工测网 surmap.com
www.SurMap.com

高等学校规划教材

工程测量

高井祥 王家贵 郑文华 葛永慧 等 编著

煤炭工业出版社

责任编辑：牟金领
封面设计：安德馨

ISBN 7-5020-1747-X
9 787502 017477 >

ISBN 7-5020-1747-X/TD17
社内编号：4518　定价：15.80元

TB22
G25

高等学校规划教材

工 程 测 量

高井祥　王家贵　郑文华　葛永慧　杜继亮　编著

A0918131

煤炭工业出版社

高等学校规划教材
工 程 测 量
高井祥 王家贵 郑文华 莫水慧 杜继亮 编著
责任编辑：牟 金 锁
*
煤炭工业出版社 出版
（北京朝阳区和平里8号 100016）
北京房山宏伟印刷厂 印刷
新华书店北京发行所 发行
*
开本 787×1092mm 1/16 印张 14 1/4
字数 338 千字 印数 1－1,600
2000 年 2 月第 1 版 2000 年 2 月第 1 次印刷
ISBN 7－5020－1747－X/TD17
社内编号 4518 定价 15.80 元
版权所有 违者必究
本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题，本社负责调换

前　言

本书是根据煤炭高校“九五”教材建设选题规划，按照在焦作工学院召开的“煤炭高校测量工程专业规划教材编写协作会议”上拟定的编写大纲编写而成的。本教材适用于测量工程专业，亦可作为有关技术人员的参考用书。

本教材的编写，本着有利于加强基础理论学习，有利于提高能力培养，有利于知识面的拓展和少而精的原则，努力做到先进性、实用性、通用性和高质量四者相统一。教材广泛吸收国内外较成熟的新技术、新仪器、新方法，覆盖面宽，内容丰富，有一定的深度。教材编写中，对所编内容力求简明扼要、深入浅出。

本教材由中国矿业大学高井祥、辽宁工程技术大学王家贵、山东矿业学院郑文华、太原理工大学葛永慧和黑龙江矿业学院杜继亮合编。其中绪论、第五、七章由郑文华编写；第一、三、四章由葛永慧编写；第二、六（部分）章由杜继亮编写；第六（部分）、十章由王家贵编写；第八、九章由高井祥编写。本书由高井祥任主编，王家贵、郑文华任副主编。高井祥对书稿做了统校工作。

本书在编写过程中，郭达志教授审阅和订正了书稿，提了许多宝贵意见；教材编写过程中，参阅了大量文献，引用了同类书刊中的一些资料；煤炭部教材规划室和煤炭工业出版社为本书的编辑出版付出了辛勤的劳动，在此，谨对上述同志以及所参阅文献资料的作者表示衷心的感谢！

本书的编写及出版过程中，编者虽做了很大努力，但书中仍会有不妥之处，恳请广大读者批评指正。

编　者

1999年7月

绪　论

一、概述

测量学是一门古老的科学，它的兴起和发展与人类征服自然、改造自然的工程建设密不可分。其发展历史可追溯到公元前14世纪，当时埃及人为划定因尼罗河水泛滥而淹没的土地边界，进行过土地边界的测定。而我国早在4千多年前夏禹治水时，就已有勘测情况的记录。工程测量学是测绘学科的一门应用科学，它是应用测绘科学的理论、仪器及方法为各类工程建设服务的测量科学。

工程测量按工程内容可分为：工业与民用建筑测量，铁路、公路测量，水利工程测量，隧道及地（水）下工程测量，管线工程测量，城市建设测量，工业测量及国防工程测量等。随着经济建设的发展及工程种类的增多，其服务领域也将更为广泛。按工程建设的程序可划分为：勘测设计阶段的工程测量、工程施工阶段的工程测量和运营管理阶段的工程测量。

在工程建设的规划设计阶段，主要的测量工作是为工程建设的规划设计提供各种比例尺的地形图、纵横断面图。另外还要进行工程水文、地质勘探的测量工作。特殊条件下还要进行地层的稳定性观测。在工程施工阶段，应根据现场的地形、工程的性质及工程计划等，建立施工控制网作为施工放样的依据。在此基础上进行施工放样，即按设计图纸要求将图纸上的建构筑物标定到实地。另外还要进行竣工测量、设备安装测量等。在工程运营管理阶段，主要的测量是变形观测，即对工程项目定期地进行位移、沉降、倾斜等观测，以便鉴定工程质量，为有关地基基础、建筑结构等科研工作提供资料，为大型设备的检测和调校提供依据。

工程测量是测量科学的一个重要分支，它是在测量学基础上发展起来的，因此它与其它测量学科的关系非常密切。工程控制网与普通控制网相比有其特点，但其基本理论、方法、观测手段、平差原理及精密仪器使用等内容却同于控制测量。此外，摄影测量也被广泛应用于工程测量。利用航测图作为线路选线设计的依据已成为行之有效的方法。近景摄影测量则可用于观测水流的形态和构筑物的变形等。由此可知，作为一个工程测量人员必须熟练掌握“测量学”、“控制测量学”、“摄影测量学”、“平差原理”等专业基础课。

工程测量是直接为工程建设服务的，因此工程测量人员应具备一定的工程建设方面的专业知识，熟悉所服务对象的作用、特点、结构、工程要求、施工程序及方法等。只有熟悉上述工程知识，才能在工作中避免盲目性。其次，应在熟练掌握测绘理论和技术的基础上，不断扩大自己的知识面，要跟上当前科学技术发展的步伐，要把大地测量、摄影测量与遥感技术、空间技术、电子计算机技术及其它基础理论有机地融为一体，使工程测量手段及方法不断得到发展。

二、工程测量的特点及展望

虽然工程测量与其它测量学科的关系非常密切，有许多共同之处，但因为工程测量是研究各项工程在规划设计、施工建设和运营管理阶段所进行的各种测量工作，因此，因施工对象、工程性质、作业程序及条件的不同，工程测量具有自身的特点。

首先是精度要求方面的不同。控制测量其精度要求和施测方法均按统一的规范与规程进行，而工程测量控制网的精度取决于工程建设的性质，一般其精度远高于测图控制网的精度。其次，工程测量具有专用的测量仪器（如变形观测中的引张线、液体静力水准仪等），并且其控制点的点位及标志的构造有其特殊之处（如倒垂线设置等）。再者工程测量较之常规测量时间性强、数据多、作业环境复杂等。

近年来，随着科学技术的迅猛发展使工程测量领域的技术发展日新月异，主要表现在以下几个方面：

（1）各类电磁波测距仪以及电子速测仪的迅速发展，为工程控制测量及施工放样提供了非常有利的条件。目前的测距仪正向着微型化、多功能、高精度、长测程及低功耗方向发展，原瑞士 Kern 厂的 ME3000、英国 COMRAD 电子仪器公司的 GEEMENSORCR204/234 高精度测距仪其标称精度达到（0.2mm±（0.2～1）$\times 10^{-6}$D）以上，可用作高精度基线测量。全站型电子速测仪则使地形测量及工业场地现状图的测绘工作向着全过程数字化、自动化方向发展。

（2）GPS 全球定位系统作为测量的一种重要手段，使测绘技术发生了划时代的革命。其高精度、全天候作业及无需通视等优点，使该项技术在工程控制、地表沉降监测、变形观测等方面得到广泛应用。世界上许多大型精密工程（如斯坦福直径为 1km 的对撞机和欧洲核子研究中心直径为 9km 的加速器等）均采用了 GPS 控制测量，并达到很高的精度。

（3）激光技术为工程中的准直测量及导向提供了方便。如激光经纬仪和激光扫平仪在机场、广场等大面积场地平整中的应用；激光准直仪应用于工业设备安装及变形观测；激光铅直仪用于高层建筑及矿山竖井的施工；激光导向仪在隧道施工中为施工机械导向等。总之，激光仪器的使用提高了工效和精度，并为施工自动化奠定了基础。

（4）电子计算机在测量中的应用，使测量工作者从测量数据的繁锁复杂的计算中解放出来，使测量优化设计、测量数据处理实现了自动化。并使测图自动化、观测数据及资料管理自动化成为现实。

另外，高精度的自动陀螺经纬仪（如德国制造的 Gyromat 型陀螺经纬仪）在地下工程中得到了广泛的应用，减少了误差的累积，提高了坑道贯通的精度。

目前，随着我国经济建设的发展，科学技术的进步，必将促进工程测量的发展，并将对工程测量提出更高的要求。因此，作为一个测量工作者应勇于探索和创新，为促进测绘事业的发展做出贡献。

第一章　工程建设中地形图的应用

第一节　地形图在工程建设各阶段的作用

地形图是进行各项工程规划、设计的主要依据。地形图能够从总体上全面地反映地面上的地物、地貌情况。通过它可以了解某地区的地面起伏、坡度变化、建筑物的相互位置、交通状况、土地利用现状、河流分布等情况。各种工程建设在工程规划、设计阶段，都必须对拟建地区的情况作系统、全面地调查，其中的一项主要内容就是地形。运用所掌握的地形图基本知识和测绘技术，可从图上取得各项工程规划、设计所需要的各种要素。在地形图上可以确定点的直角坐标、确定两点间直线的长度、计算点的高程、计算地面两点间的坡度、按预定坡度选定公路和铁路的路线、确定汇水面积、计算库容量、绘制某一特定方向的断面图、确定填挖方范围等。地形图的作用可概括为：地形图是进行工程规划、设计的重要依据之一；在不同的工程建设规划、设计中起着不同的作用；在工程建设规划、设计的不同阶段所起的作用也不同。地形图等测绘资料若要满足工程建设的需要，则应达到一定的精度要求，具有适宜的比例尺。

一、地形图在工矿企业建设中的作用

工矿企业建设是国民经济发展的主要组成部分，没有比较完整准确的地形图作为修建、扩建企业的基本技术资料，就不能实现企业的正常运转。在改建、扩建和生产管理的过程中，设计、施工的建设者和工厂的生产管理者，都必须了解掌握厂区范围地面上全部现有建筑物、构筑物、地下和架空的各种管道线路的平面位置和设计元素，以及施工场地中地物与地形的关系等详细的工业场区现状图和有关数据资料，作为工业建设、设计以及生产管理的重要依据。

在工矿企业建设的设计阶段，地形图是进行工程规划、设计的主要依据。从地形图上可以图解平面坐标和高程，进行面积、土方、坡度和距离等计算，并结合实地地形提出几种可供选择的方案，再作方案比较、筛选，选出实施的最佳方案，从而保证工程施工的合理性、经济性，克服盲目性。

每项工程的设计经过论证、审查、批准之后，即进入施工阶段。施工测量人员首先将设计的工程建筑物和选用的特征点按施工的要求通过图纸在现场标定出来，即所谓定线放样，作为施工的依据并指导施工。为此，要根据工地的地形、工程的性质及施工的组织与计划等，建立不同形式的施工控制网，作为定线放样的基础。然后，按施工的需要，采用各种不同的放样方法，将图纸上设计的内容转移到实地。

在整个建设工程完成以后，还要进行竣工测量。因为原设计意图不可能在施工中被毫无变动地体现出来。竣工测量就是使施工后的实际情况得以反映。竣工测量的主要成果是

总平面图，各种分类图、断面图以及细部坐标高程明细表。竣工总平面图编制者签字后交给使用单位存档、备用。

总之，在工矿企业建设过程中，地形图等基础资料是否正确、适用，直接影响到工矿企业的设计与施工质量，关系到能否为国家节约财富，加速企业自身的建设速度，能否为工矿企业创造良好的经营管理条件和生产环境等。

二、地形图在交通建设中的作用

一个国家、地区经济发展的速度，很大程度上取决于交通状况的方便与否。下面以铁路为例，说明地形图在道路建设规划中所起的作用。

在铁路勘测工作的最初阶段，必须搜集有关设计线路所必须的技术资料，其中包括各种比例尺的地形图和各种勘测设计资料，作为方案研究的依据。方案研究的工作是利用已掌握的资料，在1∶50000或1∶100000的地形图上选出几种可能的线路方案，经过全面的分析比较，提出对主要方案的初步意见。为了保证线路设计方案可行，需要对线路的局部重点地段作现场调查研究，掌握确切的第一手资料，以使方案决策建立在切合实际的基础上。

方案基本确定以后，要进行初测，所谓初测是对方案研究中认为可行的几条线路或一条主要线路，结合现场的实际情况，进行选点、标出线路方向。然后根据实地上选定的点进行控制测量，测出各点的平面位置和高程，再以这些控制点为图根控制，测绘比例尺为1∶5000～1∶2000的带状地形图，或者叫初测地形图，以供编制初步设计使用。初步设计是由设计人员在初测带状地形图上，研究路线的方向、坡度、曲线半径以及工程的难易程度，在图上绘出所选定的线路（线路转弯处用适宜半径的曲线连接）。之后，即可编制主要线路方案的详细纵断面图及有关线路比较方案的简明纵断面图，最后进行工程费用概预算。

在道路施工之前，首先要熟悉设计图纸和施工现场的情况，在了解设计意图及测量精度要求的基础上，掌握道路中线位置和各种附属构筑物位置的施测数据及相互关系。

目前，用航测方法进行线路勘测仍被广泛采用，并在不断完善之中。航测选线的准备工作包括：首先根据勘测地区的地形图、控制资料以及航测象片等，在室内利用1∶50000的地形图进行方案研究，建立立体模型，再在立体模型上选线，研究方案，提出线路方案。然后，在地形图上确定测图和摄影范围。一般地，为了保证测图的质量，防止造成漏测现象，摄影范围要比测图范围略大些。摄影范围确定以后，根据测区的地形、地貌，测图的比例尺和测图方法等选择适当的航摄仪。在摄影范围和航摄比例尺选定以后，就可以进行设计工作和航摄工作了。

三、地形图在水利工程建设中的作用

我国水利资源丰富，河川纵横，湖泊星罗棋布，蕴藏着极为丰富的水利资源。除了内陆河川的水利资源外，蜿蜒数千里的海岸线也蕴藏着大量的湖汐资源。由于水资源在地区、年际和年内分配的不均匀性，造成枯水季节出现干旱，洪水季节又因水量过多而发生洪涝灾害。因此，修建水利工程十分重要。

对于一条河流或者一个水系工程而言，首先应该有一个综合开发利用的全面规划，对全流域提出规划报告，确定河流的梯级开发方案，拟定开发方式，合理选择枢纽位置分布，

使其在发电、航运、防洪、灌溉等方面都能发挥最大效益。这时应具有1∶50000或1∶100000的整个流域范围内的地形图。在进行梯级布置时，不仅需要在地形图上确定合适的位置，而且还应确定各水库的正常高水位；不仅要考虑国民经济发展的因素，还要考虑流域地形、地质、水文等一系列其它因素。

对于水利枢纽工程，水库是重要组成部分。而水库建设的核心是大坝建设。为此，可利用地形图并结合实地地形与地质条件进行选择比较，选择坝址。为进行水库设计，一般要利用1∶10000～1∶50000的地形图。主要为了解决下列问题：确定各级水库的淹没情况及库容；计算有效库容；设计库岸的防护工程等；确定沿库岸落入临时淹没或永久漫没地区的城镇、工矿企业及重要耕地，并拟定防护工程措施；设计航道及码头的位置；选定库底清理、居民迁移以及交通线改建等的规划。当然，在解决这些问题时对地形图的要求不完全一致。如计算库容需要在整个库区范围内精度统一的地形图，防护工程等则需要在局部有较高精度的地形资料。在初步设计阶段，除了库区的地形图以外，在可能布设枢纽工程的地区，还应有比例尺为1∶10000～1∶25000的地形图，以便正确选择坝轴线的位置。坝轴线选定以后，在规划的枢纽布设地区，通过比例尺为1∶2000或1∶5000的地形图研究下面几类建筑物的布设方案：①主要的永久性建筑物及灌溉渠道、船闸等；②水利枢纽各种临时性的辅助建筑物——围堰、临时性土方工程用的取沙坑；③长期及临时性的铁路专用线、公路及输电线；④施工期间所需要的附属企业；⑤长期或临时的工人住宅区等。

在施工阶段，要有1∶1000的地形图，以便详细设计工程各部分的位置尺寸。对于港口码头的设计，一般分为两个阶段：在初步设计阶段，需要比例尺为1∶1000～1∶2000的陆上地形图与水下地形图，以便布设仓库、码头及其它的附属建筑物，并进行方案比较；在施工阶段，宜采用1∶500或1∶1000的地形图，以便进一步精确确定建筑物的位置与尺寸。

对于其它工程，如桥梁、山岭隧道、建筑工程等，在初始规划阶段都必须以地形图为基础依据，根据实地地形地貌选择合适的几种方案，经比较选出其中最有价值的一种。在施工阶段也要以地形图为基础，进行放样定线工作。竣工以后同样要进行竣工测绘及质量分析。

第二节　地形图比例尺的选择

地形图能够比较全面地反映地面上的地物和地貌，但不同比例尺地形图所提供地物、地貌资料的详尽程度不同，因而工程建设中不同的工程以及同一工程的不同建设阶段对地形图比例尺的需求是不同的。工程建设中所用的大部分都属于大比例尺地形图，常用的比例尺有1∶5000、1∶2000、1∶1000和1∶500，极个别的情况下应用1∶200的地形图。

在工矿企业建设选用地形图时，一个重要的工作是确定选用多大比例尺的地形图。由于工矿企业在设计时，总平面图的设计是在地形图上进行的，所以地形图除了按一定的要求表示出地面现有的情况外，同时还要能在图上进行未来工程的设计。一方面能表示出设计中所要考虑的最小地形地物，另一方面还要能绘出设计的最小建筑物、构筑物，且保持图纸清晰，而又不致于负荷过大。我国在制定为工矿企业的设计所进行的测图工作的规范时，各勘测单位曾对设计单位的用图情况作了广泛的调查。调查结果认为，在施工设计阶段的测图比例尺是1∶1000，在地形复杂或厂区建筑密度很大的地区，局部施测1∶500比

例尺的地形图。在初步设计阶段，基本上采用1∶2000比例尺地形图。以下介绍决定用图比例尺的主要因素。

一、按平面位置的精度要求决定用图比例尺

由于地形图比例尺的不同，地形图上地物点的位置精度也不同，所以任何一项建设工程都需要根据自己的实际情况选用最佳比例尺的地形图。一般认为，对于较平坦地区（0°～6°），在1∶1000比例尺的复制地形图上，重要地物点平面位置的中误差为图上±0.66mm，次要地物点平面位置的中误差为图上±0.84mm。对于1∶2000和1∶5000比例尺的复制地形图，地物点平面位置的中误差均未超过图上±1mm。只从平面位置的点位精度要求出发，选用1∶1000比例尺已能满足要求。若由于设计对象比较小且密集，用1∶1000比例尺地形图对设计对象表达不清晰时，也可选用1∶500比例尺的地形图。

二、按高程精度要求决定用图比例尺

地形图上用等高线表示地面起伏，等高线表示地貌的精度和详细程度与等高距的大小密切相关。等高距越小，表示出的地貌也就越细致，越真实；相反，等高距越大，就难以客观、真实地反映地貌。如果等高距过小，而实地坡度很大，则绘出的等高线就会过密而使图纸混乱不清晰，所以地形图的等高距是根据地形的坡度陡缓和比例尺的大小来决定的，即一定比例尺的地形图所采用的等高距代表一定的高程精度，等高距越小，高程比例尺越精确，测图成本也越高，因此在选用高程比例尺时，要同时兼顾精度和成本，不能只为追求高精度而使成本太高，更不能为了追求低成本而忽略精度。为此，在工程建设过程中，可根据等高距选用地形图。一般认为，对于较平坦地区（0°～6°），在1∶1000比例尺的地形图上（基本等高距1m）等高线高程中误差为±0.15m，在1∶2000比例尺的地形图上（基本等高距2m）等高线高程中误差为±0.27m，在1∶5000比例尺的地形图上（基本等高距5m）等高线高程中误差为±0.63m。

三、从点位和高程两者结合选用一定比例尺的地形图

在实际的工程建设中，有些工程在选用地形图比例尺时，既要从平面位置的点位精度来考虑选择地形图的比例尺，又要从高程精度来考虑地形图的等高距。比如，当设计修建上山铁路时，要求线路横向偏差即平面点位中误差不超过±1m，由于铁路的最大坡限为5‰，即1000m长可以上升或下降5m，要求高程中误差不超过其1/10。所用的地形图必须同时满足这两个限差的要求。因此，当考虑横向偏差的要求选用1∶1000的比例尺时，其点位中误差就可以满足不超过（图上）±1mm的要求；在高山地区考虑精度的要求时，应采用0.5m等高距，对应这种等高距，应当选用1∶500比例尺的地形图。

有些工程对高程的精度要求比较高，一般比例尺虽然能满足平面位置的精度要求，但却不能同时满足高程精度的要求，这时一般需要采取综合措施来解决。例如城市建设中的下水管道设计，对于平面位置的精度要求不高，一般用1∶1000比例尺的地形图就可以满足精度要求。一般下水管道要求能自流自清，而在城市内又不可能将坡度放得很大，其坡度要求一般为0.04%，若以容许误差不超过其1/10来计算，则每公里容许高程误差为4cm。城市坡度一般在6°以内，则要求地形图等高距仅为12cm，这样小的等高距，施测起

来是极端困难的，而且造价太高又不容易满足精度。因此，一般采用分别解决的办法，即不在地形图上做过高要求，而是在线路平面位置设计好以后沿线路作中线水准测量，按图根水准测量的精度则可满足要求。

为保证在地形图上正确布置建筑物的位置、确定施工坐标系原点位置和图解距离等的精度，要求图上平面点位误差不大于±1mm。为了保证确定地面最小坡度的正确性，保证主要设计高程中误差不大于 0.15～0.18m；而对于比例尺为 1∶1000 的图纸来说，其平面点位的误差基本上在±1mm 以内，高程中误差为±0.15m（对于平坦地区而言），所以一般工矿企业的设计，多数使用比例尺为 1∶1000 的地形图。多数设计单位认为这种比例尺的地形图是用于设计的“通用地形图”。

四、工程建设规划设计的不同阶段采用不同比例尺的地形图

在工程建设的不同阶段，采用地形图的比例尺也有所不同。比如在水利枢纽工程的初步设计阶段，在可能布设枢纽工程的全部地区，应有比例尺为 1∶10000 或 1∶25000 的地形图，以便正确选择坝轴线位置。坝轴线选定以后，在这个选定的枢纽布设地区，要用到 1∶2000 或 1∶5000 比例尺地形图，以研究各部分的位置与尺寸。对于港口码头的设计，一般也是分为两个阶段：在初步设计阶段，需要比例尺为 1∶1000 或 1∶2000 的陆上地形图与水下地形图，以便布置铁路、仓库、码头、防波堤及其它的一些附属建筑物，并且进行方案比较；在施工设计阶段应采用 1∶500 或 1∶1000 比例尺的地形图，以便进一步精确确定建筑物的位置与尺寸。对于各种工程在不同的设计阶段，随着设计的深入，测图范围愈来愈小，地形图比例尺要求越来越大。一般来说，最终要求的测图比例尺为 1∶1000 或 1∶500。

五、场地现状条件与面积大小决定用图比例尺

按照设计工作进行的情况，场地的现状条件大致可分为两类。第一类是平坦地区新建的工业场地，第二类是山地或丘陵地区的工业场地及扩建的工业场地。如果一张地形图因为场地面积较大而比例尺较小，使各等高线遮盖了其它主要的地物要素而使地形图面目全非，那么这张地形图也是毫无用处。

对于第一类工业场地，一般都可以根据生产工艺流程及运输条件，按设计规程进行布置，设计中所用地形图的比例尺，可依设计的内容和建筑密度来定。

对于第二类工业场地则有所不同，它是在满足生产工艺流程和运输条件的前提下，各种工程建筑物的布置在很大程度上取决于地形条件。也就是说，总平面图设计受场地现状条件影响比较大。在这种情况下，对地形图比例尺的选择，除了考虑设计内容与建筑密度以外，还要保证精度要求。

对于扩建或改建的工业场地，在地形图上除了用符合表示的内容外，还要求测出主要地物点（如厂房、车间、地下管线）的解析坐标和高程，并标在图上。如果图的比例尺较小，在使用时，设计的线条往往会遮盖了地形图的要素和注记，给设计工作带来不便。在这种情况下，往往需要 1∶500 比例尺的地形图。比如在化工厂设计中，由于管网多，为使管线和建筑物位置在图上易于表示，要求放大比例尺，也有的小型轻工业工厂面积小，用比例尺为 1∶1000 的地形图不方便，也要求施测更大比例尺地形图。但这时主要是为使用

方便，其实对地形图精度要求并不高。在这种情况下，可以按1∶1000比例尺地形图的要求，施测1∶500比例尺的地形图。总之，在一些复杂的密集的厂区，之所以提出1∶500比例尺测图，主要是为了解决负荷问题，而其精度可以放宽，但不低于1∶1000比例尺测图的精度。在选择比例尺时，工业场地面积的大小，也是考虑的因素，在保证图面清晰的前提下，一般总是尽可能选择比较小的比例尺。

由于工矿企业性质不同，工程规模大小不同，场地现状条件也不一样，设计中所用地形图的比例尺也就不可能完全相同（表1－1）。选择地表图比例尺还要受到其它因素的影响：①显示要素的清晰度；②成本高低（比例尺越大，成本越高）；③地形图数据与有关地形图的相互关系；④图幅大小；⑤其它客观因素，如显示要素的数量和特征、地形特征及采用的等高距等。

表1－1　各种工程不同设计阶段的测图比例尺

工程项目及区域 \ 测图比例尺 \ 设计阶段		规划设计	初步设计	施工设计
水利工程	全流域	1∶100000～1∶50000		
	水库区		1∶10000～1∶50000	
	排灌区		1∶10000（局部典型设计用1∶5000）	
	坝段区		1∶5000～1∶10000	
	防护工程、坝址、闸址、渠道及溢洪道			1∶1000～1∶5000
	隧洞和涵管进出口、调压井、厂房			1∶500～1∶1000
	铁路、公路、渠道、隧洞、堤线		1∶2000～1∶10000	
	地质测绘		与地质图同	
工矿企业	小厂（10hm²以下）	一次测出	1∶500	
	一般厂（10～30hm²）	一次测出	1∶500或1∶1000	
	中型矿	一次测出	1∶1000～1∶2000	
	大型矿		1∶2000～1∶5000	1∶1000局部1∶500
港口工程		1∶5000～1∶10000	1∶1000～1∶2000	1∶500～1∶1000
铁路线路		1∶50000～1∶100000	1∶2000～1∶5000	
城市建设		1∶5000～1∶10000	1∶1000～1∶2000	1∶500
桥梁	桥址比较方案	1∶10000～1∶50000		
	桥渡位置图		大河1∶10000 中河1∶5000	
	桥址地形图		大河1∶10000 中河1∶1000～1∶2000	1∶5000 1∶1000～1∶2000
地下工程	山岭隧道			洞口　竖井处 1∶500～1∶1000
	城市地铁		1∶2000～1∶5000 1∶500（车站，进口大厅，竖井，明挖施工区）	1∶500带状地形图（带宽决定于地铁深度与地质条件）

第三节　电子地图在工程规划设计中的作用

随着计算机科学的飞速发展，计算机处理信息的能力愈来愈强。电子地图以及载于各种媒体上的规模不等的空间数据库逐渐取代了传统地图的主导地位而成为地理信息在社会生活中表现和交流的主要形式，并逐步显示出其价值。在我国的一些省、市已明确规定所进行的各种地形图的测绘要以矢量数据方式提供，上海等城市已建立了自己的电子地图，并提供给有关单位使用。

电子地图可简单地表述为将地图以一定的数据方式储存在计算机中，需要时可进行调用或输出的系统。地图一般以栅格数据结构，或者矢量数据结构或矢量栅格一体化数据结构方式储存在地图数据库中。

一、栅格数据与矢量数据的概念

(1) 栅格数据的概念。将制图区域的平面表象（图象）按一定的分解力作行和列的规则划分，则形成一个栅格列阵，其中每个栅格也称为“象元”或“象素”，根据所表示的表象信息，各个象元可用不同的“灰度值”来表示，并认为每个象元是内部一致的基本单元，由平面表象对应位置上象元灰度值所组成的矩阵形式的数据就是栅格数据。

(2) 矢量数据的概念。从几何上说，空间目标可以划分为点、线、面、体四种基本类型。在图面上的点、线、面实体，可以用采样点 x、y 坐标对表达：

点：(X, Y)

线：(X_1, Y_1)，(X_2, Y_2)，… (X_n, Y_n)

面：(X_1, Y_1)，(X_2, Y_2)，… (X_n, Y_n)

对于面状地物而言，最末一点的坐标与第一点的坐标相等。矢量数据结构直接以取样点坐标为基础，尽可能将目标表示得精确无误。

(3) 栅格数据与矢量数据的获取。栅格数据主要是通过遥感手段得到的数字图象再对图象扫描得到，或由矢量数据转换获得。矢量数据主要是通过外业测量（即全野外数字测图）求得，或由栅格形式的空间数据转换获得，也可利用现有地图跟踪数字化得到。

二、电子地图在工程规划设计中的应用

电子地图系统对其所管理的地图数据库的地图数据可方便地进行输入、存储、检索、更新、删除、输出、管理等。传统的地形图主要存在如下缺陷：①原始数据必须大大压缩或归并才能使地图清晰易读，因此许多局部细节被综合、损失掉；②极为精细地描绘复杂的制图内容对于手工操作太困难；③地图分幅的限制使某些用户感兴趣的部分位于图幅接边处，使分析工作不便进行；④一旦数据表示成图后，再要从图上恢复某些数据以便与其它一些空间数据组合分析，往往难以实现，且费用很高；⑤印刷的地图是静态的，要在图上描绘的制图单元内作进一步增删或定量分析往往很困难。

电子地图克服了绘制在纸上的传统地形图的缺陷，应用灵活与方便是传统纸介质地形图无法相比的。电子地图在工程规划、设计应用中具有如下特点：①它可提供各种比例尺的地形图，满足不同工程规划、设计的不同阶段的使用；②可以在计算机屏幕上直接进行

各种工程建筑物与构筑物的设计，进而输出各种图纸，在很大程度上提高了工作效率；③它既能从总体上提供地面上的地物、地貌情况，又能提供所需地面上的局部细节，甚至提供立体图；④它可对不同的要素分层显示和输出，方便地对建筑物与构筑物的相互位置、交通情况、河流水利分布等许多方面进行单独的显示、编辑和输出；⑤它可精确地给出特定点的直角坐标、确定两点间直线的长度、计算点的高程、计算地面两点间的坡度、确定汇水面积、计算库容量、计算填挖方范围等。

电子地图与绘制在纸上的传统地形图相比具有独特的优越性，电子地图已在各项工程规划、设计的各阶段中得到了广泛的应用，如城市规划、工矿企业的改建与扩建等。随着计算机软件、硬件的迅猛发展，绘制在纸上的传统地形图将被电子地图所代替。

第二章　工程施工测设的基本方法及精度分析

第一节　概　　述

施工测设的基本工作内容，就是依据建筑物的设计，按照施工的需要，以一定的精度将建筑物的位置、形状、大小及高程，在实地标定出来。测设工作的过程与测定相反，它是为建筑物的施工做准备，没有测设工作，一切建筑物的施工就不能正确地、有计划地进行。因此，施工测量人员必须具有较全面的知识、较高的技能和高度的责任心。

施工测设工作与工程质量及施工进度有密切的联系。测量人员必须对建筑物设计的内容、性质及对测量工作的精度要求有全面了解，掌握图纸上轴线的位置、尺寸和高程数据，了解工程施工的工序及过程，掌握施工场地的变动情况，以便于制订施工测设的方案。

建筑物施工测设包括平面位置和高程测设。根据测设的手段，平面位置测设经常采用的方法有极坐标法、直角坐标法、前方交会法及方向线交会法等，通过测设角度或距离的基本手段将建筑物的轴线交点或端点在实地标定出来。根据测设的程序，平面位置测设分为直接测设法和归化测设法。直接测设法是用某种方法多次测设取平均位置来提高精度。归化测设法是将直接测设法所标定的点作为过渡点，通过测量过渡点与已知点间的几何关系，计算过渡点实际位置与正确位置的差值，通过差值对过渡点进行改正（归化）。归化法所采用的差值，可以是距离归化值，也可以是坐标归化值。高程测设采用的方法以水准法为主。

综上所述，施工测设过程中的最基本的工作是角度、距离及高程的测设，测设的过程就是取得这些数据，并在实地标定出来。

施工测设方法应结合工程的不同性质、施工场地和仪器等方面的实际情况灵活地选择。例如：角度前方交会法在全面展开的施工场地上受施工影响小，有利于提高测设速度；对于水中桥墩的定位，传统的方法也是以角度前方交会及方向交会为主；在工业场地上利用建筑方格网主要采用坐标法或方向交会法。目前，随着全站仪的广泛使用，利用极坐标法测设点位的方法被越来越广泛地采用。

在点的平面位置测设过程中，角度测设是通过已知的角值、角顶点及角的一个已知方向，标定角的另一个方向，即测设点的方向。由于仪器对中误差，使得测设点位既有对中误差的平移量，又有由于对中误差而产生方向误差引起的旋转量，如图 2－1 所示。而角度测量过程中的对中误差影响的是角度观测值，如图 2－2：

$$\beta=\beta'-\delta_1-\delta_2$$

距离与高程的观测或测设也有类似的情况，观测误差影响距离与高程的观测值；而测设误差影响测设点的位置。

本章以下各节将对施工测设的几种常用方法进行详细介绍，并分析其精度，及各种误

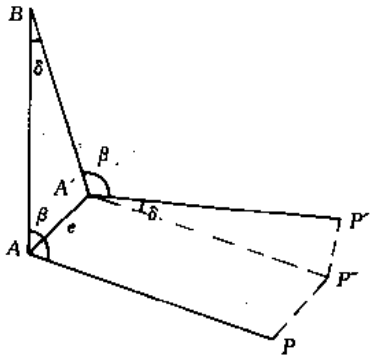


图 2－1

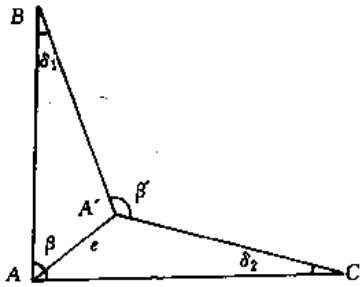


图 2－2

差对测设结果的影响。

第二节　极坐标法与直角坐标法

一、极坐标法

此方法采用数学中的极坐标原理，在取得极角（水平角）和极距（测设距离）后，以控制点为极点，已知方向为极轴，通过极角和极距的测设将待测设点标定在地面。如图 2－3 中，A、B 为已知控制点，P 点的设计坐标也已知，测设 P 点平面位置的数据可以由下列公式计算得到：

由

$$\tan\alpha_{AP}=\frac{Y_P-Y_A}{X_P-X_A} \tag{2-1}$$

计算 α_{AP}，同理计算 α_{AB}，则角

$$\beta=\alpha_{AP}-\alpha_{AB} \tag{2-2}$$

由

$$S=\frac{Y_P-Y_A}{\sin\alpha_{AP}}=\frac{X_P-X_A}{\cos\alpha_{AP}} \tag{2-3}$$

计算 A 点与 P 点间距离，利用式（2－3）的两个式子可以检核计算的正确性。

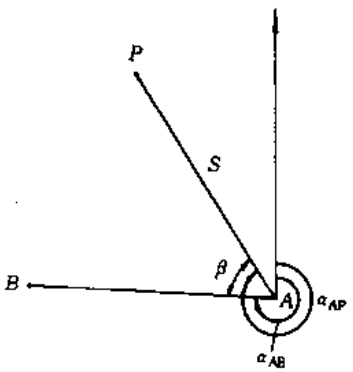


图 2－3

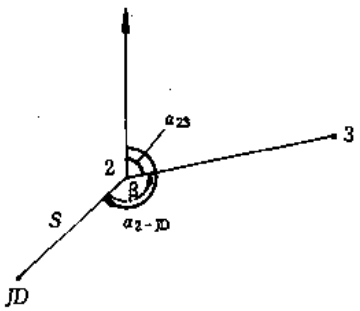


图 2－4

如图 2—4 中，JD 点设计坐标值 $x_1=7588.59\text{m}$，$y_1=7738.35\text{m}$。已知点 2 的坐标值 $x_2=7589.79\text{m}$，$y_2=7741.63\text{m}$；3 点的已知坐标值 $x_3=7615.28\text{m}$，$y_3=7816.92\text{m}$。按式（2—1）及式（2—2）计算得：

$$\alpha_{2-JD}=249°54'17''$$

$$\alpha_{2-3}=71°71'46''$$

$$\beta=178°36'31''$$

按式（2—3）计算得 $S_{2-JD}=3.49\text{m}$。极角 β 及极距 S 算出后，即可测设 JD 点：

将经纬仪安置于 2 号控制点，后视 3 号控制点，用正倒镜平均（直接测设法），顺时针测设 β 角，得到 $2-JD$ 的方向；在 $2-JD$ 方向上测设极距 S_{2-JD} 得到一点 JD。

如要求测设点位精度较高，精确测定 β 及 S_{2-JD}，计算归化量，对 JD 点进行归化修正。

二、直角坐标法

此方法是依据一条由已知控制点连成的控制线测设点位的。采用此方法所需的测设数据是待测设点到控制线的垂距，以及垂足到控制线上某已知点的距离。直角坐标法在具有建筑方格网的场地上应用较多，因为此方法距离计算比较简单。

如图 2—5 中，A、B 为已知控制点，P 点设计坐标已知，测设 P 点平面位置的数据可以由下列公式计算得到：

$$S_1=(x_P-x_A)\cdot\sin\alpha-(y_P-y_A)\cdot\cos\alpha \qquad (2-4)$$

$$S_2=(x_P-x_A)\cdot\cos\alpha+(y_P-y_A)\cdot\sin\alpha \qquad (2-5)$$

P 点的设计坐标为 $x_P=2331.594\text{m}$，$y_P=5214.327\text{m}$；A 点坐标为 $x_A=2568.741\text{m}$，$y_A=5213.918\text{m}$；直线 AB 的方位角 $\alpha=180°58'10''$。利用式（2—4）及式（2—5）计算得 $S_1=4.423\text{m}$，$S_2=237.206\text{m}$。

直角坐标法测设 P 点时，将经纬仪安置于 A 点，并瞄准 B 点，沿视线方向测设距离 S_2，得到 Q 点；将经纬仪移到 Q 点，后视 A 点顺时针测设 90°角，沿视线方向测设距离 S_1，即得到 P 点。

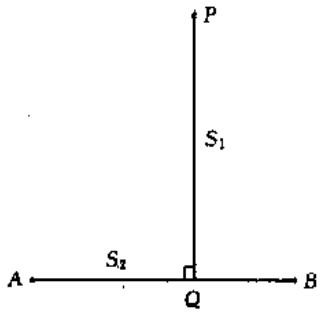


图 2-5

在实际测设工作中，采用直角坐标法而不采用极坐标法的基本原因在于：极坐标法不便于测设极距，用直角坐标法计算 S_1、S_2 比较简单。例如在有施工矩形控制网的场地上，控制点连线平行于施工坐标轴，S_1 及 S_2 的计算则为坐标差计算。

第三节　交　会　法

一、前方交会法

前方交会法是点位测设中常用的一种方法。此方法原理是利用在控制点上测设已知方向与待测设点方向夹角得到待测设点方向，两个以上方向相交得到点位，测设元素为水平角。如图 2—6，利用已知点 A、B 的坐标及待测设点 P 的设计坐标可以求得测设元素。

$$\tan\alpha_{AP}=\frac{y_P-y_A}{x_P-x_A}$$

$$\tan\alpha_{BP}=\frac{y_P-y_B}{x_P-x_B}$$

$$\beta_1=\alpha_{AB}-\alpha_{AP}$$

$$\beta_2=\alpha_{BP}-\alpha_{BA}$$

在实际测设时，为了检核及提高测设的精度，交会方向应不少于三个。由于交会方向一般不会交于一点，而出现示误三角形（多边形），在精度满足要求的条件下，取示误三角形（多边形）的重心作为测设点位。对于桥墩中心及水工轴线点测设，为了满足较高精度测设点位的要求，可以采用归化测设法。根据实际情况，可以采用坐标归化法，也可以采用角差归化法。所谓坐标归化法，是在初步测设过渡点的基础上，精确测定过渡点的坐标，以坐标归化值对过渡点进行修正。而角差归化法是通过对点间距离进行修正而归化点位。如图 2－7 所示，根据 A、B、C 三个已知点及 P 点设计坐标计算测设元素 β_1、β_2、β_3，测设得到过渡点 P' 点位置。在已知点上安置经纬仪测定所测设的角度，三个角度分别为 β'_1、β'_2 及 β'_3，利用式（2－6），与已知角度比较计算得角差 $\Delta\beta_1$、$\Delta\beta_2$、$\Delta\beta_3$。由式（2－7）计算出由于某方向的角差而引起点位横向误差 ΔS_i：

$$\Delta\beta_i=\beta'_i-\beta_i \tag{2-6}$$

$$\Delta S_i=\frac{S_i}{\rho}\cdot\Delta\beta_i \tag{2-7}$$

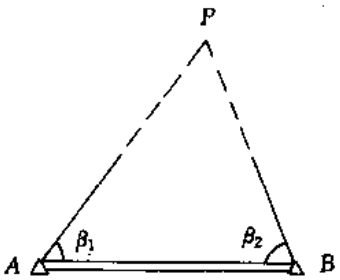


图 2－6

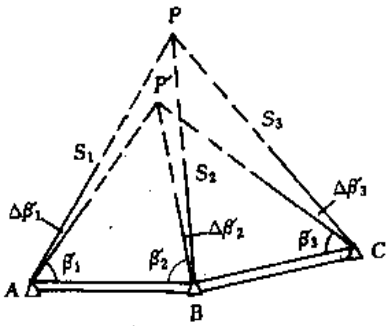


图 2－7

式中 S_i 为已知点至待设点间的距离；$\frac{S_i}{\rho}$为不同半径每秒角所对应的弧长，称为秒差，单位为 cm/（″）（或 mm/（″））。由已知点至待设点的距离按式（2－7）可分别算得 P' 点在垂直于三个交会方向的横向归化值。由于 ΔS_i 与 S_i 相比很小，所以将 ΔS_i 看成与交会方向垂直的距离，$\Delta\beta_i$ 的正负决定移动方向。在图 2－8 中，首先在图纸上绘出交会 P 点的三条直线（实线），再按横向归化值的大小及方向绘出该三条直线的平行线（虚线），这三条虚线的交点就是 P' 点的位置。但由于测量误差影响，三条虚线一般不会相交于 P' 点，而是形成一个示误三角形，取该三角形的重心作为 P' 点的位置。

测设时的一般做法不是现场按式（2－7）计算 ΔS_i。由于各边长 S_i 是已知的，在测设前预先按式（2－7）绘制一条斜率为 S_i/ρ 的直线，称为秒差图（图 2－9～图 2－11）。利用秒

差图根据测得的角差 $\Delta\beta_i$，可以很快查得 ΔS_i 的数值。具体方法是：各测站同时复测后视方向与交会方向角度，计算 $\Delta\beta_i$，并在秒差图上查得 ΔS_i，报给待测设点上测量员；由待测设点上测量员绘出图 2—8（定位图），交会出 P' 点，确定 P' 相对于 P 点位置关系并将实地 P' 点移向 P 点。

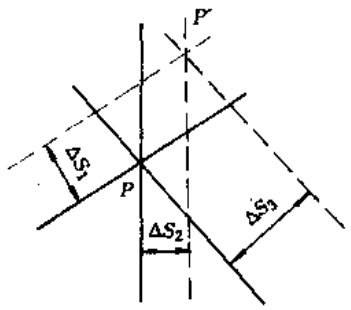


图 2—8

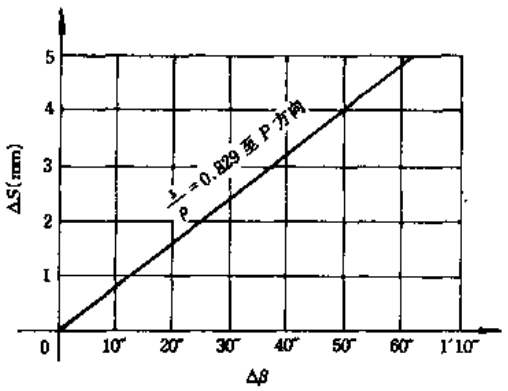


图 2—9　A 点秒差图

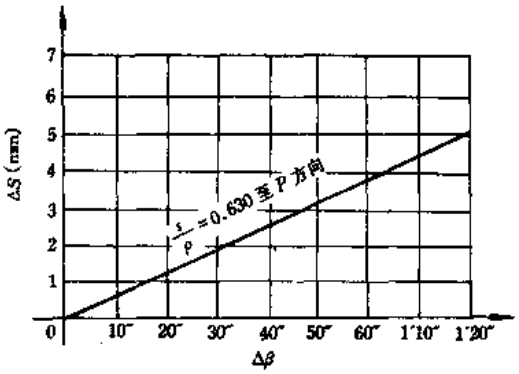


图 2—10　B 点秒差图

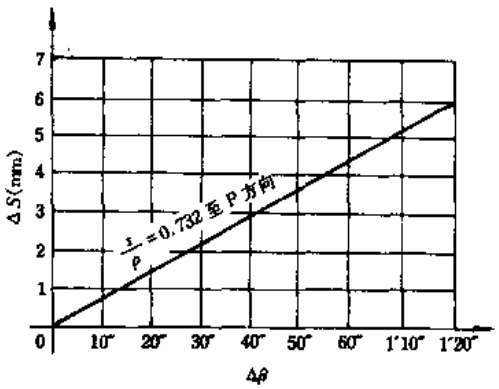


图 2—11　C 点秒差图

表 2—1　控制点及待设点坐标

点号	x（m）	y（m）	点号	x（m）	y（m）
A	54.641	−148.267	C	51.863	122.609
B	10.000	0.000	P	141.000	0.000

例如图 2—7 中，控制点 A、B、C 及待设点 P 的坐标列于表 2—1 中，利用已知坐标反算各交会角：

$\alpha_{AB}=106°04'13.7''$　　$S_{AB}=154.842$m

$\alpha_{BC}=251°08'53.9''$　　$S_{BC}=129.559$m

$\alpha_{AP}=60°04'13.7''$　　$S_1=171.083$m

$\alpha_{BP}=0°00'00.0''$　　$S_2=130.000$m

$\alpha_{CP}=305°42'37.2''$　　$S_3=151.000m$

$\beta_1=46°41'08.9''$　　$\beta_2=73°14'37.4''$　　$\beta_3=54°33'43.3''$

$S_1/\rho=0.829mm/('')$　　$S_2/\rho=0.630mm/('')$　　$S_3/\rho=0.732mm/('')$

二、方向交会法

在工业厂房柱基础测设或道路定线测量中测设中线转角点等工作中，常采用两个方向线相交定出被测设点位置，即方向交会法。如图 2－12 所示，N_1、N_2、T_1、T_2 为某工业场地的厂房矩形控制网角点，被测设的 P 点为某柱子的轴线交点，为了测设 P 点，先在矩形网的边上量距，确定定向点 A、B、C、D 位置。再分别在 A、C 点上安置经纬仪瞄准相对应的 B、D 点形成方向线 $A-B$ 及 $C-D$，两条方向线交点即为所要测设的 P 点。

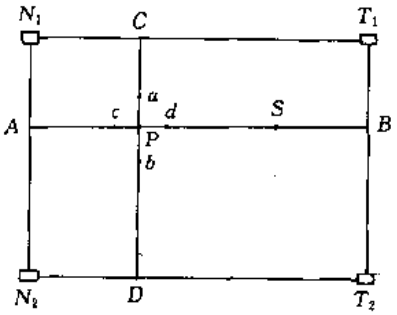


图 2－12

当方向线两端点不通视，或不便于安置仪器时，则可采用正倒镜投点法（见本章第四节）将仪器安置于能够与两端通视的方向线某点上，例如图 2－12 中 S 点，瞄准方向线端点所设立的标志取得方向线，按上述方法交会出 P 点。

在基础施工时，不但要测设出轴线交点 P 的位置，而且还要测设基础纵横轴线，以便于指导基坑开挖等工作。因此，采用方向交会法测设时，不但要用两方向线交会出轴线交点 P 的位置，还要沿轴线方向在基础开挖边线范围以外设置 a、b 及 c、d 点（俗称骑马桩）以便测设基坑的轮廓。

在施工过程中，方向线如果不只使用一次，为了便于保存方向线端点，就要在端点上设立专用标志或浇筑观测墩。

有时因施工场地条件的限制，不能将一条方向线的两个端点都设立标志，可以设立一个端点标志和一个后视方向。在使用方向线时，将经纬仪安置于有标志的端点，瞄准后视方向测设一个固定角度，即可得到所需方向线。

三、轴线交会法

轴线交会法定点较广泛地应用于水利枢纽工程中，它采用侧方交会原理测定被测设点的坐标，进而采用归化法修正被测设点位置。如图 2－13 中，A、B、C、D 为控制点，P_0 为 AB 轴线上的待测设点。建立图 2－13 所示的施工坐标系，取 $A-B$ 轴线方向为 y 轴，垂直于 $A-B$ 轴线的坐标轴为 x 轴，$A-B$ 轴线的坐标为 x_0。首先在 $A-B$ 轴线上测设出 P 点，再将经纬仪安置于 P 点，并测定 P 到 C、D 方向线与 $A-B$ 轴线夹角 α_1、α_2，则可计算出 P 点坐标。

由 C 点求得：

$$\begin{aligned} x_p' &= x_0 \\ y_p' &= y_C \pm |\Delta x_1| \cdot \cot\alpha_1 \end{aligned} \qquad (2-8)$$

其中　　$|\Delta x_1| = |x_C - x_0|$

由 D 点求得：

$$\begin{aligned} x_P'' &= x_0 \\ y_P'' &= y_D \pm |\Delta x_2| \cdot \cot\alpha_2 \end{aligned} \tag{2-9}$$

其中 $$|\Delta x_2| = |x_D - x_0|$$

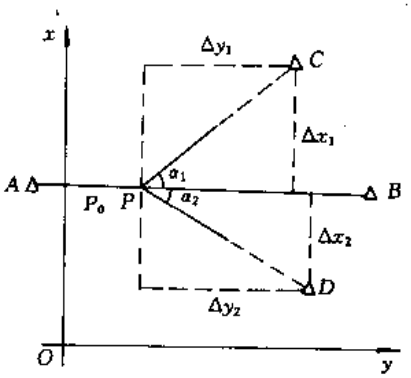


图 2—13

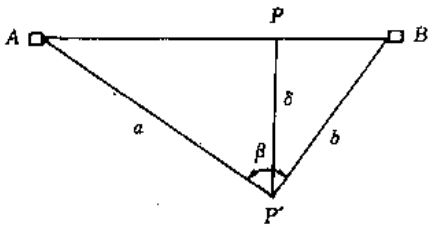


图 2—14

取两组坐标平均值：

$$x_P = x_0$$

$$y_P = \frac{y_P' + y_P''}{2}$$

即为 P 点坐标值。根据 P_0（x_0，y_0）的设计坐标可将 P 点归化至 P_0 点。为在现场作业中提高效率，需把待测设点安置于轴线方向线上，可以采用以下方法进行测设：如图 2—14 所示，将经纬仪安置于待测设点 P 附近靠近轴线的位置，测定其与轴线两端点间夹角与 180°的差值。利用此角差值及仪器到轴线端点的距离计算仪器偏离轴线位移量 δ $\left(\delta = \dfrac{a \cdot b}{(a+b) \cdot \rho} \cdot (\beta - 180°)\right)$，即可将仪器移到轴线上。

四、后方交会法

后方交会法是在靠近待测设点设立过渡插点，按后方交会法测定其坐标，再利用此过渡点采用归化法或极坐标法测设待测设点。

目前，利用全站仪测设逐渐普及。因为全站仪不仅具有测角、量距功能，还配有电子手簿，可以存贮观测数据，并且备有各种应用程序以快速地完成各种计算。由于全站仪的特点，在利用它进行后方交会法时，宜采用边角联合后方交会（又称“自由设站法”），这不但给施工测设带来极大的灵活性和方便性，而且有利于保证精度。

边角联合后方交会测定点位的原理如图 2—15 所示，xOy 为施工坐标系，N 为控制点，P 为自由设站控制点，$x'Py'$ 是以 P 为原点，以仪器度盘零方向为 x' 轴的

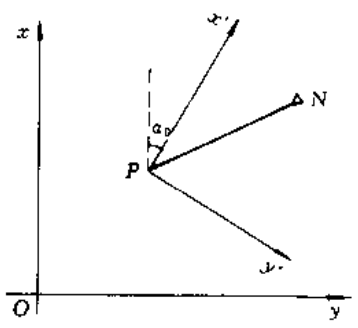


图 2—15

局部坐标系，α_0 为 x 与 x' 方向间夹角，当在 P 点观测 P 点到 N 点的水平距离 S_N 和水平方向 α_N 后，即可在 $x'Py'$ 坐标系中求出 N 点的局部坐标：

$$x'_N=S_N\cdot\cos\alpha_N$$

$$y'_N=S_N\cdot\sin\alpha_N$$

由坐标转换原理可得：

$$x_N=x_p+k\cdot\cos\alpha_0\cdot x'_N-k\cdot\sin\alpha_0\cdot y'_N$$

$$y_N=y_p+k\cdot\sin\alpha_0\cdot x'_N+k\cdot\cos\alpha_0\cdot y'_N$$

式中 k 为局部坐标系与施工坐标系长度比系数，令 $c=k\cdot\cos\alpha_0$，$d=k\cdot\sin\alpha_0$，则：

$$\begin{aligned}x_N&=x_p+c\cdot x'_N-d\cdot y'_N\\ y_N&=y_p+d\cdot x'_N+c\cdot y'_N\end{aligned}\qquad(2-10)$$

式中 x_N、y_N、x'_N、y'_N 已知，x_p、y_p、c、d 为未知数。当观测控制点数多于两个时，存在多余观测，按间接平差原理求得四个未知数，即：

$$c=\frac{[yy']+[xx']-\frac{1}{n}([x][x']+[y][y'])}{[x'x']+[y'y']-\frac{1}{n}([x'][x']+[y'][y'])}$$

$$d=\frac{[yx']+[xy']-\frac{1}{n}([y][x']+[x][y'])}{[x'x']+[y'y']-\frac{1}{n}([x'][x']+[y'][y'])}$$

$$x_p=\frac{[x]}{n}-c\cdot\frac{[x']}{n}+d\cdot\frac{[y']}{n}$$

$$y_p=\frac{[y]}{n}-c\cdot\frac{[y']}{n}-d\cdot\frac{[x']}{n}$$

以上计算在电子手簿中直接完成。为了计算 P 点精度，需计算控制点在两坐标系中坐标差值，并依下式计算 P 点精度：

$$M_P=\sqrt{2}\cdot\sqrt{\frac{[(x'-x)^2]+[(y'-y)^2]}{2n-4}}\qquad(2-11)$$

式中 x'，y' 为局部坐标；x、y 为施工坐标；n 为控制点数。

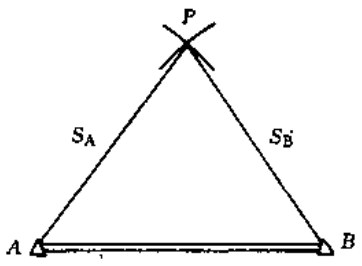


图 2－16

使用边角联合后方交会法测设时，依以上原理测定自由控制点坐标只是测设工作的第一步。为确定待测设点位置，还需输入待测设点的点号、坐标到电子手簿中。电子手簿计算出极坐标法测设点位的元素（距离、方向），进而采用极坐标法测设点位。由此可以看出：该方法只需在便于安置仪器的任意位置安置一次仪器，即可测设出若干个细部点。

五、距离交会法

距离交会法也称交线法，适用于待测设点到控制点的距离不超过测尺的长度，并且便于量距的地方。如图 2－16 所示，P 为待测设点，先根据 P

点设计坐标和控制点 A、B 的已知坐标反算距离 S_A、S_B。测设时在 A、B 两点上分别以长度 S_A、S_B 为半径作圆弧，两圆弧的交点即为需测设的点。

第四节　正倒镜投点法

采用方向交会法测设点位时，为了得到方向线，需要将经纬仪安置于方向线的一个端点上，而在另一个端点上设立观测标志，经纬仪瞄准标志后，即得到所需方向线。有时，由于方向线端点间有影响通视的障碍物，或两端点无法安置仪器，只能设立标志，此时，需将仪器安置于方向线上的某点，瞄准端点上设立的标志进行测设。当采用轴线交会法测设点位时，需要在轴线端点安置仪器，瞄准另一端点，在轴线方向线上的待测设点附近测设临时测站点，再将仪器移到测站点上测设待测设点。由于轴线端点距待测设点相对较远，不仅测设时间长，而且需占用较多人员，作业效率较低。解决以上问题的方法，是采用正倒镜投点法。

正倒镜投点法是将经纬仪安置于已知方向线的竖直面上（以下称方向线），再进行待测设点的测设。此方法的原理是利用相似三角形的边长比例关系确定仪器偏离方向线的距离，利用偏离距离将仪器归化到已知方向线上。其操作方法如下：

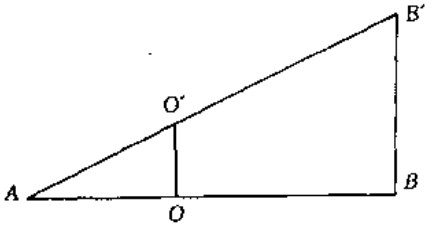


图 2—17

如图 2—17 所示，A—B 为已知方向线，O 为欲安置仪器点。首先目视选择距 O 点较近的 O' 点安置仪器，瞄准后视端点 A，倒转望远镜，视线指向 B' 点，而不是指向 B 点，在 B' 所在位置作标志。量取 BB' 距离，即可根据 AB、AO 的距离，求出 OO' 的距离：

$$OO' = \frac{BB' \cdot AO}{AB}$$

将仪器由 O' 向 A—B 方向线移动距离 OO'，即可将仪器安置于 O 点。当 OO' 距离较大时，需移动仪器脚架；当 OO' 较小时，可松动仪器中心连结螺旋移动仪器。以上过程需重复进行几次才能将仪器准确地置于 O 点上。

在实际工作中，经纬仪存在视准轴不垂直于横轴，或横轴不垂直于竖轴的误差，导致在一个镜位倒转望远镜前后视线不在同一竖直面内，即不能直接指示 B' 方向。克服仪器误差影响可采用图 2—18 所示方法：将仪器安置于 O' 点，用盘左、盘右两次瞄准 A 点，倒转

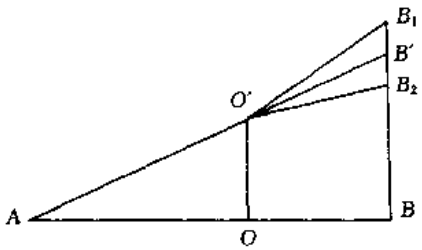


图 2—18

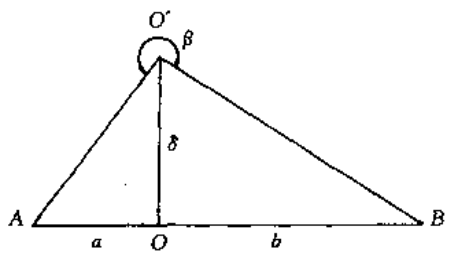


图 2—19

望远镜分别得到 B_1 及 B_2 两个方向，取平均即为 B'，即可得到直线 $AO'B'$。

在有些情况下，O 点到两端点的距离 $AO=a$，$BO=b$ 是已知的，此时，只要将仪器安置于 O' 点，观测 AO' 与 BO' 的夹角 β，即可计算出 O' 偏离方向线 AB 的距离 δ（图 2—19）：

$$\delta=\frac{a\cdot b}{(a+b)\cdot\rho}\cdot(\beta-180°)$$

第五节　平面测设方法的精度分析

一、极坐标法的精度分析

根据极坐标测设点位的过程，能够看出此方法测设的误差包括以下几种：将仪器安置于控制点上的对中误差；测设角度的误差；测设距离的误差；将待测设点标定在实地的标定误差。下面分别讨论各种误差对点位测设的影响。

1. 仪器对中误差对测设点位的影响

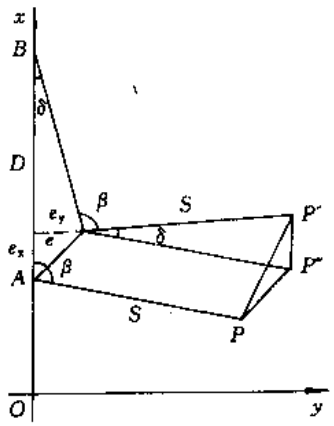


图 2—20

如图 2—20 所示，A 为测站点，$A-B$ 为后视方向。取 AB 的平行方向为 x 轴建立坐标系，仪器的对中误差 e 在两坐标轴方向的分量为 e_x 及 e_y。对中误差 e 使待测设点位由正确的位置 P 移到 P'。由图中看出，PP' 可以看作平移量 PP'' 和转动量 $P''P'$ 的合成。PP'' 的大小和方向与 e 相同；$P''P'$ 是由于 e_y 产生 δ 角而引起的，其大小为 $\frac{e_y}{D}\cdot S$，它在两坐标轴方向上的分量分别为：

$$e'_x=\frac{e_y}{D}\cdot S\cdot\sin\beta$$

$$e'_y=\frac{e_y}{D}\cdot S\cdot\cos\beta$$

对中误差 e 使 P 点产生的总位移在两坐标轴方向上的分量分别为：

$$E_x=e_x+e_y\cdot\sin\beta/D$$

$$E_y=e_y+e_y\cdot\cos\beta/D$$

总位移量为：

$$E^2=E_x^2+E_y^2$$

$$=e_x^2+2e_x\frac{S}{D}e_y\sin\beta+\left(\frac{S}{D}e_y\sin\beta\right)^2+e_y^2+2e_y\frac{S}{D}e_y\cos\beta+\left(\frac{S}{D}e_y\cos\beta\right)^2$$

$$=e^2+\left(\frac{S}{D}e_y\right)^2+2\frac{S}{D}e_xe_y\sin\beta+2\frac{S}{D}e_y^2\cos\beta$$

根据中误差定义得：

$$m_E^2=\frac{[E^2]}{n}=\frac{[e^2]}{n}+\frac{S}{D}\left(\frac{S}{D}+2\cos\beta\right)\frac{[e_y^2]}{n}+2\frac{S}{D}\sin\beta\frac{[e_xe_y]}{n}$$

因　　$\frac{[e_xe_y]}{n}\approx0$

$$m_E^2=m_e^2+\frac{S}{D}\left(\frac{S}{D}+2\cos\beta\right)m_{ey}^2 \tag{2-12}$$

由公式看出：m_e 随着 $\frac{S}{D}$ 及 m_{ey} 的增大而增大，因此在测设时应尽量用较远的控制点作为后视方向，并且注意减小与后视方向垂直的对中误差。

2. 测设角度误差对测设点位的影响

$$m_{角}=\frac{m_\beta}{\rho}S \tag{2-13}$$

3. 测设距离误差对点位的影响

当采用钢尺量距时：　　$m_S=\mu\cdot S$ 　　(2-14)

当采用光电测距仪量距时：　　$m_S=a+b\cdot S$

式中　μ 为钢尺长度误差系数；a、b 分别为测距仪的固定误差和比例误差系数。

4. 实地标定点位误差为 τ

以上四种影响的综合影响为：

$$m^2=m_e^2+\frac{S}{D}\left(\frac{S}{D}+2\cos\beta\right)m_{e_y}^2+\left(\frac{S}{D}\right)^2m_\beta^2+\mu^2S^2+\tau^2 \tag{2-15}$$

由公式可以看出：当对中误差一定，且 S/D 较小时，影响点位测设精度的显著因素是角度测设及距离测设误差。

采用直角坐标法进行点位测设，可以认为是极坐标法的特殊情况，即需测设后视距离，且测设角度为 90°角。此时测设点位的误差为：

$$m^2=m_e^2+\frac{S}{D}\left(\frac{S}{D}+2\cos\beta\right)m_{e_y}^2+\left(\frac{S}{D}\right)^2m_\beta^2+\mu^2S^2+\mu^2D^2+\tau^2 \tag{2-16}$$

二、前方交会法的精度分析

由前方交会法测设点位的过程可以看出：影响点位测设精度的主要因素是在测站点上安置仪器的对中误差对待测设点点位影响、测设交会角度的误差、将待测设点标定在地面上的标定误差等。前方交会的不同做法所得点位的精度是不同的，两点前方交会直接测设点位与三方向交会取示误差，三角形重心定点的精度都决定于角度测设的精度，而采用初步测设后重新测定点位坐标，再改正到设计位置，或用角差归化法，则主要决定于角度测量的精度。

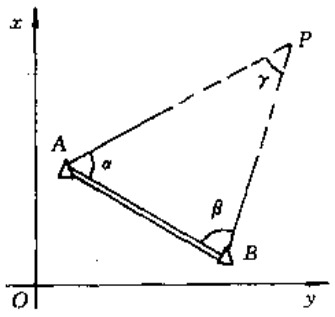


图 2-21

如图 2-21 所示，控制点 B 与 P 间坐标增量为：

$$\Delta x=a\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma}\cos\alpha_{BP}=a\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma}\cos\ (\alpha_{BA}+\beta)$$

$$\Delta y=a\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma}\sin\alpha_{BP}=a\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma}\sin\ (\alpha_{BA}+\beta)$$

对上式求全微分，得：

$$\mathrm{d}\Delta x=a\cos\alpha_{BP}\frac{\sin\beta}{\sin^2\gamma}\mathrm{d}\alpha+a\sin\alpha\frac{\cos\ (\alpha_{BP}+\gamma)}{\sin^2\gamma}\mathrm{d}\beta$$

$$d\Delta y=a\sin\alpha_{BP}\frac{\sin\beta}{\sin^2\gamma}d\alpha+a\sin\alpha\frac{\sin(\alpha_{BP}+\gamma)}{\sin^2\gamma}d\beta$$

利用误差传播定律，得：

$$m_{\Delta x}^2=a^2\cos^2\alpha_{BP}\frac{\sin^2\beta}{\sin^4\gamma}\frac{m_\alpha^2}{\rho^2}+a^2\sin^2\alpha\frac{\cos^2(\alpha_{BP}+\gamma)}{\sin^4\gamma}\frac{m_\beta^2}{\rho^2}$$

$$m_{\Delta y}^2=a^2\sin^2\alpha_{BP}\frac{\sin^2\beta}{\sin^4\gamma}\frac{m_\alpha^2}{\rho^2}+a^2\sin^2\alpha\frac{\sin^2(\alpha_{BP}+\gamma)}{\sin^4\gamma}\frac{m_\beta^2}{\rho^2}$$

$$m_p^2=m_{xp}^2+m_{yp}^2=m_{\Delta x}^2+m_{\Delta y}^2=\frac{a^2}{\rho^2\sin^4\gamma}(\sin^2\alpha\cdot m_\beta^2+\sin^2\beta\cdot m_\alpha^2)$$

$$\text{当 } m_\alpha=m_\beta=m \text{ 时，} m_p=\frac{m\cdot a}{\rho\cdot\sin^2\gamma}\sqrt{\sin^2\alpha+\sin^2\beta} \qquad (2-17)$$

以下对交会图形与测设精度的关系进一步分析。式（2－17）中，当测设角度中误差 m、起始边长 a 及交会角 γ 为定值时，m_p 的大小决定于 $\sin^2\alpha+\sin^2\beta$

令　　$y=\sin^2\alpha+\sin^2\beta$

因　　$\beta=180°-\alpha-\gamma$

则　　$y=\sin^2\alpha+\sin^2(\alpha+\gamma)$

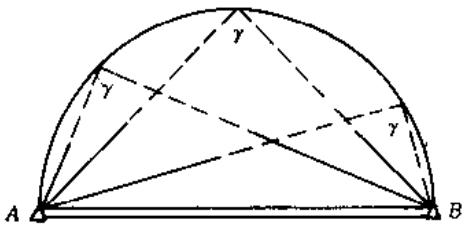


图 2－22

当 y 有最小值时，m_p 也最小。取 y 的一阶导数并等于零，即：

$$\frac{dy}{d\alpha}=2\sin\alpha\cos\alpha+2\sin(\alpha+\gamma)\cos(\alpha+\gamma)=0$$

化简得：　$\sin2\alpha+\sin2(\alpha+\gamma)=0$

即：　$\sin2\alpha-\sin2\beta=0$

所以　$\alpha=\beta$

由上述分析说明，当交会角为定值时（图 2－22），采用对称交会（即 $\alpha=\beta$）测设点位精度最高。当对称交会时，交会角 γ 将随着测设角度变化而变化，m_0 也随之变化。下面分析 m_p 取值与 γ 角变化的关系。因 $\alpha=\beta$，$\gamma=180°-2\alpha$，所以式（2－17）变为：

$$m_p=\frac{m\cdot a}{\rho}\cdot\frac{\sqrt{2}\sin\alpha}{\sin^2\gamma}$$

$$=\frac{m\cdot a}{\rho}\cdot\frac{\sqrt{2}\cos\frac{\alpha}{2}}{2\sin\frac{\gamma}{2}\cos\frac{\gamma}{2}\sin\gamma}$$

$$=\frac{m\cdot a}{\sqrt{2}\rho}\cdot\frac{1}{\sin\frac{\gamma}{2}\sin\gamma} \qquad (2-18)$$

当 $\sin\frac{\gamma}{2}\cdot\sin\gamma$ 有最大值时，m_p 为最小，设 $Z=\sin\frac{\gamma}{2}\cdot\sin\gamma$，取 Z 的一阶导数并等于零，即：

$$\frac{dz}{d\gamma}=\frac{1}{2}\cos\frac{\gamma}{2}\sin\gamma+\sin\frac{\gamma}{2}\cos\gamma=0$$

整理得：

$$\sin\frac{\gamma}{2}\cdot\left(3\cos\frac{\gamma}{2}-1\right)=0$$

解得：　　$\gamma=109°28'$

所以当交会角 $\gamma=109°28'$ 时，Z 取最大值，m_p 最小，即测设点位精度最高。

三、方向交会法的精度分析

采用方向交会法测设点位受到设置定向点误差、设置方向线误差及标定测设点位的误差等影响，以下分别进行分析。

1. 设置定向点的误差（又称端点误差）产生的影响 $m_{\mu 1}$

设置定向点误差的大小决定于设置方法。在工业建筑场地，这种误差由量测距离的方法决定。如图 2－23 所示，设置定向点 1 及 1′的误差分别为 μ_a 与 μ_b。μ_a 使待测设点产生位移 x_a，μ_b 使待测设点产生位移 x_b，即：

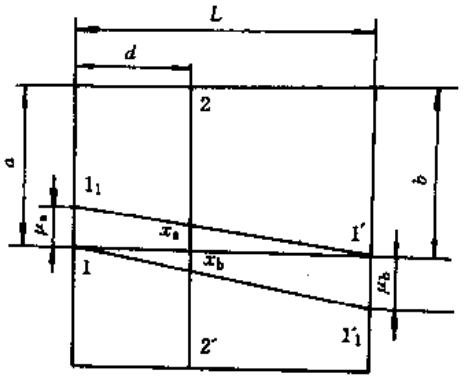


图 2－23

$$x_a=\mu_a\cdot\frac{(L-d)}{L}$$

$$x_b=\mu_b\cdot\frac{d}{L}$$

两定向点误差的综合影响为：

$$m_{\mu_1}=\pm\sqrt{x_a^2+x_b^2}=\pm\sqrt{\frac{\mu_a^2}{L^2}(L-d)^2+\frac{\mu_b^2}{L^2}d^2}\qquad(2-19)$$

2. 用仪器设置方向线误差的影响 m_{d1}

1）仪器对中误差为 m_e

设仪器对中误差为 e，使安置仪器点位由 1 点（图 2－24）移至 1_1 点。此时方向线实际设置于 $1_1-1'$ 的方向，使待测设点位由 P 点偏移至 P' 点，偏移量为 Δe，由相似三角形可知：

$$\frac{\Delta e}{L-d}=\frac{1-1'_1}{L}\approx\frac{e\cdot\cos\theta}{L}$$

故　　$$\Delta e=\frac{(L-d)\ e}{L}\cos\theta=e\left(1-\frac{d}{L}\right)\cos\theta$$

由于 θ 的随机变化区间为 0～2π，Δe 也将随之变化，取其均方值，得：

$$m_e^2=e^2\left(1-\frac{d}{L}\right)^2\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi}\cos^2\theta\mathrm{d}\theta=\frac{e^2}{2}\left(1-\frac{d}{L}\right)^2$$

即：　　$$m_e=\pm\frac{e}{\sqrt{2}}\left(1-\frac{d}{L}\right)\qquad(2-20)$$

2）目标偏心影响 m'_e

如图 2－25 所示，将仪器安置于 1 点，照准点为 1′点，但由于目标偏心而瞄准 $1'_1$，目标偏心 e′引起待测设点产生偏 $\Delta e'$，由图可知：

$$\Delta e'=e'\frac{d}{L}\cos\theta'$$

则　　$$m_e'^2=\left(\frac{e'\cdot d}{L}\right)^2\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi}\cos^2\theta'\mathrm{d}\theta'$$

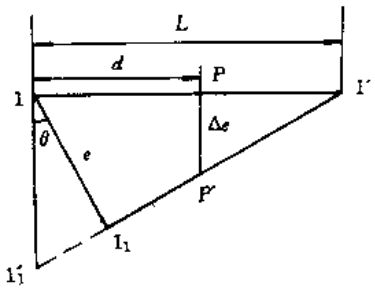


图 2—24

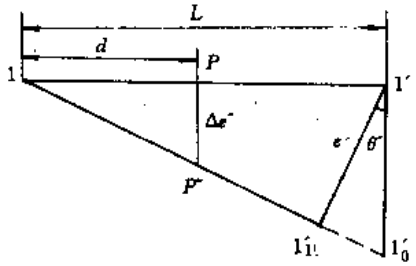


图 2—25

故
$$m'_e=\pm\frac{e'}{\sqrt{2}}\cdot\frac{d}{L} \tag{2—21}$$

设函数 $y=m_e^2+m_e'^2$，以 d 为自变量对 y 求导，令导数为零，当 $d=L/(1+(m'_e/m_e)^2)$ 时 y 有极小值。如果 $m_e>m'_e$，则 $d>L/2$。因此，当仪器对中误差大于目标偏心误差时，仪器应安置在距待测设点远的一个端点上。

3）瞄准误差影响 m_s。

瞄准中误差一般取 $60''/V$（V 为望远镜的放大率）。用方向交会法测设时需要照准两次，即在测站点上分别瞄准方向线另一端的目标点及待测设点。两次瞄准误差对待测设点位影响分别为：

$$m_{s_1}=\frac{60''}{V\cdot\rho}L\,\frac{d}{L}=\frac{60''}{V\cdot\rho}d$$

$$m_{s_2}=\frac{60''}{V\cdot\rho}d$$

故
$$m_s=\pm\sqrt{m_{s_1}^2+m_{s_2}^2}=\pm\frac{60''\sqrt{2}}{V\cdot\rho}\cdot d \tag{2—22}$$

4）望远镜重新调焦的影响 m_f

根据研究结果，望远镜在 10～200m 范围内重新调焦时，视准轴的变化可达到 1″～2″，当待测设点距仪器的距离为 100m 时，调焦影响 m_f 为 0.5～1mm。

综合以上四种因素，用经纬仪设置方向线的误差对待测设点位的影响为：

$$m_{d_1}=\pm\sqrt{m_e^2+m'^2_e+m_s^2+m_f^2} \tag{2—23}$$

由于设置定向点误差和设置方向线误差引起方向线 1—1′误差对待测设点 P 的影响为：

$$m_1=\pm\sqrt{m_{\mu_1}^2+m_{d_1}^2} \tag{2—24}$$

同理，由于另一方向线 2—2′误差引起 P 点误差为：

$$m_2=\pm\sqrt{m_{\mu_2}^2+m_{d_2}^2} \tag{2—25}$$

3. 标定待测设点位的误差 τ

标定误差 τ 的大小取决于采用的方法。在工业与民用建筑中，通常采用铁钎或铁钉标定点位，标定误差约为 1.5～2mm。

用方向交会法测设点位的总误差为：

$$m=\pm\sqrt{m_1^2+m_2^2+\tau^2} \tag{2-26}$$

四、轴线交会法的精度分析

轴线交会法测设点位是首先初步在轴线上的设计位置附近测设过渡点，再测定过渡点到两已知控制点方向与轴线方向夹角，计算实际的坐标值（y 坐标），进而将过渡点位归化到设计点位。由测设过程可以看出，此方法测设点位精度主要受以下几方面的影响：过渡点到轴线方向的垂直误差（x 方向），这种误差与测设过渡点的方法有关；测定角度的误差对坐标（y 坐标）影响；由过渡点偏离轴线方向而引起的角度观测误差（测站偏心）。下面分别分析这几方面误差。

1. 过渡点偏离轴线方向误差

当采用仪器安置于轴线端点测设过渡点时，此项误差由方向线误差确定，即设置方向线误差和标定点位误差的综合影响；如果仪器直接安置于过渡点上，此项误差则由正倒镜投点误差确定。

2. 角度测定误差对坐标影响

将式（2－8）中计算 y 坐标公式取微分，求得（略去控制点坐标误差）：

$$\mathrm{d}y_p=\pm|\Delta x|\cdot(-\csc^2\alpha)\cdot\mathrm{d}\alpha=\mp S_{CP}\cdot\csc\alpha\cdot\mathrm{d}\alpha$$

则可得到 m_{y_p}：

$$m_{y_p}=\pm S_{CP}\cdot\csc\alpha\cdot\frac{m_\alpha}{\rho}$$

由于实际观测两个控制点方向与轴线方向间夹角（图 2－13），P 点 y 坐标由两次观测取平均值得到，所以 P 点坐标中误差近似地表达为：

$$m_{y_p}=\pm\frac{1}{\sqrt{2}}S_{CP}\cdot\csc\alpha\cdot\frac{m_\alpha}{\rho} \tag{2-27}$$

此关系式表达了 m_{y_p} 与 S_{CP}、α 大小及测角精度之间的关系。

3. 过渡点偏离轴线对角度观测的影响

如图 2－26 所示，过渡点应测设在轴线 $A-B$ 方向上，但由于测量误差的影响，过渡点 P 并不在轴线上而是偏移到 P'，产生误差 δ_x，使得观测角 α'_1 及 α'_2 为偏心观测值。由图可以看出：

$$\alpha'_1=\alpha_1-\varepsilon+\varepsilon_1=\alpha_1-\Delta\alpha_1$$

$$\alpha'_2=\alpha_2+\varepsilon-\varepsilon_2=\alpha_2+\Delta\alpha_2$$

式中 $\Delta\alpha_1=\varepsilon-\varepsilon_1$，$\Delta\alpha_2=\varepsilon+\varepsilon_2$。

控制点 C，D 位于轴线 $A-B$ 两侧，且近似于对称时，$\varepsilon_1\approx\varepsilon_2$，即 $\Delta\alpha_1\approx\Delta\alpha_2$。此情况下，由两次求得 P 点 y 坐标取平均后，δ_x 对 α_1、α_2 的影响可基本抵销而忽略不计。

五、距离交会法的精度分析

如图 2－27 所示，距离测设误差与角度误差的关系为：

$$\frac{m_{S_B}}{S_A}=\frac{m_{\beta_1}}{\rho},\quad\frac{m_{S_A}}{S_B}=\frac{m_{\beta_2}}{\rho}$$

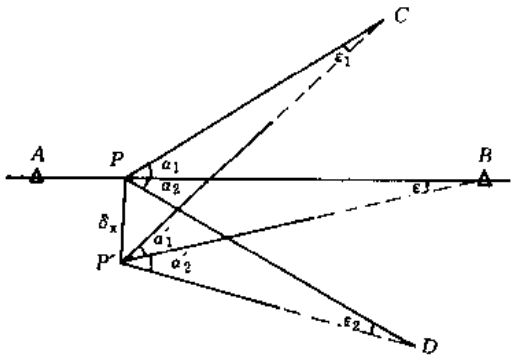


图 2－26

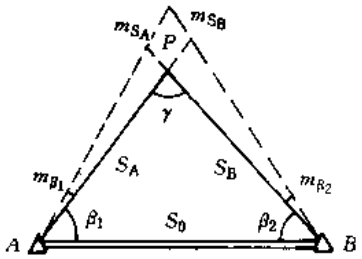


图 2－27

已知三角形面积 F 的计算公式：

$$F=\frac{1}{2}S_A S_B \sin\gamma=\sqrt{P\ (P-S_A)\ (P-S_B)\ (P-S_0)}$$

其中

$$P=\frac{1}{2}\ (S_A+S_B+S_0)$$

且 $\sin\beta_1=\dfrac{\sin\gamma}{S_0}S_B$，$\sin\beta_2=\dfrac{\sin\gamma}{S_0}S_A$，

由前方交会精度公式得：

$$m_p^2=S_0^2\frac{\sin^2\beta m_{\beta 2}^2}{\sin^4\gamma}\frac{}{\rho^2}+S_0^2\frac{\sin^2\beta m_{\beta 1}^2}{\sin^4\gamma}\frac{}{\rho^2}$$

$$=\frac{1}{\sin^2\gamma}\ (m_{SA}^2+m_{SB}^2)=\frac{S_A^2S_B^2}{4F^2}\ (m_{SA}^2+m_{SB}^2)$$

当 $\dfrac{m_{SA}}{S_A}=\dfrac{m_{SB}}{S_B}=\dfrac{m_S}{S}$ 时：

$$m_p^2=\left(\frac{m_S}{S}\right)^2\frac{S_A^2S_B^2}{4F^2}\ (S_A^2+S_B^2)$$

$$m_p=\pm\frac{m_S}{S}\frac{S_AS_B}{2F}\sqrt{S_A^2+S_B^2}\qquad(2-28)$$

六、正倒镜投点法的精度分析

由正倒镜投点法操作程序可知，此方法的精度主要受两方面误差的影响：仪器安置偏离方向线上产生的横向误差，及测设待测点的误差。

1. 仪器安置误差 m'_j

将仪器安置于方向线上作为测站的过程中，受各项误差影响而产生横向偏移。这些误差主要包括：方向线端点误差、目标偏心误差、照准误差等方面。测站的横向偏移又影响测设点位的精度。下面依次分析产生测站横向误差的各种原因。

1）方向线端点误差影响 m_μ

设端点的中误差分别为 μ_a 及 μ_b，依据式（2－19），参照图 2－23 可得：

$$m_\mu^2=\frac{\mu_a^2}{L^2}\ (L-d)^2+\frac{\mu_b^2}{L^2}d^2$$

2）目标偏心误差影响 $m_{\Delta e}$

如图 2－28 所示，方向线两端点 1、1′的目标偏心分别为 e_1 及 e'_1，则：

$$m_{\Delta e}^2=m_1^2+m'^2_1=\frac{m_{e_1}^2}{2}\left(\frac{L-d}{L}\right)^2+\frac{m'^2_{e_1}}{2}\left(\frac{d}{L}\right)^2$$

3）照准误差的影响 m'_V

由于仪器的照准误差，照准 1、1′的误差分别为 $y_a=\frac{60''}{V\cdot\rho}d$ 及 $y_b=\frac{60''}{V\cdot\rho}(L-d)$。参照图 2－28，仪器没有照准 1、1′，而是照准 1_1 及 $1'_1$，则仪器安置于 O_1 点。测站位置为：

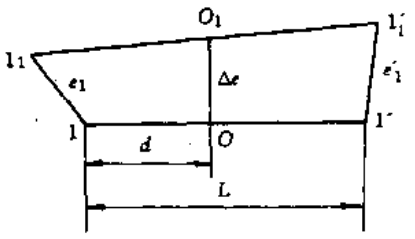


图 2－28

$$y'_0=\frac{1}{L}\left[y_a\cdot(L-d)+y_b\cdot d\right]$$

则：

$$m'^2_V=2\left(\frac{60''}{V\cdot\rho}\right)^2\frac{d^2\ (L-d)^2}{L^2}$$

综合以上三种误差影响，仪器的安置误差为：

$$m'_j=\pm\sqrt{m_\mu^2+m_{\Delta e}^2+m'^2_V}\qquad(2-29)$$

2. 测设待设点的误差 m

仪器安置于 O_1 点上，后视 1 点，测设 P 点的误差与在端点设站测设点位误差原理相同，主要包括：

1）端点误差及仪器安置误差的影响 m_q

如图 2－29 所示，仪器置于 O_1 点，后视 1 点，对 P 点的精度影响为 m_q：

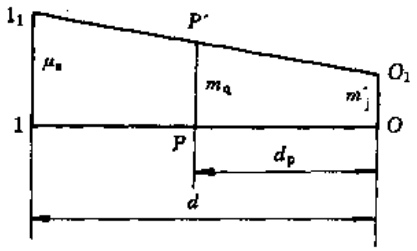


图 2－29

$$m_q^2=\left(\frac{d_p}{d}\right)^2\mu_a^2+\left(\frac{d-d_p}{d}\right)^2m'^2_j$$

2）目标偏心误差的影响 m_p

$$m_p^2=\frac{m_{e1}^2}{2}\left(\frac{d_p}{d}\right)^2$$

3）照准误差的影响 m_V

由 O_1 点照准 1 点及 P 点的误差对测设点位精度的影响为：

$$m_V^2=\left(\frac{60''\cdot\sqrt{2}}{V\cdot\rho}\right)^2d_p^2$$

4）标定误差 τ

在工业建设施工场地上，一般采用铁钎或铁钉标定点位，标定误差约 1～2mm。

综合以上四个方面影响，采用正倒镜投点法测设点位的横向精度为：

$$m^2=m_q^2+m_p^2+m_V^2+\tau^2\qquad(2-30)$$

第六节　高程测设方法

测设已知高程是在地面上根据水准点的高程，测设出设计高程的标志，作为施工中掌握高程的依据。测设已知高程在工程中应用极为广泛，例如道路中心设计高程测设、管道工程中坡度的测设、建筑物室内地坪设计高程的测设等均属此项工作。为了测设工作需要，应以必要的精度将高程引测到施工场地上，建立临时水准点。临时水准点要相对稳定，以

便于保存和测设。临时水准点的密度应满足设立一个测站即可测设设计高程的要求。

如图 2－30 所示，A 为后视水准点，欲在 P 点处测设高程 H_P。高程测设的基本方法为：

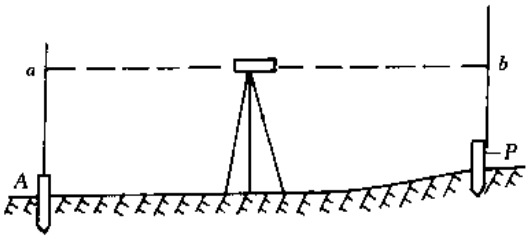


图 2－30

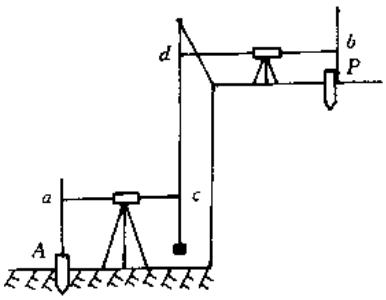


图 2－31

(1) 安置仪器，后视水准尺读数 a，根据水准点 A 的高程 H_A，求出仪器高 $H_i=H_A+a$。

(2) 计算欲测设高程点的“应读前视读数” b：

$$b=H_i-H_P \tag{2-31}$$

(3) 前视水准尺使其读数照准 b，尺底标示即为设计高程 H_P 的位置。

当测设高程的精度要求较高时，需要用性能较好的水准仪、缩短视距长度、应用较精密的水准尺，以较高的观测精度建立高程控制网。

当设计高程 H_P 与水准点高程 H_A 相差较大时，计算得“应读前视读数”较大，不能利用水准尺直接读取前视应读数，如图 2－31 所示。欲测设高程位于基槽底部或建筑物高层，则采用两台水准仪和悬挂钢卷尺进行测设。当钢卷尺零点在下端时，设计高程点 P 上前视读数为：

$$b=H_A+(a+d-c)-H_P \tag{2-32}$$

第三章　施工测量控制网的建立

第一节　施工测量控制网的用途和特点

一、施工测量控制网的用途

工程项目经勘测、设计、批准后进入施工阶段。这时，首先要将所设计的建筑物、构筑物，按照施工的要求在现场标定出来（即所谓测设），作为实地施工的依据。为此，要根据工地的地形、工程的性质及施工的组织与计划等，建立不同形式的施工控制网，作为测设的基础，然后再按照施工的需要，采用上一章介绍的测设方法，将图纸上所设计的内容转移到实地，完成工程建设的测设工作。

在勘测阶段所建立的控制网，其目的是为测图和施工服务，一般不能满足施工放样要求，因此需要重新建立施工测量控制网。从测量精度上来说，测图控制网的精度要求是按测图比例尺大小确定的，而施工测量控制网则需要根据工程建设的性质来决定，一般要高于测图控制网。因此，为了进行施工放样测量，必须建立施工测量控制网，以保证各个建筑物、构筑物的测设精度。

施工测量控制网是为工程建筑物的施工放样服务的，因此设计施工测量控制网必须考虑：①工程建筑物对放样精度的要求；②放样的程序与方法；③点位的保存与恢复。

二、施工测量控制网的特点

一般来说，施工测量控制网与测图控制网相比主要有以下几个方面的特点：

（1）控制的范围小，控制点密度大，精度要求高。与测图区域相比，工程施工的地区比较小，因此，控制网所控制的范围较小。例如，即使是大型水利工程，为了控制施工，通常包括附属工程在内的施工测量控制网，面积也不过几十平方公里。对于中小型水利枢纽工程，控制面积一般只有几个平方公里，在小型工业建筑区，控制面积有时还不到一平方公里。但是，就在这样小的范围内，由于施工阶段所有工作均集中在工程建筑区，各种建筑物的分布错综复杂，没有密集而精确的控制点是无法进行工程测设工作的。

施工测量控制网的主要任务是放样建筑物的轴线，这些轴线的位置偏差都有一定的限制，例如工业厂房主轴线定位的精度要求为 2cm，4km 以下的山岭隧道，当相向开挖贯通时，两中线之间的横向偏差不应超过 10cm；水利枢纽工程的施工测量控制网除了用于放样主要轴线以外，还经常直接用于放样主要建筑物的轮廓点。主要水工建筑物轮廓点放样的点位相对中误差要求为±2cm，因此要求最低一级控制网的点位相对于坐标起算点的中误差不得超过±2cm。相对于地形测绘的精度要求，这样的精度要求是相当高的，因此施工控制网的精度要求也是比较高的。

