第一章 绪 论

第一章 绪 论.....1
§1－1 工程测量学的任务及作用.....1
一、测量学及其分类.....1
二、测量学在国家经济建设和发展中的作用.....2
§1－2 工程测量学发展简史.....3
一、工程测量学的发展概况.....3
二、工程测量学的发展展望.....6
§1－3 地球的形状和大小.....7
§1－4 地面点位置的确定.....9
一、地理坐标.....9
二、平面直角坐标.....10
三、地心坐标系.....13
四、高程.....14
§1－5 测量工作概述.....14
一、测量的基本工作.....14
二、测量工作的原则.....15
思考与练习题.....16

§1－1 工程测量学的任务及作用

一、测量学及其分类

测量学是研究获取反映地球形状、地球重力场、地球上自然和社会要素的位置、形状、空间关系、区域空间结构的数据的科学和技术。它的主要任务有三个方面：一是研究确定地球的形状和大小，为地球科学提供必要的数据和资料；二是将地球表面的地物地貌测绘成图；三是将图纸上的设计成果测设至现场。根据研究的具体对象及任务的不同，传统上又将测量学分为以下几个主要分支学科：

大地测量学（Geodesy）——是研究和确定地球形状、大小、重力场、整体与局部运动和地表面点的几何位置以及它们的变化的理论和技术的学科。其基本任务是建立国家大地控制网，测定地球的形状、大小和重力场，为地形测图和各种工程测量提供基础起算数据；为空间科学、军事科学及研究地壳变形、地震预报等提供重要资料。按照测量手段的不同，大地测量学又分为常规大地测量学、卫星大地测量学及物理大地测量学等。

地形测量学(Topography)——是研究如何将地球表面局部区域内的地物、地貌及其它

有关信息测绘成地形图的理论、方法和技术的学科。按成图方式的不同地形测图可分为模拟化测图和数字化测图。

摄影测量与遥感学(Photogrammetry and remote sensing)——是研究利用电磁波传感器获取目标物的影像数据，从中提取语义和非语义信息，并用图形、图像和数字形式表达的学科。其基本任务是通过对摄影像片或遥感图像进行处理、量测、解译，以测定物体的形状、大小和位置进而制作成图。根据获得影像的方式及遥感距离的不同，本学科又分为地面摄影测量学，航空摄影测量学和航天遥感测量等。

工程测量学（Engineering Surveying）——工程测量学是研究在工程建设的设计、施工和管理各阶段中进行测量工作的理论、方法和技术。工程测量是测绘科学与技术在国民经济和国防建设中的直接应用，是综合性的应用测绘科学与技术。

按工程建设的进行程序，工程测量可分为规划设计阶段的测量，施工兴建阶段的测量和竣工后的运营管理阶段的测量。规划设计阶段的测量主要是提供地形资料。取得地形资料的方法是，在所建立的控制测量的基础上进行地面测图或航空摄影测量。施工兴建阶段的测量的主要任务是，按照设计要求在实地准确地标定建筑物各部分的平面位置和高程，作为施工与安装的依据。一般也要求先建立施工控制网，然后根据工程的要求进行各种测量工作。竣工后的营运管理阶段的测量，包括竣工测量以及为监视工程安全状况的变形观测与维修养护等测量工作。

按工程测量所服务的工程种类，也可分为建筑工程测量、线路测量、桥梁与隧道测量、矿山测量、城市测量和水利工程测量等。此外，还将用于大型设备的高精度定位和变形观测称为高精度工程测量；将摄影测量技术应用于工程建设称为工程摄影测量；而将以电子全站仪或地面摄影仪为传感器在电子计算机支持下的测量系统称为 3 维工业测量。

地图制图学(Cartography)——是研究模拟和数字地图的基础理论、设计、编绘、复制的技术、方法以及应用的学科。它的基本任务是利用各种测量成果编制各类地图，其内容一般包括地图投影、地图编制、地图整饰和地图制印等分支。

二、测量学在国家经济建设和发展中的作用

测量学是国家经济建设的先行。随着科学技术的飞速发展，测量学在国家经济建设和发展的各个领域中发挥着越来越重要的作用。工程测量是直接为工程建设服务的，它的服务和应用范围包括城建、地质、铁路、交通、房地产管理、水利电力、能源、航天和国防等各种工程建设部门，可列举一些如下。