(2) 使用频繁。在施工过程中，控制点常直接用于放样，例如在水利枢纽建筑区，主要建筑物（如坝、闸等）一般都很高，在不同的高度层上，具有不同的形状、不同的尺寸及不同的附属工程，往往对每一层都要进行放样工作。通常一个大坝分为10～20余个坝段，一个坝段每浇高1.5m或3m，就需要进行一次施工放样。据统计，我国葛州坝第一期工程，为浇筑坝、闸所进行的施工放样次数超过17000次。又如桥墩，也要随着它们的浇筑升高，经常进行放样工作。由此可见，放样控制点的使用是频繁的。这就对控制点点位的稳定性、使用时的方便性和精度以及在施工期间是否易于保存提出了比较高的要求。因此，在控制点上有时采用观测墩；而在工业场地上，标定桩基行列线的矩形控制网的标志，都采用顶面带有金属标板的混凝土桩，用以标定设计的点位，使其坐标为整数，这样可以使经常性的放样工作简化。

(3) 受施工干扰大。现代化施工均采用立体交叉作业，使得工地上各建筑物的施工标高有时相差悬殊。再加上人员车辆来来往往，例如吊车、建筑材料运输机等的交叉来往，都有可能妨碍控制点间的相互通视。建筑工地在施工过程中的临时建筑物，也成为阻挡视线的主要障碍，也使各控制点难以保存。因此，放样控制点的位置分布应该恰当，密度也应较大，以便在作业时，有机动选择控制点的余地。即使有个别点被碰动，也能及时进行校核并恢复。

此外，由于施工测量控制网需要的是施工面上的实际距离，当工程规模较大或所在地区离所属投影带的中央子午线较远或海拔高程较大时，控制网的边长要投影到工程中主要建筑物所在的高程面上。如在工业建设场地，常将施工测量控制网投影到厂区平均高程面上；有的工程要求边长投影到定线放样精度要求最高的平面上，以保证设备、构件的安装精度，如桥梁施工测量控制网的边长要求投影到桥墩顶的平面上。

上述特点决定了施工测量控制网的布设应该作为整个工程施工设计的一部分，布网时必须考虑到施工的程序、方法以及施工场地的布置情况。为了防止控制点标桩被破坏，应该教育工地上的所有人员注意保护。

三、施工测量控制网的布设原则

建立施工测量控制网的基本原则是“由整体到局部，先控制后碎部”。

在施工现场，各种建筑物、构筑物面积分布比较广，施工进度也不完全一致，为保证其放样精度和在平面、高程上的精度统一，施工测量必须遵循“由整体到局部，先控制后碎部”的原则。即首先在施工现场根据总平面设计与现场条件，在已有的测图控制网基础上建立起统一的便于指导施工的平面控制网和高程控制网，然后以此为基础，对建筑物和构筑物的主要轴线及细部进行放样工作。

为了在施工过程中保存点位和给放样工作创造良好的通视条件，施工测量控制网的布设应作为整个工程技术设计的一部分，所布设的点位应表示在施工设计总平面图上。

点位的布设必须顾及施工的顺序、方法、场地情况、对施工放样的精度要求和可能采用的放样方法以及对控制点使用的频繁性等。例如水利枢纽的大部分建筑物位于坝的下游，若控制点按一般情况均匀分布，则随着坝体的升高，上下游控制点间的通视将受到阻挡，而必然使上游的一部分点位失去作用。蓄水后，布设于上游的地势较低的控制点可能被毁，另一些点的稳定性也会受到影响，其结果只能重新放样。所以，在布网时点位的分布应以下

游为主，但为了放样的方便，布点时仍需适当照顾上游。

四、施工测量控制网的布设形式

施工测量控制网的布设形式应根据总平面设计和施工地区的地形条件来确定。既可用传统的三角网、测边网、边角网、导线网建立施工测量控制网，也可以用GPS建立施工测量控制网；根据具体工程条件既可采用分级布网，也可以根据具体情况布设精度高于上一级的加密网，还可布设全面网。

对于建筑物布置比较规则和密集的工业场地，由于建筑物一般多为矩形而且多沿两个互相垂直的方向布置，为达到建筑物在定位时计算简便、测定方便且保证精度的目的，施工平面控制网一般采用矩形网，即所谓建筑方格网；在面积不大且不十分复杂的建筑场地，可用一条或几条直线，作为施工控制测量的平面控制网，称之为建筑基线。对于起伏较大的山岭地区（如水利枢纽）及跨越河谷的工程（如桥梁），一般可采用三角网、测边网、边角网、导线网、GPS控制网的方法建立施工测量控制网。

一般的工程建设中，在布设施工测量控制网时采用两级布网的方案。这是由于对一般工程来说，往往是各种建筑物、构筑物、铁路、公路的综合体，各个项目对放样的精度要求并不完全相同；各项目轴线间几何联系的要求比它们细部相对于各自轴线的要求来说，在精度上也要低得多，因此采用两级布网的方案是合适的。即首先建立布满整个工程地区的第一级控制网，其主要作用是用来放样各个建筑项目的主要轴线，其次再建立加密的第二级控制网。第二级控制网的加密可以用插点、插网、交会定点等方法，第二级加密控制网通常根据各个工程项目的具体需要来布设。在水利枢纽工程中，一般常分为基本网和定线网两层来布设。基本网的点位尽量选在地质条件好、离爆破震动远、施工干扰小的地方，以便能长期保存和基本稳定。在此基础上用插点、插网、交会定点等方法在靠近建筑物的地方扩展定线网点，供直接放样用。在工业场地，施工测量控制网分为厂区控制网（第一级）和厂房控制网（第二级）。在桥梁施工中，为了满足每个桥墩的需要，在桥梁控制网（第一级）下也需要加设一定数量的插点作为第二级控制网。

高程控制网可布设水准网或用测距三角高程代替水准网。在施工期间，要求在建筑物近旁的不同高度上都必须布设临时水准点，临时水准点的密度要在放样时保证只设一个测站就能够把高程传递到建筑物上去。高程控制网通常也分为两级布设，即布满整个施工场地的基本高程网与根据各施工阶段放样需要而布设的加密网。加密网点一般均为临时水准点，可以直接在岩石顶端做上标记而作为天然的临时水准点。这些水准点开始的时候还可作为沉降的观测点使用。基本高程控制网一般采用三等水准测量施测，加密高程控制网可用四等水准测量。对于起伏较大的山区（如水利枢纽地区）平面和高程控制网一般各自单独布设。而在平坦地区（如一般工业场地），平面控制点通常均联测在高程控制网中，同时兼作高程点使用。

五、布设施工测量控制网的工作步骤

（1）搜集资料。当接受到测量任务时，首先要进行的就是搜集资料的工作。这项工作将会直接影响以后的具体布网、选点、观测以及整个网的使用是否方便。需要搜集的资料很多，首先要搜集的资料包括施工区域的大比例尺的地形图、建筑物构筑物相互关系位置

图、施工技术设计、施工总平面图等。其次还应搜集勘测单位在过去所完成的测量资料或已完成的地面控制资料，尤其是在转换施工单位时，这一点应特别注意。最后还应当搜集施工地区的气象、水文、地质以及交通运输等方面的资料。

(2) 现场踏勘。在对所搜集到的资料进行初步研究之后，必须对施工区域进行详细的踏勘。在踏勘时，应特别注意建筑物、构筑物、地形、施工设施的布置、水源、居民点以及交通情况。

(3) 选点布网。在选定布网方案后，应结合现场进行踏勘选点。施工区域有大比例尺地形图时，一般还要参考大比例尺地形图，确定控制点的点位。控制点的点位确定后，根据设计网形和预期的观测精度，上机进行控制网的精度估算和优化设计，确定一个满足工程要求的施工测量控制网。

第二节　施工测量控制网精度的确定

在工程建设的施工阶段，测量工作的任务是直接为施工服务。测量工作的精度主要体现在相邻点位的相对位置上。对于不同的建筑物，或者对同一建筑物中各个不同的部分，这些精度的要求并不一致，有时甚至相差较大。所以说，施工测量控制网精度的确定，应从保证各种建筑物放样的精度要求来考虑。

建筑物放样的精度要求，是根据竣工时各建筑物的位置对于设计尺寸的容许偏差（即建筑限差）来决定的。建筑物竣工时的实际误差由施工误差 $m_{施}$（包括构件制造误差、施工安装误差等）和测量放样误差（即测设误差，其中包括控制点误差 $m_{控}$ 和依据控制点进行测设时的误差 $m_{放}$ 所引起的综合误差）$M_{总}$，而测量误差只是其中的一部分。为了根据验收限差正确地制定建筑物放样的精度要求，除了具备测量知识外，还必须具有一定的工程知识。

正确制定工程建筑物放样的精度要求，是一项极为重要的工作，必须分析哪一部分精度要求最高，确保满足了最高的精度要求，则其它的精度就自然满足。例如桥梁，关键是保证桥长与桥墩放样精度；对于隧道，关键是保证相向开挖的正确贯通，不能片面追求高精度。如果定得过严，就可能给放样工作带来不少困难而增加放样工作量，延长放样的工作时间；定得太宽，很有可能造成事故，使国家经济受到重大损失。

对于桥梁和水利枢纽，放样点位一般距离控制点较远，放样不太方便，因而放样误差比较大，同时考虑到放样工作要及时配合施工，经常在有施工干扰的情况下高速度进行，不可能用增加测量次数的方法提高精度。而在建立施工测量控制网时有足够的时间和各种有利条件来提高控制网精度。设 M 为放样后所得点位的总误差；m_1 为控制点误差所引起的误差；m_2 为放样过程中所产生的误差。在设计施工测量控制网时，应使控制点误差 m_1 对于施工放样误差 m_2 来讲能小到忽略不计，以便为今后的放样工作创造有利条件。根据这个原则，对施工测量控制网的精度要求分析如下：

$$M=\pm\sqrt{m_1^2+m_2^2}=\pm m_2\sqrt{1+m_1^2/m_2^2} \tag{3-1}$$

$$\because m_2>m_1 \quad \therefore m_1/m_2<1$$

将式（3－1）按二项式展开为泰勒级数并略去高次项得：

$$M=m_2\ (1+m_1^2/\ (2m_2^2)) \tag{3-2}$$

若使 $m_1^2/2m_2^2=0.1$，即控制点误差的影响最大只占 10%，得到 $m_1^2=0.2m_2^2$，代入式（3—2）得：

$$m_1\approx 0.4M \tag{3-3}$$

这就是说，当控制点误差占测设总误差的 40%时，它使放样点位的测设总误差仅增加 10%，这样的影响实际上可以忽略不计。

施工测量控制网的精度，应从保证各种建筑物放样的精度要求来考虑。由于在施工过程中，各种建筑物对放样精度的要求不一样，即使是同一建筑物，它的不同部分对放样精度的要求也不同。因此，首先遇到的问题就是根据哪一个精度的要求来考虑施工测量控制网的精度，在选择时应该考虑到施工现场条件与施工程序和方法，分析这些建筑物是否必须直接从控制点进行放样。比如有的建筑元素，虽然它们之间的相对位置的精度要求很高，但在放样时，可以利用它们之间的几何联系直接进行放样，因而在设计控制网的精度时，可以不考虑。如水利枢纽工程中闸门槽位置的放样，在设计控制网的精度时，就可以不考虑，原因是虽然它的精度要求很高，只有 0.5mm，但它不是直接根据控制点放样，而是根据闸门主轴线来放样的。

在确定了建筑物放样的精度要求之后，就可以用它作为基础数据来推算施工测量控制网的必要精度了。这个时候，要根据施工现场的情况及放样的工作条件来考虑控制网误差和细部放样误差的比例关系，以便合理地确定施工控制网的精度。

前一节已讨论了施工测量控制网一般分为两级布设，第一级控制网和加密的第二级控制网，而第二级网的加密方式又有插点、插网、交会定点等几种方式。另外，在放样过程中，随着放样方法、放样图形的不同，控制点误差所引起的影响也会随之改变。所以，在确定了所需放样点位的测设综合误差后，在用式（3—3）确定施工测量控制网的精度时还需要根据具体情况采取不同的方法措施。

而对于一般工业场地，施工测量控制网的点位较密，放样距离也比较近，实施起来比较容易，放样误差也比较小。在这种情况下，完全没有必要采用“使控制点误差对放样点位不发生显著影响”的原则，而且给控制网误差与细部放样误差以适当比例，合理确定施工测量控制网的精度。

第三节　工民建施工测量控制网的建立

工业建筑场地上的施工测量控制网一般分为两级布设，即厂区控制网和厂房控制网。首先是布满整个场地的控制网，一般称为厂区控制网。其平均边长大约 200m。为了进行厂房或主要生产设备的细部放样，按实践中的经验，还要根据由厂区控制网所定出的厂房主轴线，建立厂房控制网。厂区控制网要根据建筑场地的地形及建筑物的布置情况采用不同的布网方式：对于地势平坦、建筑物布设比较规则、密集的工业场地，一般采用建筑方格网为宜，因为此时网点布置比较灵活；当建筑场地地形起伏较大时，最好采用三角网、边角网、导线网或 GPS 网作为控制网。

厂区控制网的主要作用是用来放样厂房轴线及各生产车间之间的联系设备，例如皮带运输机、各种管道、线路和铁路等。厂房轴线放样的误差，只影响厂房之间的间隔，由于这种间隔较大，所以这方面的精度要求不太高。而联系设备布满整个工业场地，且各处同

时施工，如果放样的误差较大，则会影响连接，不能保证工程的质量。所以，根据建筑限差，厂区控制网的边长相对中误差最大为 1/20000。

在以建筑方格网作为厂区控制网时，建筑方格网须在编制施工组织设计时在总平面图上进行布设。格网大小视拟建建筑物的尺寸而定。格网须与大多数拟建建筑物平行，交点要选在人行道上或绿化带上，各相邻点间亦要保持通视。布设建筑方格网时，首先要选择两条互相垂直的主轴线。主轴线是在场地平整以前进行测设的。如图 3—1 中 AB 和 CD 所示。其中 A、O、B 三点为主轴线的定位点，称为主点，其间距不宜过短，一般不应小于 400m，以保证依据主轴线进行定向时，有足够的精度。在求得主点准确坐标后，再将三个主点的建筑方格网坐标换算为测图坐标，以便将其测设到地面上；当 A、O、B 三个主点的建筑方格网坐标换算为测图坐标后，就可根据其附近的测图控制点的坐标，算出各主点至最近控制点的水平距离 d_1、d_2、d_3 和与已知方向的夹角为 β_1、β_2、β_3，然后精确放出三个主点的位置，并用混凝土桩固定下来。桩的基底要埋入冰冻线以下至少 30cm，桩顶要高出地面 10cm 并且桩顶预埋一块 10cm 见方的铁板，以便标定点位。理论上，所设计直线上的点在实地上也应为一条直线，但由于测量误差的存在，三个主点可能不在一条直线上，如图 3—2 中 A'、B'、O'，所以初步放样定出的点还必须进行调整，使其在一条直线上。其方法是在 O' 点安置经纬仪，精确测量 $\angle A'O'B'$ 的角值 β，若交角不为 180°，则按

$$\delta = a \times b / (a+b) \times (90° - \beta/2) / \rho \qquad (3—4)$$

计算 δ 值，将三个点沿横向各移动一个 δ 值；调整需多次进行，直至误差在允许范围之内。

当主轴线 AB 测设好之后，就要进行对另一条主轴线 CD 的测设了，其方法与 AB 主轴线测设方法大致相同，只不过此时是在 O 点上安置经纬仪照准 A 点，向左、右各测设 90°直角，并测设距离 L_1、L_2 得 C'、D' 两点。

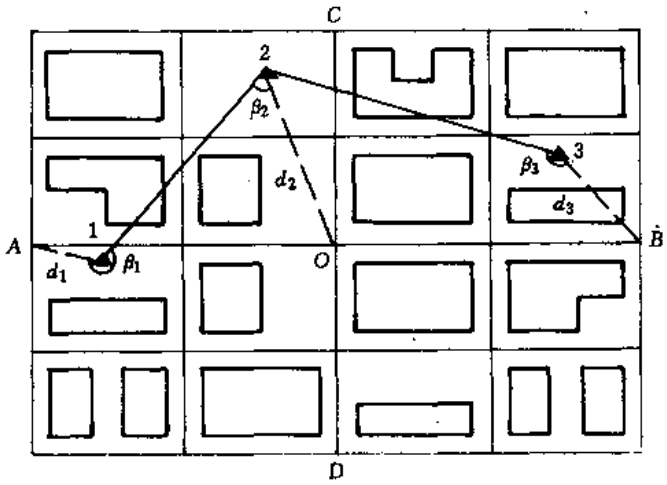


图 3—1

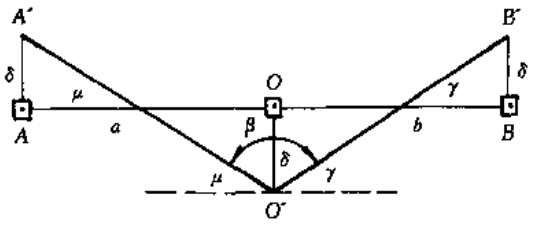


图 3—2

再精确测得 $\angle AOC'$ 与 $\angle AOD'$，根据它们与 90 之差 ε_i 按

$$d_i = L_i \times \varepsilon_i / \rho'' \qquad (3—5)$$

进行改正。调整 C'、D' 位置时，其移动方向要根据实测角度大小来判断，最后还得测量 $\angle COD$ 与 180°之差进行检核，这样主轴线 AB、CD 就测设好了。

主轴线定出以后，即沿着它进行测距，以定出主轴线上的方格网点（有时还要加密方格网或每隔一定距离设一距离指示桩）。在主轴线 AB、CD 上自零点起测设网点的距离，用两架经纬仪同时安置在网点上，精确测设 90°角，用交会法定出各网点的位置如图 3—3。在

各网点埋设混凝土桩，当混凝土桩硬化且沉降稳定之后，再仔细检查各网点的角度和距离。经过平差后，求得各网点的实际坐标并与设计坐标进行比较、进行归化改正，最后将确定的点位刻在钢板上。

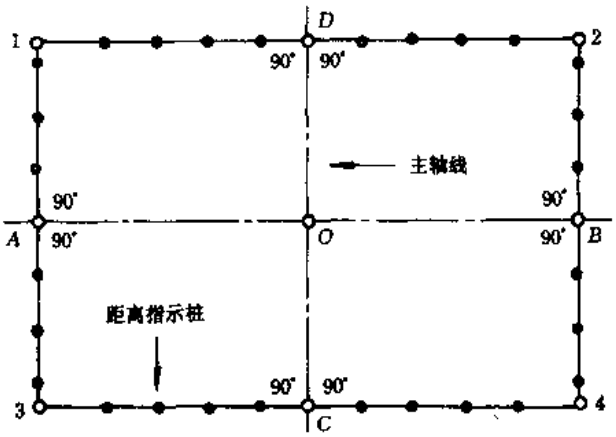


图 3—3

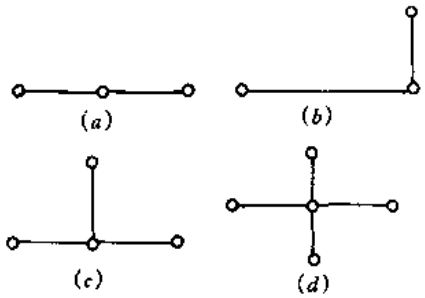


图 3—4

以上具体讲述了厂区控制网的建立方法。如果建筑区较小、建筑物构造较简单或总体联系要求精度较低时，可以布设建筑基线。建筑基线是施工平面控制网中一种比较简单的形式。常用形式有三点直线形、三点直角形、四点丁字形、五点十字形（图 3—4）。需要注意的是无论哪种方式，建筑基线不得少于三个点，以便相互检查有无变动。

由于厂区控制网点分布较稀，用其放样建筑物细部点的位置是远不能达到精度要求的，因此对每个车间厂房还需要建立厂房控制网。一般厂房多为矩形，所以厂房控制网都是布设成矩形控制网。它是厂房施工的基本控制，厂房屋架及其内部主要设备的关系尺寸，都是根据它放样到实地去。

厂房控制网的建立通常有下面几种方法：

第一种方法先根据厂区控制网定出它的一条边作为基线，再在基线的两端精密测设直角，建立矩形的两条短边，并沿着各边丈量距离，埋设距离指标桩。如图 3—5，这种布设形式比较简单，测设起来也较方便，但是由于其三边由基线推出，误差集中在最后一条边 $N_1 \cdots N_2$ 上，所以这条边精度比较差，这是它的缺点。此种方式的控制网只适用于中小厂房。

第二种方法首先根据厂区的控制网定出矩形控制网的主轴线，再根据主轴线在厂房柱基的挖土范围以外，测设出矩形网的四条边而形成一个控制网。这样的布网方案灵活性大，标桩容易选择适宜的位置，而且矩形网的四条边是根据主轴线测设的，其误差分布比较均匀。缺点就是测设的工序较多，比较费时，一般适合大型车间建立控制网。

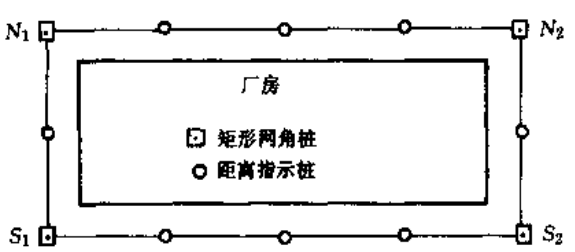


图 3—5

在矩形控制网施测以前，应根据施工总体规划、厂房施工平面图、厂区控制网资料和

现场地形的形状、精度要求、标桩结构等，拟定测量和计算的方法。矩形网的主轴线，原则上应与厂房的主轴线或主要设备基础的轴线一致，但还要结合现场地形条件及施工情况。各种不同的工程建设项目究竟采用什么样的建网方法，应视当地当时的具体情况而定。例如需要在主轴上量距，可以按“田”字形导线网进行观测，但如果建网时直接量距不太方便，也可用三角测量、导线测量等方法测定所定点位的实际坐标。

第四节　桥梁、隧道、水利枢纽施工测量控制网的建立

一、桥梁施工测量控制网的建立

桥梁施工测量控制网的主要目的是为确定桥长和放样桥墩服务。对于一般的中型、小型桥梁，由于河窄水浅，桥台桥墩间的距离可用直接丈量的方法进行放样，也可以用桥址勘测阶段的测量控制网为基础进行施工放样。大桥、特大桥跨越的江河水域，通常水深河宽，两桥台的距离无法直接丈量，放样工作一般采取前方交会法或极坐标法。当采用前方交会法时要有良好的图形，用极坐标法时要有适中的后视方向。

1. 桥梁施工测量控制网的布设

在布设桥梁施工测量控制网时，可以利用桥址地形图，拟定布设方案。在仔细研究桥梁设计图及施工组织计划的基础上，结合当地的地形情况进行踏勘选点，尽量使控制网点不在施工区及存放材料的地方。而且网点不应设在淹没地区及土壤比较松软沉降不稳的地方。控制网的布设应力求使：控制点要有足够的强度和密度方便于各个桥墩、桥台和桥头引线的放样；为了使控制网与桥的轴线联系起来，应该在河流两岸的桥轴线上各设一个点，也就是把桥轴线同时作为控制网的一条边，同时为了方便桥台的施工放样以及为了保证两桥台间的距离能够满足设计施工的精度要求，控制点与桥台设计的位置距离不应太远。在放样桥墩时，在桥轴线的控制点上安置经纬仪，以减少垂直于桥轴线方向的误差；桥梁控制网的边长与河宽有关，一般在 0.5～1.5 倍的河宽范围内变化。

桥梁控制网常用的图形如图 3—6 所示，其中 (*a*)、(*c*)、(*d*) 比较简单，只由一个大地四边形或两个三角形构成，只适用于一般的桥梁施工放样；图形 (*b*) 是在桥轴线两侧各布设一个大地四边形，图形强度较高，适用于特大桥梁的施工放样。

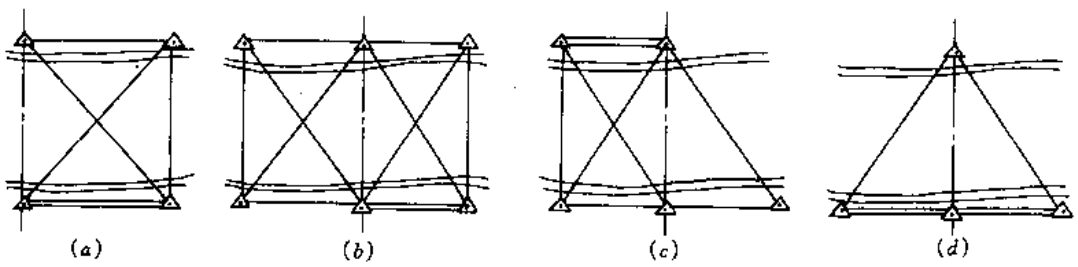


图 3—6

因为桥梁控制网是为施工服务的，需要的是控制点之间的实际距离，应将边长长度化算在桥墩顶平面上，而不是归算至椭球面上。桥梁控制网作为一个独立的控制网计算，通

常采用以桥轴线为纵坐标轴 x 轴，与它垂直的方向选定为横坐标轴 y 轴的施工坐标系。坐标原点可采用位于河流一岸桥轴线上的一个控制点，也可采用位于桥轴线延长线上的其它控制点。

作为桥梁施工高程控制网的水准点，每岸至少需要埋设三个点，并与国家或城市水准点联系起来，水准点应采用永久性的固定水准标石，也可采用平面控制网中的控制点标石作为水准点。同岸的三个水准点中有两个应埋设在施工范围以外，以免受到破坏或受到临时性建筑物的破坏，另外一个埋设在施工区，以便直接将高程传递到需要的地方，而且要注意采取保护措施以免受到破坏。为了将高程传递到桥台和桥墩上去，应在每一桥台附近设立一个施工水准点。对于永久性水准点应采取保护措施，使其不受碰动，如果发现某一水准点四周进行土方工程时，则需要事先将此点引测到安全地方去。

2. 桥梁施工测量控制网精度的确定

在桥梁工程中，施工测量控制网的精度与桥长、跨越结构架设、桥墩放样以及其它建筑物与构筑物的放样等有关，但主要取决于跨越结构架设和桥墩放样的允许误差。

1）根据跨越结构架设的误差来确定控制网的必要精度

控制网的精度与桥跨大小以及跨越结构的形式有关。对于钢梁而言，其杆件制造误差、桥墩支座上垫板时的安装误差以及温度变化所引起的杆件的伸缩等，都影响桥跨的距离。根据我国《钢梁验收规范》中的规定，钢梁各杆件长度的误差，不超过其长度的 1/5000，可将这一误差看作极限误差，支座垫板的安装误差为±5mm。温度变化引起的杆件伸缩可以认为是系统误差。为了确定控制网的精度，可按钢梁制造时的误差和支座垫板安装的误差推算每孔的极限误差，再根据误差传播定律计算出全桥钢梁架设的极限误差。一般取极限误差等于 2 倍中误差，据此，可以求得全桥钢梁架设的中误差。若保证使测量误差不至于影响工程质量，可取控制测量误差为钢梁架设误差的 $1/\sqrt{2}$，以求得控制网在桥轴线上的边长相对中误差。一般来说连续梁比简支梁精度高，大跨度的桥梁比小跨度的桥梁精度高。

例如某大桥为桁梁钢桥，共有 9 孔。每孔长度为 160m，宽 10m，高 16m，每孔分 10 个节点，每节间成“米”字形，其上、下弦杆的长度为 16m，所以全桥共有 90 个节间。此大桥为连续桁梁，三孔为一联，联与联间支座中心距为 2m，所以全桥总长 $D=160\times9+2\times2.0=1444$m。两桥台支座及联与联间支座安装限差均为±5mm，每节间的极限误差为 16000/5000≈±3.2mm。而每联的极限误差可按下式计算：

$$\Delta\delta=\pm\sqrt{\delta_1^2+N\times n\times(S/5000)^2+\delta_2^2}$$

式中 δ_1 和 δ_2 为支座安装限差；N 为一联的孔数；S 为上下弦杆的长度；n 为每孔上（下）弦杆数。将上述数据代入即可算出每联的极限误差：

$$\Delta\delta=\pm\sqrt{5^2+3\times10\times(16000/5000)^2+5^2}=\pm18.9\text{mm}$$

全桥钢梁架设的极限误差为

$$\Delta D=\pm\sqrt{3}\times\Delta\delta=\pm\sqrt{3}\times18.9=\pm33\text{mm}$$

全桥钢梁架设的相对中误差为

$$m_D/D=33/(2\times1444000)=1/88000$$

为使控制测量误差不致于影响工程质量，取控制测量误差为钢梁架设误差的 $1/\sqrt{2}$，则控制网在桥轴线上的边长相对中误差应不低于 1∶124000。

2）从桥墩放样的容许误差分析控制网必要的精度

在桥梁施工中，桥墩的位置是由控制点上测设角度进行前方交会或极坐标法确定的。工程上一般对于放样桥墩位置的要求是：桥墩中心在桥轴线方向上的位置中误差不应大于1.5～2.0cm。桥墩位置偏移，就使得墩上的支座位置偏移，这样桥墩的应力就会有所改变，如果在桥轴线方向上偏移超过2～3cm，就应当对此桥墩根据其荷载量进行应力分析，来决定是否采取补救措施，一般可以采取加宽桥墩顶部的方法来补救。

例如以桥墩中心在轴线方向上的位置中误差不大于2.0cm作为确定控制网必要精度的起算数据。为使控制网误差对桥墩定位精度不产生显著影响，按式(3－3)要求$m_1=0.4M=\pm 8mm$。因为边长误差对桥墩定位的最大影响等于边长误差，因此，在桥墩定位工作中，控制网边长误差在数值上应力求小于8mm。由此计算，对于宽度为不超过1000m的河流，控制网最弱边相对中误差不大于1/125000。

由于桥梁控制网的主要工作是确定桥长和放样桥墩，因此，应分别根据桥梁架设误差和桥墩定位的精度要求来计算桥梁控制网的必要精度。为了安全，一般以其中较高者作为桥梁控制网的精度要求。

二、隧道施工测量控制网的建立

隧道工程包括铁路隧道工程、公路隧道工程、输水隧道工程、城市地下铁道工程等。由于施工方法不同，对测量工作的要求也有所不同。但总的说来，施工测量一般包括在地面上建立平面与高程控制网。随着施工的进展，将地面上坐标、方向和高程传递到地下去，在地下进行平面与高程控制测量，再根据地下控制点进行施工放样，指导开挖、衬砌施工。进行这些测量工作的目的，就是要在地下定出工程的设计中心线与高程，为开挖、衬砌指出方向、位置；保证在两个相向开挖的掘进中，施工中线及高程能够正确贯通，符合设计要求；保证开挖不超过规定界线；保证所有建筑物在贯通前能够正确修建，不侵入规定的限界。

1）隧道施工测量控制网的布设

隧道施工期间的地面控制测量，包括平面和高程两个方面。由于山岭隧道都位于崇山峻岭等地形复杂的地区，平面控制网通常可以结合隧道的长度和平面形状及路线通过地区的地形情况，布设成联测主洞口、竖井洞口和平面洞口埋石点的三角网、边角网、导线网或*GPS*控制网作为地面控制网；用导线作为地下控制测量。对于较短的隧道，如通过山脊的公路隧道，可在隧道两端点之间进行导线和水准测量，并计算两端点连线的长度、方向和坡度，端点间的地面导线应尽可能采用直伸式，隧道洞口外的两个端点中心桩应是永久性的埋石点。沿地表中心线的适当位置应测设附加桩（施工控制桩）以便在山脊的两侧控制隧道的方向。高程控制网一般可采用水准测量方法或测距三角高程代替水准测量的方法。

在隧道施工中，地面导线网既可以作为独立的地面控制网，也可以作为加密的地面控制网，将首级网的坐标传递到隧道的入口处。当以地面导线网作为地面控制网时，在直线隧道中，为了减少导线量距误差对隧道横向影响，应尽可能将导线沿着隧道的中线布设。导线点数不宜过多，以减少测角误差对横向贯通的影响。对于曲线隧道而言，导线应沿着曲线的切线方向布设，但不一定要通过曲线的转折点，最好将曲线的始点和终点包括在导线中，这样，曲线转折点上的总偏角便可以根据导线测量结果计算出来，据此便可以将定测

时所得的总偏角加以修正而获得比较精确的数值，以便用以计算曲线元素。在有横洞、斜井和竖井的情况下，导线应经过这些洞口，以减少洞口投点。为了增加校核条件，同时也为了提高导线测量的精度，一般都使其组成闭合环。

对于采用地面导线测量作业作为隧道独立的施工测量控制网，我国《铁路测量技术规则》中作了规定（表 3—1）。

表 3—1 铁路隧道地面导线测量作业等级与隧道长度的关系

导线测量等级	适用的隧道长度 (km)	测角中误差 (″)	边长相对中误差	
			直线隧道	曲线隧道
二	6～8	±1.0	1/5000	1/10000
三	4～6	±1.8	1/5000	1/10000
四	2～4	±2.5	1/5000	1/10000
五	＜2	±4.0	1/5000	1/10000

作为高程控制的地面水准测量等级的确定，不仅决定于隧道的长度，更取决于隧道地段的地形情况，也就是由它所决定的两洞口间水准路线的长度，表 3—2 为我国《铁路测量技术规则》对各种水准测量的规定。进行地面水准测量时，利用线路定测水准点的高程作为起始点的高程，沿水准线路在每个洞口至少应埋设两个水准点。水准线路应形成闭合环，或者布设为两条互相独立的水准线路，由已知的水准点从一端洞口测量至另一端洞口。

表 3—2 铁路隧道水准测量等级与线路的关系

等级	两洞口间水准路线长度 (km)	水准仪型号	标尺类型
二	＞36	S05 S1	线条式因瓦水准尺
三	13～36	S1	线条式因瓦水准尺
		S2	区格式木质水准尺
四	5～13	S3	区格式木质水准尺

2）隧道施工测量控制网精度的确定

隧道施工测量控制网的主要作用是保证地下相向开挖工作能正确贯通，它们的精度要求，主要取决于隧道贯通精度的要求、隧道的长度与形状、开挖面的数量以及施工方法等。

在隧道施工中，由于地面控制测量、联系测量、地下控制测量以及细部放样的误差，使得两个相向开挖的工作面的施工中线产生错开现象，即所谓贯通误差。贯通误差在线路中线方向的投影长度称为纵向贯通误差（简称纵向误差），在垂直于中线方向的投影长度称为横向贯通误差（简称横向误差），在高程方向的投影长度称为高程贯通误差（简称高程误差）。对于铁路山岭隧道，纵向误差影响隧道中线的长度，只要它不大于定测中线的误差，能够满足铺轨的要求即可，这是容易做到的。高程误差影响隧道的坡度，由于应用水准测量的方法，也容易达到所需的要求。因此，在实际上最重要的是横向误差。因为横向误差

如果超出了一定的范围，就会引起隧道中线几何形状的改变，甚至洞内建筑物侵入规定限界而使已衬砌部分拆除重建，给工程造成损失。

至于各项贯通误差的允许数值，根据我国铁路隧道工程建设的要求及多年来贯通测量的实践，《铁路测量技术规则》中对于横向误差规定为：当两相向开挖的洞口间长度为4km及4km以下时为100mm；在4～8km时，为150mm（即中误差为±75mm）；在8km以上时应根据现有的测量水平另行规定。对于高程误差规定不超过±50mm（即中误差为±25mm），对于纵向误差的限值，一般都不做明确规定，如果按照定测中线的精度要求，则应小于隧道长度的1/2000。

在我国，铁路隧道施工中的地面控制测量与洞内测量，往往由不同单位担任，故应将上述容许贯通误差加以适当分配。一般来说，对于平面控制测量而言，地面上的条件要较洞内为好，故对地面控制测量的精度要求可高一些，而将洞内导线测量的精度要求适当降低。按照《铁路测量技术规则》的规定，将地面控制测量的误差作为影响隧道贯通误差的一个独立因素，而将地下两相向开挖的坑道中导线测量的误差各为一个独立因素。这样，设隧道总的贯通中误差的允许值为Δ，按照等影响原则，则得到地面控制测量误差所引起的横向贯通误差的允许值为：

$$m_q = \pm\Delta/\sqrt{3} = \pm 0.58\Delta \qquad (3-6)$$

对于通过竖井开挖的隧道，考虑到两个竖井定向的误差，上式应为：

$$m_q = \pm\Delta/\sqrt{5} = \pm 0.45\Delta \qquad (3-7)$$

对于高程控制测量而言，洞内的水准线路短，高差变化小，这些条件比地面的好；但另一方面，洞内有烟尘、水气、光亮度差及施工干扰等不利因素，所以将地面与地下水准测量的误差对于高程贯通误差的影响，按相等的原则分配。设隧道总的高程贯通中误差的允许值为Δh，则地面水准测量的误差所引起的高程贯通中误差的允许值为：

$$m_h = \pm\Delta h/\sqrt{2} = \pm 0.71\Delta h$$

按上述原理所算得的隧道控制测量的误差，对于贯通中误差所容许的影响值见表3－3。

表3－3　隧道控制测量的误差对于贯通误差所容许的影响值

横向贯通误差（mm）				高程贯通中误差（mm）
两洞口间长度（km）	≤4	4～8	>8	
地面测量	30	45	酌定	18
洞内测量	40	60	酌定	17
全部测量	50	75	酌定	25

上表所列数值，系指由两个洞口相向开挖，中间没有工作面的情况。当有中间工作面时（如竖井、斜井及平硐等），按理对于控制测量的精度要求可以放宽一些，但在实际工作中，设计经常变更，在作了地面控制测量后，其中间的开挖面在施工时还常有增减或改变，具体的贯通面的位置也不能肯定；而通过平行导坑建筑的隧道，每隔100～200m就有一个横向坑道，实际上贯通面很多，如果每个贯通面上的横向贯通中误差都允许为Δ，则整个隧道中线的几何形状零乱；因此，为了保证整个隧道的贯通精度和使隧道中线符合设计的几

何形状，对于通过平行导坑开挖的隧道，虽然中间通过横向坑道使开挖面贯通的地方很多，但仍按只有一个贯通面考虑。这时，按照式(3－7)，地下导线测量的横向误差允许值为 m_q，它们对于横向贯通的影响值为 $\sqrt{2}m_q$。如果整个隧道通过横向坑道进行贯通的贯通面有 n 个，则每个贯通面上的横向贯通中误差的允许值可规定为：

$$\delta=\sqrt{2}m_q/\sqrt{n}=\pm 0.82\Delta/\sqrt{n}$$

以上所讨论的是就我国铁路山岭隧道施工测量的情况而言的，对于城市地下铁道、水下隧道及其它地下工程，有时要先开挖竖井至一定深度，然后再按设计的方向开拓工作面，这时就要考虑竖井联系测量的误差对贯通的影响，表 3－3 所列的各项贯通误差的分配值就应重新考虑。

三、水利枢纽施工测量控制网的建立

水利枢纽工程建筑物具有两重性，其一是建筑物的松散性，可分为不同的整体，结构较为复杂；其二是整体性，这些分散的各个建筑物在平面位置及高程方面又有一定的联系，具有较高的相对精度要求，需要尽可能采用相同的控制点进行放样。因此，为了保证建成后的各建筑物符合设计的要求，在施工前必须建立整体施工测量控制网，以控制全局，作为各项工程放样的依据。

1. 水利枢纽施工测量控制网的布设

水利枢纽施工测量控制网可采用三角网、测边网、边角网、导线网或用 GPS 控制网。通常根据建筑物的设计要求、施工措施、地形条件等方面的因素，而采取分级布网、分层布网或全面布网的方案。因为施工测量控制网边长较短，为了提高控制网的精度及方便以后的使用，常采用钢筋混凝土观测墩作为控制网的点位，观测墩底部应埋设在岩石上，当控制点位于土层较厚地区时，要加大其底脚尺寸，以增强点位的稳定性。或者也可以用直径为 20cm 左右的金属管状标来代替钢筋混凝土观测墩。当控制网精度要求较高时，为了消除或减弱偏心影响，测站点和照准点均应采用强制对准设备，照准点应采用专用照准标志。而且值得注意的是，水利枢纽施工测量控制网边长较短，一般平均边长在 1km 以下，而各控制点间高差又比较大，因此在一个测站上所观测的各方向垂直角的变化较大，要特别注意仪器纵轴的垂直性。在观测前，必须严格整平仪器，整平后还要将仪器绕纵轴旋转一周，并观测水准泡的偏离情况。水利枢纽的大部分建筑物位于坝的下游，若控制点按一般情况均匀分布，则随着坝体的升高，上下游点间的通视将受到阻挡，而必然使上游的一部分点位失去作用。蓄水后，布设于上游的地势较低的控制点可能被毁，另一些点的稳定性也会受到影响，其结果只能重新放样。所以，在布网时，点位的分布应以下游为主，但为了放样的方便，布点时仍适当照顾上游。在河面开阔的大型水利枢纽以分级布设基本网和定线网为宜。对于高山、峡谷、河面较窄的大中型水利枢纽，在条件允许时可布设全面网，条件不具备时可采用分级布网，或者根据具体情况也可布设精度高于上一级的加密网。这是因为，从放样时使用方便出发，控制点应靠近建筑物，但这样往往容易被施工所破坏，即使点位能够保存下来，由于在施工时受附近震动、爆破等的影响，也很难保证它的稳定，因此控制点最好又要选在远离建筑物的地方。为了解决这种矛盾，可以把控制网布设为两级。一级为基本网，它提供对整个水利枢纽建筑物的整体控制，其点位应尽量选在地质条件好、

离开爆破震动远、施工干扰小的地方，以便长期保存。另一级以基本网为基础，用插点、插网、交会定点等方法加密的定线网，其点位可以靠近建筑物，直接为放样建筑物的辅助轴线和细部服务。定线网在施工期间要通过基本网来检验并求算其变动后的坐标。当定线网稳定性受到破坏时，也可用基本网来恢复其点位。为了便于以后计算放样数据，在设计总平面图上，建筑物的平面位置以施工坐标系表示。直线型大坝的坝轴线通常取作坐标轴，所以布设控制网时应尽可能把大坝轴线作为控制网的一条边。施工放样需要的是控制点间的实际距离，所以控制网边长一般投影到建筑物平均高程面上，有时也投影到放样精度高的高程面上，如水轮机安装高程面上。

施工期间，高程控制直接为高程放样服务，由于各处工程建筑物对高程精度要求不完全一致，因此在设计与布设高程控制网时，还要结合工程要求来进行考虑。高程控制的密度应能做到在建筑物近旁的不同高度上都设有水准点，以确保只需设一个测站就能将高程传递到建筑物上。高程控制网一般也是分为两级布设，即布满整个施工场地的基本高程控制网和根据各施工阶段放样需要而布设的加密网。对混凝土建筑物基本高程控制要求不低于三等水准，土工建筑物则不低于四等水准。一般情况下，由于水利枢纽建筑物位于山区，所以平面控制网点与高程控制网点采用各自独立布设的方式。对于地形起伏大的地区，用测距三角高程测量代替水准测量。

加密网点一般均为临时水准点，它可以直接在岩石露头注上标记作为天然的临时水准点。为了放样方便，往往在已浇灌的混凝土上布设临时水准点。这些水准点开始时作为沉陷的观测点使用。加密网一般用四等水准施测，根据各阶段施工需要，布设附合路线或结点网。对精度要求不高的施工区，也可以用五等水准点建立高程控制网。整个施工期间对水准点应经常性地进行复测，以保证水准点的可靠性，尤其在安装重要构件时，更要注意对临时水准点高程进行事先检查。

当控制网的作用在于确保引水隧道间的贯通时，高程控制一般分为地面高程和地下高程控制两部分。考虑到洞内的水准线路高差变化小，这些条件比地面上要好，但另一方面，由于洞内有烟尘、水气、光线较暗以及施工干扰等不利因素，所以将地面与地下水准测量的误差对于高程贯通误差的影响，按相等的原则分配。对于长度小于 4km 的水工隧洞，按规范规定贯通高程中误差为 25mm，地面高程控制测量对高程贯通中误差的影响应为：

$$m=\pm 25/\sqrt{2}=\pm 18\text{mm}$$

根据这一要求，即可设计应选择的水准路线。

2. 水利枢纽施工测量控制网精度的确定

根据我国《水利水电工程施工测量规范》中有关规定，大坝、厂房、船闸、水闸等的建筑物的主要轴线点均应由等级控制点进行测设。主要轴线点相对于邻近控制点的点位中误差不应大于 10mm。当施工测量控制网采用两级布网时，可以根据建筑物轮廓点放样的精度要求来确定定线网的精度。另外，水利枢纽工程控制网的精度除了与坝的长度、放样方法有关外，还与坝的形式、建筑所用的材料、施工方法和工地现场地形条件有关，对于各种不同情况要注意区别对待。

施工测量控制网的精度应满足施工放样的要求。当用控制点直接放样某些辅助轴线及个别细部点时，对控制网提出的要求较高。如坝墩中心线、水轮机轴线放样的精度要求约为 1～2cm。因此目前大多数有关文献都以能保证所放样的点位中误差不超出±（10～20）

mm 作为确定施工测量控制网必要精度之起算数据。

考虑到控制点误差对放样点位应不发生显著影响的原则，应用公式 $m_1 \approx 0.4M$，若取放样后所得点位的总误差 $M=\pm 20\text{mm}$，则控制点误差所引起的影响 $m_1=\pm 8\text{mm}$。

设放样采用前方交会法，在不考虑交会基线方位误差的情况下，控制点误差对放样点位的影响可由交会基线（即两控制点间的距离）之长度误差来体现（图 3—7）。设交会基线具有误差 m_S，则将影响所放样的点位，使 P_0 点移至 P 的位置。显然，PP_0 即上述之控制点误差的影响 m_1。从相似三角形 $BP'B'$ 中，可以算出 $P'B$ 的数值，而 $P'B=PP_0$，故

$$PP_0=m_S\times\sin\beta/\sin\gamma \qquad (3-8)$$

在一般的交会情况下，可以选择放样控制点以使 $\sin\gamma\geqslant\sin\beta$，从而使 $PP_0\leqslant m_S$。因此，若两放样控制点间边长的误差 $m_S\leqslant 0.4M$，能保证 $m_1\leqslant 0.4M$，即在放样工作中控制点误差的影响可以忽略不计。对于所述的情况，若取 $M=\pm 20\text{mm}$，则 m_S 应小于 $\pm 8\text{mm}$。

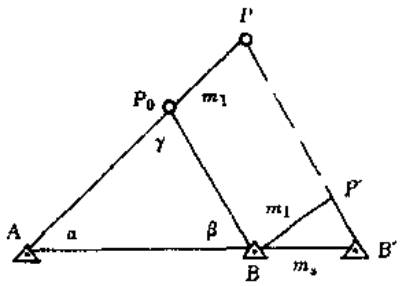


图 3—7

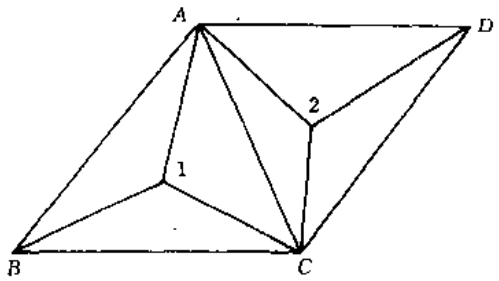


图 3—8

布设定线网时，通常采用在基本网内插点或插网的方法。因此在最不利的情况下，m_S 可以看作无直接联系的两相邻插点间的边长误差（如图 3—8 中的 1、2 两点）。

在这种情况下，可以认为两点间的边长误差 m_S 与点位误差（M_1、M_2）之间具有下列关系：

$$m_S=\sqrt{M_1^2/2+M_2^2/2} \qquad (3-9)$$

若设 $M_1=M_2=M_0$，则得 $m_S=M_0$。由此推得定线网点的点位误差不应超出 $\pm 8\text{mm}$。

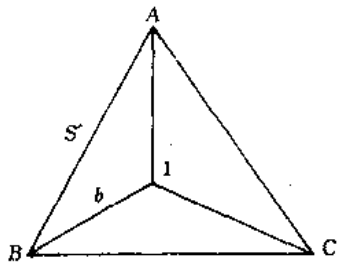


图 3—9

下面推算基本网的精度要求。

各种工程建设，一般只是在相邻建筑物之间才有工程结构上的联系，因而常对相邻建筑物的相对位置提出精度要求，因此为工程施工服务的定线放样工作的精度主要体现在相邻点相对位置的精度上，用其边长误差来体现。

如图 3—9 中，若在基本网内插入定线网点，并设基本网边长的相对误差在数值及符号上相同（因插点多在坝轴线附近，而坝轴线又是坐标轴，所以这里的基本网可以近似地认为无扭曲）。则定线网点的点位误差 M_0 可用下列近似公式表示：

$$M_0=\pm\sqrt{M'^2+(b\times m_S'/S')^2} \qquad (3-10)$$

式中 b 为定线网至基本控制网之距离；m_S/S' 为基本网内插入定线网的测量误差。

在一般情况下，我们可以近似认为：$b=S'/\sqrt{2}$ (3－11)

将式（3－11）代入式（3－10），则得

$$M_0=\pm\sqrt{M^2+(m_S'/\sqrt{2})^2} \quad (3-12)$$

设 $M^2=2(m_S'/\sqrt{2})^2$，则 $M_0=\pm\sqrt{3/2}m_S'$

由此得 $m_S=\pm\sqrt{2/3}M_0=\pm 6.5$mm。

当水利枢纽基本控制网的平均边长在1km左右时，三角网在坝轴线附近的边长精度要求为：

$$m_S'/S'=6.5/1000000=1/154000$$

而当基本控制网的平均边长在500m左右时，

$$m_S'/S'=6.5/500000=1/77000$$

对于某水利枢纽的基本网平均边长为418m，则要求

$$m_S'/S'=6.5/418000=1/64000$$

水利枢纽工程施工测量控制网的精度要求除了与坝的长度、放样方法有关外，还与坝的形式、建筑所用的材料、施工方法和工地现场地形条件等有关。因此，我们对于各种不同的情况要注意区别对待。

第五节　GPS在施工测量控制网建立中的应用

GPS是英文Navigation Satellite Timing and Ranging/Global Positioning System的字头缩写词NAVSTAR/GPS的简称。其含义是导航卫星测时测距/全球定位系统。

GPS是全球性的卫星定位和导航系统，能够提供连续的实时的位置、速度和时间信息。整个系统包括空间（卫星）、地面控制站和用户（接收机）三个部分。空间部分有24颗卫星分布在6个轨道平面上，两轨道平面间的夹角为60°，对赤道的倾角为55°，每个轨道上有4颗卫星，轨道距地面高度约为20000km。卫星绕地球一周需要12个小时，这样，对于地球上任何一点，任何时刻都可以收到至少4颗卫星发射的信号。

GPS测量有两种基本的观测量："伪距"和载波相位。接收机测定调制码由卫星传播至接收机的时间，再乘上电磁波传播的速度便得到距离。但由于所测得的距离受到大气延迟和接收机时钟与卫星时钟不同步的影响，所测得的距离并非卫星到接收机的真实几何距离，其中包括有钟差、介质效应等多种因素的影响，所以这种观测量称为伪距观测量。载波相位测量的观测量是卫星信号和接收机本振信号之间的相位差。

GPS定位时，把卫星看作是飞行的控制点，利用测量的距离进行空间后方交会，求得接收机的位置。卫星的瞬时坐标可以利用卫星的轨道参数来计算。

GPS定位包括单点定位和相对定位两种方式。单点定位即要求解某点的坐标矢量，也就是确定单个点在地心坐标系中的位置。相对定位即求解两测站之间的相对位置的定位方法，是利用两台以上的接收机同时观测一组卫星，然后计算接收机之间的相对位置。由于在定位测量时，许多误差对同时观测的测站有基本相同的影响，因此在计算时，大部分误差可以相互抵消，从而大大提高了相对定位的精度。

影响GPS定位精度有两个主要因素，一个是观测误差，另一个是定位时卫星的几何图

形误差，又称定位几何因素误差。目前，GPS 的单点定位精度约为几十米，而相对定位精度可达到 1～2 个 ppm。

一、应用 GPS 建立控制网的优点

传统的基本控制网分为平面控制网和高程控制网，平面控制网是以大地基准点的平面坐标为起始数据，借助于水平角和距离，以三角形或大地四边形为几何图形，推求出其它各点的坐标。其观测量是三角形的边长以及方向值，这种推算的结果使点位误差逐渐累积。在三角锁的两端还需设置大地基准点的高程为起算高程，通过水准测量，测得每两点间的高差，再推求出高程控制网各点的高程。一般的，传统的平面控制网和高程控制网是相互独立的。

GPS 的应用之一是建立各种形式的控制网。值得一提的是，在 GPS 问世后，常规控制网的概念和作用将会大大减弱，代之的将是一个地区范围内建立 1～2 个主控点，那里有 GPS 接收机连续跟踪观测，而测量用户只需把接收机放到要观测的地方，不需要先控制后碎部。而且能够同时以厘米级给出点位在统一坐标系统中的三维坐标，即平面点位和高程，这样就可以同时求解出地面点的平面坐标和高程，建立起一个平面坐标和高程统一的基本控制网。GPS 把独立观测的各个点的三维坐标作为观测量，平差计算时，定位误差是独立的，不存在误差的积累与传播，与距离的相关性也很弱。不仅如此，GPS 是对卫星进行观测，这将省去传统测量中为保证几何图形和通视条件而付出的高昂代价，其它诸如便于携带、易于操作、全天候操作等特点更是显示出其巨大的优越性。

由于 GPS 全球定位系统具有高精度和全天候的特点，故便于进行快速定位和布设大地网，能建立全球统一的地心坐标系，提供高精度的原子时。具体地说，主要有下面几个优点：

(1) 精度高。用载波相位观测量做相对定位，目前达到的典型精度是 1ppm，观测时间只要 1 个小时，这是其它任何定位手段都难以达到的。

(2) 不需要控制点之间的通视。GPS 测量不要求测站之间相互通视，这无疑给测量工作带来了很大方便。控制点的位置根据需要设置，在建立工程控制网时，可以省略对工程无用的过渡点。

(3) 不受时间的限制。GPS 系统可以实现全天候测量，可大大减少完成任务的时间。

(4) 费用低。根据 GPS 测量的特点，时间短，精度高，同时免去了一些常规测量方法中需要的造标，扫除通视障碍等费用，因此用 GPS 测量是经济的。虽然 GPS 接收机目前还比较昂贵，但 GPS 正式投入运行后，由于市场的扩大，接收机的价格会降低。目前，许多厂家都已经开始研制 GPS 接收机专用的超大规模集成电路块，整个接收机电路可装在一个插板上，这会大大降低接收机的成本。

(5) 在统一坐标系统中提供三维信息。GPS 定位是在国际统一的坐标系统中计算的，因此不同点的测量成果相互关联。对于某些工程测量工作，往往要求和全国统一坐标系连接，采用 GPS 定位后就可以免去这项工作。

二、GPS 在施工测量控制网建立中的应用

线路包括公路工程、铁路工程、输电线路工程、输油（气）线路工程、引水工程等。这

些工程的共同特点是施工区域为线状形，在其线路上及其附近包括了各种建筑物与构筑物。如在铁路工程中可能包含有桥梁、隧道、车站、变电站等；在引水工程中可能包含有枢纽、隧洞、泵站、渡槽等。

线路工程的施工测量控制网布设一般分为两级：其一为控制整个线路的首级控制网，其主要作用是保证全线路的各种建筑物与构筑物的紧密衔接，由工程特点决定了首级控制网为线性网形式，高程控制网沿较平坦的线路布设，根据线路的长短和工程需要平面控制网和高程控制网的等级均要与国家等级相一致；对于东西方向的线路工程和沿线地面起伏较大的线路工程，为了保证全线路的各混凝土建筑群的紧密衔接，还需要考虑投影变形问题，必要时要将线路分段分带建立平面控制网。其二为满足各种建筑物与构筑物施工需要的二级工控制网。二级控制网根据所服务的具体建筑物与构筑物的不同可布设成各种形式的专用控制网。现以某特大型引水工程为例说明用 GPS 建立线路施工测量控制网的有关问题。

某特大型引水工程从水利枢纽 950m 高程处引水，线路全长 300 余公里，其中隧洞 200 余公里，最长隧洞 50km，总扬程约为 650m，总流量约为 50m³/s，东西方向线路长 100 余公里，工程线路穿越于海拔 900～1900m 的高山峻岭中，在线路上包括了水利枢纽、调节水库、隧洞、泵站、渡槽等。

1. 控制网精度的确定

平面控制网的精度主要以线路中的隧洞为主考虑如下几方面的内容：

(1) 隧洞开挖贯通对洞外控制点的要求。按现行《水利水电施工测量规范》，要求见表 3－4（可视为相邻洞口点的允许点位中误差，按 4km 一段考虑）。

表 3－4　隧洞开挖贯通对洞外控制点的要求

相向开挖长度（km）		1～4	4～8
水工隧洞洞外控制点点位中误差	横向（mm）	±30	±45
	纵向（mm）	±60	±90

(2) 水工建筑物轮廓点放样精度要求。建筑物轮廓点平面位置中误差 $m_0 \leqslant 30\text{mm}$（相对于邻近基本控制点位的中误差）

$$m_0 = \pm\sqrt{m_{控}^2 + m_{放}^2} \quad m_{控} = 0.4 \times m_0 = 0.4 \times 30 = 12\text{mm}$$

即最末级控制网的相邻点点位中误差 $m \leqslant 12\text{mm}$。

表 3－5　隧洞竖向贯通对洞外高程基点的要求

相向开挖长度（km）	1～4	4～8
洞外水准基点中误差（mm）	±15	±20

高程控制网的精度：根据水利工程测量规范规定，隧洞竖向贯通对洞外高程基点的中误差见表 3－5。

2. 控制网的布设方案与原则

平面控制网：以高精度GPS控制网作为首级平面控制网；沿工程线路布设成条带状，一般不超过10km布设一对点，一对点间的横向间距为2～3km；尽可能将原有三角点和水准点纳入GPS网中，以便进行各项换算。二级平面控制网以平均边长1km的三等导线网布设，附合于首级GPS控制点上，水利枢纽另外布设专用的控制网；各隧洞洞口和支洞口附近应建立三个以上的控制点，其中两点用于隧洞中线的定向或兼作其它水工建筑物的放样，另一点作检核，在调节水库、隧洞、泵站、渡槽等水工建筑物的附近也要有足够的用于放样的控制点；每一控制点至少能与一个以上的点相互通视，以便定向检核；点位选择要适当，紧靠建筑物、构筑物及洞口的点要避免施工的破坏，其它定向点要避免山洪冲毁或塌方掩埋；既要考虑控制网的图形强度，也要因地制宜。

高程控制网：以三等水准沿引水路线附近的公路、大路和小路布设，每隔3km左右埋设一座水准标志，各主要水工建筑物、构筑物洞口附近均要埋设水准标志。

其它线路工程，如公路工程、铁路工程、输电线路工程、输油（气）线路等其施工控制网的建立与上述类似，可依照施工建筑物、构筑物的特点，确定控制网的等级或必要的精度，以及布网形式。

第四章　工矿企业及民用建筑施工测量

第一节　概　　述

建筑工程一般分为工业建筑工程和民用建筑工程两大类。无论是工业建筑工程还是民用建筑工程，就其土建工程部分来说，对测量精度的要求一般都不是很高；而与设备安装有关的工程，则对测量精度提出较高的要求，如工业厂房内部吊车轨道的安装，发电厂发电机机组的安装，连续生产的自动作业线的安装等。因此，建筑工程施工测量的精度要求，应根据工程性质和设计要求而定，不能一概而论。工业企业与民用建筑群内的建筑物及其附属道路和各种建筑物管线，一般都是沿着相互垂直的两个方向布置的，因此，建筑工程的施工控制网也往往布设成方格形式，使设计总平面图上各种建筑物主轴线方向与施工控制网主要轴线方向一致。根据这一特点，为了简化设计和施工中的计算工作，建筑场地内部，常采用与场区主要建筑物轴线相平行的假定坐标系。施工前应首先进行地形测量勘测工作，为各项工作提供控制点的资料，绘制各种比例尺的地形图，为工程设计和规划提供必要的依据。通常，城镇建设需要 1∶2000～1∶10000 的地形图，工业广场、厂区的建设需要 1∶500 的地形图，矿区规划需要用 1∶1000～1∶5000 的地形图。一旦工程批准实施，测量工作者就要建立基本控制测量，以提供足够的平面和高程控制点，保证地形测量等各方面的需要。

建筑施工测量是各种建筑工程在施工阶段所进行的测量工作。它一般包括：①建立施工平面和高程控制网，作为测设工作的依据；②把设计在图纸上的建筑物、构筑物按其设计的平面位置和高程标定在实地上，即所谓放样或测设工作，以便指导施工；③工程竣工后测绘各种建筑物、构筑物完工后的实际情况，即竣工测量；④对各种建筑物和构筑物施工期间在平面和高程方面产生的位移、沉降和变形进行观测。

工程施工测量，是为工程施工服务的，因此，作为工程测量人员应具备一定的工程专业基础知识，要了解其对象，并且还要熟悉图纸，了解设计的意图及每项工程施工测量的精度要求，了解施工的全过程，以便与施工任务密切配合。在建筑施工中，测量人员应按设计要求，将设计在图纸上的建筑物、构筑物的平面位置和高程位置测设到实地上去，并埋设各种标志、标石，作为施工的依据。测量标志是指导施工的依据，施工现场由于各种交叉作业（建筑现场一般为地面、地下和高空同时施工），有大量的土、石方填挖和各种施工机械作业，因此必须妥善保管并经常检查现场埋设的各种测量标志，一旦发现有损坏或碰动要及时恢复。

施工测量的具体方法很大程度上取决于建筑物的类型、位置和尺寸大小，也与工程设计和施工单位的习惯有关。由于施工中各工序之间均是以施工测量为指导而进行施工作业的，因此施工测量的质量将直接影响到建筑物尺寸和位置的正确性，即使施工测量有微小

的差错也会造成重大甚至是无法挽救的损失，因此，作为施工测量人员必须具有高度的责任心，工作时一定要细心，对每一个施测数据和测设点都应该做到步步校核，决不可马虎从事。

测量仪器的不断改进和发展如电子全站仪、GPS 定位系统、激光水准仪等各种高精度而灵巧的高科技仪器的广泛应用，为各种施工测量提供了强有力的工具，也带来了极大的方便。虽然这些新的设备的使用在某种程度上改变了原来的作业方法，但并没有改变施工测量的基本思想。

第二节　场地平整测量

工业场地上布置有各种用途的建筑物和构筑物，因此，需要有一块比较平坦的场地。施工场地平整测量工作主要是在施工前对整个场地由设计部门根据工程建设的总体布置和具体地形条件进行竖向规划，编制场地平整平面图和断面图。在平面图上，将平整以后的地形在地形图上用红色等高线表示出来，以便于与原地形图等高线相区别。由于受地形条件的限制，有些工矿企业尤其是矿区的工业场地需要平整成几个高程不同的台阶场地，有些则要求平整为带有一定坡度的斜面。这项工作的要求是在场地平整时，应为土方量最小和土方运输路线最短，场地平整后应使建筑物、构筑物间运输方便，场地中的雨水积水能很快聚集并便于排放。工业场地的平整一般包括两方面的工作，即场地范围的标定和土方量的计算。首先，标定工业场地的轮廓，沿设计图上工业场地的轮廓布置若干特征点，这些特征点连线所确定的范围就是工业场地的范围。用测量的方法将这些特征点标定出来，特征点一经标定，就应在地面上埋设标志，予以固定，然后就是土方量的计算。以下是几种常用的土方量的计算方法。

一、方格网法

此法主要适用于高低起伏较小，地面坡度变化比较均匀的场地。

1. 方格网的测设

将标定出的工业场地的轮廓网用一定的测量方法加密成全面的方格网。方格网边长可按地形条件、平整范围和施工方法而定。平坦地区人力施工一般用 20×20m 的方格网，地面起伏较大时可用 10×10m 的方格；当采用机械施工时多用 50×50m 或 100×100m 的方格。方格网点用经纬仪或全站仪标定在地面上并用木桩固定，桩顶面与地面齐平，桩顶上钉一小钉，桩旁设一护桩，护桩上注明编号。同时要确定木桩的高程（精确到厘米），高程可用测距三角高程的方法、水准测量的方法或激光水准仪确定；如果有满足要求的原有场地的大比例尺地形图，可将方格网直接展在地形图上，然后按图上地形点高程或等高线求出各方格网点处地面高程。为了便于计算，各方格网点按纵横行列注明编号，如图 4－1 所示。

2. 地面平均高程的计算

在填与挖土方量平衡的情况下，若将场地整成水平面，则水平面的设计高程应等于该场地现状地面的平均高程。在方格网中，一般认为各点间的地面坡度是比较均匀的，因此各点在方格网中位置不同，它的地面高程所影响的面积也就不相同，如果以四分之一方格

为单位面积，定其权为 1，则方格网中各点地面高程的权分别是：角点为 1，拐点为 3，中心点为 4，边点为 2，这样就可以采用加权平均值的方法，计算整个方格网点的地面平均高程 $H_{平}$。

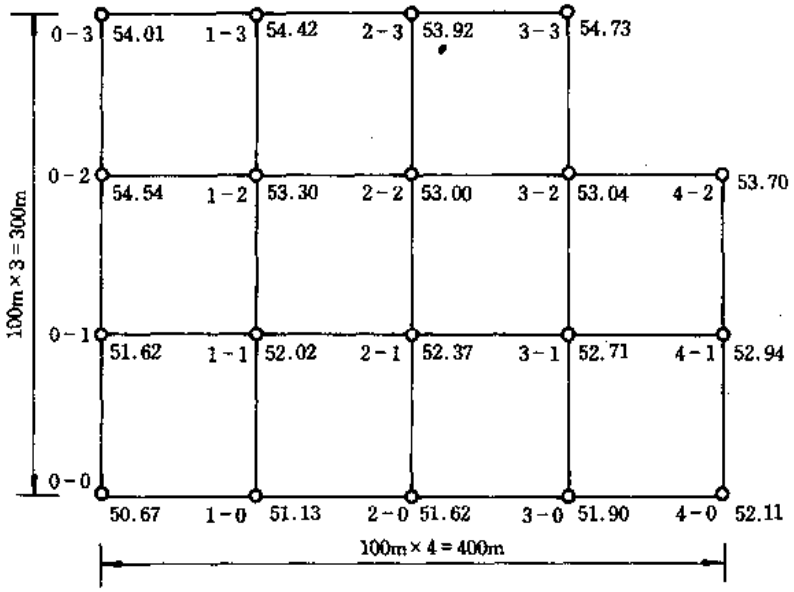


图 4－1

$H_{平}$ 的计算方法为：　　$H_{平}=\Sigma P_i H_i/\Sigma P_i$　　(4－1)

式中　H_i 为方格网点 i 的地面高程；P_i 为方格网点 i 的权。

例如要计算图 4－1 中所示方格网的平均地面高程，为了简单，我们以 50.00m 为基准，求其以上的平均值。

5 个角点的 $PH=1\times$（0.67＋2.11＋3.70＋4.73＋4.01）＝15.22m

8 个边点的 $PH=2\times$（1.13＋1.62＋1.90＋2.94＋3.92＋4.42＋3.54＋1.62）

＝42.18m

1 个拐点的 $PH=3\times3.04=9.12$m

5 个中心点的 $PH=4\times$（2.02＋2.37＋2.71＋3.00＋3.30）＝53.60m

所以，地面点的平均高程　$H_{平}=50.00+\Sigma P_i H_i/\Sigma P_i=52.73$m

如果在图 4－1 所示场地中，因修建各种地下工程、管道工程和基础工程时，共要挖出 33000m³ 的土方并就地铺平，考虑这个因素后的平均地面高程应是 H_1：由图知整个场地面积是 110000m²，故将 33000m³ 的挖土，平均铺到整个场地上的厚度为 33000/110000＝0.30m，考虑上述因素后的平均地面高程为 52.73＋0.30＝53.03m。

3. 将场地整成一定坡度的计算

为了节省土方工程和场地排水的要求，在填挖土方平衡的原则下，一般场地按地形现状整成一个或几个有一定坡度的斜面。由立体几何的知识可知，若将整个场地平面的几何重心处的设计高程，确定为场地平均地面的高程时，则整个场地无论平整成向任何方向倾斜的斜平面，土方的填挖量总是平衡的。当为矩形场地平整成一个斜平面时，其图形中心

就是重心，对于非对称图形，可通过图解法求出重心。

如果场地的形状不对称，又不平整为一个斜平面，可先算出当场地按设计坡度平整后，场地最低点高程以上的土方量 V，若以土方量 V 除以场地面积 A，就可以得到平均厚度 h。由立体几何知识，若将场地地面高程 $H_{平}$ 减去此厚度 h，所得高程定为场地最低点的设计高程时，则整个场地平整后填挖方量必然平衡。当各方格网点的设计高程已知后，则可计算各点处的填高或挖深的尺寸，称为填挖数。

$$\text{填挖数}=\text{设计高程}-\text{地面高程} \tag{4-2}$$

式中　填挖数为“+”表示填方；填挖数为“−”表示挖方。

填方时，一般在填高地区的方格网角点旁设立标杆，在标杆上相当于应填高的水平处固定一标志。至于挖方，则在护桩上注记相应的下挖的施工高度。

4. 填挖边界和填挖方量的计算

为了计算填方和挖方，首先应将开挖线（或称零位线）的位置求出，然后再计算土方量。如图 4−2 所示，在方格网的填方点（如 0−1 点，+0.83m）和挖方点（如 0−2 点，−0.59 m）之间，必然有一个不填不挖的点，即填挖边界点或者称为零点，把相邻的零点连接起来，就是填挖边界线或者称为零位线，即设计地面与原地面的交线。图 4−2 中的①−②−③−④−⑤即为零位线。零点和填挖边界线是计算填挖方量和施工的重要依据。

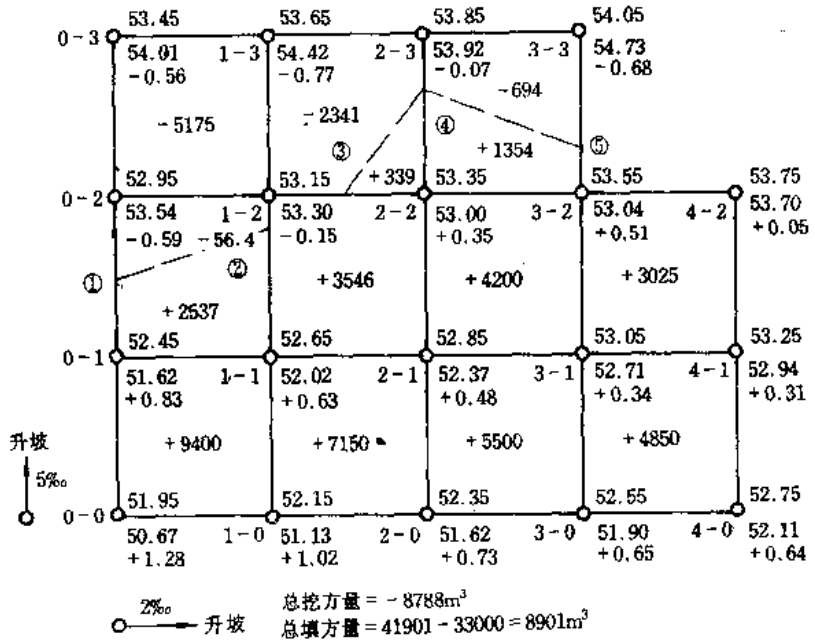


图 4−2

如图 4−3 是 0−1 点与 0−2 点断面情况。计算零点位置，可根据相似三角形对应边成比例的关系算出：

$$d=1\times|h_1|/(|h_1|+|h_2|) \tag{4-3}$$

式中　1 为方格网边长；h_1 为方格网点填挖的绝对值；d 为零点距填方点 h_1 的距离。

在填挖边界线求出以后，就可以在图 4−2 中计算各方格网内的填挖方量了。各方格网

内的填挖方量依各方格的具体情况用相应的体积计算公式计算，如可根据底面形状区分为正方形、直角梯形、直角三角形、直角五边形和直角六边形等情况由相关公式求得。把计算出的各方格网中填挖方量，分别填写在该相应方格中(图 4－2)，最后分别算出各方格网中的总填方量和总挖方量，由前面分析两者在理论上应相等；但因计算填挖方量中多用近似公式，可以有差值，如果差值较大说明计算中有错误，应仔细检查，重新计算。

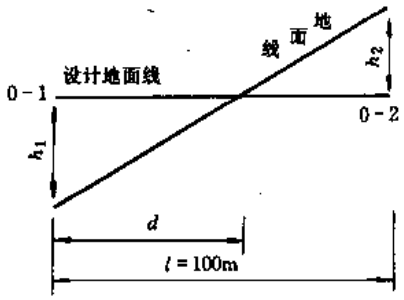


图 4－3

5. 填挖边界和填挖数的测设

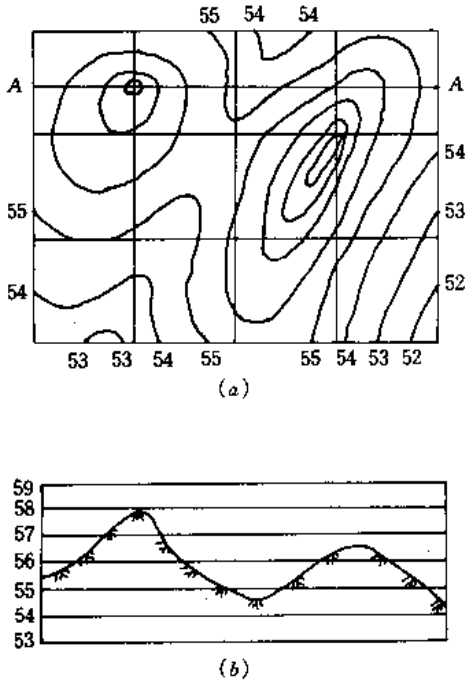


图 4－4

当填挖边界和方量都计算无误后，则可以根据图 4－2 在现场由方格点相应地量出各零点位置，然后用白灰线将相邻的零点连接起来，就得到填挖边界线，并在各方格桩注明填挖数，作为施工的依据。

二、等高线法

当现场地面高低起伏较大且坡度变化较多时，用方格网点计算地面平均高程不但困难，而且精度也会比较低，若改用等高线法计算，则效果比较好，尤其是原有大比例尺地形图的等高线精度较高时更为合适。等高线法的主要特点是根据等高线计算方量，其基本步骤和方格网法大体相同。首先也是在现场测设方格网，并在现场校对原有地形图的等高线位置，然后根据校对后的等高线图，计算场地的地面平均高程。计算的方法是先在地形图上求出各条等高线所围起的面积，乘上其间隔高差，算出各等高线间的土方量，并求出总和，即为场地内最低等高线 H_0 以上的总土方量 V。设 A 为场地总面积，则场地的地面平均高程 $H_{平}$ 为：

$$H_{平}=H_0+V/A \tag{4－4}$$

例：如图 4－4a 是场地等高线图，图 4－4b 是 AA 方向的断面图，场地内最低点高程 H_0 为 51.20m，场地总面积 A 为 120000m^2，根据图上等高线求出场地平均地面高程。

解：用求积仪或其它方法求出图上等高线所围起的面积列入表 4－1，由表 4－1 中可知，最低点 H_0 以上总土方量 $V=497760$m^3。则场地平均高程 $H_{平}$ 为：

$$H_{平}=H_0+V/A=55.35\text{m}$$

当场地平均地面高程求出后，设计和计算场地的设计坡度与设计高程，以及其它工作仍按方格法中所述。

表4—1 等高线所圈面积

高　程 (m)	面　积 (m^2)	平均面积 (m^2)	高　差 (m)	方　量 (m^3)
51.2	120000	119200	0.8	95360
52.0	118400	116200	1.0	116200
53.0	114000	109700	1.0	109700
54.0	105400	91200	1.0	91200
55.0	77000	55500	1.0	55500
56.0	13000 21000	21600	1.0	21600
57.0	2700 6500	6300	1.0	6300
58.0	300 3100	1900	1.0	1900
59.0	700			
总　计				497600

三、断面法

如果施工场地为窄长的带状地区，则可以使用断面图。基本方法是沿场地纵向中线每隔一定距离（如 20m 或 50m）测一横断面图，然后将横断面上的地形点，转绘到场地平面图上中线两侧，则可根据横断面上的地形点绘出等高线。这样即可按等高线法平整场地，也可直接根据中线上各点高程和各横断面图设计地面坡度和高程，计算填挖土方量。

第三节　民用建筑施工测量

在城镇及大中型工矿企业区域建设中，常常需要建设许多民用建筑及其附属建筑物。民用建筑一般是指居民住宅、宿舍、仓库、商店、学校、办公楼、礼堂等。建筑工程施工测量的任务是按设计的要求把设计图纸上的建筑物标定到实地上。施工中的测量工作主要是按设计要求，配合施工进度，测设建筑物的平面位置与高程，保证工程各部分按图施工。具体的说，民用建筑的施工测量主要包括：①平整场地测量，进行土石方工程量的计算；②建筑物主轴线的定位测量；③建筑物放线；④基础施工测量；⑤建筑物轴线的投测及高程传递；⑥建筑物变形观测和沉陷观测。上一节已对平整场地测量作了比较详尽的说明，而建筑物变形观测和沉陷观测将在第十章中讨论，在此只对建筑物主轴线的定位测量、建筑物放样、基础施工测量和建筑物轴线的投测和高程传递等内容作介绍。

一、建筑物施工放样前的准备工作

测量放线工作是房屋建筑施工的第一道工序。如果把房屋建筑的位置或尺寸弄错了，就会造成严重的工程事故，给人民财产和人身安全带来损失。因此施测前一定要做好准备工作，首先是熟悉和校核设计图纸，了解设计意图。主要的设计图纸如下：

（1）设计总平面图。设计总平面图是施工放线的总体依据，建筑物都是根据总平面图上给定的尺寸及关系定位的，在总平面图上给出了各建筑物之间的相对位置关系。

（2）单体建筑物平面图和剖面图。建筑物平面图和剖面图上相同部位的尺寸和高程是一致的，这两种图纸上都给出了建筑物各轴线的间距、房间和墙的厚度、门窗的位置，并给出了基础、室内外的地坪、门窗的设计标高。

（3）基础平面图。基础平面图上给出了基础轴线的编号及尺寸、墙基础厚度及建筑物的柱子等各基础纵横轴线的关系位置，以便与建筑物平面图互相对照。

（4）基础剖面图。图上注有基础宽度和埋设深度。所注高程，一般都是按不同设计剖面，表明房屋的结构形式和基础开挖的深度以及门窗过梁等相对于“±0”水准点的高程。

以上这些图纸是施测的基本依据，要逐张仔细校对各部分尺寸，分段长度应等于各段长度总和，矩形建筑物的两边对应尺寸应一致，必要时要将图上主要尺寸摘抄于记录本上，以便随时查找使用，切忌凭记忆用错尺寸；其次要全面了解现场情况，检测所有测量的控制点；平整和清理现场，按施工进度的要求，制定施工测量的作业方案，并检校仪器和准备必要的器材。

二、建筑物主轴线的定位测量

一般房屋的轴线是指墙基础或柱基础沿纵横方向布置的中心线，它们相互间一般是平行或垂直的，多呈矩形。我们将控制建筑物整体形状的纵横轴线或起定位作用的轴线称为建筑物主轴线。对于民用建筑物的施工测量，首先要根据总平面图上所给出的建筑物尺寸关系进行定位。所谓定位，就是把建筑物的轴线交点标定在地面上，然后再根据这些交叉点进行放样。建筑物的定位一般根据设计条件将建筑物的主轴线按设计要求测设到地面上，作为基础放样和细部放样的依据。由于设计条件不同，定位的方法也就不同，一般有下面几种。

1. 根据“建筑线”放样主轴线

在城镇建造房屋时，要按统一规划进行，建筑用地边界或建筑物轴线位置要经规划和设计部门商定，由规划部门的拨地单位于现场直接测定。如图 4—5 中的甲乙两点，就是拨地单位于现场直接测设的建筑用地边界点，称“建筑线”桩。建筑线一般与街道中心线平行。

具体测设方法如图 4—5 所示。欲根据甲、乙建筑线桩放样 17 号楼和 18 号楼的主轴线 AB、CD 和 EF、CH，可先在甲点安置经纬仪照准乙点，在视线方向上根据设计距离依次钉出 H'、F'、D'、B' 点，然后分别在 H' 和 B' 点设置仪器，精确放样 90°角，并在所得的方向线上量距钉出 H、G 和 B、A 等桩点，再置仪器于 G 和 A 点，检查 $\angle HGA$ 和 $\angle GAB$ 是否等于 90°，检查 AG 距离是否等于 BH 距离，如果误差在允许范围内，应根据情况作适当调整。然后，还要在轴线的延长线上加打引桩，以便开挖基槽后作为恢复轴线的依据。同

样，还要检查 H 和 B 点的距离及$\angle BHG$和$\angle ABH$是否为90°，最后根据矩形 $ABHG$ 放样出 C、D、E、F 各点，即得到17号楼和18号楼的主轴线 AB、CD 和 EF、GH。还需进一步检核各纵横轴线间的关系及垂直性。

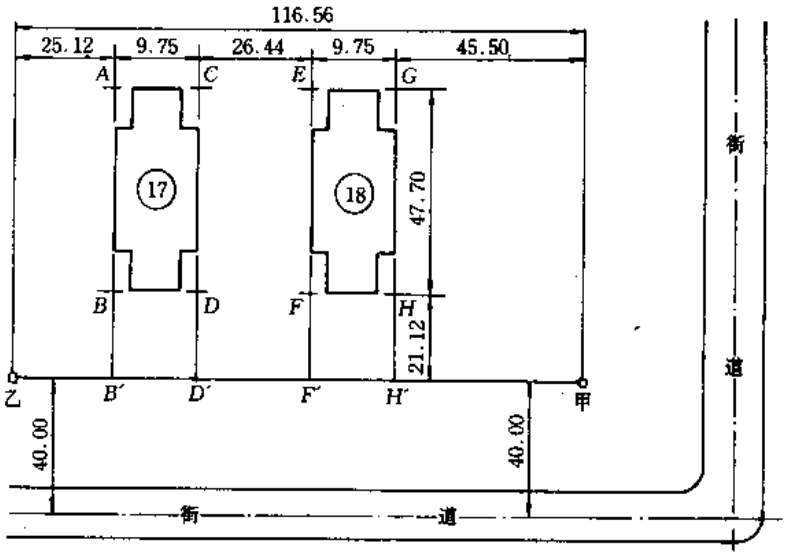


图 4－5

2. 根据与现有建筑物的关系位置放样主轴线

在建筑群内新建和扩建房屋时，设计图上往往绘出拟建建筑物与原有建筑物或道路中心的位置关系。此时，其主轴线可根据给定关系放样。图 4－6 是几种常见的情况，画有斜线为已有建筑物，未画的为拟建建筑物。

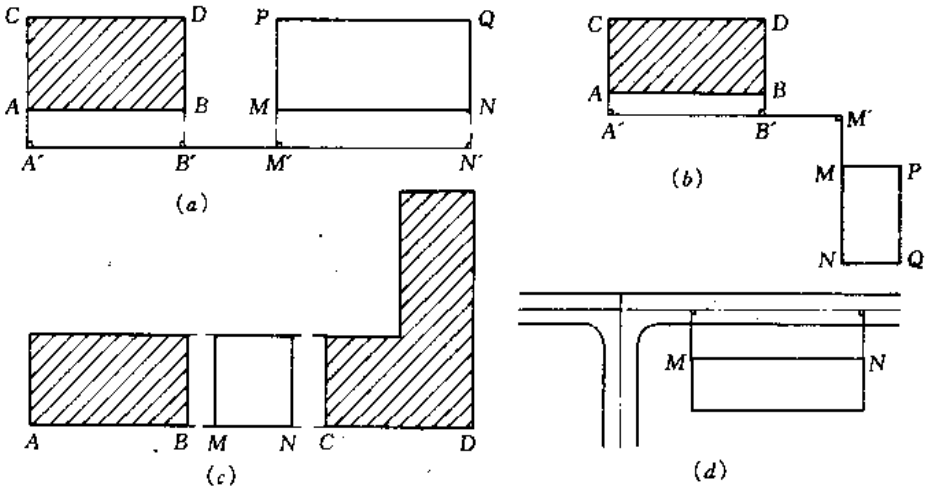


图 4－6

(1) 如图 4－6 (a) 所示，为了准确地放出 AB 延长线 BMN，(此时 AB 应为原有建筑物的主轴线，否则就是墙角外边线，MN 为 AB 边的平行线)，可先作 AB 的平行线 $A'B'$ (用勾股弦法或用钢尺沿墙边作 AC 和 BD 的延长线，截取 $AA'=BB'$，得 A'、B' 点)。在 B'

点安置经纬仪做 $A'B'$ 的延长线 $M'N'$（按设计关系尺寸钉出），再分别置仪器于 M'、N' 点做垂线，量出设计尺寸，即得 MN 和 PQ 主轴线。

（2）如图 4－6（b）所示，用上法作出 $A'B'$ 线后，按设计延长 $A'B'$ 至 M' 点，在 M' 点安置仪器作直角，再按设计钉出 MN 轴线点，根据 MN 放出轴线 PQ。

（3）如图 4－6（c）所示，由于受地形和障碍物限制（如 B 与 C 处墙有堆积物及棚屋），难以做出 AB 或 CD 的平行线，BC 两点连线也困难，此时，可先在原有建筑物高墙处确定出轴线点 B 和 C，用正倒镜投点法将经纬仪安置于 B、C 点连线上，再投到地面，即得线 MN 的方向。

（4）如图 4－6（d）所示，表明拟建的建筑物主轴线平行于沿道路中心线，先在道路上定出道路中心线，沿此中心线按设计作垂线，即得主轴线 MN 点。

3. 根据建筑方格网放样主轴线

通过施工控制测量建立了方格网之后，为建筑物提供了极为方便的条件，根据方格网和建筑物的坐标，利用直角坐标法就可以定出建筑物的平面位置。

如图 4－7（a）中，是总平面图中的某建筑物位置，Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ是已测设到地面的建筑方格网点。车间与建筑方格点的坐标，在建设单位转来的建筑方格网坐标表及各建筑物主轴线表中已经给出，图 4－7（a）为其示意图。

现用直角坐标法定出其四个角点，具体施测步骤如下：

首先根据方格网点坐标和厂房轴线坐标，算出放样所需数据，核对无误后绘出定位草图，如图 4－7（b）所示；然后安置仪器于方格点Ⅰ，瞄准点Ⅱ，在此方向线上，从Ⅰ点向Ⅱ点量 8.00m，测设出 a 点，由 a 点再向前量 84.00m 测设出 b 点，由 b 点再向前量 8.00m，恰好到Ⅰ点，用以做校核用。设置仪器于 a 点，使水平度盘“对零”后视Ⅰ点，用正倒镜设置 90°角，得 a－4 方向，由 a 点向前量 15.00m，测设出房间点 1，从 1 点继续向前设置 36m，即得房角点 4，再置仪器于 b 点，后视Ⅰ点，同法定 2、3 点。这样，该车间的主要轴线在地面上便被确定下来了，最后还要检核各顶点是否是 90°，各个边、角与对角线长。角度误差一般不超过 20″，边长误差根据放样精度要求来决定，一般不应低于 1/5000，根据这些轴线，便可以对建筑物进行细部放样了。

上述方法是根据建筑方格网，利用直角坐标法测设建筑物的方法与检核程序。由于采用这种方法定出的各轴线点均设在基础中间，在挖基础土方时，绝大多数要被挖掉，而失去了指导施工的意义。因此在建筑物定位时，多在建筑物边线外侧钉一排控制桩。

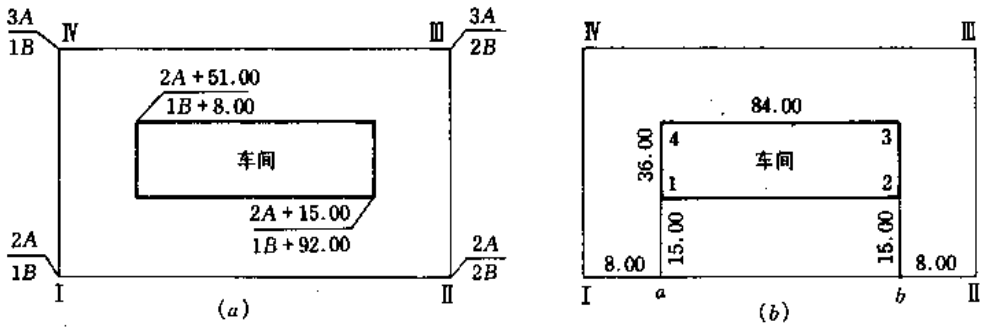


图 4－7

控制桩一般钉在基槽边外侧 2～4m，不易受施工干扰的地方，并且要便于引测和保存桩位。为了保证建筑物的测设精度，在大型建筑物放线中，先测设主要轴线的控制桩，并在与控制桩所形成的控制网的四个顶点处，设置较控制桩更为牢固的角桩，作为控制桩使用。角桩与控制桩测设方法与前所述的 1、2、3、4 四个角点完全一样，且要求闭合精度在允许范围之内。测定完毕后，再进一步对建筑物进行细部放样，将对应桩位拉上线，各线的交点也就是各中心桩点位，就可以据此指导施工。在施工过程中，即使有个别桩被破坏，也可以根据其它桩位很快修复。

4. 根据控制点放样主轴线

在山区或建筑场地障碍物较多的地方，一般采取布设导线点或三角点作为放样的控制点。如图 4－8 所示，可以根据现场情况用极坐标法或角度交会法放样建筑物主轴线 AB 和 CD 点。

当用极坐标法放样时，先根据Ⅰ、Ⅱ、A、B 点已知坐标求出放样数据夹角 α_A、α_B、β_A、β_B 和 S_{1A}、S_{1B}、S_{1A}、S_{1B}，分别安置仪器于Ⅰ、Ⅱ两点，转角量距定出 A、B 点。两次所放出的点位应相同，若误差在允许范围之内，则取其中点作为放样点。如果控制点距离所放样轴线较远或量距有困难时，则可用两台仪器安置在Ⅰ、Ⅱ点上转出 α_A、α_B、β_A、β_B，交会定出 AB 点。为了保证交会点精度，一般用第三个控制点方向进行检核，交会角应在 30°～150°之间。

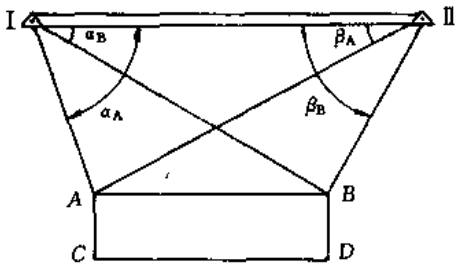


图 4－8

三、建筑物放线

建筑物主轴线定出后，尚需详细放样建筑物各细部纵横轴线的交点位置。轴线交点用木桩，桩顶钉上小钉标定点位，称为中心桩，如图 4－9 所示。再根据中心标桩位置，用白灰撒出基槽边界线，若为桩基工程，则应先定出钻孔的位置。由于在施工开槽时，中心桩要被挖掉，因此在槽外各轴线的延长线上应设置施工控制点，也叫保险桩或引桩，作为开槽后各阶段施工中确定轴线位置的依据。控制桩一般设在槽外边 2～4m 处（最好与中线的距离为整米数），不受施工干扰，并便于引测和保存桩位，延长线的标志有龙门板和轴线控制桩两种做法。

1. 龙门板的测设

在一般民用建筑中为了施工方便，通常在基槽外一定距离处设龙门板，如图 4－9 所示。在轴线的两端处钉一木桩，再在木桩上钉水平木板就是龙门板，将各轴线或细绳挂垂线投放在龙门板上，钉上小钉，以相应点拉线，就可表示出轴线位置，并可将基槽或墙的宽度在龙门板上表示出来。一般设置龙门板的要求是：龙门板应平行（或垂直）于建筑物轴线，在离开基槽外边缘 1.5～2.0m 的地方设置，还要结合土质及槽深情况；建筑物四周的龙门板应各自保持一条直线；龙门板顶面要保持水平，为此要先在龙门桩上放样水平线，最好使其高度为“±0”的位置，亦可高于或低于“±0”某一常数，但要在龙门板上标明。

龙门板的具体设置方法如下：

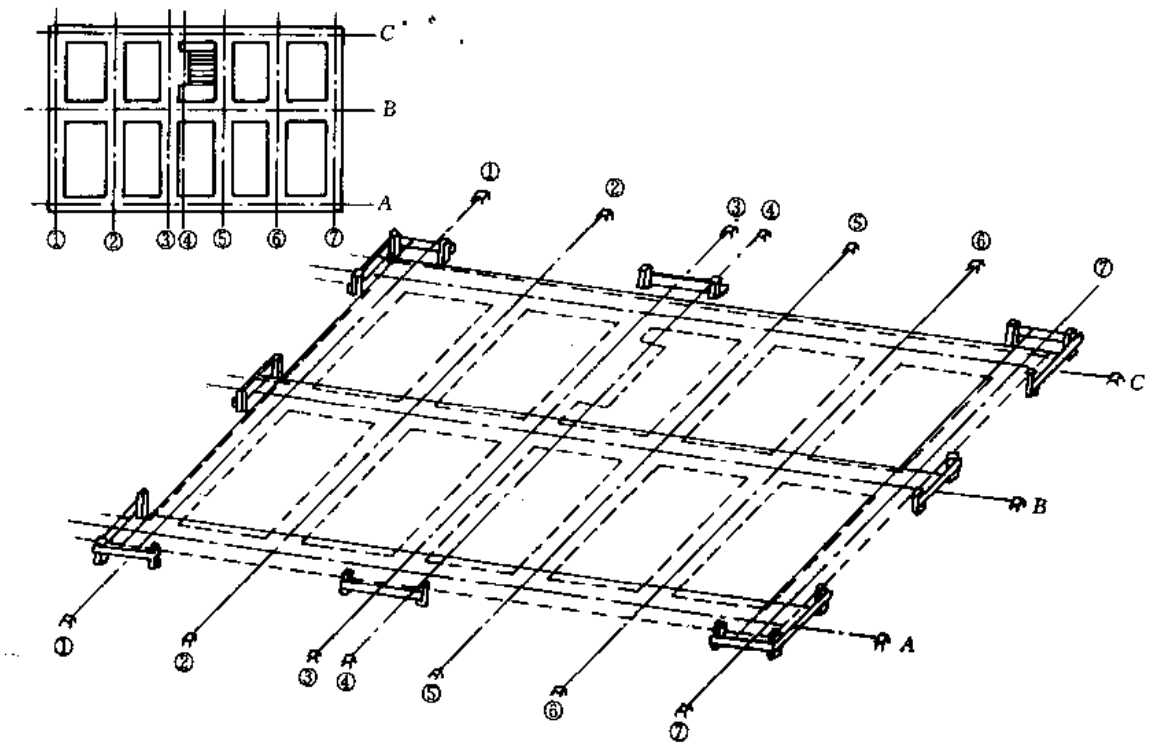


图 4－9

(1)在建筑物四周和中间隔墙的两端基槽外约 1.5～2.0m(依槽深和土质情况确定)处设置龙门桩。桩要钉得竖直、牢固，桩与基槽平行。

(2) 根据场地内的水准点，在每个龙门桩上测设出室内或室外地坪设计高程线，即±0 标高线，如地形条件不允许，可测设比±0 高或低某一常数的标高线。根据标高线把龙门板钉在龙门桩上，使龙门板上边缘的标高正好为±0。此后，用水准仪校核龙门板的高程，如发现有差错应及时纠正。

(3) 把轴线引测到龙门板上，为此将经纬仪安置在控制桩或中心桩点上，瞄准同一条轴线的另一控制点，沿视线方向在龙门板上定出一点，并钉一小钉，作为轴线标志。

(4) 把中心钉都钉在龙门板上以后，应用钢尺沿龙门板顶面检查房屋轴线的距离，其误差不超过 1/2000。检查合格后，以中心钉为准将墙宽、基槽宽标在龙门板上，最后根据槽的上口宽度拉线画出基槽灰线。

设置龙门板后，施工人员即可自行掌握控制住“±0”以下各层标高和槽宽、基础宽和墙宽等放线施工。但它使用木材较多，且占用场地，影响交通。近年来有些单位不再用龙门板而只设各轴线的施工控制桩。或者在一些大型建筑工程，以角钢连接成钢质龙门板，不但牢固而且可以拆下多次使用，节省了大量木材。

2. 轴线控制桩的测设

如图 4－10，在建筑物定位时，不设外轮廓轴线交点的角桩，而是在基槽外侧 1～2m 处，测设一个与建筑物 $ABDC$ 平行的矩形 $A'B'D'C'$，称为矩形控制网。然后，测出各轴线在此矩形网上的交点桩，称为轴线控制桩。最后以各轴线控制桩定出基槽上口位置，并撒出基槽灰线。

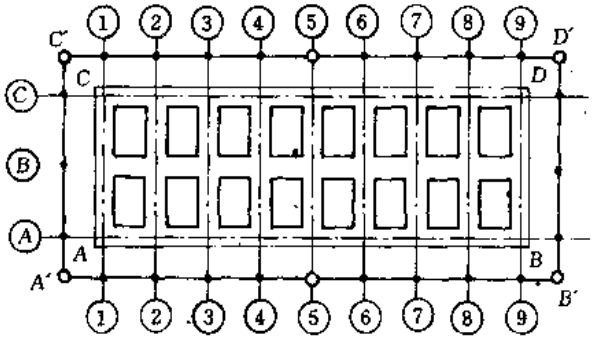


图 4－10

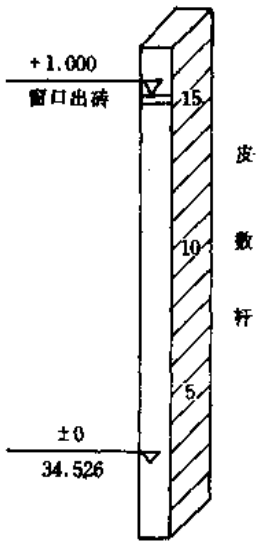


图 4－11

四、基础施工测量

建筑物各轴线放样后，即可按轴线钻孔中心位置打钻、浇灌钢筋混凝土并做基础圈梁，房屋的基槽边线可按照基础平面图上的尺寸，在已经定出轴线的基础上定出，并画出灰线。但应注意的是，基槽顶面尺寸应等于或大于基地尺寸，而其大小视土质与基槽的深度而定，然后按基槽灰线破土开挖。当挖到接近槽底设计高程时，就应该在槽帮上放样出距槽底设计高程为某一常数的水平桩，并用此水平桩来控制挖槽深度。

为了施工方便，在槽壁各拐角处和每隔 3～5m 的地方均要标一个水平桩，必要时，还可以沿水平桩弹出水平墨线，作为控制槽底和打基础垫层时掌握高程的依据。垫层打好以后，根据墙中心线桩或龙门板上的小钉，在垫层上用墨线弹出墙中心线或基础边线。由于整个墙身砌筑均以此为基础，所以要严格校核后方可砌筑墙身。然后，就可以立好基础皮数杆，开始砌 筑基墙。当墙身砌筑到±0 高程的下一层时，可做防潮层抄平并立皮数杆，再向上砌筑。房屋基础墙的高度就是利用基础皮数杆，也叫线杆或程序尺，是一根木制的尺子，是砌墙时掌握高程和砖行水平的主要依据，一般立在建筑物拐角和隔墙处，如图 4－11 所示。在杆上，事先按照设计尺寸、砖的厚度和灰缝厚度画出线条，并标明±0、防潮层和门窗口及过梁、预留孔等其它部分的高度和尺寸大小。皮数杆上所标明的位置是根据建筑物设计剖面图及各构件规格、尺寸和标高确定的。画皮数杆时，砖的行数从±0 起向下注明。立皮数杆时，可在立皮数杆处打一桩，在砖上用水准仪放样出±0 的高程位置，把皮数杆上的±0 与桩上的±0 对齐，然后把皮数杆钉牢在木桩上，作为砌筑墙的标定依据。

五、砌墙身的测量

当基础砌到防潮层以后，要把第一层楼房的墙中心和墙边线用墨线弹到防潮层面上，并把这些线延伸到基础墙的侧面。同时，放出门窗口和其它洞口的边线位置，这些线要画在基础墙的主面上，墙身立面仍用皮数杆来控制。墙身皮数杆是按照设计尺寸、砖的厚度和

灰缝厚度刻划的，另外，还要标定门、窗口、圈梁、楼板等的标高位置。墙身皮数杆是从±0起向上注记的，一般在墙身砌起1m以后就在室内砖墙上定出0.50m的标高，并弹墨线标明，供室内地坪抄平和室内装修用。

对于多层建筑物，还要用经纬仪将墙中心转设到上层的楼板边缘或柱顶上，作为上一层施工的依据。转设时，将经纬仪安置在墙中心线桩上，后视底层墙中心线标高，仰起望远镜，在楼板边缘或者柱顶上标出一点，倒镜后再标出一点，两点应重合，如不重合，而误差在允许范围以内时，其中点为墙中心线的正确位置。各条墙中心线转设上去以后，要用钢尺量其间距作为检核，检查合格后，才可以施工。为了保证工程的质量，仪器应事先进行校正，转设时仪器应严格整平和对中。为了避免仰角过大，经纬仪距建筑物的水平距离应大于建筑物的高度。

六、多层建筑物的轴线投测和高程传递

在多层建筑物砌筑或安装上部构件过程中，测量工作主要有两点：

（1）轴线的投测。对于多层建筑物，一般是由施工人员利用挂垂球纠正墙角（或轴线），使同一部位墙角（或轴线）在同一铅垂面内，将轴线的位置逐层传递上去。这样既保证了墙身铅直又满足了轴线间的位置关系，方法简单易行。但有时因受外界干扰，如风比较大或建筑物较高，垂球线摆动，不易准确定出建筑物轴线位置。这时，可用经纬仪把轴线位置投测到楼板边缘或柱顶上，作为第二层施工的依据。投测时，将经纬仪安置在控制桩点或轴线延长线上，照准墙底部已弹出的轴线，仰起望远镜在上层楼板边缘或柱顶上标一点。再用倒镜投测一点，取其中点位置。轴线投测到上层楼板后，还需要检核各轴线间距是否符合设计要求。各层轴线均按此法投测。

（2）高程传递。多层建筑物施工过程中，常常要由下层楼板向上层传递高程，以便使楼板、门窗口、室内装修等工程的标高符合设计要求。高程传递一般可以采用以下几种方法：①利用皮数杆传递高程，皮数杆由±0处起将门窗口、过梁、楼板等构件高程注明；②利用钢尺直接垂直丈量，如某墙角由±0点起向上丈量，将高程传递上去；③以悬挂钢尺法用水准仪读数，向高处传递高程。

各层楼房施工中的测量工作，主要是根据下层投设上来的轴线，在楼板上分间，弹线；利用传递上来的高程，做该层抄平，即一般放样出一条高于该层地面+0.500m的水平线，作为该层地面施工及室内装修掌握高程的依据。

对于高层建筑物及超高层建筑物，在施工方面的主要特点是：建筑工地多较狭窄，受周围已有建筑物的限制，且建筑物又很高，施工技术要求高，所以在施工过程中对施工测量的要求也相应较高。

根据高层建筑物的施工特点，测量工作的主要任务是解决轴线在各层的定位问题，即保证高层建筑物的垂直度，下面简要叙述一下高层建筑物施工测量的要求和方法。

1. 主轴线的选定和放样

目前，我国高层建筑物多为独立的工程，可不作整体平面控制，按适当的高层建筑物基础轴线或柱列轴线定出以后，组成房屋矩形控制网作为平面控制的依据。主轴线定出以后，将其在基础开挖以外的适当地方埋设固定标桩，放样主轴线的精度要求一般是测角中误差为±10″，边长丈量相对精度为1/10000。

2. 房屋矩形控制网的放样

在建立房屋矩形控制网之前，应对所放样的主轴线进行检查，两条轴线的夹角应满足90°±10″的精度要求，如果超出限差，则要进行改正。一般改正短的那条轴线，改正方法与建筑方格网主轴线相同。然后将设计的柱列轴线放样并标定于实地，形成房屋矩形控制网。柱列轴线放出以后，要进行检核调整其误差，使其在误差允许范围之内。

3. 高层建筑物柱列线的投测

高层建筑物施工时，其柱列轴线要逐层向上投测，不断校正柱子的垂直，目的是为了控制高层建筑的垂直度，为此首先必须控制建筑物各柱列轴线的平面位移，根据《冶金工业建筑安装施工测量规程》中的规定：建筑物的垂直偏差不得超过建筑物高度的1/1000，总误差不得大于50mm。如果采用一般挂垂球或用经纬仪投测的方法则很难达到精度要求，为此目前许多单位已采用激光铅垂仪来控制柱列轴线的平面位置，这是高层轴线投测的比较理想的方法。其具体的操作方法如下：

(1) 浇筑底层混凝土时，预先埋设三块固定标板，如将 A、B、C 三点分别精确放样在标板上，$\triangle ABC$ 为一直角三角形，$\angle B=90°$。这三点都选在纵横轴线的平行线上，作为安装激光铅垂仪的测站，对所放样的 A、B、C 点要做到实测复核，保证 B 点处为直角，并把误差控制在2mm以内，这样就在底层形成了一个直角三角形的控制图形，作为各层投测各柱列轴线的依据。

(2) 进行向上各层施工时，对每一层楼板应在相应的 A、B、C 处的垂直方向上预留出激光束通过光孔。例如在二层楼施工完成后，可将激光铅垂仪分别安放在每层固定标板的 A、B、C 点上，对中整平，开动激光电源，向上发射激光束透过楼板上的预留通光孔，在上面放上激光靶就可以显示光斑位置。为了精确确定出点位，可旋转激光束求其轨迹（为一圆周），找出圆心，即为所求位置。当 A、B、C 三点用激光束投在上层后，就形成了相应的 a、b、c 直角三角形。将经纬仪安置在 b 点，检查 b 处是否为直角，并量取 ab、bc 的距离应与设计距离相等。投测完毕后，将 a、b、c 点在上层固定下来，其它各层均作如此投测。有的工程，是采用提升双梁平台工艺施工的，平台下面逐渐提升，逐步形成多层框架，这就需要利用激光仪将点位投测到双梁平台上。先校正双梁平台，控制住提升前后的平台上同一轴线位置的铅直性，以达到同步提升的目的。

(3) 根据在每一层所投测出的相应轴线点，再在各层放样出各柱列轴线，校正各柱子水平位移及其垂直度。

七、高程控制

为了保证高程的放样精度，充分利用建筑区域附近的已知水准点，按四等水准测量要求，在建筑区域内建立施工用的水准点，并在附近固定建筑物上放样出按设计地坪高度所需的“±0”水准点。基础及底层施工完成后，可在柱子或运输筒壁上放样出“±0”水准点的位置。向上层传递高程 一般用钢尺由“±0”水准点向上铅直丈量，并加各项改正，按设计放样出各层地面高程位置，作出标记以便利用。

此外，在高层建筑施工过程中，当利用提升双梁平台作为一种施工手段时，尚需对平台的提升作抄平测量，控制提升误差，进行调整。高层建筑物的屋顶钢架安装，也需要进行安装测量等。

第四节　工业建筑施工测量

一、厂房矩形控制网的测设

在整个工业建筑场地施工控制网建立起来之后，为了对每个厂房或车间进行施工放样，还需对每个厂房或车间建立厂房（或车间）施工控制网。由于厂房多为排柱式建筑，跨度和间距大，但间隔少，平面布置简单，所以厂房施工控制网多数是布设成矩形的，故也称厂房矩形控制网或者简称厂房矩形网。在拟定厂房矩形控制网的布设方案时必须掌握和了解厂房的平面布置情况、设备基础的布置情况、厂房柱子中心线和设备基础中心线的有关尺寸、厂房施工坐标和标高等。设计厂房矩形控制网所需的图纸资料为：①厂区总平面图；②1∶500～1∶1000大比例尺地形图；③厂房柱基、设备基础施工图；④各种管线施工图；⑤厂区总体规划、总体设计施工总平面图；⑥平整场地、土建施工、结构安装等施工方案；⑦厂区控制区的有关资料；⑧施工总进度安排。厂房矩形网的布设同时要考虑到施工现场的实际情况，如地形变化、放样控制点的应用等；还要研究厂房结构、设备平面位置和生产工艺流程的特点（连续性的程度与精度要求）。并且还要了解施工的方法与程序，有的厂房是开口施工，即先将设备基础或柱子基础同时施工，进行结构安装，再把厂房四周砌墙封闭；有的厂房是闭合施工，即先盖厂房后再进行设备基础施工。施工安排也不一样，有的是同时施工，有的是逐步施工。所以，设计方案对这些因素都要考虑进去。厂房矩形控制网的测设方法可用角桩测设法和主轴线测设法。

1. 角桩测设法

首先根据场区方格网，测设出矩形网的两个角桩 A' 和 B'，然后由 $A'B'$ 测设 C' 点和 D' 点如图4－12，最后校核 $\angle C'$、$\angle D'$ 和 $C'D'$ 边长，并做必要的误差调整。这样，$A'B'$ 边的精度直接受方格网精度的影响，而且测设误差积累到 $C'D'$ 边上，因此这种形式的厂房矩形网适用于精度要求不太高的中、小型厂房。

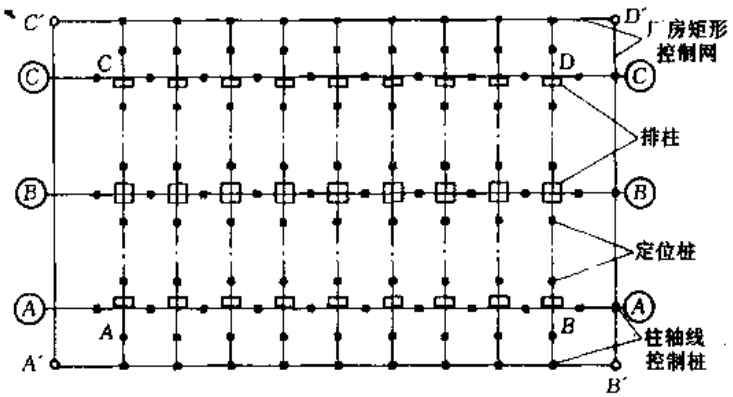


图4－12

2. 主轴线测设方法

厂房主轴线指厂房长（纵）、短（横）二条基本轴线。它是厂房建筑和设备安装平面控

制的依据，如图 4－13 中的Ⅰ－Ⅰ轴和Ⅱ－Ⅱ轴，0 为轴线主点。主点 0 和长轴两端点 WE，是根据建筑场地施工控制网或原有控制网测设的，并进行适当的调整使其三点在一条直线上。ON_1 与 OS_1 是根据 0Ⅰ轴初步测设的短轴方向，然后精密测出 α_1、β_1 和 α_2、β_2 后，按式（4－5）计算的 δ_1 和 δ_2 进行调整，使短轴Ⅱ－Ⅱ准确地垂直于长轴Ⅰ－Ⅰ。

$$\delta_i = l_i x \frac{(\alpha_i - \beta_i)}{2\rho} \qquad (i=1,\ 2) \qquad (4-5)$$

主轴线 ON、OE、OS 和 OW 的长度必须按规定的精度测设。如冶金工业建筑安装工程测量规范中规定，精度要求分为三级：第一级要机械传动性能较高，有连续生产设备的大型厂房，其量距精度为 1/30000；第二级是有桥式吊车的生产厂房，量距精度为 1/20000；第三级是一般厂房及仓库，量距精度为 1/10000。主轴线定出后，可由各轴线端点，用一般精度测设矩形控制网 $ABCD$ 的初步位置和各边上柱轴线控制柱的初步位置。然后用规定精度，对控制网的各边和各角度进行观测，以 O 点位置为准，进行平差计算，求出各点实测坐标，最后按各点设计坐标，在实施调整各点位置。当控制网上各点位置调整好以后，各边上柱轴线控制点也应做相应的调整。这种方法的特点是精度高，但工作量大，一般多用于大中型厂房。

3. *厂房矩形网的标志*

厂房矩形网点位经初步放样后均需换成永久性标志桩，对主轴线点要求稳定坚固；除加大体积外，并在底部插入粗钢筋，采用现场支模浇筑混凝土。距离指标桩多采用预制混凝土桩现场埋设，按所在地区自然地理条件，可做成不同高度规格的标桩。不论上述哪一种标桩，顶部都埋设有金属板，以便刻线定点使用。同时，还埋设有圆头铆钉，作为施工临时水准点使用。

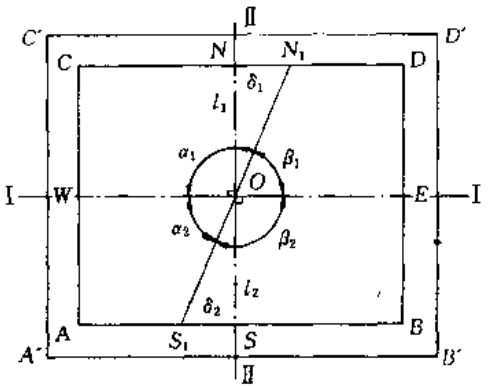


图 4－13

二、基础施工测量

在工业厂房结构中，柱子基础和设备基础是关键的组成部分。柱子基础是对厂房的土建部分（如柱子、吊车梁及轨道、吊车、桁架等），起着承重作用；设备基础则是各种机械正确安装和安全运行的保证。一般工业厂房柱子是大量的，它的基础形状多成矩形，厂房柱子基础按基础与按柱子的结构关系和施工工艺可分为两种类型：其一为直接现场浇灌混凝土；其二为装配式结构，柱子可预制成混凝土或钢结构预制件，插入到施工好了的杯形基础中，做二次浇灌或装配在带地脚螺丝的基础上。在此主要叙述装配式结构基础的施工测量工作。

（1）基础定位。在基坑开挖前，必须把基础中心线标定到地面上，并画出基坑边缘的灰线。为此，先从基础平面图上查出欲定位的基础轴线号数及其长宽尺寸，然后在各控制桩上安置经纬仪，以标定各基础的定位桩 a、b、c、d（a 和 b 与 c 和 d 连线的交点即为基础中心位置），如图 4－14 所示。定位桩要位于基坑以外相当于基坑深度 1～1.5 倍的地方，这四个定位桩不仅可以作为开挖基坑的依据，而且作为设置垫层树立模板以及杯形基础中心放线的依据。基础定位桩测设以后，根据基础平面图的设计尺寸画出基坑开挖灰线，即可

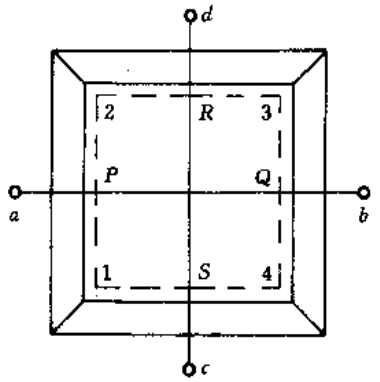


图 4—14

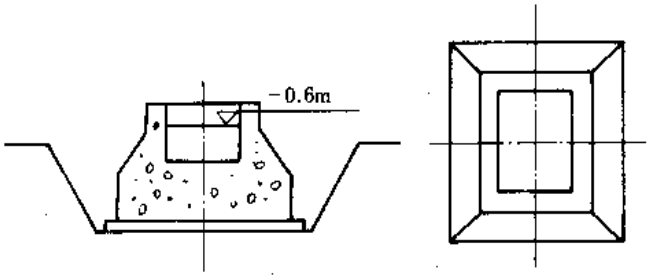


图 4—15

开挖基坑。

(2) 基坑坑底标高的检查。基坑挖掘到坑底设计高程时，需用水准仪检查坑底标高。基坑挖好以后，还要再检查一次。

(3) 浇灌垫层的测量工作。浇灌垫层以前，要把基础轴线投到夯实的坑底面上，并根据坑底轴线放出垫层的位置。一般工业厂房基坑较深，须在相应的定位桩间拉上细绳，用垂球将轴线投到坑底，弹出墨线，如图 4—14 中的 PQ 与 RS。然后用角尺定出垫层位置 1、2、3、4，并弹上墨线以此作为依据来浇灌垫层。标设垫层面的标高时，可在坑底打一木桩，使木桩顶面高出垫层面约 20mm，将垫层面标高画在木桩上，依此进行施工。

(4) 基础模板的定位。在基坑内浇灌混凝土垫层以后，根据基坑定位桩将其基础纵横轴线投影到垫层面上，根据轴线放置模板，并同时用水准测量方法检查模板杯口的标高。

(5) 杯底标高的检查。杯底基础浇灌完毕以后，要检查杯底标高是否符合设计要求，如果杯底高于设计值，则高出的部分除去；如果杯底低于设计值，则应进行砂浆抹面。检查时，可在高于杯底的某一整数处做一水平标记。如图 4—15 中所示，即水平线到杯底的距离为 0.6m，以此作为杯底抹面检查的依据。

三、柱子安装测量

1. 准备工作

在吊装前要检查柱子的规格尺寸是否符合设计要求，根据轴线控制桩把定位轴线投到杯形基础顶面上并用墨线标明，如图 4—16 所示。将混凝土柱子身上三面弹出中心线（墨线），由牛腿面按设计高程沿柱身向下量出“±0”水准点位置，以“±0”位置为准再量至柱底四角，得出的长度与设计数值比较，施工人员可根据基础杯底的实测标高加以修正使柱子竖起后满足牛腿面的设计高程。因为加垫板比铲低容易，所以为了避免剔凿，浇灌柱基混凝土时，一定要注意杯口底面一定要比设计高程略低，杯底标高容许偏差为 0～—10 mm。

2. 柱子安装测量

准备工作完成后，即可开始吊装柱子。将钢筋混凝土柱子预制件起吊，插入杯口中，使柱身中心线（墨线）与基础面中心线对齐对正，如图 4—17 所示。用钢丝缆绳拉紧，杯口四周插入木楔或铁楔来进行调整固定，使之中心线的误差不大于 5mm。在现场实地放样的

±0 位置与柱子上的±0 位置比较，其误差不应超过 3mm。如果是钢柱现场逐次拼装，则可根据基础中心线标板在基础面弹出墨线，同时按地脚螺丝标高加设垫板进行安装，配合经纬仪校正竖直，水准仪抄平，使其符合设计要求。

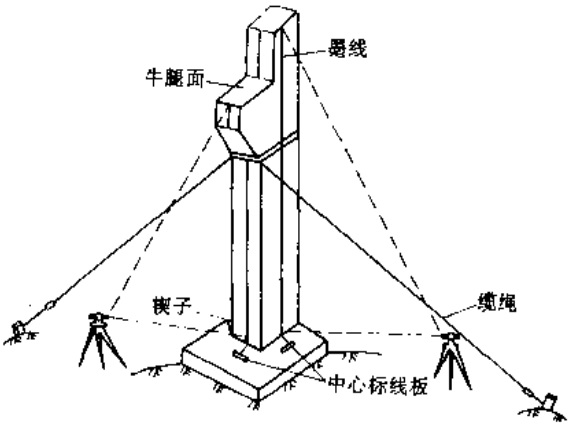


图 4－16

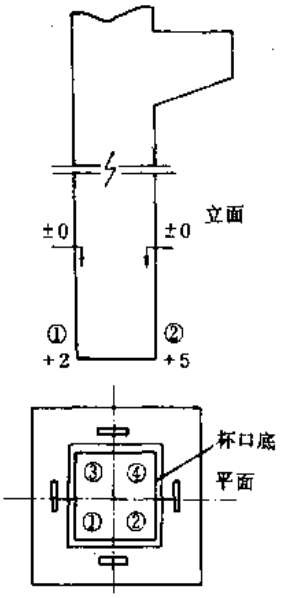


图 4－17

3. 垂直度校正的方法

（1）单个柱子校正。用两台经纬仪分别整置在互相垂直的两条轴线上，同时进行垂直度校正。此时，所用的经纬仪必须经过严格的校正，尤其是对横轴的检验。为了便于观测，仪器离柱子不要太近，倾角以不超过 45°为宜。经纬仪先照准柱子底部中线，逐渐仰起望远镜，分别照准柱子中部及顶部等标志。此时柱子中心线应一直在视线上，如有偏离，则用钢缆绳上的紧缩器拉紧或放松使柱子竖直。同时，调整杯口固定楔子。经两台经纬仪同时在柱子两侧方向反复校正，直到两中心线同时满足两架经纬仪对垂直度的要求为止。满足垂直度条件后将上视点投至柱下，量出其偏离误差。

（2）成排柱子校正。在实际工作中，遇到的一般多是成排柱子，安装时一般是一次把成排成列的柱子都竖起来，然后再进行校正。这时可把仪器安置在轴线上的一侧，一次可校正几根柱子（对变截面的柱子要另行处理），但仪器偏离轴线最好不要超过 15°，面对柱子变截面一侧的经纬仪必须放在轴线上不能偏离。校正柱子时，避免在烈日下进行，因为柱子受强烈阳光照射后，会向阴面一侧弯曲，使柱顶发生一个微小的水平位移。施工中，还要随校随向杯口浇筑豆石混凝土加以固定。直到吊车梁、联系梁、屋架支撑系统连接固定成为一个整体后，再撤下揽风绳。柱子竖直校正后，还要检查一下牛腿的标高是否正确。检查方法是，先用钢尺沿两根柱身将标高传递到牛腿上，然后把水准仪直接放在第三根柱子的牛腿上用已有标高的两根柱子作后视，检查每根牛腿面标高。

柱子安装的容许偏差为：柱下端中心线与定位轴线偏离不大于 5mm；垂直偏差不大于柱高的 1/1000，且数值不大于 20mm；牛腿面的标高与设计标高的偏差为：柱高在 5m 以下的不超过±5mm，柱高在 5m 以上的不超过±8mm。

四、吊车梁安装测量

厂房柱子安装完毕后，则需要在每排柱子的牛腿面上铺设吊车梁及吊车轨道，如图 4－18 所示。对它们安装测量的基本要求是使吊车轨道安装在设计的空间位置，即梁中心线、轨道中心线及牛腿面中心线在同一竖直平面内，两轨道间跨距满足设计要求；梁面与轨道面在设计标高位置上。安装前首先要了解施工图纸，将各种设计数据，如梁面、轨道标高、跨距、厂房中心线及柱子中心线的关系尺寸记入手簿，并绘制施工草图，然后到施工现场了解施工安装方法，根据实际情况决定施测方案。一般步骤为：

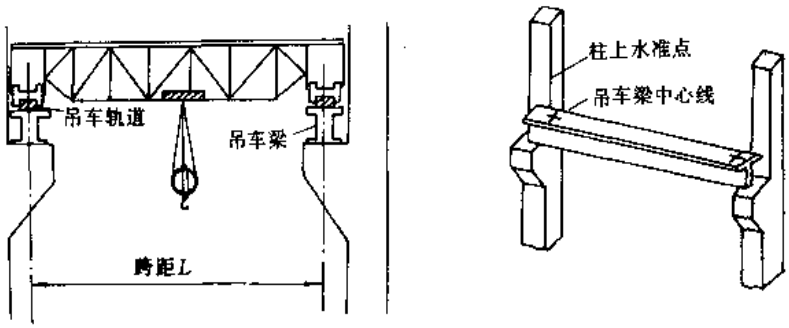


图 4－18

（1）用前述方法检查每根柱子牛腿面的标高。

（2）在每根吊车梁的顶面和两端弹出吊车梁中心线。

（3）柱子虽然经过校正，但仍有不可避免的误差。因此不应根据中心线找吊车梁中心线，而一定要在柱子经过校正、浇筑杯口混凝土且达到一定强度后，根据厂房纵轴线控制桩在地面上定出吊车梁中心线。如图 4－19 中的 $A'A'$ 和 $B'B'$。吊车跨距 $A'B'$ 的尺寸要用钢尺检核，要平均改正 A' 和 B' 的位置，使之严格符合设计要求。

（4）安置经纬仪于厂房一端的 A' 点，照准另一端点的 A' 点，仰起望远镜，在每根柱子上的牛腿上测设出吊车梁中心线并弹出墨线。同法测绘出另一排柱子的吊车梁中心线。弹好墨线后，便可据此安装吊车梁。安装时，应使吊车梁的中心线与牛腿面上中心线相吻合，误差不应超过 5mm。吊车梁安装完毕后，还要在梁上设置一个水准点，并做一个明显的标志。据此水准点检查吊车梁面标高，每隔 3m 测一点，偏差应在＋10～－5mm 范围内，钢吊车梁上表面标高容许偏差为±5mm，垂直度容许偏差为梁高的 1/500。

五、吊车轨道安装测量

吊车轨道安装前，须先对梁上吊车轨道中心线进行检测。此项检测多用平行线法（俗称借线），如图 4－19 所示。首先在地面上从吊车轨道中心线向厂房量出 1m 的平行线 $A''A''$ 和 $B''B''$，然后安置经纬仪于此平行线的一端 A'' 上，照准另一端 A'' 后，制动照准部，仰起望远镜向上投测。这时另一个人在梁上移动横放的尺子，当视线正对准木尺的顶点时，尺的 1m 刻划应在吊车轨道的中心线上，依同样的方法可测设厂房的另一端的吊车轨道中心线。吊车轨道安装时，可将经纬仪安置于吊车梁上或利用专门仪器架将经纬仪安置于吊车梁上，依据测设标志对吊车轨道进行校正。在对吊车轨道按校正过的中心线进行安装就位的同时，

可将水准仪直接放在吊车梁上，对轨面标高进行检测。吊车轨安装完毕后，应对中心线、跨距及轨顶标高进行一次全面检查。

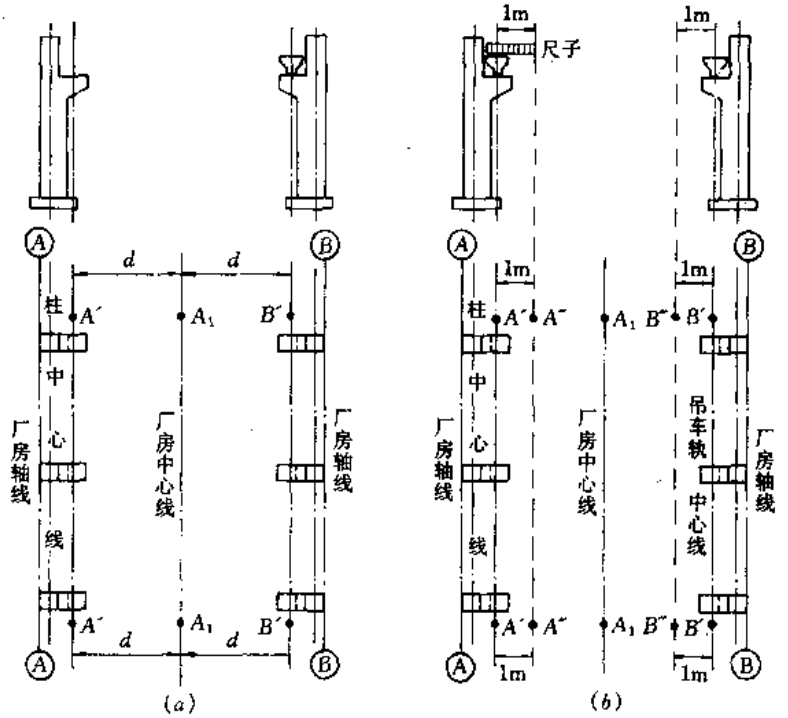


图 4－19

(1) 中心线检查。安置经纬仪于轨道中心线上，再逐一检查轨道面上的中心线是否都在一条直线上，其误差不应超过 3mm。

(2) 跨距检查。用经过检定的钢尺悬空丈量轨道中心线的距离，它与设计跨距之差不得超过 5mm。此时，量距要加上尺长、温度及其它改正数。

(3) 轨道顶标高检查。用水准仪根据吊车梁上的水准点进行检查，在轨道接头处各测一点，容许偏差±1mm，中间每隔 6m 测一点，容许偏差为±2mm，两根轨道相对标高容许偏差±10mm。

六、屋架安装测量

在吊装工程中，屋架是与吊车梁同步进行安装的。从厂房的一端起，安装好吊车梁后，就开始安装屋架、屋面板及天窗架等，以后每安装一个节间的吊车梁就安装一榀屋架，并安装屋面板、天窗架等其它部件，以形成一个整体的空间结构。最后吊车从厂房的另一端退出。

屋架校至垂直后，立即用电焊固定。焊接时，先焊接屋架两端成对角线的两侧边，再焊另两条边，避免两端同侧施焊。

屋架安装的竖直容许误差为屋架高的 1/250，钢桁架容许偏差 1/250 梁高，但不能超过 15mm，薄腹梁容许偏差为 5mm。

七、机械设备的安装测量

在现代化工业企业中，机械设备是多种多样的，其安装精度的要求也不尽相同。对于普通的中小型机械设备安装，只要按中心线标板拉线或挂垂线找正即可。高程方向可利用加垫板测设调整解决。然而对于现代化连续生产机械设备的安装，则必须采用较高精度的测量手段。

在机械设备安装前首先需要对设备基础进行验收。所发现的问题在机械设备就位前加以处理，确保工程质量及安装工作的顺利进行。验收前，由基础施工的基础资料：①厂房矩形网及设备基础控制网（平面及高程），施测资料和图纸；②有关设备基础设计与实测的资料和图纸，如中心线的位置及坐标位置、基础及地脚螺丝的外形尺寸、标高及误差情况，由安装单位进行验收。

在工业企业的施工中，还有各种管道工程的施工测量，将在其它章、节中论述。下面就竣工测量的有关内容作以简要的说明。

八、竣工测量

由于各种因素的影响，原设计意图不可能在施工中毫无变动地体现出来，竣工测量是竣工后实际情况的全面反映。这种对建筑物或者构筑物竣工后所进行的测量我们称之为竣工测量。竣工测量最主要成果是总平面图，还有各种分类图、断面图及详细坐标、高程表等。竣工测量是为了：①反映设计和施工的变更；②便于生产经营中的维修工作（特别是对地下管道等隐藏工程的检查与维修工作）；③为企业的改建和扩建提供各种原始资料。绘制竣工总平面图时，应先将设计总平面图用铅笔绘于图上，作为底图。每项工程竣工后，根据竣工测量结果，绘出该工程的实际状况，并标出坐标和高程。特别是地下及隐藏工程要随着施工的进展，逐步将设计铅笔线按竣工位置修改并着墨描绘。

竣工总平面图应包括下列内容：①测量控制点、建筑方格网、主轴线等平面和高程控制点的点位；②地面及地下建筑的平面位置及高程；③给水、排水、电信、电力及热力等线路与检查井的平面位置及高程；④铁路、公路、厂区、道路、桥梁等交通线路、设施的起点、交叉点、圆曲线平面位置及高程；⑤露天货栈、敞棚及围墙等室外工程和室外场地、绿化区的位置及高程；⑥厂区及其它地物、地貌等。

竣工总平面图的编绘工作包括室外实测和室内资料汇编两个方面。室外实测是根据建筑物竣工情况和现场已有的控制点，对竣工建筑物进行实地测绘；室内资料汇编主要是将有关的原始地形图、施工图纸、文件、坐标值及高程表、工程定位及检查、各种断面图、建筑物或构筑物的沉降及变形等测量资料、验收记录、设计变更文件等资料编绘成册。编绘竣工总平面图是一项细致而复杂的工作，需在施工过程中不断地收集一切有关施工验收资料，随时整理，随时清绘，隐蔽工程要在现场实测验收。竣工总平面编绘完成后，应由工程负责人和本图编绘人签字后交给使用单位存档备用。竣工总平面的比例尺一般采用1：1000或1：500，当线条过于密集时，也可采用1：200的比例尺或分类图表示。

第五节　井筒十字中线的测量与恢复

大型矿区的地面建设包括：矿区行政区的建设，矿区工业场地的建设，矿区居民小区的建设，矿区和矿井（坑口）电站的建设等。矿井工业场地的建设，是矿区建设中重要的部分，它不仅有一般工业和民用建筑物，而且有大型设备、运煤系统、储备系统和选煤系统等。矿井工业场地上的建筑物、构筑物、大型机械、选煤系统的建筑物、井筒、井架塔、提升设备和井底车场之间都是相互联系、相互影响的。为了保证它们之间位置的正确性，设计部门通常选择主、副井筒的十字中线作为设计的主轴线进行总体平面设计，在设计图上给出了各建、构筑物轴线与井筒十字中线间的尺寸。为了保证施工标定的正确性，测量人员通常在矿井施工之前，将主、副井筒的十字中线标定于实地，以此为依据来标定矿区工业场地的各建筑物、构筑物的位置。因此井筒十字中线点的标定对保证矿井建设的施工质量是至关重要的。

一、井筒中心与井筒十字中线

立井井筒十字中心就是立井井筒水平断面的几何中心。通过井筒中心且互相垂直的两条方向线称为井筒十字中线，其中一条与井筒提升中线相平行或重合的，称为井筒主十字中线。井筒提升中线是一条通过两条提升钢丝绳连线中点并垂直于绞车主轴中线的方向线。通过井筒中心的铅垂线称为井筒中心线，如图 4－20 所示。斜井井筒主要中线就是斜井的井筒中心线。斜井井筒中心（井口位置）是斜井中心线上的设计变坡点，如图 4－21 所示。

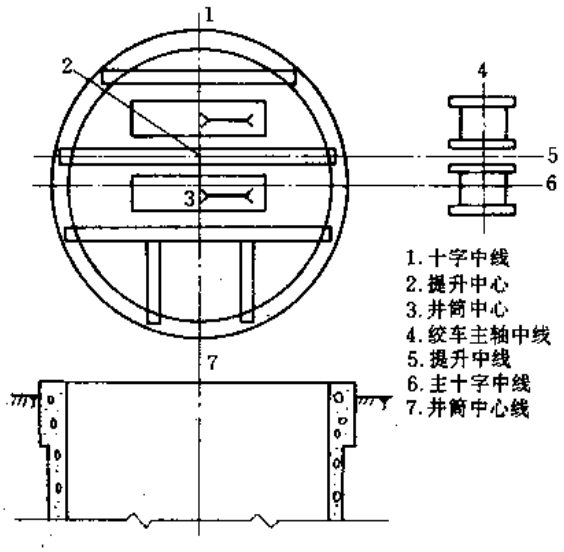


图 4－20

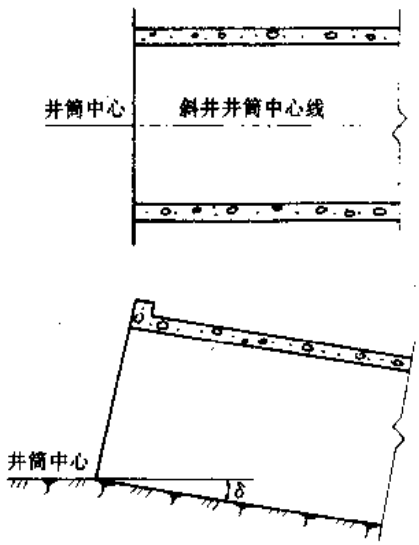


图 4－21

从地质和采矿的角度考虑，井筒中心和井筒十字中线的标定错动 1～2m，对生产没有影响。但从地形条件考虑，情况就有所不同，在设计矿区工业场地上的主要建筑物、构筑物时都考虑了地形条件。由于这些建筑物、构筑物和井筒中心线及井筒十字中线有着固定关系，如果井筒的标定位置偏离其设计位置较大，势必破坏原设计中建筑物和构筑物与地

形之间的相互关系，这样就有可能使土方量增大和破坏总体设计。因此对于井筒中心和井筒十字中线的标定精度，应以设计井筒位置时所能达到的精度为依据来考虑。井筒中心的精度可根据设计时所用的地形图精度来考虑，例如按照1∶1000比例尺地形图设计井筒位置时，由于制图和量图的误差大约为图上0.4mm，此时井筒位置设计精度可以认为是0.4m。

二、标定井筒中心线和井筒十字中线所需的资料

主要有：①矿井附近控制网资料和地形图；②矿井设计说明书中给出的井筒中心坐标、井筒十字中线方位角及井口设计高程以及标定所需的井口附近测量控制成果；③矿井工业场地总平面布置图以及施工总平面图、场地平整设计平面图和断面图以及工业场地煤柱设计图；④井筒横断面施工图；⑤井口附近钻孔的坐标资料。此外，测量人员还应到施工现场进行实地调查，了解施工地区的地貌、地物和控制点的位置及保护情况等。在研究资料和现场调查的基础上，可编制1∶200或1∶500的大比例尺井筒十字中线基点设计图，在该图上绘出井筒中心、十字中线基点、临时的和永久的建筑物、构筑物以及各种管道、线路、测量控制点等。

三、标定井筒中心线和井筒十字中线的允许偏差

在《煤矿测量规程》中，标定井筒中心和井筒十字中线允许偏差见表4－2。

表4－2 井 筒 标 定 限 差

条　　件	实测位置与设计位置的允许互差（或与已有井巷关系）			两条十字中线的垂直度误差
	井筒中心平面位置	井口高程	主中心线方位角	
井巷工程与地面建筑未施工前	0.5m	0.05m	3′	±30″
井巷工程与地面建筑已施工时	0.1m	0.03m	1′30″	±30″

四、井筒十字中线的标定方法

1. 井筒中心点的标定

井筒中心通常是根据近井点用极坐标法标定的。如果标定之前尚未测设近井点，也可用支导线的方法标定。无论怎样标定其精度应满足表4－2中要求，标定的井筒位置用大木桩固定，并在木桩上钉上小钉，作为井筒中心的标志，保证井筒破土施工之前此标志不受破坏，标定后应及时算出井筒中心点的坐标。如用支导线的方法标定，则应抓紧建立永久性近井点，并重测井筒中心和井筒中线方位角，作为井筒中心位置的最后测量成果，在整个矿井施工过程中保持不变。

2. 井筒十字中线基点的标定

井筒十字中线基点的标定，是在标定了井筒中心后，根据十字中线基点设计图进行的，如图4－22所示。其具体标定方法如下：

（1）将经纬仪置于井筒中心O点上，根据控制点A，顺时针依次拨角β、$\beta+90°$、$\beta+$

180°、$\beta+270°$。其中 $\beta=\alpha_{OB}-\alpha_{OA}$，$\alpha_{OB}$为设计给定的十字中线方位角。在各方向线上埋设一个大木桩，大木桩应埋设在设计的十字中线基点最外侧，桩位距井筒中线 100m 左右，以正倒镜在桩顶上精确标出井筒十字中线 A'、A''和 B'、B''。然后以三个测回检测十字中线 A'、A''和 B'、B''的垂直精度。如果垂直误差超过 30″时，则以角度标定规化法重新标定 A'、A''、B'、B''点，在大木桩上用小钉做出标志，并应再检查一次。

(2) 在十字中线方向上，按基点设计位置标出基点坑十字线。如图 4－22 中 6 号点十字线 1′—2′、3′—4′。以 1′—2′和 3′—4′为准，挖基点坑，浇筑混凝土基桩，在基桩上埋设铁心——“点心铁”。当基点稳定后，在 O 点安置经纬仪，分别瞄准 A'、B''、A''、B'，在各基点桩的点心铁上精确标出十字中线点，并以钻小孔或锯十字线作为基点标记。

(3) 十字中线点标设之后，按 1/8000 导线的施测方法测量基点的实际位置，并绘制井筒十字中线基点的位置图。图上应绘出十字中线基点附近的永久性建筑物，注明点间距离、点的高程、设计和实际的井筒中心坐标及主十字中线方位角等。并且编制基点坐标成果表，注明设计的和实际的井筒中心坐标及十字中线方位角，作为建井移交的资料。当十字中线基点的布置和防护有困难时，可标定工业场地方格网点作为整个标定的基础。

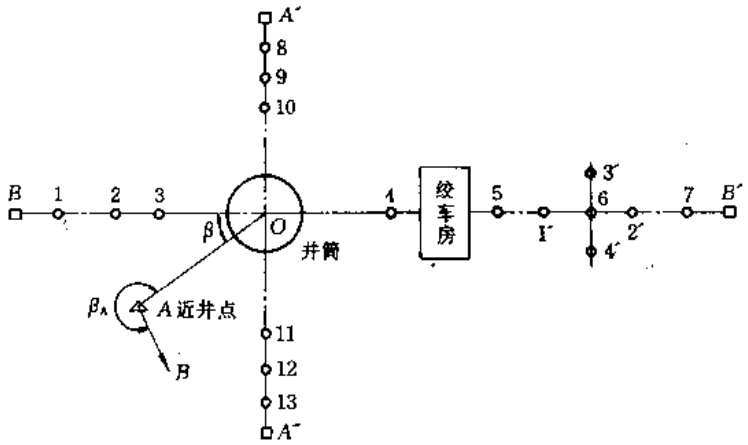


图 4－22

五、井筒十字中线基点的点型、埋设要求和保护措施

基点的点型和埋设要求：①基点位置应便于使用和长期保存，应尽可能避开地面临时和永久性建筑物并设在不受采动影响的区域内。当在十字中线的基线方向上有临时的和永久的建筑物且影响基点通视和保存时，可平行于这条十字中线建立辅助中线，如图 4－23 所示。②井筒每侧的基点不得少于 3 个，点间距离不应小于 20m，距井口边缘最近的十字中线点可设在墙上或其它建筑物上。当主十字中线在井口与绞车房之间不能设置三个点时，可以少设，但须在绞车房后面再设三点，其中至少有一个点能瞄视井架天轮平台。建立井塔时，地面十字中线点的布置应保证每侧至少有一个点能直接向每层平台上标定

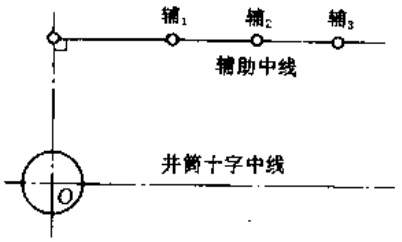


图 4－23

十字中线。③基点顶面高程应大致等于工业场地设计高程。④基点的类型可根据表土层结构、冻结深度和基点的高度等来确定，点心铁的头部最好用不锈钢或铜制成，基点露出表土层比较高时，基点顶面应能安置仪器。

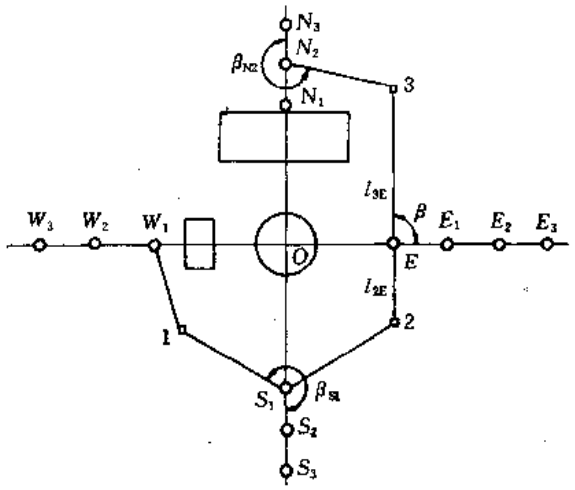


图 4－24

井筒十字中线是工业场地内建筑物标定、提升设备安装及井筒、硐室、井底车场等施工测量的主要依据，而且在整个矿井生产过程中也起着重要作用。因此必须做好下面的工作：①为了保证安装和检查提升设备的几何关系，应及时在井筒永久锁口、绞车基础和井塔基础上转设十字中线点；②向有关施工部门和人员进清十字中线基点的重要性，共同配合，加强对基点的保护，应加围栏保护和进行培土，以防各种车辆碰压；③如果十字中线点受到破坏，应按未动的十字中线基点及时补设。可采用直接补设、直角坐标法补设或布设经纬仪导线补设的方法进行。

六、基点的转设和补设

为了防止点的破坏和保证安装、检查提升设备的几何关系，应尽可能增加十字中线基点的数目。转设方法是采用直线标定法。如果十字中线点受到破坏，应根据未动的十字中线点及时补设。下面以图 4－24 为例说明导线补设的方法。经检查 E_1、E_2、E_3、S_3、N_3 等基点均已破坏，但是 W_1、W_2、W_3 尚在一条直线上，为了检查 S_1、S_2、N_2 和 N_1 是否移动，布设 5″导线 W_2—W_1—1—S_1—2—3—N_2，并测出角 β_{S1}、β_{N2}。经计算如果 S_1 至 S_2 和 N_2 至 N_1 的坐标方位角与原方位角之差值在测量精度范围之内，则可由 N_1、N_2 点直接补设 N_3 点，由 S_1、S_2 点直接补设 S_3 点。为重新标定东侧基点，可按下式计算 E 点坐标：

$$X_E=X_0+(Y_2-Y_0)-(X_2-X_0)\tan\alpha_{23}/(\tan\alpha_{W_2W_1}-\tan\alpha_{23}) \qquad (4-6)$$

$$Y_E=Y_0+(X_E-X_0)\tan\alpha_{W_2W_1} \qquad (4-7)$$

然后根据 E 点和 2、3 点坐标反算求得 l_{2E}、l_{3E}，在导线点 2、3 上标出 E 点，在 E 点安置经纬仪根据角 $\beta=\alpha_{W_2W_1}-\alpha_{23}$，标出 E_1、E_2、E_3 点的新位置。

第五章　铁路及公路工程测量

第一节　铁路及公路工程概述

铁路及公路均是建造在大地上的一种线形工程构造物，主要承受车辆荷载的重复作用并经受各种自然因素的长期影响和侵蚀。因此它们不仅要有平顺的线形、和缓的纵坡，而且还要有坚实稳定的路基、平整的轨（路）面，牢固耐用的桥涵和其它人工构造物及附属设备，以保证交通的安全。铁（公）路由路基、轨（路）面、涵洞、桥梁、隧道等基本构造物组成，还有线路交叉工程，路基防护工程和排水工程等。

根据我国《铁路工程技术规范》规定，铁路建设标准分为三级：

Ⅰ级铁路——要求远期（运营十年后）年输送能力大于1000万t（单车方向），在路网中起骨干作用的铁路。

Ⅱ级铁路——指远期要求年输送能力为1000～500万t，在路网中起辅助作用的铁路。

Ⅲ级铁路——指年输送能力小于500万t，为某一地区服务的铁路。

按我国《公路工程技术标准JTJ1—81》，将公路划分为五个等级。

高速公路——年平均昼夜汽车交通量在25，000辆以上，专供汽车分车道高速行驶，全部立体交叉和全部控制进出口的公路。

一级公路——年平均昼夜汽车交通量10，000～25，000辆，可供汽车分道行驶，并部分控制出入及部分立体交叉的公路。

二级公路——年平均昼夜交通量2000～5000辆，连接政治、经济中心的干线公路。

三级公路——年平均昼夜交通量2000～200辆，沟通县及县以上城市的一般干线公路。

四级公路——年平均昼夜交通量在200辆以下，连接县、乡、镇的重要公路。

铁路、公路工程均可大致分为勘测设计阶段、施工建设阶段、竣工及试运营阶段。具体可分为：第一，根据有关的政治、经济、交通和自然条件进行室内研究和野外调查、全面分析、比较、论证道路建设的意义以及技术上、经济上的合理性和可行性，提出路线的初步构思方案。第二是初测，它是在前面工作的基础上进一步安排路线，落实路线局部方案。第三是定测，它是在初步设计基础上，将纸上定线的路线方案进行实地放线。第四是在建设过程中进行施工检查测量。第五是竣工测量。

第二节　线路勘测阶段的测量工作

铁路勘测与公路勘测均属于线路勘测，其勘测程序大体相同。其任务可分为踏勘（初测）和定测。

铁路勘测的最初工作，是根据国民经济发展的需要和自然地理条件，经过室内研究、分

析和对比以及对于重要路段（如大型隧道、桥梁以及地质构造复杂地段等）的现场调查研究，确定初步方案，编写出勘测任务书。依据勘测任务书，则由设计人员、测量人员及有关部门，对初步设计方案中认为有价值的线路进行实测，即进行实地选点，定出线路方向，并沿线进行导线测量和水准测量，并测绘带状地形图供初步设计之用。

初步设计批准后，应结合现场的实际情况确定线路的位置，并为施工设计收集必要的资料，以上工作称为定测。

公路勘测分两阶段勘测和一阶段勘测两种。所谓两阶段勘测，就是对路线进行踏勘（初测）测量和详细（定测）测量，而一阶段勘测则是对路线作一次定测（技术比较简单的工程项目可采用一次定测的方法）。由此可看出铁路、公路在勘测阶段的工作是大同小异。因此以下主要以铁路为例进行讲解。

一、线路的初测

初测是铁路初步勘测设计阶段所有测量工作的总称。其任务是选点插旗、导线测量、水准测量和带状地形测量。

（一）选点插旗

根据线路研究阶段所规划的线路位置及实地的小比例尺地形图，由勘测组在现场结合实际情况，选择并标定出线路转折点位置，插旗标出线路走向，大旗间距以能表示线路走向及清晰地观察目标为原则。

在插旗的同时应进行初测导线的点位选择。导线点选择应满足以下几项要求：

（1）点位应靠近大旗线路的位置，以便于实测之用。

（2）在日后的桥梁及隧道两端的附近，严重地质不良地段以及越岭垭口处均应设点。

（3）点位应选在地势较高、视野开阔、易于保存的地方，以保证前后通视及方便地形测量。

（4）考虑到导线点是为定线和地形测图而设置的，点间距应取用 400m 左右，以避免因边长过短而降低精度。使用电磁波测距仪时边长可增到 1km，但应在不远于 500m 处增设内分点。

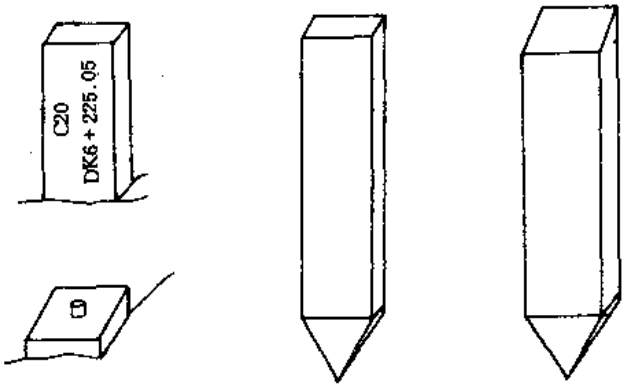


图 5—1

（5）为减小导线的横向误差，应尽量减少转折角个数。除选择导线点外，在地形变化处、道路交叉处、大中河流两岸、沟底、电线交叉处等地点均应增设加桩。对于钢尺量距导线应在整百米处设置百米桩。用电磁波测距仪或其他间接方法测距时，可不设百米桩，但应使加桩间距保持在 100m 左右。导线点除埋设点位外还应设标志桩，以便标记导线点号、里程并方便找点。其埋设情况如图 5—1 所示。

导线点应从起点顺序编号。各点的里程桩号应按以下格式书写：点号及整公里数＋不满整公里的零数（如 C5DK1＋269.10）。

其中C5表示第5个导线点，DK1为整公里里程，269.10为百米数及零数)。应注意：导线点的里程是该点离开线路起点的距离，是沿导线边长方向来计算的。在设有比较线时，应按Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ顺序将比较线编列，并在点号前加上比较线路号以示区别。对于比较线起、终点里程桩号与正线里程桩号的关系均应注明。如：

$$IC1DK0+000=C26DK8+326.05$$

$$IC8DK4+167.05=C39DK13+125.40$$

经过方案比较后，当决定采用1比较线时，正线C39DK13+125.40点以后的里程不必更改，只需在图上及手簿上分别注明。

$$DK8+326.05=DK0+000.00$$

$$DK13+125.40=DK4+167.05$$

正线与1比较线的里程差数为：

$$(13125.40-8326.05)-4167.05=632.30\ (m)$$ 称为断链（1）

所谓断链是指由于比较线、改线或量距和计算的差错等原因使得桩上的里程和实际里程不相符所产生的差数。断链可分为长链和短链，当桩上的里程大于地面实际里程时称为短链，反之称为长链。应注意断链桩宜设在直线的百米桩或20m整倍数的桩上，不宜设在车站、桥梁、隧道和平曲线内。

（二）导线测量

1. 水平角观测

初测导线水平角，可用DJ2及DJ6级经纬仪以测回法测量右角，观测一测回。两个半测回之间应变动度盘位置，两半测回间角值较差在±20″（DJ2）或±30″（DJ6）以内时取其平均值。

2. 边长丈量

导线边长可采用电磁波测距仪、钢尺、两米横基尺和基线法测量。边长测量的相对中误差不应大于1/2000。

3. 导线的联测

在初测导线测量中，为控制测量误差累积，使导线能得到可靠的检核和防止粗差，要求导线上间隔不远于30km应与国家或其他不低于四等的控制点联测。当测区内控制点稀少联测有困难时，应在起、终点及间隔不远于30km的点上用天文测量方法观测真北或用陀螺经纬仪定向（见矿山测量学）形成方向附合导线，以检核导线角度。

当初测导线与国家控制点联测或在两端测定了真北、或陀螺方位角构成角度检核时，其角度闭合差应小于表5－1的要求。

表5－1 方位角允许闭合差

与国家平面控制点联测的导线的 f_β	测真北或陀螺方位角构成的方向附合导线的 f_β	
$\pm 30''\sqrt{n}$	两端测真北（或陀螺方位角）	$\pm 30''\sqrt{n+10}$
	一端测真北或陀螺方位角	$\pm 30''\sqrt{n+5}$

上表中 f_β 的推算如下：

附合导线的方位角闭合差：　　$f_\beta=\pm 2m_\beta\sqrt{n}$　　(5－1)

在满足导线相对闭合差 1/2000 的前提下，将 DJ6 型仪器测角中误差放宽至 15″，则得 $f_\beta=\pm 30\sqrt{n}$。

方向附合导线：考虑到两端（或一端）所测真北或陀螺方位角均有误差，因此：

$$f_\beta=\pm 2\sqrt{m_\beta\cdot n+2m_\infty^2}\qquad(5-2)$$

式中　m_∞ 为观测真北方位角或陀螺方位角的平均值中误差，取 $m_\infty=\pm 35''$，$m_\beta=\pm 15''$ 代入式（5－2）近似得：

$$f_\beta=\pm 30''\sqrt{n+10}$$

当仅在一端观测真北方位角或陀螺方位角时则近似得：

$$f_\beta=\pm 30''\sqrt{n+5}$$

当初测导线构成方向附合导线时，若角度闭合差小于表 5－1 中的数值时通常不进行平差。当导线与国家控制点联测进行坐标检核时，则应对角度闭合差进行调整，根据平差后的角度来计算坐标增量。

应当注意，在利用国家控制点进行导线检核时，要考虑导线所用的起算点与检核用的控制点是否在同一 高斯投影带内，若不在同一带则应进行换带计算。另外由于国家控制点坐标均为高斯平面上的坐标，因此，在检核前必须将所计算的坐标增量改化至高斯投影面上。其改化公式如下：

将坐标增量总和改化至大地水准面上：

$$\begin{aligned}\Sigma\Delta x_0&=\Sigma\Delta x\left(1-\frac{H_m}{R}\right)\\ \Sigma\Delta y_0&=\Sigma\Delta y\left(1-\frac{H_m}{R}\right)\end{aligned}\qquad(5-3)$$

式中　$\Sigma\Delta x_0$、$\Sigma\Delta y_0$——改化至大地水准面的纵、横坐标增量总和，m；

$\Sigma\Delta x$、$\Sigma\Delta y$——由边长和平差后角度计算的纵、横坐标增量总和，m；

H_m——导线平均高程，km；

R——地球平均曲率半径，km。

把改化至大地水准面的坐标增量总和化算至高斯投影面：

$$\begin{aligned}\Sigma\Delta x_s&=\Sigma\Delta x_0\left(1+\frac{y_m^2}{2R^2}\right)\\ \Sigma\Delta y_s&=\Sigma\Delta y_0\left(1+\frac{m_m^2}{2R^2}\right)\end{aligned}\qquad(5-4)$$

式中　$\Sigma\Delta x_s$、$\Sigma\Delta y_s$——改化至高斯平面上纵、横坐标增量总和，m；

y_m——导线两端点横坐标的平均值，km。

用改化至高斯平面上的坐标增量总和，求出与国家控制点的坐标增量之差，该导线全长相对闭合差不得大于 1/2000。满足要求时可调整闭合差。

（三）水准测量

在铁路初测阶段应沿线路布设水准点，并测定各水准点高程，为建立沿线高程控制提

供依据，该项工作称为基平测量。然后以基平测量的水准点为基础，测定沿线各导线点、百米桩及加桩点的高程，用以绘制线路纵断面图。该测量工作称为中平测量。

1. 基平测量

水准点的密度，应根据地形的复杂程度和工程需要而定。平原丘陵区沿线路每隔 2km 左右设立一水准点，在地形复杂路段可适当缩短水准点间距。另外在 300m 以上的大桥和隧道两端及车站场附近应加设水准点。水准点布设位置应离开线路中线一定距离，以 50～100m 为宜，以免线路施工时破坏。并且点位埋设应牢固，标志应醒目。

基平测量应采用 DS3 级以上的水准仪，按一组往返或两组单程的水准测量方法施测。高程控制等级应在五等以上，视线长度一般应不大于 150m，在跨越河流和沟堑时可放宽至 200m，但要注意尽量保持前后视距相等。当在特殊情况下视线超过 200m 时，应按跨河水准测量的要求进行。

为限制测量误差的累积及时检核测量的质量，基平测量应与国家水准点或等级相当的其他水准点联测。一般规定每 30km 左右联测一次，构成附合水准线路，其高程允许闭合差为 $\pm 30\sqrt{L}$ mm（L 为附合水准路线长度，km）。

基平测量也可用电磁波测距三角高程施测，可用导线点兼作水准点。但点间距及垂直角应往返观测，所测距离应加入气象改正，仪器高、觇标高应丈量两次，并读至 mm。

2. 中平测量

中平测量可采用单程水准测量，以基平测量所测水准点为基准布设成附合水准线路。由于百米桩、加桩等间距较小，因此测量中可采用工程水准测量的方法。中平测量允许的闭合差为 $\pm 50\sqrt{L}$ mm（L 为附合水准路线长度，km）。

3. 带状地形图测绘

由于铁路属线形地物，因此所需地形图为带状，其测图带的宽度与测图比例尺、地形的复杂程度有关。《铁路测量技术规则》对此作了下列有关规定（表 5—2）。

表 5—2 带状地形图测绘规定

测图比例尺	导线每侧的测绘宽度（m）	等高线间距（m）		最大视线长度	
		一般地段	困难地段	垂直角<12°	垂直角≥12°
1∶10000	250～500	5	10	600	600
1∶5000	200～300	2	5	450	350
1∶2000	100～150	1	2	400	300
1∶1000	按需要	1	1	250	150
1∶500	按需要	0.5	1	150	80

带状地形图的比例尺选择可参照一般平坦地区为 1∶5000～1∶2000，困难地区为 1∶2000 进行。

二、线路定测

铁路定测的任务是，把初测后初步设计在图纸上的线路准确测设到实地上，并且结合现场的实际情况，对局部线路进行调整，并为施工设计搜集资料。然后根据定测后的线路进行纵、横断面测量。

（一）定线测量

定线测量的任务是把图纸上的设计线路测设到实地。

1. 支距放线法

该方法的基本原理是在设计图上量出初测导线点和线路中心线点的支距，然后根据支距和实地的初测导线点点位进行实地放样。这种方法适用于地形不太复杂且初测导线与设计的线路中线相距较近的地区。

（1）获取放样数据和初设线路的相互关系。在初测地形图上，依据初测导线（图 5—2）过导线点作初测导线的垂线，与初步设计线路中线相交于 DZ_1、DZ_2。这些交点称为中线转点。应注意转点位置应选在地势较高，且能与相邻转点相互通视的位置上。并且设计线路的每条直线段最好有三个以上的转点。然后在图上量出导线点到相应转点的支距。但有时为使转点位于相互通视的位置，转点与导线点的连线并不垂直于初测导线，如图中的 DZ_3，此时量出 DZ_3 相对于导线点 C_3 的极坐标的极距 L 和极角 β。

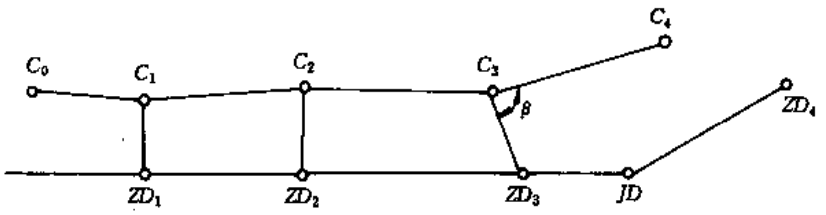


图 5—2

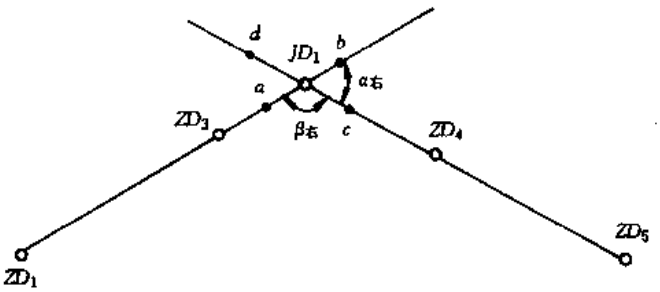


图 5—3

（2）实地放样。在现场将经纬仪安置在相应的导线点上（如 C_2 上）瞄 C_3 定向拨直角。在视线上丈量出该点的支距长定出 DZ_2 点，如定测后个别转点位置不合适，应现场做适当调整。

（3）穿线（转点的直线性调整）。由于图解放样数据的误差及各个环节的测量误差的影响，将造成同一直线上各转点放样后不在一条直线上，因此必须对它们进行调整，调整时其方法可参照第三章 调整建筑方格网主轴线的方法进行。

（4）线路交点的确定。当确定了线路中线上两条相邻直线段后，应依据经调整后的两

直线段上转点，定出两线的交点，如图 5－3 所示。在 ZD_1 上安置经纬仪，照准 ZD_3 用正倒镜分中法，在直线延长上的 JD_1 处（可大概估计出）附近设立 a、b 两个桩（俗称骑马桩），其上钉小钉并拉细线。

精确标出视线方向，而后在 ZD_5 点安仪器瞄准 ZD_4，同上法在视线上设立 c、d 两个骑马桩（便于 JD_1 点的恢复）其上钉钉，并拉细线与 a、b 线相交处即为 JD_1 点。应注意在正倒镜分中法增设交点时，其点间距应不大于 500m，当采用电磁波测距仪施测时不宜大于 1000m。正倒镜点位的横向偏差，每 100m 不应大于 5mm，当间距超过 400m 时，不应大于 20mm。

交点定出后，应在交点上安置经纬仪测量计算转角。所谓转角又称偏角，是线路由一个方向偏转到另一方向时，所夹的角度（图 5－3 中的 α 角）。通常是观测线路的右角 β，按下式计算 α；

$\beta<180°$时　　$\alpha_{右}=180°-\beta$　（右偏角）

$\beta<180°$时　　$\alpha_{左}=\beta-180°$　（左偏角）

观测 β 右时应采用两半测回测量右角。两半测回间，应变动度盘位置，其观测角值较差，当采用 DJ2 型仪器时，不应大于 20″；当采用 DJ_6 型仪器时不应大于 30″。

2. 拨角放线法

拨角放线法属解析法。首先在设计图上量出线路各交点的平面坐标，依此算出各交点间距离及交点的转向角。实地放样时，可直接按这些数据拨角量距，放出整条线路。该法适用于导线点较为稀少的情况（如利用航测图设计线路时）。较之支距放线法工效高，但存在放线误差累积的问题。因此每隔一定距离需要和初测导线闭合，按下列方法求出闭合差（图 5－4）。C_5、C_6 为初测导线点，JD'_9、JD'_{10}、JD'_{11}为实地放出的交点位置，JD_9、JD_{10}、JD_{11}为图上设计交点位置。在 C_6 及 JD'_{10}安置经纬仪测水平角 β 和 β_1，量出 C_6 与 JD'_{10}间的距离，则由此可求出 JD'_{10}到 JD'_9 间的方位角及 JD'_{10}的坐标。与 JD_{10}～JD_9 的方位角及 JD_{10}坐标比较即可求出方向闭合差和长度相对闭合差。该方向闭合差不得超过 $\pm 30''\sqrt{n}$，长度相对闭合差不得超过 ±1/2000。如闭合差超限应查明原因，调整放样点位。如闭合差在允许范围内，则可不调整闭合差但应重新计算放样数据。如前例，要根据 JD'_{10}与 JD_{11}的坐标计算两点间距离、方向角及拨角 β，并在 JD'_{10}设站按新的放样数据定出 JD_{11}，然后依 JD_{11}继续放样以后各点。

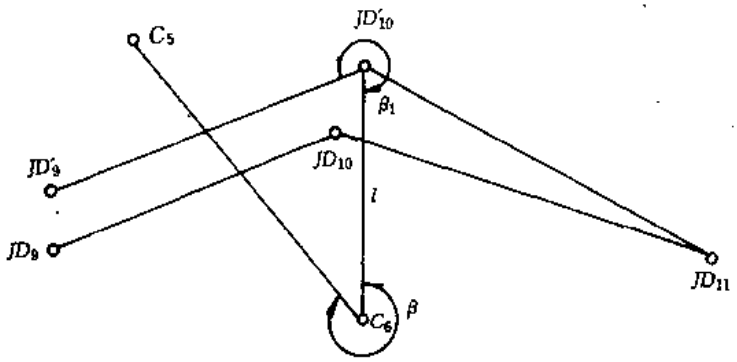


图 5－4

（二）中桩测量及曲线测设

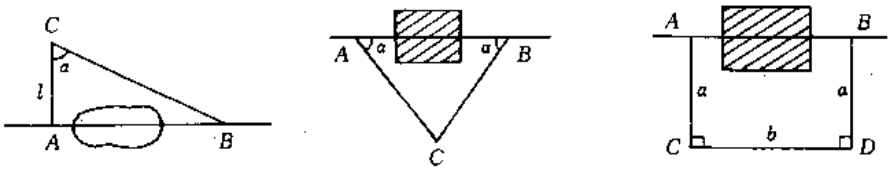
交点确定之后，应进行中线丈量确定里程桩。同时设置地形、地质、地物等加桩，并进行曲线测设（该部分内容详见本章第四节）。

中线桩测设时，可将经纬仪安置于定点（*JD*）或中线转点（*ZD*）上，定出中线方向，用钢尺量距设置中线桩。目前电子全站仪（TPS）或电磁波测距仪的应用使放点变得更加方便、快捷。对于起控制作用的交点桩、转点桩、曲线主点桩、桥位桩、隧道桩、公里桩等均要设置正桩（方木桩）和标志桩（板桩），正桩与地面齐平。标志桩位于正桩一侧，在其上写明桩号和里程（图 5－1），中桩的桩位允许误差见表 5－3。

当中线丈量时遇有障碍物，可采用如下的间接丈量方法：

（1）中线可通视但不便丈量时（如过泥塘地等），可用直角三角形法来求出路线距离（图 5－5*a*）。

（2）当路线不通视时，可利用等腰三角形、等边三角形、矩形等方法求出路线距离（图 5－5*b*、*c*）。



(*a*)　　(*b*)　　(*c*)

图 5－5

表 5－3　中桩测量精度要求

桩　位	允 许 误 差	注　示
纵向（m）	S/1000+0.1	S 为交点或转点至中桩点的距离
横向（cm）	10	

（三）水准测量及纵横断面测绘

定测阶段的水准测量工作同于初测阶段，其基平测量应尽量采用初测水准点的高程数据。对于被破坏或将受施工影响的点位以及离定测线路较远的点位应重新埋设。对于水准点密度尚不满足工程要求的地段要增设新的水准点，组成新的水准线路进行水准测量，作业方法及精度要求同于初测。对线路中初测水准点的检测，其限差不应超过$\pm 30\sqrt{L}$mm（L 为相邻水准点间的线路长度，km）。若符合限差采用初测成果，否则应查明原因，重新测算。

中平测量的任务是测出定测时设置的各中桩高程为绘制纵断面图提供依据。

中平测量一般采用工程水准测量的方法进行，单程水准测量是以相邻两水准点为一测段，其与基本水准点附合的精度要求为$\pm 50\sqrt{L}$mm。一般测设形式如图 5－6 所示。

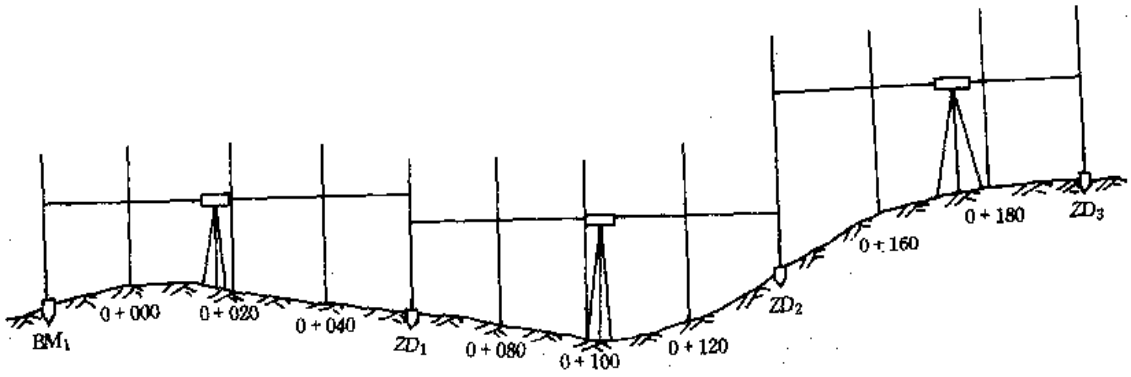


图 5—6

跨越沟谷时可采用如图 5—7 所示方法在沟底采用接尺的方法进行。但应注意使用此法时要将沟内沟外分清，接尺需做记录。沟内 C 点要单独计算。

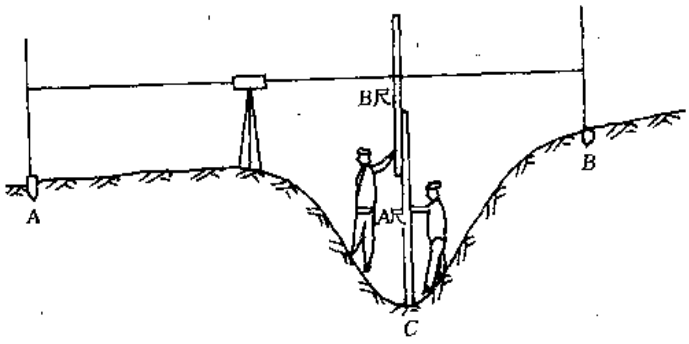


图 5—7

第三节　纵横断面图绘制及土方量计算

绘制纵横断面图是定测阶段的一项重要任务，它是在基平测量和中平测量所得各桩点高程数据的基础上绘制的。纵断面图表示了沿中线方向的地势起伏形状，设计中将利用它来研究线路空间线型的起伏布置。横断面图则反映了各中桩处垂直于线路中线方向的地面起伏情况，可帮助设计人员结合当地的地形、地质、气候和水文等自然因素，确定横断面的形式、各部分位置和尺寸，同时也为路基土石方量的计算提供依据。

一、纵断面图绘制

纵断面图绘制时采用直角坐标，以线路里程为横坐标，高程为纵坐标。图的比例尺通常为：横向 1∶1000～1∶5000，纵向 1∶100～1∶500。图 5—8 为一铁路纵断面图。图的上部是根据中线桩里程及地面高程，展绘出各中线桩在图上的位置，用细线依次连接各点即为线路中线的地面线；粗实线为按里程和各里程桩路肩设计高程绘出的设计坡度线；还标注有水准点位置和编号及其高程；桥涵的类型、孔径、跨数、长度、里程桩号；同某公

路或铁路交叉点的位置、里程及其说明；定测起点、终点及断链桩位置、里程；另外有时还将工程地质与水文地质的调查与钻探资料绘于图上。“工程地质特征”栏为线路通过地段的地表的实际地形地质情况概括。路肩设计高程为根据线路起始高程和设计坡度算出的各里程桩处的路肩高程。“设计坡度”栏注明了各段的距离及设计坡度。斜线表示设计纵坡，按前进方向上斜表示上坡，反之为下坡。如图中第一段距离为1400m，坡度为2‰。“地面标高”栏为各里程桩及加桩的实测高程。“加桩”栏标注了各加桩位置及里程数。“里程”栏标明了里程桩位置及里程。“线路平面”栏为中线示意图，注明了直线的长度和方向及曲线的要素符号和数值。在前进方向上，曲线部分用折线表示，上凸表示线路右偏，下凹表示线路左偏。

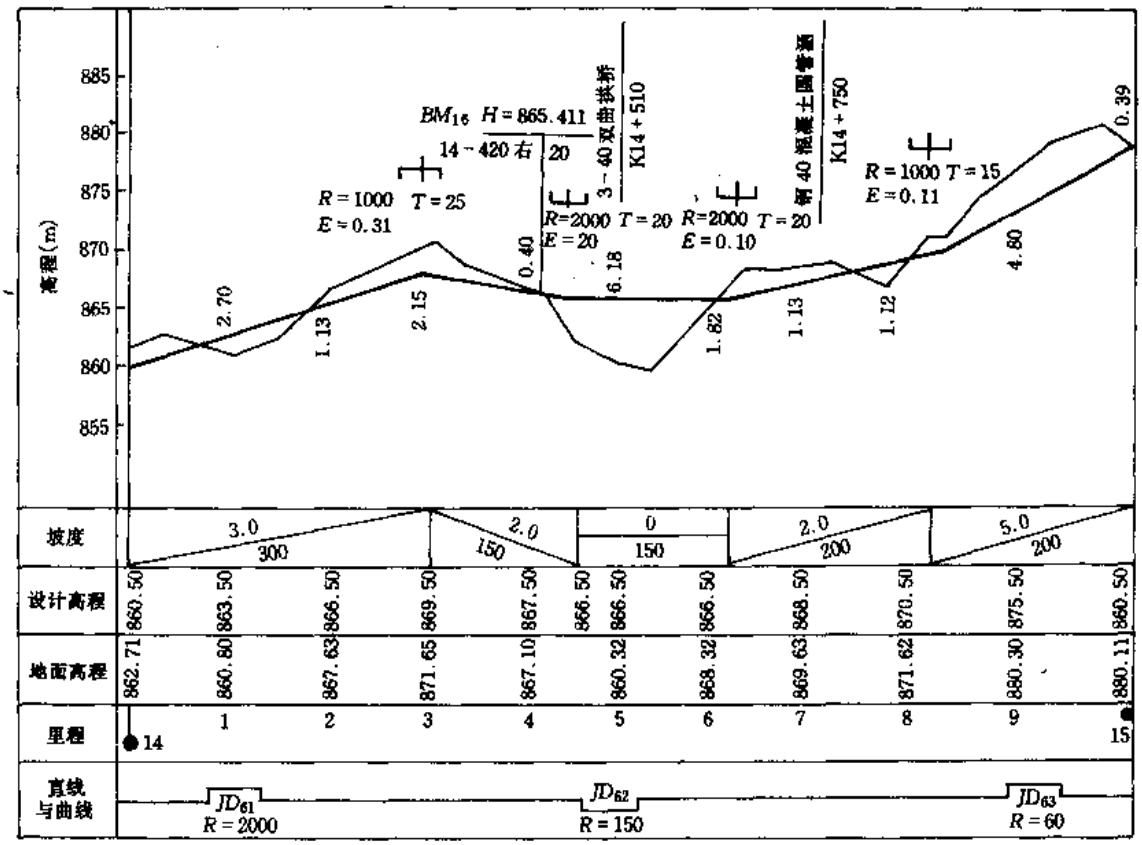


图 5—8

二、横断面图测绘

为满足路基、桥涵、隧道、站场设计及土石方量计算的需要，还在曲线控制点、公里桩、桥隧两端、挡土墙、线路纸、横向地形明显变化处测定垂直于线路中线方向的地面起伏情况。

1. 横断面的测定

横断面方向的确定可用方向架或经纬仪等进行。当用方向架确定方向时，可将方向架立于中桩上（图5—9）用方向架的其中一个方向瞄准前方或后方一中桩，则方向架的另一

方向即为所要确定的横断面方向。或用经纬仪安于中桩上瞄中线方向拨转 90°，即可定出横断面方向。

横断面测量可用经纬仪或水准仪进行。在地势平坦、通视良好、且精度要求较高的地段可用水准仪作横断面测量。首先在定出的横断面上丈量各特征点距中线桩的距离，并用水准仪测各点相对于中桩的高差。当地形起伏较大时，应用经纬仪置于中线桩上，读取到横断面上各特征点的视距和垂直角，从而计算出各点相对于中桩的高程。横断面测量的限差见表 5－4。

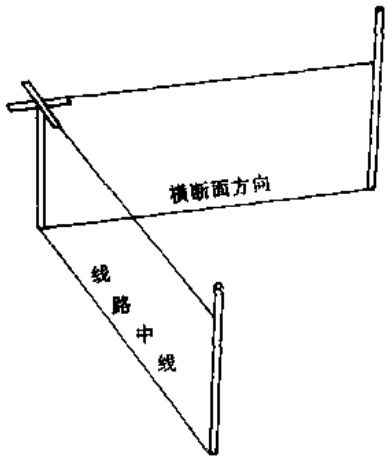


图 5－9

2. 横断面绘制

绘制横断面图时常选择纵横比例尺相同，一般采用 1∶200 的比例尺（图 5－10）。而设计人员要根据横断面图做出路基、路堑设计图，以下是三种路基路堑设计图（图 5－11）它们是计算土方量的依据之一。

表 5－4 横断面测量限差（m）

线路名称	距离	高程
铁路、汽车专用公路	$\frac{L}{100}+0.1$	$\frac{h}{100}+\frac{L}{200}+0.1$
一般公路	$\frac{L}{50}+0.1$	$\frac{h}{50}+\frac{L}{100}+0.1$

注：L 为测点至线路中桩的水平距离（m）；h 为测点至线路中桩的高差（m）。

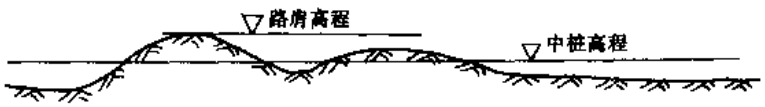


图 5－10

三、线路土方量的计算

路基土石方工程数量是筑路工程的主要技术经济指标之一，是估算工程造价、编制施工组织计划的依据。土石方计算的工作量很大，计算方法应力求简化。由于自然地面起伏多变，因此就不可能是一简单的几何体。若依实际地面起伏变化情况进行计算，则会相当烦杂，而且其实用意义不大。所以对路线土石方量的计算，常采用近似方法。将相邻横断面间的路基看成一柱体，取两个横断面的面积平均值作为柱体底面积，两横断面间距离作为柱体的高计算柱体体积。现将常用的计算横断面面积的方法介绍如下：

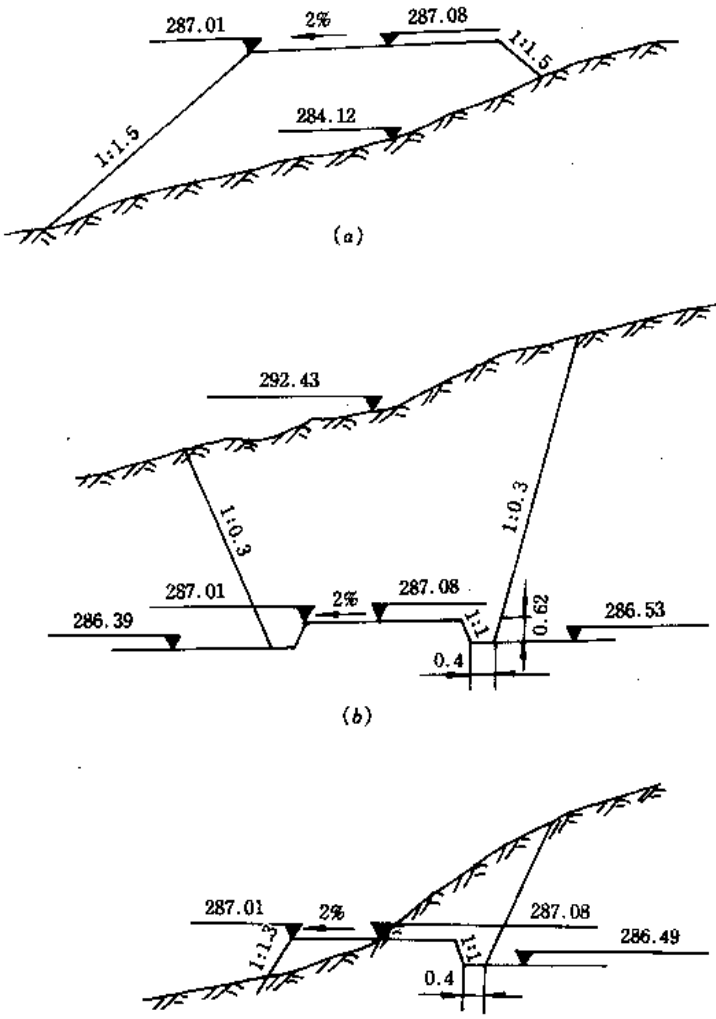


图 5－11

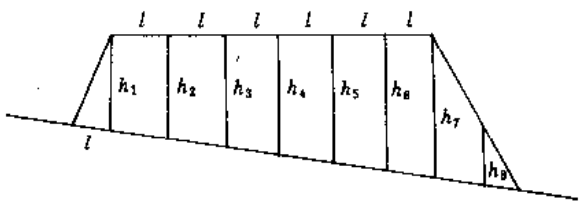


图 5－12

1. 积距法

在横断面图上，将所计算面积分成高度为 l 的若干个三角形或梯形(图 5－12)，每个条块的面积等于其高度 l 与平均长度 h 的乘积，则总面积为各条块面积之和。

$$A=2A_i=l\ (h_1+h_2+\cdots\cdots+h_n)$$

实际工作中 Σh_i 常采用分规在图上累加的方法获得，如图 5－13 所示。用分规先卡出 h_1，然后将分规两脚均位于 h_2 的延长线上，且一脚 (A) 对准 h_2 一端点 a，固定分规的 B 脚，移动分规 A 脚至 h_2 另一端点 b，此时分规两脚间的积距即为 h_1+h_2；依次类推可求得所有平均长度之和 Σh_i。注意应将 l 和 h 按比例尺化算成实地距离。