（1）城乡规划和发展离不开测量学。我国城乡面貌正在发生日新月异的变化，城市和村镇的建设与发展，迫切需要加强规划与指导，而搞好城乡建设规划，首先要有现势性好的地图，提供城市和村镇面貌的动态信息，以促进城乡建设的协调发展。

（2）资源勘察与开发离不开测量学。地球蕴藏着丰富的自然资源，需要人们去开发。勘探人员在野外工作，离不开地图，从确定勘探地域到最后绘制地质图、地貌图、矿藏分布图等，都需要用测量技术手段。随着测量技术的发展，如重力测量可以直接用干资源勘探。工程师和科学家根据测量取得的重力场数据可以分析地下是否存在重要矿藏，如石油、天然

气、各种金属等。

（3）交通运输、水利建设离不开测量。铁路公路的建设从选线、勘测设计，到施工建设都离不开测量。大、中水利工程也是先在地形图上选定河流渠道和水库的位置，划定流域面积，诸流量，再测得更详细的地图（或平面图）作为河渠布设、水库及坝址选择、库容计算和工程设计的依据。如三峡工程从选址、移民，到设计大坝等测量工作都发挥了重要作用。

（4）国土资源调查、土地利用和土壤改良离不开测量。建设现代化的农业，首先要进行土地资源调查，摸清土地“家底”，而且还要充分认识各地区的具体条件，进而制定出切实可行的发展规划。测量为这些工作提供了一个有效的工具。地貌图，反映出了地表的各种形态特征、发育过程、发育程度等，对土地资源的开发利用具有重要的参考价值；土壤图，表示了各类土壤及其在地表分布特征，为土地资源评价和估算、土壤改良、农业区划提供科学依据。

§1—2 工程测量学发展简史

一、工程测量学的发展概况

工程测量学是一门历史悠久的学科，是从人类生产实践中逐渐发展起来的。在古代，它与测量学并没有严格的界限。到近代，随着工程建设的大规模发展，才逐渐形成了工程测量学。

早在公元前二十七世纪建设的埃及大金字塔，其形状与方向都很准确，这说明当时就已有了放样的工具和方法。我国早在二千多年前的夏商时代，为了治水就开始了水利工程测量工作。司马迁在《史记》中对夏禹治水有这样的描述：“陆行乘车，水行乘船，泥行乘撬，山行乘攀（jú），左准绳，右规矩、载四时，以开九州，通九道，陂九泽，度九山。”这里所记录的就是当时的工程勘测情景，准绳和规矩就是当时所用的测量工具，准是可揆（kiu）平的水准器，绳是丈量距离的工具，规是画圆的器具，矩则是一种可定平、测长度、高度、深度和画圆画矩形的通用测量仪器。早期的水利工程多为河道的疏导，以利防洪和灌溉，其主要的测量工作是确定水位和堤坝的高度。秦代李冰父子领导修建的都江堰水利枢纽工程，曾用一个石头人来标定水位，当水位超过石头人的肩时，下游将受到洪水的威胁；当水位低于石头人的脚背时，下游将出现干旱。这种标定水位的办法与现代水位测量的原理完全一样。北宋时沈括为了治理汴渠，测得“京师之地比泗州凡高十九丈四尺八寸六分”，是水准测量的结果。

公元前十四世纪，在幼发拉底河与尼罗河流域曾进行过土地边界的划分测量。我国的地籍管理和土地测量最早出现在殷周时期，秦、汉过渡到私田制。隋唐实行均田制，建立户籍册。宋朝按乡登记和清丈土地，出现地块图。到了明朝洪武四年，全国进行土地大清查和勘丈，编制的鱼鳞图册，是世界最早的地籍图册。

早在公元前一千多年以前，我国就诞生了地图。《汉书.郊祭志》中有：“禹收九牧之金，铸九鼎，像九州”的记载。《左传》中有：“惜夏方有德也，远方图物，贡金九牧，铸鼎像物，百物而为之备，使民知神奸”。意思是说，在夏朝极盛时期，远方的人把地貌、地物以及禽