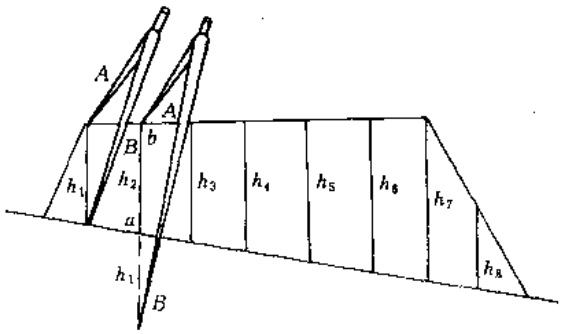


图 5—13

2. 几何图形法

将计算面积化分成若干个三角形、矩形、或梯形等规则图形，如图 5—14。然后计算各几何图形面积，相加可得断面面积。

3. 混合法

对有些横断面可采用积距法和几何图形法混用来求面积，如图 5—15。

4. 求积仪法

对于极不规则且面积较大的横断面，可用求积仪求算其面积。

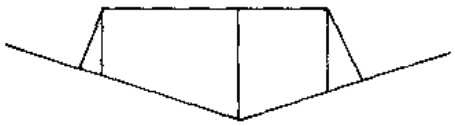


图 5—14

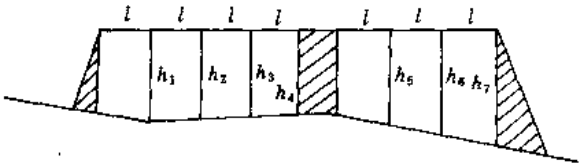


图 5—15

5. 土石方数量的计算

根据线路定测时所测得的横断面将线路分段，将每段看成一个棱柱体，按平均断面法，求得棱柱体积（图 5—16）。路基土石方工程数量计算，一般是采用列表法进行的。表中主要应填入断面桩号、填挖面积、土石成分、相邻断面距离、平均断面面积及两断面间体积等。



图 5—16

第四节 曲 线 测 设

受自然条件（主要是地形、地质、地物）的限制，线路在平面上不可能是一条直线，而是由许多直线段和曲线段组合而成。这种曲线段称之为平曲线。在铁路及公路中常用的平曲线有圆曲线、缓和曲线、回头曲线等。另外，因受地形起伏影响，线路在立面上的坡度也要发生变化。当两相邻的坡度值的代数差超过一定值时，在变坡点处要用曲线连接，这种曲线称为竖曲线。

一、圆曲线的测设

一般先测定出曲线的起点（也称直圆点 *ZY*）、中点（曲中点 *QZ*）和终点（圆直点 *YZ*）三个主点桩，然后在主点的基础上加密曲线上其它各点，从而完整地将曲线标出。

（一）圆曲线要素计算

圆曲线要素包括：圆曲线半径 R、偏角（即线路转向角）α、切线长 T、曲线长 L、外

矢矩 E 及切曲差（又称校正数或超距）q。其中，R 是在线路设计阶段按线路等级及地形、地质、地物条件等因素选定的；α 是线路定测时测定的。其余要素可由下列公式计算：

$$T=R\cdot\tan\frac{\alpha}{2}$$

$$L=\frac{\pi}{180^\circ}\cdot\alpha\cdot R \tag{5-5}$$

$$E_0=R\left(\sec\frac{\alpha}{2}-1\right)$$

$$q=2T-L$$

（二）主点里程计算

圆曲线主点的里程是根据交点的里程推算出的：

$$ZY\text{ 里程}=JD\text{ 里程}-T$$

$$YZ\text{ 里程}=ZY\text{ 里程}+L$$

$$QZ\text{ 里程}=YZ\text{ 里程}-\frac{L}{2} \tag{5-6}$$

$$JD\text{ 里程}=QZ\text{ 里程}+\frac{q}{2}$$

（三）主点放样

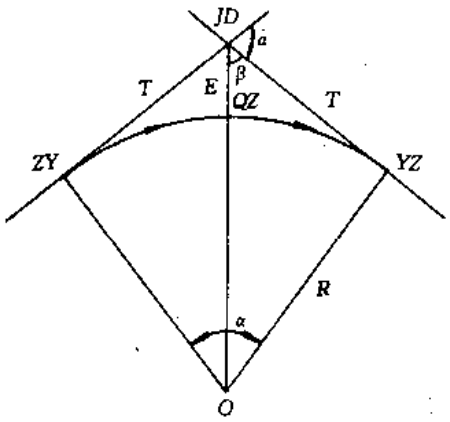


图 5-17

在 JD 上安置经纬仪，瞄准线路前进方向后方的交点或转点（图 5-17）。沿视线量出切线长 T 得 ZY 点，并丈量 ZY 点至最近一个直线桩的距离，如两桩里程之差在容许范围内可砸桩定位。同理可得 YZ 点。而后瞄 ZY 点拨转 β 角（$\beta=(180-\alpha)/2$）得角平分线方向，沿此方向量取 E 值得 QZ 点。

主点位置的正确与否将直接影响整个圆曲线的放样质量。因此，在主点测设后，应迁仪器至 ZY（或 YZ）点，测定 JD、QZ 及 YZ 点间的夹角，其正确角值应为 $\alpha/4$ 和 $\alpha/2$。

（四）圆曲线的详细测设

圆曲线详细测设是指以测定的圆曲线主点为基准，测定其它的曲线桩，包括加桩、百米桩等。

圆曲线详细测设的方法有许多种，在此主要讲述偏角法、切线支距法、弦线支距法和弦线偏距法。

1. 偏角法

偏角法放样的基本原理是，应用曲线起点（或终点）至曲线上任意点 i 的弦线与切线 T 之间的弦切角（又称偏角）δ 及弦长 c 作方向和定长交会，来确定 i 点位置。

根据几何学原理，偏角（弦切角）δ 等于该弦所对圆心角 ϕ 的一半，即

$$\delta_i=\frac{1}{2}\phi_i=\frac{L_i\cdot 180^\circ}{2\pi R} \tag{5-7}$$

弦长 c 可由下式计算：

$$c_1 = 2R \cdot 2 \cdot \frac{\phi_1}{2}$$

实际工作中偏角法一般采用规定弧长 L_0 的方法，即使圆曲线点里程为 20m 的整倍数（除曲线起点和终点外）。因此除了起始点和终点处会出现小于 20m 的弧长，其余弧长均相等。这样可给计算放样及施工带来方便。

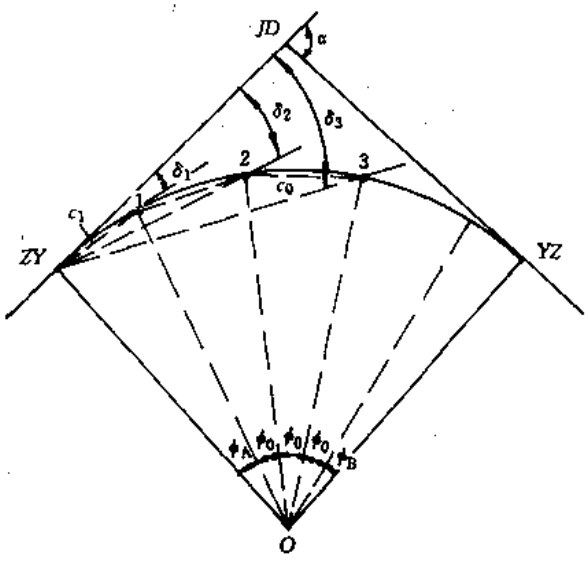


图 5－18

如图 5－18 所示，测设 1 点时，将经纬仪安置在曲线起点（ZY）上，以交点（JD）定向，使度盘读数为零（顺时针拨角时）或等于 1 点偏角值（逆时针拨角时）。转动照准部使度盘读数等于 1 点偏角值（或零），由 ZY 点沿视线量第一段弦长 c_1 得整桩点 1。继续转照准部，使度盘读数为 2 点偏角值（或零）。由 1 点量 c_0 与视线相交得 2 点，依次类推可测设至 YZ 点上。如果曲线较长，在测至 QZ 点后搬站至 YZ 点上再测设另一半曲线。曲线测量的限差应符合表 5－5 的规定。

表 5－5　曲线测量限差表

线路名称	纵向闭合差		横向闭合差（cm）
	平地	山地	10
铁路、汽车专用公路	1/2000	1/1000	10
一般公路	1/1000	1/500	10

目前电磁波测距仪及电子全站仪的广泛应用使量距非常方便，因此在给出 i 点的偏角后，可直接用 ZY 点到 i 点的弦长来定点，这样可减少放样时误差的累积。

2. 切线支距法

切法支距法又称直角坐标法，适用于地势较为开阔平坦，便于量距的地区。其原理是以曲线起点 ZY（或终点 YZ）为原点，以切线作 x 轴，过原点的曲线半径为 y 轴，利用曲线上各点坐标 x、y 来测设各曲线点，如图 5－19 所示。

各曲线点坐标可按下式计算：

$$\begin{aligned} x_i &= R\sin\phi_i \\ y_i &= R\ (1-\cos\phi_i) \end{aligned} \qquad (5-8)$$

式中 $\phi_i = \frac{L_i}{R} \cdot \frac{180^\circ}{\pi}$；$L_i$ 为待定点至原点间的弧长；ϕ_i 为 L_i 所对的圆心角；R 为曲线半径。

测设时以 ZY（或 YZ）点为起点，沿切线方向量取 i 点的横坐标 x_i，得垂足 N_i。由垂

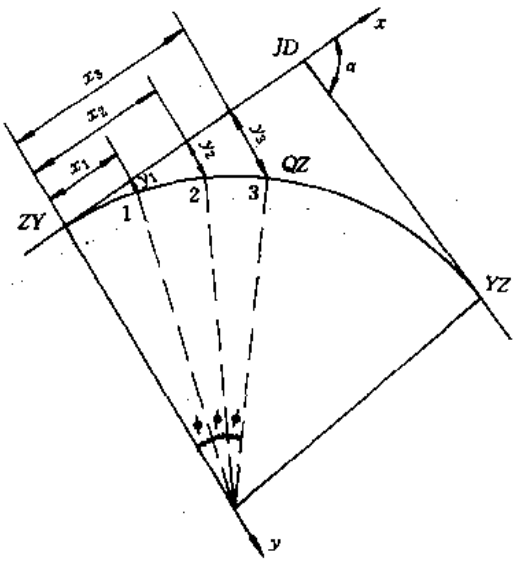


图 5—19

足点 N_i 上设置直角，沿垂线方向量出相应的 y_i 坐标即得 i 点。依次可定出各点位置，一般放样至 QZ 点而后再由 YZ 点开始测设。

该方法各曲线点的测设是相互独立的，不会产生误差累积。但不能自行闭合，即缺少检核条件。因此放样后要丈量各相邻两点间距离，以作检核。

3. 弦线支距法

弦线支距又称长弦纵距法。该法是以 ZY（或 YZ）点为坐标原点，以弦 $ZY\sim YZ$ 为 x 轴，弦的垂线为 y 轴（图 5—20）。

各曲线点坐标可按下式计算：

$$x=\frac{c}{2}-x'$$

$$y=M-y' \qquad (5-9)$$

$$M=R\ (1-\cos\alpha/2)$$

式中 c 是 ZY 点～YZ 点间弦长；x'、y' 是以 QZ 点为原点，过 QZ 点的切线为 x 轴，过 QZ 点和曲线圆心的线为 y 轴构成的坐标系中的纵、横坐标值（图 5—21），可按式（5—8）求得。

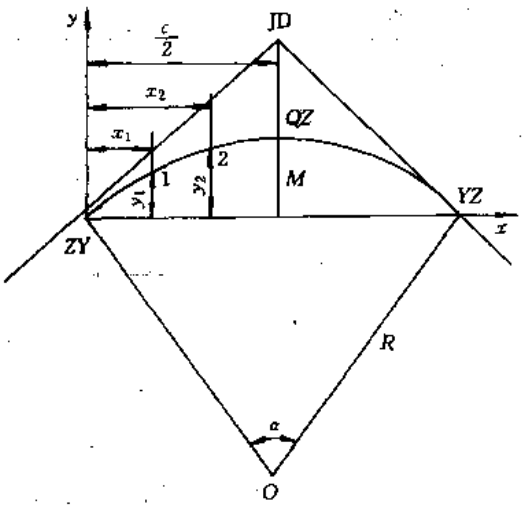


图 5—20

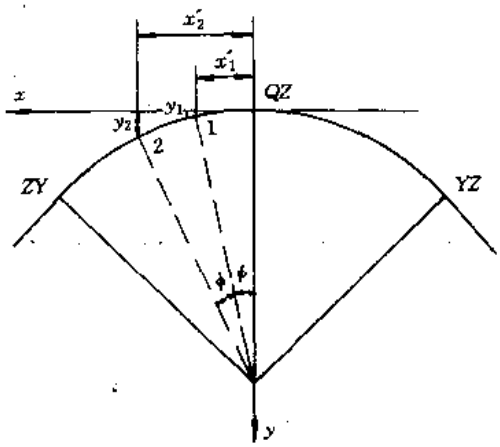


图 5—21

用弦线支距法测设圆曲线，常以 QZ 点为界把曲线分成两部分。在计算出 x_i、y_i 值后，沿 ZY 点—YZ 点的弦量 x_i 得 N_i 点，在 N_i 点拨直角作弦的垂线；在线上量出 y_i 值即得曲线点 i。标定出各点后同样要量出各曲线点间距以作检核。

该种方法多用于使用切线支距法有困难时，可用它从曲线内侧测设。特别适用于曲线较短或狭长地带（如曲线隧道内）。作业时可将整条曲线根据实际地形分成若干段，各段可

自成一直角坐标系统进行曲线放样。

4. 弦线偏距法

弦线偏距法亦称延弦法，实际上是一种以距离交会测定曲线桩点的方法。该法的关键是求出曲线上两相邻点的弦线延长一倍后端点对曲线的偏离值 d，由图 5－22 可看出：

$$d_1=2c\cdot\sin\frac{\phi}{4}$$
$$d_i=2c\cdot\sin\frac{\phi}{2} \qquad (5-10)$$

式中 d_1 为 ZY 点（或 YZ 点）与相邻曲线点的切线偏距；d_i 为其余各相邻曲线点的弦线偏距。

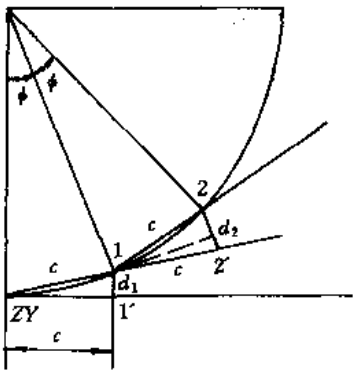


图 5－22

测设时，由 ZY 点（或 YZ 点）沿切线量弦长定出 $1'$ 点，而后在 ZY 点用弦长 c 在 $1'$ 点用偏距 d_1 作距离交会得 1 点。将 ZY—1 延长一倍得 $2'$ 点，再由 1 点和 $2'$ 点分别以 c 和 d 作线交会得 2 点。依次类推，即可测设出曲线各点。实际工作中常以 QZ 点作为界线分别由 ZY 点和 YZ 点向 QZ 点标设。以 QZ 点作为标定精度的检核。

弦线偏距法量测工具简单、测算方便，更适合于横向受限制的地段测设曲线。如隧道工程、半成路基上恢复中线及狭窄地区的曲线测设。

5. 极坐标法

目前电子速测仪及测距仪与便携微机的配合使用，使得极坐标法在放样中被广泛应用。所谓极坐标法，是在已知点上安置经纬仪，后视另一已知点，拨出极角 β_i；在视线方向上量出极坐距 S_i，即可确定待定点 i 的位置。此法的优点是计算简单，使用灵活方便。特别是电子速测仪中都设有极坐标放样与自由设站的专用程序，更使测设工作变得快捷。

采用极坐标法测设曲线各点时，可首先选择一视野开阔，能看到整条曲线的点位。用电子速测仪测定其空间三维坐标，而后移站至该点，利用测站点坐标和各曲线点坐标（可由设计资料解析出）反算标定要素（各点相应的极角 β_i 及极距 S_i），并将其输入速测仪或电子手簿中。然后照准已知点定位，转动电子速测仪大致照准放样点位置处的反光镜，在放样程序的配合下，仪器（或电子手簿）显示窗上会自动显示偏离正确位置的偏离值。立镜者可按测站传递的信息调整镜位，从而正确标定出曲线点。在测绘仪器朝着智能化、自动化发展的今天，极坐标法在曲线放样中将会受到测量人员的喜爱，而成为曲线放样的一种主要手段。

二、复曲线测设

线路转向时，由于地形限制，需在两相邻直线方向间设置两个或两个以上半径不同的同向圆曲线，该组圆曲线称为复曲线（图 5－23）。复曲线的测设方法较多，这里只介绍切基线法。

图 5－23 中，JD_1、JD_2 为相邻两交点。JD_1—JD_2 为切基线，GQ 为主副曲线的公切点。

首先依据设计中给出的 R_1、R_2、α_1、α_2 利用式（5—5）计算出 T_1、T_2。测设时在 JD_1

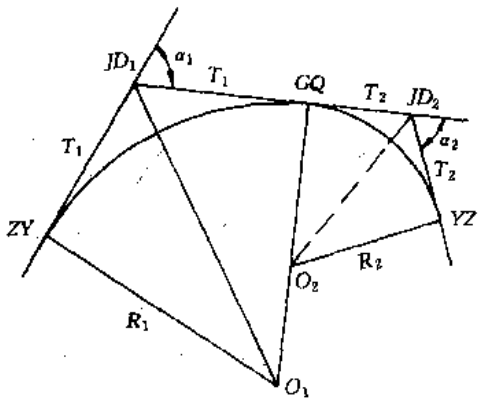


图 5－23

安置经纬仪瞄直线上的转点或交点定出切线方向，沿线量 T_1 可得 ZY 点和 GQ 点。同理可利用 JD_2 定出 YZ 点并检查 GQ 点位置。而后可按前面讲述的曲线详细测设方法测定各曲线点。

三、缓和曲线的测设

当车辆由直线驶入圆曲线，即从无限大的半径到一个定值半径，或从大半径圆曲线驶入小半径圆曲线时会产生较大的离心力，影响车辆的安全行驶。为使车辆能安全、迅速、平稳、舒适地从直线转到圆曲线上，使离心加速度的变化控制在一定数值内，应使路面做成外侧高、内侧低呈单向横坡形式，即弯道超高。为了符合车辆行驶的轨迹，应使超高由零逐渐增加到一定值，在直线与曲线间插入一段半径由∞逐渐变化到 R 的曲线，这种曲线称为缓和曲线。

缓和曲线的线型有螺旋线（回旋线）、三次抛物线、双纽线等。我国铁路和公路部门均采用螺旋线作为缓和曲线。螺旋线的特性是：曲线上任意一点的曲率半径与该点至起点的曲线长成反比。

（一）缓和曲线参数及应用公式

1. 螺旋线的基本公式

$$R'=\frac{c}{L} \tag{5－11}$$

式中 c 为螺旋曲线参数，称为曲线半径变化率。

c 值可按下法确定，在缓和曲线与圆曲线的连接点处，其半径 ρ_0 应等于圆曲线半径 R，缓和曲线终点到其起点的曲线长即是缓和曲线的全长 l_s，则：

$$c=R'l=R\cdot l_s \tag{5－12}$$

在复曲线中应用的缓和曲线其 c 值为：

$$c=\frac{l_{012}\cdot R_1\cdot R_2}{R_1-R_2} \tag{5－13}$$

式中 R_1、R_2 分别为两邻圆曲线的半径；l_{012} 为连接两圆曲线的缓和曲线长度。

2. 缓和曲线要素及参数

当圆曲线两端加入缓和曲线后，必将使圆曲线内移一段距离 P，才能使缓和曲线与直线衔接，这时切线加长 m 值。内移圆曲线，可采用移动圆心或缩短半径的方法。我国铁路、公路中通常采用移动圆心的方法（图 5－24）。

加入缓和曲线后的圆曲线其主点由原来的三个增加为五个：

ZH——直缓点，直线与缓和曲线的连接点；

HY——缓圆点，缓和曲线和圆曲线的连接点；

QZ——曲中点，曲线的中点；

YH——圆缓点，圆曲线和缓和曲线的连接点；

HZ——缓直点，缓和曲线和直线的连接点。

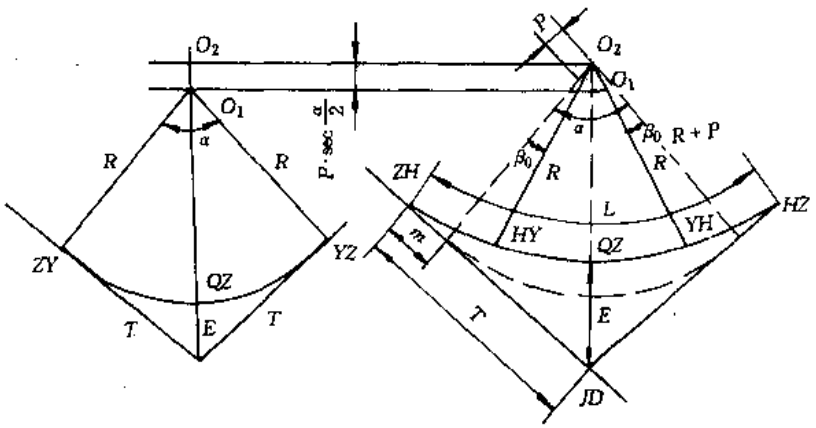


图 5－24

各曲线要素公式变为下式：

$$T=m+(R+P)\tan\frac{\alpha}{2}$$

$$L=\frac{\pi R\cdot(\alpha-2\beta_0)}{180^\circ}+2l_0 \tag{5-14}$$

$$E=(R+P)\sec\frac{\alpha}{2}-R$$

$$q=2T-L$$

式中 α、R 分别为线路转向角和圆曲线半径；

l_0——缓和曲线长度；

m——加设缓和曲线后使切线增长的距离；

P——加设缓和曲线后圆曲线相对于切线的内移量；

β_0——HY 点（或 YH 点）的缓和曲线角度。

其中：m、β_0、p 称为缓和曲线参数，可按下式计算：

$$\beta_0=\frac{l_0}{2R}\cdot\rho$$

$$m=\frac{l_0}{2}-\frac{l_0^3}{240R^2} \tag{5-15}$$

$$p=\frac{l_0^3}{24R}$$

3. 缓和曲线参数方程

首先讨论缓和曲线参数方程，为此建立以 ZH 点为原点，过 ZH 点的缓和曲线切线为 x 轴，ZH 点上缓和曲线的半径为 y 轴的直角坐标系（图 5－25）。

由图可知：曲线上任一微分弧段 dl 在坐标轴上的投影为：

$$\mathrm{d}x=\mathrm{d}l\cdot\cos\beta$$

$$\mathrm{d}y=\mathrm{d}l\cdot\sin\beta$$

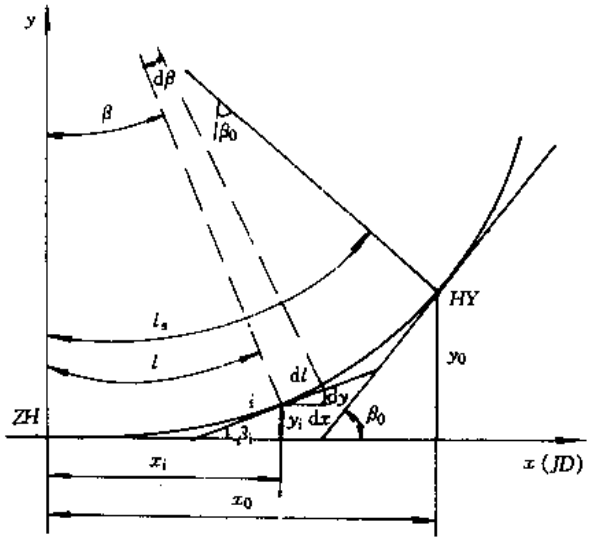


图 5－25

式中 β 为 l 的函数。根据弧长与半径的关系有：

$$d\beta=\frac{dl}{R'}=\frac{l\cdot dl}{c}$$

对上式求积分得：

$$\beta=\frac{l^2}{2c} \qquad (5-16)$$

所以缓和曲线上任一点的坐标为：

$$x=\int_0^l \cos\beta\cdot dl=\int_0^l \cos\left(\frac{l^2}{2c}\right)\cdot dl$$

$$x=\int_0^l \sin\beta\cdot dl=\int_0^l \cos\left(\frac{l^2}{2c}\right)\cdot dl \qquad (5-17)$$

以 $c=R\cdot l_0$ 代入上式后将 $\cos\left(\frac{l^2}{2c}\right)$ 和 $\sin\left(\frac{l^2}{2c}\right)$ 按级数展开并对上式积分得：

$$x_i=l_i-\frac{l_i^5}{40R^2l_0^2}+\frac{l_i^9}{3456R^4l_0^4}-\cdots\cdots$$

$$y_i=\frac{l_i^3}{6Rl_0}-\frac{l_i^7}{336R^3l_0^3}+\frac{l_i^{11}}{44240R^5l_0^5}-\cdots\cdots \qquad (5-18)$$

上式即为以曲线为参数的缓和曲线方程。

下面讨论圆曲线参数方程。如图 5－26 所示，仍采用前述直角坐标系。

$$x_i=R\sin\alpha_i+m$$

$$y_i=R\ (1-\cos\alpha_i)\ +P \qquad (5-19)$$

将 $\alpha=\frac{180°}{\pi R}(l_i-l_0)+\beta_0$（$\alpha$ 用弧度表示）及 $\beta_0=\frac{l_0}{2R}$ 代入式（5－19）得：

$$x_i=R\sin\left(\frac{l_i-0.5l_0}{R}\right)+m$$

$$y_i=R\left[1-\cos\left(\frac{l_i-0.5l_0}{R}\right)\right]+P \qquad (5-20)$$

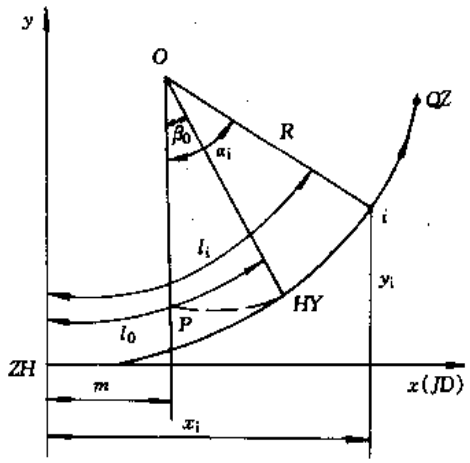


图 5－26

将式 5－20 中的 $\sin\left(\frac{l_i-0.5l_0}{R}\right)+m$ 及 $\cos\left(\frac{l_i-0.5l_0}{R}\right)$ 用台劳级数展开，略去高次项后得：

$$x_i=l_i-0.510-\frac{(l_i-0.5l_0)^3}{6R^2}+\cdots\cdots+m$$

$$y_i=\frac{(l_i-0.5l_0)^2}{2R}-\frac{(l_i-0.5l_0)^4}{24R^3}+\cdots\cdots+P \qquad (5-21)$$

（二）缓和曲线主点测设

在圆曲线上设置缓和曲线后，将圆曲线和缓和曲线作为一个整体考虑。首先式（5—14）计算各曲线要素 T、L、E、q 并根据 JD 点已知里程和各曲线要素推算各主点里程。

ZH 点里程＝JD 里程－T

HY 点里程＝ZH 点里程＋l_0

YH 点里程＝HY 点里程＋l_0

HZ 点里程＝YH 点里程－l_0

QZ 点里程＝HZ 点里程－$l/2$

JD 点里程＝QZ 点里程＋$q/2$（该里程作检核用）

主点 ZH、HZ 及 QZ 的测设，同于前述圆曲线主点的测设。而 HY 及 YH 点一般是用切线支距法测设的，因此要求出 HY 和 YH 点坐标值 x_0、y_0。通常 x_0、y_0 是以 R 及 l_0 为引数，在“曲线表”第三表中查取的。

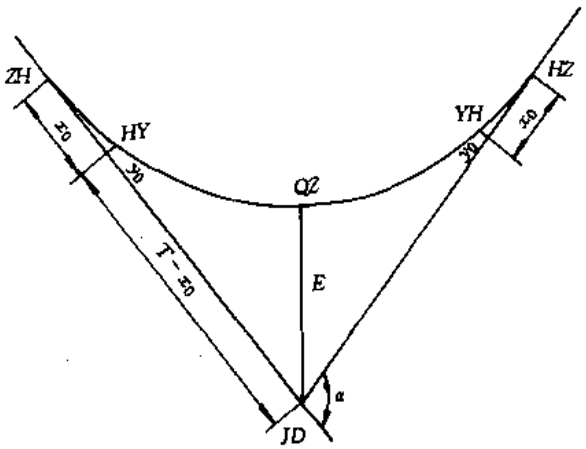


图 5—27

测设时（图 5—27），将经纬仪置于交点 JD 上定向，沿两切线方向量出切线长 T 即得 ZH 点及 HZ 点。然后用经纬仪设置角（180—α）的平分线在线上量 E 得 QZ 点。

根据 x_0、y_0 由 JD 沿两切线方向分别量 $T-x_0$ 得 $(HY)'$ 和 $(YH)'$ 两个点，过 $(HY)'$ 和点 $(YH)'$ 点作切线的垂线，在线上量出 y_0 即得 HY 点和 YH 点。

（三）缓和曲线详细测设

1. 切线支距法

缓和曲线的切线支距法是以 ZH 点（或 HZ 点）作为坐标原点，过 ZH 点的切线及半径分别为 x 轴和 y 轴。利用综合曲线上各点的 x、y 坐标测设曲线（图 5—26）。曲线上各点坐标可按式（5—18）和（5—21）计算，另外也可以 R、l_0、l_i 为引数查“曲线表”第十表取得。其测设方法同于前面圆曲线切线支距法。

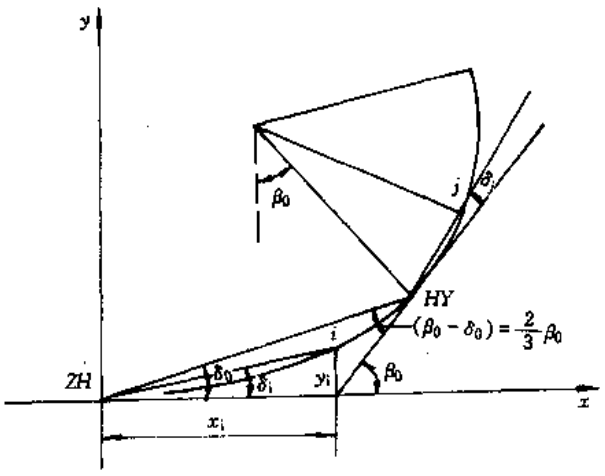


图 5—28

2. 偏角法

偏角法是利用方向和距离交会的方法来放样曲线点的，所以首先应计算偏角及距离。

在利用偏角法放样综合曲线时，通常是先在 ZH 点上安经纬仪，放样缓和

曲线上各细部，然后将仪器迁至 HY 点上，放样圆曲线上各细部点。因此偏角值可分为缓和曲线和圆曲线来计算。

如图 5—28 所示，i 点为缓和曲线上的任意点，i 点与 ZH 点的连线与切线的夹角即为该点的偏角 δ_i，因 δ_i 很小故 $\delta_i=\frac{y_i}{x_i}$。根据式（5—18）并仅取其第一项后代，则有：

$$\delta_i=\frac{\frac{l_i^3}{6Rl_0}}{l_i}=\frac{1}{3}\cdot\frac{l_i^2}{2Rl_0}=\frac{1}{3}\beta_i \tag{5—22}$$

$$\delta_0=\frac{1}{3}\beta_0$$

且可推出 $\delta_1:\delta_2=l_1^2:l_2^2$。

上式表明缓和曲线上任意点的偏角 δ_i 与该点至曲线起点的曲线长之平方成正比，且等于该段缓和曲线转角 β_i 的三分之一。

当用整桩距法测设时，即取 $l_2=2l_1$、$l_3=3l_1$……。

根据式（5—22）可得相应各点的偏角值为：

$$\begin{aligned}&\delta_2=2^2\delta_1\\&\delta_3=3^2\delta_1\\&\cdots\cdots\\&\delta_n=n^2\delta_1=\delta_0\end{aligned} \tag{5—23}$$

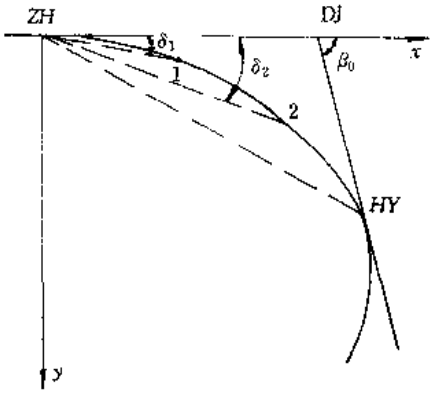


图 5—29

对于圆曲线部分，由于测设时是将仪器安置在 HY 点（或 YH 点）上进行的。所用的各点偏角都是该点与 HY 点（或 YH 点）的连线与过 HY（或 YH）点的切线所夹的角度，因此其偏角可按式(5—7)计算。

在综合曲线放样时，如图 5—29 所示。首先将仪器安置于 ZH 点上，以 DJ 定向并将度盘归零。然后拨 δ_1 角，在视线上量取 l_1 得 1 点。继续转经纬仪拨 δ_2 角，由 1 点量取 l_1 与视线相交得 2 点（如测距方便，可直接由 ZH 点沿视线量 l_2 得 2 点，这样做可避免各点误差累积，使各点误差独立）。依次类推，可放至 HY 点。经主点 HY 点闭合检查后，将仪器迁至 HY 点上，以 ZH 或 HZ 点定向，使水平度盘读数为 $360°-(\beta_0-\delta_0)$。转动经纬仪照准部使水平度盘读数为零，此时视线方向即为 HY 点的切线方向。纵转望远镜，即可按圆曲线上各点的 δ 角及弦长放样（方法同前），至 QZ 点后迁至 HZ 点上放样另一半曲线。此时应注意偏角的拨动方向是反拨。另外当由一个主点测设至另一个主点时，应检查其闭合差。若闭合差在允许范围内，可按圆曲线测设时闭合差分配方法处理。

四、困难地段的曲线测设

由于地形复杂及地物障碍，往往使线路交点、曲线主点不能设站，或放样时视线受阻，

因此实际工作中必须因地制宜采用一些灵活多样的方法来放样曲线。下面将介绍几种常见情况及解决办法。

（一）虚交

所谓虚交是指线路交点 JD 不能设桩或安置仪器（如交点位于水中或建筑物上）。另外有时线路转角过大，使 JD 点远离曲线不便于使用或不易到达。此时可采用选定副交点的方法来解决。

如图 5－30 所示，在切线的适当位置上选定 A、B 两点作为副交点，并测出 α_A、α_B 及 AB 间距离 S_{AB}。由图可知 $\alpha=\alpha_A+\alpha_B$。解算$\triangle ABC$ 可求出 S_{AC}及 S_{BC}。放样主点时，可由 A 或 B 分别沿切线方向量出 $(T-S_{AC})$ 或 $(T-S_{BC})$ 即可定出 ZY 点和 YZ 点。

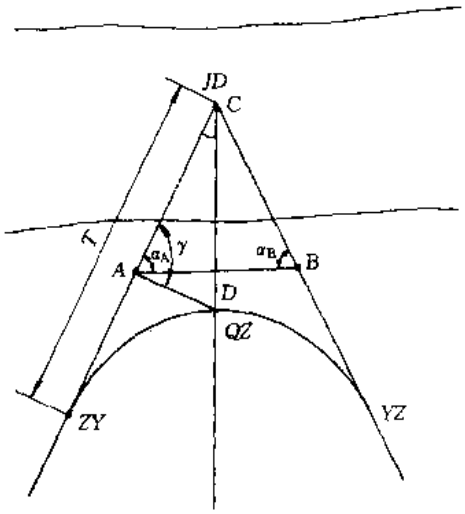


图 5－30

在$\triangle ACD$ 中，

$$AD=\sqrt{AC^2+CD^2-2AC\cdot CD\cos\theta}$$

按正弦定理：$r=\arcsin\left(\dfrac{CD}{AD}\sin\theta\right)$

式中 $CD=E$，$\theta=(180-\alpha)/2$。

依据计算出的 γ 角可在 A 点安仪器，后视 ZY 点，拨角 $(180°+\gamma)$ 在视线方向量长度 AD 即可定出 QZ 点。

曲线三主点定出后，即可进行详细测设。

但有时产生切线不通视的情况，此时对于副交点选择可作适当调整，如图 5－31 所示。测定 α_1、α_2，丈量 AB 从而解算出 AC 长，进一步定出 A 至 ZH 点距离。

（二）偏角法视线受阻时的测设方法

1. 测定圆曲线受阻时

当用偏角法测设圆曲线遇到障碍视线受阻时，可将仪器迁至能与待测桩点通视的已测定桩点上，继续测定。如图 5－32 所示，由 4 开始，以后各点视线受阻，此时可将仪器迁至已测定的 3 点上。后视 ZY 点，将度盘配置为（0°00′00″），纵转望远镜。拨转照准部使

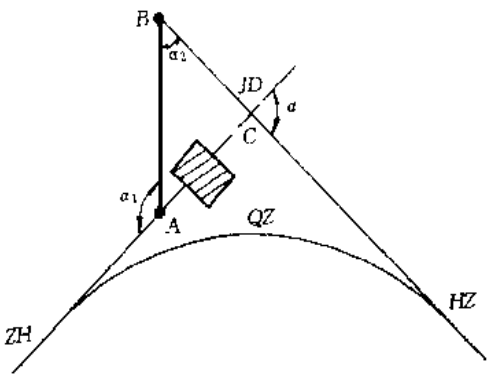


图 5－31

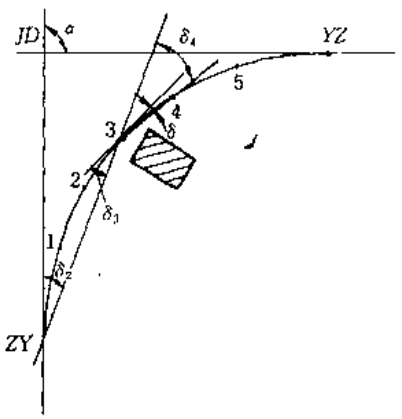


图 5－32

读数为 δ_4 时，即为 4 点的测设方向，沿视线量出 l 长可得 4 点，同理可标出以后各点。

2. 测设缓和曲线视线受阻时

在测定缓和曲线视线受阻时，也可迁至已测定且与其它待测点通视的点上，继续测设曲线。如图 5－33a 的 2 点，在这种情况下关键应求出 2 点的切线及放样用前、后视偏角。

图 5－33b 中，B、E 点为缓和曲线上已测定点，D 为待测点。过 E 点的切线与 x 轴的夹角为 β_E，由图可知：

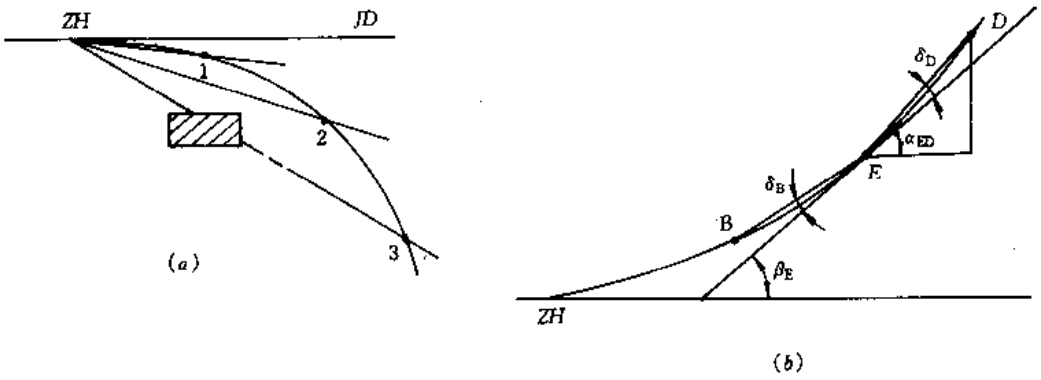


图 5－33

$$\delta_D=\alpha_{ED}-\beta_E$$

由式（5－16）可得：

$$\beta_E=\frac{lE_2}{2Rl_0}\cdot\rho \tag{5-24}$$

而 $\alpha_{ED}\approx ED\tan\alpha=\frac{y_D-y_E}{x_D-x_E}$。由缓和曲线参数方程式（5－18）并取其第一项代入可得：

$$\alpha_{ED}=\frac{(l_D^2+l_Dl_E+l_E^2)}{6Rl_0}\cdot\rho \tag{5-25}$$

则

$$\begin{aligned}\delta_D&=\frac{\rho}{6Rl_0}(l_D^2+l_Dl_E+l_E^2)-\frac{l_E^2}{2Rl_0}\cdot\rho\\&=\frac{\rho}{6Rl_0}(l_D^2+l_D\cdot l_E-2l_E^2)=\frac{\rho}{6Rl_0}(l_D-l_E)(l_D+2l_E)\end{aligned} \tag{5-26}$$

式中 l_B、l_E、l_D 分别为 B、E、D 各点距曲线起点 ZH 的弧长。

同理可得：

$$\delta_B=\frac{\rho}{6Rl_0}(l_E-l_B)(l_B+2l_E) \tag{5-27}$$

实际工作中，可以 R 和 l_0 为引数在“曲线表”第六表中查出测站点的前后视偏角。

求出前后视偏角后，可以 2 点安置仪器，后视 1 点或 ZH 点（后视点应尽量远些）将水平度盘配置在后视偏角值上纵转望远镜，转动照准部使水平度盘读数为 0。此时视线指向 2 点切线方向，而后可根据各待测定点的前视偏角继续测设曲线。

（三）曲线起点或终点有障碍物

如图 5－34 所示，ZY 点落在水中，此时可在切线上的池塘两边选点 A、B，量出 B 至 JD 距离，S 过 A、B 点作切线的垂线，使 $AA'=BB'$ 并延长 $A'B'$ 交圆曲线于 C 点，则：

$$CB'=CD-B'D=R\sin\phi-(T-S) \tag{5-28}$$

$$\phi=\arccos\left(\frac{R-AA'}{R}\right)$$

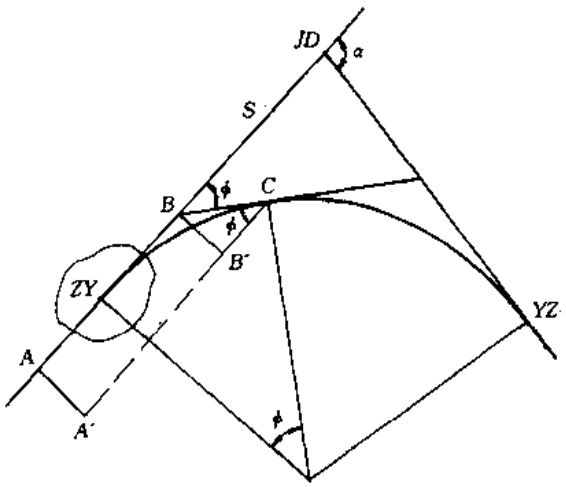


图 5－34

实际测定时，可在 B' 点安置经纬仪后视 A' 点纵转望远镜，在视线上量距 $B'C$ 即可定出 C 点。在 C 点安经纬仪，以 A' 点定向，配置水平度盘读数为 $(360°-\phi)$。转动照准部当度盘数为零时，视线方向即为切线方向。由 ϕ 角可计算 C 点里程并依此计算曲线上各细部点偏角。用偏角法放样以后各点。

另外，此种情况下，用极坐标法放样也是可行的。

五、回头曲线的测设

回头曲线是一种半径小、转弯急、线型标准低的曲线形式，常用于山区。其特点是交点（JD）位于曲线内侧，偏角接近或大于 180°（图 5－35）。通常回头曲线由直线、缓和曲线及圆曲线组成。其曲线要素计算公式如下：

$$\begin{aligned}
&\alpha=360°-(\theta_1-\theta_2)\\
&T=(R+P)\tan\left(\frac{\theta_1+\theta_2}{2}\right)-m\\
&L=\frac{\pi P}{180}\cdot(\alpha-2\beta_0)+2l_0
\end{aligned} \tag{5-29}$$

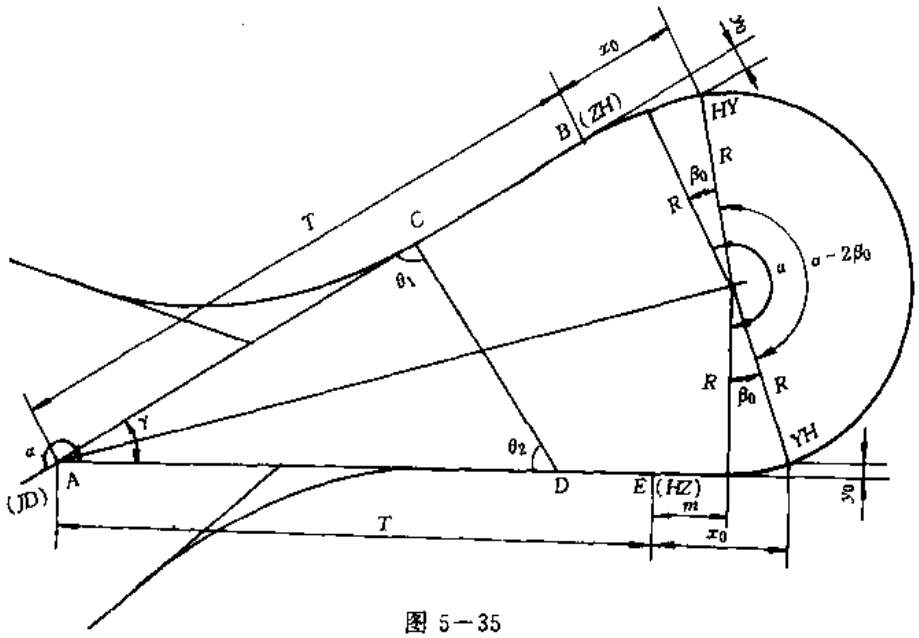


图 5－35

1. 副交点法

在两直线段上分别选择 C、D 点，丈量 C、D 点间距离，并测量 θ_1 和 θ_2 角。解算△ACD 得：

$$AC=CD\frac{\sin\theta_2}{\sin\ (\theta_1+\theta_2)}$$

$$AD=CD\frac{\sin\theta_1}{\sin\ (\theta_1+\theta_2)}$$

分别由副交点 C、D 开始沿 AC 和 AD 方向量 $CB=T-AC$ 和 $DE=T-AD$ 定出 ZH 点和 HZ 点。由 ZH 点和 HZ 点用切线支距法定出 HY 点和 HY 点。主点定出后即可按前述方法进行曲线的详细测设。

2. 公路回头曲线放样

公路的回头曲线的线形往往不同于铁路。公路回头曲线，一般由主曲线（半径为 R_1 的圆曲线转角大于或略小于 180°）和副曲线（半径为 R_2 用来连接主曲线和路线直线段的圆曲线）所组成（图 5－36），并且一般不设置缓和曲线。

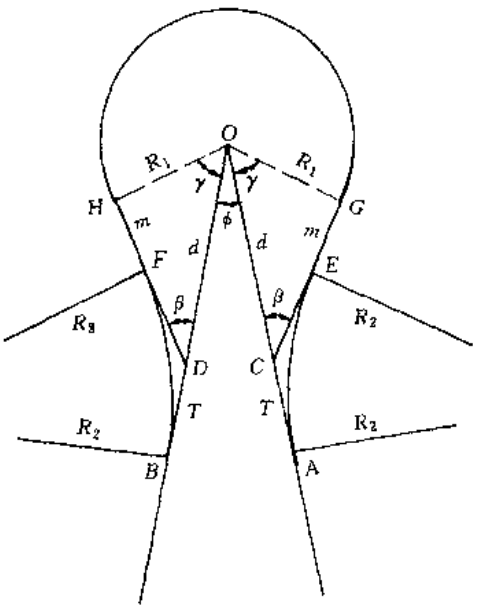


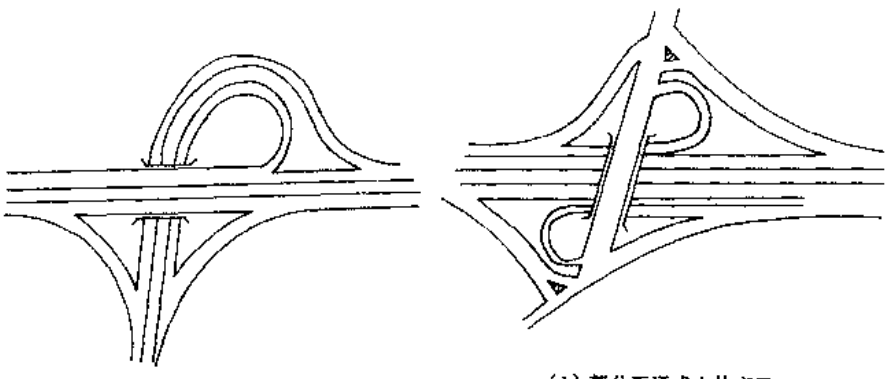
图 5－36

图中线路的交点 O 及两直线段夹角 ϕ 均由定测时测出，主曲线半径 R_1 和副曲线半径 R_2 及 HD、GC、OD、OC 的距离均为设计给定。设计中遵循 R 应大于极限最小半径，CD 点间距应大于双向路基总宽（含边坡、边沟或其它有关设施之和的一半）。为放样还需做以下计算。

$$\beta=\arctan\frac{OG}{CG} \qquad (5-30)$$

$$r=90°-\beta$$

测设时首先安置仪器于 O 点，沿回头曲线切线方向（已测定）OA 及 OB 量出长度 d 得副曲线的交点 C、D。再由 C、D 点分别沿 OA、OB 方向量 T 得副曲线起点 A 和 B、E、F。在 O 点安经纬仪分别以 A、B 定向并拨 γ 角沿视线量取距离 R，定出主曲线的起点 T 和终点 F。主点定出后按前述的曲线详细测设的方



（a）三岔互通式立体交叉　　（b）部分互通式立体交叉

图 5－37

法进行细部测定。

3. 立交圆曲线

目前为解决城市交通拥挤的状况，在大中城市的主要路口，多采用立体交叉线路，从而形成一种立交圆曲线的线型。该圆曲线所连接的上下两条直线段高度相差较大，并形成空间交错。其类型较多，主要有部分互通式、四岔道互通、菱形互通、三岔互通、环形多岔道、完全互通等多种立体交叉（图 5－37）。

图 5－38 是一典型的公路主交圆曲线。曲线半径 R 设计中已给定，其 JD 点和 α' 角在定测中已测定。依据 R 和 α' 角可求出曲线要素为：

$$L=\alpha\cdot R\cdot\frac{1}{\rho}$$

$$\alpha=360^\circ-\alpha' \qquad (5-31)$$

$$T=\frac{R\sin\beta_2}{\sin\beta_1}$$

$$E=\frac{R\sin\beta_3}{\sin\beta_1}+R$$

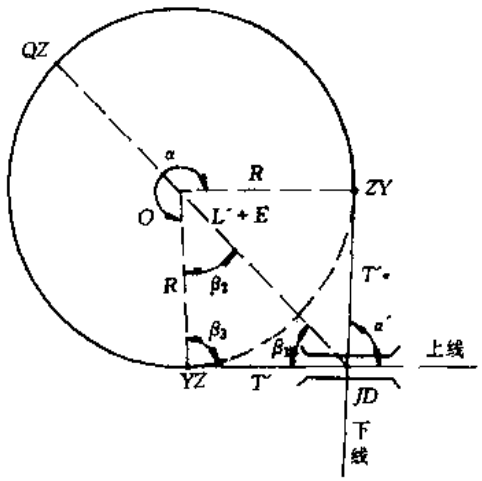


图 5－38

式中 $\beta_1=\dfrac{360^\circ-2\alpha'}{4}$；$\beta_2=\dfrac{360^\circ-\alpha}{2}$；$\beta_3=180^\circ-\beta_1-\beta_2$。

各主要点里程计算为：

$$ZY=JD_{下}+T$$

$$QZ=ZY+L/2$$

$$YZ=QZ+L/2$$

$$JD_{上}=YZ+T$$

式中 $JD_{下}$ 为交点在下线的里程；$JD_{上}$ 为交点在上线的里程。

测设时将经纬仪置于 JD 上，后视下线方向 ZD 定向后纵转望远镜，在视线上量 T 得 ZY 点。同法照准上线方向后测设 YZ 点。在 YZ 点上安经纬仪瞄上线方向拨直角，在视线上量 R 定出圆心 O，在 O 上安经纬仪检测 α 角；满足限差要求后设置 α 的平分线，在线上量 R 得出 QZ 点，细部放样同于一般圆曲线。

六、竖曲线

铁路及公路修筑在地面上，必须随地形起伏相应地设置上坡下坡，其坡度变化点称为变坡点。这种不加修饰的折线纵坡，不利于行车的舒适和安全。特别是当相邻两坡度之差超过一定值时会给运行的车辆带来危险。因此当变坡点的坡度代数差（Δi）超过规定限值（国家Ⅰ、Ⅱ级铁路规定 $\Delta i\leqslant 3‰$、Ⅲ级铁路 $\Delta i\leqslant 4‰$）时，应在两坡段间用曲线把它们连接起来。这种连接不同坡段的曲线称为竖曲线。

竖曲线的线型，可采用抛物线或圆曲线，我国多采用圆曲线。由于线路上的纵坡的竖曲线半径都很大（铁路一般在 5000～10000m），所以在直线和曲线间不用插入其它曲线，可直接相接。

图 5－39 是一圆形竖曲线。曲线要素计算公式为：

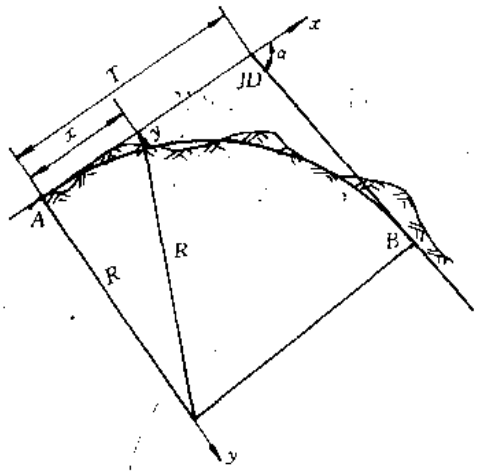


图 5－39

$$T=R\tan\frac{\alpha}{2} \qquad (5-32)$$

$$L=R\cdot\alpha$$

由铁路及公路纵坡设计中可看出，其允许纵坡的数值不大(如高速公路在山区为5%，Ⅰ级公路在山区为6%，……)，因此纵断面上的转角 α 可由下式近似计算：

$$\alpha=\Delta i=i_1-i_2$$

式中 i_1、i_2 为两相邻的纵向坡度值。

$$\therefore \qquad T=R\tan\frac{\alpha}{2}=\frac{1}{2}R\cdot\Delta i \qquad (5-33)$$

$$L=R\cdot\alpha=R\cdot\Delta i$$

此外，还必须计算出竖曲线上各点高程及外矢距 E。为此建立以起点 A 为坐标原点，切线方向及半径方向分别为 x、y 轴的直角坐标系(图5－39)。

因 α 很小，故可近似认为曲线上各点的 y 坐标方向与半径方向一致。可将 y 值近似看作为切线和竖曲线的高程差。

$$(R+y)^2=R^2+x^2$$

$$2Ry=x^2-y^2$$

由于 y 值很小，可略去。故有：

$$y=\frac{x^2}{2R} \qquad (5-34)$$

依据上式的 y 值可计算各曲线点高程，已知变坡点设计高程为 H_0，则坡度线上各点高程为：

$$H'_i=H_0\pm(T-x)\cdot i$$

竖曲线上各点高程为：

$$H_i=H_0+(T-x)\,i_1\pm\frac{x^2}{2R} \qquad (5-35)$$

对于竖曲线上各点的里程，可依据变坡点里程来计算。在线路纵坡设计中，一般将变坡点设置在整桩上。这样 x 值取决于曲线点间所选的间距。

放样竖曲线时，首先根据竖曲线附近线路上的控制桩或里程桩，按各曲线点里程放样各点在线路上的位置并砸桩。测各点高程，依此计算各点填挖高度，将各点的填挖高度注在木桩上，作为施工的依据。

第五节　铁路施工测量

铁路施工测量主要包括：线路复测、路基施工测量、路面施工测量、铁路连接线测量。

一、线路中心线复测

线路勘测设计完成后，由于施工设计以及报批等原因影响，往往不能马上进行施工修筑。这一时期将会有部分桩点丢失。因此在施工前，要对线路各桩点进行复测。

复测的主要任务是：检查相邻两交点点间的曲线起（终）点和直线转点是否在同一条直线上；复测转向角并丈量切线长；复测各曲线主点桩；复测固定桩，丈量线路实际长度；各主要桩加设固定桩。

复测时，首先依照定测资料并借助仪器查找各桩点。当个别交点桩丢失时，可利用相邻的交点及两直线段上尚有的转点采用方向交会法重新定点，并在交点上安置经纬仪重新测定转向角。若与定测资料基本相符，可按复测的转向角和原设计半径计算曲线元素，定出曲线主点。若转点桩丢失，在交点上按定测资料拨角放点，为保证恢复的转点桩与同一直线段上的其它桩点位于一直线上，应对放出的点位进行归化。当交点和转点恢复后，应补测其它中桩。

铁路施工中，经常需要恢复中线，因此对于所有的交点桩、曲线主点桩、直线转点桩及主要里程桩，应设置保护桩，以便在施工中线路中心桩破坏后仍能恢复，保护桩可布设成如图 5—40 所示的形式。

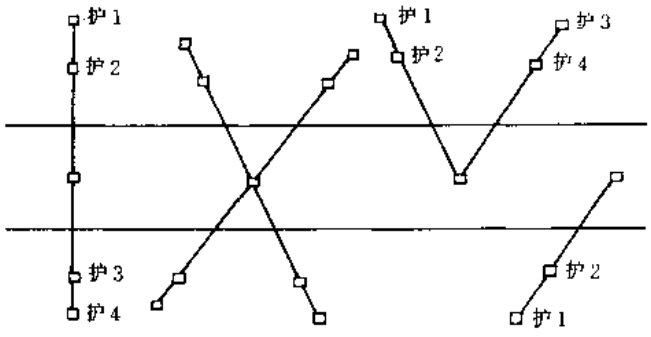


图 5—40

此外还应对线路水准进行复测。其任务包括：恢复被破坏的水准点、对受施工影响的水准点进行迁移，并对原水准点进行检测，对新补水准点施水准测量。水准点检测的高差与原定测时高差较差不应大于 $\pm 30\text{mm}\sqrt{L}$，对中线桩也应进行复测。

二、路基施工测量

路基施工测量分为边桩放样和边坡放样。所谓边桩放样就是在地面上将每一个横断面的路基边坡线与地面的交点，用木桩标定出来。而边坡放样，是把边坡坡度在实地放样出来，以保证按设计坡率来夯填或开挖路基。

（一）路基边桩放样

1. 图解法

该方法是直接在设计好的横断面图上量出坡脚点与中桩的距离，然后在实地用尺子沿横断面方向丈量距离，放样出边桩。此法适用于地形不复杂、且有横断面设计图的情况。

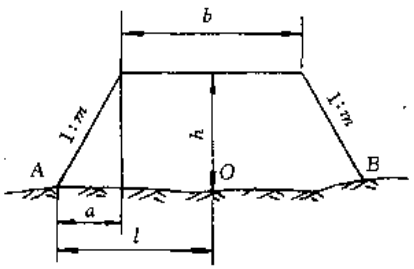


图 5—41

2. 解析法

路堤是边坡桩 A 点至路基中心桩 O 点的水平距离 l，如图 5—41 所示。

$$l=\frac{b}{2}+a=\frac{b}{2}+m_1h$$

算出 l 值后，自中心线标桩 O 点起，沿横断面方向量取水平距离 l，即可放出边坡桩 A 和 B。

3. 逐渐趋近法

在倾斜地段，边桩至中桩的距离随着地面坡度的变化而变化。

如图 5－42a 所示，路堤坡脚桩至中桩的距离 $D_{上}$、$D_{下}$ 为：

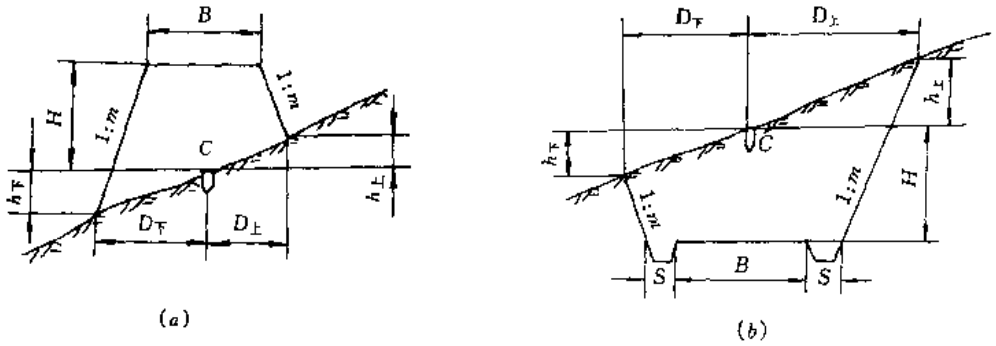


图 5－42

$$D_{上}=\frac{B}{2}+m\ (H-h_{上})$$
$$D_{下}=\frac{B}{2}+m\ (H+h_{下}) \qquad (5-36)$$

当为路堑时（图 5－42b）$D_{上}$、$D_{下}$ 为：

$$D_{上}=\frac{B}{2}+s+m\ (H+h_{上})$$
$$D_{下}=\frac{B}{2}+s+m\ (H-h_{下}) \qquad (5-37)$$

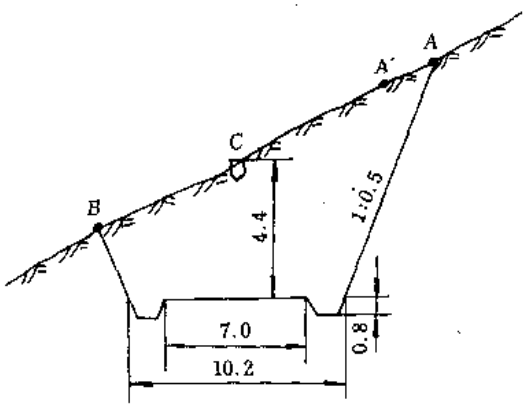


图 5－43

在此种情况下，可采用逐渐趋近法。此法的原理为：在标设现场，根据地面倾斜情况大致估算边桩与中桩 C 间的高差，利用式（5－36）或式（5－37）计算两点间平距，并依据中桩放样出上边界桩和下边界桩。然后用水准仪实测两点相对于中桩的高差，与估计的高差相比并求出差值。根据差值对边桩到中桩的平距进行调整，调整时可遵循如下原则进行。

当挖方时，如果实际高差大于估计高差，则平距应加大；如实际高差小于估计高差，则平距应缩小，填方时则反之。

现以一实例（图 5－43）说明具体标设方法（以标定上边界桩为例）：首先估计上边界桩的高差，根据地面倾斜状况估计 A 点相对于中桩 C 的高差为 1.6m，因此计算出边桩中心距为 8.1m，由中桩向上坡方向量平距 8.1m，在地面上标出 A' 点。实测 A' 点相对中桩高 2.2m，因此边桩的中心距应为 8.4m，按平距 8.4m 再标一点 A 点，实测其高差为 2.25m 与原测高差基本相符，可在 A 点处定边界桩。

4. 坡脚尺法

所谓坡脚尺是一个安装在杆上的扇形竖盘。竖盘上按照倾斜角与坡度的换算关系，自左至右注记了坡度。

使用边坡脚尺放样时，首先在横断面距中桩距离 l_1（$l_1<l$）处选一点 B_1 点（图 5－44a）。测出其与中桩的高差，近一步求出其与路基面的高差。

则有
$$l_1+m\cdot i=\frac{B}{2}+m\cdot h_1=l' \tag{5-38}$$

在 B_1 点处坡脚尺的高度 i 应为：
$$i=\frac{l'-l_1}{m} \tag{5-39}$$

求出 i 值后，在 B_1 点安置坡脚尺，使其仪器中心高度为 i，竖直标杆后使坡脚尺对准设计要求坡度，则其边缘的延长线与地面的交点则为边坡桩点 B。放样路堑时，其方法与此相同（图 5－44b）。

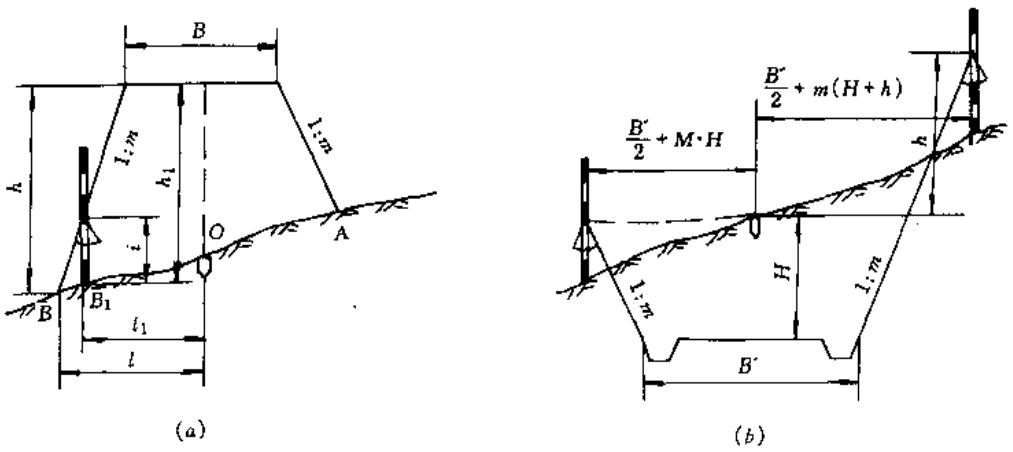


图 5－44

（二）铁路铺设时的测量

在铁路路基筑成而未铺设前，必须进行路基中心线放样，故沿中心线进行纵横断面测量，以检查路基放样及施工的质量，满足后继工程的需要。

首先依据设置的保护桩，将交点桩、曲线主点桩、直线转点桩及主要的里程桩恢复，并依此恢复出线路中心线的所有里程桩及曲线的细部点。在此基础上沿中桩进行水准测量。计算出每个标桩高程及所在处路基面高程，并求出其与设计高程之差。对路基进行修整，然后进行铁路上部建筑物（道砟、轨枕和铁轨）的放样。上部建筑物平面位置依据中心桩向两侧量距放样，高程位置一般放样在中线标桩的侧面，以划线或切口分别标出道砟面（或轨枕底平面）标高及钢轨顶面标高。曲线放样时应注意外轨超高的问题。

三、铁路连接线的测设

为方便机车的调度和行驶，在车站内及附近必须铺设线路连接交叉设备。常用的连接交叉设备有道岔和渡线。

1. 道岔的测设

所谓道岔是线路与线路间的连接设备，图 5－45 所示是一单开道岔。道岔一般由尖轨

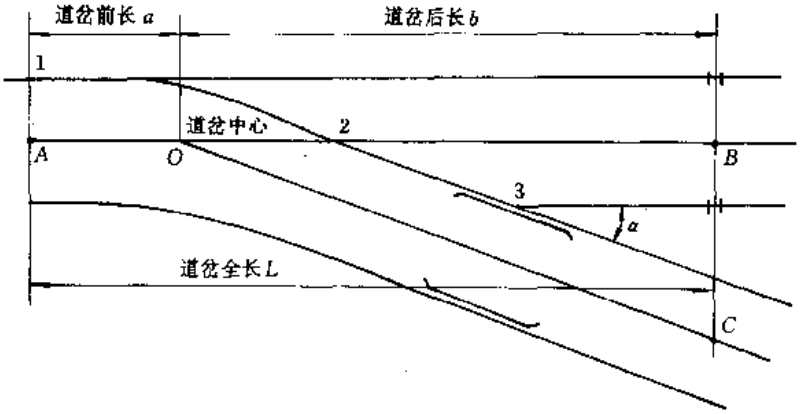


图 5—45

表 5—6 道 岔 尺 寸 表

道岔号码	道岔全长 L (mm)	道岔前长 a (mm)	道岔后长 b (mm)	辙叉后长 (mm)	辙叉角 α (° ′ ″)	导曲线半径 (m)
8	27165	13725	13440	1915	7 07 30	145.717
9	28848	13839	15009	2025	6 20 25	180.717
10	30804	14224	16580	2190	5 42 38	230.717
11	35017	16756	18261	2439	5 11 40	280.717
12	36595	16853	19742	2488	4 45 49	330.717

1、导曲线 2、辙叉 3 组成。在辙叉两个作用边之间的角度称为辙叉角（α）。

我国道岔已标准化，道岔各部尺寸与其道岔号码有关。常用道岔及有关尺寸见表 5—6。道岔号码越大其辙叉角越小，辙叉角越小，则列车通过道岔时越平稳。

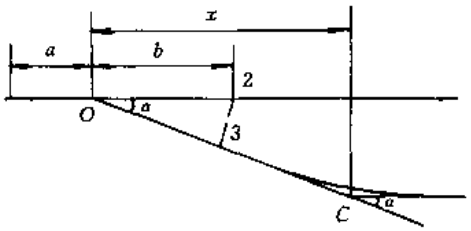


图 5—46

放样道岔时，应首先标出道岔中心位置。道岔中心位置可以其坐标放样，也可以其线路里程放样。道岔中心 O 标出后在 O 上安经纬仪，以线路中线定向拨 α 角定出测线方向。根据道岔前后长度定出 A、B 及 C 的位置。

对于两条平行线路相接（图 5—46），此时辙叉角与侧向线路辙叉角相等。C 点为侧线曲线的交点，设两线路中心线之间的距离为 l_1，则 C 点沿主线方向至道岔中心的距离为：

$$x=\frac{l}{\tan\alpha} \tag{5—40}$$

C 点处的切线长为：

$$T=R\cdot\tan\frac{\alpha}{2} \tag{5—41}$$

插入直线长：

$$q=\frac{1}{\sin\alpha}-(b+T) \tag{5—42}$$

当两条非平行线路相接时（图 5－47），道岔中心 O 与两线路交点 B 不重合，因此道岔中心 O 不能设在交点 B 则应当超前一段距离 x。由图可知：

$$x=\frac{(b+q+T)}{\sin\beta}\cdot\sin\ (\beta-\alpha) \tag{5－43}$$

式中 α 和 b 是由所选道岔号码确定，交角 β 是定测中测出，插入直线 q 在设计中给定。

$$BC=\frac{b+q+T}{\sin\beta}\cdot\sin\alpha \tag{5－44}$$

测设时在 B 点安经纬仪，沿两线路中线分别定出 O 点、C 点及其它点位。

2. 渡线的测设

所谓渡线是指由两付普通道岔。两条方向不同的曲线及一夹直线组成用来连接两条平行线路的连接线路，如图 5－48 所示。

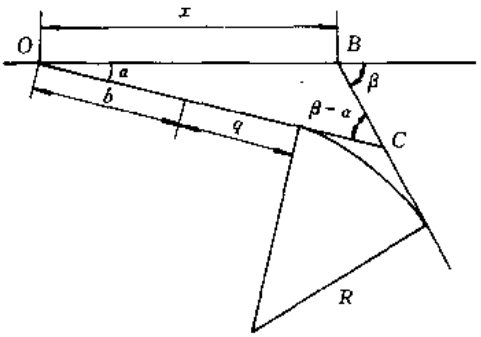


图 5－47

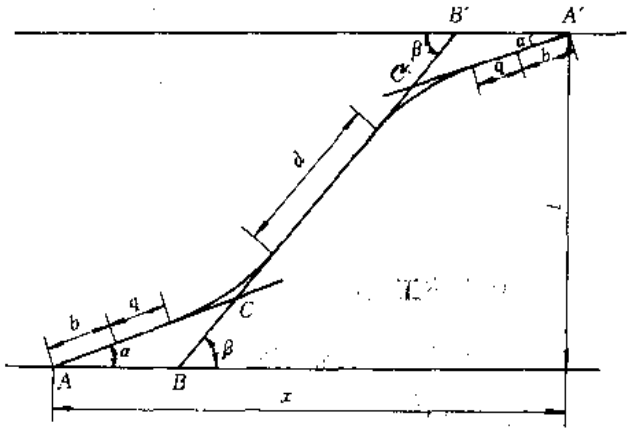


图 5－48

图中 β、b、q、α 等均在设计中给定，因此两道岔中心 A 和 A' 沿线路中线的距离 x 为：

$$x=2\ (b+q+T)\ \cos\alpha+\ (2T+d)\ \cdot\cos\beta \tag{5－45}$$

切线长 T 和直线段长 d 为：

$$T=R\tan\frac{(\beta-\alpha)}{2} \tag{5－46}$$

$$d=\frac{1}{\sin\beta}-2\frac{(b+q+T)}{\sin\beta}\sin\beta-2T \tag{5－47}$$

放样渡线时可根据里程在线路上定出一道岔中心（如 A），而后依其为原点用 x、β、l 放样 A' 点。在 A 及 A' 点上安经纬仪拨 α 角，并测设距离 $(b+q+T)$ 定出交点 C 与 C' 点，此两点间距离应等于 $2T+d$，其误差不得大于 1/20000。

第六节　公路施工测量

在公路施工中，除了路面铺设不同于铁路施工外，其余的施工过程基本相似。其施工测量分为：恢复线路中线、路基边桩的放样、路基边坡的放样、竖曲线放样和路面放样。

恢复线路中线及路基边桩放样与铁路施工测量相同，在此不再重复。下面介绍路基边

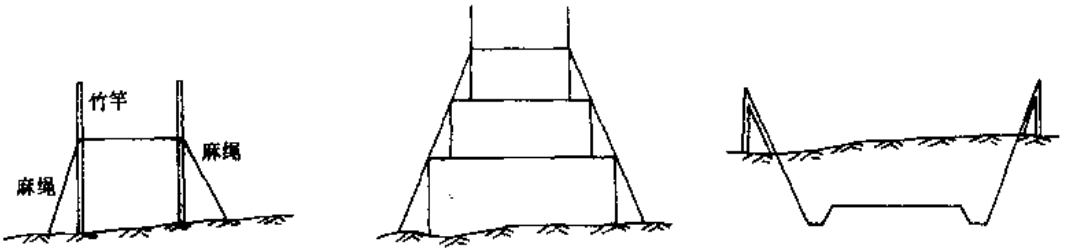
坡放样和路面施工放样。

一、路基边坡的放样

只放样出路基边桩还不足以指导施工，为使填、挖的边坡符合设计的坡率还应把边坡坡度在实地标定出来，以便于施工。

可利用麻绳竹竿标出边坡，当路堤不高时，可采用一次挂线（图 5－49*a*）。当路堤较高时可分层挂线（图 5－49*b*）。

在开挖路堑时，可在坡顶外侧立固定边坡样板指示边坡的挖掘（图 5－49*c*）。



(*a*)　(*b*)　(*c*)

图 5－49

二、路面施工放样

路面施工放样分为路槽放样和路拱放样。

1. *路槽放样*

在铺筑公路路面时，首先应放样出路槽宽度和路槽底部高程及路面高程。利用设置的保护桩在路基上部恢复线路中线的百米桩及加桩，并用水准测量实测其高程。然后在路线中线上每隔数 10m 采用高程点放样的方法测设高程桩，使其桩顶高程等于将来要铺筑的路面标高（图 5－50）。并由各高程桩沿横断面方向各量出二分之一路槽宽，根据路面横坡设计的路槽边桩高程标定出路槽边桩。并在上述各桩边挖一小坑，在坑中定桩，使桩顶等于考虑了横坡后槽底的高程，以指导路槽开挖。

2. *路拱的放样*

为利于路面横向排水通常将路面做成中间高两边低的弧线形（称为路拱），路拱分为抛物线型和圆曲线型。

当路面为抛物线型拱时（图 5－51），以路拱中心为原点 O，以过 O 点的水平线和铅垂

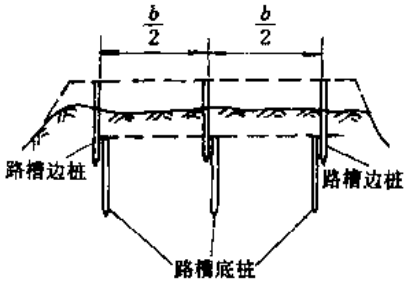


图 5－50

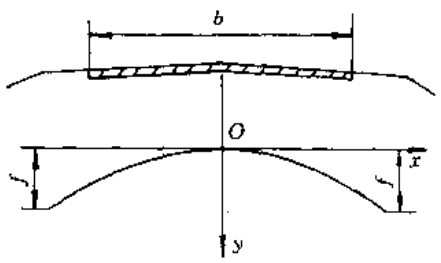


图 5－51

线分别作为 x 轴和 y 轴。由抛物线方程 $x^2=2py$，可求出路拱不同点的 y 坐标值。

当 $x=\frac{b}{2}$ 时，$y=f$（路拱高），由此可得 $p=\frac{b^2}{8f}$，则有

$$y=\frac{x^2}{2p}=\frac{4f}{b2}x^2 \tag{5-48}$$

根据各点 y 坐标依据中桩可放样横断面细部。

当路面为两个斜面中间插入的圆曲线时，路拱的高度 f 由下式计算：

$$f=\left(\frac{b}{2}-\frac{l_1}{4}\right)\cdot i_1$$

式中 b——铺装路面的宽度；

l_1——曲线段的水平投影距离。

公路路面横断面的放样是根据设计数据预先制成路拱样板，供施工人员使用。放样误差对于碎石路面不应超过 1cm，对于沥青和混凝土路面不应超过 2～3mm。

第七节 隧道施工测量

隧道施工测量是在隧道洞外平面控制测量的基础上进行的。它可概括为进洞测量和洞内测量。首先依照各洞口控制点坐标、以及隧道设计中线标定洞口位置及开挖的方向，指示隧道掘进，并及时延伸中线。当隧道掘进一定距离后应在临时点基础上建立导线控制，对临时点进行校核，并依此标设新中线点，直至贯通。由此可看出隧道施工测量与矿山测量中的内容有许多相似之处。因此本节主要讲述其独特之处，对于与《矿山测量》内容相同之处不再赘述。

一、进洞测量

进洞测量的主要任务是标定洞口位置和隧道开挖方向，包括进洞关系数据的推算及洞口和开挖方向的实地标定。而进洞关系数据计算的正确与否，直接关系到隧道工程的质量。因此对此项工作要慎之又慎。

当掘进直线隧道（又称正洞），且两洞口控制点 A、B 均在隧道中线上时，这时应按 A、B 两点坐标反算 A、B 连线的方位角，并由此求出进洞关系数据 β，如图 5－52a 所示。

如果 A 点不在隧道中线上，此时应由直线上的转点 ZD 和 A 点的坐标，反算出 AA' 的距离，标定出 A' 点并实测 A' 点坐标，然后反算 $A'B$ 连接的方位角。依此计算进洞的关系数据（图 5－52b）。

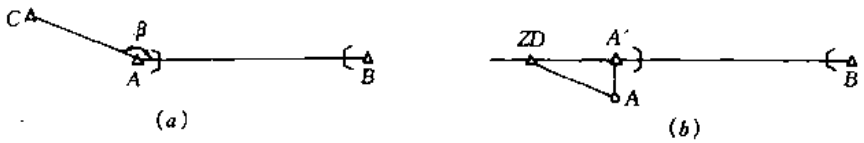


图 5－52

当掘进横洞时（图 5－53，C 为横洞洞口点，横洞中线与隧道中线交点为 O，交角为

r)。此时的关键是求出 O 点坐标，设 O 点坐标为 x_0、y_0，则

$$\tan\alpha_{AO}=\frac{y_0-y_A}{x_0-x_A} \qquad \tan\alpha_{CO}=\frac{y_0-y_C}{x_0-x_C}$$

对上述两式进行联立解算，可得 x_0、y_0，从而反算出进洞关系数据 β 和 S。

当洞口点位于曲线上时，进洞口的关系数据的计算则较复杂。

为保证隧道贯通质量，施工前多要布设隧道施工控制网，并将隧道中线上的主要点包括在网中（图 5－54）。那么会产生由网中控制点 ZD_1、ZY、D、ZD_2 求出的交点 JD 处的转角 α 与定测时所测 α 角不相同。为保证准确贯通，应根据新算出的 α 以及设计中给定的 R、l 等值来重新计算曲线元素，而曲线元素数值的改变则使得定测中已标定的某些曲线点（如图 5－54 中的洞口点 A 点）偏离新曲线，因此在施工测量时首先要对 A 点点位进行重新标定。可由 ZY 点按本章第四节中所述方法标定出 A 点（如 A 点为 ZY 点，可根据 JD 点按新计算的切线长重新标定 A 点）。而后计算进洞数据，标定洞口挖掘位置和挖掘方向。

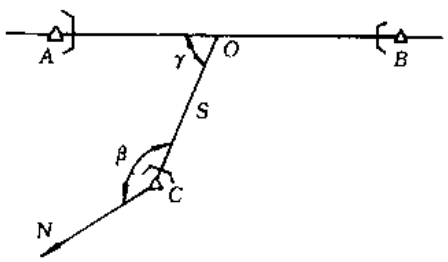


图 5－53

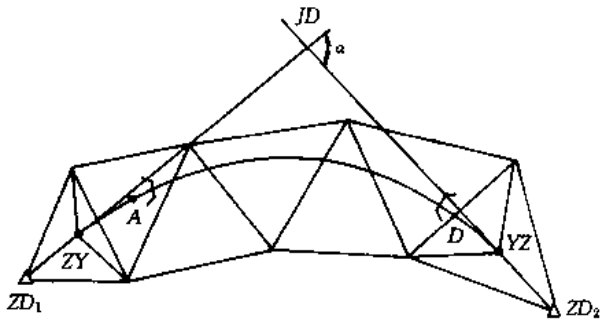


图 5－54

二、洞内测量

用施工导线控制隧道开挖至一定长度后应布设地下控制导线，导线的等线取决于隧道的长度和形状，表 5－7 为《铁路测量技术规则》对地下各级导线测量的规定。

表 5－7

测量部位	导线测量等级	测角精度（″）	导线长度（km）		边长相对中误差	
			直　线	曲　线	直　线	曲　线
	二	±1.0	7～20	3.5～20	1/5000	1/10000
	三	±1.8	3.5～7	2.5～3.5	1/5000	1/10000
	四	±2.5	2.5～3.5	1.5～2.5	1/5000	1/10000
	五	±4.0	＜2.5	＜1.5	1/5000	1/10000

控制导线应尽量沿线路中线或平行中线布设，可布设成多边形闭合环导线或主副导线闭合环。

为减小测角误差及量边误差的影响，应尽量加长主要导线的边长，并采用电磁波测距仪测距，其它测量工作在《矿山测量学》中介绍。

第八节　DTM 在道路规划设计中的应用

在道路规划设计过程中，通常要利用地形图来研究道路的设计方案，同时，还利用地形图绘制道路中线的纵断面图和计算土石方量。如利用手工绘制的地形图进行这些工作，不仅费工费时，而且当设计方案改变时，又必须重新计算和绘图，严重影响设计速度和最佳方案的选择。

数字地面模型（Digital Terrain Models，简称 DTM）是以一系列离散分布的二维点及其属性（如高程）表示连续分布的地形式面。DTM 是利用计算机定量分析地表形态的一种有效方法。

数字地面模型的建立一般要经过数据采集和建模等过程。

一、DTM 数据采集

数据采集是指数据采样点的选取和其坐标值的量测。数据采集是建立数字地面模型的基础。数据采集可采用下述三种不同的方法。

1. 利用地形图采集数据

在地形图上采集数据的方法较多，利用数字化仪数字化现有地形图采集数据，建立数字地面模型是目前常用的手段之一。

利用数字化仪像实地测量那样，先采集离散地形特征点的平面坐标，然后，用图解方法求得这些特征点的高程值。有了这些原始数据，就可以利用相应的软件建立地面模型。

2. 利用野外实测的方法采集数据

利用全站仪或测距仪配合便携式计算机，可以迅速方便地采集地形特征点的三维坐标，并将这些数据暂存在全站仪内存或便携计算机中，野外工作结束后，将其及时传输到计算机或图形工作站，利用成图软件，可获得高精度的数字地图。

3. 利用摄影测量方法采集数据

摄影测量方法是国内外大面积采集数据普遍采用的一种方法，新近问世的高集成度数字化航测系统，为高效率采集三维空间数据提供了便利的手段。

二、DTM 的表示方法

数字地面模型的表示方法较多，这里介绍格网法和不规则三角网（TIN）法。

1. 格网 DTM

按平面上等间距规则采样或内插所建立的数字地面模型称为格网数字地面模型。它可以用矩阵表示为：

$$DTM=\{Z_{ij}\}\qquad i=1,2,3,\cdots,m;\quad j=1,2,3,\cdots,n$$

式中　Z_{ij}为格网结点 (i, j) 上的属性数据，当该属性为高程时，则该 DTM 也称为数字高程模型（Digital Elevation Model，简称 DEM）。

将地形图数字化或野外实测方法获得的数据通过内插也可以生成格网 DTM。常用的内插方法有：加权移动平均法，趋势面分析法和 kriging 法等。

2. TIN 的表示方法

格网 DTM 表示方法简单、直观，便于地形分析，但数据量大，对于具有不连续特征的地性线、断层等，不便于建立 DTM。对此，可用不规则三角网（Triangulated Irregular Network，简称 TIN）表示 DTM。

TIN 是根据不规则分布的野外观测点构成的三角网构造 DTM 的。每个三角形顶点具有平面坐标（x，y）及其属性 Z。TIN 的数据包括顶点点号、顶点坐标、三角形号和相邻三角形号。

三、DTM 在道路规划设计中的应用

道路规划设计中需要的数字地面模型应是沿着预选的线路中线方向，具有一定宽度的带状数字地面模型。

道路设计人员进行设计时，先调出道路某段的地形图显示在屏幕上，或者按某一比例尺由机助绘图仪绘出地形图。这时，设计人员在地形图上仔细研究并考虑到其它因素后选出一条道路走向方案。把此方案的特征点输入计算机，让计算机利用数字地面模型求算沿中线各点的高程，在屏幕上或在绘图仪上输出该方案的纵断面图。设计人员研究纵断面图后选定道路坡度，并把设计示意图输入计算机中，计算机利用数字地面模型求算一系列横断面上的地面高程。然后，把存贮在计算机内的道路标准横断面放到各横断面处的设计中线高度上，就可以计算各横断面的填挖面积，再乘以横断面间距可求得填方或挖方的工程量。最后，研究填方、挖方的平衡以及统计填方与挖方的工程量。

以上内容是设计人员提出一个线路平面方案后所要完成的工作。当设计人员要提出多个方案供选择时，就要重复完成大量的计算和绘图工作。这么大的工作量，用传统的设计方法是很难完成的。因此，DTM 在道路规划设计中起着重要的作用。

第六章　管线工程测量

第一节　概　　述

随着社会和经济的发展，在城镇及工矿企业中铺设给水、排水、热力、输电和煤气等各种管线愈来愈多。管线工程测量是为各种管线的设计和施工服务的，它的任务有两个方面：一是为管线工程设计提供地形图及纵、横断面图；二是按设计将管线位置测设到实地。管线工程各阶段所需的具体测量工作包括以下几项：

(1) 收集确定区域内大中比例尺地形图、控制点资料、原有各种管线的平面图及断面图等。

(2) 地形图测绘。根据初步规划的线路，实地测量管线附近的带状地形图或修测原有地形图。

(3) 管线中线测量。根据设计要求，在地面上标定出管道中心线的位置。

(4) 纵、横断面图测量。测绘管线中心线和垂直于中心线方向的地面高低起伏情况。

(5) 管线施工测量。根据定线成果及设计要求测设施工过程中所需要的各种标志。

(6) 竣工测量。将施工成果通过测量绘制成图，反映实际施工情况，作为使用期间维修、管理的依据。

其中前五项工作在工程的规划设计阶段进行。

管线工程的设计和施工是按照城市总体规划分期、分段进行的，设计和施工过程中必须顾及沿线各现有管线与拟建管线的相互关系问题，施测前必须充分了解工程的全貌，并收集已有的可利用资料，以便制定合理的施测方案，减少不必要的重复测量工作。

管线工程多属于地下构筑物，在城镇及工矿企业中，各种管线互相穿插，纵横交错。为了保证各种地下管线的安全输送、城市卫生的要求等，有关部门对各种管线间的水平距离、垂直交叉净距及覆土深度等都有明确规定。测量工作必须采用城市或厂区统一的坐标和高程系统，并且做到步步有检核，才能保证施工质量。

由于各种管线的性质不同，其测量精度要求也有区别。重力自流排水管线工程对高程的精度要求较严，而压力给水管线和容易弯曲的电力电缆、电信电缆等，对高程精度要求不高。地下管线工程采用施工方法不同，对测量精度要求也不相同。开槽施工对平面控制精度要求偏低，而长距离的顶管施工或盾构法施工对平面和高程控制精度要求较高，以控制贯通误差。因此，测量工作应依据工程的不同特点和要求进行。

第二节　中　线　测　量

中线测量的任务是将设计的管线位置在地面上测设出来。其主要工作内容是定出管线的交点桩、里程桩和加桩。

一、交点桩测设

交点桩（包括转折点、起点及终点桩）的测设数据可用图解法或解析法求得。城市管线一般与道路或建筑物平行或垂直敷设，当管线规划设计图的比例尺较大，而且管线交点附近又有明显可靠的地物时，可采用图解法，交点桩的测设可按几何关系取得数据。如图 6－1 所示，A、B 是原有排水干线上的检查井，新建居民区排水管线交点Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ可依 A、B 两点及Ⅱ、Ⅲ点附近的建筑物采用图解法在设计图上量出测设数据。沿原有排水干线 BA 方向由 B 点量出 S 即得到Ⅰ点，用 a、b 采用距离交会法测设Ⅱ点，用 c、d 采用直角坐标法测设Ⅲ点；若无法取得图解数据而只有管线的坐标资料，可沿管线布设工程导线，计算测设数据，即采用解析法取得数据。无论是图解法或解析法，交点桩的测设依实际情况可利用直角坐标法、距离交会法、角度交会法或极坐标法等原理进行。

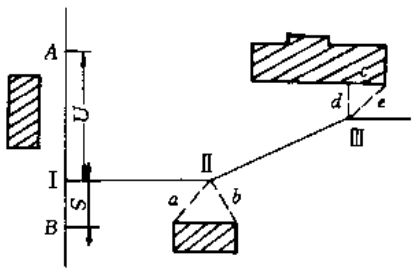


图 6－1

为了使测设有检核，应有多余的测设数据，作为检核条件。如果无法取得多余测设数据，应采用重复量测的方式。

二、中桩测设

为了测定管线长度和测绘纵、横断面图，沿管线中心线由起点开始测设里程桩和加桩，这项工作称为中桩测设。里程桩是按固定的距离设置的，一般间隔为 20m，最长不超过 50m。加桩是在管线穿越重要地物（如道路、原有管线等）和地形变化处增设的中线桩。中桩的编号是用管线的起点（桩号为 0＋000）到该桩的距离作为该桩的桩号。中线量距确定里程时，要注意不同管线的里程起算点也是不同的，如给水管道以水源作为起点，煤气、热力管道以来气、来热方向为起点，电力、电信线以电源作为起点，排水管道以下游出水口作为起点。

当设计给定管线的检查井间距或以各种构筑物控制中线位置时，可以检查井或构管物代替中线里程桩，一般不钉整里程桩。

三、转向角测量

管线工程对转向角的测设有较严格的要求，它直接影响施工质量及管线的正常使用。某些管线的转向角满足定型弯头的转角要求，如给水管道使用的铸铁管弯头转角有 90°、45°、22.5°等几种类型。如管线交点之间距离较短，对于管径大于 500mm 的线路转向角与定型弯头的转角差不应超过 1°，管径小于 500mm 时可放宽至 2°。即使管线交点间距较大时，其差

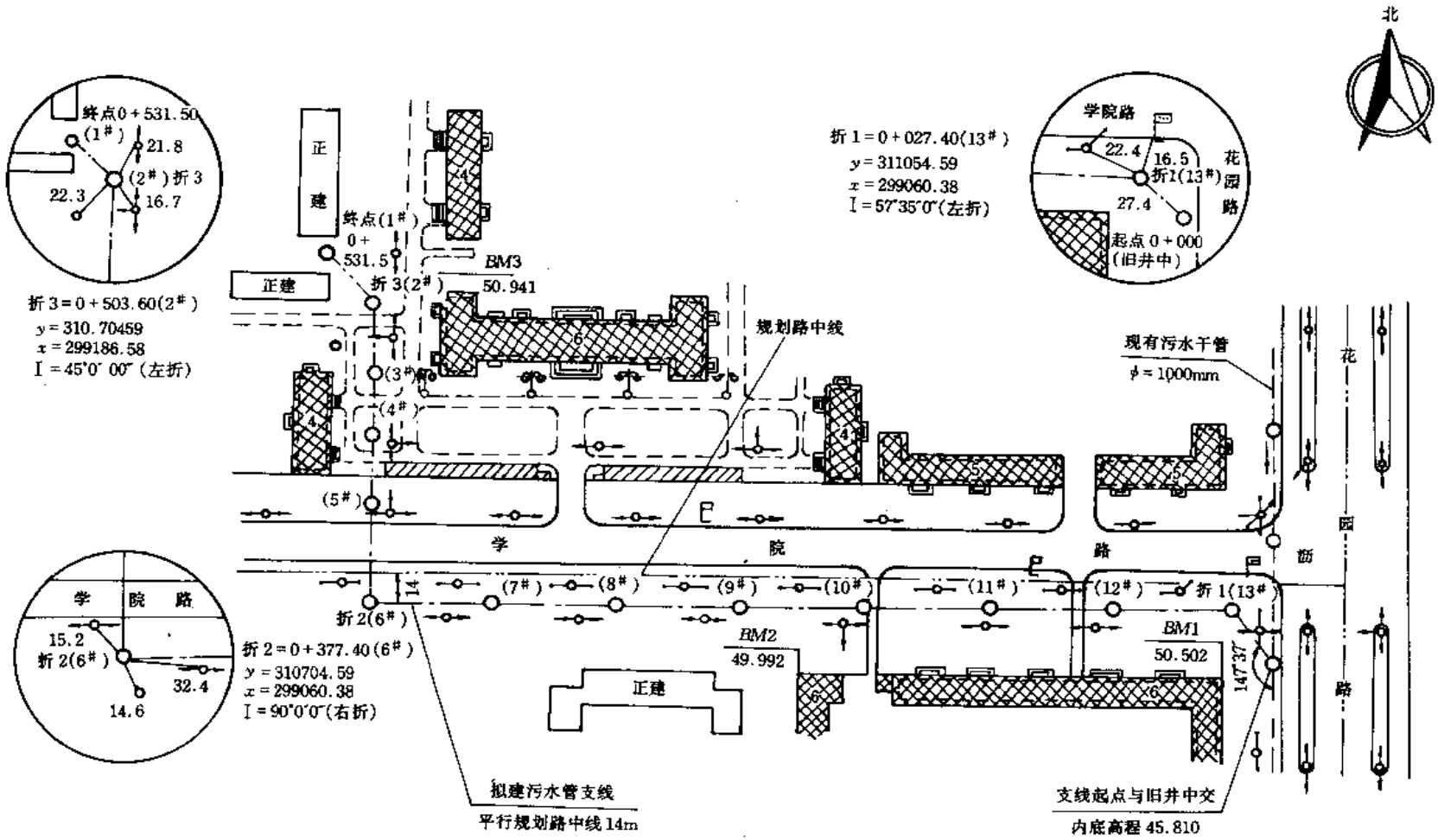
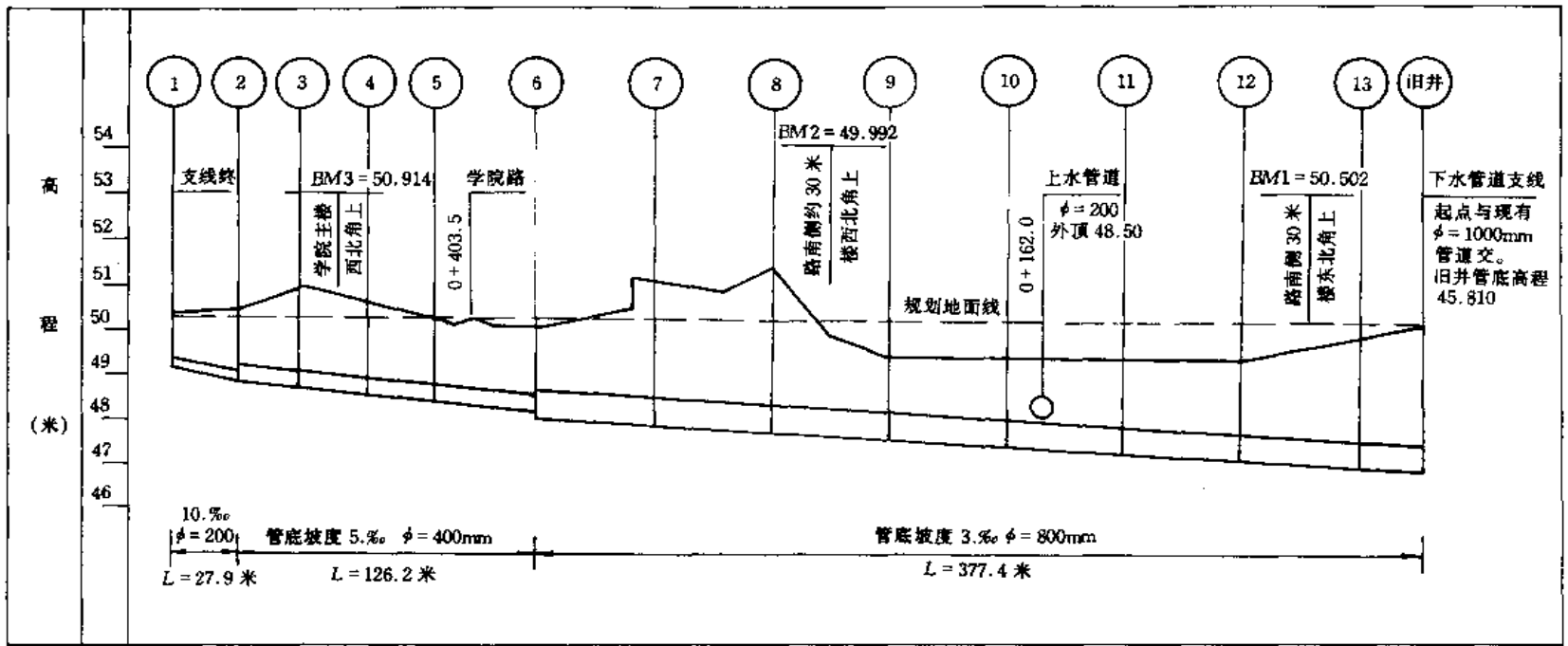

北
终点0+531.50
(1#)
21.8
(2#)折3
22.3
16.7
折3=0+503.60(2#)
y=310.70459
x=299186.58
I=45°0′00″(左折)
正建
终点(1#)
0+
531.5
折3(2#)
BM3
50.941
正建
规划路中线
(3#)
(4#)
(5#)
学
院
路
(7#)
(8#)
(9#)
(10#)
(11#)
(12#)
折1(13#)
折2(6#)
BM2
49.992
BM1
50.502
正建
学院路
22.4
16.5
折1(13#)
27.4
花园路
起点0+000
(旧井中)
折1=0+027.40(13#)
y=311054.59
x=299060.38
I=57°35′0″(左折)
现有污水干管
φ=1000mm
花
园
路
147.37
学 院 路
15.2
折2(6#)
32.4
14.6
折2=0+377.40(6#)
y=310704.59
x=299060.38
I=90°0′0″(右折)
拟建污水管支线
平行规划路中线14m
支线起点与旧井中交
内底高程45.810

图 6—2


高程（米）
54
53
52
51
50
49
48
47
46
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
旧井
支线终
BM3 = 50.914
学院主楼
西北角上
学院路
0 + 403.5
BM2 = 49.992
路南侧约 30 米
楼西北角上
规划地面线
0 + 162.0
上水管道
ϕ = 200
外顶 48.50
BM1 = 50.502
路南侧 30 米
楼东北角上
下水管道支线
起点与现有 ϕ = 1000mm 管道交。
旧井管底高程 45.810
10.‰
ϕ = 200
L = 27.9 米
管底坡度 5.‰ ϕ = 400mm
L = 126.2 米
管底坡度 3.‰ ϕ = 800mm
L = 377.4 米

| | | |

值也不应过大。排水管线支线与干线交汇处转向角不应大于 90°，否则就会有阻水现象。

四、绘制管线地形图

为了给设计和施工提供资料，在中桩测设的基础上，应将中线展绘到现状地形图上。图上应反映出：各交点的位置和桩号，各交点的点之记，各交点的坐标、转向角，各里程桩与加桩的位置和桩号等。当没有现状地形图时，需要实测管线两侧带状地形图。如图 6－2 所示为某排水管线地形图。

五、管线的纵横断面测量及调查测量

管线纵横断面测量是在管线中线测量和中线桩高程的水准测量基础上进行的。纵断面图测绘的一般作法和要求见第五章。由于管线起点的不同情况，有时为了与管线地形图的中桩注记方向一致，往往要将纵断面图倒展（即起点在图的右端），图 6－2 所示排水管线的纵断面图为图 6－3。如地下管线埋设深度较浅且开挖边界较窄，一般不测绘横断面图，计算土方量时以中线填挖深度为准。

地下管线工程测量中，原有地下管线的调查测量十分重要，它是设计管线安全施工和使用的重要保证。调查测量的具体作法有以下几种：

1. 设计管线与原管线交叉点调查测量

（1）测井法。利用交叉点两侧检查井，测量原管线高程，进而求出交叉点高程。此方法适用于自流管道。

（2）坑探法，即实地挖坑。此方法适用于压力管道及电缆线路。

2. 利用地下金属管线探测仪确定现有地下金属管线位置的埋深

附：地下金属管线探测仪简介

一、基本原理

金属管线探测仪所采用的方法主要有以下两种：

（1）感应法。仪器由发射机和接收机两部分组成，发射机是一个振荡器，经由发射线圈向空间发射 170kHz 的电磁波。当发射线圈、地下金属管线与接收线圈三者在同一平面时（图 6－4），由于金属管线的感应耦合作用，这时接收线圈收到的信号最强，经过接收机的检波、放大，就可以在耳机中听到音频信号。

当接收机线圈偏离管线中心时，声音变小，由此可确定地下金属管线的走向。这种方法的优点是不必把发射机的输出端接到管线上，设备也比较简单。但当被测管线附近平行排列有其它地下金属管线时，无法分辨出哪一条是被测管线。

（2）传导法。仪器也是由发射机和接收机两部分组成。发射机能发出一个单频率的音频信号，使用时将发射机的两个输出端一端接到被测管线上，另一端接到距被测管线 10m 左右的接地棒上，如图 6—5 所示。工作信号电流经由被测管线、周围土壤及接地棒构成通路，因而在管线周围产生交变磁场，其磁力线的形状，应当是在与管线垂直的平面内，以管线为中心的许多同心圆。

当接收机上探杆的磁棒线圈指向被测线圈时，由于该处磁力线垂直于磁棒，感应信号最弱，如图 6—6 所示，耳机中听到的声音最小，称为弱音点。在其它位置声音都较大，因

此可以探测地下金属管线的走向。当磁棒与地面成45°时，在距离管线平面位置 L 远的地方，磁力线又垂直于磁棒，信号又最弱，从耳机中听出弱音点，偏移距离就是管线的埋深 H，如图6—7所示。

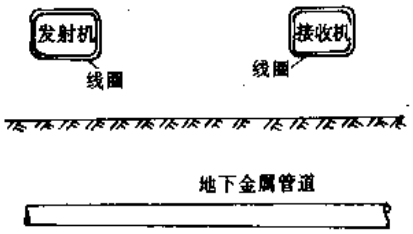


图6—4

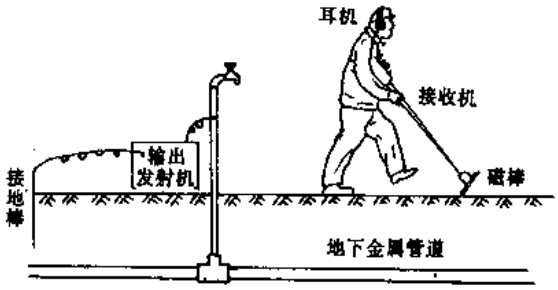


图6—5

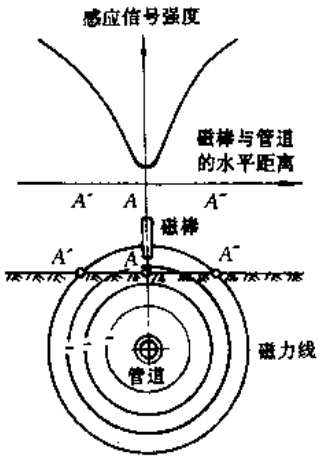


图6—6

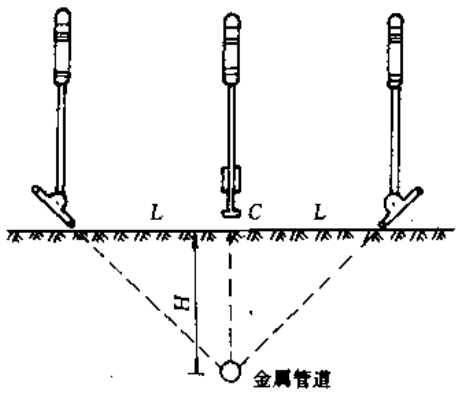


图6—7

由上述可见，对于管线情况复杂、埋设较深时，用传导法能较为准确地测出金属管线的平面位置和高程。

二、T—10—75型地下金属管线探测仪简介

1. 基本性能

T—10—75型地下金属管线探测仪，用于探测埋设在地下的各类金属管线（如给水、煤气、暖气、输油管、压缩空气管及各种电缆）的平面位置及埋设深度，稍加改装即可作为地下通道的辅助测量工具。

该仪器由发射机、接收机、电源箱及蓄电池四部分组成（图6—8）。仪器全部采用硅晶体管电路，交直流两用，适于野外工作。

2. 操作方法

按照图6—5所示，将发射机的输出导线的一端与被测管线连接好（如管道表面铁锈过厚，应先除锈）；输出的另一端与在被测管线两侧、距管线不大于10m处的两根接地棒连接，接地棒打入深度约0.5～1m。如土质干燥，应浇水以利导电。对一般工业管线，可只打一根接地棒。然后将发射机接上电源，先把信号开关拨至“连续”位置，打开电源开关，观察匹配指示电流并旋动匹配选择开关，直到电流表指针偏转最大为止。再将信号开关拨至“断续”位置，此时即有断续的信号输出，并可根据需要调节输出信号强度旋钮。

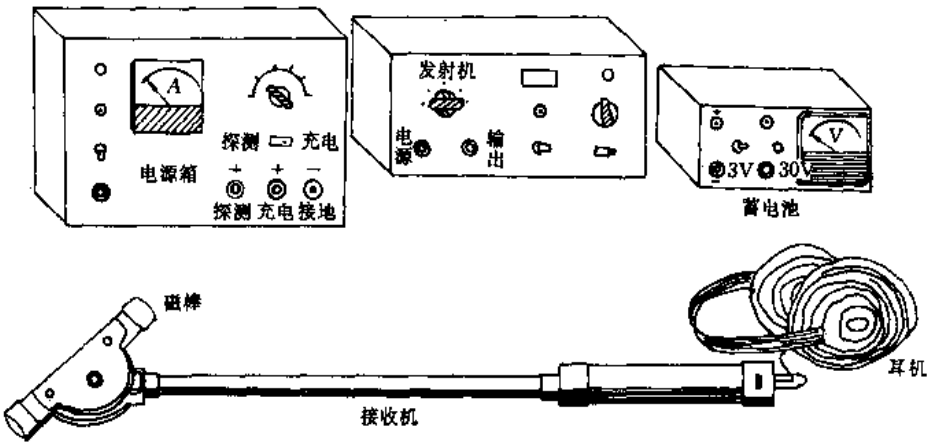


图 6－8

将耳机插头插入接收机的塞孔内，打开接收机的电源开关并控制适当音量，手持提环，使探头垂直于地面，探索声音最小点。如果左右偏离时声音变大，这个弱音点就是管线中心位置，如图 6－7 中之 c。沿着这个中心左右探索前进，并始终保持两侧声音大，中间声音小，即可探出管线的路径。手持提环，使探头与地面保持 45°，并沿着垂直管线的方向水平移动，如图 6－7，当耳机中又出现弱音点时，探头移动的距离 L 就是管线的埋深 H。

在探测给水管道或其它没有防护层的管道的弯头时，为避免电磁干扰，可在距弯头 5m 以外处各测两点，引线相交，找出弯头位置。

3. 供电与充电

为了便于野外作业，或是在不便利用交流电源的情况下，发射机可由蓄电池作为电源。蓄电池采用 2XY－8 银锌蓄电池 6 个串联或采用 CNY－3 镍镉蓄电池 15 个串联，蓄电池箱附带直流电压表，在使用中及充电时检查电压。

电源箱既可作为蓄电池充电的电源，在作业时可以不必携带至野外；又可在交流电方便的场合，直接用它整流作为发射机的直流电源。

第三节　开槽管线施工测量

施工前的测量工作，除应熟悉图纸及施工组织安排、校核中线、钉施工控制桩外，在引测水准点时，一般应同时校测原有管线出入口和与设计管线交叉处的高程，如果与设计图纸给定数值不符时，应及时与设计部门研究解决。

一、施工控制桩测设

地下管线施工时，管线交桩及中桩将随着沟槽的开挖被挖掉。为了便于恢复中线和检查井的位置，应在开挖沟槽前测设中线控制桩和井位控制桩。如图 6－9 所示，中线控制桩一般测设在管线起点、终点及转折点处的中线延长线上，井位控制桩则应测设在中线的垂直线上。各控制桩应设在引测方便、便于保存桩位的地方。井位控制桩至中线的距离最好是整数。

二、槽口测设

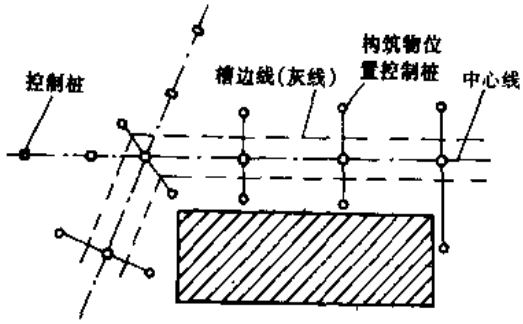


图 6－9

槽口测设的任务是根据设计要求的埋深及土质情况、管径大小等计算开槽宽度，并在地面上定出槽边线位置，作为开槽的依据。

若横断面坡度较平缓，开挖槽口宽度可用下列公式计算（图 6－10）：

$$B=b+2\cdot m\cdot h$$

若横断面坡度较陡，且开挖深度较大，中线两侧槽口宽度不同，应分别计算（图 6－11）：

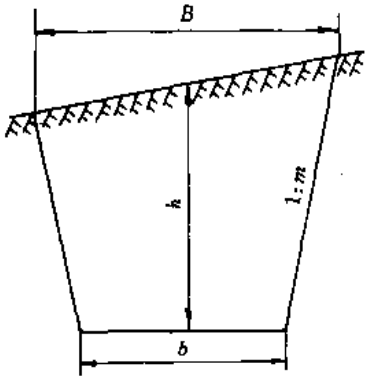


图 6－10

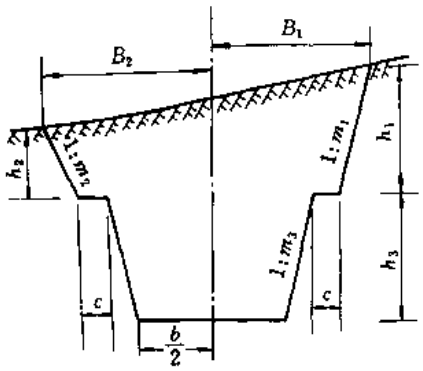


图 6－11

$$B_1=\frac{b}{2}+m_1\cdot h_1+m_3\cdot h_3+c$$

$$B_2=\frac{b}{2}+m_2\cdot h_2+m_3\cdot h_3+c$$

三、中线及坡度控制标志测设

管线的敷设要按照设计的中线及高程（坡度）进行，在开槽前后应设置控制管线中线及高程的施工测量标志，常采用龙门板法及腰桩法。

（一）龙门板法

龙门板由坡度板及高程板构成。坡度板的作用是控制管线的中线方向，高程板用于控制管线的坡度。龙门板沿中线每 10～20m 埋设一块，遇检查井及支线等构筑物时应加设。龙门板应根据工程进度要求及时埋设，当槽深在 2.5m 以内时，应在开槽前埋设（图 6－12）；若槽深大于 2.5m，应在槽挖到距槽底 2m 左右时，在槽内埋设（图 6－13）。

1. 坡度板埋设

中线测设时，根据中线控制桩，用经纬仪将中线投设至各坡度板上沿，并且用小钉（中线钉）标定其位置。各龙门板上中线钉连线即为管线中线方向，挂垂球即可将中线测设到槽底，指导施工。

坡度板埋设不应高于地面且应注意固定，板顶面应保持水平。中线钉测设后应在板侧

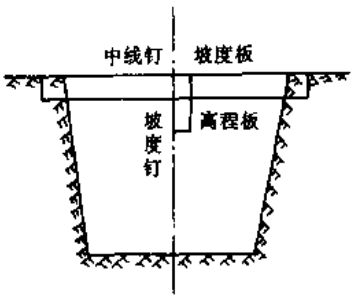


图 6－12

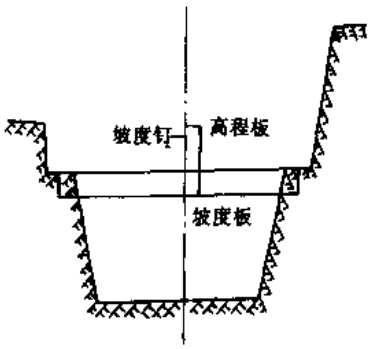


图 6－13

面注记里程桩号或加桩号。

2. 坡度钉测设

为了控制管槽开挖深度，应根据附近的水准点在龙门板上测设坡度钉，以便掌握槽底和基础面的施工高程。如图 6－12、13 所示，在坡度板上中线钉一侧钉一高程板，在高程板侧面测设一水平钉称为坡度钉，各龙门板上坡度钉连线平行于管线的设计坡度线，并且距离管底设计高程为一整分米数，这一距离叫下反数。

测设坡度钉最常用的方法是“应读前视法”，如图 6－14 所示。“应读前视法”测设步骤如下：

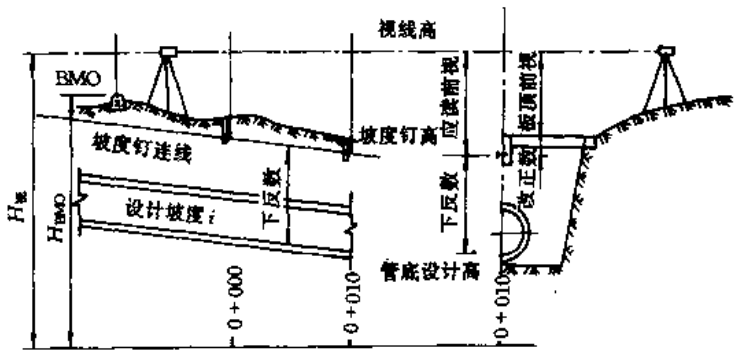


图 6－14

(1) 后视水准点，求出视线高。

(2) 选定下反数，计算坡度钉的“应读前视”：

应读前视＝视线高－（管底设计高程＋下反数）

下反数根据现场实际情况选定，一般使坡度钉钉在不妨碍工作和使用方便的高度上（常选 1.500～2.000m），表 6－1 中选用 2.000m。

管底设计高程可由纵断面图中查出，或利用坡度及里程由已知点设计高程计算得到。

(3) 立尺于坡度板上沿，读出板顶前视读数，计算钉坡度钉需要的改正数：

改正数＝板顶前视－应读前视

式中改正数为“＋”时表示自板上沿向上量改正数钉坡度钉，反之则向下量改正数。

(4) 检查实测前视与应读前视是否一致，误差应在±2mm 以内。

(5) 为防止观测或计算错误，每测一段应附合到另一水准点上进行检核。

表 6—1　坡度钉测设手簿

测点（桩号）	后视读数	视线高	前视读数	高程	管底设计高程	下返数	应读前视	改正数		备注
								+	−	
BM6	1.632	49.919		48.296						已知高程
0+205.7			1.813		46.127	2.000	1.792	0.021		井 6
0+225.7			1.785				1.692	0.093		
0+245.7			1.421		i=5‰		1.592		0.171	
0+265.7			1.483		46.427	2.000	1.492		0.009	井 5
BM7			0.730	49.189						已知高程 49.191

计算检核：49.919−（46.427+2.000）=1.492

测量检核：闭合差=50.189−50.191=−0.002　　合格

坡度要测设时应注意各测段的联测，即在本测站上测定前站上测设的坡度钉或管底高程，防止坡度线连接不止的错误。对于地面坡度起伏较大的下反数所对应的坡度钉（图 6—15），为了便于施工中掌握高程，在每块坡度板上应用高程牌的形式注明各位置高程及下反数，如图 6—16 所示。

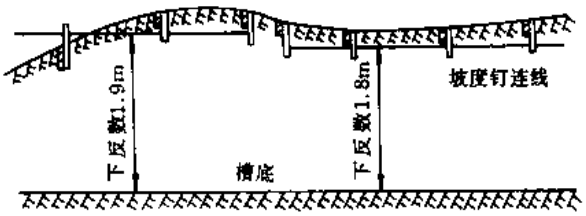


图 6—15

0+225.7 高程牌	
管底设计高程	46.227
坡度钉高程	48.227
坡度钉至管底	2.000
坡度钉至基础面	2.060
坡度钉至槽底	2.160

图 6—16

（二）平行轴线腰桩法

当管线的管径较小、坡度较大且施工精度要求较低时，可采用平行轴线腰桩法。其设置步骤如下：

1. 测设平行轴线

开挖坑槽前在中线一侧或两侧钉一排平行轴线桩，桩位应钉在槽外，距离管线中线为 a，如图 6—17 所示。各桩间距在 20m 左右，在检查井位应设对应的平行轴线桩。

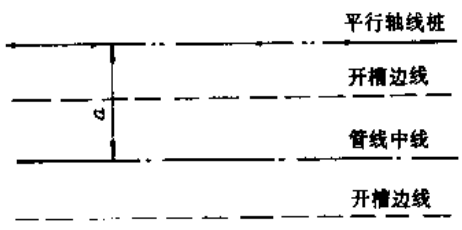


图 6—17

2. 测量平行轴线桩高程

利用附近水准点测出平行轴线桩高程，利用对应的管底设计高程计算出挖深 h，如图 6—18 所示。

3. 控制槽底高程

如图 6—19 所示，利用一边可活动直角尺，检查平行轴线桩处的挖深 h'，并与 h 比较，

以便随时掌握挖深。

4. 钉腰桩

为了较准确地控制管线中线的高程，在槽坡上（距槽底约 1m 左右）再钉一排与中线平行的腰桩，腰桩与管线中线距离为 b，如图 6－20 所示。

5. 测量腰桩高程

测出各腰桩高程后，用各腰桩高程减去相应的管底设计高程，得到各腰桩与管底的高差 h_b，如图 6－20 所示。通过腰桩的 b 和 h_b，即可控制管线的中线方向和高程。

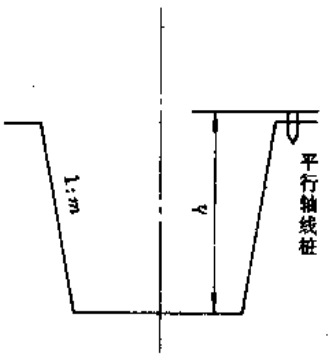


图 6－18

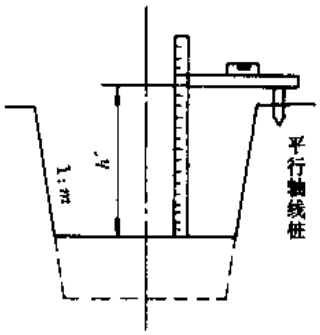


图 6－19

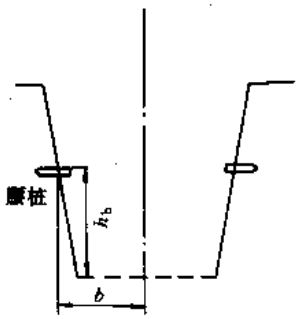


图 6－20

第四节　顶管施工测量

开槽管道施工是管道施工的主要方法，但是当管道穿越铁路、公路、重要建筑物甚至河流时，有时不允许开槽施工或不能绕道施工，此时须采用顶管施工方法。顶管施工具有不直接开挖路面中断交通，不需拆除地上建筑或绕道等特点，顶管施工技术也随机械化程度的提高、现代城市建设的需要，应用愈来愈多。

开槽施工是明挖，施工现场直观性好，放样中心线及高程的方法简单。顶管施工的主要场合是地面上看不见的地下，前进方向看不见，靠测量指示方向。由于这种施工特点，施工测量技术不但复杂，且有精度要求高、责任大的特点。

需要顶管施工的地段在设计图纸上已设计好需要穿越的建（构）筑物，以及穿越建（构）筑物两侧的工作坑。

顶管施工的基本工作过程是在顶管施工地段两侧挖好工作坑，坑内安放导轨将管材放置在导轨上，用顶镐将管材沿管线方向顶进土中，再将管内土挖出。根据顶管方法可知，顶管施工中测量的主要任务是保证管线中线方向、高程和坡度必须满足设计条件。

一、测量准备工作

1. 设置顶管中线桩

顶管部分总是位于管道的直线段，顶管的方向是由管道中线桩控制。为使中线桩能直接控制顶管施工，根据设计图纸，依据非顶管部分的管道中线桩，用经纬仪在工作坑的前后分别测设中线控制桩，而后可根据它定出工作坑的开挖边界。当工作坑挖到设计深度后，

根据中线控制桩将中线引测到坑壁上，并钉以大钉或木桩，此桩称为顶管中线桩（图 6－21）。

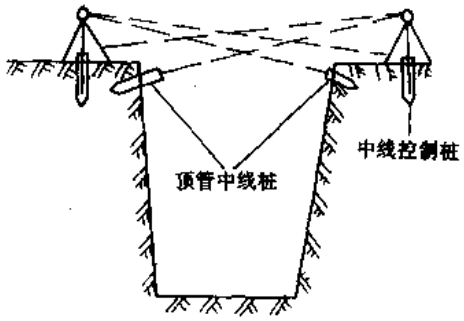


图 6－21

2. 设置临时水准点

当工作坑挖到设计高度后，将高程引测到工作坑内，作为安装导轨和管材顶进时高程和坡度控制的依据。为了相互校核，一般设置两个水准点。

3. 安装导轨

导轨由两条钢轨或木轨组成。两导轨距离由顶管直径决定，导轨坡度由顶管坡度确定。导轨要安装在木基础或混凝土基础上，测量的工作是要保证基础面的高程及纵坡均要符合设计要求。安装时根据顶管中线桩和坑内水准点进行，经检查无误后，将导轨固定在基础上。

二、顶管顶进过程中的测量工作

1. 中线测量

如图 6－22 所示，过顶管中线桩拉一条细线，在细线上挂两个垂球，两垂球线的连线即为管道方向线。在管道内的前端横放一根水平尺，其上有刻划和中心钉，两长垂球连线的方向线与中心钉重合，则说明管子中心位于设计管道方向上；如不重合，直接从木尺上读出偏差值，偏差超过±1.5cm 时，则需校正。当距离较远可用激光指向仪，不具备条件时，也可设计用经纬仪指向。基本方法是：仍在图 6－22 基础上过顶管中心线桩拉一条细线，在细线上挂一个垂球，垂球下安置经纬仪，其高度不超过顶管上沿以使望远镜能直接看到管内木尺。用镜上对中（也可将垂球点投到基础上作标记，用镜下对中），而后抬起望远镜瞄准工作坑壁上顶管中线桩，旋紧水平制动，打开竖直制动，照准管内木平尺（用电筒照明），即可指示顶管方向。

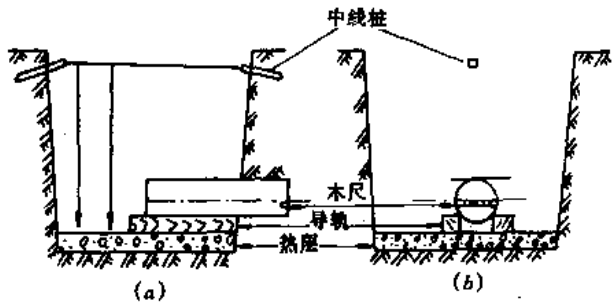


图 6－22

2. 高程测量

将水准仪安置在工作坑内，以临时水准点为后视，在管内使用一根小于管径的标尺，即可测得管底高程。将管底实测高程与设计高程比较，即可指示修正值（超过 1cm 时需校正顶管坡度）。

激光技术和顶管施工先进机械组合成自动导向顶管机械，改变了千斤顶顶管人工挖土的笨重劳动方式。这套机械主要设备由顶管钻机、输土设备、激光自动控制导向装置、液压顶进设备、机械操作系统组成，使生产效率得以极大提高。

第五节　架空管线工程测量

架空管线主要有两类，一类是架空管道，一类为高压输电线路。主要测量工作有：选线测量工作，为设计提供资料；施工测量，将设计线路标定于实地配合施工，修建高压线塔或管道支架等工作。

一、选线测量工作

实地选线前，设计人员先在较小比例尺地形图上进行选线方案比较，待方案确定后，再会同勘测、施工、运行管理人员实地选定线路的主要控制点（拐点）。

选线测量主要工作是中线测量。中线测设方法同铁路线路的中线测设，其精度要求基本上是图根测量精度。

中线测设后，需沿中线测绘纵、横断面图。纵、横断面图用途不是计算土方量，纵断面用来了解线路与地面、地物等净空高度；横断面用来了解线路与侧面山坡、其它线路及建（构）筑物的距离。纵向绘 1∶200 或 1∶500 比例尺图，横向为 1∶2000 或 1∶5000 比例尺图。

断面高程可采用光电测距三角高程法实施。纵断面高程点的间隔一般为 100m，地形变化处酌情加点，如线路跨越沟谷时，可减少测点，通常不测低点高程，但要测突出高地的高程。当线路穿越树林、房屋和其它架空线路时，要测树、房屋的高度和线路的净高等。其高度可用三角高程法测定。

对于横断面，在平原地区一般不测。当线路沿山坡敷设时，常需测横断面；当线路与其它线路工程交叉跨越时应施测横断面。与通信线、电力线交叉时，要测出杆塔高度及线高，与公路、铁路、河道交叉时要施测路面、轨顶、河底水面及洪水位高程等，水平比例尺为 1∶1000，高程比例尺一般为 1∶100。

二、管线施工测量

管线施工测量方法比较简单，这里只强调测量工作重点。对于单杆、双杆高压线路测量工作重在控制线路方向，即拐点定位。对于塔式线架主要放样塔脚位置和抄平工作。管路工作除控制方向外尚要控制每个支架的位置和支撑底座的高程以满足设计要求。管线施工时拐点位置要准确，放线后要复测，其角度较差不大于 1′，距离丈量精度相对误差一般为 1/2000。

第六节　管线工程的竣工测量

竣工测量是设计工程经施工后，将实际建筑物、构筑物测绘成图纸、数字及文字等，是工程验收工作的必要内容，可为将来的管理维护、改扩建工程提供必须的资料。设计图纸固然是重要的原始资料，但经过施工可能改动图纸某些设计，也由于施工改变了原地表等外观，一些参照物发生了变化，特别是埋到地下的管线工程，竣工后地表经过平整很难确认管线的位置和深度。现在老城改造等工程经常发生挖坏原有地下管线，造成泄水尤其是

煤气泄露致人死亡等重大事故。

管线工程的竣工测量属于专题测量，主要测制成三种资料：①沿全线路的带状图纸；②细部点坐标册；③管线编号、说明及单体工程（或局部）放大图。

管线带状图用聚酯薄膜描绘，一般宽 33cm，长度 5m，过长时再分幅绘制。坐标值小的为图头，自左向右绘制，将管线中线方向同于图纸延伸方向，且位于中间。要绘制 10cm×10cm 的坐标方格网，当坐标格网方向不与管线中线平行时，要将坐标轴斜置，路线拐弯，要重新调整方格网方向。

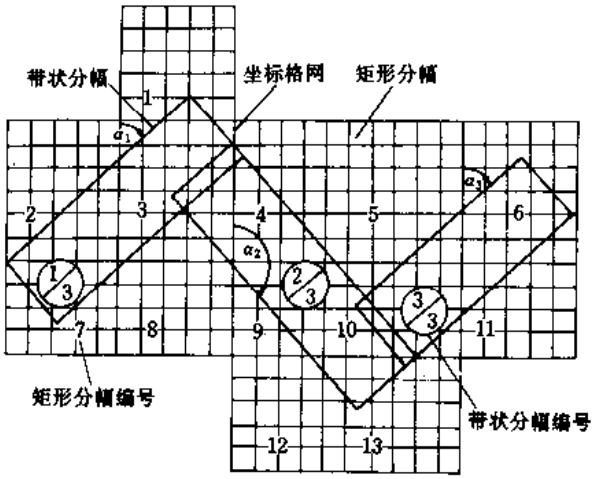


图 6－23

如图 6－23 所示带状图分幅方法，图中带状分幅号 1/2 表示共 2 幅第一幅等。

城镇管线工程测图比例尺一般为 1∶500，其它地方可根据情况缩小，如 1∶1000 或1∶2000 比例尺带状图。当具有现势性较强的同比例尺地形图时，可补测管线工程内容后编绘成图，没有合适地形图可利用时，则按地形测图方法实测成图。

所有测量工作均要依据国家或城市各级测量控制点进行，包括平面和高程控制点。

架空管道通常测出起、终、拐点、分叉点支架中心坐标和高程，如果支架有一定宽度和长度，应按实际大小依比例绘图。施测时测支架一长边两角点坐标，量出支架宽度后绘于图上。有的管线拐弯处无支架，应测出拐弯处临近两支架中心坐标，如图 6－24A、B 两点。对于直线部分支架可用钢尺量出它们的间距，在图上一一展绘。

对于单杆电力、照明及通信线路要测出起、终点及拐点处杆位中心坐标；高压铁塔要测出一条对角线上两基础中心坐标，据以在图上绘出铁塔各脚位置。

地下管线特别是现代化城市地下管线种类繁多，如给水、污水、雨水、煤气、热力、电力、电信等等。地下管线工程竣工测量应在覆土前测量起点、终点、拐点、分叉点等管中心的坐标和高程。为便于区别与管理，在施测前按管线始一终顺序编临时号，如煤气管线编煤$_1$…煤$_n$，供热管线编热$_1$…热$_n$ 等。调查管线内、外径。若为检修井时要量井面至管内底的比高，当管中线不正对井中时，应量取管中线对于井中的偏距，并注明偏距方向，如图 6－25 所示。

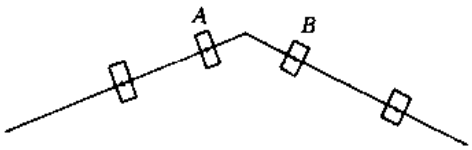


图 6－24

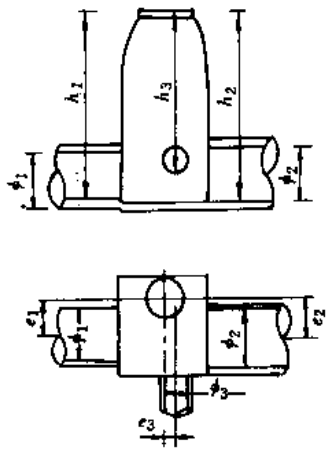


图 6－25

外业资料测量、调查齐全后方可内业展绘连线成图。绘图时应将管线的临时编号改为

统一规定的编号。

在一些专业图纸中常将不同管线着以不同颜色，以示区别。

管线图上必须注记统一的编号，不得重号，并在成果表和附属资料中写全具体的内容，如坐标、高程、管径、偏距等。

管线图及资料在《工程测量规范》中有具体规定，在实践上有许多好的作业经验。以往的管线工程图从测绘到管理虽有许多好经验，但仍局限于手工作业，当前计算机已应用于管线工程，从外业测绘到资料管理均可实现数字化测绘与现代化管理。

第七章　桥梁及水利水电工程测量

第一节　桥梁及水利枢纽工程概述

一、桥梁工程概述

桥梁是铁路及公路的重要组成部分，特别是大、中型桥梁对政治、国防、经济都具有重要的意义。因此桥梁首先要有足够的承载力以保证行车的畅通和安全，其次应体现经济合理、效益高。另外要尽可能使桥梁具有优美的外形并与周围景观相协调。

（一）桥梁的基本尺寸

桥梁由两个主要部分组成：桥跨结构（称上部结构）和桥墩、桥台（称下部结构）。上部结构是跨越路线障碍的结构物，下部结构是支承上部结构的建筑物，起支承桥跨结构和衔接路堤的作用。

桥梁的基本尺寸主要是指长度和高度两种。

1. 长度

（1）计算跨径 l。桥跨结构两支点间的距离。桥跨结构的力学计算均以 l 为准。

（2）净跨径 l_0。设计洪水位线上相邻两桥墩（或桥台）间的净距（图 7－1），各孔净跨径总和称为桥梁的总跨径。桥梁的总跨反映该桥排泄洪水的能力。

（3）标准跨径 L。梁式桥为相邻两桥墩中线或桥墩中线与桥台台背前缘间的距离；而拱桥的标准跨径为两起拱线间的水平距离（即净跨径）。

（4）桥梁全长 L_0。有桥台的桥梁，为两岸桥如侧墙或八字墙尾端间的距离，无桥台的桥梁，为桥面系行车道长度。在一条线路中，桥梁的总长和比重反映它们在整段路施工中的重要程度。

2. 高度

（1）桥下净空高度 H_0。设计洪水位或计算通航水位与桥跨结构最下缘的高差。

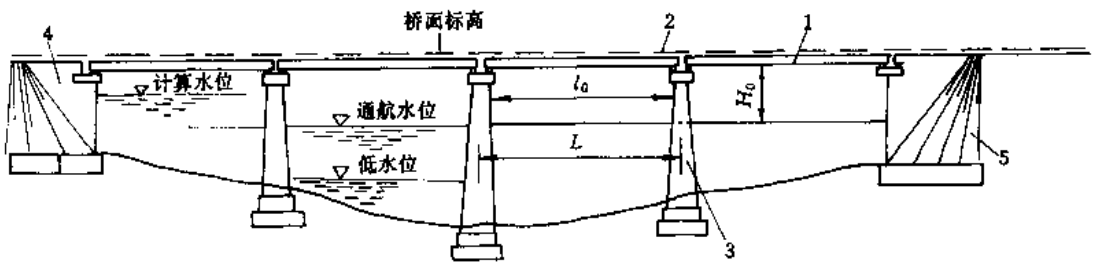


图 7－1

1—主梁；2—桥面；3—桥墩；4—桥台；5—锥形护坡

(2) 桥梁的建筑高度 h。桥面（包括路拱）与桥跨结构最低边缘的高差。

(3) 桥梁高度 H。行车道顶面至河床最低点（有时指低水位）之间的距离。

(4) 桥面净空。为保证车辆和行人的安全通过，在桥面以上垂直于行车方向应保留的界限空间，包括桥面净宽和净高。

(二) 桥梁结构

上部结构和墩台及其基础是桥梁结构的重要组成部分。因篇幅所限，对各部分结构仅作简单介绍。

1. 梁式桥上部构造

因简支梁与连续梁桥、悬臂梁桥就总体构造而言有许多相似之处，所以以简支梁的上部构造为例。

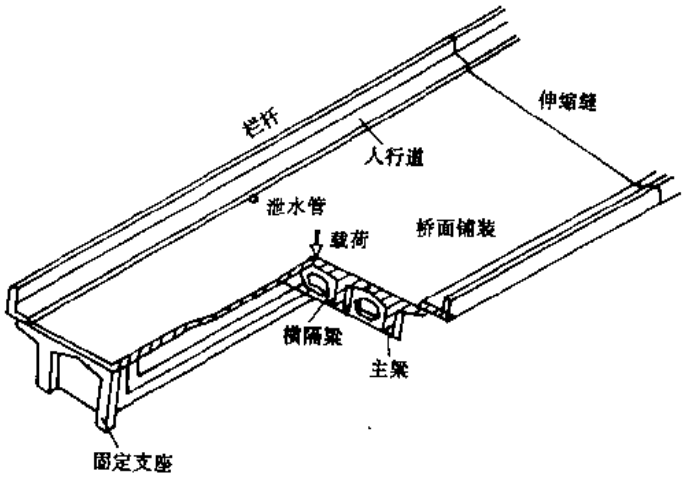


图 7－2

简支梁桥由于在施工方法上的不同，分整体式和装配式两类。所谓整体式简支梁桥就是将其上部结构在桥位上整体现场注筑而成。装配式则是将预制的独立构件在桥位现场吊装拼接。简支梁上部结构是由主梁、横隔梁、桥面板、桥面系以及支座等部分组成（图 7－2）。

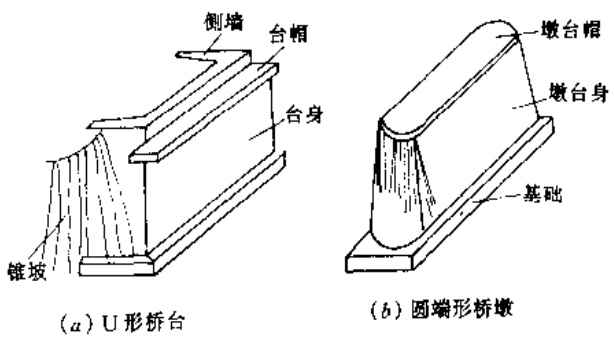
主梁是上部结构的主要承重构件。两端分别用固定支座和活动支座支承于墩台上，横隔梁起着联系各主梁，增强全桥整体性的作用，桥面板联系各主梁并对车辆荷载起分布作用。支座设在主梁与墩台之间，从而把上部结构的垂直和水平荷载传递到墩台上去，保证上部构造的稳定。简支梁桥每跨设置一个（组）固定支座和一个（组）活动支座。固定支座用来固定上部构造在墩台上的位置，可转动但不能纵向移动。活动支座可以保证上部结构在温度变化、混凝土收缩或竖向荷载作用下，能自由转动和移动。多跨简支梁一般将固定支座设置在桥台上，再在每个桥墩上布置一个（组）活动支座和 1 个固定支座，以便所有墩台共同承受纵向水平力。

2. 拱桥上部构造

拱桥也是由桥跨结构和下部结构两部分组成。桥跨结构由拱圈及拱上建筑构成。

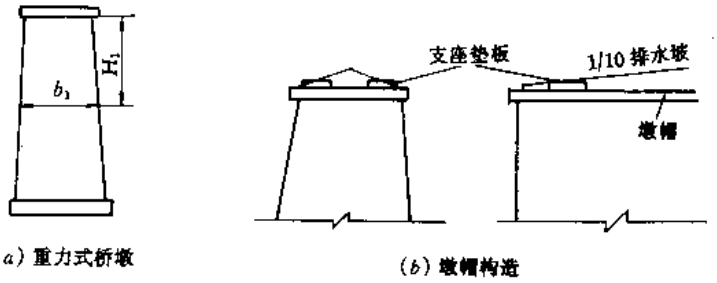
3. 桥梁墩台及基础

(1) 桥梁墩台。桥梁墩台是由墩（台）帽、墩（台）身和基础三部分组成（图 7－3）。桥墩是指多跨桥桥梁中的中间结构物，承受来自相邻两跨上部结构支座传来的竖直力和水平力。桥墩类型很多，仅介绍重力式桥墩（图 7－4）。



(a) U 形桥台　　(b) 圆端形桥墩

图 7－3



(a) 重力式桥墩　　(b) 墩帽构造

图 7—4

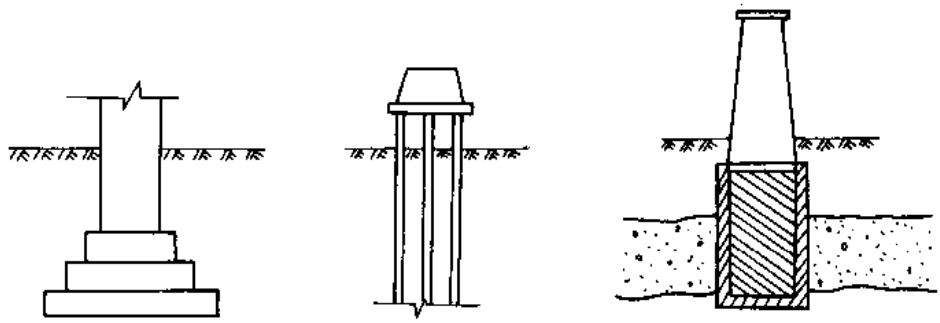


图 7—5

墩帽设在墩身顶部、帽顶设置成斜面以便排水。墩帽平面尺寸：根据支座布置要求确定。墩身设有坡度，一般墩身宽 $b_1 \approx (1/5 \sim /1/6)\ H_1$。

桥台是指桥头两端的支承结构物，它除了支承桥跨结构外，还是路桥的衔接构造物。

(2) 墩台基础。地基是桥梁的立足点，常采用明挖基础、桩基础或沉井基础（图 7—5）。明挖基础用于浅基础，当地层的硬土层较深时常采用桩基础。当地层中含有流砂层时多用沉井基础。

二、水利水电工程概述

水利水电工程主要包括水库闸坝、水力发电、农田水利、给排水、治河防洪、内河航运和渔业等工程。因篇幅所限仅对水库、闸坝、水力发电工程作一简述。

(一) 水库枢纽工程

一般水库枢纽工程主要是由挡水建筑物、泄水建筑物、取（放）水建筑物所组成。

1. 挡水建筑物

水库挡水建筑物是指各种拦河坝。拦河坝按筑坝材料可分为土石坝、混凝土坝和浆砌石坝。混凝土坝和浆砌石坝按结构特点可分为重力坝、拱坝、支墩坝。按是否泄流可分为非溢流坝和溢流坝。

(1) 重力坝。重力坝是用混凝土或浆砌石修筑的大体积挡水建筑物，它不仅可作为挡水坝，也可做成溢流坝。还可在坝体不同高度设置引水管道，检查、观测、排水、交通廊道，底孔泄放水建筑物等。为适应温度变化及地基不均匀沉陷，坝体还设有永久性温度缝

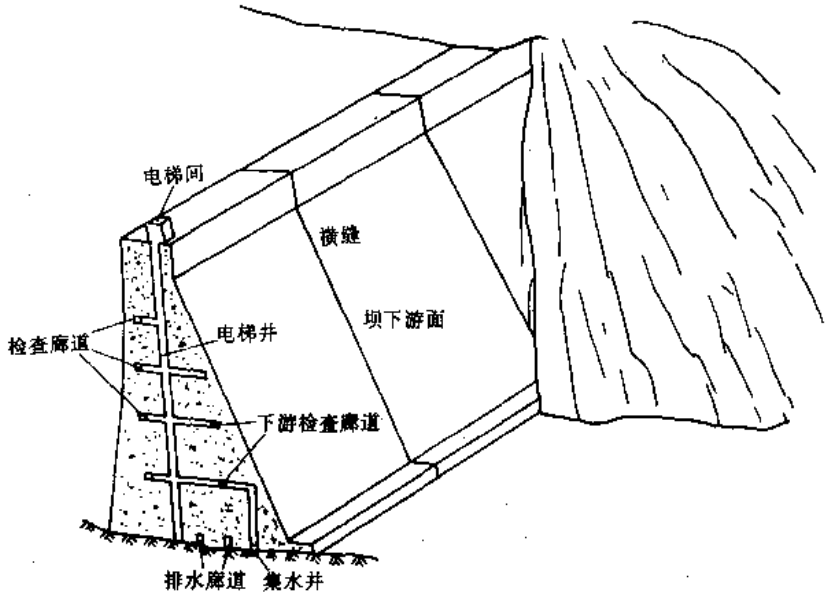


图 7－6

和沉陷缝，见图 7－6。另外溢流坝顶常设有闸门、工作桥、交通桥和启闭设备。

(2) 拱坝。拱坝在平面上是凸向上游的拱形，拱的两端支承于两岸的山体上，立面上有时也呈凸向上游的曲线形，整个拱坝是一个空间壳体结构（图 7－7）。根据其水平拱圈形状可分圆弧拱、抛物线拱、椭圆拱、三圆心拱及变厚度拱等。

(3) 土石坝。土石坝是利用当地土料、石料或土石混合料堆筑而成的最古老的一种坝型，也是最常用的一种坝型，可分为土坝、堆石坝、土石混合坝。

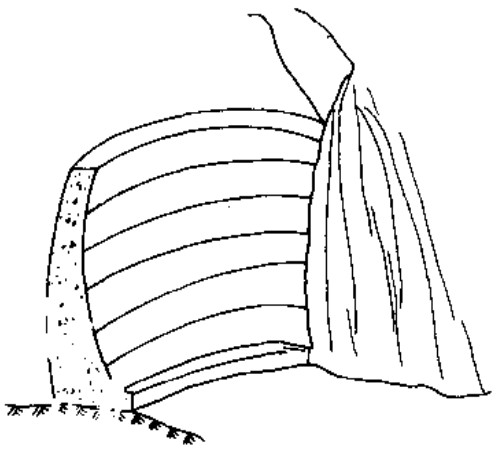


图 7－7

2. 泄水建筑物

泄水建筑物是水库枢纽中的一项主要建筑物，用以排泄超过水库拦蓄能力的洪水。泄水建筑物按其在水库枢纽中的位置，可分为位于拦水坝体的坝身泄水道和位于河岸的岸式泄水道。

3. 放水建筑物

自水库引水以供灌溉、发电、给水等需要的水工建筑物，称为放水建筑物，其型式有水工隧洞、坝下涵管和坝体放水孔。

(二) 水力发电工程

将水能转换成电能的工程，称为水力发电工程。水能大小取决于水流的流量 Q 及其落差 H（水头）。考虑到能量的损失及水头的损失，水电站的功率为：$N=9.804\eta QH_{净}$。根据河道的水流条件、地质地形条件以及集中水头的不同方法，水电站可分为坝式水电站、河床式水电站和引水式水电站三种基本类型。

1. 坝式水电站

水头是由坝所形成，即在河道上筑坝，用以抬高水位，形成落差。当发电机厂房紧靠着坝体布置在坝体下游时，称坝后式水电站。如厂房置于泄洪建筑物之下时称为厂房顶溢流式电站。当厂房布置在坝体的空腹内则称为坝内式水电站。图 7－8 是坝后式水电站示意图。

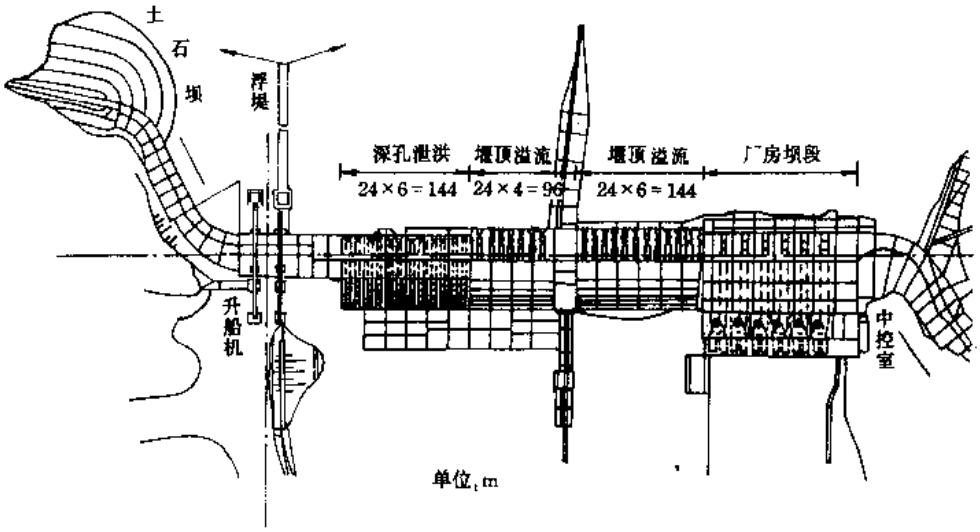


图 7－8

2. 河床式水电站

河床式水电站的特点是水电站水头较低，厂房本身也起挡水作用，是挡水建筑物的一部分，坝轴线与厂房并列（图 7－9）。

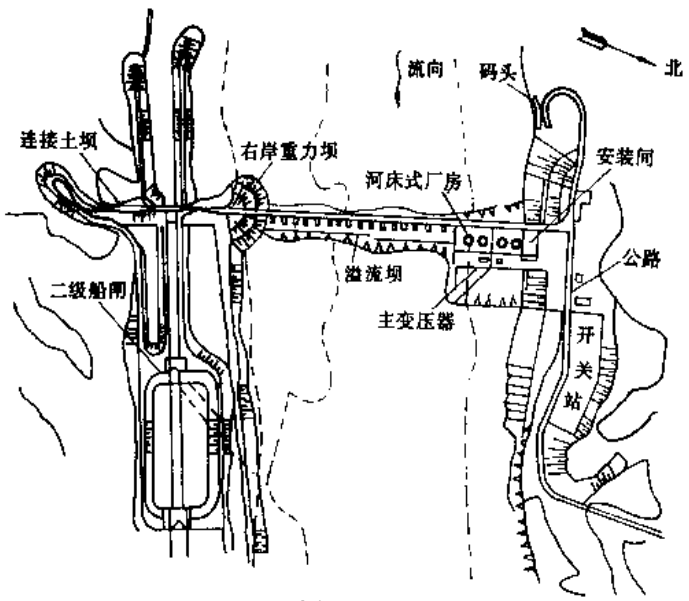


图 7－9

3. 引水式水电站

特点是引水道较长，水电站的水头全部或相当大的一部分由引水道所集中（图 7－10）。

第二节　桥梁工程施工测量

一、桥墩台施工测量

（一）桥梁墩台中心定位测量

桥梁墩台的中心定位，就是根据梁桥设计施工详图上提供的里程，依据已经建立的桥位控制点，测设出墩台中心的位置。墩台中心位置的测设方法因河道的情况不同而异。

1. 直接丈量法

当河流无水、浅水或河岸与河底高差较小时，可采用直接丈量法测定桥轴线长度。该方法是根据桥轴线控制桩和桥墩、桥台的里程，算出其间的距离，然后用钢尺由控制桩沿中线方向依次放出各段距离，将墩台中心位置用木桩标定于实地，并用铁钉定位。然后在这些点位上安置经纬仪，以桥轴线为基准放出墩台的十字中线，如图 7－11 中的 CC 线与 DD 线。并应在十字中线每端方向于基坑开挖边界外 1～2m 处设置方向桩。

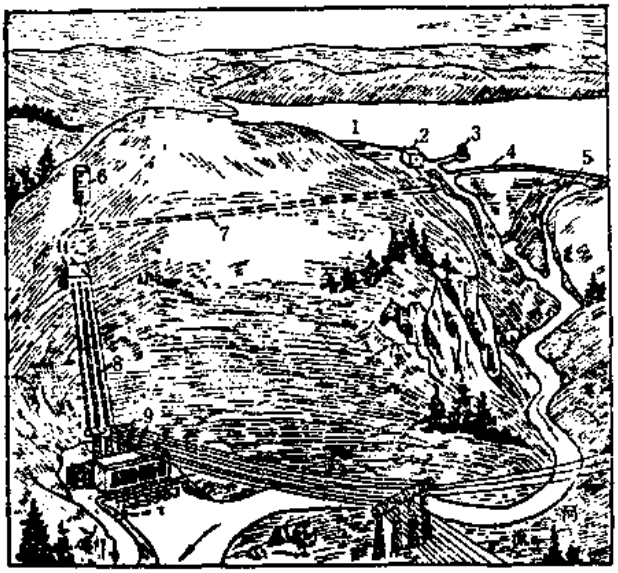


图 7－10

1—水库；2—闸室；3—进水口；4—坝；5—泄水道；6—调压室；7—有压隧洞；8—压力水管；9—厂房

丈量时使用的钢尺，应经过检定。并用经纬仪定线。丈量时需往返丈量两次以上，并对丈量结果加入尺长、温度、拉力和倾斜改正。

另外可用光电测距仪安置于桥位控制点 A 上，以 B 点定向用距离放样，其丈量精度不得低于表 7－1 的规定。

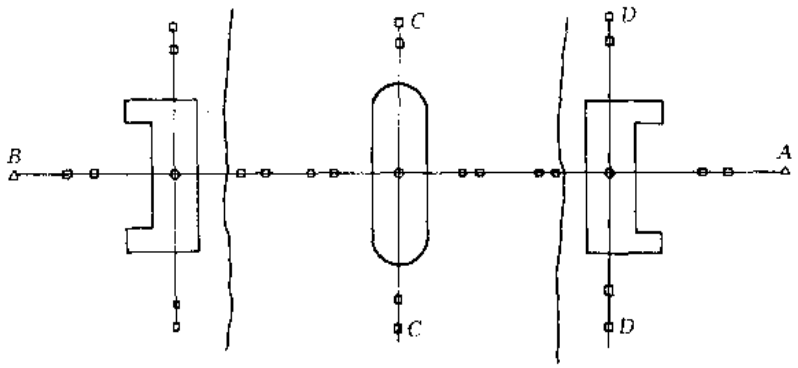


图 7－11

表 7－1 桥轴线丈量精度

桥轴线长度（m）	＜200	200～500	＞500
精　度	1/5000	1/10000	1/20000

2. 间接丈量法

当河道宽阔、水深流急、桥位桩之间的距离不能用钢尺直接丈量时可采用角度交会法测设。

1）计算交会角

在图 7－12 中，L_i 为 i 号墩台中心至桥轴线控制点 A 的距离，基线长 d_1、d_2 及角度 θ_1、θ_2 均为观测值，则交会角 α_1、β_1 可按下述方法算出：过点 i 作垂线 $in \perp AC$，则在 $\triangle Cni$ 中：

$$\alpha_1=\arctan\frac{in}{Cn}=\arctan\frac{L_1\sin\theta_1}{d_1-L_i\cos\theta_1} \tag{7－1}$$

同理得：

$$\beta_1=\arctan\frac{L_i\sin\theta_2}{d_1-L_i\cos\theta_2}$$

为检核 α_1、β_1 可按下式求算 ϕ_1 和 ϕ_2：

$$\begin{aligned}\phi_1&=\arctan\frac{d_1\sin\theta_1}{L_i-d_1\cos\theta_1}\\ \phi_2&=\arctan\frac{d_2\sin\theta_2}{L_i-d_2\cos\theta_2}\end{aligned} \tag{7－2}$$

则：

$$\begin{aligned}\alpha_1+\phi_1+\theta_1&=180^\circ\\ \beta_1+\phi_2+\theta_2&=180^\circ\end{aligned} \tag{7－3}$$

2）实地测设

按第二章第五节所介绍的角度交会法进行 i 点的放样。在采用角度交会时应注意：交会精度与交会角 γ 有关，当 γ 角在 90°～110°范围内时交会精度最高，故在选择基线和布网时应考虑使 γ 角在 80°～130°之间，不小于 60°和不大于 150°。若出现 γ 角小于 60°时，则需加测交会用的控制点；当 γ 角大于 130°时，可在基线适当位置上设置辅助点 P、Q 作为交会近岸墩位的测站，以减小 γ 角。

在桥墩施工中，角度交会需经常进行，为了准确、迅速地进行交会，可在取得 i 点位置后，将通过 i 点的交会方向线延长到彼岸设立标志（图 7－13）。标志设好后，用测角的方

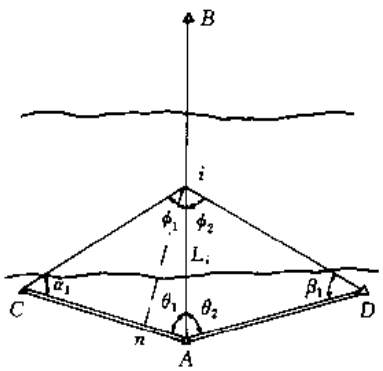


图 7－12

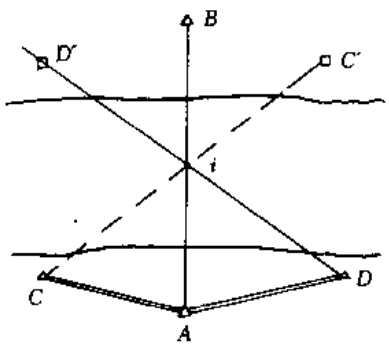


图 7－13

法加以检核。这样，交会墩位中心时，可直接瞄准彼岸标志进行交会，而勿需拨角。若桥墩砌高后阻碍视线，则可将标志移设在桥墩上。

（二）桥墩台施工测量

1. 墩台基础施工测量

因墩台基础分为明挖基础、桩基础和沉井基础三种，因此其相应的施工测量方法也不尽相同。

1）明挖基础的施工测量

首先根据已标定的墩台中心线，以及设计的基坑上的尺寸，标定开挖边界线。当基坑挖到一定深度时，在坑壁上设置高程桩。并依据两岸设置的水准控制点，测出其高程，用于控制挖深和基础施工中掌握高程的依据。

基坑挖好后，在墩台砌筑前，要根据施工测量定出的墩台中心线，在基础面上放出砌筑墩台的中心线，作为砌筑或模板安装的依据。

2）桩基础和沉井基础的施工测量

在这两种基础施工中，一是要正确标定桩基位置，二是要控制桩基和沉井井壁的竖直程度。现以沉井基础为例说明其施工测量工作。

在沉井过程中，沉井基础断面中心与基础设计中心间会产生水平位移，因此应定期进行位移测量。首先在沉井上口十字中线交点上方悬挂垂球线对准基础中心点，用经纬仪导线测量方法求得中心点坐标值，以地面上沉井上口中心为极点，用不同深度的测斜所得偏斜方位和偏斜值展绘沉井断面中心点，并推出断面中心的实际坐标，根据实际中心坐标和原中心坐标推出其水平位移大小和位移方位角。

2. 基础的竣工测量

桥基竣工测量的主要任务是如实地反映基础的结构和施工的实际位差。

1）打桩基础

打桩的施工方法有机械打桩和射水沉桩等，对基桩定位的要求都是相同的（表 7－2）。

表 7－2 打桩桩位允许偏差

桩　类	项　目	技　术　要　求	
木桩或钢筋混凝土桩	桩位允许偏差 $\delta_{允}$（D=桩的直径）	1. 带形基础下或桩群中的桩	$\delta_{允}$ 不大于 D
		2. 满堂桩中的桩	$\delta_{允}$ 不大于 $2D$
		3. 沿帽梁方向轴线的桩	$\delta_{允}$ 不大于 D
		4. 垂直帽梁方向轴线的桩	$\delta_{允}$ 不大于 $D/4$
		5. 桩群或满堂桩基最外一行的桩	$\delta_{允}$ 不大于 $D/2$
	入土深度	不小于设计规定	
	最后贯入度	不大于设计规定	
	桩顶高程	不低于设计高程	

基础桩位在设计图中已给定，但由于地层情况复杂，竣工后的基础桩位常有变动。因此需实测其位置，检查是否合乎要求。

实测时可对各桩统一编号，直接丈量各桩至桥墩纵横轴线 x、y 的垂距，检测各桩顶高

程。然后根据设计值求出其桩位偏差 δ_x、δ_y，并绘出各桥墩的实际桩位图。

2）混凝土灌注桩基础

其桩位的竣工检验可采用前述方法，也可在桥轴线控制点上用极坐标法实测其坐标，从而求出其桩位偏差值，其桩位允许偏差见表 7－3。

表 7－3 混凝土灌注桩桩位允许偏差

桩类	检验项目		技术要求
混凝土钻孔灌注桩	桩位允许偏差	顺桥中线方向 $\delta_{Y允}$	±50mm
		垂直桥中线方向 $\delta_{X允}$	±50mm
		支承面标高	±10mm
	桩入土深度		符合设计要求

3）开挖砌筑基础

依基坑放线的轴线量出基坑的轮廓，并绘记略图。测定坑底清基高程，注记在基坑略图的相应位置。记载基坑土质及基岩露头等情况。标明砌筑基础底座的结构尺寸，说明施工情况。

3. 墩台砌筑（浇灌）时的施工测量工作

在墩台施工过程中，对砌筑墩台应做好石料的定位。当墩台身和基础较低时可用垂线法控制定位石的位置。当墩台身较高时，可采用瞄准法。对混凝土浇筑墩台，则应注意模板的定位。

为控制墩台的砌筑高度，当桥墩、桥台砌筑到一定高度时，应根据水准点在墩台的每侧测设一条距顶部一定高度的水平线，在墩帽及帽顶施工时，应用水准测量控制其高程，误差应控制在－10mm 之内。用经纬仪定出墩台上两个方向的中线位置，在墩台上标出 T 型支座钢垫板的位置（图 7－14 所示）。

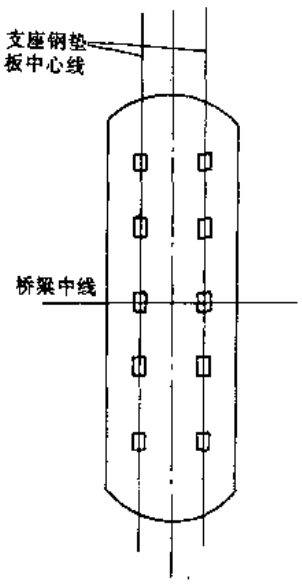


图 7－14

标定支座钢垫板位置时，首先依桥墩中心线定出支座钢垫板中心线。依路中线与支座钢垫板中心线的交点为基准以 T 型梁间距为长度，沿支座钢垫板中心线量出各支垫的位置。各支垫中心的间距，其误差不得大于 2mm。支垫高度可略低于设计高程。经检查无误后，即可浇注墩台顶面的混凝土。

4. 墩台的竣工测量

1）墩台中心间距的检测

墩台中心间距的测定可用直接丈量法（用检定过的钢尺或用光电测距仪直接丈量两中心距离）、交会法（用双三角形交会法测算桥墩中心的坐标，反算墩台中心间距）、视差法（每隔一座桥墩在其上设置一短基线 b，精密丈量其长度，在未设基线的墩台上设置经纬仪测出各 γ 角，求算出墩台中心间距，如图 7－15 所示）。检查的墩台间距其误差应满足表7－1的要求。

2）墩台竣工标高及平面位置的检测

检测时，可自一岸的永久水准点开始，经过各桥墩，测至另一岸的永久水准点，其高程闭合差限差应为：

$$f_{h限} \leqslant 4\sqrt{n} \qquad (mm)$$

式中 n——测站数。

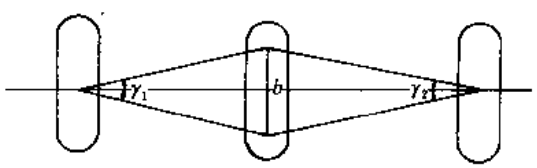


图 7－15

在进行此项水准测量时，应联测各墩顶的水准点，并测定各垫板及墩顶其它各点的标高。

另外应用经纬仪依中线桩检查墩台的两个方向的中线位置，其偏差应小于±10mm。

3）墩顶细部的检测

墩顶细部检测，应依据其纵横轴线进行。主要检测各垫板的位置及其尺寸、墩顶的长和宽。实际尺寸与设计尺寸的偏差应小于 20mm，并应根据所测资料绘制墩台竣工图。编制墩台中心间距表和墩台水准点成果表，作为上部结构安装的依据。

二、桥跨构件组装及安设时的测量工作

桥跨构件主要有：钢筋混凝土预应力梁、钢结构的实腹梁、桁梁等。

在桥墩上组装及安设桥跨构件时，主要的测量工作有：检查主桁架装配的直线性；构件的跨度；桁架的高空安装及拱度的调整。

1. 桥跨构件跨度的检测

在桥跨构件安装前，必须对构件的跨度作检测。如构件较短时可用检定过的钢尺丈量两次，并应加入温度、尺长改正。当构件较长时，可使用光电测距仪测定其长度，同样应加入气象、尺长改正。

2. 桥跨构件装配直线性的测量

桥跨构件安装后其纵轴线应为一直线，其直线度偏差不应大于跨度的 1/5000。

对于钢筋混凝土预制梁，安装前应对墩台上支座钢垫板的位置和高程重新检测一次，对支座间距也应进行检查，并在 T 型梁两端弹出中心线。T 型梁吊装就位时，其支座中心线应对准钢垫板中心线。初步就位后，应在桥轴线端点处安置经纬仪，以桥轴线为基准重新检查各 T 型梁中心是否位于同一条线上，并用水准仪检查梁两端的高程，偏差应在±5mm 以内。中线位置和高程检查合格后，应及时打好保险垛并焊牢，以防 T 型梁位移。

对于钢结构桥梁。钢梁铆接后，主梁弦杆的中线（在水平面上的投影）应成一直线，如图 7－16 中的 a、b、c、d、e、f、g 为桁架的节点。各节点在 a、g 直线上的偏差称为直线度偏差。检查时可将经纬仪安置在桥墩上，使视线平行于桁架上 a、g 两点的连线，固定照准部。然后将水准尺依次横置于各中间节点上，使水准尺零端与弦杆边缘相接触，用望远镜读出尺上读数，求出各节点的直线度偏差。同法，可求出另一侧的直线度偏差。取桁架两侧直线度偏差的平均值，作为桁架中线直线度的偏差。

如应用激光经纬仪测绘桁架平面图，则更为方便。

3. 构件拱度的检查

钢梁铆接以后，钢梁及各弦杆实质上不成水平线形状，而成平滑曲线，其中部稍微高起，略显弧形，以便车辆通过时，钢梁受力变为直线形状，或稍有下垂但不致下垂过多。此

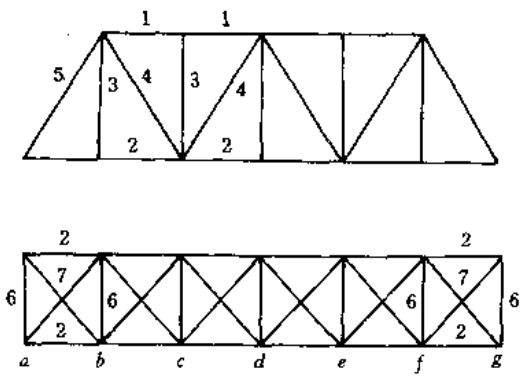


图 7－16

1—上弦杆；2—下弦杆；3—立柱；4—斜杆；5—端斜杆；6—横梁；7—斜撑

平滑曲线称为拱度曲线，其中部高于两端最大的高差，称为拱度。拱度通常约为跨度的1/1000。

作拱度检查时，首先在构件弦杆上标定观测点位，并量出各点间距。然后将水准仪安置在桥墩或桥墩的钢结构物上，将水准尺依次立于弦杆上各观测点上进行观测读数，可求出拱度，并绘制弦杆的纵断面图。

由于温度变化，钢梁各部分受热不同会影响拱度的大小，因此检查拱度应在阴天进行，并对所用水准仪进行严格检校。

另外架设钢梁时，其支座底板应水平，其辊轴支承面倾斜不应大于2mm。该项检查可用精密水准仪安置在桥墩顶面进行水准测量。

第三节　水利枢纽工程施工测量

在施工前原布设的测图控制网在点位密度、点位分布及其精度等方面均难以满足施工的需要。为保证建成后各个建筑物符合设计要求，在施工前必须根据作业区域地形、工程性质及规模等建立施工控制网；然后以施工控制网为依据进行施工放样；在施工阶段末期，要进行竣工测量。本节主要介绍水力枢纽工程施工测量。

一、坝轴线放样

对于每项水利枢纽工程，在经过有关人员的反复勘测设计后，在大比例尺地形图上绘出了工程设计图。施工测量的任务就是将图上的坝轴线及附属物实地放样出来。坝轴线的放样一般分成两步，首先根据已设计好的坝轴线的两端点设计坐标，依据测图控制点将其放样到实地，而后将其纳入施工控制网，作为控制网的一条边施测。而后根据施工控制网点及坝轴线端点再来放样坝轴线的其它细部点。

大坝根据其坝型可分直线型坝和曲线型坝。一般情况下，在设计图上已确定出了直线型坝两端点及各坝墩中心的设计坐标。对于曲线型坝，则根据水平拱圈形状在设计图上给定了圆心等的设计坐标以及中心角、半径等。施工放样前应根据坝区的地形、控制网点布设位置以及现场的测量设备确定具体的放样方法。

（一）直线型坝

对于直线型坝的坝轴线其两端点及各坝墩中心的设计坐标已确定，可根据坝区地形控制网点布设情况以及现场测量设备确定具体的放样方法。对于坝端点放样常用的方法有交会法及用全站仪或半站仪施测的极坐标法。在交会法中应选择最有利的交会角及交会线长度，然后依据放样点设计坐标及控制点坐标计算交会角度 α 和 β。在极坐标法中则要计算出极径及极角，并要注意分析其放样点精度是否符合要求。对于其它的坝墩中心位置，则可依据已放样出的坝轴端点及轴线两侧的平面控制点用轴线交会法（具体放样方法见第二章

第三节）或正倒镜投点法（第二章第四节）来标定。

在放样中应注意：在工程设计图中各个水工建筑物的位置，常采用以坝轴线方向为坐标轴的施工坐标来确定。应通过坝轴线与施工控制网的联测进行坐标的换算。

（二）曲线型坝

曲线型坝有多种曲线形式。本节以最常用的圆曲线型拱坝为例，图 7－17 为某水利枢纽工程的拦河大坝，其南顶拱圈中心角为 115°，坝轴半径 243m，坝顶拱圈弧长为 488m。大坝共分为 27 个坝段。

为了便于计算放样数据，根据设计图建立大坝施工坐标系统，以曲线型坝的圆心为坐标原点，以圆心与⑫、⑬坝段分跨线的连线为 x 轴。假定原点施工坐标为 $x=5000.00$m、$y=500.000$m。为了将圆曲线坝的形状尽可能地在实地放样出来，放样点间的距离取 5m。依照半径及弧长，即可计算出各点的设计坐标。

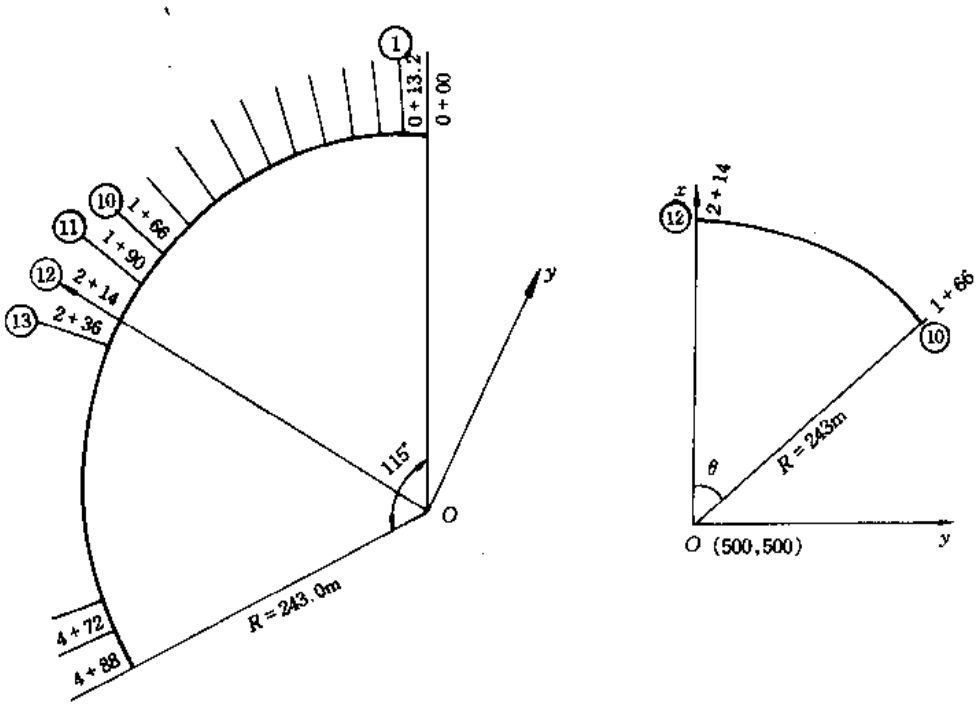


图 7－17

现以计算第 11 个放样点的设计坐标为例。

由放样点桩号可求出 10 点与 12 点间的圆弧长 L 和相应的圆心角 θ。

$$L=214-166=48\text{m}$$

$$\theta=\frac{180}{\pi R}\times L=11°19'04''$$

则 11 点的坐标增量：

$$\Delta x=R\cos\theta=238.274\text{m}$$

$$\Delta x=R\sin\theta=47.689\text{m}$$

$$x_{11}=x_0+\Delta x=738.274\text{m}$$

$$y_{11}=y_0+\Delta y=547.689\text{m}$$

由此法可求得其它放样点的设计坐标。

依据各放样点设计坐标。可根据控制点布设情况，用前方交会法或极坐标法进行放样。为保证和提高放样精度，对于放样各点应有检核。

二、混凝土坝的施工放样

在水利枢纽建设中，为便于放样和计算数据，常以水利枢纽的大坝轴线作为坐标轴而建立起局部坐标系统。因此在使用基本控制网点进行放样时应注意坐标的换算。

（一）坝基基础的放样

大坝地基要求有足够强度、抗渗性和抗滑能力。因此坝基应建在微、弱风化层以下的基岩上。为保持坝体抗滑稳定，基础底部不宜开挖成向下游倾斜的斜面，必要时可开挖成分级平台；基岩开挖面应平整，避免高低悬殊的突变，以免造成坝体应力集中，开挖应分层进行。应剩余 0.5～1.0m 的余量，用小药量爆破，如遇易风化的页岩、泥灰岩等岩石，应留 0.2～0.3m 的保护岩层待到浇筑混凝土前再挖除。因此在坝基基础放样中掌握好挖掘深度及基底平整度是非常重要的。

大坝根据其类型可分成为许多坝段，有时各坝段基础宽度不同。因此放样时可把坝轴线分为若干坝段，按一定距离在坝轴线上钉木桩，并安置经纬仪定出垂直于坝轴线的方向线。根据坝断面求出坝轴线到坡脚的距离，沿所测方向线依这些距离放出各个坡脚点的点位，将各点连接即为开挖的边界线。

在基础开挖过程中，因坝基基础的开挖深度是根据地质、地形、岩石风化情况和工程设计要求而定的，因此在开挖过程中主要是抄平基岩开挖面以及标定各级平台。另外为加强基础通常要进行固结灌浆。其固结灌浆孔在平面上呈梅花形或方格网布置，孔距一般为 3～6m，因此施工时应根据设计标定出钻孔位置。

（二）混凝土坝坝体放样

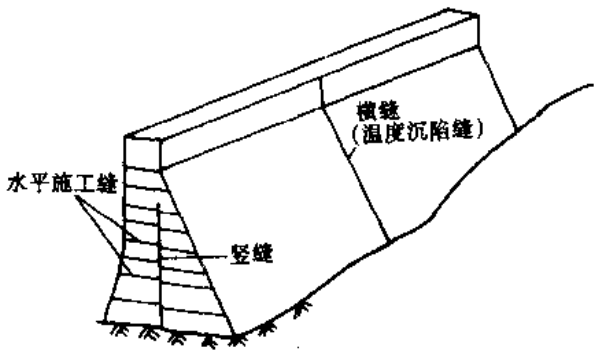


图 7－18

重力坝是整体结构，为了适应温度变化及地基不均匀沉陷，坝体设有永久性温度缝和沉陷缝（图 7－18）。为适应混凝土浇筑能力，防止初期温度裂缝，施工时常将坝分成柱状块和水平层，逐块逐层浇筑混凝土，形成施工缝。

当混凝土坝坝基开挖到符合要求并对基坑处理完毕后，即开始浇筑混凝土坝体。此时的施工测量任务是用前方交会的方法和方向线法按每块段的角点设计坐标，放样出每层或每段、每块的边线。下面仅以直线型坝为例说明。

1. 直线型坝方向线的测设

直线型坝坝底边线的放样是根据混凝土坝分段分块布置图，采用方向线法进行放样的。设置的方向线应平行和垂直于坝轴线，并在两端设置控制点（也称定向点），其布置见图 7－19。方向线的位置选择应根据混凝土坝的分段分块布置图进行，以便于放样及施工布置

方向线时，可首先在设计图上设计出各方向线，而后再实地放样出各方向线及端点。平行于坝轴线的方向线可用交会的方法放样，以坝轴线为准，向两侧量取设计间距，即可定出平行坝轴线的方向线 AA'、BB'、CC'。垂直于坝轴线的方向线测设时，可在上下游围堰上选择通视良好便于测量的地段选埋好二个端点（如 G 点），并以Ⅰ、Ⅱ点测设出其坐标，并以Ⅱ点和 G 点坐标以及坝轴线的方位计算拨角 α。在 G 点设站按所设计的间距精确标定出 D、E、F、H、I、J、K 点，在 D、E、F……各站上设站在另一围堰上定出 D'、E'、F'……各点。

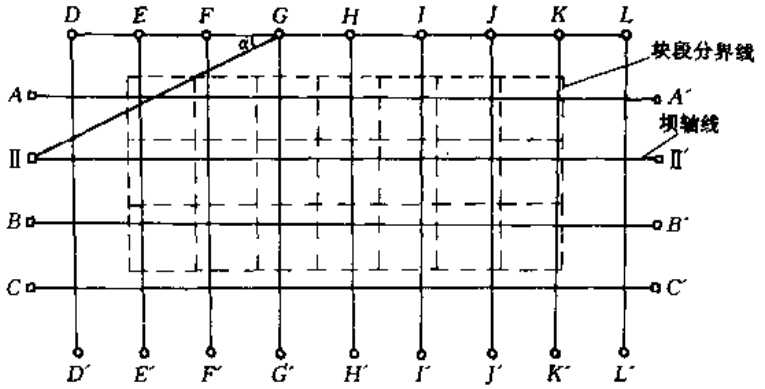


图 7－19

2. 直线坝坝体放样

坝体放样，首先放样坝底边线。根据坝体每段每块布置图，利用所设置的方向点，用方向线交会法，即可定出每段每块的轴线。如果方向线被挡住，影响放样，可将方向线投影到便于安置仪器，且通视的混凝土块上，继续用方向线法放样，或者用前方交会法解决。然后，只要事先布设好方向点，即可迅速而正确地定出边线。

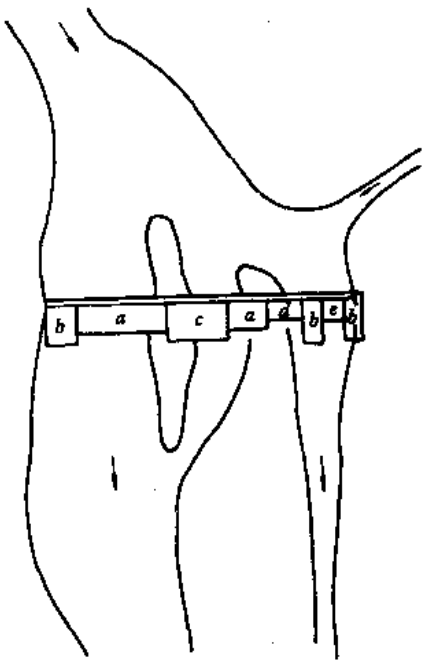


图 7－20

a—电站；*b*—船闸；*c*—泄水闸；*d*—混凝土坝；*e*—冲沙闸

三、水工建筑物的施工放样

大型的水利枢纽工程，除大坝电站外还包括船闸、泄水闸、冲沙闸等水工建筑物。现以某水利枢纽工程（图 7－20）的冲沙闸（图 7－21）为例说明闸门的放样方法。

（一）闸孔中线放样

冲沙闸是为了将大坝上游沉积的泥沙冲走而设置的。各闸室间设有闸墩，闸墩之间装有闸门。该冲沙闸共设六孔，每孔装有两道闸门，一道为弧形式工作闸门，一道为平板式事故闸门。

图 7－21 是冲沙闸第二孔平面图。闸孔中线放样时，可根据定向点进行交会得到交会点。由交会点根据各个闸孔中线间的尺寸，用检定过的钢尺沿着方向线丈量，即可定出各个闸孔中线上的点位。如图 7－21 中的 M 点是闸孔中线上的点位。在 M 点和坝轴线端点分

别设置仪器进行交会即可定出 N 点，用 MN 的设计距离检查合格后在地上设置永久性标志，作为控制闸孔中心线和槽门中心线的起点，以免坝体边墙上升后，坝轴线不易投点的困难。为便于放样和检核，还应在闸室下游方向的适当位置再设置一个闸孔中线点 Q。NQ 之长应精确量取。

（二）闸墩放样

闸墩放样时应首先放样闸墩中线。先在设计图上得出闸墩中线与坝轴线的交点 P 的设计坐标，根据 N 点坐标反算出放样数据。在 N 点设置仪器，放样出 P 点，然后在 P 点安仪器，放样出闸墩中线 m、n（图 7－21）。

以闸墩中线为基准放样闸墩的轮廓线，闸墩轮廓线分为直线和曲线两部分。直线部分，可根据闸墩中线，按照设计尺寸，用直角坐标法放出。闸墩椭圆曲线放样时应根据设计曲线大样图（图 7－22）和 P 点坐标计算放样数据，用极坐标法将曲线上各点放样出来。