兽画成图，而九州的长官把图和一些金属当作礼品献给夏禹，禹收下“九牧之金”铸成鼎，并把远方人画的画铸在鼎上，以便百姓从这些图画中辨别各种事物。文中的“百物而为之备”，很明显说明是供牧人、旅行者使用的图。可惜，原物流传至二千多年前的春秋战国时，因战乱被毁而失传。

据宋代思想家朱熹推断，后来的《山海经图》是从夏代九鼎图像演变而来的，也是一种原始地图。在《山海经图》的“五藏三经图”上，画着山、水、动物、植物、矿物等，而且注记着道里的方位，是较规范的地图形式。由此可以说，中国在夏代已经有了原始的地图。

工程测量学的发展也受到了战争的促进。中国战国时期修筑的午道，公元前 210 年秦始皇修建的“堑山堙谷，千八百里”直道，古罗马构筑的兵道，以及公元前 218 年欧洲修建的通向意大利的“汉尼拔通道”等，都是著名的军用道路。修建中应用了测量工具进行地形勘测、定线测量和隧道定向开挖测量。唐代李筌指出“以水佐攻者强，……，先设水平测其高下，可以漂城，灌军，浸营，败将也”，说明了测量地势高低对军事成败的作用。中华民族伟大象征的万里长城修建于秦汉时期，这一规模巨大的防御工程，从整体布局到修筑，都进行了详细的勘察测量和施工放样工作。

工程测量学的发展在很长的一段时间内是非常缓慢的。直到二十世纪初，由于西方的第一、二次技术革命和工程建设规模的不断扩大，工程测量学才受到人们的重视，并发展成为测绘学的一个重要分支。以核子、电子和空间技术为标志的第三次技术革命，使工程测量学获得了迅速的发展。20 世纪 50 年代，世界各国在建设大型水工建筑物、长隧道、城市地铁中，对工程测量提出了一系列要求；20 世纪 60 年代，空间技术的发展和导弹发射场建设促使工程测量进一步发展；20 世纪 70 年代以来，高能物理、天体物理、人造卫星、宇宙飞行、远程武器发射等，需要建设各种巨型实验室，从测量精度和仪器自动化方面都对工程测量提出了更高的要求。二十世纪末，人类科学技术不断向着宏观宇宙和微观粒子世界延伸，测量对象不仅限于地面而且深入地下、水域、空间和宇宙，如核电站、摩天大楼、海底隧道、跨海大桥、大型正负电子对撞机等。由于仪器的进步和测量精度的提高，工程测量的领域日益扩大，除了传统的工程建设三阶段的测量工作外，在地震观测、海底探测、巨型机器、车床、设备的荷载试验、高大建筑物（电视发射塔、冷却塔）变形观测、文物保护，甚至在医学上和罪证调查中，都应用了最新的精密工程测量仪器和方法。1964 年国际测量师联合会（FIG）为了促进和繁荣工程测量，成立了工程测量委员会（第六委员会），从此，工程测量学在国际上作为一门独立的学科开展活动。

现代工程测量已经远远突破了为工程建设服务的狭窄概念，而向所谓的“广义工程测量学”发展。苏黎世高等工业大学马西斯教授指出：“一切不属于地球测量，不属于国家地图集范畴的地形测量和不属于官方的测量，都属于工程测量”。

从工程测量学的发展历史可以看出，它的发展经历了一条从简单到复杂、从手工操作到测量自动化、从常规测量到精密测量的发展道路，它的发展始终与当时的生产力水平相同步，并且能够满足大型特种精密工程中对测量所提出的愈来愈高的需求。举世瞩目的三峡水利枢扭工程，小浪底、二滩和溪洛渡等水利枢扭工程；长达 30 多公里的杭州湾大桥和东海大桥工程；已竣工的秦岭隧道（18.4 km），山西省引黄工程南干线 5#隧洞（长 26.5km），7#隧洞（长 42.6km），以及辽宁省大伙房引水工程隧道（长达 85.3 km）；上海磁悬浮铁路；北