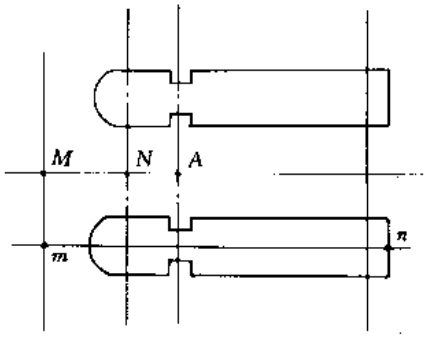


图 7－21

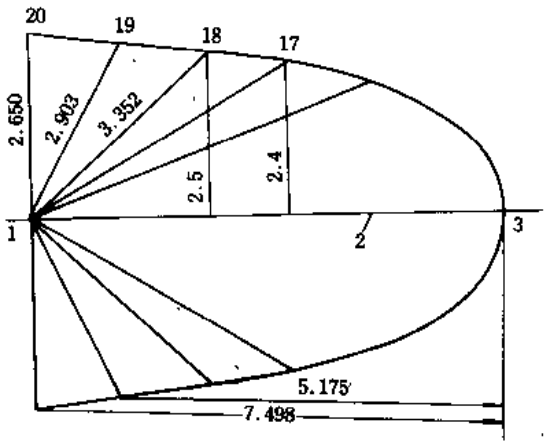


图 7－22

1—测站；2—中墩中线

（三）闸门的安装

闸门分为平板闸门、弧形闸门、人字形闸门等。本节仅以平板闸门为例叙述其安装测量工作。

平板闸门安装测量可分为底坝、门枕、门楣的放样及门轨安装测量（图 7－23）。放样时首先放样出门槽中线，然后依据门槽中线来放样底坝、门楣等构筑物。

1. 门槽中线放样

可依据坝轴线与闸孔中线的交点 N 点，按坝轴线至门槽中线的设计距离，用钢尺沿闸孔中线方向精确丈量，定出 A 点（图 7－23）。在 A 点安仪器以闸孔中线方向为准拨 90°角，得门槽中线方向，并在方向线上做出两个标志。

2. 底坝和门枕放样

闸门底坝中线与门槽中线平行。放样时，可依 N 点按坝轴线至闸门底坝中线的设计距离，在靠近门坝中线附近，用仪器设置一条与底坝中线相平行的线（2 线），在平行线上每隔 1m 处的混凝土面上做一标志，注明距坝中线的尺寸，以便施工安装。高程是边安装边测量的。

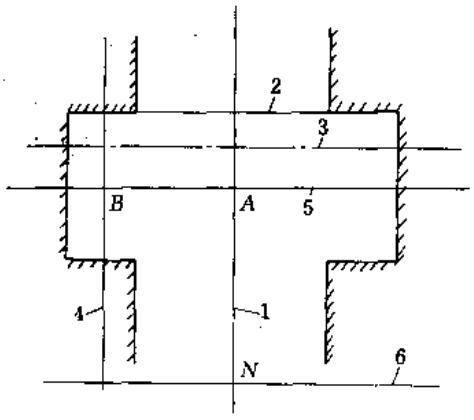


图 7－23

1—闸孔中线；2—平行线；3—底坝中线；4—门枕中线；5—门槽中线；6—坝轴线

门枕中线与门槽中线垂直。放样时，可依据 A 点沿门槽中线方向按门枕中线与闸孔中线的设计距离定出 B 点，依据 B 点标出门枕线并在两端混凝土上做出标志，以便安装时用。

3. 门轨位置的放样

为使闸门上下滑动灵活平稳，要求门轨要垂直，轨面不能偏扭。因此放样门轨位置时，可依据 A 点，按照设计尺寸和安装精度要求，用直角坐标法放出各个有关控制点，并精确做出标志。各控制点之间应尽可能保持对称，放样误差不能大于 0.5mm，根据这些对称的控制点即可进行门轨安装。

四、土坝施工测量

坝轴线放样完毕后，则要进行坝身细部放样，如坡脚线、坝坡面、马道等。坝身的细部一般依据矩形控制网来放样。

（一）坝身控制测量

所谓矩形控制网是由若干条平行于坝轴线和垂直于坝轴线的直线构成的，基间距一般为 10～20m（如图 7－24）。在设置平行线时 要将斜墙边线及马道中线定出来。对于垂直坝轴线的方向线，还要确定里程桩起算点（0+000 号桩）。零号桩位置一般设置在坝轴线上，其高程等于坝顶设计高程。

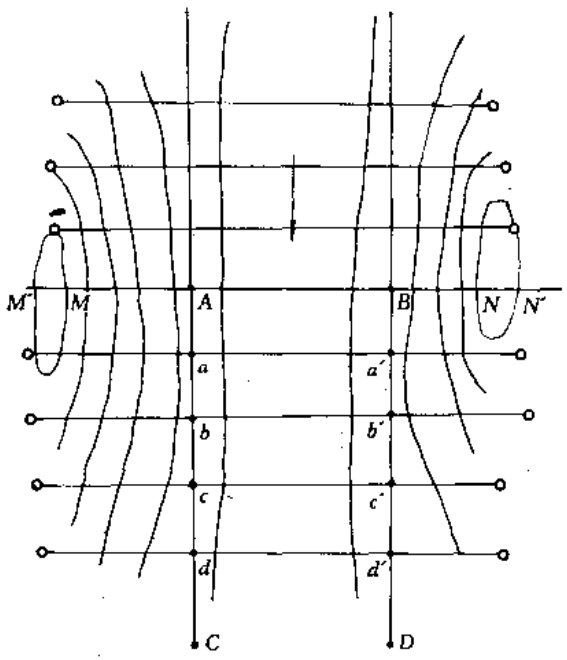


图 7－24

1. 平行线的设置

在坝轴线端点 M 上设站，瞄准另一端点 N，沿方向线在河谷地面上便于向上、下游量距的地方设置 A、B 两点。分别在 A、B 点上安置仪器，以坝轴线方向为准，拨 90°得垂线 AC 及 BD。在垂线 AC 及 BD 上按规定的间距定出 a、b、c……和 a'、b'、c'……点。则 aa'、bb'、cc'……即为要设置的平行线。用仪器分别把它们延长到两侧山坡上标定设点。

2. 垂直线的设置

在端点 M 附近安置水准仪，测设零号桩。在 M 点水准尺上读数 a，则零号桩上前视读数为：

$$b=(H_0+a)-H_{\text{桩}} \qquad (7-4)$$

式中 H_0——水准点高程；

$H_{顶}$——坝顶设计高程。

指挥前尺上下移动，当水准尺读数为 b 时立尺点即为零号桩位置。从零号桩起，按规定间距用钢尺沿坝轴线方向丈量，定出其它各个里程桩的位置。然后在各桩点设站，以坝轴线方向为准拨 90°角，即可定出垂直于坝轴线的一系列平行线，在上下游施工范围以外，用标桩标定其方向。

坝轴线上各个里程桩的位置及各条垂线在实地标定后，即可沿着各个里程桩方向施测每个里程位置的横断面图，以便作放样坝基开挖线和收方的依据。

（二）清基开挖线和坡脚线的放样

在填筑坝体之前，必须对大坝基础进行清理，使坝体与地基能很好结合。清基开挖线就是坝体与自然地面的交线，清理基础时，应把这个交线在实地定出来，以便破土清基。

1. 清基开挖线的放样

清基范围不必很精确，因此可用图解法，根据里程桩的高程，把土坝的设计断面套在横断面图上（图 7－25）。P_1、P_2 为坝面上下游清基开挖点。由图上量出 S_1、S_2，在里程桩上安置仪器，后视横断面方向桩，沿方向向两侧量出 S_1、S_2 即得实地开挖点 P_1、P_2。由于清基时有一定深度，开挖时要有一定边坡，故长度 S_1、S_2 应加宽 1～2m。连接各断面上的清基开挖点即为清基开挖范围。

2. 坡脚线的放样

放样方法有趋近法、平行线法等，在此仅叙述趋近法。

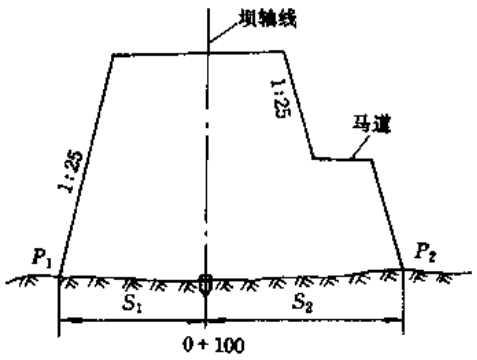


图 7－25

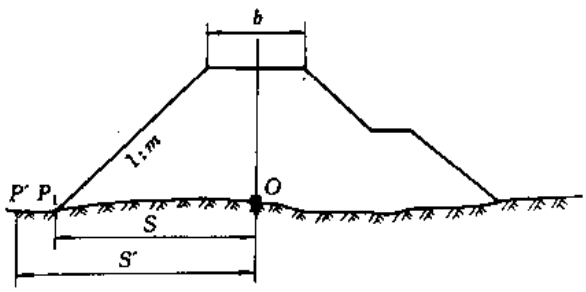


图 7－26

将仪器安置在里程桩上，照准横断面方向桩在坡脚点 P_1 附近的 P' 点立尺（图 7－26）。测出 O 点至 P' 点的轴距 S' 及 P' 点高程 H，按下式计算平距 S：

$$S=\frac{b}{2}+(H_{顶}-H)_m \qquad (7-5)$$

式中 b 为坝顶宽；$H_{顶}$ 为坝顶高程；H 为立尺点高程；m 为坝面坡坡度。

如 $S\neq S'$ 则该立尺点不是坡脚点，则应将尺子沿断横面方向移动（移动方向根据 $\Delta S=S'-S$ 来确定，ΔS 为正则尺子向坝轴线方向移动），直至算出的平距与实测平距之差 ΔS 在容许误差内为止，该点即为坡脚点。

（三）坝体边坡放样与修整

为使修筑的坝体符合设计要求，在填筑坝体前需要放样坝体上下游坡面的坡度。边坡放样的方法类似于铁路路基的边坡放样，这里不再赘述。

第八章　水下地形测量

第一节　概　　述

在水利工程建设、航道整治、填海造地以及兴建各种水工建筑物（如码头、海防工程等）时，除了需要各种比例尺的陆上地形图外，还要求测量人员施测各种比例尺的水下地形图。

水下地形测量所采用的控制测量方法与陆地地形测量相同，水下地形图像陆地一样，也采用等高线（或等深线）表示地形的起伏。只是由于水下的地形起伏人眼看不见，不能像陆地上那样准确地选择特征点进行测绘，因此，只能根据实际情况，采用断面线（测深线）法、散点法等方法均匀地布设一些测点。

用等高线来表示水底地形高低起伏的地图，称为水下地形图；用等深线描述水底地形相对于某一起算面的深度分布情况的图称为水深图；在大范围内（如海域）施测的水深图，如采用统一编号，则称为海图。

一般而言，海图的比例尺较小，而在沿海的港湾、内河、湖泊等地区，为满足特定工程建设项目的需要而测设的水下地形图，一般比例尺较大，既可以单独编号，也可以与陆上地形图统一编号。

测绘水下地形图，也需要以控制点为基础测量各测点（碎部点）的平面位置，同时测量其水深。因是在水面上进行测量，所以必须借助船只才能实施。测定测点平面位置的方法很多，目前大多根据具体情况，采用交会法、无线电定位法、GPS 系统定位法等。测点的高程，是由水面高程（水位）减去测点处的水深来推求的。而水位通常是变化的，因此，在水下地形测量过程中应及时观测水位的变化情况。

水下地形测量的内容，与陆上的相比，要简单得多。但由于水下地形的起伏肉眼看不到，所以测点只好大致布设均匀。但水下地形与陆地相比，显得比较平缓，因此，布设均匀的测点基本上能反映水下地形的变化情况。

目前，随着电子技术、计算机技术的不断发展，水下地形测量所使用的定位手段和测深设备日趋自动化，国内外已研制了大量的水下地形测量自动化成图系统：定位系统与自动回声测深仪同时进行定位和测深，并将所测数据自动记录在磁盘上，经微机自动处理后，自动绘制成水下地形图。

第二节　测深线、测深点的布设和测深仪器设备

一、测深线、测深点的布设

水下地形测量与陆地地形测量不同，因为水下地形的起伏看不见，所以不能像陆地地

形测量那样能有效地选择地形特征点进行测绘。为了使测点能分布均匀，不漏测，不重复，在实践上常采用散点法或测深线法布设测深点。观测时，同时测定测深点的平面位置和水深。测深线也称测深断面。测量人员根据待测水域情况，事先在室内设计好待测断面，然后利用前面介绍的放样方法，在实地标定好测深断面和测深点。

测深线的方向，可与河流主流或岸线垂直（图 8－1*a*、*b*）；可以相互平行，平行线间距一般为图上的 10～20mm。在河道转弯处，也可将测深线布设成扇形（图 8－1*c*）。测深线还可以呈辐射状布设（8－1*d*）。测深点的间距通常为图上 6～8mm，也可以根据水下地形的复杂程度适当地加密或放宽测深点和测深线。

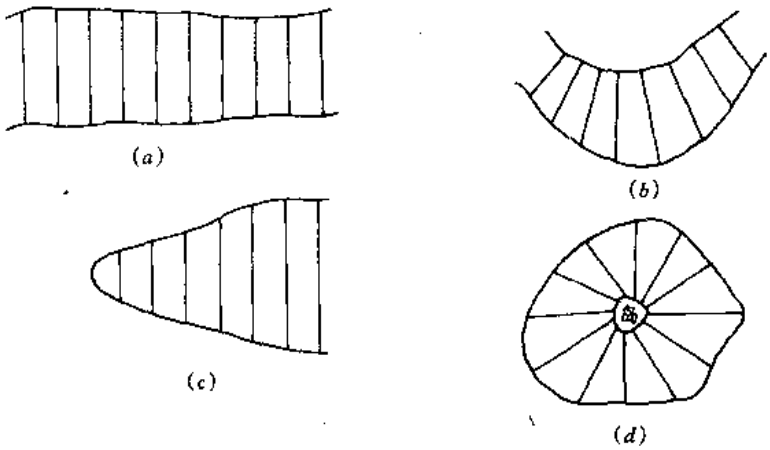


图 8－1

观测时利用船只来测定每个测点的水深。为了使船沿测深线航行，在实地上要安放导标。导标常用花杆或大旗做成。两个导标相距应尽可能远些，以供测船瞄准之用。

导标的安放，要按设计的测深线的位置，在测深前安置好。每条测线上应安置两个导标（图 8－2 中的 *a*、*b*）。为便于检核，每条测线上应安放三个桩位，如图 8－2 中的 *c* 所示。

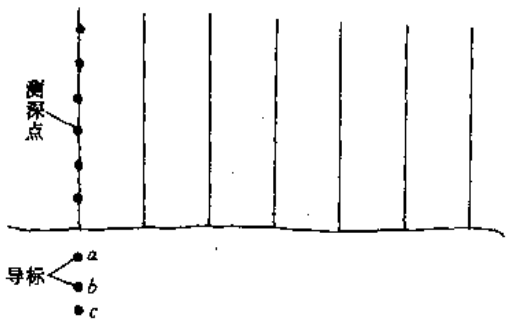


图 8－2

实际测量时，也可以采用散点法测量水深，测线方向和测深点间距完全由船上的测量人员控制。

二、测深仪器设备

水下地形测量中，常用的测深工具或仪器有测深杆、测深锤和回声探测仪等，可根据水深、流速大小和精度要求选用，一般应满足表 8－1 的要求。

（一）测深杆

测深杆（图 8－3）可用竹杆、硬塑料管、玻璃钢杆或铝合金管等硬质材料作为标杆。标杆下端装一直径为 10～15cm 的铁底板或木板，以防止杆端插入淤泥深处而影响测深精度。

表 8—1　测深仪具适用范围与测深点深度中误差

水深范围（m）	作　业　设　备	测深点深度中误差（m）
0～5	宜用测深杆	±0.10
2～10 0～10	测深仪 测深锤　（流速小于 1m/s）	±0.15
10～20	测深仪或测深锤（流速小于 0.5m/s）	±0.20
超过 20	测深仪或测深锤（静水水域）	水深的 1.5%～2.0%

注：①在工程要求不高或特殊困难地区以及用锤测而流速大于表中规定时，可按表中要求放宽至 2 倍。

②测深水域遇有水草、海底树林时，不得使用测深仪。

为便于读数，在测深杆上用红油漆每隔 10cm 作一标志。而且，为了区别，可以将 1、3、5m 漆成白色，并用红漆注明 10cm 的位置；同样，将 2、4、6m 漆成红色，用白漆标明 10cm 的位置。分划线要从铁底板的底面起算。

测深杆宜用来测量小于 5m 的水深。

（二）测深绳

当水深较大时，可用测深绳测量水深。测深绳一般选用柔软、在水中伸缩性小的材料制成。在测深绳下端系一重约 3～4kg 的重锤。水深较大时，可用 5kg 以上的重锤。为了便于读数，绳索上应每隔 10cm 用不同颜色的色带作出标志（图 8—4）。

测深绳适宜在流速小、船速小、水深不大于 20m 的情况下使用。为了保证测量精度，在使用一段时间后，应对绳索长度进行检测。

（三）回声测深仪

当水域面积较大、水深较深、流速较大时，用前面介绍的传统的测深杆、测深绳测量水深，不仅精度较低、费工费时，有时甚至是不可能的，这时可选用回声测深仪测量水深。

回声测深仪适用范围较广，最小测深为 0.5m，最大测深可达 300m。当流速为 7m/s 时，仍能照常工作。测深仪的优点是精度高，且能迅速、连续不断地测量水深。

测深仪的型号很多，但它们的工作原理和主要结构大同小异，掌握了基本原理，遇到具体型号的仪器时，参看仪器说明书即可使用。



图 8—3



图 8—4

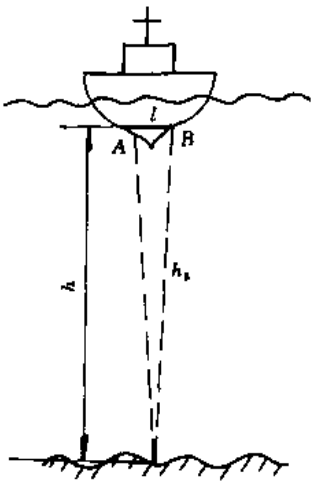


图 8—5

1. 回声测深仪的工作原理

回声测深仪的基本原理是利用声波在同一介质中匀速传播的特性，测量声波由水面至水底往返的时间间隔 Δt，从而推算出水深 h（图 8－5）：

$$h=\frac{1}{2}\sqrt{(c\times\Delta t)^2-l^2} \tag{8-1}$$

式中 l 为两换能器之间的距离（又称基线长）。当在深水水域或换能器收、发合一时，上式可简化为：

$$h=\frac{1}{2}c\times\Delta t \tag{8-2}$$

式（8－2）中的水中声速 c 与水介质的体积弹性模量及密度有关，而体积弹性模量和密度又是随温度、盐度及静水压力变化而变化的。时间 Δt 是仪器测量得到的，一旦声速 c、时间 Δt 确定后，那么换能器到水底的垂直距离也就知道了。

2. 声速

前已述及，声速 c 与水介质的体积弹性模量 E 和密度 ρ 有关，用公式表示为：

$$c=\sqrt{\frac{E}{\rho}} \tag{8-3}$$

对于海水来讲，在 0℃时，$E=2.15\times10^9\text{N/m}^2$，$\rho=1020\text{kg/m}^3$，由此得 $c=1452\text{m/s}$。在实际工作中，实测体积弹性模量是十分麻烦的。因而，在测求海水声速时，可用仪器直接测量，或者用经验公式计算。用声速仪直接测量，可以适时地获得当时当地的声速，有利于实施测量自动化，但需用专用仪器和设备。运用经验公式进行计算，首先必须获得影响水中声速的各种因素的数值，然后再运用声速与各因素的函数表达式，即经验公式，进行计算。目前在工程上应用较多的经验公式是：

$$c=1449.2+4.6t-0.055t^2+0.00029t^3+(1.34-0.01t)(S-35)+0.168P \tag{8-4}$$

式中 t 是温度；S 是盐度；P 是静水压力。

由公式（8－4）可知，声速随着水介质的温度、盐度及静水压力增加而增加。

3. 回声测深仪的组成

回声测深仪主要由发射机、接收机、发射换能器、接收换能器、显示设备、电源等部分组成。

发射机主要作用是周期性地产生电振荡脉冲并向海水中发射；接收机能将换能器接收的微弱回波信号进行检测放大，经处理后送入显示设备；发射换能器是一个将电能转换成机械能，再由机械能通过弹性介质转换成声能的电－声转换装置；显示设备的作用是将所测得的水深值显示出来。

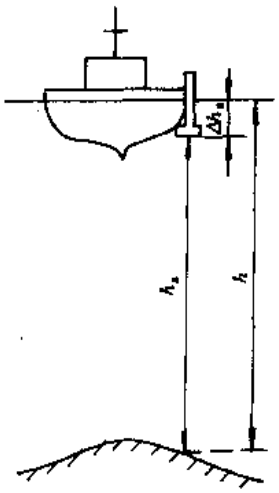


图 8－6

目前许多测深仪都将发射和接收换能器做在一起。

4. 水深值的几项改正

对测深仪所测得的水深值，必须加上有关改正后，才能得到真正的水深值。

1）吃水改正 Δh_s

测深仪的换能器一般都安装在水面下一定距离的地方，由水

面至换能器底面的垂直距离称为换能器吃水改正数 Δh_s（图 8－6）：

$$\Delta h_s = h - h_s \tag{8-5}$$

式中 h 为水面至水底的深度；h_s 为换能器底面至水底的深度。

2）转速改正 Δh_n

当测深仪的实际转速 n_s 与设计转速 n_0 不一致时，就产生了转速改正数。由于记录器记录的水深值是记录针移动的速度与回波时间所决定的，因此，当转速变化时，所记录的水深值也将发生变化。转速改正数 Δh_n 为：

$$\Delta h_n = h_s\left(\frac{n_0}{n_s} - 1\right) \tag{8-6}$$

3）声速改正 Δh_c

声波在海水中传播的速度 c 是温度 t、盐度 S 及海水静压力 P 的函数。当这些参数发生变化时，将引起声速 c 的变化。若测区的实际声速 c_m 与设计声速 c_0 不一致时，就产生了声速改正数 Δh_c：

$$\Delta h_c = h_s\left(\frac{c_m}{c_0} - 1\right) \tag{8-7}$$

进行声速改正，需要知道所测海区的实际声速 c_m。在实际工作中一般是采用两种方法求取 c_m：一种是根据大量的实测资料，建立比较符合实际的经验公式；另一种是每月测定测区内 0m、15m、25m、35m、50m、75m、100m、150m……深度处的声速，然后取各层声速的加权平均值，作为海面某深度处的平均声速 c_m。

4）测深值的总改正数

将上述各项改正数汇总，即得到水深值的总改正数 Δh 为：

$$\Delta h = \Delta h_s + \Delta h_n + \Delta h_c \tag{8-8}$$

上述改正数中，以声速改正数 Δh_c 对总改正数 Δh 的影响最大。另外，当发射换能器与接收换能器不合一时，还应加上基线改正，这里从略。

第三节　测深点定位

测深点定位是水下地形测量的一项重要工作之一，无论是测量江河湖泊水底的地貌，还是测量海底地形，都必须将相应测深点的平面位置纳入地面坐标系统，否则测量工作毫无意义。

水上定位与陆上定位不同，因为水上定位时，待测船位是运动的、实时的，不可能像陆上测量一样用多测回重复测量，并进行严密平差。因此，水上定位有其特定的方法。目前常用的技术方法有：交会法、断面索法、无线电定位法、GPS 定位法。

1. 前方交会法

这是最常用的一种方法。以行驶的测船为观测目标，在岸上的两个控制点上架设经纬仪，同时照准目标，按角度前方交会法（测量交会角 α、β），即可求得待测点位置。

2. 后方交会法

如图 8－7 所示，在陆地上三个控制点 A、B、C 上立标杆，在测船上用两架六分仪分别测量两个后交角 α、β、P 点位置就可以确定了。由于这种方法定位精度较差，故一般只

能用于1∶5000以下的中、小比例尺测图。该法目前已渐被淘汰。

3. 断面索法

此法适用于小河道测量。如图8－8所示，按事先设计好的断面测线方向，在两岸拉一带有刻划的钢丝绳。工作时，让小船沿这条带有刻划的钢丝绳边定位边测深。一条测线测好后，同法可进行另一条测线的测量工作。此法定位精度最高。

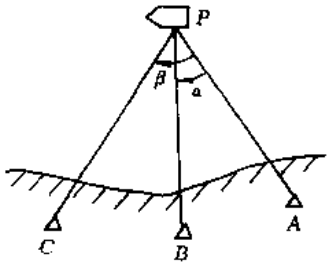


图8－7

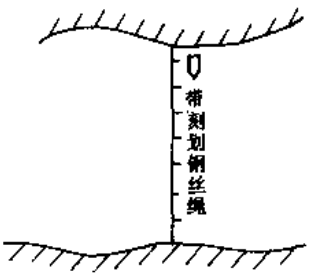


图8－8

4. 极坐标法

在陆地的测站上架设带测距装置的经纬仪，将反光镜置于船上，在测量角度的同时测量测站到航船的距离，则航船位置便可确定。近年来，随着电子经纬仪和高精度测距仪的不断发展，这种方法得到了广泛应用。特别是利用全站仪，按方位一距离的极坐标法进行定位，可获得每个瞬时的船位的坐标，并及时存贮在电子手簿中，事后通过微机处理，利用绘图机自动成图。由于这种方法方便灵活，定位精度较高，因此这种方法的使用日渐增多。

5. 无线电定位

在水域宽广的湖泊、江河、港湾及海洋上进行定位时，可用无线电定位仪。无线电定位系统具有全天候连续实时定位的特点，定位精度基本能满足水下地形测量的要求，作用距离远、覆盖范围广，已成为海洋测量的主要定位手段之一。

无线电定位根据距离或距离差来确定测船的位置，前者称为圆系统定位，后者称为双曲线系统定位。

1）圆系统定位

如图8－9所示，在测量船P上设置主电台，主电台包括发射机、接收机、天线和显示设备。在岸上两已知点上设置副台，副台上设有接收机、发射机和定向天线。

定位时，船上主电台发射一定频率的电磁能脉冲，设测得主台至副台1、副台2的距离为D_1、D_2，分别以副台1、副台2为圆心，以D_1、D_2为半径，所画圆弧之交点，即为所测船位。

为了使岸上电台都只能回答预先规定的脉冲，船上电台的发射机应发射两种不同频率的脉冲，而岸上电台的接收机也应各自调谐到相应的频率。

目前我国使用的这类仪器有国产的HLCJ－1、DW－2；国外引进的如Trisponder、Falcan-III等。

2）双曲线系统定位

双曲线定位又称测距差定位。它是根据到两个定点的距离差为常数的动点轨迹为双曲

线的几何原理设计的。如图 8—10 所示，在陆地的三个控制点 A、B、C 上设立无线电发射台。其中 A 为主台，B、C 为副台，P 为测船位置，船上设有无线电定位仪。

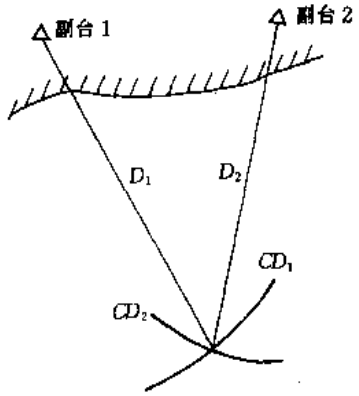


图 8—9

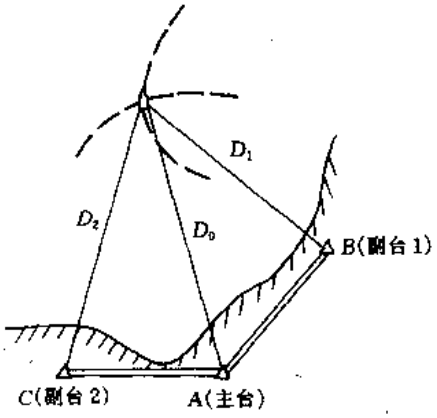


图 8—10

由测船 P 至岸台的距离分布为 D_1、D_2 和 D_0，若将岸台视为双曲线的焦点，则船位 P 就是距离差（D_0-D_1）的双曲线和距离差（D_1-D_2）的双曲线的交点。距离差是由测船接收三个岸台无线电信号，分别测量它们的相位差求得的。这种无法电定位系统的仪器型号较多，定位速度也快，但由于定位精度一般只能达到 3～5m，所以在大比例尺水下地形测量中较少采用。

6. GPS 定位

GPS（全球定位系统）是继 NNSS（子午卫星导航系统）之后，美国建立的第二代卫星定位系统。GPS 提供两种类型的服务：一种为精密定位服务（PPS），使用 P 码，其单点实时定位精度可优于 10m，供美国军方及特许用户使用；另一种为标准定位服务（SPS），使用 C/A 码，向全世界用户开放，其单点实时定位精度约为 20～30m。自美国政府实施 SA 政策后，C/A 码的定位精度已降低到 100m 左右。这样的精度对于大比例尺水下地形测量的测深点定位显然是不够的。为了提高 GPS 测量的精度，动态差分定位越来越引起人们的重视。

所谓差分 GPS（DGPS），就是将一部基准 GPS 接收机（RR）放在位置已精确测定的点上，将这部 GPS 接收机所产生的定位数据与其准确的位置相比较，以求得 GPS 系统在该点的位置或伪距测量误差，再将这些误差值通过发射台（差分台）发播出去。附近的 GPS 用户在接收到来自差分台的误差信号后，便用以校准自己的 GPS 观测值，从而达到提高精度的效果。但单主站式差分 GPS 服务存在有效作用范围小，若要在全国覆盖，需要布设大量 DGPS 站等缺点，因此，近几年来，广域差分（WADGPS）技术受到越来越多的关注。

动态差分定位目前用得较多的是坐标差分和伪距距离差分。所谓坐标差分就是将岸上已知点的观测坐标与已知坐标的差值作为改正数，改正船台同步测得的点位坐标；所谓伪距距离差分就是在岸台已知点和船台同时对卫星伪距进行观测，然后对所测的伪距进行改正的方法。伪距距离差分要比坐标差分严密且效果更好。GPS 差分的高精度潜能还在于载波相位的的应用。相位与伪距相结合的差分方法能够达到 0.5～1m 的精度。

应该指出，测深点平面定位与水深测量一定要同步进行。

第四节　水下地形测量外业

水下地形图的测绘，是一项群体性的复杂的技术工作，各道工序的衔接要求较严格。由于是在水面进行作业，安全工作十分重要，所以，作业之前必须根据任务要求和测区情况进行周密的准备。

一、水下地形测图的准备工作

在明确了测绘任务以后，首先应收集测区内及其附近地区的各种测绘资料、水文资料，然后进行实地踏勘，了解水流、水深、交通、水底淤泥等情况；检查控制点是否保存完好、相邻点之间是否通视，以便落实已有控制点可利用的程度。

水下地形测图是一项要求高、作业环节多、组织管理复杂、带有一定危险的测量工作。为了保证测图工作能顺利进行，确保各工序之间的密切配合，使成果、成图符合技术标准和用户要求，以获得最佳的社会效益和经济效益，在施测工作开始前应进行技术设计。

技术设计时，应根据测图比例尺、测图流域面积、河流走向、潮汐变化等自然地理情况，结合用图单位的具体要求及本单位仪器设备、技术力量等条件，灵活运用测量学的有关理论和方法，制定一套在技术上可行、经济上合理的技术方案、作业流程和实施计划，并将其编写成技术设计说明书，报有关单位批准后实施。

进行水下地形测量需要利用测船在水面上进行，因此，安全工作非常重要，应制订一套严密的安全防范措施，以防发生意外。

二、水位观测

水下地形测量时，水下测点的高程是通过观测时刻的水深间接推求的，由于测量水深的基准是水面，而水面的水位通常是变化的（如海平面因潮汐影响每天有升有降；在江河中的不同地段，水位亦不同）。因此，必须对实测的水深值加上改正后，才能推算出成图时所需用的统一高程值。

进行水位改正，必须先进行水位观测。水位观测在统一的基准面上进行。我国目前采用两种基准面：

（1）大地水准面，根据青岛验潮站资料计算的多年平均海平面，称为“1985 国家高程基准”。这是绝对基准面。

（2）测站基准面，采用观测地点历年的最低枯水位以下 0.5～1.0m 处的平面作为测站基准面，这是相对基准面。

通常的水位观测设备有标尺和自动水位计两大类。使用最广的是立在岸边水中的标尺。标尺一般为木制，上面刻有米、分米和厘米刻划，类似于水准尺。为了减少波浪的影响，提高读取水位的精度，可在标尺周围设置挡浪的设备。在易受水流、漂浮物撞击以及河床土质松软影响而不宜设置直立式标尺时，可设立矮桩式标尺。这种标尺只露出地面 10～20cm，并在桩顶设置一圆头钉作为高程测量标志。

标尺零点的高程用水准测量的方法与水准点联测求得，设为 H_0。观测标尺时，应尽可能接近它，水面读数至厘米。在有风浪时，应取波峰、波谷读数的平均值。所谓水位即为

标尺零点高程加上标尺读数。

进行水下地形测量时，水底测点的高程等于水位减去水深，因此，水位观测应与测量水深同时进行。这一要求在实际工作中难以做到，也不必要。实际工作中，是派专人按规定时刻连续在标尺上读取水位，时间间隔因水位升降速度和水深测量的精度要求而定，一般每隔 10～30min 观测一次，记录水位及观测时刻，并以水位为纵坐标，时间为横坐标，作出水位－时间曲线图备用（图 8－11）。

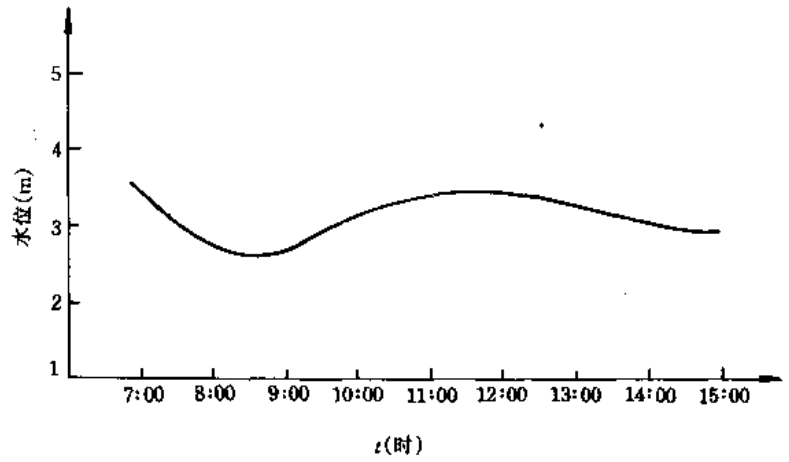


图 8－11

应当注意，在沿海及受潮汐影响的河段应根据当地潮位预报，做好最高、最低潮水位的观测工作。当测区有显著的水面比降时，应分段设立标尺进行水位观测，按上、下游两个标尺读得的水位与距离成比例内插，获得测深时的水位。

在测点上测量水深的时刻不会恰好等于标尺上测水位的时刻。这时可通过内插求得任意时刻的瞬时水位；也可根据所绘的水位－时间关系图，用比例尺在上量取任一时刻的瞬时水位。

下面介绍水底高程 H 的计算：

如图 8－12 所示，设某时刻 t 的瞬时水位为 H_t，标尺零点高程为 H_0，测得瞬间水平面在标尺上的读数为 h_t，则：

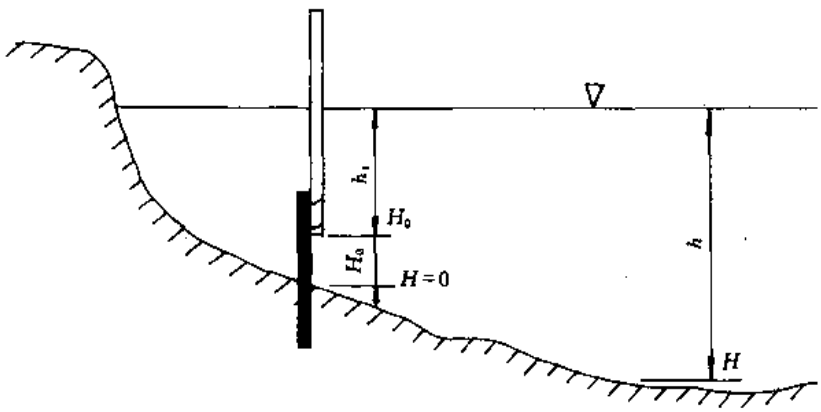


图 8－12

$$H_t = H_0 + h_t \tag{8-9}$$

水底的高程 H 为：

$$H = H_t - h \tag{8-10}$$

式中 h 为水深。

三、碎部测量

水下地形测量的平面和高程控制系统、图幅分幅、等深（高）距一般应与陆上地形测量一致、互相衔接。但测区范围较小时，也可自由分幅。

测深点点位相对于邻近图根点的点位中误差，一般在图上不应超过±1.5mm，在开阔平坦水域、水深超过 20m 的水域和 1∶5000 测图时，可放宽到 2mm。

测深前必须了解测区水域的水下障碍物及水文气象资料，工作中应注意安全。当风浪引起测深区记录纸上回声线的起伏变化：在内陆水域大于 0.3m、海域大于 0.6m 时，应暂停工作。

测深点一般按横断面布设，断面方向应与水流方向（或岸线）垂直。断面间距一般为图上 2cm，测点间距一般为图上 1cm。测深点的定位与测深应同时进行。测深点的定位可根据测区情况、测图比例尺及设备条件选用适当的方法。用于测深点定位的测站点，不应低于图根点精度。

第五节　水下地形测量内业

外业工作结束后，即可开始内业整理。内业整理工作的内容包括以下几个方面：

（1）将野外观测成果汇总，逐点进行检查。对于遗漏或不合格的成果，应及时组织补测。

（2）在实测水深值上加上各种改正数，求得绘图所需的水底高程值。

（3）在图纸上展绘控制点，然后展绘各测点位置，并注记相应的高程。

（4）勾绘等高线或等深线。

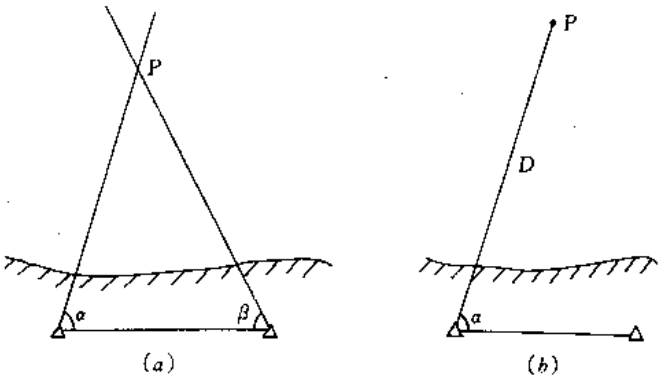


图 8－13

上述第二项内容，已在上节讲过；等高线或等深线勾绘在测量学中学过。所以这里着重讨论一下测点位置的展绘。

测深点内业展绘，应根据外业定位方法、测图比例尺、测区大小及测深点距测站的远近，选用辐射线格网法、圆弧格网法、三杆分度仪法、量角器法、重叠法或解析法。

用图解法展点时，常用前方交会法和极坐标法，如图 8－13 所示。利用带有直尺的量角器可以方便地根据前方交会法观测值（图 8－13a）和极坐标法观测值（图 8－13b）求得测深点 P 的平面位置。

在无线电定位系统中，若采用圆系统定位时，测出测船 P 到两个岸台的距离 D_1 和 D_2 后，就可在预先绘制好的图板上（图 8－14）确定船的平面位置。

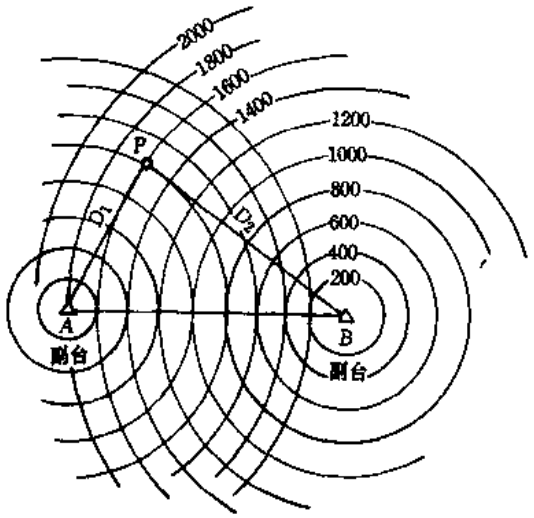


图 8－14

用双曲线系统定位时，也需要事先按照一定距离差的间隔，画出相应双曲线网络图（图 8－15）。实测时，根据每次测得的距离差在图板上用内插法求得待定点位置。

用图解法展点时，不需作业人员计算，比较直观。但图解法精度较低，作业效率也低，所以现在已逐渐被解析法所代替。所谓解析法，就是根据野外的测量数据，用解析公式直接计算待定点的平面坐标的一种方法。由于解析法精度较高，所以随着计算机技术的普及，也越来越受到作业人员的欢迎。

测深点的平面位置展绘后，应立即注上水底高程。按下来的工作就是勾绘等深线或等高线。等深线的勾绘，是水下地形测量中的最后一步工作，也是最重要的工作之一。当展好测深点后，便可根据这些点的高程勾绘等深线或等高线。水底点的高程，未必与勾绘的等深（高）线高程恰好相同，因此需用内插法求得等深（高）线通过点的位置，从而勾出等深（高）线。插求点的高程相对于邻近图根点的高程中误差，不应大于表 8－2 的规定。

图 8－16 为 1∶2000 水下地形图的一部分。

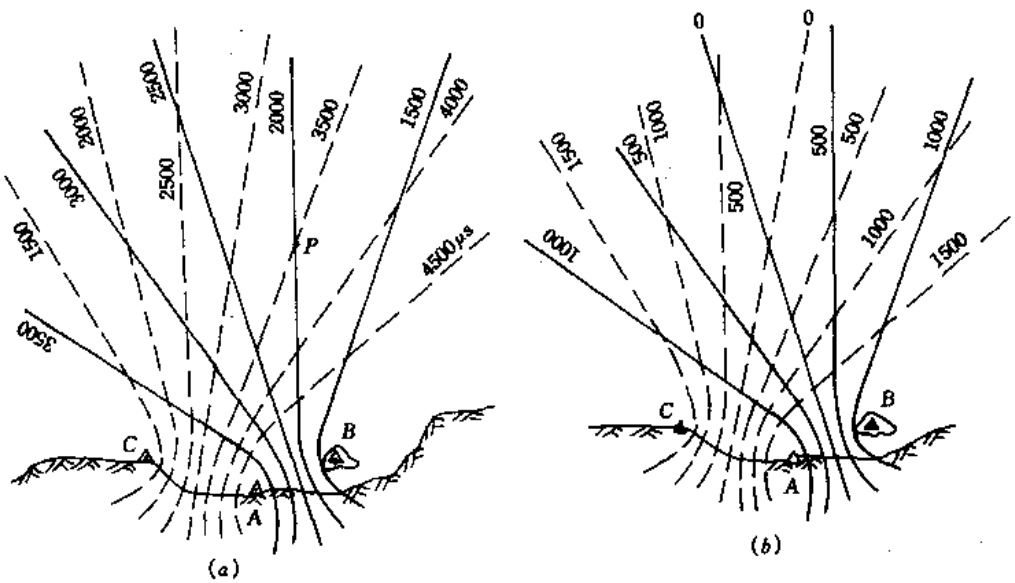


图 8－15

第九章　特种工程测量技术与仪器

在工程测量领域，除使用通用的测量技术和仪器外，还往往要运用一些特殊的技术和仪器设备。它们的内容十分丰富，本章只介绍其中的一部分。

第一节　激光技术在工程中的应用

长期以来，许多测量工程都利用光学仪器来完成，其精度和效果较差。激光器问世以后，人们利用它亮度高、方向性好、单色性强的特点，制成了各种激光仪器用于测量工作，取得了较好的效果。

激光器的种类较多，工程测量中最常用的是氦氖（He－Ne）激光器。这种激光的波长为 0.6328μm。激光器可以单独使用，但多数情况下是与其它光学元件配合使用，构成不同用途的激光测量仪器。

一、激光扫平仪

激光扫平仪能给出一个激光水平基准面，它配合普通水准尺或接收器，能在地面标出一组高程相等的点或一个高程一定的地平面（或斜面）。激光扫平仪主要由激光准直器、转镜扫描装置、安平系统和电源等部分组成。激光准直器竖直地安置在仪器内。当激光束沿五角棱镜旋转轴 OO' 入射时，经折射后的出射光束为水平光束（图 9－1）。当五角棱镜在电机驱动下作水平方向旋转时，出射光束构成激光平面，可以同时测定扫描范围内任意点的高程。目前常见的这类仪器有两种类型，一种是手动安平激光扫平仪，如西门子公司的 TT－80 型建筑激光扫平仪、北京市建筑工程研究所生产的手动安平激光扫平仪；另一种是自动安平激光扫平仪，如西门子公司的自动激光仪、美国生产的 45 型扫描式自动激光扫平仪。

图 9－2 为日本拓普康公司生产的 RL－H 型自动安平激光扫平仪。该仪器自动安平范围为±10°，精度为±10″，工作范围（直径）为 700m。为适应恶劣的野外环境，该仪器的设计是防尘和防水的。

激光扫平仪可以用于建筑装饰测量，也可用于工业场地的平整测量。例如，用激光扫平仪可以测定待平整场地方格网各桩点的高程，由于激光扫平仪发射的是激光基准平面，所以可多人立尺，快速测量各桩点的高程，并计算出土方量。在采用人工平整工业场地时，可不用标桩控制填挖尺寸，而是用激光扫平仪来控制。此时将仪器安置于施工场地旁边，一般是安在高于场地设计高程的地方，然后根据水准基点测出激光平面的高程，并计算激光平面高程和设计高程之差。施工工人根据此高差在水准尺上做出标记。这样，工人可以随时检查地面填挖的高度。如果激光平面与尺上的标记重合，证明场地正好为不填不挖的设计高度。当采用推土机平整时，可以由一个测量工人配合，随时用标尺测量地面的高程，指挥推土机的填挖工作。这时因不受标桩的限制，能提高施工的质量和速度。

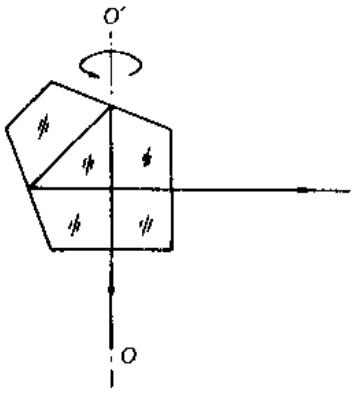


图 9－1

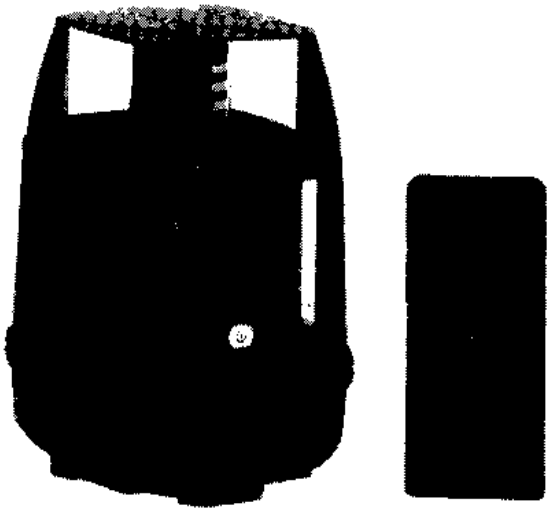


图 9－2

二、激光准直测量

对于长距离直线定线、大型设备的安装、分段建造的万吨巨轮的合线等工程，往往要求很高的定线精度。这就需要借助于良好的准直工具，激光准直就是其中的方法之一。激光准直根据其测定的偏离值的方法不同，可分为激光经纬仪准直与波带板激光准直。下面介绍的是波带板激光准直装置。

波带板激光准直系统由三个部分组成：激光器点光源、波带板装置和激光接收器。如图 9－3 所示，A、B 为基准线的两端点，A 点安置激光器点光源，B 点安置激光接收器。在 A、B 之间需要测定偏离值的观测点 C 上安置波带板。

激光通过波带板后在接收器上成像（十字丝或光点），通过接收器可以准确地探测出波带板偏离直线的距离（偏离值），使直线的定线精度大大提高。同样，若欲将直线 AC 延长，则可根据 B 处接收器上读出的偏离值，移动 B 点位置，使 A、C、B 三点严格在一条直线上，实验表明，用这种装置测定偏离值的精度，可达测线长的百万分之一。

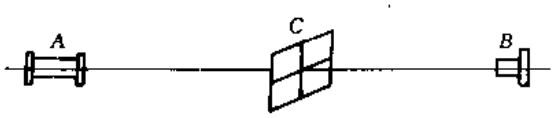


图 9－3

下面是波带板激光准直系统在大坝水平位移观测中的应用示例。

1. 布设方案

波带板激光准直测定大坝水平位移，仪器可布设在坝内廊道和坝顶位置。测线的两端分别安置激光点光源和目视或光电接收器。在测点上安置波带板。定期观测各测点偏离基准线的偏离值，即可得出各测点的水平位移。

基准点的布设分三种情况：当观测端点能直接建造在基岩上时，观测端点便是固定基准点；当观测端点不能直接建造在基岩上，但可在观测端点处布置倒垂线时，则观测端点为工作基准点；如果上述二种情况都不能满足，而在测线中间某一位置布设倒垂线，则把倒垂线处的测点作为工作基准点，但两工作基准点间的距离应不小于三分之二的整测线长

度。测点的布置应使离点光源最近的一个测点到点光源的距离不小于整测线长度的十分之一。所有测点应尽量接近点光源中心和接收器中心的连线，特别是靠近光源的测点，这样接收器的测量范围可以得到充分的利用。

2. 观测方法

激光准直测定大坝水平位移可克服大气湍流对观测精度的影响。采用自动找中光电接收器作为观测仪器，其观测步骤如下：

(1) 点亮激光管，将激光束调整到视线方向上，以能均匀照满波带板为限。

(2) 安置波带板，当采用对中杆安置波带板时，应使波带板中心和测点中心在同一条铅垂线上，波带板面和视线大致垂直。

(3) 在接收端进行观测，用手动钮和手动机构使探头大致对好光点，便可让仪器自动跟踪。当电表指针在零位附近来回摆动时，即可记录读数，取 10 次观测的平均值。

利用波带板可以把几百米以外的点光源经聚后形成直径约一毫米的点。因此即使在接收屏上用肉眼判断其中心位置，精度也很高。实验表明用这种装置准直，测定偏值的精度可达测线长的 $1/10^6$。

三、激光铅垂仪

激光铅垂仪又叫激光垂线仪，它是一种能使激光束沿铅垂线方向发射的指向仪。图 9—4 所示为一种国产激光铅垂仪的示意图。其竖轴是一个空心筒轴，两端有螺扣连接望远镜和激光器的套筒，将激光器安在筒轴的下端，望远镜安装在上端，构成向上发射的激光铅垂仪。也可以反向安装，成为向下发射的激光铅垂仪。

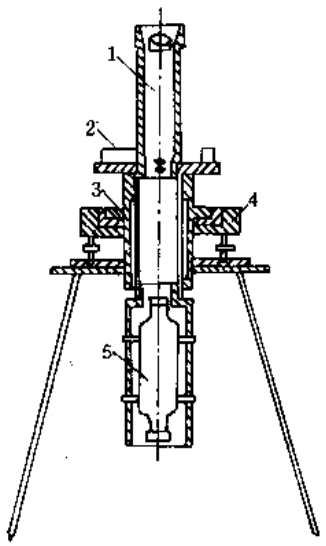


图 9—4

1—发射望远镜；2—水准管；3—竖轴；4—基座；5—氦氖激光管

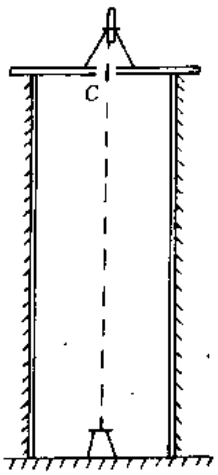


图 9—5

仪器工作之前，应首先对“激光束垂直于水准管轴”进行检验较正。检验好的仪器整平后，发射的激光就是铅垂的。

这类仪器用于建造烟囱、高层楼房和开掘竖井时指示铅垂方向。图 9－5 为竖井开掘图，C 点为井筒中心位置，将激光铅垂仪安装在地面的 C 点上，在井下放置的激光接收靶上的激光光斑，即为地面 C 点的铅垂投影位置。

上述定位仪器，由于激光器件还存在某些缺陷，大多数还只能应用于较低精度的施工放样测量，且应用尚不广泛。但是，由于激光的直线性能好，亮度高又是可见光等优点，随着激光技术的发展，在不久的将来，这种仪器会得到广泛应用。

第二节　平行光管技术在工程中的应用

平行光管（又称准直管）是一种能够给出平行光束的光学仪器。它能形成一个无穷远的像，作为被测定系统的物，用来代替室外无穷远处的目标。图 9－6 是平行光管结构原理示意图。

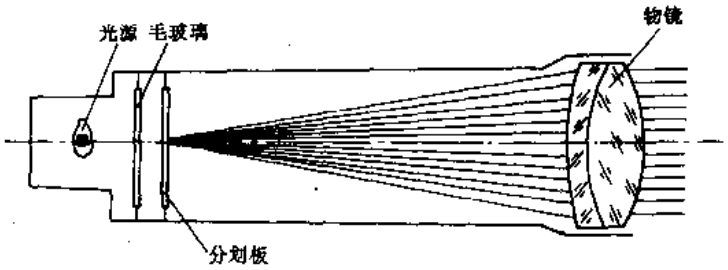


图 9－6

光源发出的光经毛玻璃后成为漫射光，照亮分划板。分划板是一块位于物镜的焦平面上的平板玻璃，朝物镜的这个面上刻有许多用途和形状不同的分划线。光线通过分划面射到物镜上，经物镜折射后形成平行光束发射出来。

简单的平行光管就是十字丝固定在物镜焦面上的镜管，所以测量望远镜可以被看作是平行光管。

在平行光管焦面上放一个十字丝，后面用灯光照明。这时十字丝中心就可作为一个发光点。我们称十字丝中心与物镜光心的连线为平行光管的视准轴。当测量望远镜十字丝中心照准平行光管十字丝中心时，两个视准轴必定相互平行。

这时有两个特点必须注意：

(1) 即使平行光管的物镜离测量望远镜很近，在盲区之内，由于测量望远镜接收平行光后能成像于焦平面上，所以仍能清晰地看到平行光管里的虚像，仍可以精确地瞄准。换句话说，把平行光管作为目标瞄准时，没有盲区的限制。

(2) 如果把测量望远镜平移一小段距离（上下或左右）。只要平行光管物镜的出光瞳与测量望远镜的进光瞳有一部分重合，仍可以瞄准，而且瞄准后两个视准轴仍平行。

这个特点告诉我们，照准平行光管的十字丝只能实现两个视准轴相互平行，而不能保证它们相互重合。例如，若需要把室外 AB 边的方向经走廊传递到室内 CD 边去（图 9－7），中间有两条边（QR 和 SC）很短，如像导线测量那样测量转折角，则仪器和目标对中误差的影响将很大。设 $S_{QR}=2\text{m}$，采用三联脚架法后，对中误差为 0.1～0.2mm。则由此引

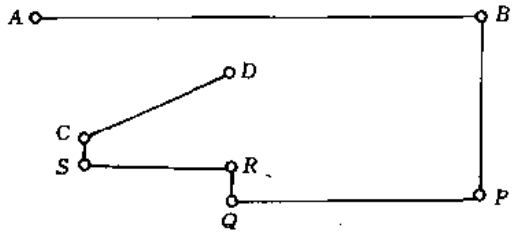


图 9—7

起的方向误差可达 10″～20″。

这时可采用下述方法，使方向从 PQ 边较精确地传递到 RS 边上去，避开 QR 短边的不良影响。

在 Q、R 两点上同时架设经纬仪。P、S 点上放觇牌。把 Q（或 R）点上的经纬仪的望远镜按某一远目标调焦，然后粗略地对准 R 点上的经纬仪的横轴中心，并在其目镜后放一灯光，以照亮十字丝。R 点上的经纬仪通过 Q 点上仪器的物镜，去瞄准后者的十字丝。这时由于两个望远镜没有调焦至无穷远，所以会感到成像不太清晰。微动两架望远镜的调焦钮，一直到十字丝十分清晰为止。然后精确瞄准，即让两根视准轴相互平行。这时双方在各自的水平度盘上取读数。

然后分别瞄准 P 或 S 上的觇牌并取读数。从而可分别获得两个转折角。用这两个转折角的“和”把方向角从 PQ 边传递给 RS 边，将避开短边两端对中误差的不良影响。

如果需测量几个测回时，由于每次观测只能使两视准轴相互平行，而不能保证两视准轴相互重合，所以单个角各测回的结果之间无法比较。只有把两个角值取和，才可以在不同测回间进行比较、检验。

同理，可以用这种方法通过其它短边实现方向角的精确传递。这种方法在室内进行某些精密工程测量时效果很好。

第三节　垂线和引张线技术

一、垂线

1. 垂线技术

垂线是测量实践中最常用的基准线之一。由于垂线代表着重力矢量方向，其量值非常稳定，而且在实践上非常容易复现，所以在测量工作中，常以垂线作为测量基准线。如在煤矿生产中所进行的竖井联系测量工作，用的就是正垂线。垂线技术广泛应用于大坝等建（构）筑物的变形监测工作。

垂线分正垂线和倒垂线两类。正垂线是上端固定而下端系一重锤的不锈钢丝（图 9—8）；倒垂线是下端固定而上端系以浮子的不锈钢丝（图 9—9）。如果没有外界干扰，钢丝受重力或浮力作用而伸直，使钢丝与当地的铅垂线方向完全重合。

根据经验，非接触式正垂线的垂球质量计算如下：

$$M \geqslant 20\ (1+0.02L) \tag{9—1}$$

式中　M 为重锤质量（kg）；L 为正垂线长度（m）。

倒垂线的浮力计算如下：

$$F=200\ (1+KL) \tag{9—2}$$

式中　F 为浮力（N）；L 为倒垂线长度（m）；K 为系数，一般取 $K=0.01$～0.05。

2. 垂线结构

正垂线由悬挂装置、固定束线装置、活动束线装置、不锈钢丝、重锤、油桶、观测台等部分组成，其安装和使用方法类似于矿山测量竖井联系测量时的单重稳定投点。

倒垂线由浮体组、不锈钢丝、锚固点和观测台等部分组成。

利用垂线可以监测高耸建筑物及大坝等的倾斜和挠度。

3. 垂线观测

如图 9—10 所示，设在大坝体内、竖井或宽缝中悬挂了一根垂线，上端的 A 点为固定点，在 B、C……处的坝体中有观测点。若坝体倾斜或挠度有变化，则观测点与垂线之间的坐标差也会有变化。观测这些变化量（两期观测值之差），就可了解坝体的倾斜度和挠度变化的情况了。



图 9—8

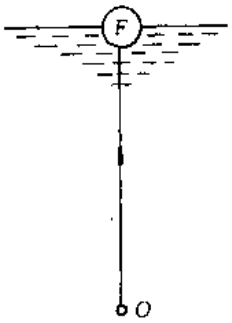


图 9—9

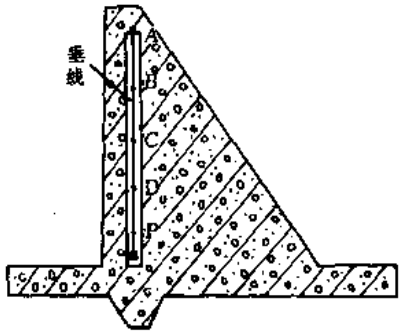


图 9—10

那么，如何测量垂线相对于观测点的坐标差呢？一般是使用垂线观测仪进行观测。用于测量垂线与仪器基座之间相对位移的仪器称为垂线观测仪。由于垂线非常稳定可靠，作为测量参照物十分理想，所以以垂线为测量对象的仪器已有许多年的发展历史。一个好的垂线观测仪必须能从钢丝观测点上分离出二维 x、y 或者三维 x、y、z 的位移量。

垂线观测仪的型号很多，下面简单介绍武汉地震研究所研制的垂线坐标观测仪。如图 9—11 所示，仪器的光心瞄准部分集中在照准部，安有两个进光口，一个在正面，另一个在侧面。由于仪器光路中有一组称为“别汉棱镜”的作用的结果，使得来自侧面垂线的像在十字丝面上呈水平状态。

仪器的上部可以相对于基座作二维（即 x、y 两个方向）平移。如果十字丝的竖双丝“夹”住了垂线正面的像，横双丝“夹”住了垂线侧面的像，则表明仪器已从两个方向“瞄准”了垂线。照准部相对于仪器中心的平移量，可以在基座上的两根标尺上读得，这就是所求的垂线相对于仪器中心的坐标差。

在实际工作中，如果 A 点为垂线的悬吊点，B、C…P 为观测点，既可以在每个观测点上都架设垂线观测仪，也可以用一台垂线观测仪分别架设在各观测点上进行观测，这要视具体情况而定。

垂线观测仪也同样可以用于观测倒锤的垂线相对于地面点的坐标差。

二、引张线

在一根不锈钢丝的两端施加水平拉力引张后自由悬挂，则它在垂直面内呈悬链线形状，

其在水平面上的投影应是一条直线。这条直线可作为准直测量的基准线。利用这条直线可以测定观测点的偏离值，而且不受旁折光的影响。

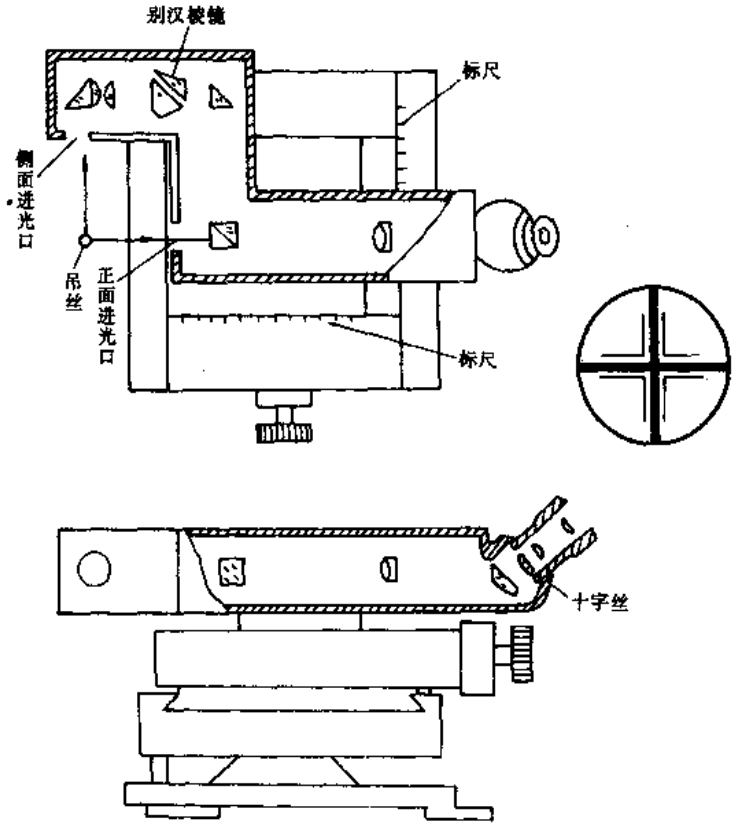


图 9—11

引张线的两端所通过的固定的端点，即是基准线的两个端点。当两端点之间距离较大，会引起引张线的垂曲度过大，此时，引张线在干扰力的作用下会产生系统性的偏差或处于不断的摆动之中。为了解决这个问题，通常采用在引张线中间设置若干个浮托装置。浮托在液体中可自由浮动。这样，既可使垂径大为减小，还能保持整个线段的水平投影仍为一条直线。

引张线的装置由端点、观测点、测线（即不锈钢丝）等部分组成。

在观测点上的标尺，系由不锈钢制成，其长度约 15～20cm，标尺上的最小分划为 1mm。标尺固定在槽钢面上，槽钢埋入大坝廊道内，并与之牢固结合。当坝体发生移动时，也带动槽钢上的标尺移动，这样，观测标尺与基准线（引张线）之间的相对位移量，就可测量坝体的移动量。

为了便于观测，引张线各测点的标尺应基本上位于同一高程面上，尺面应水平，并让刻划线平行于引张线。

由于引张线的两个端点是固定不动的，所以可以认为引张线为固定的基准线。在安装时已使各观测点上的标尺与坝体稳固地连接在一起。因此，在各变形监测周期内，钢丝在标尺上的读数变化值，就是该观测点的位移值。因此，观测引张线，实质上就是观测钢丝

在标尺上的读数。钢丝在标尺上的读数方法很多，如可用垂球线作为传递工具，也可用反向光学对中器等。这里介绍一种读数显微镜法，这种方法是利用带有测微分划线的读数显微镜进行的。测微分划线最小刻划为 0.1mm，可估读到 0.01mm。

由于通过显微镜后钢丝与标尺分化线的像都变得很粗大，所以采用由测微分划线量取标尺分划（靠近钢丝的一根分划）左边缘与钢丝左边缘的距离（a），然后再用测微分化线量取它们右边缘之间的距离（b）。此两距离的平均值即为标尺分划中心与钢丝中心的距离，将它加到相应的标尺整分划值上即量得钢丝在标尺上的读数。

图 9—12给出了观测情况与读数显微镜中成像情形。如图中，$a=0.30$mm，$b=1.40$mm，故标尺刻划中心与钢丝中心之间距离为 $(a+b)/2=0.85$mm。因为相应的标尺整刻划为 72mm，因此钢丝在标尺上的读数应为 $72+0.85=72.85$mm。

通常观测是从靠近端点的第一个观测点开始读数（读一次），依次观测到测线的另一端点，为一个测回，每次观测三个测回。各测回之间应轻微拨动中间观测点上的浮船，使整条引张线浮动，待其静止后，再进行下一测回观测。各测回间互差的限差为 0.2mm。

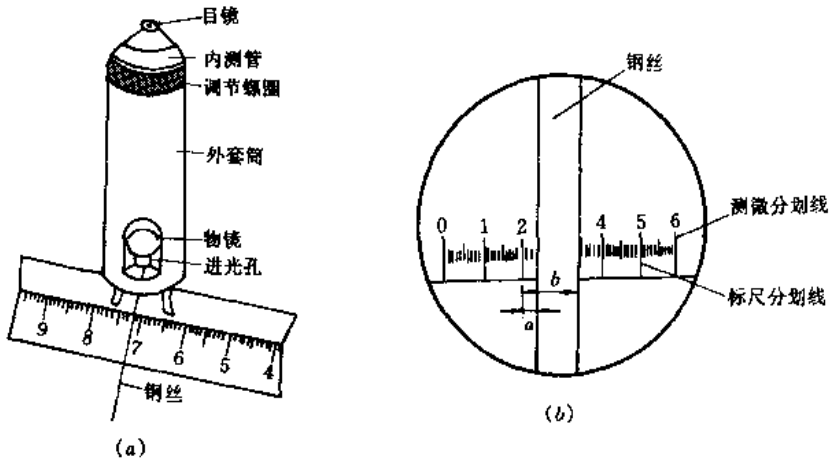


图 9—12

第四节　倾斜仪的应用

倾斜仪是用于观测建（构）筑物倾斜度的变化或岩体内水平位移的仪器，种类较多。下面介绍其在工程测量中的主要应用。

一、水平倾斜仪

测定建筑物在水平方向的倾斜，称为水平测斜。水平测斜所用的仪器，称为水平倾斜仪。这里介绍一种气泡式倾斜仪。

气泡式倾斜仪由一个高灵敏度的气泡水准管 e(图 9—13)和一套精密的测微器组成。测微器中包括测微杆 g，读数盘 h 和指标 k。气泡水准管 e 固定在支架 a 上，a 可绕 c 点转动。a 下装一弹簧片 d，在底板 b 下有置放装置 m。将倾斜仪安置在需要的位置上以后，转动读数盘，使测微杆向上（或向下）移动，直至水准气泡居中为止。此时在读数盘上读数，即

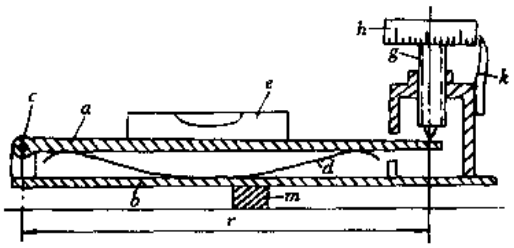


图 9－13

可得出该处的倾斜度。

我国研制的气泡式倾斜仪，灵敏度为2″，总的观测范围为1°。气泡式倾斜仪适用于观测较大的倾斜角或量测局部地区的变形，例如测定设备基础的平台的倾斜。

为了实现倾斜观测的自动化，现在还生产了一种电子水准器。它是在普通的玻璃水准器的上、下装上三个电极所形成的一种差动电容器装置。这种电子水准器可固定地安置在建筑物或设备的适当位置上，并能自动地进行倾斜观测，所以非常适于作动态监测。当测量范围在200″以内时，测定倾斜值的中误差可在±0.2″以内。

二、测斜仪

测斜仪是一种有效而精确地测量土层及岩体内部水平位移和变形的工程测量仪器，既可用于岩体内部的水平移动监测，也可用于坝体内部的水平移动监测。

1. 测斜仪简介

测斜仪分为活动式和固定式两种。固定式系固定埋设在结构物内部的固定点上；活动式在坝体内埋设有导槽的测斜管，间隔一定的时间将测头放入管内沿导槽滑动，测定斜度变化，计算水平位移。

测斜仪是由测头、测斜管、电缆和测尺以及读数仪表四个部分构成。活动式测头可连续地测定整个深度的水平位移变化，能长久地反复使用并便于检修校正。测斜管是有四个相互垂直导槽的铝合金管或软质、硬质塑料管。每节套管长1.5～3m，可测定200m深度内的位移。套管倾斜角范围可达30°，但倾斜度在7°以内时，观测精度较高。

这种测斜仪的原理是根据摆锤受重力影响为基础测定以摆锤为基准的弧角变化。当土体或岩体产生位移时，管子随土体或岩体同步位移，测管的位移量即为土体的位移量。放入管内的测头，测出的量是各个不同分段点上测斜管道的倾角变化$\Delta\alpha_i$，而该段测管相应的位移增量为：

$$\Delta l_i = L_i \sin\Delta\alpha_i \tag{9－3}$$

式中 Δl_i——位移增量（mm）；

$\Delta\alpha_i$——倾角变化（rad）；

L_i——单位管长（mm）。

2. 测斜仪的埋设

活动式测斜仪的埋设仅是传感器测量导管的埋设。一是预埋设，在坝体还未堆积时设置测量管；另一种是常用的钻孔埋设。两种埋设方法都要求测管的底端必需固定在不动层内，如岩基或密实土中；宜设置在一个牢固的、无位移的参考点上。

为了埋设槽管，需按要求钻一个直径为100mm的孔。钻孔可采用泥浆护壁的方法，防止塌孔。钻孔的偏斜度控制在1°范围内。测管深度根据滑动土层的厚度来确定。为便于分析资料，其深度需进入稳定土层以内2～3m。

钻孔打好后，可按如下步骤安装测斜导管：

(1) 在现场采用边组装边下入的方法（逐根按照预先做好的对准标记和编号对接固定密封），将测斜管放入钻孔内。测斜管底部装有底盖，每个管接头和底盖都要密封，以防浆液渗入管内。

(2) 埋设时，应及时检查测斜管内的一对导槽，其指向是否和预计的岩体位移方向一致或与洞室轴线是否垂直，并应及时修正。然后用测头模型在下入钻孔中的测斜管内沿导槽上下滑行一遍，以了解导槽是否畅通无阻。

(3) 安装好的测斜管导槽转角应每 3m 不超过 1°，全长范围内应不超过 5°。安装时应及时采用测扭仪检查测斜管导槽的旋钮状况，以备整理观测成果时进行校正。

(4) 记录每一测斜管接头的深度，测定导槽方位，然后将测斜管固定。

(5) 测斜管下入孔内至预定深度后，即可向测斜管与孔壁之间的间隙由下而上逐段灌浆。为防止在灌浆时测斜管浮起，宜预先在测斜管内注入清水。

(6) 灌浆完毕拔管后，应将测斜管内冲洗干净，然后及时做好孔口保护装置，防止杂物掉进管内。

(7) 水泥浆凝固后，量测测斜管导槽方位、管口坐标及高程，并对安装埋设过程中发生的问题、处理措施及结果，要作详细记录。

(8) 要求水泥浆凝固后的变形性质及弹性模量与钻孔周围岩体相近，为此，应事先进行实验确定配合比。

3. 观测

观测可按如下步骤进行：

(1) 观测前，应进行二项检查，即：①测斜孔及导槽是否畅通的检查，办法是用模型侧头下入测斜管内沿导槽上下滑行一遍；②测读仪和测头检查。

(2) 测量方法是将测头插入测斜管内并缓慢下到孔底，一般先测可能出现最大位移的方向。测量由孔底开始，自下而上沿导槽全长每隔一定距离测读一次。每次测量时，应将测头稳定在某一位置上。量测完毕后，应将测头旋转 180°插入同一对导槽，按上述方法重复测量（两次量测部位要保持一样）。此时各测点的正反两读数值接近，符号相反。如果测量数据有疑问，则应及时补测。用同样的方法可测另一对导槽的横向位移。

(3) 测斜管初始值，应该是注浆凝固后，连续两次以上的读数的平均值。

(4) 观测间隔时间，可视具体情况而定。但当横向位移有明显增加时，应加密观测次数。

三、冻结孔测斜

在用冻结法掘进井筒时，因冻结孔在钻进过程中所穿过的地层不同和操作方面的原因，使得钻孔偏离设计位置。因此，必须随时掌握与控制钻孔偏斜情况。目前，冻结孔测斜的方法，主要有灯光测斜和陀螺仪测斜两种，这里介绍陀螺测斜。

上海地质仪器厂所生产的 JDT－2 型冻结孔测斜仪是一种新型的半导体化的测斜仪，它专门用在冻结法凿井时测量冻结孔偏斜。

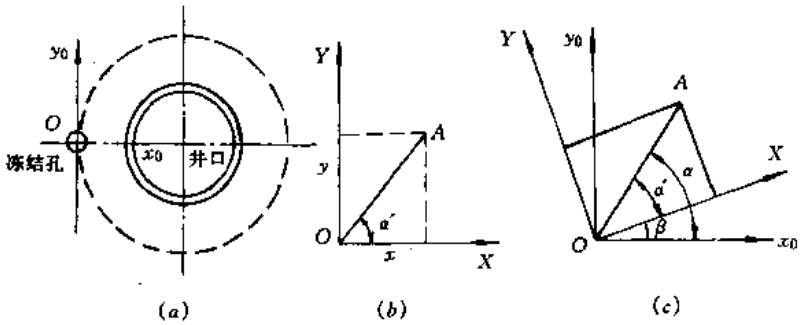
整个仪器由四部分组成，即半导体直流稳压器、半导体变流器、下井仪器和测量面板。

JDT－2 型陀螺测斜仪测量钻孔倾斜角度的方法，是把倾斜角分成两个相互垂直的分

量，此分量由仪器的测角传感器测出，两个分量的合成量即是钻孔的倾角。但是，要得到真正的方位角，还必须分清两个坐标系统。

1. 冻结孔坐标系

以钻孔口为坐标原点，以原点和井筒中心的连线为 x_0 轴。钻孔偏斜方向正对 x_0 轴时，其方位角为零，而逆时针方向旋转时，方位角增大，如图 9－14 所示。



(a)　(b)　(c)

图 9－14

2. 仪器坐标系

仪器坐标系是由陀螺定位的。下井仪器内除陀螺外，还有两个相互垂直的摆锤轴（X 轴和 Y 轴）。每个摆锤上都有一个测角传感器，分别测定钻孔倾角在 X 轴和 Y 轴上的两个分量，如图 9－14 所示。如果仪器测得钻孔倾角的分量为 X 和 Y 时，则 OA 代表倾角的大小，α 是方位角。

因为冻结孔坐标系统是固定不变的，而仪器坐标系统则每次测量时要发生变化。在一般情况下，这两个坐标系统是不重合的，它们相差一个角度 β，β 称为仪器的方位角。由图 9－14 中可看出，钻孔的真正方位角 α 是仪器测得的方位角 α' 和仪器的原始方位角之和。

下井仪器是整个仪器的心脏。它的作用是把钻孔倾斜及方位转变成为电信号，通过测井电缆传到地面。由下列三部分组成，如图 9－15 所示。

（1）定心脚。借助上下两个定心脚将仪器支撑在冻结管（或测斜管）中，以保持仪器中心线与冻结管中心线严格一致，保证测量精度。

（2）保护管。是由厚 5mm 的无缝钢管制成，上下有密封装置，能经受住 10MPa 大气压力。

（3）活动部分。它是一个框架，上下各有一个轴承在固定框架内，可作 360°的自由转动。内有 X 轴测角传感器和摆锤，Y 轴测角传感器和摆锤，定向框、定向陀螺、光电开关、集电环、和卸荷电机的减速齿轮等组成，如图 9－16 所示。

3. 仪器的主要部件和作用原理

1）测角传感器

测角传感器是将转角变成电压的元件，由定子、转子和线圈组成，如图 9－17 所示。定子固定在活动框上，随仪器倾斜而相对转子转一个角度。转子固定在摆锤轴上，因此，它的位置由于摆锤作用而保持不变，从而给出铅垂线标准。当定子相对转子在对称位置时（相当于仪器铅垂），输出电压为零。当二者间有相对转动时，输出端即出现和转角（即仪器倾角在此轴上的分量）成正比的信号。定子相对转子正转 α 角与反转 α 角，输出信号数值

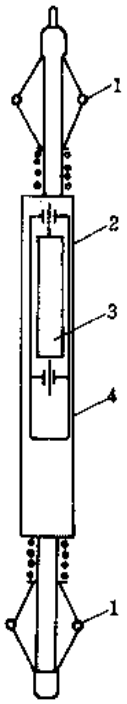


图 9－15

1—定心脚；2—保护管；
3—活动部分；4—固定框

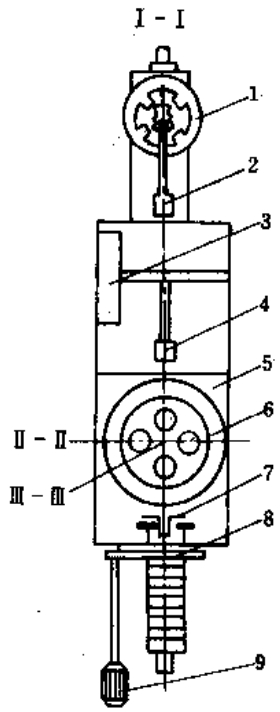


图 9－16

1—x 轴传感器；2—x 轴摆锤；3—y 轴传感器；
4—y 轴摆锤；5—活动框架；6—定向陀螺；
7—光电开关；8—减速齿轮；9—卸荷电机

虽相同，但相位差 180°，可以通过相敏整流将它识别出来。

2）定向系统

在每一个冻结孔测量前要测出仪器的方位角，也就是先要知道仪器坐标的原始位置，并且要保证在仪器下井测量过程中，这个原始方位不变。

由于仪器在钻孔中下放和上提时，不可避免地在Ⅰ轴上出现“干扰力矩”，这样就可能使Ⅰ轴转动，从而使原始方位发生变化。为了使原始方位不变，是利用了 21500r/min 的高速旋转三自由度陀螺。三自由度陀螺有保持其旋转轴方位不变的特性，故当Ⅰ轴受到干扰力矩时，并不转动而保持原来的方向。这就是陀螺定向的原理。

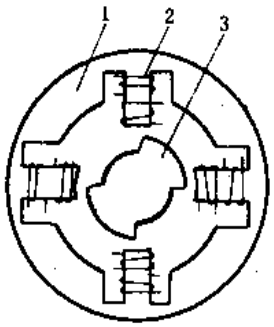


图 9－17

1—定子；2—线圈；3—转子

同样，在Ⅱ轴上有干扰力矩时，Ⅰ轴也要产生进动，称之为漂移，因而出现方位误差。但因Ⅱ轴是“藏”在里边的，它的两个轴承也是经过精细挑选，轴上承担重量也比Ⅰ轴小，因此可以使Ⅰ轴的漂移控制在允许范围内。

3）测量和绘图

测量时，将下井仪器竖立在被测冻结孔的孔口，使它向井筒中心方向倾斜约 4°左右。在测量面板上读出在 x 轴和 y 轴上的倾角的分量，此即仪器坐标系的原始方位。

慢慢扶直下井仪器，将仪器放入冻结孔内。下放时必须缓慢，切忌用力过猛或倾角超过10°。每隔10m测一点，仪器上提时复测一次，以便校正。若某点上测与下测的差值较大时，需将仪器移动100～200mm再测一次，取两者相近之值。

仪器提出后，再按前述的方法复测仪器的原始方位。然后分别求出下放和上提时每点所测 x 和 y 的平均值。

取得上述数据之后便可绘制钻孔偏距图。绘图方法如下：在坐标方格纸上先绘出孔口 x 和 y 的原始方位坐标点 A，OA 线的指向是井筒中心方向，如图9—18所示。将在不同深度测得的 x 和 y 的平均值用逐点叠加的方法画出 B、C、D 等点。连接各点即得钻孔倾斜的曲线。图9—18中 C 点是20m深处的点，所以 OC 即代表20m深处测点的倾角，而其方位角是指由 OA 线逆时针至 OC 的角度 α。冻结孔是每10m测一次，其偏斜距离应为10m与倾角正切的乘积。但倾角一般都较小，正切函数1′之值为0.3‰，则每1′的偏斜距离为3mm。如果在绘图时，以每一小方格代表1′，这样，只要以1∶3的比例尺量一下 OC 的长度即可得出 OC 处的偏斜距离了。有了不同深度的偏斜距离和偏斜方位即可绘制冻结壁图。

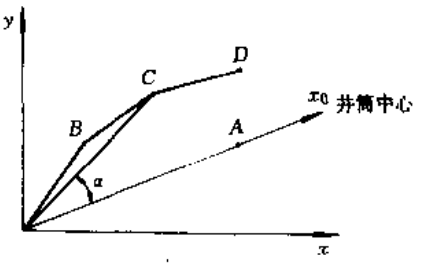


图 9—18

第五节　流体静力水准测量简介

流体静力水准测量是利用静止液面原理来传递高程的方法之一，在我国已有数千年的发展历史。这种测量方法不要求两点之间通视，容易克服障碍物的阻挡，还可以实现自动遥测。在大坝及各种工程建筑物施工及沉陷与倾斜观测中得到了广泛应用，效果较好。

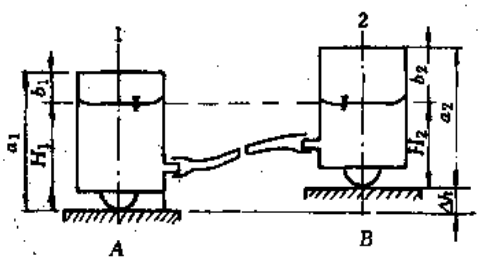


图 9—19

流体静力水准测量的基本原理可用图9—19予以说明。图中两容器1与2分别安置在待测的平面 A、B 上，两容器间用软管连接，内装均质液体，则两容器中液体的自由表面处于同一水平面上。因此 A、B 两平面的高差可用液面的高度 H_1 和 H_2 来计算：

$$\Delta h_{ab}=H_1-H_2$$

$$\text{或 } \Delta h_{ab}=(a_1-a_2)-(b_1-b_2)$$

式中　a_1、a_2——分别为两容器的高度（即零点读数相对于工作底面的位置）；

b_1、b_2——容器中液面位置的读数（即读数零点至液面的距离）。

由于容器制造的不完善，致使两个流体静力容器的观测头的读数零点不一致，产生差数 C（$C=a_2-a_1$），称为观测头零点差。可通过互换两容器的位置并进行两次读数来求取。而对于固定设置的流体静力水准仪，观测头零点差是无须考虑的，因为所有的后期观测都是以起始观测作为参照的。

一般的流体静力水准仪都必须有三个部分组成：①搁支点，其作是与被测对象接触；②

盛装液体的容器以及连接两容器的连通软管；③测微读数装置。

图 9－20 是采用目视接触法测定液面位置的流体静力水准仪，这是一种悬挂式水准仪，适于在室内进行流体静力水准测量，以监测建筑物的沉降及倾斜情况。

仪器的顶部有圆水准器 10，用下面的两个整平螺旋 9，可以使气泡居中，这时仪器处于垂直位置。测针 11 通过测微螺旋 12 使它和水面镜像相接触。螺杆的螺距一般为 0.5mm 或 1mm；测针升降的值一方面按指标线从分划尺 15 上读得毫米数，另一方面从测微分划盘 16 上读取毫米以下的小数。

在开始观测之前，要在观测的地方做出记号，并应埋设量测螺栓 4 和锚定螺栓 21。在埋设各个量测螺栓的地点之间，其高差应小于 100mm。

流体静力水准仪的种类较多，但其原理都是一样的，只是定位和测定液面位置的方法有所不同，既有传统的机械式的流体静力水准仪，也有采用自动装置的遥测仪器，其测量精度也从 1mm 到 0.01mm。

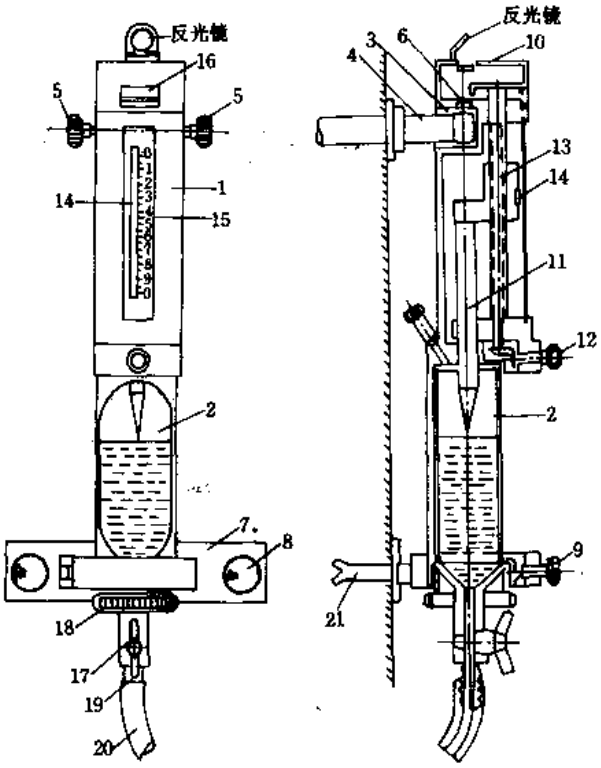


图 9－20

1—外壳；2—玻璃圆柱；3—凹槽；4—球式墙上水准点；5—固定螺栓；6—玛瑙片；7—下端支架；8—下端固定螺栓；9—整平用螺旋；10—圆水准器；11—测针；12—控制测针上下的螺旋；13—螺杆；14—螺母上的指标线；15—毫米分划尺；16—测微分划圆环；17—开关；18—密封螺帽；19—接管嘴；20—软管；21—锚定螺栓

流体静力水准测量中的误差，主要来自仪器误差和外界条件的影响两个方面。但后者是主要误差来源，在观测中应予足够的重视。

第十章　变形观测与数据处理

第一节　概　　述

一切物体都具有自己的几何形状，由于某种原因改变了原几何形状可称为变形。大到宇宙中的星球，小到我们生活的地球及其某个地区、城市、矿区，甚至一个具体的建筑物以至于某个构件都存在变形，如全球性的地极移动，地壳的板块运动及区域性的地震，城市地表下沉，矿区采空区的地表沉陷，山体、河岸及矿坑边帮的滑坡，建筑物基础下沉、倾斜，建筑物墙体的裂缝及构件挠曲等都是变形的表现形式。

变形总是存在的，但变形超过一定限度会给人们的生命财产带来危害。为了解变形，研究变形发生的原因、变形特征及其随空间与时间的变化规律，以便预测、预报、以避免或尽可能减少损失，必须进行变形观测。

研究变形是多学科的学问，但我们只限于工程建设范畴内的各种变形，可概括为地表沉陷，山体等滑坡，建筑物等局部性的变形。

产生变形的原因较多，大致有如下几种：

（1）地下水影响。地下水升降可对地表升降产生影响，上海、苏州等城市使用地下水得不到充分补充而导致地表下沉，因地下水定向流动可产生塌帮。有的地下水对建筑物基础的钢筋或混凝土有侵蚀性，年代过久可导致基础毁坏。

（2）地下开采影响。地下开采形成采空区，地表面失去支撑而产生塌陷。若地面上有建筑物，轻则倾斜裂缝，重则倒塌。

（3）地震影响。地震可导致地球表面大面积升降和平移。这在我国的邢台、海城、唐山等地震中得到证实。

（4）建筑物的荷重。众所周知，建筑物的荷重大，对地基的压力也大。当建筑物建造在具有一定压缩性的地基上时，从施工开始，随建筑物荷重增加，而地基逐渐被压缩以至于下沉，从而引起建筑物沉降。

（5）其它作用的影响。机械振动（如锻压车间锻锤的工作）会引起建筑物某部位下沉。旧建筑物附近增加新建筑，由于新建筑物修建对旧建筑物基础的扰动可引起原建筑物地基产生新的不均匀沉降；打桩可使附近地面隆起引起上面建筑物变形；高耸建筑物由于风震可产生摆动；日照及气温昼夜及季节变化将使单柱形建筑物产生扭转等变形；江河中水流大小变化会使拦江（河）大坝坝基压力发生变化，可引起坝体向下游方向位移、滚动等变形；水利枢纽修建，拦江大坝截流后上游水位升高，浸泡大坝上游两岸，会使堤岸滑坡；露天矿遇连续降雨会使不稳定的露天坑帮向坑下滑坡导致停产等。

既然变形超过一定限度会产生危害，就须通过变形观测的手段了解其变形，为此在变形影响范围以外设置稳定的测量基准点，在变形体上设置被观测的测量标志（称为变形观

测点，可简称为观测点），从基准点出发，定期地测量观测点相对于基准点的变化量，从历次观测结果比较中了解变形随时间发展情况。这个过程就是所谓的变形观测。

显然变形观测的一个重要目的在于实用，即检查各种工程建筑物和地质构造的稳定性，对变形进行几何分析，掌握规律，预测、预报变形，达到安全运营之目的。据有关资料介绍，对长江三峡地区进行了大面积的变形观测。1984 年，根据观测结果，对可能发生的滑坡做了正确的预报，使滑体上万余居民在滑体滑坡发生前一周撤离，避免了一场灾难的发生。变形观测的另一个重要目的是科学研究，对变形进行物理解释，验证工程建筑物的设计理论以及地壳运动的假说，改进工程建筑物设计，建立正确的预报变形的理论和方法。像地震的监测既要在断层附近建立监测网，测定长期应变累积形式和速率，以及地震前两个星期至半年的变化。也要设置跨越断层的固定的连续监测系统，以便发现地震前短期征兆（震前几分钟至几天内）。关于这方面研究，我国已积累了许多经验。又如矿山采空区地表移动观测工作，可以根据开采范围、开采深度、开采方法以及地质构造，预测地表沉陷范围、深度、时间和对建筑物的破坏程度，以便在沉陷发生前采取相应措施，避免和减少损失。矿山开采地表沉陷的研究取得的许多成果，在矿山生产方面起到了积极的作用。

根据变形观测的目的，可概括变形观测的具体工作由三部分组成：一是根据不同观测对象、目的设置基准点及观测点；二是进行多周期的重复观测（平面或高程，或是三维观测）；三是进行数据整理与统计分析。

不同的观测对象和变形观测目的，变形观测内容也不同。

当观测目的是为了知道地表下沉、建筑物基础下沉或倾斜，多采用高程测量方法，也称为垂直位移观测。

想知道被观测体水平位移情况，可采用观测点的平面位置坐标的方法，或建立稳定不动的基准线，观测被测目标相对于基准线的位移量。可称为水平位移观测。

对裂缝大小的测量可称为裂缝观测；想了解建筑物（或构件）弯曲程度的测量，称为挠度观测；对于滑体的观测，也称为滑坡观测，常采用三维观测，既观测其平面位移，也测定垂直位移。凡此等等。

随着现代化建设和科学的发展，变形观测的工作愈来愈重要。我国的变形观测工作虽然较经济发达国家起步晚，但也积累了许多成功的经验并研究出实用的理论。像上海地表沉陷监测与治理、葛洲坝水利枢纽变形监测、核电站等变形监测都为安全生产和科研提供了宝贵的资料。

变形观测具有如下特点：

（1）精度要求高。与其它测量工作相比，变形观测要求的精度高。用于实用目的，一般要求达到 1mm 的精度。这对于垂直变形还是比较容易达到，对于水平位移变形，有点偏高。用于科研目的可能还要高些。这个精度比地形测图以及一般工程放样都要高。

（2）重复观测。众所周知，一般城市测量控制网，非改造或补充一些点时，一般不再重复观测。而用于变形监测的网则必须相隔一定时间进行重复观测。只有重复观测，才能从坐标或高程值的变化中发现变形。

（3）严密地进行数据处理。一些变形体的变形大都较小，有的与测量误差有相同的数量级，故要采取一些办法从含有观测误差的观测值中分离出变形信息。在变形观测数据处理的论著中，有许多关于变形观测中含有粗差和系统差的鉴别、检验等论述。

（4）多学科的配合。变形测量工作不仅需要测绘学，尚需要土木工程和土力学及岩石力学等方面的知识。

（5）责任重大。变形观测责任重大，它需要一丝不苟地认真工作。由于变形量都是微观变化，更应从带有观测误差的观测值中，找出变形规律的蛛丝马迹，及时正确预报危害变形，使人们避免灾害，减少损失。

第二节　变形观测的精度与观测周期

国内外对变形观测的精度要求存在不同看法，但有一条比较统一，即变形观测的精度取决于变形观测的目的。为检查施工变形，其观测精度要求较低，以能反映施工变形大小为度；为确保建筑物安全的变形观测则精度要求较高，而为了某些科学研究目的则精度要求更高。国际测量工作者联合会（FIG）第十三届会议（1971年）工程测量组提出："如果观测的目的是为了使变形值不超过某一允许的数值而确保建筑物的安全，则其观测的中误差应小于允许变形值的1/10～1/20；如果观测目的是为了研究其变形的过程，则其中误差应比这个数值少得多。"

工程类型众多，要求各异，很难规定一个统一的精度标准。小于允许变形值的1/10～1/20的要求取值灵活，易被人们接受，对于很重要的工程人们还是愿意依当时能够达到的最高精度为标准进行观测。GB·50026—93《工程测量规范》将变形测量划分成四个等级，并规定了相应的精度指标，见表10—1。其精度指标为：①变形点水平位移中误差；②变形点垂直位移高程中误差；③相邻点高差中误差。

表10—1　变形测量的等级划分及精度要求

变形测量等级	垂直位移测量		水平位移测量
	变形点的高程中误差（mm）	相邻变形点的高差中误差（mm）	变形点的点位中误差（mm）
一等	±0.3	±0.1	±1.5
二等	±0.5	±0.3	±3.0
三等	±1.0	±0.5	±6.0
四等	±2.0	±1.0	±12.0

一、按允许变形值求观测中误差

变形测量工程采用表10—1中哪个等级，须通过建筑物的允许变形值推算求得。建筑物的允许变形值，一般由建筑工程规范中规定或由设计单位提出。表10—2列出了部分允许变形值。

下面举例说明变形点的观测中误差的求法。

例1：某大楼高90m，箱形基础长$L_1=35$m，宽$L_2=25$m，求沉陷观测点高程中误差。

查表10—2多层和高层建筑基础的倾斜允许变形值：

$$\Delta H_{12}=0.002$$

ΔH_{12}由下式计算得出：

$$\Delta H_{12}=\frac{H_2-H_1}{L} \qquad (10-1)$$

式中 H_1、H_2 分别为 1、2 的沉陷值（图 10－1）。

表 10－2 建筑物的地基允许变形值

变形特征		允许变形值	
		中低压缩性土	高压缩性土
工业与民用建筑相邻柱基的沉降差			
①框架结构		0.002l	0.003l
②砖石墙填充的边排柱		0.0007l	0.001l
③当基础不均匀沉降时产生附加应力的结构		0.005l	0.005l
砌体承重结构基础的局部倾斜		0.002	0.003
多层和高层建筑基础的倾斜	$H_g\leqslant 24$	0.004	
	$24<H_g\leqslant 60$	0.003	
	$60<H_g\leqslant 100$	0.002	
	$H_g>100$	0.0015	
高耸结构基础的倾斜	$H_g\leqslant 0$	0.008	
	$20<H_g\leqslant 50$	0.006	
	$50<H_g\leqslant 100$	0.005	
	$100<H_g\leqslant 150$	0.004	
	$150<H_g\leqslant 200$	0.003	
	$200<H_g\leqslant 250$	0.002	

注：①l 为相邻柱基的中心距离（mm）；H_g 为自室外地面起算的建筑物高度；②倾斜指基础倾斜方向两端点沉降差与其距离的比值；③局部沉降指砌体承重结构纵向 6～10m 内基础两点的沉降差与其距离之比。

则沉降值之差 $\Delta H_{差}$：

$$\Delta H_{差}=H_2-H_1=\Delta H_{12}\cdot L$$
$$=0.002\times 25=50\text{mm}$$

50mm 是 1、2 两观测点沉降允许差值，取允许值的 1/20，则沉降差值的中误差 $m_{差异}$：

$$m_{差异}=\frac{1}{20}\Delta H_{差}=\frac{50}{20}$$
$$=\pm 2.5\text{mm} \qquad (10-2)$$

由于 H_1 和 H_2 分别是两点两次观测高程之差，即

$$\Delta H_2=H_2^{(i)}-H_2^{(i+1)}$$
$$\Delta H_1=H_1^{(i)}-H_1^{(i+1)}$$

式中 i 为第 i 次观测。

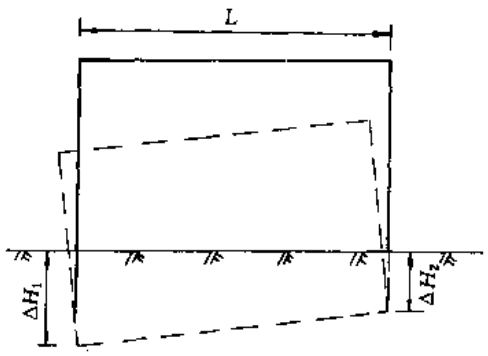


图 10－1

由此可求得两个观测点高程中误差 m_H：

$$m_H=\frac{1}{2}m_{差异}=\frac{2.5}{2}=\pm 1.25\text{mm} \qquad (10-3)$$

由表 10－1 可查得变形点的观测，取垂直位移观测为三等精度是适宜的。

例 2：某大楼为挖孔桩基础，地基为低压缩性土，相邻两沉降观测点距离 $l=7.8$m，求观测点的高程测量中误差。

由表 10－2 查得相邻观测点的差异沉降量的允许值 $\Delta H_{允}$：

$$\Delta H_{允}=0.02\times l=0.002\times 7.8=15.6\text{mm}$$

差异沉降观测值中误差取$\frac{1}{10}\Delta H_{允}$，则

$$m_{差异}=\pm\frac{1}{10}\Delta H_{允}=\frac{1}{10}\times 15.6=\pm 1.56\text{mm}$$

同一点沉降差是该点相邻两次所测高程之差，而差异沉降是相邻两观测点沉降值之差，则一个观测点一次测量高程中误差 m_H：

$$m_H=\frac{1}{2}m_{差异}=\frac{1}{2}\times 1.56=\pm 0.78\text{mm}$$

查表 10－2 该大楼沉降观测取二等精度较适宜。

二、变形监测网的精度设计

变形观测除在观测目标上设立变形观测点，还需设立基准点和工作基点，由基准点和工作基点组成监测控制网。若观测项目较少，基准点和工作基点兼用。对于同一变形观测工程，变形观测点能够达到的精度，除取决于监测网出发对观测点的测量精度 $m_{测}$，也受监测网本身的精度影响。最不利情况是由监测网中最弱点 $m_{弱}$ 施测观测点，则观测点的观测中误差：

$$m_{观}=\sqrt{m_{测}^2-m_{弱}^2} \tag{10-4}$$

当 $m_{观}$ 由允许变形值确定后，就可选择观测点的测精度 $m_{测}$ 和监测网的精度 $m_{弱}$：

$$m_{弱}=\sqrt{m_{测}^2-m_{观}^2} \tag{10-5}$$

$m_{测}$ 和 $m_{弱}$ 可做适当调整，以确定适宜的监测网和观测点的施测精度。

一但 $m_{弱}$ 解算出后，可根据网形确定权 $P_{弱}$，由此解得观测值单位权中误差 m_0：

$$m_0=\frac{m_{弱}}{\sqrt{P_{弱}}} \tag{10-6}$$

进而确定监测网的测量等级与相应技术要求。

如图 10－2 所示，A、B、C 为沉降观测基准点，C 为最弱点，观测点观测路线及监测网的观测路线如图所示。设根据允许变形值已求得观测点高程中误差不大于 1.00mm，相应规范定 $m_{站}=\pm 0.3$mm。试确定监测网的适宜精度。

由图 10－2 所示，观测点的观测路线共 6 站，起闭于监测网中最弱点。观测点观测路线中 Q 点为所有转点中误差最大的点，而由第 3 站间视测得 E、F 点，该两点相当于由 Z 点起算，其高程误差要受 Z 点误差和测站 3 观测 E、F 点误差的影响。本图形中，E、F、K、L 均为间视点，它们具有相同的精度，也是所有观测点中精度最差的点。如果监测网能保证这些点的精度，其它点的精度均能满足要求。

沉降观测路线要求往返测，往返测合格后对路线闭合差平差处理，再利用 Z 点计算 E、F 点高程。

为求 E 点精度先计算 Z 点高程中误差。设 1 测站往返观测为单位权观测，则 Z 点的权 P_Z：

$$P_Z=\frac{1}{n_{C.1.2}}+\frac{1}{n_{C.6\cdots 3}}=\frac{1}{2}+\frac{1}{4}=\frac{3}{4}$$

按等权代替法对应于 P_2 路线的虚拟测站 n_2 为：

$$n_2=\frac{C}{P_2}=\frac{4}{3}$$

由 Z 点观测 E 点只设一站，且为间视（往、返各测一次），则相应权 P_E 为：

$$P_E=\frac{1}{1+n_2}=\frac{1}{1+\frac{4}{3}}=\frac{3}{7}$$

$$m_E=m_{站}\sqrt{\frac{1}{PE}}=\pm 0.3\sqrt{\frac{7}{3}}$$
$$=\pm 0.46\text{mm}$$

依式 10－4，监测网的精度：

$$m_{弱}=\sqrt{m_{观}^2-m_{测}^2}$$
$$=\sqrt{1.00^2-0.46^2}$$
$$=\pm 0.89\text{mm}$$

监测网形已固定，即 C 点权已确定：

$$P_C=\frac{1}{n_{AC}}+\frac{1}{n_{ABC}}=\frac{1}{6}+\frac{1}{8}=\frac{7}{24}$$

则单位中误差 m_0：

$$m_0=\frac{m_{弱}}{\sqrt{\frac{1}{P_C}}}=\frac{0.89}{\sqrt{\frac{24}{7}}}=\pm 0.48\text{mm}$$

由表 10－1 知道，当每站高差中误差 $m_{站}=\pm 0.30$mm 时为三等监测网（相当国家二等水准测量），略高于计算得出的 $m_0=\pm 0.48$mm，故垂直网以变形三等监测网精度施测，即能满足观测点高程中误差不大于 1mm 的要求。

若考虑变形观测场地条件不利，而监测网离场地稍远，故将监测网精度适当提高，由三等提到二等，即

$$m_{站}=\pm 0.13\text{mm}$$

所以，有些部门规定建筑物沉降变形观测以二等精度施测，而将变形观测点的观测精度放宽，即

$$m_{站(观)}=\pm 0.50\text{mm}$$

三、变形观测周期

相邻两次变形观测的间隔时间为变形观测周期，简称观测周期。

变形观测周期确定的基本原则是：根据建（构）筑物的特征、变形速率、观测精度要求和工程地质条件及施工过程等因素综合考虑。观测过程中，根据变形量的变化情况，应适当调整。通常应使观测的次数能反映出变化的过程。

通常按荷载阶段和变形是否稳定确定观测周期，第一阶段，从基础施工开始，对地基

的荷载逐渐增加，到满荷载为止，该阶段是沉降最快阶段，对于一般高楼建筑通常每升高1～2层观测一次，或根据施工进度7～15天观测一次；第二阶段，从满荷载到沉降趋向稳定阶段（日沉降量0.01～0.04mm认为稳定），一般一个月、二个月、三个月、半年不等至沉降停止。有些建筑需终生观测直至报废，观测周期可一年、两年不等。如在观测过程中变形速度异常、雨水浸泡、地震等，应增加观测次数，以监视建筑物动态变化，保证安全施工或使用。

有些工程工期较短，但在施工期间的观测次数通常不少于4次，否则不能取得正确的变形特征值。

第三节　变形观测的主要技术方法

变形观测的方法与变形对象、特征，变形的大小、变形的速度以及观测精度有关。变形观测包含对变形监测网及变形观测点的平面或高程的观测。可概括为如下几种主要方法。

一、常规地面测量方法

常规地面测量方法是指通过测定高程、角度和边长或坐标来测定变形的方法。常规地面测量方法也叫大地测量方法，一直是变形观测的主要方法，仪器工具比较普及，各种精度级别的仪器工具都有，直观性好，容易选择到合适的观测精度和相应的仪器工具。

1. 精密高程测量

国家三等以上的高程测量看作是精密高程测量，主要用精密水准仪进行。精密水准测量也一直是垂直位移观测的主要方法。具有精度高，稳定可靠，技术成熟等优点。但劳动强度大，速度慢，山区系统误差大。由于光电测距仪的发展，国内外测量工作者大量实验光电测距三角高程，以求代替精密水准，提高速度和减轻测量工作者的劳动强度。一些实验表明，每公里偶然中误差可达到±1mm的精度，这是很理想的结果。但它附有一些条件，具有不稳定性。所以尚不能推广，仍在研究试验中，故一般情况下，还不能单独将光电测距三角高程应用于需精密测量的垂直变形观测中。有的为了做实验还要与精密水准高程对比。从目前情况来看，用于四等及以下的高程测量较容易实现，若想替代精密水准，尚须仔细设计。

2. 角度测量

角度测量的主要工具是经纬仪，主要用于水平位移观测，如三角网形式的水平变形监测或三角测量方法测定变形体变形。例如混凝土坝水平位移等用测小角法，用活动觇牌法时须用J1级以上经纬仪测角。不容易到达地点（烟筒中心线垂直度观测）的平面位置观测常利用经纬仪采用测角前方交会法全面观测等。

有了光电测距仪，特别是全站型速测仪，监测网观测可用边角网方法。电子经纬仪使记录和计算及数据处理变得简单，容易实现变形监测自动化。

3. 精密距离测量

早期精密测距工具为因瓦基线尺，目前因瓦基线尺仍是有效的精密测距工具。丈量距离远，地表起伏不平或跨越深沟时，因瓦尺量距不但劳动强度大，而且也不方便。由于有了精密光电测距仪，使精密量距变得极为便利。如Mekometer ME300，测程2.5km，标称

精度为±0.3mm±10^{-6}D；改进型的ME5000，测程5km，标称精度为±0.2mm±（0.2～1）×10^{-6}D；双色激光测距仪测程20km，标称精度为0.1mm±0.1×10^{-6}D。这三种仪器完全可代替因瓦基线尺作高精度测距，常被用于精密边角网的测距工作。

普通的光电测距仪更是方便，用于一般精度的测距极为方便。像矿区地表沉陷观测，用普通光电测距导线即能满足精度要求。

二、全球定位系统的应用

变形监测网要多次重复观测，像城市地表沉陷观测面积大，用常规方法一次观测时间长，但又希望一次观测时间越短越好，以克服时间差给沉陷成果带来的不利影响。

全球定位系统是测量技术的一项重大变革，集平面与高程测量为一体，使三维变形监测网的观测变得简单。这种定位技术不要求两点间通视，监测网具有更多的优化余地，观测时效率高，经济性好。目前，第二代全球定位系统可达±3cm级三维定位精度。第三代全球定位系统可达±1mm级或更高定位精度。

全球定位系统已成功地用于矿区地表沉陷观测。欲用于高精度监测网尚须仔细设计和选择合适的GPS接收机，特别是欲获得相当国家三等以上精密水准的高程精度，还有一定工作要做。

三、摄影测量方法

摄影测量方法包括航空摄影、遥感和地面摄影测量法三种。局部变形观测则以地面摄影测量法方便易行。地面摄影变形观测的主要工具为地面摄影机和坐标量测仪，这样的设备不为大多数测绘单位所具备，应用不普及，并且还需根据不同设备认真研究其达到的精度。虽然如此，该方法对某些特殊的观测对象（如储煤气罐等球状物）进行变形观测具有独特优越性和特点：

（1）像片信息量丰富，可同时获得变形体上大批目标的三维变形信息，完整记录了变形体在不同时间的状态，便于对成果的比较与分析。

（2）外业工作量小，劳动强度低。

（3）观测时不需接触被摄物体，可观测人不易达到的地方。

用地面摄影测量进行变形观测有两种基本方法：

1. 固定摄影站的时间基线法

固定摄影站的时间基线法（或称伪视差法），是把两个不同时刻所摄的像片作为立体像对，量测同一像点的左右和上下视差，这些视差乘上像片比例尺即为目标点的位移。由该法基本原理可知，这种方法仅能测定变形体的二维变形，而不能得到像点沿摄影机主光轴方向的位移。所以，该法只适用二维变形的变形观测。

2. 立体摄影测量法

立体摄影测量法是依获得目标点的三维坐标而得名，需要在两个或两个以上测站对变形体进行摄影，构成立体像对，再由内业处理获得目标点的三维坐标。

摄影测量获得变形观测资料多用解析法处理，坐标量测仪量测像点的坐标，然后通过一定的数学模型建立像点坐标与物点坐标的关系，从而获得目标点的坐标。解析处理方法用得较多的是严密光线束解析法及直接线性变换法。

有关地面摄影测量方法以及资料处理的数学模型及方法，在摄影测量或工程摄影课中有详细的介绍。地面摄影近些年有较大的发展，除内业处理上有许多新的改进，精度上有较大提高外，已由解析法处理向数字摄影测量过渡。地面摄影会在变形监测中发挥越来越大的作用。

四、特殊测量手段

前面所述的各种变形观测技术方法，基本上是以获得观测点的三维坐标为目标，进而判断变形体的垂直或水平位移。实践上也有些变形观测技术方法区别于上述各方法，如准直测量、倾斜测量以及应变测量中均有些特别的测量手段。

(1) 准直测量是观测某一方向上点位相对于该方向变化。前面介绍的激光准直、引张线技术均较多地用于大坝等线状工程建筑物的变形观测，激光铅直仪多用于高层建筑物的摆动观测。正垂线和倒垂线的机械法垂直准直，多将它们用于建筑物的挠度和倾斜观测。埋设在基岩上的倒锤用做变形观测的基准点。

(2) 倾斜测量特殊技术。在第九章中所述倾斜仪和静力水准测量是倾斜测量的特殊技术方法。其特点是测量过程简单，连续监测，较容易实现自动化。

(3) 物理测量。物理测量是变形体的变形量转换成电感应量（电压、电流或电阻）变化的信息，从而测定被测物体变化量的大小，常被称作应变测量。物理测量的主要技术途径是传感器技术。传感器实质是一个导体（如一金属丝）埋设在变形体中，由于变形体的变形改变了导体内电感应量，并将其传递出来进行记录。由于这个信息可自动传递由数字显示或记录，故传感器测量常用作自动化变形观测。

常用的传感器有差动变压器位移传感器、感应同步器、电容式传感器、光电传感器等。由于电感应灵敏度高，故可以获得较高的变形观测精度，因此，常被用于精密工程变形观测工作中，一般工程变形观测不常采用。关于这方面技术在精密工程测量书籍中有较详细介绍，这里不再叙述。

五、综合技术

变形观测的各种技术方法都有自己的特点以及适用范围。由于科学技术发展，变形监测对象、目标和内容愈来愈复杂，有时只靠单一技术方法难以实现监测目的。因此，遇到具体变形观测工程时，要综合考虑各种技术方法。

例如混凝土重力坝工程结构复杂，监测内容多，靠单一技术方法不能完成监测任务。需用引张线法观测坝身水平位移，用倒垂线法观测坝身垂直方向的挠度，用精密水准和静力水准测定坝基础倾斜，用精密控制网和精密水准监测坝区的水平位移和垂直位移，还可用传感器技术观测坝体应力变化等。

采空区大面积沉陷观测，可用 GPS 和光电测距导线独立测定点的三维位移，以资校核对比。

滑坡观测可用 GPS 或常规方法测定其三维位移，再用陆地摄影法测定其三维位移与之对比校核等。

第四节　地表沉陷观测

本章第一节所述城市地表沉陷和采空区地表沉陷均属局部沉陷，可能是一个地区、一个城市或几十平方公里或不足一平方公里。虽然都叫沉陷观测，其观测技术方法与数据处理有一定区别，本节分别予以叙述。

一、城市地表沉陷观测

城市地表沉陷一般比较缓慢，绝对沉陷值较小，很少发生水平位移。主要采用垂直位移观测方法，以精密水准为主。

1. 观测精度与周期

确定城市地表沉陷观测的精度指标，主要根据需要和年均沉陷量大小、沉陷地区的面积选用国家二、三或四等水准进行。电磁波测距三角高程或GPS全球定位系统根据仪器和技术设计，能满足相应等级的精度可以代替相应等级的水准测量。一般规律是年均沉陷量小、观测精度高，或测区面积大、观测精度高。一般认为，对于地表沉陷观测应能反映出不大于1cm的变化，至少应与城市各级高程网的精度相当，即各等水准网中最弱点的高程中误差相对于起算点不大于2cm。

观测周期可参照执行《城市测量规范》的规定，见表10－3。

表10－3　城市沉降观测周期

年均沉降量（cm）	沉降点间距（mm）	复测周期
1～3	2000～1000	5～3年
3～5		3～1年
5～10	700～500	1～0.5年
10～15	500～250	6～3月
15以上	小于250	3～1月

2. 城市地表沉陷观测水准网布设

城市地表沉陷观测水准网布设形式同于城市水准网，并且要与城市水准网的线、点相重合。对于较大的城市可根据年均沉陷量大小，将整个城市分成几个不同沉陷量的沉陷区，以缩短一个沉陷区内水准网观测的时间。地表沉陷量大小通常与时间长短成正比。假如某地区月沉陷量为2cm，一条水准路线刚好观测一个月，这条路线上最初观测的水准点和最末一个水准点就存在2cm由沉陷造成的差值。这一点说明地表沉陷观测，特别是年均沉降量较大的城市，应尽量缩短每一观测网的观测时间。进行城市地表沉陷观测技术设计时，必须充分估计到地表沉陷速度与观测时间对成果的影响。

沉陷观测点不但尽可能与城市水准网点重合，其密度参照表10－3规定设置。

沉陷观测点埋石类型与方法应执行《城市测量规范》有关规定。当城市首级高程网也在城市沉陷区内，应设立部分基岩水准点，以保证高程起算点稳定不动。

3. 观测要求

地表沉陷观测的精度受沉陷影响，观测时除应执行城市高程测量相应等级的技术规定外，尚应采取如下措施：

(1) 为缩短观测时间，除设计时尽量缩短各环线和路线长，还可采用：①两架同级仪器对向观测；②观测网点中的结点由几个作业小组使用同级仪器协同作业，同时观测。

(2) 沉陷观测的路线，观测使用的仪器和标尺及观测季节相对固定。

(3) 高等水准路线和低等水准路线在同一年施测时宜同期进行。

(4) 沉陷观测应从沉陷量大的地区向沉陷量小的地区推进。

(5) 注意总结经验，掌握地表沉陷观测的规律，以便提高观测的精度。

二、采空区地表移动观测

采空区地表沉陷有垂直和水平两种变形，称沉陷过程为地表移动。地表移动结果，在采空区上方形成一个比采空区面积大得多的沉陷区域，呈盆地状，称之为地表移动盆地，简称下沉盆地。下沉盆地形成过程中改变了地表原有形态，引起高低、坡度、水平位置等变化，可能出现裂缝、塌陷坑或盆地积水等现象，对地面各类建筑和生态环境带来影响。

在采空区上方，地表平坦、采动影响范围内没有特殊地质构造等一般情况下最终形成的静态下沉盆地可划分成三个区域：

(1) 盆地中间区域。盆地中间区域地表下沉较均匀（图 10—3），下沉值也最大，基本上没有水平移动和变形，一般不出现裂缝，对上面建筑影响最小。

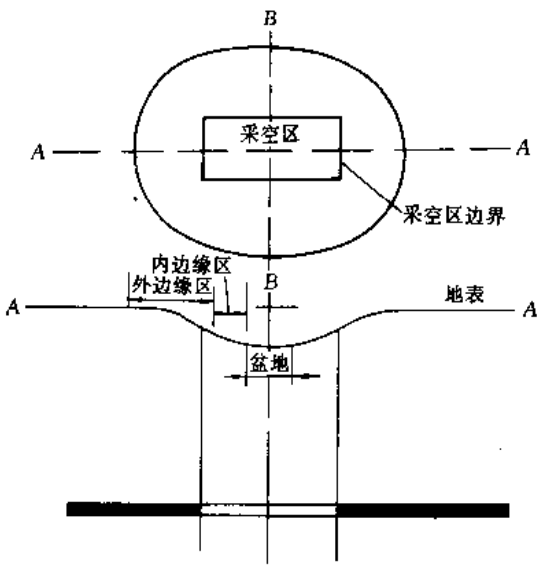


图 10—3

(2) 下沉盆地内边缘区。该区位于采空区边界附近与最大下沉点之间。在该区域内，既有下沉又有水平位移，是下沉与平移合成向盆心方向倾斜。

(3) 下沉盆地外边缘区。该区位于采空区边界到盆地边界之间，地表移动为向盆地中心方向倾斜，呈拉伸态，故该区域产生裂缝。

下沉盆地中心两互相垂直面 AA 与 BB 是该采空区下沉范围最大的位置，也是移动量最大的两个断面，常称为主断面。若 AA 为矿藏走向断面，则 BB 为倾向断面。研究采空区变形首先研究主断面上的地表移动和变形。通过对开采沉陷的观测取得数据，研究地表及岩层的变形规律。

开采沉陷观测工作的基本过程：在开采以前，在选定的地点设置观测点和基准点，通过定期对这些点的观测取得各点及点间的平面和高程的位移，进而分析其变形规律。矿山开采沉陷学是门专门学科，这里仅就开采沉陷观测基本问题予以叙述。

1. 沉陷观测线布设

沉陷观测一般设置两条互相垂直的主断面观测线，如图 10－4*a* 示。一条观测线沿矿层走向（Ⅰ－Ⅰ线），另一条沿矿层倾向布设（*A*－*A* 线）。当面积较大时可增加一两条观测线，如图 10－4 中所示几种形式。当布置两条平行观测线时中间应具有 50～70m 的间隔。

布置好观测线要做好下述两项工作：

（1）根据已有的地质资料、图纸，明确矿层走向和倾向。

（2）根据开采设计资料明确开采深度、开采范围、开采方法等因素，确定观测线的形式、位置，使观测线一定位于主断面上，并且有足够的长度。

每条观测线的两端，每端不少于两个基准点（测量控制点）与矿区测量控制网相联系，中间 5～25m 设一观测点；对观测线所有点进行编号。

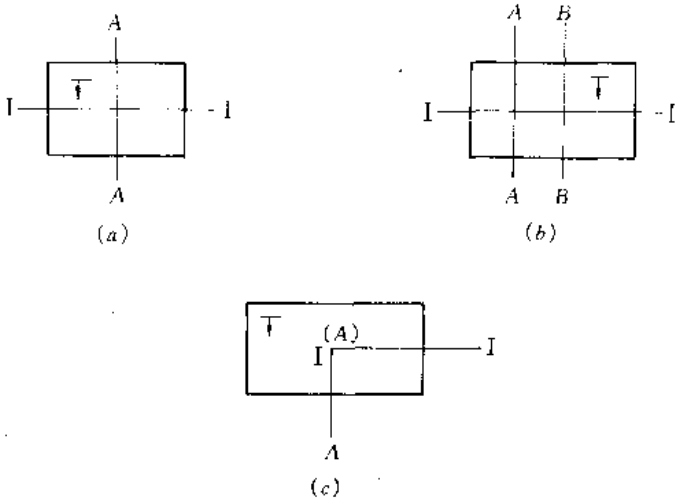


图 10－4

各类点的埋石及埋设方法同于城市地表沉陷观测中的有关规定。

2. 连接测量

所谓连接测量就是把所有基准点与矿区测量控制网联测，以确定这些基准点在矿区测量控制网坐标系统中的平面位置和高程，便于应用矿区原有资料图纸以及了解地面与地下开采上下对应关系。连接测量方法可采用测量上常用的方法。近些年，多用光电测距导线进行。平面测量时测角精度不低于 5″级的导线（城市Ⅰ线导线）；高程用不低于三等水准测量的精度进行施测。

首次联测多是独立连续进行两次，以保证其可靠性。连接测量要进行整体平差，以取得各点在统一坐标系中的坐标和高程。

3. 观测点观测

在联测以后，地表开始移动之前，应对观测点独立进行两次测量，以测定各观测点的平面位置和高程。目前多用测距导线，城市Ⅱ级导线精度。高程测量可用四等水准精度施测。经设计测距三角高程能达到要求时，也可试用测距三角高程。在平面观测同时进行三角高程测量。也可试用 GPS 全球卫星定位系统进行沉陷观测。

在地表开始移动以后，每一、两个月进行一次高程测量，当连续 6 个月观测地表各点的累计下沉值均小于 30mm 时，认为地表移动稳定，应进行终期平面和高程的全面观测。

第五节　建（构）筑物变形观测点与监测网布设

变形观测要设置变形观测点（简称为观测点）和建立变形监测网（简称为监测网）。

观测点设在被观测的目标上，为对观测点实施观测还需建立基准点。基准点分为稳定的基准点和工作基点。埋设在变形影响范围以外或基岩上的稳定不动的测量控制点为稳定

的基准点。基准点离被观测目标远，工作不方便，观测误差大，埋的近了，又不稳定，所以采用两级控制。将设在离观测点较近对观测点进行观测时所依据的基准点称为工作基点。

这样，由稳定的基准点和工作基点组成了变形监测网。由于工作基点离观测点较近，可能在变形区内（不稳定），其位移量是通过对整个监测网的重复观测来确定。由工作基点对观测点观测，测得观测点相对于工作基点的位移量，再根据工作基点相对于基准点的位移量来修正观测点相对于工作基点的位移值。

当监测网中的两种控制点不需要区分时，统称为基准点。工作基点独立称呼时，说明该点可能不稳定。

为使观测点正确反映建（构）筑物变形，在布设观测点与监测网之前应做好如下工作：首先收集和了解作业区的地质、水文等资料，工程设计图纸及说明书，稳定地层位置、深度、水位、水的酸碱性、冻土深度；根据设计图纸及说明书了解建（构）筑物位置、大小、高度、结构、基础类型、深度；了解建（构）筑物安全等级；了解设计对变形允许值大小的要求；了解施工组织方式与进度等。对上述情况做到心中有数，再依据规范要求进行变形观测方案技术设计。

一、变形观测点布设

（一）变形观测点布置

建（构）筑物种类多，形状各异，结构不同，对观测点的布置，很难规定得十分具体。实践中掌握的原则是：点设在能反映建（构）筑物变形特征和变形明显的部位；点位避开障碍物，便于观测和长期保存。经实践总结，认为观测点宜设在下述位置：

（1）框架结构建筑物的每个（或每两个）柱基上设一点；箱形基础四角、拐角处。

（2）高低层建筑物、新旧建筑物及建筑物沉降缝两侧。

（3）基础形式或埋深不同处，不同结构分界处。

（4）建筑物宽度大于 15m 的中点处，内部承重墙柱纵横轴线交叉处。

（5）重型设备基础和动力基础。

（6）电视塔、烟囱、水塔、油罐、高炉及其它高耸建筑物，应沿周边基础对称轴的特征点上布点，并不少于 4 个观测点。

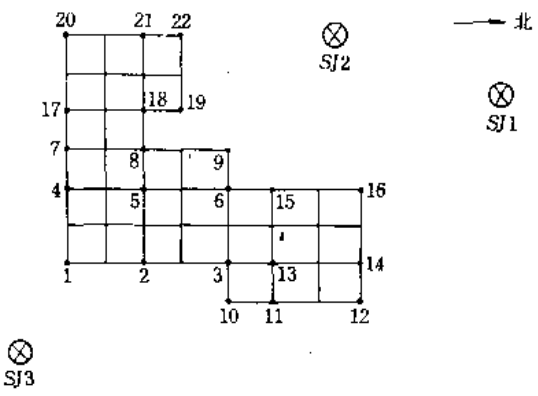


图 10－5

（7）需测定挠度的基础某一轴线方向上有代表性位置，一般一条轴线上不少于 3 个观测点。图 10－5 为带有裙房的大厦（97m 高）观测点及基准点布置示意图。该建筑主体高 97m，25m×35m 的箱形基础；西、北两测为五层裙房，挖孔桩基础。所有基础深 8.3m。室内地坪线下有圈梁及纵横梁将所有承重柱连接起来。该建筑观测重点是了解主体是否均匀沉降，及其与裙房间沉降关系。观测点设置重点为主体基础四角（1、3、9、7 点），考虑长、宽均超过 15m，又设了 4、5、6、2、8 五个观测点，以掌握主体箱型基础沉

降情况。裙房只有五层，若是独立建筑物可不进行沉降观测；由于主体与裙房联体，高度相差很多，基础又不相同，故在主体的邻柱（裙房承重柱）、裙房的四角、其它柱隔柱设点。

(8) 裂缝观测的观测点沿裂缝最窄处、最宽处两侧成对设点（图 10—6）。

(9) 桥梁变形观测对象是墩台的垂直位移和水平位移（包含倾斜），故观测点要设在墩台上下游两端（如图 10—7 所示墩台顶布置的 A、B 两观测点）。

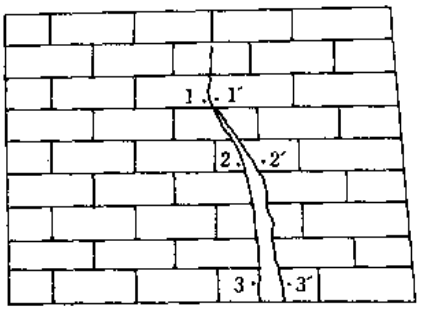


图 10—6

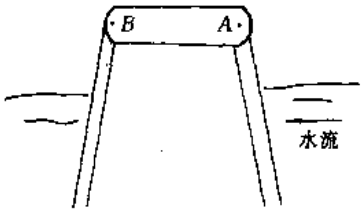


图 10—7

(10) 大坝变形观测点布置时应视大坝类型和观测内容来确定。钢筋混凝土构筑的大坝为重力坝，而由土石堆成面上砌石或浇注混凝土的大坝，称为土石坝。通常要进行垂直位移和水平位移两项观测。

水平位移观测的任务：垂直于大坝轴线方向的水平位移（图 10—8）；铅垂方向上不同高度处水平位移（挠度观测）（图 10—9）；任意点任意方向的水平位移。

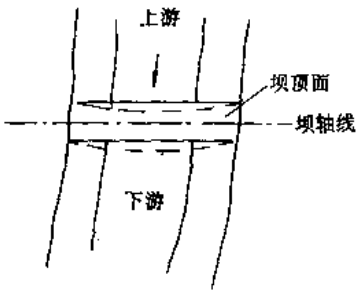


图 10—8

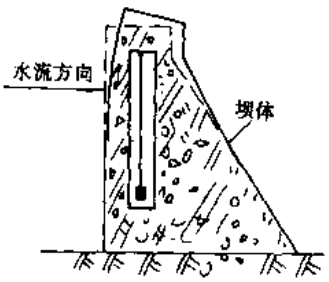


图 10—9

垂直大坝轴线方向水平位移观测点布置：对于直线型坝段的混凝土坝和土石坝（多位于河床上）的轴线水平位移观测，在坝顶面上主要采用视准线法和激光准直法；混凝土重力坝多在不同高处的廊道里采用引张线法（图 10—10）。土石坝很少设有廊道，所有观测线均设在坝面上（图 10—11），一般将视准线设在迎水坡正常水位线以上、坝顶面、背水坡不同高度处及各道戗台上等位置。

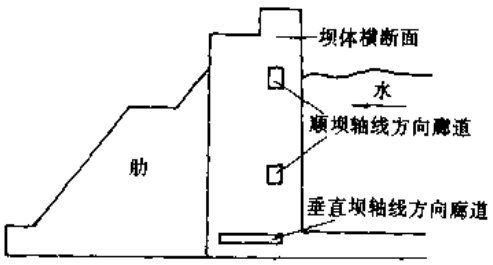


图 10—10

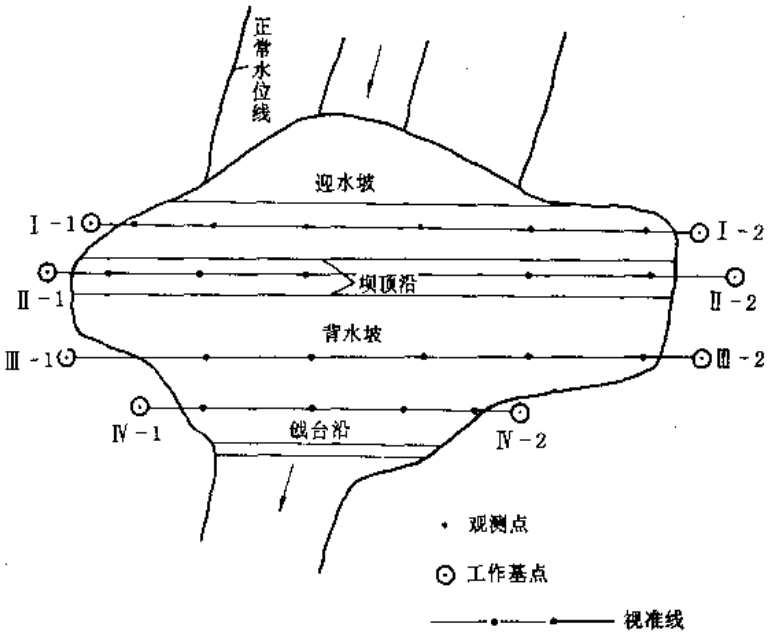


图 10--11

非直线型坝段（多处于河流上的坝与两岸连接的坝段）和坝的其它部位的坝段，多采用前方交会法测定水平位移。将观测点设在基础差、构造单薄的坝段及下游面的不同高度处。

混凝土坝受水的水平推力及压力除大坝相对坝轴线向下游水平位移外，在铅垂方向不同高度也产生水平位移，使坝体产生挠度。坝体挠度观测多设正垂法（图 10－9），常在各坝段连接缝设竖井或设竖管，在竖井或竖管内设正垂线。一般由廊道可以到达竖井、竖管处，从而实施对正垂线的观测。

各重要闸门框可布置任意方向位移的上、中、下三点，以便观测闸门框是否变形。

图 10－12 所示为某大坝部分坝段变形观测平面布置示意图。该大坝在不同高度处设置了三条引张线，以测定坝体的水平位移：Ⅰ－Ⅰ′长 408m，Ⅱ－Ⅱ′长 15m，设置在底层廊道内：Ⅲ－Ⅲ′长 644m，设置在坝顶部廊道内。引张线端点设在坝体内，其位移量由设在附近的倒垂线来测定，如 D_2、D_3、D_4、D_5 为倒垂线；在坝体不同位置设置了正垂线，以测定坝体挠度，如 Z_1-Z_9 为正垂线。并且 Z_1 与 D_1、Z_5 与 D_3、Z_8 与 D_4 正倒垂线相互联系，并用倒垂线来测定正垂线位移值。为测定右岸连接坝段位置变形，在该坝段上设置了视准线 $B-B'$。

坝体垂直位移观测主要是基础沉降的观测，观测点重点布设在如下位置：基础沉降观测点布置在基础廊道中心线与每个坝段中心线交点处，每个坝段设一点；重点坝段增加沉降观测点（布在基础廊道内、兼观测基础倾斜）；主要坝段的坝体上下游两侧的坝面上适当布设观测点，用来测定坝体上、下游两侧的高差变化，以便了解坝体转动情况；靠近水轮机、升降机等坝段的平台上适当布点，以研究机械运转对坝体沉降的影响；土石坝的垂直变形观测点通常与水平位移观测点合用。

（11）基坑回弹观测点布置。回弹观测点应能反映基坑回弹的纵、横主断面的升降，所以观测点多沿基坑纵、横轴线布设。如图 10－13 所示，坑较小时不少于三点，两边以中间

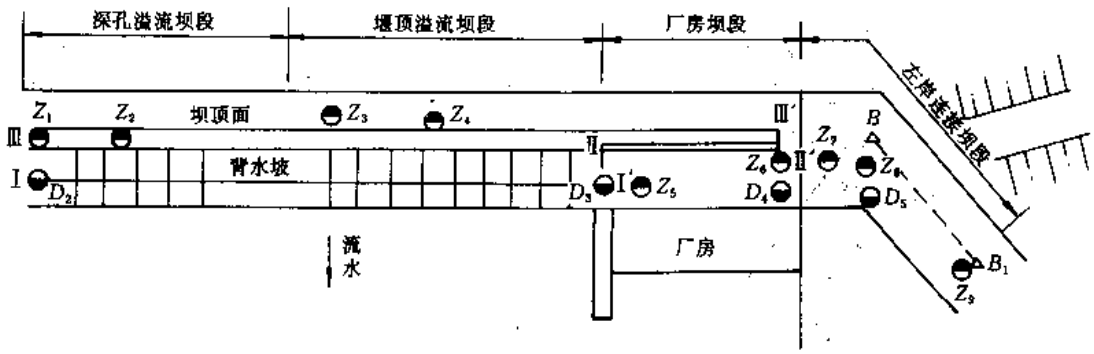


图 10－12

一点对称。坑较大时适当多布点以能充分反映基坑边缘、中间等主要特征部位升降为主。由于基坑埋点费用较高，应精心设计，尽可能省点，以节约费用。

（二）观测点标志及其埋设

变形观测点的标志应根据观测对象的特点和观测点埋设位置来确定。

埋设到钢筋混凝土柱基础上的点常用图 10－14*a* 的形式；钢筋混凝土柱上的观测点多用 10－14*b* 的形式；钢柱上设观测点多是在角钢上焊一铜头，再把角钢焊到钢柱上（图 10－14*c*）；在装饰过墙壁上的观测点可埋设成隐蔽式，如图 10－14*d* 的形式；在铺装过的墙根地板下观测标志可埋设在窨井下（图 10－14*e*）。总之使观测点牢固结合到建筑体上，便于保存，便于观测，且不影响建筑物的使用和美观。

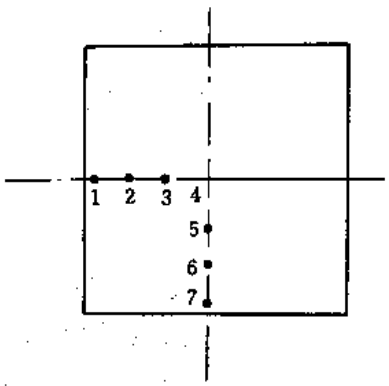


图 10－13

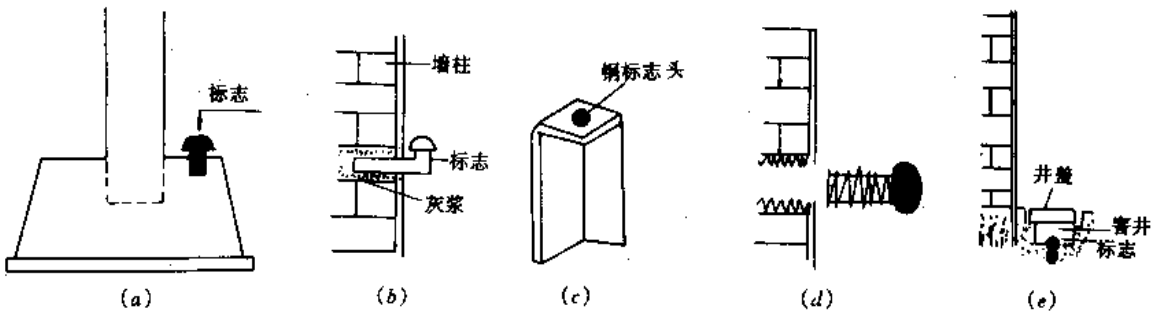


图 10－14

基坑回弹观测点标志常用一截钢材（角钢、圆钢、钢管均可），上部焊上一半球状的突出标志。钢材长度视基坑地质条件定。土层或砾砂层钢材可长些，约 1.5m 为宜，弱风化岩可适当短些，以便于埋设且牢固为原则。观测点标志顶面应埋入基坑底面设计标高以下 10

～20cm 处。比较常用的埋设方法是在基坑开挖之前先在观测点设计位置钻孔。孔深按下式计算：

$$孔深=基坑设计深度+标志长+(10\sim20)cm \qquad (10-7)$$

当孔深达到计算深度后，将标志放入钻孔底部（一定保证标志顶低于基坑底面设计标高 10～20cm，只能多不能少）。用水泥沙浆将它固定在土层中。埋设时注意钻孔要竖直，严格控制沙浆量，不能将标志头埋上。

若基坑底为普通砾砂或纯土，可采用如下办法：当钻孔到基坑设计深度后，即将标志放入钻孔底部，而后锤击到设计埋深即可。

裂缝观测标志可采用：①裂缝两测打孔埋设观测标志；②在裂缝的观测处抹一层石膏，厚约 10mm，石膏干后，用红漆喷一条宽约 5mm 的跨越裂缝两侧且垂直于裂缝的横线，若裂缝继续扩张，则石膏裂开；③薄铁片标志，厚约 0.5mm 薄铁片两块，一块为 100mm 的方形，另一块为 150mm×50mm 的矩形，如果裂缝较宽，矩形铁片根据需要做长些。方形铁片喷白漆，待干后固定在裂缝一侧。矩形铁片一端搭在方形铁片上，另一端固定在裂缝另一侧，而后将两块铁片同喷红漆即成。

二、监测网布设

如前所述，监测网由基准点和工作基点组成。可分为垂直位移监测网和水平位移监测网。有的监测网很小，只由 3～5 个点组成，有的监测网很大，像水利枢纽变形监测网可大到几百平方公里。

（一）监测网布设

1. 垂直位移监测网布置

用于工业与民用建筑物沉降观测的水准基点通常要求不少于三点，可构成单一路线。对于土层地基上的建筑物必须在其压力扩散范围以外的地方布监测网，并充分估计到地下水位变化以及冻土深度对它稳定性的影响，通常采用深埋标志。当土层较浅将基准点设到基岩上最为理想。在城市地区，亦可以将基准点设置在已经稳固的深基础永久建筑物墙脚上。

对于大型水利枢纽，要充分估计大坝建成蓄水后影响坝下游区的沉降，稳定的水准基点应设在河流两岸大坝下游方向沉陷范围以外，埋设在基岩上最为理想。工作基点可设置在坝体附近，以便于对坝体等各部位的观测点实施观测。

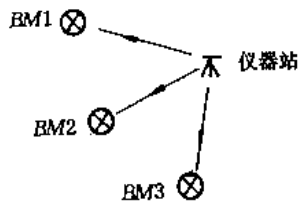


图 10－15

大桥垂直位移观测基准点尽量设置在承压区以外，当离桥较近便于利用的位置不易设置稳定的基准点时，可将基准点布设成两级，工作基点设置在离桥址较近便于测量观测点的位置，最好每岸设三点，构成弧状（图 10－15）。置一次仪器便可以相等的距离观测两点间高差。稳定的基准点设在离桥址稍远些的稳定地区，以便实施对工作基点稳定性的监测。

2. 水平位移监测网布置

应用水平位移监测网较多的是水利枢纽工程。监测网布设形式与观测点的观测方法有关。视准线法的端点是工作基点，需布设在坝体上或附近。由于不能保证工作基点不动，为

此，工作基点的测定与检核可采用三角网、边角网、三边网及倒垂线法。

以控制网形式施测基准点时，常在坝区建立短边控制网，将视准线端点（工作基点）包括在控制网中，其它基准点设在稳定区，定期对控制网进行测量，得出各端点在不同观测周期的坐标值，经比较、判断，可得出端点的位移值。

以倒垂线法作为基准点时，将倒垂线的下端固定在基岩上，上面设立观测墩（视准线端点）。通过倒垂线观测墩相对于倒垂线的位移观测，即测定了视准线端点的水平位移。

挠度观测所用的正垂线固定点在坝体上部，以测得不同高度上的点相对于底点的位移（即挠度）。欲求得所有观测点绝对位移，坐标仪所在位置的位移要用倒垂线测定。

对于坝面上的某些孤立点的水平位移观测，多采用前方交会法。用前方交会法测定水平位移时常布成两级网；距观测点较近的位置设工作基点，构成较好的交会图形，实施对观测点的观测，在距坝稍远些地质条件良好处设置精度高的控制网（将工作基点包括在网内）测出基准点（含工作基点）的位置。

大坝的变形观测关系重大，工作基点和基准点的测量成果必须可靠。一些单位常常采用两种完全独立的方法进行观测，用一种方法验证另外一种方法所测成果的可靠性。

桥梁变形观测工程中，当对桥墩的扭动变形进行观测时要设置水平位移监测网，因对观测点的施测方法不同布置不同形式的监测网。

采用视准线法或光电测距法测量观测点时，控制点若能设置在桥附近的基岩上，可只布一级网，这样的监测网形式要简单得多。若布设两级网时，则工作基点的稳定性需要远离桥区的稳定的基准点来控制，此时的监测网由两岸的工作基点和稳定的基准点组成。

前方交会法测定桥墩水平位移时，由于观测点只能设置在桥墩上游或下游一侧，加之桥轴线与河床方向基本垂直的关系，欲工作基点稳定，又兼顾好的交会图形实属困难。一般情况下是以好的交会图形为基础兼顾点位稳定，若不能兼顾，就在远离桥区建立稳定的基准点来监测工作基点。

其它各类工程均可根据工程需要仿上述方案布设监测网。

（二）监测网标志及其埋设方法

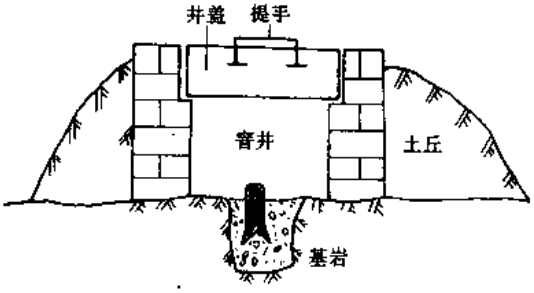


图 10—16

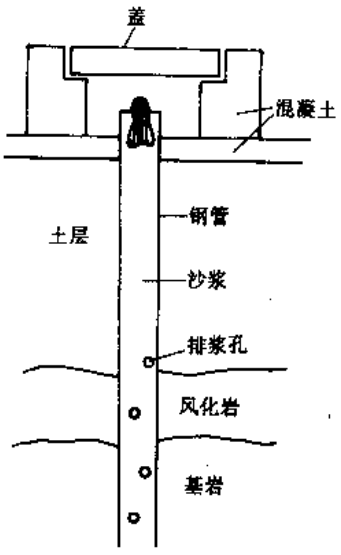


图 10—17

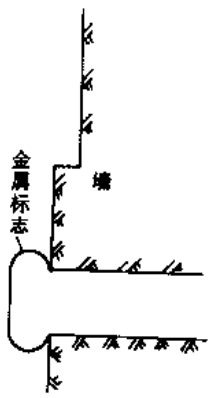


图 10—18

水准基点是垂直位移观测的基准点，依埋设位置不同而有不同构造的标志和不同的埋设方法。

当基岩上面的覆盖层很浅，埋设的基岩标石可采用图 10—16 所示的地表岩石标类型。当土层较厚时可采用图 10—17 所示的深埋钢管基岩标石。城市墙脚金属标如图 10—18 所示，实践中还有不同形式的标志，不管哪种标志，首要的是保证基准点本身的稳定可靠。

第六节　建（构）筑物变形观测

工程建（构）物不仅种类繁多，变形特征也有多种，如垂直位移、水平位移、倾斜、挠曲、裂缝等变形。变形观测方法因变形特征不同而异，本节仅就几种典型的变形讨论其变形观测方法。

一、垂直位移观测

建（构）物的垂直位移观测是测定其基础或建筑物本身在垂直方向上的位移（即升降）。基本方法是定期地测量观测点相对于水准基点的高差，以求得各观测点的高程，并将不同周期的高程相比较，同时进行统计分析，以掌握建筑物基础或其本身的垂直位移情况。

工业与民用建筑物的沉陷观测是最常遇到的变形观测工作，从建筑物基础施工开始到工程交付使用甚至更长一段时间都需进行变形观测。

深埋大型基础在基坑开挖后，由于基坑上面的荷重卸除，基坑底面（地基）隆起，称为基坑回弹。回弹量因土层不同而异，一般土层、软土层回弹量稍大，砾砂岩层回弹量稍小，弱风化岩层一般情况下回弹量较小，而基岩层基本不回弹。

基坑回弹观测的任务是测定基坑开挖后的回弹量。其目的是为改进基础设计，确定室内地坪的适宜标高提供重要资料。

回弹观测要点是：基坑开挖之前先测出设计的坑底土层的准确高程。如图 10—19*a* 中的 Q 点的高程为 H_Q，当基坑土被取出后再复测坑底土层中 Q 点上升 Q'（图 10—19*b*），Q' 高程为 $H_{Q'}$，它与初始高程之差为 ΔH_Q：

$$\Delta H_Q = H'_Q - H_Q \tag{10—8}$$

就是基坑回弹量。

图 10—19*a* 中，$H_{坪}$ 为室内地坪设计标高，CD 为设计的基坑底面，其标高为 H_Q，当土块 $ABCD$ 被取走后 CD 面上升到 $C'D'$（图 10—19*b*）。为保持设计坑内标高仍是 H_Q，将 $C'D'$ 挖去，使原 EF 升至 $E'F'$ 即 CD 高度。当基础筑完之后，$E'F'$ 又被压回到 EF（图10—19*c*）。若按基础设计深度 h 施工室内地坪，则±0 降低了 ΔH_Q。若按±0 设计标高施工室内地坪，则 h 增加了 ΔH_Q 尺寸。

如果 ΔH_Q 是在基础施工后一段时间完成，可能导致整个建筑物降低了 ΔH_Q 尺寸。由于坑底 C、D、Q 三点回弹量与下沉量也不均，可导致防水失败，对工程危害极大。因此，回弹观测，特别是软土层深基础的回弹观测有重要意义。

回弹观测应达到一定精度，一般取预计回弹量的 1/10 为回弹观测高程中误差。观测中，常将各项较差取至 1mm。所用仪器能读出 0.1mm 的微小量。

如图 10—20 所示为回弹观测示意图。准备精密水准仪和铟瓦水准尺，准备检定过的

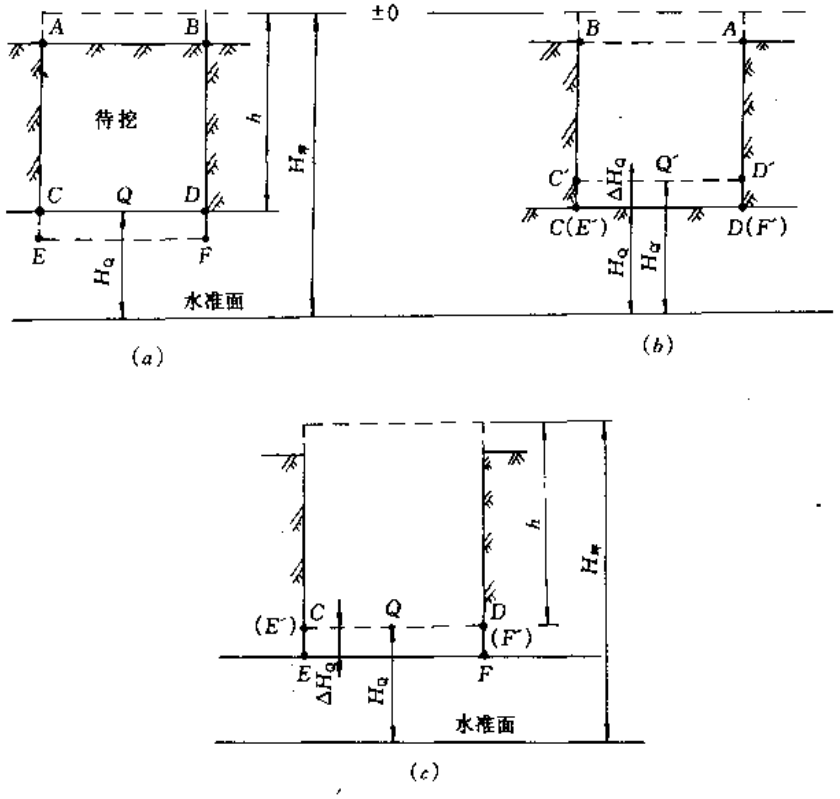


图 10－19

30m 或 50m 钢尺，以及与钢尺标准拉力相应的重锤两个和投放钢尺的支架。其观测工作应在开挖前后各进行一次。

开挖前观测时，将平底重锤放入孔底，让锤与回弹标志顶接触，另一端用检定拉力将钢尺引张。当孔底重锤碰到标志后，用水准仪测量基准点与回弹标志的高差（要注意钢尺的零点值）。观测时钢尺估读到 0.1mm，水准尺读到 0.1mm，以下凑整。

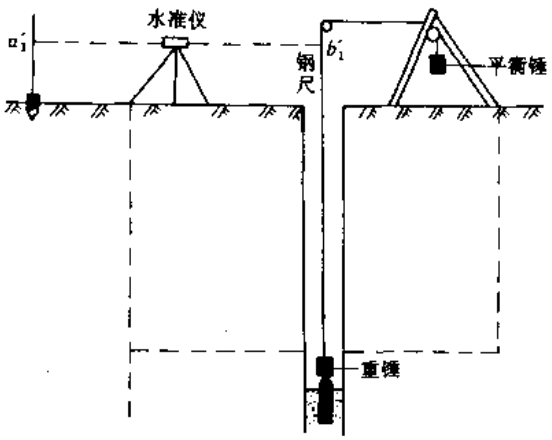


图 10－20

测回观测顺序如下：

（1）后视水准尺，调平气泡，读基本分划 a'_1。

（2）不动测微器，前视钢尺，调平气泡读钢尺读数 b'_1。仍不动测微器，再重新调平气泡，再读钢尺读数三次，当较差小于 1mm 时，取三次平均值得 b'_1。

（3）后视水准尺辅助分划，读法同（1）得 a''_1。

（4）重新引张钢尺，水准仪前视钢尺，读法同（2）得 b''_1。

（5）测量孔底与地面上的温度，取其中数对钢尺施加温度改正。

（6）计算高差：

$$h'_1=a'_1-b'_1$$

$$h''_1=a''_1-b''_1$$

式中 h'_1、h''_1 分别为上、下半测回高差。

(1) ～ (5) 步观测为一测回，一测回两次高差之差为：

$$f_{h'_1}=h'_1-h''_1$$

当 $f_{h'_1}$ 不大于 1mm 时，取其平均值为第一测回的结果，即

$$h_1=\frac{1}{2}\ (h'_1-h''_1)$$

该项观测须进行两测回，其较差不大于 1mm，取两测回平均值作为最后的观测高差值，即

$$h=\frac{1}{2}\ (h'_1+h''_2)$$

式中 h_2 为第二测回观测高差。

观测完毕，先回填白灰半米，拔出套管，回填素土。

基坑挖至白灰时，应仔细挖坑，以免破坏坑内各观测点。同时在基坑壁一合适的高度做一个临时水准点（设计坑底往上不超过 1.5m 高），按开挖前的观测方法，测量该临时水准点与地面基准点高差。

当回弹观测点被挖露出后，以临时水准点为后视，观测各回弹观测点的标高。从而算得各观测点的回弹量。

对于工业与民用建筑的基础沉陷观测分为水准基点观测和观测点观测。

(1) 基础施工完毕，即进行首次观测，包括水准基点和观测点的观测。

(2) 首次观测结果是沉降量计算的基础值，为保证其准确性，一般重复观测两次，取其平均值作为观测结果。

(3) 观测应依事先设计好的观测路线进行，往、返测及重复测均应在同一路线进行；观测点观测时，可以安置一次仪器观测几个前视点。

(4) 沉陷观测宜采用固定作业人员、固定仪器设备、固定仪器站的办法来提高观测速度和精度。

(5) 基准点观测应执行表 10—4（《工程测量规范》规定）或技术设计的技术要求；观测点观测应执行表 10—5（《工程测量规范》规定）。

(6) 作业现场及时检查各限差，如有超限及时返工或补测。

(7) 每一周期的观测应连续进行。

(8) 外业记录内容齐全，如年、月、日及工程进度等不能遗漏。

水利枢纽地区的垂直位移观测是为了掌握混凝土坝的基础及坝的本身在垂直方向的位移，其观测路线要比上述观测路线长得多，需按规范或设计的技术要求进行观测，从而保证观测数据的精度和可靠性。

铁路大桥的垂直位移观测多用精密水准施测。观测工作有两个内容：基点与工作基点的联测。从工作基点出发测定观测点垂直位移。

观测精度应依铁路工程建筑物变形允许值推算。目前多按下述经验掌握观测精度（表 10—6）。

表 10－4　垂直位移监测网的主要技术要求

等级	相邻基准点高差中误差（mm）	每站高差中误差（mm）	往返较差、附合或闭合环线闭合差（mm）	检测已测高差较差（mm）	使用仪器、观测方法及要求
一等	0.3	0.07	$0.15\sqrt{n}$	$0.2\sqrt{n}$	DS05 型仪器，视线长度≤15m，前后视距差≤0.3m，视距累积差≤1.5m，宜按国家一等水准测量的技术要求施测
二等	0.5	0.13	$0.30\sqrt{n}$	$0.5\sqrt{n}$	DS05 型仪器，宜按国家一等水准测量的技术要求施测
三等	1.0	0.30	$0.60\sqrt{n}$	$0.8\sqrt{n}$	DS05 或 DS1 型仪器，宜按工程测量规范二等水准测量的技术要求施测
四等	2.0	0.70	$1.40\sqrt{n}$	$2.0\sqrt{n}$	DS1 或 DS3 型仪器，宜按工程测量规范三等水准测量的技术要求施测

注：n 为测段的测站数。

表 10－5　沉陷观测点的精度要求和观测方法

等级	高程中误差（mm）	相邻点高差中误差（mm）	观　测　方　法	往返较差、附合或环线闭合差（mm）
一等	±0.3	±0.15	除宜按国家一等精密水准测量外，尚需设双转点，视线≤15m，前后视距差≤0.3m，视距累积差≤1.5m，精密液体静力水准测量；微水准测量等	$\leqslant 0.15\sqrt{n}$
二等	±0.5	±0.30	按国家一等精密水准测量；精密液体静力水准测量	$\leqslant 0.30\sqrt{n}$
三等	±1.0	±0.50	按《工程测量规范》二等水准测量；液体静力水准测量	$\leqslant 0.60\sqrt{n}$
四等	±2.0	±1.00	按《工程测量规范》三等水准测量；短视线三角高程测量	$\leqslant 1.40\sqrt{n}$

表 10－6　桥梁垂直变形观测精度

桥　长　L	水　准　等　级	每公里高差中数偶然中误差（mm）
＞1km	国家一等水准	±0.5
1km～300m	国家二等水准	±1.0
＜300m	国家三等水准	±3.0

工作基点与水准基点的观测周期，可每年观测一到二次，其它技术要求同于工业与民用建筑的变形观测中的基准点观测。

观测点观测路线受墩台位置影响有其特殊性。观测时只能在桥墩上安置仪器，由于墩上铺设了大梁，造成墩台两端不能通视，如图 10－21 中 I 号墩上 3 号点安置仪器看不到 4 号点，并且还不能观测该墩置仪器这端的观测点，只能观测前后两墩上的观测点。如 3 号点设站观测 1、5 号点。这样观测路线宜按下述办法组成：

（1）墩台上下游两端分别组成观测路线，即 1、3、5、7、9 和 2、4、6、8、10 分别为两条路线。

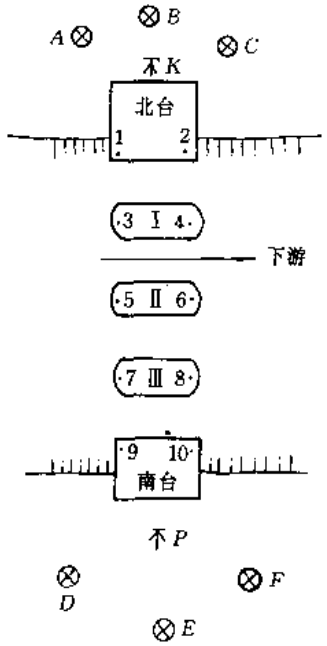


图 10—21

(2)K、P 为两岸仪器站，则 K、3、7、P 为往测仪器站，K、1、5、9、P 为返测仪器站。

(3) 另一条路线也照此法组成观测路线。

这种水准路线，由于受墩台位置限制，墩台间隔又不一样，近则二三十米，远则上百米，因此不能保证前后视距近于相等，前后视距差可能上百米。为此，观测所用仪器的检校应格外仔细，特别是仪器的 i 角应尽可能小。

二、水平位移观测

水平位移观测因建（构）筑物类型的不同可有不同的观测方法。直线型建（构）筑物常用基准线法、引张线法、距离丈量法；曲线型建（构）筑物可用测角前方交会法、精密导线法；高层建筑顶部相对于底层偏移、竖直中心是否铅直（挠度）可用测角前方交会法，有条件可用经纬仪投点法；坝体铅直方向的挠度常用垂线法等。

(一) 基准线法

以通过建筑物轴线或平行建筑物轴线作为基准，根据它来测定建筑物的水平位移。以经纬仪的视准轴为基准线测定观测点的水平位移，称为视准线法测定水平位移。以激光束作基准线是测定水平位移的新方法。以拉直的钢丝作为基准，在大坝的廊道内测定坝体的偏移的办法称为引张线法。

视准线法测定水平位移的要点是：在建筑物的一端安置经纬仪，另一端设置固定标志，沿仪器中心与固定标志中心连线方向的建筑物上设置若干观测点，如图 10—22 中的 1、2、3、4、5、6 点，定期观测这些点偏离基准线的距离，求出各观测点不同时期的偏离值差数，即为各点在垂直于视准线方向上的水平位移值。

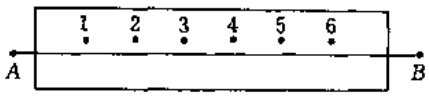


图 10—22

视准线法按使用的工具和作业方法不同有：测小角法、活动觇牌法。

由于建筑物的水平位移一般很小，对水平位移观测的精度要求能反映 1～2mm 的位移值。因而从观测工具到方法都需精心设计和施工。基准线的端点要设置强制对中装置，用于作观测目标的觇牌也要精心设计与制作。

1. 测小角法

如图 10—23 所示，AB 为基准线两端点，A 点安置经纬仪，B 点设置固定目标，P 为观测点目标。测小角法是利用 A 点经纬仪，准确测出观测点（P）方向与基准线方向（AB）所夹小角 β。可用下式计算出 P 点偏离值 e：

$$e=\frac{\beta}{\rho}\cdot S \qquad (10-9)$$

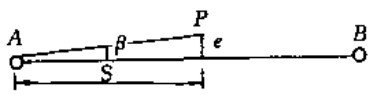


图 10—23

式中 S 为端点 A 到观测点 P 的距离，$\rho=206265$。

为了设计观测精度，对上式进行误差讨论。将式（10－9）进行全微分，并转成误差公式，得：

$$m_e^2=\frac{1}{\rho^2}S^2m_\beta^2+\frac{1}{\rho^2}\beta^2m_s^2 \tag{10-10}$$

由于 S 的丈量精度容易满足，为此令

$$\frac{1}{\rho}Sm_\beta=9\,\frac{\beta}{\rho}m_s \tag{10-11}$$

代入式（10－10）整理后得：

$$m_s=\frac{\rho m_e}{10\beta}$$

顾及式（10－9），上式写成：

$$m_s=\frac{m_e\cdot S}{10\cdot e} \tag{10-12}$$

写成相对误差：

$$\frac{m_s}{S}=\frac{m_e}{10e} \tag{10-13}$$

当要求 $m_e=0.5$mm，设偏移值 $e=50$mm，则有 $\frac{m_s}{S}=\frac{1}{1000}$；当 $e=100$mm 时，$\frac{m_s}{S}=\frac{1}{2000}$。实际工作中 1/3000 的丈量精度仅是图根级边长测量精度。实际上，按可忽略原则，由式（10－10）可知，边长丈量的误差可忽略不计，则位移值的误差仅受小角测量精度影响，于是有：

$$m_e=\frac{m_\beta}{\rho}\cdot S \tag{10-14}$$

由图 10－22 可知，1、2、…、6 各点距端点 A 的距离 S 不等，所以当测小角精度 m_β 一定时，m_e 与 S 成正比。设 $m_e=0.5$mm，$S=500$m，则有：

$$m_\beta=\frac{m_e\cdot\rho}{S}=\frac{0.5\times206265}{500000}=\pm0.34''$$

用 J1 级仪器以测回法测小角，则需要测回数 n 为：

$$n=\frac{(1\cdot\sqrt{2})^2}{(0.34)^2}\approx18$$

J1 级仪器观测 18 测回不是件容易事，若用 J07 级仪器观测仅需 9 测回。

2. *活动觇牌法*

该法是用一种如图 10－24 式样的活动觇牌，该觇牌的标志中心相对于旋转轴可以平移，而移动量用测微螺杆测量，直读 1mm，估读到 0.1mm。

做法是将觇牌安置到观测点上，并且读得观测点标志中心通过觇牌标志中心时螺旋杆的读数，称为零位读数。当 A 点望远镜后视 B 点后，由助手用测微螺杆移动觇标，使觇标中心被望远镜十字丝照准。这时在测微螺杆上读得移动量 e，上述操作称为一测回。

这种方法测定 e 的精度主要与望远镜瞄准精度有关，与测小角法有相似的精度。为提高测定精度，对同一观测点需进行多测回观测。视准线法除用于大坝顶面水平位移观测，也可用于直线桥墩台沿水流方向位移的观测，并且比测小角法更为方便易行。

3. 引张线法

在图 10—22 中的 A、B 两点间用拉直（或称引张）金属丝作为基准来测定观测点水平位移值，将这种基准线法称为引张线法。

引张线装置由端点、观测点、测线（不锈钢丝）、测线保护管等部分组成。

(1) 端点。由墩座、滑轮、重锤、重锤连接部件和夹线装置组成（图 10—25a）。

(2) 观测点。由浮托、标尺保护箱等组成（图 10—25b）。若设置读数显微镜装置时，其测微分划线最小刻划为 0.1mm，估读到 0.01mm。

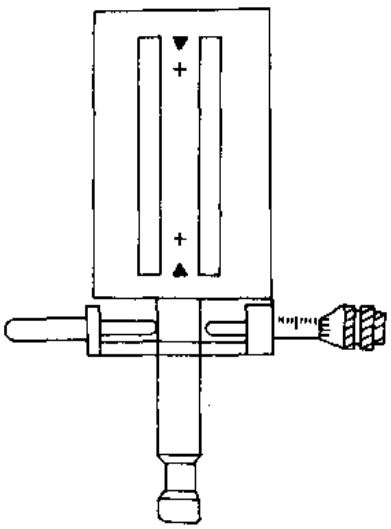


图 10—24

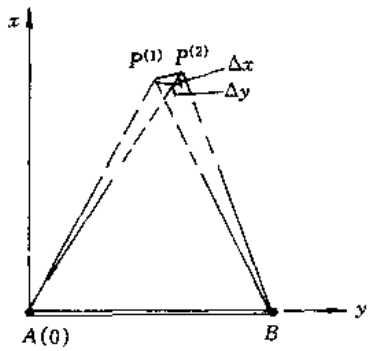


图 10—26

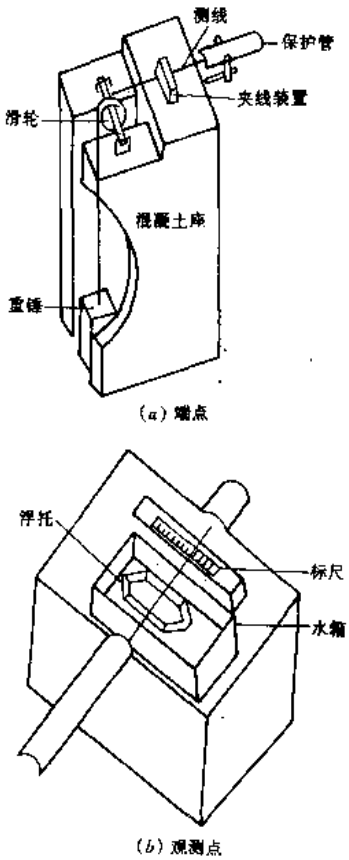


图 10—25

(3) 测线及保护管。引张线是假定两端点固定不动，即固定的基准线。各观测点上的标尺与建筑体固联，所以不同的观测周期，钢丝在标尺上的变化值就直接表示该观测点的位移值。

(二) 距离测量法

精密测量观测点至基准点间的水平距离，比较各次测量的距离，确定观测点相对于基准点的水平位移。距离远时可用精密测距仪（如 ME5000），距离近时（几米或几十米）用铟瓦基线尺。例如铁路桥墩受列车运行时振动与冲击可引起顺桥轴线方向位移，可用这里

所述距离测量法测定各墩台顺桥轴线方向水平距离。

（三）测角前方交会法

通过测角前方交会的办法，测算出观测点的坐标，比较不同周期的坐标求出位移值和位移方向。现在有了计算机，甚至一台程序型计算器都能方便地完成计算工作。

如图 10－26 所示，P 为观测点，当算出相邻周期的坐标即可算出 P 点位移分量：

$$\left.\begin{aligned}\Delta x_P &= x_P^{(0)} - x_P^{(i)} \\ \Delta y_P &= y_P^{(0)} - y_P^{(i)}\end{aligned}\right\} \tag{10-15}$$

P 点的位移值

$$\Delta D = \sqrt{\Delta x_P^2 + \Delta y_P^2} \tag{10-16}$$

P 点位移方向

$$a = \tan^{-1}\frac{\Delta y_P}{\Delta x_P} \tag{10-17}$$

式中 $x_P^{(0)}$、$y_P^{(0)}$，$x_P^{(i)}$、$y_P^{(i)}$ 分别是 P 点第一次和任意一次观测的坐标值。

需要指出的是，这里的位移方向是相对于变形观测独立坐标，如果需要知道其在城市坐标系中位移方向，需将 A、B 点与城市控制网联测。

为了获得较高的精度，须采取一些减少误差的措施，如选择有利的观测点的标志和强制对中（测站点）设施，以基本消除目标的对中偏差。设计较好的图形，可用下式估算点位精度：

$$m_P = \frac{m_\beta}{\rho}\sqrt{\frac{(\sin^2 A + \sin^2 B)\cdot D^2}{\sin^4(A+B)}} \tag{10-18}$$

式中 m_β 为测角中误差；$\rho = 206265''$

由式（10－18）看出，当交会图形一经确定，即 A、B、P 已确定，为提高点位精度须提高测角中误差（选仪器和确定测回法）。经验证明，当交会边长 100m 左右，较好的交会图形，J1 级经纬仪 6 个测回，P 点测定中误差可为 1～2mm。

前方交会不仅用于测定单个点的位移值（如桥墩），也可用于倾斜观测。如图 10－27 只要测定 C 与 C' 点的坐标，便可根据 C' 与 C 的坐标差解得 C' 相对底点 C 的偏移值 $e_{cc'}$，进而求得倾斜方向和倾斜率，倾斜率用下式计算

$$i = \tan\delta = \frac{e_{cc'}}{H} \tag{10-19}$$

式中 H 为建筑物的高度；δ 为 $C'C$ 的倾斜角度。

前方交会法用于烟囱的倾斜观测时按如下办法进行观测。距烟囱一定远外（$1.5H$～$2.0H$，H 为烟囱高）设置 A、B 两点（图 10－28），以 A 点为坐标原点，AB 方向为 y 轴，垂直 AB 方向为 x 轴，将整个建筑物置于坐标系第一象限。

置经纬仪于 A，量取仪器高 i，分别进行底部和顶部观测。

底部观测时后视 B 点，然后用十字丝中心照准烟囱底部左侧切点（注意该点选在建筑物轮廓整齐部位），读取方向值和天顶距，并在观测者指挥下在切点处做上标记，记为观测点 $T_下^{(1)}$；制动望远镜，保持视线高度不变（保持视线倾角不变），水平方向转动照准部，照准烟囱右侧切点 $T_下^{(2)}$，读取方向值，同时在 $T_下^{(2)}$ 处做标记。以后各测回只需照准 $T_下^{(1)}$、$T_下^{(2)}$ 的标记测水平方向值和天顶距即可。

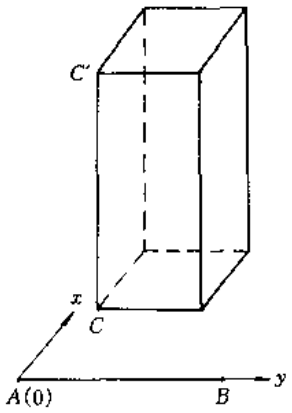


图 10－27

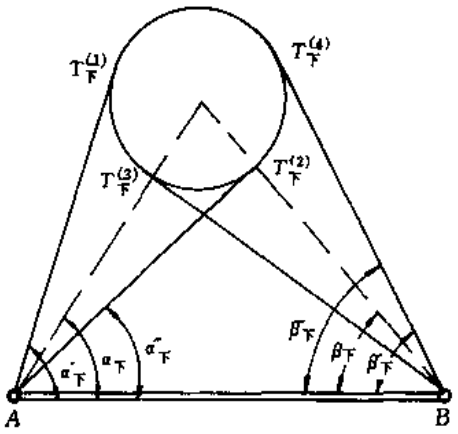


图 10－28

顶部观测时不需丈量仪器高，在 A 点仰起望远镜，用观测底部的办法观测顶部切点。

迁站于 B，后视 A，重复上述方法观测，但须保持照准的切点与 A 点照准的切点同高。

计算角 $\alpha_{下}$ 与 $\beta_{下}$ 和 $\alpha_{上}$ 与 $\beta_{上}$：

$$\left.\begin{aligned}\alpha_{下}&=(\alpha'_{下}+\alpha''_{下})/2\\ \beta_{下}&=(\beta''_{下}+\beta''_{下})/2\end{aligned}\right\}\qquad(10-20)$$

同理可算得 $\alpha_{上}$ 与 $\beta_{上}$。

利用 $\alpha_{下}$、$\beta_{下}$、$\alpha_{上}$、$\beta_{上}$，用前方交会余切公式分别计算出底部和顶部圆心坐标（$x_{下}$、$y_{下}$）、（$x_{上}$、$y_{上}$）。

烟囱高度计算：

$$\begin{aligned}H&=H_{上}-H_{下}\\&=\tan\delta_{上}\cdot\cos\frac{\alpha''_{上}-\alpha'_{上}}{2}\cdot\sqrt{(x_{上}-x_A)^2+(y_{上}-y_A)^2}\\&\quad-\tan\delta_{下}\cdot\cos\frac{\alpha''_{下}-\alpha'_{下}}{2}\cdot\sqrt{(x_{下}-x_A)^2+(y_{下}-y_A)^2}\end{aligned}\qquad(10-21)$$

式中 $\delta_{上}$、$\delta_{下}$ 分别为观测烟囱顶部和底部时的视线倾角，由天顶距算得。

根据坐标可按式（10－16）、（10－17）及（10－19）计算顶部位移值、倾斜方向和倾斜率。前方交会法用于烟囱几何中心挠度观测时，要将烟囱分成几层（或几段），如 10m 一段，顺着烟囱向上量，用上面介绍的前方交会法测算出各层中心坐标，从而得到烟囱几何中心的挠度。实际工作时，有时不可能将设计的间隔丈量出来，可采用如下办法：

（1）于图 10－28A 点设站，用上述办法观测底层两切点的方向值和倾角。在观测底层切点的同时，用钢尺丈量切点（做标记）到 A 的水平距离 D_A，而后用下式计算底层高程：

$$H_1=H_A+i_A+D_A\tan\delta_{A-1}\qquad(10-22)$$

（2）仍在 A 观测以上各层。由于层间隔均设计为 l，利用底层高程和各层间隔即能算出各层高度，如 n 层高度为：

$$H_n=H_1+(n-1)\,l\qquad(10-23)$$

用底层切线的平距 D_A，近似代替各层切线的平距，可算得第 n 层切点的倾角为：

$$\delta_{An}=\tan^{-1}\frac{H_n-H_A-i_A}{D_A} \tag{10-24}$$

观测 n 层切线方向值前，将望远镜置于倾角 δ_{An} 的位置，固定望远镜，水平转动照准部，分别照准烟囱左右（以测站观测烟囱）得切点方向值 $\alpha_n=$（2，3，…$m_{顶层}$）。

（3）在 B 点设站，后视 A，量取仪器高 i_B，对底层观测。按 H_1 高度标出底层切点，丈量 B 至切点的平距 D_B，观测底层左右两切点方向值。而后仿式 10－24 计算出各层的倾角 $\delta_{B.n}$，即可以测得各层切点的方向值 β_n。

用前方交会进行变形观测方便灵活，不需特殊装置，应用的是大多测绘单位（甲、乙级测绘证单位）都拥有的常规精密仪器，所以在变形监测工作中应用得较多。

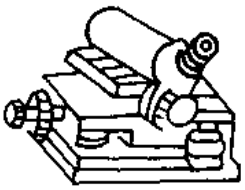


图 10－29

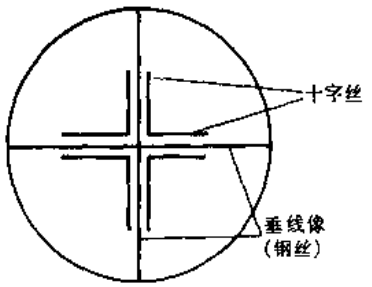


图 10－30

（四）垂线法

垂线法是利用铅垂线作为基准线以测定建筑物在各个不同高度处与铅垂线的相对水平位移，按重锤所在位置不同分为正垂线和倒垂线（关于垂线装置在第九章已有叙述）。为了观测建筑物水平位移，在悬挂垂线的管道内将垂线观测坐标仪安置在建（构）筑物上，在不同高度处设站观测，则可以测算出建筑物的倾斜或挠度。

垂线观测坐标仪简称垂线仪（图 10－29），它的照准部光学系统能使来自垂线的光线分做两路：一路直接经过物镜在分划板上成像，另一路在垂直的方向由棱镜反射并旋 90°后进入物镜，也在分划板上成像。观测时从两个方向转动望远镜。当照准垂线后，在目镜中可以看到相交成 90°的垂线像（图 10－30），其交点代表垂线的平面位置。一测回照准钢丝两次读数一般不要超过 0.3mm，根据需要可进行多测回观测，测回间互差不超过 0.3mm。

（五）经纬仪投点法

投点法测定建筑物倾斜主要用于外轮廓规则的建筑物，如图 10－31 所示高楼房倾斜的观测。

1. 测站与观测点设置

在楼顶向外倾斜一角（如 1）设置观测点，用钢尺实量楼高 H；在 A_1 的延长线方向上且距 1 点约 $1.5H$ 的地方设置测站 A 点，在 A_2 的延长线上且距 1 约 $1.5H$ 的地方设置测站 B 点。

2. 观测

在 A 和 B 点同时安置经纬仪，先照准上部 1′标志，然后将点投到地面上为 1″；准确丈量 ΔD，在 $B1$ 的延长线上丈量 $B1''$在延长线上丈量 Δy，在 $A1''$延长线上丈量 Δx，并用下式检校：

$$\Delta D_{算}=\sqrt{\Delta x^2+\Delta y^2} \qquad (10-25)$$

在地面上丈量的 ΔD 及 Δx、Δy 的数值均不会很大，少则几毫米、几厘米，偏移值达到米级是很少的情况。在这样近的距离丈量准确到毫米是不难的，所以 $\Delta D_{算}$ 与丈量值 ΔD 之差不超过 3mm 是很容易做到的。

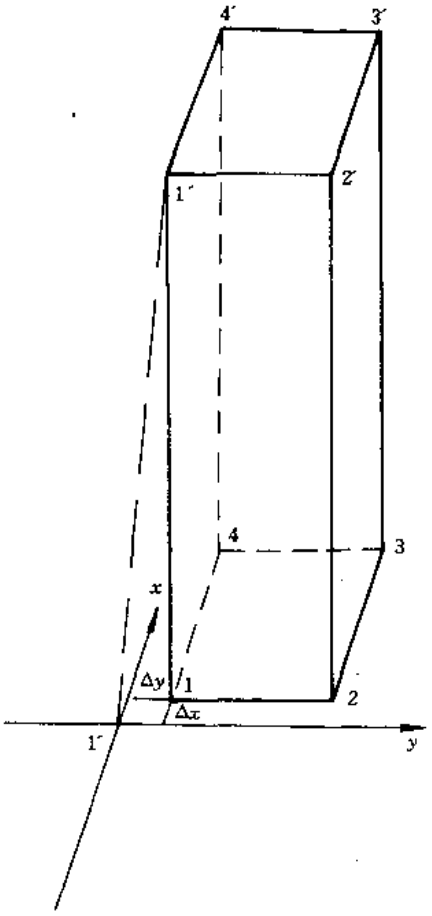


图 10－31

第七节　滑　坡　观　测

滑坡是一种不良地质现象，有时会产生很大危害，如某露天煤矿曾发生过几次滑坡，滑体从上一直冲到坑下，位于该露天坑帮的铁路运输线全部塌毁，致使日产 1.5 万 t 煤的露天矿停产。像长江三峡大坝筑起后，上游水位升高，两岸原自然地表受到浸泡和冲刷，可导致山体滑坡。研究三峡上游两岸是否稳定，对三峡的建设和开发有极其重要的意义。

为了掌握滑坡规律，制定治理措施，保证安全生产，或减少滑坡造成的灾害损失，需进行滑坡观测。观测内容为：滑体范围、滑动量、滑动方向、倾角、速度和规律等。

滑坡观测属于三维观测，既要观测点的水平位移，又要观测其垂直位移，从而得到各观测点的综合位移量。

滑坡观测常需设置多条观测线，如图 10－32 所示，观测线走向大体垂直滑动方向。根据地形条件也可将观测线设计成垂直于边坡走向，即与滑动方向相同。观测线间距视滑体范围、坡度、地表起伏状况等确定。每条观测线由观测点和基准点组成。基准点设计在预计稳定地区，每条观测线一端至少设置两个基准点，两基准点间距一般为 20～50m 远。所有观测线的基准点应能联测成网（目前以测距导线网居多）。每条观测线的观测点也要视地表情况而定，若成台阶状边坡，则每台阶边沿和坡脚处设置观测点，若是不均匀的山坡，也仿台阶状边坡设置观测点。观测点距离视观测范围大小和起伏情况而定，一般 5～50m 设一个点。有的山坡分段滑动，则每段边界处都应设置观测点。

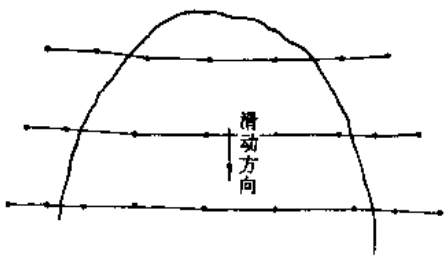


图 10－32

基准点和观测点均应埋设永久性标石。为保持基准点稳定，基准点最好埋设在基岩上，观测点要埋在冻土线 0.5m 以下。

滑坡观测周期视滑体滑动速度而定，一般旱季每三个月观测一次，雨季每月观测一次，如遇暴雨、地震、解冻或滑动加快，须及时增加观测次数。一般情况下，滑坡平面位移观

测精度比建筑沉降观测偏低些，各行业规范的规定有差别，可执行本行业的规范，或就高执行，或针对具体工程设计观测精度，免得观测精度过低而耽误对滑坡形成的判断与预报。基准点联成网观测后，要根据网形选取相应的平差方法，以使各观测线的基准点坐标统一。

观测点的观测精度通常比基准点低一些。目前多采用光电测距导线或光电测距极坐标法测定各观测点平面位置。首次观测时对那些无检核条件测定的点要增加观测次数。可用前方交会法测定位于危险地方的观测点的平面位置。也有将GPS全球卫星定位系统应用于滑坡观测，按设计精度施测。

垂直位移观测与水平位移观测同步进行，其观测精度要事先设计。基准点用水准测量法施测，对于观测点测量可用水准测量法，也可用光电测距三角高程，在水平位移观测的同时进行三角高程的观测。若用GPS全球定位系统经设计高程能满足要求时可直接测算出三维坐标值。

第八节　变形监测网的稳定性检验与分析

变形观测包含了变形监测网的测量与变形观测点的测量，欲知观测点的变形，首先关心的是监测网网点是否稳定。监测网点是否稳定主要从同一点的重复观测平差计算成果（平面位置或高程）的对比分析得知。

变形监测网点是否稳定的判断有三个主要问题要解决：一是用于监测网平差的观测值不能含有粗差；二是合理的平差方案；三是应用有效的方法，检验或反映网点的移动。本节就这方面几个基本问题给予介绍。

一、含有小粗差观测值的检验

这里所谓含有小粗差的观测值是指那些在外业依规范规定符合各类限差要求的观测值中，有的观测值仍含有较大的误差，有文献称它为小粗差。这种含有小粗差的观测值对高精度的变形监测网的精度影响很显著，但又不能用简单的办法把它挑出来，必须采取更有效的办法去发现和剔除小粗差。

（一）直接观测平差时单个小粗差的检验

设对某一量 x 进行 n 次等精度观测，其观测值为 L_i（$i=1, 2, \cdots, n$），均符合观测限差要求。试检验其是否含有小粗差。有三种方法。

1. 用单位权中误差估值检验小粗差

步骤如下：

（1）计算这一组观测值的最或然值：

$$x=\frac{1}{n}(L_1+L_2+\cdots+L_n)=\frac{[L]}{n} \tag{10-26}$$

（2）计算单位权中误差估值：

$$\hat{\sigma}_0=\sqrt{\frac{[vv]}{n}} \tag{10-27}$$

（3）用小粗差检验的准则进行检验

$$|V|>L_{a,n}\cdot\hat{\sigma}_0 \tag{10-28}$$

式中 a 为显著水平；n 为观测值个数；$L_{a,n}$是由 a、n 为引数在表 10—7 中查取的（母体均值未知，母体方差未知）最大$\left|\frac{\bar{x}-x_i}{m}\right|$的上百分值点。

表 10—7 格拉布斯 $L\alpha$，n 数值表

n \ a	0.10	0.05	0.01	n \ a	0.10	0.05	0.01	n \ a	0.10	0.05	0.01
3	1.15	1.15	1.15	16	2.43	2.58	2.85	29	2.72	2.89	3.22
4	1.46	1.48	1.50	17	2.46	2.62	2.89	30	2.73	2.90	3.24
5	1.67	1.71	1.76	18	2.49	2.65	2.93	35	2.80	2.97	3.31
6	1.82	1.89	1.97	19	2.52	2.68	2.97	40	2.85	3.03	3.38
7	1.93	2.02	2.14	20	2.55	2.70	3.00	45	2.90	3.08	3.43
8	2.02	2.12	2.27	21	2.57	2.73	3.03	50	2.94	3.12	3.48
9	2.10	2.21	2.39	22	2.59	2.75	3.06	55	2.98	3.16	3.52
10	2.17	2.29	2.48	23	2.61	2.78	3.09	60	3.01	3.19	3.56
11	2.22	2.35	2.56	24	2.63	2.80	3.11	70	3.07	3.25	3.62
12	2.26	2.41	2.64	25	2.65	2.82	3.13	80	3.12	3.30	3.67
13	2.32	2.46	2.70	26	2.67	2.84	3.16	90	3.16	3.34	3.72
14	2.36	2.50	2.75	27	2.69	2.85	3.18	100	3.20	3.38	3.75
15	2.40	2.54	2.81	28	2.70	2.87	3.20				

2. 数据探测法

基本公式及说明：

$$W_i=\frac{|V_i|}{\sqrt{r_i\cdot m_{L_i}}}\sim N\ (0,\ 1)\ (i=1,\ 2,\ \cdots,\ n) \tag{10—29}$$

式中 V_i 为观测值改正数，设服从正态分布；m_{L_i}为观测值中误差；W_i 称为标准化残差，在不存在粗差时，$W_i\sim N\ (0,\ 1)$ 正态分布，否则 L_i 中含有小粗差。

r_i 在可靠性理论中为多余观测分量，用下式计算：

$$r_i=\ (Q_vP)_{ii}=Q_{v_iv_i}P_i \tag{10—30}$$

直接观测平差时：

$$Q_{v_iv_i}=\frac{1}{P_i}-\frac{1}{[P]} \tag{10—31}$$

式中 P_i 为观测值 L_i 的权。

将式（10—31）代入式（10—20）中：

$$r_i=\left(\frac{1}{P_i}-\frac{1}{[P]}\right)P_i=\frac{[P]\ -P_i}{[P]} \tag{10—32}$$

等精度观测时，$P=E$，则上式为：

$$r_i=\frac{n-1}{n}$$

例如在一测站上，进行了9测回观测，某方向观测值列于表10—8中，J_2级仪器观测，归零方向值各测回互差符合观测限差，检验是否有小粗差存在。

表10—8 某方向观测值

序号	观测值 ° ′ ″	序号	观测值 ° ′ ″	序号	观测值 ° ′ ″
1	44 44 56.7	4	44 44 58.4	7	44 44 54.9
2	55.2	5	57.6	8	56.7
3	50.5	6	55.5	9	57.8

解：方法一

最或然值 $x=44°44'55.92''$

改正数向量 $V=[0.78,0.72,5.42,2.48,-1.68,0.42,-1.68,-0.78,-1.88]^T$

单位权中误差估值

$$\hat{\sigma}_0=\sqrt{\frac{[vv]}{n}}=\pm 2.23''$$

表10—9 W_α数值表

W_α	α
1.96	0.05
2.56	0.01
3.00	0.0027
3.29	0.001

检验：

取显著水平$\alpha=0.05$，n为9，在表10—7中查取$L_{\alpha,n}=2.21$。

$$L_{\alpha,n}\cdot\hat{\sigma}_0=2.21\times 2.23''=4.93''$$

$|v_3|>4.93''$故第3测回含有小粗差，应舍掉补测再重新检验。

方法二

最或然值与改正数向量同上，多余观测分量为：

$$r_i=\frac{9-1}{9}=\frac{8}{9}$$

取$m_3=\pm 2.5''$，应用式（10—29）算得W_i向量：

$$W_i=[0.33,\ 0.3,\ 2.3,\ 1.05,\ 0.71,\ 0.18,\ 0.43,\ 0.33,\ 0.8]^T$$

取显著水平$\alpha=0.05$，查表10—9，W_α为1.96，$W_3>W_\alpha$，则认为L_3的方向值含有小粗差，应舍去补测，再重新检验。

3. 单个粗差t检验法

作统计量：

$$t_i=\frac{|v_i|}{\hat{\sigma}_{i_i}\sqrt{Q_{v_iv_i}}}\sim t\ (n-t-1) \tag{10—33}$$

σ_{ii}用下式求得：

$$\hat{\sigma}_{ii}^2=\frac{1}{n-t-1}\left(V^TPV-\frac{P_iV_i}{r_i}\right) \tag{10—34}$$

式中 n——观测值个数；

t——未知数个数；

$\hat{\sigma}_0$——平差后观测值单位权中误差估值

例如仍用上例之观测值，试用 t 检验法检验该组方向值是否含有小粗差。

解：最或然值与改正数向量同前。

由式 10－34 知：

$$\hat{\sigma}_{t3}^2=\frac{1}{9-1-1}\left[44.8365-\frac{5.42}{\frac{9-1}{9}}\right]=5.534$$

$$\therefore\quad \hat{\sigma}_{t3}=\sqrt{5.534}=\pm 2.35$$

取显著水平 $a=0.05$，$n-t-1=7$，查 t 分布表 10－10，得 $t_a=1.89$。显然 $t_3>t_a$，则第三方向值含有小粗差，应舍去补测，重新检验。

表 10－10　t 分布表摘录（$p\{t(n)>t_a(n)\}=\alpha$）

n	$\alpha=0.25$	0.10	0.05	0.025	0.01	0.005
1	1.0000	3.0777	6.3138	12.7062	31.8207	63.6574
2	0.8165	1.8856	2.9200	4.3027	6.9646	9.9248
3	0.7649	1.6377	2.3534	3.1824	4.5407	5.8409
4	0.7407	1.5332	2.1318	2.7764	3.7469	4.6041
5	0.7267	1.4759	2.0150	2.5706	3.3649	4.0322
6	0.7176	1.4398	1.9432	2.4469	3.1427	3.7074
7	0.7111	1.4149	1.8946	2.3646	2.9980	3.4995
8	0.7064	1.3968	1.8595	2.3060	2.8965	3.3554
9	0.7027	1.3830	1.8331	2.2622	2.8214	3.2498
10	0.6998	1.3722	1.8125	2.2281	2.7638	3.1693
11	0.6974	1.3634	1.7959	2.2010	2.7181	3.1058
12	0.6955	1.3562	1.7823	2.1788	2.6810	3.0545

（二）直接观测平差含有多个小粗差的检验

对同一个量进行多次重复观测，假如观测质量不高，虽然符合观测限差要求，但误差分布较离散，这样的观测值用于网的整体平差，势必对网的精度产生坏影响，为此，要把那些小粗差的观测值检测出来予以剔除。用两步法检验小粗差效果较好。首先用向后选择法确定小粗差的个数及位置，然后用向前删去法进行检验，最后确定小粗差。步骤如下：

（1）用全部观测值计算最或然值 $\bar{x}_0$ 和方差估值 $\hat{m}^2$，将 $\left|\frac{x_i-\bar{x}_0}{m}\right|$ 最大的一个所对应的观测值归入小粗差观测值列。

（2）用 $n-1$ 个观测值计算均值 $\bar{x}_1$ 和偏差平方和 m_1^2，将 $\max\left(\frac{|x_i-\bar{x}_1|}{m_1}\right)$ 所对应的观测值列入小粗差观测值中。

(3) 重复 (2)，直到计算出的观测值方差比较合理为止，剩 K 个观测值，同时将观测值排序，把可能含有小粗差的观测值排在前面。

(4) H_0：$n-k+1$ 观测值中无小粗差，则统计量为：

$$T_{nk}=\frac{|x_k-\bar{x}_{k-1}|}{m_{k-1}} \tag{10-35}$$

式中：

$$\bar{x}_{k-1}=\frac{\sum_{j=1}^{n}x_i}{n-k+1} \tag{10-36}$$

$$m_{k-1}^2=\sum_{j=k}^{n}(x_j-\bar{x}_{k-1})^2 \tag{10-37}$$

若 $T_{n,k}<t_0\ (t,\ i,\ a)$，是接受 H_0，继续做下一步。分位值 $t_0\ (a)$ 见表 10-11。

表 10-11 分位值 $t_0\ (\alpha)$ 数值表

$t_0=(k,\ i,\ a),\ a=0.05$							$t_0=(k,\ i,\ a),\ a=0.01$						
k	i	n					k	i	n				
		10	15	20	30	50			10	15	20	30	50
2	1	0.783	0.695	0.632	0.547	0.450	2	1	0.844	0.764	0.700	0.608	0.501
2	2	0.789	0.698	0.633	0.546	0.450	2	2	0.836	0.757	0.691	0.604	0.598
3	1	0.804	0.711	0.643	0.554	0.454	3	1	0.860	0.779	0.711	0.616	0.505
3	2	0.806	0.714	0.640	0.552	0.453	3	2	0.853	0.772	0.702	0.609	0.502
3	3	0.796	0.705	0.632	0.546	0.450	3	3	0.846	0.759	0.693	0.605	0.498
4	1	0.825	0.727	0.655	0.561	0.458	4	1	0.873	0.795	0.724	0.623	0.509
4	2	0.832	0.734	0.653	0.559	0.458	4	2	0.872	0.791	0.716	0.617	0.506
4	3	0.820	0.723	0.642	0.554	0.454	4	3	0.862	0.777	0.704	0.611	0.502
4	4	0.811	0.711	0.634	0.546	0.450	4	4	0.848	0.762	0.694	0.606	0.498
5	1	0.844	0.745	0.668	0.568	0.461	5	1	0.882	0.811	0.736	0.632	0.514
5	2	0.854	0.752	0.666	0.567	0.461	5	2	0.893	0.803	0.728	0.625	0.510
5	3	0.837	0.744	0.653	0.559	0.458	5	3	0.575	0.789	0.716	0.617	0.506
5	4	0.839	0.729	0.634	0.552	0.454	5	4	0.870	0.777	0.705	0.611	0.502
5	5	0.841	0.717	0.635	0.546	0.450	5	5	0.866	0.763	0.695	0.606	0.498

(5) H_{01}：$n-k+2$ 个观测值中无小粗差，其统计量为：

$$T_{n,k-1}=\frac{|x_{k-1}-\bar{x}_{k-2}|}{m_{k-2}} \tag{10-38}$$

式中：

$$\bar{x}_{k-2}=\sum_{j=k-2}^{n}x_j/\ (n-k+2) \tag{10-39}$$

$$m_{k-2}^2=\sum_{j=k-2}^{n}(x_j-\bar{x}_{k-2})^2 \tag{10-40}$$

若 $T_{n,k-1}<t_0\ (k,\ i,\ a)$，则接受 H_{01}，并做下一步。

(6) 重复步骤 (5)，直到拒绝原假设为止，从而可判定含小粗差的观测值。

例如，对某观测值 x 进行 10 次观测，其观测值如表 10-12 中 x_i 项，试检验是否有小粗差，并确定位置。

表 10－12 观　测　值

n	$T_{n,1}=\|x_i-x_{i-1}\|m_{i-1}$				
	x_i	全体样本	去掉样本 2	去掉样本 2、8	去掉样本 2、8、5
1	1.4	0.162	0.144	0.084	0.064
2	12.4	0.381	—	—	—
3	0.4	0.252	0.331	0.363	0.496
4	2.6	0.050	0.081	0.252	0.735
5	4.6	0.127	0.456	0.810	—
6	1.0	0.198	0.219	0.196	0.160
7	0.8	0.216	0.256	0.252	0.272
8	5.9	0.245	0.699	—	—
9	1.8	0.125	0.069	0.028	0.288
10	1.0	0.198	0.219	0.196	0.160

解：按步骤（1）、（2）、（3）可得出，$k=4$，其相应观测值为：

$$\{12.4,\ 5.9,\ 4.6,\ 2.6\}$$

由式（10－35）～（10－37）得 $T_{10,4}=0.735<t_0$（4，4，0.05）$=0.811$，说明观测值 2.6 不含小粗差。

由式（10－38）～（10－40），得 $T_{10,3}=8.10<t_0$（4，3，0.05）$=0.820$，说明 4.6 也不含小粗差。

同理得 $T_{10,2}=0.669<t_0$（4，2，0.05）$=0.832$ 说明 5.9 也不含小粗差。$T_{10,1}=0.831>t_0$（4，1，0.05）$=0.825$，说明 12.4 含有粗差。

（三）监测网中含有小粗差的观测值的检验

检验监测网中含有小粗差的观测值的方法有多种，本文只介绍两种方法，即 t 检验法与统计量法。

1. t 检验法

选择适当的平差方法将监测网进行平差，利用改正数 V 和中误差检查小粗差。

设改正数列向量为：

$$V=(V_1,\ V_2,\ \cdots,\ V_n)^{\mathrm{T}} \tag{10-41}$$

按间接平差得改正数 V 的协因数阵为

$$Q_{vv}=P^{-1}-BQ_{LL}B^{\mathrm{T}} \tag{10-42}$$

式中 P^{-1}——观测值的权倒数阵；

B——误差方程式的系数矩阵；

改正数 V_i 的权倒数就是 Q_{vv} 的对角线元素 $Q_{v_iv_i}$。用 t 检验法做统计量。

$$t=\frac{|V_i|}{\hat{\sigma}_0\sqrt{Q_{vv_i}}}\sim t\ (r) \tag{10-43}$$

式中 $\hat{\sigma}_0$——平差后的单位权中误差估值；

r——自由度，即监测网的多余观测数。

选显著水平 a，当

$$t=\frac{|v_i|}{\hat{\sigma}_0\sqrt{Q_{v_iv_i}}}\sim t_{\frac{\alpha}{2}(r)} \tag{10-44}$$

经变化为：

$$|v_i|>t_{\frac{\alpha}{2}}\cdot\hat{\sigma}_0\sqrt{Q_{v_iv_i}} \tag{10-45}$$

由上式可判定观测值 L_i 含有小粗差，应剔除并补测。式中临界值 $t_{\frac{\alpha}{2}(r)}$ 是以 $\frac{\alpha}{2}$ 和 r 为引数，在 t 分布表中查取。

例如某测角网，平差后的单位权中误差估值为 $\hat{\sigma}_0=2.02''$，多余观测数 $r=9$，观测值 L_4 的改正数 $v_4=4.4''$，其权倒数 $Q_{v_4v_4}=0.65$，试问该观测值是否有小粗差？

作统计量：

$$t=\frac{|v_4|}{\hat{\sigma}_0\sqrt{Q_{v_4v_4}}}=\frac{4.4''}{2.02''\sqrt{0.65}}=2.77$$

取显著水平 $\alpha=0.05$，从 t 分布表中查得临界值：

$$t_{\frac{\alpha}{2}(r)}=t_{0.025(9)}=2.26$$

$$t=2.77>t_{\frac{\alpha}{2}(r)}=2.26$$

故以 95%的概率判定观测值 L_4 含有小粗差。

2. 统计量法

单位权中误差未知，用其估值 $m=\sqrt{\frac{[\Delta\Delta]}{n}}$ 代替 σ_0，粗差检验准则是：

$$|\Delta|>L_{\alpha,n}\cdot m \tag{10-46}$$

式中 $L_{\alpha,n}$ 是以 α，n 为引数由表 10－7 中查取。

例如，一测距导线，每条边作了往返测，距离经过了各项化算，往返测距离较差列于表 10－13 中，试问观测值中是否含有小粗差？

表 10－13 往返测距离较差

边	较差 d_s（m）	边	较差 d_s（m）
1	0.015	8	0
2	−0.008	9	−0.002
3	−0.004	10	0.006
4	0.003	11	0.030
5	−0.005	12	0.007
6	−0.012	13	0.008
7	0.010	14	0.004

解：各边长大致相等，在相同条件下测量，故可认为精度相同，可应用 $m=\sqrt{\frac{[\Delta\Delta]}{n}}$ 计算 m，得：

$$m=\sqrt{\frac{[\Delta\Delta]}{n}}=\sqrt{\frac{0.001652}{14}}=0.011\ (\text{m})$$

取显著水平 $a=0.05$，由表 10－7 查得 $L_{0.05,14}=2.50$，代入式（10－46），得：

$$0.030>2.50\times 0.011$$

故该边含小粗差。

上述统计量数据探测法，一次只能探测一个小粗差。假如一个监测网中有多个观测值含有小粗差，最简单办法是采用一种向后选择法，即让全部观测值参加平差，进行一维的数据探测，去掉小粗差中最大的一个。然后用 $n-1$ 个观测值参与平差，再进行数据探测，以此类推直到无小粗差为止。

单个小粗差探测还有其它许多种方法，均要注意适用条件，以使检验有效。

二、监测网的变形分析

为保证变形监测网的精度和可靠性，平差前要对参加平差的观测值进行粗差检验和剔除；平差时选择合适的平差方法（一些专著中有专门论述），特别是当怀疑网中所有点都有动的可能时，应用秩亏自由网平差法较为适宜。平差出成果后，便需进行监测网点的变形分析。变形分析方法有许多种且涉及深奥的理论，这里仅就 F 检验法的应用和监测网灵敏度分析加以介绍。

（一）变形网点稳定性检验与分析

以水准网为例。设第一期经秩亏自由网平差后第 i 点高程为 $H_i^{(1)}$，第二期观测后求得该点高程为 $H_i^{(2)}$，两期平差成果之差值为：

$$\Delta H_i=H_i^{(2)}-H_i^{(1)}\quad (i=1,\ 2,\ \cdots,\ t)$$

则有：

$$H^{(2)}=\begin{bmatrix}H_1^{(2)}\\H_2^{(2)}\\\vdots\\H_t^{(2)}\end{bmatrix},\quad H^{(1)}=\begin{bmatrix}H_1^{(1)}\\H_2^{(1)}\\\vdots\\H_t^{(1)}\end{bmatrix},\quad \Delta H=\begin{bmatrix}\Delta H_1\\\Delta H_2\\\vdots\\\Delta H_t\end{bmatrix}$$

差值矩阵表达式为：

$$\Delta H=H^{(2)}-H^{(1)}\qquad (10-47)$$

差值的权系数阵为：

$$Q_{\Delta H}=Q^{(2)}+Q^{(1)}\qquad (10-48)$$

由差值 ΔH 可用下式计算单位权方差：

$$\hat{\sigma}_{\Delta H}^2=\frac{\Delta H^{\mathrm{T}}P_{\Delta H}\Delta H}{r_{\Delta H}}\qquad (10-49)$$

式中 $r_{\Delta H}$——独立的 ΔH 个数；

$P_{\Delta H}$——ΔH 的权矩阵，是 $Q_{\Delta H}$的伪逆，即 $P_{\Delta H}=Q_{\Delta h}^{+}$。 $(10-50)$

同时，由每期用秩亏自由网平差法获得的改正数 V 可计算该期的单位权方差：

$$\hat{\sigma}_{r_i}^2=\frac{(V^{\mathrm{T}}PV)^{(j)}}{m_j-(t-1)},\ (j=1,\ 2)\qquad (10-51)$$

式中 V——观测值改正数列矩阵；

P——观测值权矩阵；

m_j——第 j 期观测值的个数；

t——网中控制点个数。

由于两次观测时网形不变，按同技术要求施测，每期平差的改正数计算的单位权方差之间一般不会有较大差异，否则应查找原因，处理后再平差计算。当 $\hat{\sigma}_{r1}^2$ 与 $\hat{\sigma}_{r2}^2$ 无显著差别时，可用下式计算两期观测的综合单位权方差：

$$\hat{\sigma}_r^2=\frac{(V^{\mathrm{T}}PV)^{(1)}+(V^{\mathrm{T}}PV)^{(2)}}{r_1+r_2}=\frac{(V^{\mathrm{T}}PV)^{(1)}+(V^{\mathrm{T}}PV)^{(2)}}{r} \tag{10-52}$$

当对 $\hat{\sigma}_{r1}^2$ 与 $\hat{\sigma}_{r2}^2$ 是否差别显著不能判定时可对它们的同一性作 F 检验。先假设两期单位权方差相同，将 $\hat{\sigma}_{ri}^2$ 中大者作分子（设 $\hat{\sigma}_{r1}^2$ 较大），计算统计量：

$$F_0=\frac{\hat{\sigma}_{r1}^2}{\hat{\sigma}_{r2}^2} \tag{10-53}$$

选取显著水平 α，由第一自由度 r_1、第二自由度 r_2 从 F 分布表中查得分位值 r_α、r_1、r_2，若 $F_0<r_\alpha$、r_1、r_2，则接受原假设，即认为 $\hat{\sigma}_{r1}^2$ 与 $\hat{\sigma}_{r2}^2$ 无显著差异，而后进行点位稳定性的 F 检验。

假设在两期观测期间，网中全部控制点都是稳定的，则差值 ΔH 与观测值改正数均为正态变量，而 $\hat{\sigma}_{\Delta H}^2$ 与 $\hat{\sigma}_r^2$ 是同一正态母体方差 $\hat{\sigma}_0^2$ 的无偏估值，并且 $\Delta H^{\mathrm{T}}P_{\Delta H}\Delta H/\sigma_0^2$ 与 $[(V^{\mathrm{T}}PV)^{(1)}+(V^{\mathrm{T}}PV)^{(2)}]/\sigma_0^2$ 分别是 $x_{r\Delta H}^2$ 和 x_r^2 变量，它们相互独立。作统计量：

$$F=\frac{\dfrac{\Delta H^{\mathrm{T}}P\Delta H}{\sigma_0^2}/r\Delta H}{\dfrac{[(V^{\mathrm{T}}PV)^{(1)}+(V^{\mathrm{T}}PV)^{(2)}]}{\sigma_0^2}/r}=\frac{\hat{\sigma}_{r\Delta H}^2}{\hat{\sigma}_r^2} \tag{10-54}$$

根据 $\hat{\sigma}_{r\Delta H}^2$ 与 $\hat{\sigma}_r^2$ 值代入上式计算的统计量应服从 F 分布，选取显著水平 α，由第一自由度 $r_{\Delta H}$ 与第二自由度 r 查 F 分布表得到分位值 r_α、$r_{\Delta H}$、r。若 $F<r_\alpha$、$r_{\Delta H}$、r，接受原假设，即网中所有控制点都是稳定的；反之拒绝原假设，即网中存在动点。

为找出动点，将所有点依次分成动点组（选一个动点）A 和不动点组 B（去掉一个动点所剩点），对差值权矩阵 $P_{\Delta H}$ 作相应的分块：

$$\Delta H=\begin{bmatrix}\Delta H_{\mathrm{B}}\\ \cdots\cdots\\ \Delta H_{\mathrm{A}}\end{bmatrix},\quad P_{\Delta H}=\begin{bmatrix}P_{\mathrm{BB}} & P_{\mathrm{BA}}\\ P_{\mathrm{AB}} & P_{\mathrm{AA}}\end{bmatrix} \tag{10-55}$$

由上式可得：

$$\left.\begin{aligned}\overline{\Delta H}_{\mathrm{A}}&=\Delta H_{\mathrm{A}}+P_{\mathrm{AA}}^{-1}P_{\mathrm{AB}}\Delta H_{\mathrm{B}}\\ \overline{P}_{\mathrm{BB}}&=P_{\mathrm{BB}}-P_{\mathrm{BA}}P_{\mathrm{AA}}^{-1}P_{\mathrm{AB}}\end{aligned}\right\} \tag{10-56}$$

则有

$$\Delta H^{\mathrm{T}}P_{\Delta H}\Delta H=\Delta H_{\mathrm{B}}^{\mathrm{T}}\overline{P}_{\mathrm{BB}}\Delta H_{\mathrm{B}}+\overline{\Delta H}_{\mathrm{A}}^{\mathrm{T}}P_{\mathrm{AA}}\overline{\Delta H}_{\mathrm{A}} \tag{10-57}$$

依次将网中的点轮流作动点计算出 $(\overline{\Delta H}_{\mathrm{A}}^{\mathrm{T}}P_{\mathrm{AA}}\overline{\Delta H}_{\mathrm{A}})$，其中最大者为动点。

剔除动点，将剩余点再作 F 检验，作统计量：

$$F_1=\frac{\hat{\sigma}r_{\Delta HB}^2}{\hat{\sigma}_r^2} \tag{10-58}$$

式中
$$\hat{\sigma}_{r\Delta HB}=\frac{\Delta H_B^T\overline{P}_{BB}\Delta H_B}{r_{\Delta HB}} \tag{10-59}$$

当 F_1 小于相应的分位值时，分析即结束，否则继续剔除动点，继续检验，直到原假设被接受，最后剩下的是稳定的控制点。

（二）变形监测网的灵敏度

所谓变形监测网的灵敏度是指在给定的误差概率下（显著性水平 α 和检验功效 β），通过统计检验所能发现的变形向量的下界值。

设各同名网点不同观测周期位移向量为 ΔX，位移向量的协因数阵为 $Q_{\Delta X}$，做统计检验量：

$$F=\frac{\Delta X^T Q_{\Delta X}^1 \Delta X}{r_{\Delta X}\cdot\hat{\sigma}_r^2}\sim F\ (r_{\Delta X},\ r) \tag{10-60}$$

式中 $\hat{\sigma}_r^2$——位移向量的单位权方差；

$r_{\Delta X}$——相互独立的位移分量个数；

r——两期观测的自由度，$r=r_1+r_2$。

$$\hat{\sigma}_r^2=\frac{(V_T PV)_1+(V^T PV)_2}{r_1+r_2}$$

原假设 H_0 与备选假设 H_1 分别为：

$$\left.\begin{aligned}H_0:E\ (\Delta X)\ &=0\\ H_1:E\ (\Delta X)\ &=\Delta X\neq 0\end{aligned}\right\} \tag{10-61}$$

给出一定置信水平 α 时，统计量式（10－60）：

$$F/H_0\sim F\ (r_{\Delta X},\ r) \tag{10-62}$$

$$F/H_1\sim F\ (r_{\Delta X},\ r,\ \lambda) \tag{10-63}$$

式（10－62）表示网点不存在变形，式（10－60）服从中心化的 F 分布；式（10－63）表示网点存在变形，则式（10－60）服从非中心化 F 分布。λ 为非中心化参数，其值为：

$$\lambda=\frac{\Delta X^T Q_{\Delta X}^T \Delta X}{\hat{\sigma}_r^2} \tag{10-64}$$

有文献证明，统计量式（10－60）的值大于中心化 F 分由的临界值 $F_{1\frac{\alpha}{2}}\ (r_{\Delta X},\ r)$ 的概率，即检验功效：

$$\begin{aligned}\beta&=1-\int_{-\infty}^{F_{1-\frac{\alpha}{2}}(r_{\Delta X},r)} f_1\ (F)\ \mathrm{d}F\\ &=1-\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{F_{1-\frac{\alpha}{2}}(r_{\Delta X},r)}(\exp\ (-F-\lambda)^2/2)\ \mathrm{d}F\end{aligned} \tag{10-65}$$

由上式知，λ 越大，检验功效 β 越大，为此，定义非中心化参数，为变形观测网整体灵敏度的指标。

网中，对于任意的能被监测的变形向量，可通过下面的办法得到解决：

设两期观测网形相同，观测纲要相同，根据协方差传播律得：

$$Q_{\Delta X}^T=\frac{1}{2}\ (B^T PB) \tag{10-66}$$

式中 B——平差模型设计矩阵；

P——观测值权阵。

将上式代入式（10－64），得：

$$\lambda=\frac{\Delta X^{\mathrm{T}}B^{\mathrm{T}}B\Delta X}{2\hat{\sigma}_{\mathrm{r}}^{2}} \tag{10-67}$$

$$B=\begin{bmatrix}b_1\\b_2\\\vdots\\b_n\end{bmatrix}\quad P=\mathrm{diag}\ (P_1,\ P_2,\ \cdots P_n)$$

式中 $i=1,\ 2,\ \cdots,\ n$。

将式（10－67）展开为：

$$\lambda=\frac{1}{2\hat{\sigma}_{\mathrm{r}}^{2}}\Delta X^{\mathrm{T}}\ (b_1^{\mathrm{T}},\ \cdots,\ b_n^{\mathrm{T}})\begin{bmatrix}P_1&&&\\&P_2&&\\&&\vdots&\\&&&P_n\end{bmatrix}\begin{bmatrix}b_1\\b_2\\\vdots\\b_n\end{bmatrix}\Delta X \tag{10-68}$$

$$=\frac{1}{2\hat{\sigma}_{\mathrm{r}}^{2}}\sum_{1}^{n}\Delta X^{\mathrm{T}}b_i^{\mathrm{T}}P_i\Delta X$$

如果将 $\lambda=\sum_{1}^{n}\lambda_i$ 看成 n 项 λ_i 之和，则有：

$$\lambda_i=\frac{1}{2\hat{\sigma}_0^2}\Delta X^{\mathrm{T}}b_i^{\mathrm{T}}P_i\Delta X \tag{10-69}$$

上式说明 λ_i 值越大，第 i 个观测元素监测网点变形能力就越强，反之越弱。故定义 λ_i 为观测元素的灵敏度。

由式（10－65）知，λ 是显著水平 α、检验功效 β 及 r 和 b 的复杂函数，若给定 α、β、γ 和 b 可求得非中心参数 λ 的下界值 λ_0。当 ΔX 计算的 λ 值大于 λ_0 时，则 ΔX 能在给定的 α、β 下被检测出来。至于 λ_0 可通过公式计算，但很复杂，多由巴尔达编制的诺模图查取。

第九节　变形观测数据整理与分析

外业数据采集只完成变形观测工作必要的一步，尚需对采集的数据及时整理。

观测数据整理与分析的主要工作内容有两方面：

（1）对现场观测的资料进行检查、加工整理、编制成果表、绘制各种变形图等。

（2）进行观测成果的统计分析，从中寻找规律，通过实测变形值与工程设计或建筑规范的允许变形值相比较，对建筑物做出安全预报。

以往变形观测数据的计算、绘图等工作多由手工完成，目前计算机完全可以用于数据整理工作中，不仅作业效率高，同时可克服成果转抄、摘录、计算、制表等过程中的错误，也能实现科学化管理资料。必要时可与自动化采集系统联接，实现联机实时的安全监测。目前已有一些单位根据自己的工作内容实现了变形观测资料的计算机管理。由于变形监测内容复杂，即使同一个观测内容其管理模式也不能统一，故本节不花费篇幅介绍计算机在变形监测管理中的应用（不具备一般性、通用性），各单位可结合各自的工作内容开发研究计算机的应用。

日常变形观测工作中遇到最多的当属工业与民用建筑物沉陷观测，本节以该类变形观测资料整理为主，介绍变形观测数据整理与分析的基本内容。

一、观测资料的整理

这一阶段的主要工作是进行各项原始记录计算检查、观测成果计算、编制成果表、绘变形图等。

1. 回弹观测成果

(1) 回弹观测成果表（表 10—14）。

表 10—14 回 弹 观 测 成 果

点 号	开挖前高程 H_1（m）	开挖后高程 H_2（m）	回弹量 δ（mm）	备 注
1	144.8462	144.8808	15.6	
2	145.1184	145.1346	16.2	
3	144.9321	144.9497	17.6	
4	144.9255	144.9520	26.5	$\delta=H_1-H_2$
5	145.0871	145.1080	20.9	
6	145.0310	145.0462	15.2	
7	145.0819	145.0942	12.3	

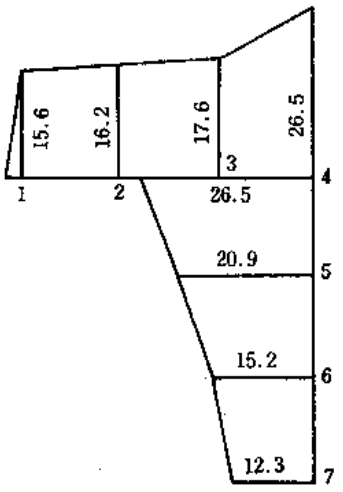


图 10—33

(2) 回弹纵、横断面图。作图时选一合适比例尺（能清楚表示回弹量为准），先画好纵横线，按观测点间距在各轴上画上各点位置，然后在各点以该点回弹量点连线，即为回弹纵横断面图。图 10—33 即为一纵横断面图。通过断面图能直观了解基坑回弹情况，对基础设计与施工提供了参考资料。

2. 沉陷观测成果

沉陷观测要计算出相邻两次观测的沉陷差、累计沉陷量以及沉陷速度，并整理成表、绘制沉陷随时间（或荷重）曲线图，以及沉陷等值线图、沉陷展开图（适用于建、构筑物基础沉陷）。

(1) 计算。

本次沉陷量计算：

$$\Delta H_i^{(k)}=H_i^{(k-1)}-H_i^k,\ (i=1,\ 2,\ \cdots n) \qquad (10-70)$$

式中 $H_i^{(k-1)}$、H_i^k 分别为任意点上次和本次观测高程。

第 K 次平均沉陷值：

$$\Delta H_{均}^{(k)}=\frac{\sum_1^n \Delta H}{n} \qquad (10-71)$$

式中 $\sum_1^n \Delta H=\Delta H_1^{(k)}+\Delta H_2^{(k)}+\cdots+\Delta H_n^{(k)}$；$n$ 为观测点个数。

平均沉陷速度：

$$V=\frac{\Delta H_{均}^{(k)}}{\Delta t} \tag{10-72}$$

式中 Δt 为相邻两次观测时间间隔。

(2) 沉陷观测成果表（表 10—15）。

(3) 沉陷观测图：

①时间或（荷载）—沉陷量曲线图。绘制时间（或载）—沉陷量曲线图（图 10—34）时，常取横轴为时间 t，时间的单位视观测内容而定，一般以日或月为单位，很少用到以小时为单位。可以绘沉陷量最大、最小、平均三条曲线，必要时每个观测点画一条沉陷曲线。从曲线可表现出沉陷的开始、发展及趋于稳定的整个沉陷过程，故也叫它为沉陷过程曲线。

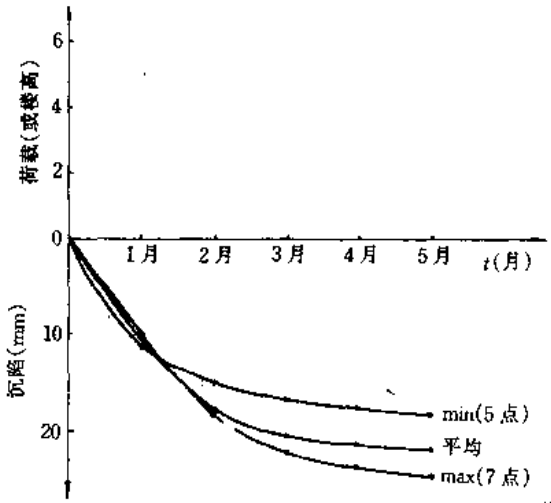


图 10—34

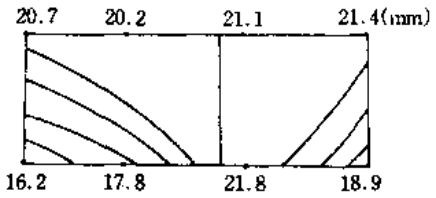


图 10—35

②变形等值线图。绘变形值线图（图 10—35）是根据各观测点沉陷达到稳定时的累积沉陷量绘制的。绘制方法与等高线绘制相似。要根据

表 10—15 沉陷观测成果表

观测点点号	第一次（基础完工）			第二次（二层）			第三次（四层）			第四次（六层）			…
	1996 年 4 月 20 日			1996 年 5 月 21 日			1996 年 6 月 19 日			1996 年 7 月 20 日			…
	高程 (m)	本次沉陷量 (mm)	累积沉陷量 (mm)	高程 (m)	本次沉陷量 (mm)	累积沉陷量 (mm)	高程 (m)	本次沉陷量 (mm)	累积沉陷量 (mm)	高程 (m)	本次沉陷量 (mm)	累积沉陷量 (mm)	…
1	140.6467			140.6365	10.2		140.6292	7.3	17.5	140.6260	3.2	20.7	…
2	140.6640			140.6528	11.2		140.6467	6.1	17.3	140.6438	2.9	20.2	…
3	140.6655			140.6540	11.5		140.6472	6.8	18.3	140.6444	2.8	21.2	…
4	140.6672			140.6563	10.9		140.6491	7.2	18.1	140.6458	3.3	21.4	…
5	140.6370			140.6253	11.7		140.6218	3.5	15.2	140.6208	1.0	16.2	…
6	140.6305			140.6192	11.3		140.6148	4.4	15.7	140.6127	2.1	17.8	…
7	140.6530			140.6430	10.0		140.6352	7.8	17.8	140.6312	4.0	21.8	…
8	140.6438			140.6327	11.1		140.6270	5.7	16.8	140.6249	2.1	18.9	…
平均沉陷					11.0			6.1	17.1		2.7	19.8	…
沉陷速度				0.35mm/日			0.21mm/日			0.09mm/日			…

实际情况选一适当的比例尺和沉陷差作为等值线距，以勾绘清楚反映直观形象为原则。从变形等值线图上可以了解沉陷分布情况及是否均匀沉陷。对于建筑基础沉陷观测，对应沉陷等值线分布可分析地基、基础及对上部建筑体的影响。对于城市地表沉陷，可从沉陷等值线分布找出哪个部位沉陷最严重，也可称为沉陷漏斗，针对沉陷漏斗分析附近抽出地下水情况，采取相应治理措施。

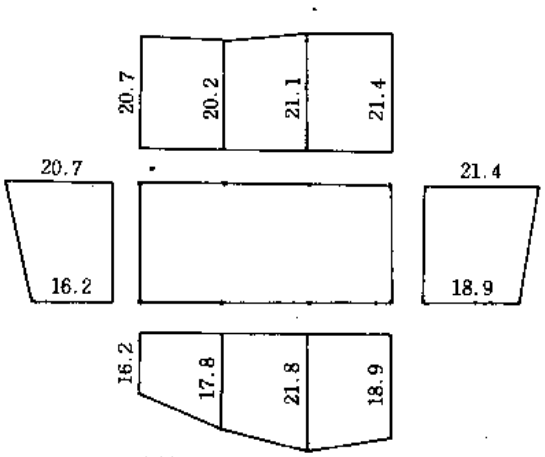


图 10－36

③沉陷曲线展开图。沉陷曲线展开图（图 10－36）是以建筑基础平面图为基础，沿周边轮廓线画各边的沉陷曲线，它能直观、形象地反映各边相邻点沉陷差别。

3. 采空区地表沉陷成果

采空区地表沉陷观测除了部分成果（沉陷）同于城市地表沉陷，尚需计算出相邻点倾斜、曲率、水平位移等资料。

1）成果计算

（1）各观测点的下沉值 ΔH_i：

$$\Delta H_i = H_i^{(0)} - H_i^{(m)} \qquad (10-73)$$

式中 ΔH_i——i 点第 m 次观测后相对于第 1 次观测的下沉值；

$H_i^{(0)}$——i 点第一次观测高程；

$H_i^{(m)}$——i 点第 m 次观测高程。

（2）相邻两点倾斜：

$$i_{i,i+1} = \frac{\Delta H_{i+1} - \Delta H_i}{D_{i,i+1}} \qquad (10-74)$$

式中 $D_{i,i+1}$为第 i 点至 $i+1$ 点的水平距离。

（3）i 点附近的曲率，即 $i-1$ 号点至 $i+1$ 号点之间曲率：

$$W_{i+1,i-1} = \frac{2\ (i_{i+1,i} - i_{i,i-1})}{D_{i+1,i} + D_{i,i-1}} \qquad (10-75)$$

式中 $i_{i+1,i}$、$i_{i,i-1}$——分别表示 $i+1$ 号点至 i 点和 i 点至 $i-1$ 号点的倾斜；

$D_{i+1,i}$、$D_{i,i-1}$——分别表示 $i+1$ 号点到 i 号点和 i 号点至 $i-1$ 号点的水平距离。

（4）i 号点的水平移动及移动方向。

水平移动值：

$$\Delta D_i = \sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2} \qquad (10-76)$$

水平移动方向：

$$\alpha = \tan^{-1}\frac{\Delta y_i}{\Delta x_i} \qquad (10-77)$$

式中 Δx、Δy 为 i 点任意次观测相对首次观测坐标变化值。

（5）i 号点与 $i+1$ 号点间的水平变形：

$$\varepsilon_{i+1,i} = \frac{D_{i+1,i}^{(m)} - D_{i+1,i}^{(0)}}{D_{i+1,i}} \qquad (10-78)$$

式中 $D_{i+1,i}^{(0)}$、$D_{i+1,i}^{(m)}$分别表示 $i+1$ 号点至 i 号点首次观测和第 m 次观测进的水平距离。

(6) i 号点的下沉速度：

$$V_i=\frac{\Delta H_i^{(m)}-H_i^{(m-1)}}{\Delta t} \tag{10-79}$$

式中 $\Delta H_i^{(m)}$、$\Delta H_i^{(m-1)}$ ——分别为 m 次和 $m-1$ 次相邻两次下沉值；

Δt——两次观测的间隔天数。

2) 绘制地表移动和变形曲线图

每次观测计算出后，都要绘制地表移动和变形曲线图(图 10-37)，由这种曲线能形象地看出沿主断面的地表移动和变形的分布特征与发展过程。

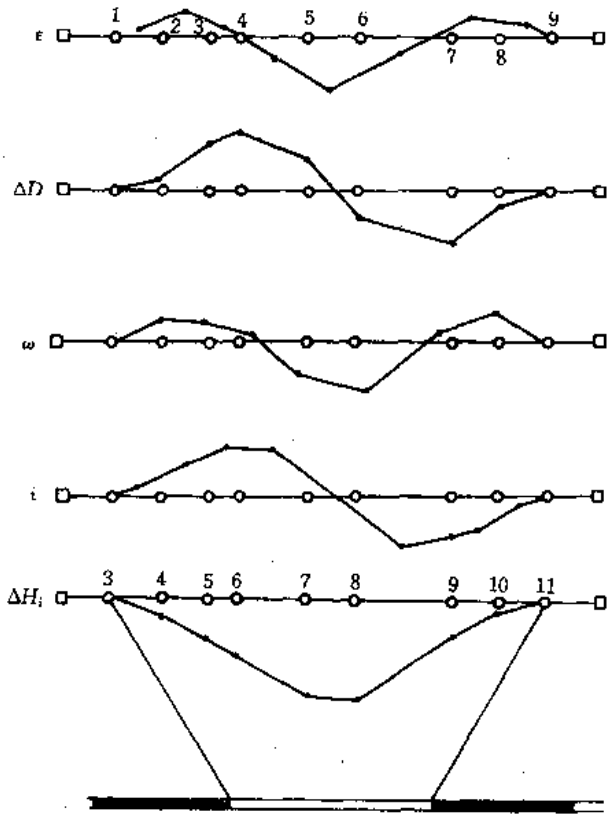


图 10-37

一般将任意点下沉值、相邻两点倾斜、任意点附近的曲率、任意点水平位移及点间的水平变形绘到一个图上，而沉陷等值线图单绘一张。

绘图先要确定竖直和水平比例尺。确定竖直比例尺的原则为：使绘出的曲线能清楚地反映出移动和变形的分布规律，便于分析比较；水平比例尺一般与观测线布置平面图一致，如 1∶1000 或 1∶2000，也有用 1∶500 比例尺的，视范围大小而定，范围大时比例尺小点，范围小时比例尺稍大些。

绘图时，对每一种变形绘一条水平线，将测点依距离按比例展绘在水平线上。下沉是展在相应测点下方，而后连成曲线。倾斜和水平变形是根据其正、负号展在两测点间中点的正上方或正下方。水平位移是根据其值的正、负号分别展在测点的正上方或正下方。曲率点展绘时有两种情况：当相邻两线段的长度相等时，依据曲率值正、负号展在中间点的正上方或下方；当相邻两线段长度不等时，则曲率点应展在该相邻两线段各自中点连线的 1/2 处的上方或下方。

如需要可绘下沉速度曲线，绘制时按下沉速度值，在两次观测时间间隔的正中点展点。

4. 滑坡观测成果

滑坡观测点是三维移动，既不同于城市地表沉陷（垂直位移），也不同于采空区地面沉陷（周围向中心三维位移），而是滑体从整体上基本上向一个方向位移，含下沉和水平移动。计算的成果应从数量上反映平面位移量、位移方向和下沉量，以及位移速度。从这些数字中通过分析便可了解滑坡的发展与危险滑动的发生。滑坡观测图纸则能直观表示滑坡滑动的情况。

1）滑坡观测成果计算

（1）任意观测点相邻两次观测位移量。

平面位移量：
$$\Delta D_i^{(m,m+1)}=\sqrt{\Delta x_i^2+\Delta y_i^2} \tag{10—80}$$

平面位移方向：
$$\theta_i=\tan^{-1}\frac{\Delta y_i}{\Delta x_i} \tag{10—81}$$

平均位移量：
$$\overline{\Delta D}=\frac{\Sigma\Delta D}{n} \tag{10—82}$$

垂直位移量：
$$\Delta H_i^{(m,m+1)}=H_i^{(m)}-H_i^{(m+1)} \tag{10—83}$$

式中 Δx_i、Δy_i——i 点相邻两次平面坐标差；

ΔH_i——i 点相邻两次高程差；

m——第 m 次观测；

n——观测点个数。

（2）任意观测点总位移量。仍然利用上述四式计算，只是将第 m 次观测值换成第一次观测值即可。

（3）任意观测点相邻两次观测期间平面位移速度：
$$V_{Di}=\frac{\Delta D_i}{\Delta t} \tag{10—84}$$

式中 Δt 为相邻两次观测时间间隔。

（4）任意观测点相邻两次观测期间下沉速度：
$$V_{Hi}=\frac{\Delta H_i}{\Delta t} \tag{10—85}$$

2）滑坡观测成果表（表 10—16、表 10—17）

表 10—16 第三观测线终期水平位移成果表（1996 年）

点　号	观测时间与位移量					
	96.1 ΔD_i（mm）	96.4 ΔD_i（mm）	96.7 ΔD_i（mm）	96.8 ΔD_i（mm）	96.9 ΔD_i（mm）	96.12 ΔD_i（mm）
7	0	4	11	30	34	38
8	0	6	14	35	40	44
9	0	6	15	36	40	45
10	0	8	16	37	42	46
11	0	5	12	32	36	40
平均位移量 $\overline{\Delta D}$	0	6	14	34	38	43

3）滑坡变形图

滑坡变形图基本上要表示沉陷、水平位移随时间的变化曲线。

5. 建筑物（如烟囱）主体挠度观测成果

建筑物主体挠度的主要成果要能反映各层几何中心相对底层的水平位移大小及方向。

表 10－17　第三观测线垂直位移成果表（1996 年）

点　号	观测时间与沉陷量					
	96.1 ΔH_i（mm）	96.4 ΔH_i（mm）	96.7 ΔH_i（mm）	96.8 ΔH_i（mm）	96.9 ΔH_i（mm）	96.12 ΔH_i（mm）
7	0	2	4	14	16	19
8	0	3	6	17	19	22
9	0	3	6	18	21	25
10	0	3	8	20	23	27
11	0	3	7	18	20	22
平均沉陷量 $\Delta\overline{H}$		3	6	17	20	23

1）变形特征值计算

（1）各层相对底层水平位移量 ΔD_n：

$$\Delta D_n=\sqrt{(x_n-x_1)^2+(y_n-y_1)^2} \tag{10-86}$$

式中　x_1、y_1，x_n、y_n——分别是底层和第 n 层中心坐标。

（2）各层相对底层扭曲方向 θ_n：

$$\theta_n=\tan^{-1}\frac{\Delta y_{1n}}{\Delta x_{1n}} \tag{10-87}$$

（3）该建筑平均扭曲方向 $\overline{\theta}$：

$$\overline{\theta}=\frac{1}{m-1}(\theta_2+\theta_3+\cdots+\theta_m) \tag{10-88}$$

（4）各层圆心位移量 ΔD_n 在平均扭曲方向垂直面上的投影 $\Delta D'_n$：

$$\Delta D'_n=\Delta D_n\cdot\cos(\theta_n-\overline{\theta}) \tag{10-89}$$

2）挠度观测成果表（表 10－18）

表 10－18　挠　度　观　测　成　果

层次	各层高程 H_n（m）	各层圆心坐标		相对底层水平位移 ΔD_n（mm）	相对底层扭曲方向 θ_n ° ′	$\theta_n-\overline{\theta}$ ° ′	$\Delta D'_n$（mm）
		x（m）	y（m）				
1	140.20	320.751	216.024				
2	150.20	320.749	216.025	2.2	153　26	0　28	2.2
3	160.20	320.746	216.027	5.8	149　02	−3　55	5.8
4	170.20	320.739	216.029	13.0	157　23	−4　25	13.0
5	180.20	320.734	216.035	20.2	147　06	−5　51	20.1
6	190.20	320.723	216.039	31.8	151　49	−1　08	31.8
7	200.20	320.714	216.043	41.6	152　49	−0　08	41.6
8	200.20	320.700	216.047	55.9	155　44	2　46	55.8
9	220.20	320.684	216.056	74.2	154　28	1　30	74.2
10	234.00	320.668	216.063	91.7	154　50	1　52	91.7

平均扭曲方向 $\overline{\theta}=152°57'$

3）挠度曲线图（图 10－38）

二、变形观测统计分析

变形观测统计分析是在观测成果形成之后尤其是积累了一定量的变形观测成果之后进行的。通过对成果的整理、归纳后，找出变形的过程、变形规律及变形幅度；找出变形与引起变形因素的某种函数关系；在找出规律、建立函数关系的基础上，通过求得的变形值（已经观测一段时间）预报未来变形的可能范围。通过实测变形值与工程设计的允许变形值相比较，或者某次（或某几次）观测与大多数实测变形值比较做出安全预报。

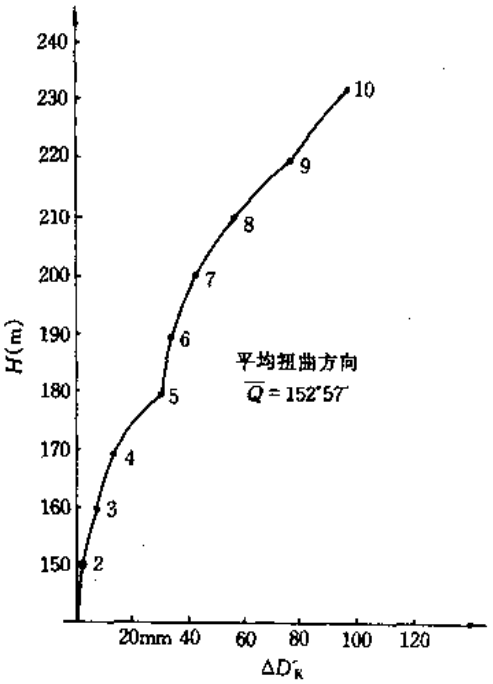


图 10－38

工业与民用建筑的变形多与建筑物的荷重、地基有关。根据以往的经验，建在砾砂层上的建筑物，施工期间能完成 70%～80%的沉陷，达到稳定期时间短；建在土层等建筑物，施工期只能完成预计总沉陷的 5%左右甚至更少，达到稳定期时间较长，甚至十几年。

大坝变形与坝基、坝高、温度、水位等有关。建立沉陷与时间关系函数也并非易事，城市地表沉陷与矿区采空区沉陷、砾砂层上建筑与软土层上建筑的沉陷与时间关系的函数式不尽相同，很难用一个确定的函数式表示，所以要做统计分析，以找出规律。通常用数理统计中的回归分析法处理变量之间的不确定关系。

设变形量 y_1、y_2、…、y_n 与另一自变量（观测量）x_1、x_2、…、x_n 之间存在线性形式的统计相关，表达式为：

$$y_i=a+bx_i+\varepsilon_i,\ (i=1,\ 2,\ \cdots n) \tag{10-90}$$

由于 y_i 与 x_i 关系具有不确定性，即使给定 x_i 也不能唯一决定 y_i，即不能表达为 $y_i=a+bx$ 的确定的线性函数关系，而有偏差 ε_i

$$\varepsilon_i=y_i-(a+bx_i) \tag{10-91}$$

在式（10－90）中，通过观测值的 x_i 和 y_i 可求得系数 a、b 的估值 $\hat{a}$、$\hat{b}$，利用这样两个系数建立表达式。根据测得的 x 值即可预计 y 值可能出现的范围。将 a、b 叫做回归系数。

为了由观测值计算 a、b 的最佳估值，应用最小二乘法有：

$$[\varepsilon\varepsilon]=[(y-a-bx)^2]=\min \tag{10-92}$$

可得法方程：

$$\left.\begin{aligned} n\hat{a}+[x]\hat{b}-[y]&=0\\ [x]\hat{a}+[x\cdot x]\hat{b}-[x\cdot y]&=0\end{aligned}\right\} \tag{10-93}$$

解之得：

$$\hat{b}=\frac{n[x\cdot y]-[x][y]}{n[x\cdot x]-[x][x]} \tag{10-94}$$

将上式分子分母均除以 n，并令：

$$\bar{x}=\frac{[x]}{n},\ \bar{y}=\frac{[y]}{n} \tag{10-95}$$

得

$$\hat{b}=\frac{[x\cdot y]-n\bar{x}\cdot\bar{y}}{[x\cdot x]-n\cdot\bar{x}^2} \tag{10-96}$$

又因为

$$[(x-\bar{x})^2]=[x\cdot x]-nx^2 \tag{10-97}$$

$$[(x-\bar{x})(y-\bar{y})]=[x\cdot y]-n\bar{x}\cdot\bar{y} \tag{10-98}$$

所以

$$\hat{b}=\frac{[(x-\bar{x})\cdot(y-\bar{y})]}{[(x-\bar{x})^2]} \tag{10-99}$$

由式（10—93）得：

$$\hat{a}=\bar{y}-b\bar{x} \tag{10-100}$$

由 $\hat{y}_i=\hat{a}+\hat{b}x_i$ 求因变量的估值需加改正数 ϵ_i：

$$\epsilon_i=y_i-\hat{a}-\hat{b}x_i \tag{10-101}$$

由此可求得用回归直线方程 $\hat{y}=\hat{a}+\hat{b}x$ 求因变量估值的中误差：

$$\bar{S}=\sqrt{\frac{[\epsilon\epsilon]}{n-2}} \tag{10-102}$$

根据以往的观测数据计算出回归方程后，即可预报未来变形值。预报未来变形值时常在回归直线两侧以 $2\bar{S}$ 画两条平行线。平行线以内的范围即为未来变形值 y 可能出现的区间。

回归直线公式适用于变量 y 与 x 必须是线性相关。通常用相关系数 ρ 这个数量指标来描述这两个变量相关程度：

$$\rho=\frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x\cdot\sigma_y} \tag{10-103}$$

其估值：

$$\hat{\rho}=\frac{S_{xy}}{S_x\cdot S_y}=\frac{[(x-\bar{x})(y-\bar{y})]}{\sqrt{[(x-\bar{x})^2]}\cdot\sqrt{[(y-\bar{y})^2]}} \tag{10-104}$$

当 $|\hat{\rho}|$ 愈接近 1 时，表明随机变量 x 与 y 线性相关愈密切，经验公式愈可靠；$|\hat{\rho}|$ 愈接近零，相关程度愈低。在一定置信水平下编制了相关系数表（表 10—19），表中自由度为 $r=n-2$。

表 10—19 相关系数临界值

自由度	置信水平 α		自由度	置信水平 α	
$n-2$	0.05	0.01	$n-2$	0.05	0.01
1	0.997	1.000	25	0.381	0.487
2	0.950	0.990	30	0.349	0.449
3	0.878	0.959	35	0.325	0.418

续表

自由度	置信水平 α		自由度	置信水平 α	
$n-2$	0.05	0.01	$n-2$	0.05	0.01
4	0.811	0.917	40	0.304	0.393
5	0.754	0.874	45	0.288	0.372
6	0.707	0.834	50	0.273	0.354
7	0.666	0.798	60	0.250	0.325
8	0.632	0.765	70	0.232	0.320
9	0.602	0.735	80	0.217	0.283
10	0.576	0.708	90	0.205	0.267
12	0.532	0.661	100	0.195	0.254
14	0.497	0.623	150	0.159	0.208
16	0.468	0.590	200	0.138	0.181
18	0.444	0.561	300	0.113	0.148
20	0.423	0.537	400	0.098	0.128

相关显著性检验时，先确定一个置信水平 α（综合分析时，选 $\alpha=0.05$，重要的预计参数，取 $\alpha=0.01$），以 $r=n-2$ 为引数，在相关系数临界表中查得相关系数的临界值 ρ_α。若计算的 $\hat{\rho}>\rho_\alpha$，则认为在 α 水平上相关显著，经验公式有效；若 $\rho\leqslant\rho_\alpha$ 则认为相关不显著，经验公式无效。

另外，也可用 t 检验法进行回归方程的显著性检验。

做统计量

$$t=\frac{\hat{b}-b}{\bar{s}\sqrt{Q_{xx}}} \tag{10-105}$$

在 H_0 下，$b=0$ 即 y 和 x 没有线性的统计关系，所以在 H_0 下，自由度 $n-2$ 的 t 变量是

$$t=\frac{\hat{b}}{\bar{s}\sqrt{Q_{xx}}} \tag{10-106}$$

式中

$$Q_{xx}=\frac{n}{n\left[x\cdot x\right]-\left[x\right]\left[x\right]} \tag{10-107}$$

若计算的 $|t|>t_{\alpha/2}$，（查 t 分布表），则 α 水平下 H_0 不可信，回归效果显著，反之回归效果不显著。

在实际资料分析中，也存在由多个变形因素影响变形值，可用多元线性回归的统计分析办法解决。多元线性回归的数学模型是

$$y_i=b_0+b_1x_{i1}+b_2x_{i2}+\cdots+b_mx_{im}+\varepsilon_i\quad(i=1,\ 2,\ \cdots,\ n) \tag{10-108}$$

给定了 n 组实测数据 x_{i1}、x_{i2}、$\cdots$、x_{im}、y_i，应用最小二乘法求未知参数 b_0、b_j 的估值

$$\hat{b}_0、\hat{b}_j\ (j=1,\ 2,\ \cdots,\ m)$$

$$[\varepsilon\varepsilon]=[\ (y-b_0-b_1x_1-b_2x_2-\cdots-b_mx_m)^2]=\min \tag{10-109}$$

为求未知参数 b_0、b_j 的估值 $\hat{b}_0$、$\hat{b}_j$（$j=1,\ 2,\ \cdots,\ m$），将 x_{ij} 中心化，即

$$x'_{ij}=x_{ij}-\bar{x}_i \tag{10-110}$$

式中 $\bar{x}_i=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_{ij}$

令
$$b'_0=b_0+b_1\bar{x}_1+b_2\bar{x}_2+\cdots+b_m\bar{x}_m \tag{10-111}$$
考虑式（10—110）、（10—111）后式（10—108）可写成
$$y_i=b'_0+b_1x'_{i1}+b_2x'_{i2}+\cdots+b_mx'_{im}+\varepsilon$$
按最小二乘法可得法方程为
$$\left.\begin{aligned}
&n\hat{b}'_0+[x'_1]\hat{b}_1+\cdots\cdots+[x'_m]\hat{b}_m=[y]\\
&[x'_1]\hat{b}'_0+[x'_1x'_1]\hat{b}'_1+[x'_1x'_2]\hat{b}'_2+\cdots\cdots+[x'_1x'_m]\hat{b}'_m=[x'_1y]\\
&[x'_2]\hat{b}'_0+[x'_1x'_2]\hat{b}'_1+[x'_2x'_2]\hat{b}'_2+\cdots\cdots+[x'_2x'_m]\hat{b}'_m=[x'_2y]\\
&\qquad\cdots\cdots\cdots\cdots\\
&[x'_m]\hat{b}'_0+[x'_1x'_m]\hat{b}'_1+[x'_2x'_m]\hat{b}'_2+\cdots\cdots+[x'_mx'_m]\hat{b}'_m=[x'_my]
\end{aligned}\right\} \tag{10-112}$$
由式（10—110）得
$$[x'_j]=\sum_{i=1}^{n}(x_{ij}-\bar{x}_j)=0$$
则式（10—112）中的一式
$$\hat{b}'_0=\frac{1}{n}[y]=\bar{y} \tag{10-113}$$
引入矩阵符号
$$X_{n\times m}=\begin{bmatrix}x'_{11}&x'_{12}&\cdots&x'_{m1}\\x'_{21}&x'_{22}&\cdots&x'_{2m}\\&\cdots\cdots\cdots\cdots&&\\x'_{n1}&x'_{n2}&\cdots&x'_{nm}\end{bmatrix}\quad \hat{B}_{m\times1}=\begin{bmatrix}\hat{b}_1\\\hat{b}_1\\\vdots\\b_m\end{bmatrix},\ y_{n\times1}=\begin{bmatrix}y_1\\y_2\\\vdots\\y_n\end{bmatrix}$$
则式（10—112）可写成矩阵
$$X^TX\hat{B}=X^TY \tag{10-114}$$
由式（10—114）可解得 $\hat{b}_j$，（$j=1, 2, \cdots, m$）。
可由下式计算中误差
$$\bar{S}=\sqrt{\frac{[vv]}{n-m-1}} \tag{10-115}$$
与一元线性回归相同，多元线性回归也需进行线性相关显著性检验，可用 F 检验法。做统计量
$$F=\frac{\dfrac{Q_1}{m}}{\dfrac{Q_2}{n-m-1}} \tag{10-116}$$
式中：
$$Q_1=[(\hat{y}-\bar{y})^2]=[x'_1y]\hat{b}_1+[x'_2y]\hat{b}_2+\cdots+[x'_my]\hat{b}_m$$
$$Q_2=[(y-\hat{y})^2]=[\varepsilon\varepsilon]=(n-m-1)\bar{S}^2$$
若计算的 $F>F_\alpha$，则回归效果显著；若 $F\leqslant F_\alpha$，则回归效果不显著。

前面讨论的是全部 x_j 与 y 的线性相关检验。也可能存在某一个或某几个 b_j 实际上是零，则要对每个自变量 x_j 进行显著性的检验，可用 t 检验法。

假设 H_0：$b_i=0$，即与某一变量不存在线性相关，若成立，则用统计量

$$t_i=\frac{\hat{b}_i}{\overline{S}\sqrt{Q_{b_ib_i}}} \tag{10-117}$$

作检验，其自由度为 $(n-m-1)$。若假设成立，说明与 x_i 相关不显著，可从回归方程中把这一因子剔除，用剩余因子重新建立回归方程。如此循环，逐步把不相关的剔除，只剩相关因子，故称为逐步回归分析。

在实际资料分析时，变形值与变形因素之间关系并非都是线性的，如抛物线、指数函数、双曲函数关系等非线性关系。在实际应用时可以通过线性化和变量替换化算成线性问题，然后再进行线性相关分析。例如地基基础人员认为土质地基沉降过程曲线近似符合双曲线函数关系，可用下式描述其下沉过程

$$\frac{1}{\Delta H}=a+b\frac{1}{T} \tag{10-118}$$

式中 T——统计时间；

ΔH——T 时间内基础沉降量。

作变量替换，可化成线性回归的形式。

令

$$y=\frac{1}{\Delta H}\quad x=\frac{1}{T} \tag{10-119}$$

由式（10－118）可得

$$y=a+bx \tag{10-120}$$

例如某建筑物的沉降观测资料见表 10－20。作回归分析预期最终沉降量。

表 10－20 某建筑物沉降观测资料

时间 T（天）	30	60	90	120	180	240	330	420	510	600	780	960
沉降量 ΔH（mm）	70	100	120	135	142	148	149	156	163	164	165	166

解：为求得 a、b 的估值，先计算 y 与 x，见表 10－21。

表 10－21 y 与 x 的 计 算

$x=1000/T$	33.33	16.67	11.11	8.33	5.56	4.17	3.03	2.38	1.96	1.67	1.28	1.04
$y=1000/\Delta H$	33.33	19.61	13.89	11.11	9.09	7.41	6.90	6.41	6.13	5.99	5.92	5.88

回归系数计算，见表 10－22。

$$\bar{x}=\frac{[x]}{n}=7.54\quad \bar{y}=\frac{[y]}{n}=10.97\quad \hat{b}=\frac{[(x-\bar{x})(y-\bar{y})]}{[(x-\bar{x})^2]}=0.857$$

$$\hat{a}=\hat{y}-\hat{b}\cdot\bar{x}=4.51$$

然后建立回归方程

$$y=4.51+0.857x$$

即
$$\frac{1}{\Delta H}=0.00451+0.857\frac{1}{T} \tag{10-121}$$

进行相关性检验

$$\hat{\rho}=\frac{[(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})]}{\sqrt{[(x_i-\bar{x})^2][(y_i-\bar{y})^2]}}=0.985$$

取置信水平 $a=0.01$，查相关系数临界表 $\rho_a=0.708$，由此 $|\hat{\rho}|>\rho_a$，则相关显著。最后进行最终沉降值 ΔH 终预计；由式（10－121），当令 $T\to\infty$ 时，解得

$$\Delta H_{终}=222\text{mm}$$

表 10－22 回 归 系 数 计 算

序　　号	$x_i-\bar{x}$	$y_i-\bar{y}$	$(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})$
1	25.79	22.36	576.66
2	9.13	8.64	78.88
3	3.57	2.91	10.39
4	+0.79	0.14	0.11
5	−1.98	−1.88	3.72
6	−3.37	−3.56	12.00
7	−4.51	−4.07	18.36
8	−5.16	−4.56	23.53
9	−5.58	−4.84	27.01
10	−5.87	−4.98	29.23
11	−6.26	−5.05	31.61
12	−6.50	−5.09	33.08
	$\Sigma(x_i-\bar{x})^2$	$\Sigma(y_i-\bar{y})^2$	$\Sigma(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})$
	971.1239	736.3100	832.70

参 考 文 献

1. 李青岳主编. 工程测量学. 测绘出版社，1984
2. 田佩俊、陈汉华编. 矿山测量学（第二分册）. 中国矿业大学出版社，1988
3. 周立吾等编. 矿山测量学（第一分册）. 中国矿业大学出版社，1987
4. 季斌德、邵自修编. 工程测量. 测绘出版社，1988
5. 侯国富等编. 建筑工程测量. 测绘出版社，1987
6. 吴子安、吴栋材编. 水利工程测量. 测绘出版社，1990
7. 陆之光主编. 建筑测量. 中国建筑工业出版社，1987
8. 北京市测绘处、北京建筑工程学院合编. 城市建设工程测量. 测绘出版社，1981
9. 陈永奇等编著. 高等应用测量. 武汉测绘科技大学出版社，1996
10. 李青岳、陈永奇主编. 工程测量学. 测绘出版社，1995
11. 陈龙飞、金其坤编著. 工程测量. 同济大学出版社，1991
12. 石金峰编. 近代误差理论与数据处理. 煤炭工业出版社，1994
13. 李庆海、陶本藻. 概率统计原理和在测量中的应用. 测绘出版社，1982
14. 张正禄等编著. 精密工程测量. 测绘出版社，1992
15. 陶本藻编著. 自由网平差与变形分析. 测绘出版社，1984
16. 何国清等编著. 矿山开采沉陷学. 中国矿业大学出版社，1991
17. 王兆祥等编. 铁路工程测量. 测绘出版社，1986
18. 林宗元主编. 岩土工程试验监测手册. 辽宁科学技术出版社，1994
19. 朱鸿禧等编著. 测量学. 中国矿业大学出版社，1995
20. 梁开龙. 水下地形测量. 测绘出版社，1995
21. 吴翼麟. 孔祥元等. 特种精密工程测量. 测绘出版社，1993
22. 城乡建设环境保护部. 城市测量规范. 中国建筑工业出版社，1985
23. 中华人民共和国国家标准. 工程测量规范. 中国计划出版社，1993
24. 中华人民共和国能源部. 煤矿测量规程. 煤炭工业出版社，1989
25. 测绘词典编辑委员会编. 测绘词典. 上海辞书出版社，1981
26. 工厂建设测量手册编写组. 工厂建设测量手册. 测绘出版社，1990
27. 郭达志等编著. 测绘新技术及其应用. 中国矿业大学出版社，1995

K3

41-00-4943-1

参 考 文 献

1. 李青岳主编. 工程测量学. 测绘出版社，1984
2. 田佩俊、陈汉华编. 矿山测量学（第二分册）. 中国矿业大学出版社，1988
3. 周立吾等编. 矿山测量学（第一分册）. 中国矿业大学出版社，1987
4. 季斌德、邵自修编. 工程测量. 测绘出版社，1988
5. 侯国富等编. 建筑工程测量. 测绘出版社，1987
6. 吴子安、吴栋材编. 水利工程测量. 测绘出版社，1990
7. 陆之光主编. 建筑测量. 中国建筑工业出版社，1987
8. 北京市测绘处、北京建筑工程学院合编. 城市建设工程测量. 测绘出版社，1981
9. 陈永奇等编著. 高等应用测量. 武汉测绘科技大学出版社，1996
10. 李青岳、陈永奇主编. 工程测量学. 测绘出版社，1995
11. 陈龙飞、金其坤编著. 工程测量. 同济大学出版社，1991
12. 石金峰编. 近代误差理论与数据处理. 煤炭工业出版社，1994
13. 李庆海、陶本藻. 概率统计原理和在测量中的应用. 测绘出版社，1982
14. 张正禄等编著. 精密工程测量. 测绘出版社，1992
15. 陶本藻编著. 自由网平差与变形分析. 测绘出版社，1984
16. 何国清等编著. 矿山开采沉陷学. 中国矿业大学出版社，1991
17. 王兆祥等编. 铁路工程测量. 测绘出版社，1986
18. 林宗元主编. 岩土工程试验监测手册. 辽宁科学技术出版社，1994
19. 朱鸿禧等编著. 测量学. 中国矿业大学出版社，1995
20. 梁开龙. 水下地形测量. 测绘出版社，1995
21. 吴翼麟. 孔祥元等. 特种精密工程测量. 测绘出版社，1993
22. 城乡建设环境保护部. 城市测量规范. 中国建筑工业出版社，1985
23. 中华人民共和国国家标准. 工程测量规范. 中国计划出版社，1993
24. 中华人民共和国能源部. 煤矿测量规程. 煤炭工业出版社，1989
25. 测绘词典编辑委员会编. 测绘词典. 上海辞书出版社，1981
26. 工厂建设测量手册编写组. 工厂建设测量手册. 测绘出版社，1990
27. 郭达志等编著. 测绘新技术及其应用. 中国矿业大学出版社，1995

K3

41-00-4943-1

参 考 文 献

1. 李青岳主编. 工程测量学. 测绘出版社，1984
2. 田佩俊、陈汉华编. 矿山测量学（第二分册）. 中国矿业大学出版社，1988
3. 周立吾等编. 矿山测量学（第一分册）. 中国矿业大学出版社，1987
4. 季斌德、邵自修编. 工程测量. 测绘出版社，1988
5. 侯国富等编. 建筑工程测量. 测绘出版社，1987
6. 吴子安、吴栋材编. 水利工程测量. 测绘出版社，1990
7. 陆之光主编. 建筑测量. 中国建筑工业出版社，1987
8. 北京市测绘处、北京建筑工程学院合编. 城市建设工程测量. 测绘出版社，1981
9. 陈永奇等编著. 高等应用测量. 武汉测绘科技大学出版社，1996
10. 李青岳、陈永奇主编. 工程测量学. 测绘出版社，1995
11. 陈龙飞、金其坤编著. 工程测量. 同济大学出版社，1991
12. 石金峰编. 近代误差理论与数据处理. 煤炭工业出版社，1994
13. 李庆海、陶本藻. 概率统计原理和在测量中的应用. 测绘出版社，1982
14. 张正禄等编著. 精密工程测量. 测绘出版社，1992
15. 陶本藻编著. 自由网平差与变形分析. 测绘出版社，1984
16. 何国清等编著. 矿山开采沉陷学. 中国矿业大学出版社，1991
17. 王兆祥等编. 铁路工程测量. 测绘出版社，1986
18. 林宗元主编. 岩土工程试验监测手册. 辽宁科学技术出版社，1994
19. 朱鸿禧等编著. 测量学. 中国矿业大学出版社，1995
20. 梁开龙. 水下地形测量. 测绘出版社，1995
21. 吴翼麟. 孔祥元等. 特种精密工程测量. 测绘出版社，1993
22. 城乡建设环境保护部. 城市测量规范. 中国建筑工业出版社，1985
23. 中华人民共和国国家标准. 工程测量规范. 中国计划出版社，1993
24. 中华人民共和国能源部. 煤矿测量规程. 煤炭工业出版社，1989
25. 测绘词典编辑委员会编. 测绘词典. 上海辞书出版社，1981
26. 工厂建设测量手册编写组. 工厂建设测量手册. 测绘出版社，1990
27. 郭达志等编著. 测绘新技术及其应用. 中国矿业大学出版社，1995

K3

41-00-4943-1

参 考 文 献

1. 李青岳主编. 工程测量学. 测绘出版社，1984
2. 田佩俊、陈汉华编. 矿山测量学（第二分册）. 中国矿业大学出版社，1988
3. 周立吾等编. 矿山测量学（第一分册）. 中国矿业大学出版社，1987
4. 季斌德、邵自修编. 工程测量. 测绘出版社，1988
5. 侯国富等编. 建筑工程测量. 测绘出版社，1987
6. 吴子安、吴栋材编. 水利工程测量. 测绘出版社，1990
7. 陆之光主编. 建筑测量. 中国建筑工业出版社，1987
8. 北京市测绘处、北京建筑工程学院合编. 城市建设工程测量. 测绘出版社，1981
9. 陈永奇等编著. 高等应用测量. 武汉测绘科技大学出版社，1996
10. 李青岳、陈永奇主编. 工程测量学. 测绘出版社，1995
11. 陈龙飞、金其坤编著. 工程测量. 同济大学出版社，1991
12. 石金峰编. 近代误差理论与数据处理. 煤炭工业出版社，1994
13. 李庆海、陶本藻. 概率统计原理和在测量中的应用. 测绘出版社，1982
14. 张正禄等编著. 精密工程测量. 测绘出版社，1992
15. 陶本藻编著. 自由网平差与变形分析. 测绘出版社，1984
16. 何国清等编著. 矿山开采沉陷学. 中国矿业大学出版社，1991
17. 王兆祥等编. 铁路工程测量. 测绘出版社，1986
18. 林宗元主编. 岩土工程试验监测手册. 辽宁科学技术出版社，1994
19. 朱鸿禧等编著. 测量学. 中国矿业大学出版社，1995
20. 梁开龙. 水下地形测量. 测绘出版社，1995
21. 吴翼麟. 孔祥元等. 特种精密工程测量. 测绘出版社，1993
22. 城乡建设环境保护部. 城市测量规范. 中国建筑工业出版社，1985
23. 中华人民共和国国家标准. 工程测量规范. 中国计划出版社，1993
24. 中华人民共和国能源部. 煤矿测量规程. 煤炭工业出版社，1989
25. 测绘词典编辑委员会编. 测绘词典. 上海辞书出版社，1981
26. 工厂建设测量手册编写组. 工厂建设测量手册. 测绘出版社，1990
27. 郭达志等编著. 测绘新技术及其应用. 中国矿业大学出版社，1995

K3

41-00-4943-1

参 考 文 献

1. 李青岳主编. 工程测量学. 测绘出版社，1984
2. 田佩俊、陈汉华编. 矿山测量学（第二分册）. 中国矿业大学出版社，1988
3. 周立吾等编. 矿山测量学（第一分册）. 中国矿业大学出版社，1987
4. 季斌德、邵自修编. 工程测量. 测绘出版社，1988
5. 侯国富等编. 建筑工程测量. 测绘出版社，1987
6. 吴子安、吴栋材编. 水利工程测量. 测绘出版社，1990
7. 陆之光主编. 建筑测量. 中国建筑工业出版社，1987
8. 北京市测绘处、北京建筑工程学院合编. 城市建设工程测量. 测绘出版社，1981
9. 陈永奇等编著. 高等应用测量. 武汉测绘科技大学出版社，1996
10. 李青岳、陈永奇主编. 工程测量学. 测绘出版社，1995
11. 陈龙飞、金其坤编著. 工程测量. 同济大学出版社，1991
12. 石金峰编. 近代误差理论与数据处理. 煤炭工业出版社，1994
13. 李庆海、陶本藻. 概率统计原理和在测量中的应用. 测绘出版社，1982
14. 张正禄等编著. 精密工程测量. 测绘出版社，1992
15. 陶本藻编著. 自由网平差与变形分析. 测绘出版社，1984
16. 何国清等编著. 矿山开采沉陷学. 中国矿业大学出版社，1991
17. 王兆祥等编. 铁路工程测量. 测绘出版社，1986
18. 林宗元主编. 岩土工程试验监测手册. 辽宁科学技术出版社，1994
19. 朱鸿禧等编著. 测量学. 中国矿业大学出版社，1995
20. 梁开龙. 水下地形测量. 测绘出版社，1995
21. 吴翼麟. 孔祥元等. 特种精密工程测量. 测绘出版社，1993
22. 城乡建设环境保护部. 城市测量规范. 中国建筑工业出版社，1985
23. 中华人民共和国国家标准. 工程测量规范. 中国计划出版社，1993
24. 中华人民共和国能源部. 煤矿测量规程. 煤炭工业出版社，1989
25. 测绘词典编辑委员会编. 测绘词典. 上海辞书出版社，1981
26. 工厂建设测量手册编写组. 工厂建设测量手册. 测绘出版社，1990
27. 郭达志等编著. 测绘新技术及其应用. 中国矿业大学出版社，1995

K3

41-00-4943-1

参 考 文 献

1. 李青岳主编. 工程测量学. 测绘出版社，1984
2. 田佩俊、陈汉华编. 矿山测量学（第二分册）. 中国矿业大学出版社，1988
3. 周立吾等编. 矿山测量学（第一分册）. 中国矿业大学出版社，1987
4. 季斌德、邵自修编. 工程测量. 测绘出版社，1988
5. 侯国富等编. 建筑工程测量. 测绘出版社，1987
6. 吴子安、吴栋材编. 水利工程测量. 测绘出版社，1990
7. 陆之光主编. 建筑测量. 中国建筑工业出版社，1987
8. 北京市测绘处、北京建筑工程学院合编. 城市建设工程测量. 测绘出版社，1981
9. 陈永奇等编著. 高等应用测量. 武汉测绘科技大学出版社，1996
10. 李青岳、陈永奇主编. 工程测量学. 测绘出版社，1995
11. 陈龙飞、金其坤编著. 工程测量. 同济大学出版社，1991
12. 石金峰编. 近代误差理论与数据处理. 煤炭工业出版社，1994
13. 李庆海、陶本藻. 概率统计原理和在测量中的应用. 测绘出版社，1982
14. 张正禄等编著. 精密工程测量. 测绘出版社，1992
15. 陶本藻编著. 自由网平差与变形分析. 测绘出版社，1984
16. 何国清等编著. 矿山开采沉陷学. 中国矿业大学出版社，1991
17. 王兆祥等编. 铁路工程测量. 测绘出版社，1986
18. 林宗元主编. 岩土工程试验监测手册. 辽宁科学技术出版社，1994
19. 朱鸿禧等编著. 测量学. 中国矿业大学出版社，1995
20. 梁开龙. 水下地形测量. 测绘出版社，1995
21. 吴翼麟. 孔祥元等. 特种精密工程测量. 测绘出版社，1993
22. 城乡建设环境保护部. 城市测量规范. 中国建筑工业出版社，1985
23. 中华人民共和国国家标准. 工程测量规范. 中国计划出版社，1993
24. 中华人民共和国能源部. 煤矿测量规程. 煤炭工业出版社，1989
25. 测绘词典编辑委员会编. 测绘词典. 上海辞书出版社，1981
26. 工厂建设测量手册编写组. 工厂建设测量手册. 测绘出版社，1990
27. 郭达志等编著. 测绘新技术及其应用. 中国矿业大学出版社，1995

K3

41-00-4943-1

参 考 文 献

1. 李青岳主编. 工程测量学. 测绘出版社，1984
2. 田佩俊、陈汉华编. 矿山测量学（第二分册）. 中国矿业大学出版社，1988
3. 周立吾等编. 矿山测量学（第一分册）. 中国矿业大学出版社，1987
4. 季斌德、邵自修编. 工程测量. 测绘出版社，1988
5. 侯国富等编. 建筑工程测量. 测绘出版社，1987
6. 吴子安、吴栋材编. 水利工程测量. 测绘出版社，1990
7. 陆之光主编. 建筑测量. 中国建筑工业出版社，1987
8. 北京市测绘处、北京建筑工程学院合编. 城市建设工程测量. 测绘出版社，1981
9. 陈永奇等编著. 高等应用测量. 武汉测绘科技大学出版社，1996
10. 李青岳、陈永奇主编. 工程测量学. 测绘出版社，1995
11. 陈龙飞、金其坤编著. 工程测量. 同济大学出版社，1991
12. 石金峰编. 近代误差理论与数据处理. 煤炭工业出版社，1994
13. 李庆海、陶本藻. 概率统计原理和在测量中的应用. 测绘出版社，1982
14. 张正禄等编著. 精密工程测量. 测绘出版社，1992
15. 陶本藻编著. 自由网平差与变形分析. 测绘出版社，1984
16. 何国清等编著. 矿山开采沉陷学. 中国矿业大学出版社，1991
17. 王兆祥等编. 铁路工程测量. 测绘出版社，1986
18. 林宗元主编. 岩土工程试验监测手册. 辽宁科学技术出版社，1994
19. 朱鸿禧等编著. 测量学. 中国矿业大学出版社，1995
20. 梁开龙. 水下地形测量. 测绘出版社，1995
21. 吴翼麟. 孔祥元等. 特种精密工程测量. 测绘出版社，1993
22. 城乡建设环境保护部. 城市测量规范. 中国建筑工业出版社，1985
23. 中华人民共和国国家标准. 工程测量规范. 中国计划出版社，1993
24. 中华人民共和国能源部. 煤矿测量规程. 煤炭工业出版社，1989
25. 测绘词典编辑委员会编. 测绘词典. 上海辞书出版社，1981
26. 工厂建设测量手册编写组. 工厂建设测量手册. 测绘出版社，1990
27. 郭达志等编著. 测绘新技术及其应用. 中国矿业大学出版社，1995

K3

41-00-4943-1

参 考 文 献

1. 李青岳主编. 工程测量学. 测绘出版社，1984
2. 田佩俊、陈汉华编. 矿山测量学（第二分册）. 中国矿业大学出版社，1988
3. 周立吾等编. 矿山测量学（第一分册）. 中国矿业大学出版社，1987
4. 季斌德、邵自修编. 工程测量. 测绘出版社，1988
5. 侯国富等编. 建筑工程测量. 测绘出版社，1987
6. 吴子安、吴栋材编. 水利工程测量. 测绘出版社，1990
7. 陆之光主编. 建筑测量. 中国建筑工业出版社，1987
8. 北京市测绘处、北京建筑工程学院合编. 城市建设工程测量. 测绘出版社，1981
9. 陈永奇等编著. 高等应用测量. 武汉测绘科技大学出版社，1996
10. 李青岳、陈永奇主编. 工程测量学. 测绘出版社，1995
11. 陈龙飞、金其坤编著. 工程测量. 同济大学出版社，1991
12. 石金峰编. 近代误差理论与数据处理. 煤炭工业出版社，1994
13. 李庆海、陶本藻. 概率统计原理和在测量中的应用. 测绘出版社，1982
14. 张正禄等编著. 精密工程测量. 测绘出版社，1992
15. 陶本藻编著. 自由网平差与变形分析. 测绘出版社，1984
16. 何国清等编著. 矿山开采沉陷学. 中国矿业大学出版社，1991
17. 王兆祥等编. 铁路工程测量. 测绘出版社，1986
18. 林宗元主编. 岩土工程试验监测手册. 辽宁科学技术出版社，1994
19. 朱鸿禧等编著. 测量学. 中国矿业大学出版社，1995
20. 梁开龙. 水下地形测量. 测绘出版社，1995
21. 吴翼麟. 孔祥元等. 特种精密工程测量. 测绘出版社，1993
22. 城乡建设环境保护部. 城市测量规范. 中国建筑工业出版社，1985
23. 中华人民共和国国家标准. 工程测量规范. 中国计划出版社，1993
24. 中华人民共和国能源部. 煤矿测量规程. 煤炭工业出版社，1989
25. 测绘词典编辑委员会编. 测绘词典. 上海辞书出版社，1981
26. 工厂建设测量手册编写组. 工厂建设测量手册. 测绘出版社，1990
27. 郭达志等编著. 测绘新技术及其应用. 中国矿业大学出版社，1995

K3

41-00-4943-1

参 考 文 献

1. 李青岳主编. 工程测量学. 测绘出版社，1984
2. 田佩俊、陈汉华编. 矿山测量学（第二分册）. 中国矿业大学出版社，1988
3. 周立吾等编. 矿山测量学（第一分册）. 中国矿业大学出版社，1987
4. 季斌德、邵自修编. 工程测量. 测绘出版社，1988
5. 侯国富等编. 建筑工程测量. 测绘出版社，1987
6. 吴子安、吴栋材编. 水利工程测量. 测绘出版社，1990
7. 陆之光主编. 建筑测量. 中国建筑工业出版社，1987
8. 北京市测绘处、北京建筑工程学院合编. 城市建设工程测量. 测绘出版社，1981
9. 陈永奇等编著. 高等应用测量. 武汉测绘科技大学出版社，1996
10. 李青岳、陈永奇主编. 工程测量学. 测绘出版社，1995
11. 陈龙飞、金其坤编著. 工程测量. 同济大学出版社，1991
12. 石金峰编. 近代误差理论与数据处理. 煤炭工业出版社，1994
13. 李庆海、陶本藻. 概率统计原理和在测量中的应用. 测绘出版社，1982
14. 张正禄等编著. 精密工程测量. 测绘出版社，1992
15. 陶本藻编著. 自由网平差与变形分析. 测绘出版社，1984
16. 何国清等编著. 矿山开采沉陷学. 中国矿业大学出版社，1991
17. 王兆祥等编. 铁路工程测量. 测绘出版社，1986
18. 林宗元主编. 岩土工程试验监测手册. 辽宁科学技术出版社，1994
19. 朱鸿禧等编著. 测量学. 中国矿业大学出版社，1995
20. 梁开龙. 水下地形测量. 测绘出版社，1995
21. 吴翼麟. 孔祥元等. 特种精密工程测量. 测绘出版社，1993
22. 城乡建设环境保护部. 城市测量规范. 中国建筑工业出版社，1985
23. 中华人民共和国国家标准. 工程测量规范. 中国计划出版社，1993
24. 中华人民共和国能源部. 煤矿测量规程. 煤炭工业出版社，1989
25. 测绘词典编辑委员会编. 测绘词典. 上海辞书出版社，1981
26. 工厂建设测量手册编写组. 工厂建设测量手册. 测绘出版社，1990
27. 郭达志等编著. 测绘新技术及其应用. 中国矿业大学出版社，1995

K3

41-00-4943-1

参 考 文 献

1. 李青岳主编. 工程测量学. 测绘出版社，1984
2. 田佩俊、陈汉华编. 矿山测量学（第二分册）. 中国矿业大学出版社，1988
3. 周立吾等编. 矿山测量学（第一分册）. 中国矿业大学出版社，1987
4. 季斌德、邵自修编. 工程测量. 测绘出版社，1988
5. 侯国富等编. 建筑工程测量. 测绘出版社，1987
6. 吴子安、吴栋材编. 水利工程测量. 测绘出版社，1990
7. 陆之光主编. 建筑测量. 中国建筑工业出版社，1987
8. 北京市测绘处、北京建筑工程学院合编. 城市建设工程测量. 测绘出版社，1981
9. 陈永奇等编著. 高等应用测量. 武汉测绘科技大学出版社，1996
10. 李青岳、陈永奇主编. 工程测量学. 测绘出版社，1995
11. 陈龙飞、金其坤编著. 工程测量. 同济大学出版社，1991
12. 石金峰编. 近代误差理论与数据处理. 煤炭工业出版社，1994
13. 李庆海、陶本藻. 概率统计原理和在测量中的应用. 测绘出版社，1982
14. 张正禄等编著. 精密工程测量. 测绘出版社，1992
15. 陶本藻编著. 自由网平差与变形分析. 测绘出版社，1984
16. 何国清等编著. 矿山开采沉陷学. 中国矿业大学出版社，1991
17. 王兆祥等编. 铁路工程测量. 测绘出版社，1986
18. 林宗元主编. 岩土工程试验监测手册. 辽宁科学技术出版社，1994
19. 朱鸿禧等编著. 测量学. 中国矿业大学出版社，1995
20. 梁开龙. 水下地形测量. 测绘出版社，1995
21. 吴翼麟. 孔祥元等. 特种精密工程测量. 测绘出版社，1993
22. 城乡建设环境保护部. 城市测量规范. 中国建筑工业出版社，1985
23. 中华人民共和国国家标准. 工程测量规范. 中国计划出版社，1993
24. 中华人民共和国能源部. 煤矿测量规程. 煤炭工业出版社，1989
25. 测绘词典编辑委员会编. 测绘词典. 上海辞书出版社，1981
26. 工厂建设测量手册编写组. 工厂建设测量手册. 测绘出版社，1990
27. 郭达志等编著. 测绘新技术及其应用. 中国矿业大学出版社，1995

K3

41-00-4943-1