京国家大剧院等大型精密特种工程，都堪称世界之最。大型特种精密工程建设和对测绘的要求是工程测量学发展的动力。下面结合国内外有关工程予以说明。

三峡水利枢纽工程变形监测和库区地壳形变、滑坡、岩崩以及水库诱发地震监测，其规模之大，监测项目之多，都堪称世界之最。如对滑坡体变形与失稳研究的计算机智能仿真系统，拟进行研究的三峡库区滑坡泥石流预报的 3S 工程等，都涉及到精密工程测量。隔河岩大坝外部变形观测的 GPS 实时持续自动监测系统，监测点的位置精度达到亚毫米级。该工程用地面方法建立的变形监测网，其最弱点精度优于±1.5mm。

北京正负电子对撞机的精密控制网，点位精度达±0.3mm。设备定位精度优于±0.2mm，200 米长的直线段漂移管准直精度达±0.1mm。大亚湾核电站控制网最弱点点位精度达±2mm，秦山核电站的环型安装测量控制网的精度高达±0.1mm。

武汉长江二桥全桥的贯通精度（跨距和墩中心偏差）达毫米级。长达 30 多公里的杭州湾大桥的 GPS 首级控制网的最弱点点位精度高达±1.4mm。高 454m 的上海东方明珠电视塔对于长 114 米、重 300 吨的钢桅杆天线，安装的铅垂准直误差仅±9mm。

长 18.4km 的秦岭隧道，洞外 GPS 网的平均点位精度优于±3mm，一等精密水准线路长 120 多公里。已贯通的辅助隧道，在仅有一个贯通面的情况下，贯通后实测的横向贯通误差为 12mm，高程方向的贯通误差只有 3mm。

国外的大型特种精密工程更不胜枚举。以大型粒子加速器为例，德国汉堡的粒子加速器研究中心，堪称特种精密工程测量的历史博物馆。1959 年建的同步加速器，直径仅 100m，1978 年的正负电子储存环，直径 743m，1990 年的电子质子储存环，直径 2000m。为了减少能量损失，改用直线加速器代替环形加速器，正在建的直线加速器长达 30km，100～300m 的磁件相邻精度要求优于±0.1mm，磁件的精密定位精度仅几个微米，并能以纳米级的精度确定直线度。用精密激光测距仪 TC2002K 进行距离测量，其测距精度与 ME5000 相当，平均边长为 50m 的 3800 条边，改正数小于±0.1mm 的占 95%。美国的超导超级对撞机，其直径达 27km，为保证椭圆轨道上的投影变形最小且位于一平面上，采用了一种双重正形投影。所作的各种精密测量，均考虑了重力和潮汐的影响。主网和加密网采用 GPS 测量，精度优于 1ppm。

德国的露天煤矿大型挖煤机开挖量动态测量计算系统是 GPS、GIS 技术相结合在大型特种工程中应用的一个典型例子。大型挖煤机长 140m，高 65m，自重 8000 吨，其挖斗轮的直径达 17.8m，每天挖煤量可达 10 多万吨。为了实时动态地得到挖煤机的采煤量，在其上安置了三台 GPS 接收机，与参考站进行无线电实时数据传输和差分动态定位，挖煤机上两点间距离的精度可达±1.5cm，根据三台接收机的坐标，按一定几何模型可计算出挖煤机挖斗轮的位置及采煤层的截面，其平面精度为±3cm，高程精度为±2cm。结合露天煤矿的数字地面模型，可计算出采煤量，经对比试验，其精度高达 4%。

南非某一核电站的冷却塔高 165m，直径 163m，在整个施工过程中，要求每一高程面上塔壁中心线与设计尺寸的限差小于±50mm，在塔高方向上每 10m 的相邻精度优于±10mm。由于在建造过程中发现地基地质构造不良，出现不均匀沉陷，使塔身产生变形。为此，要根据精密测量资料拟合出实际的塔壁中心线作为修改设计的依据。采用测量机器人用极坐标法作三维测量，对每一施工层，沿塔外壁设置了 1600 多个目标点，在夜间可完成全

部精密测量工作。对大量的测量资料通过恰当的数据处理模型使精度提高了一至数倍，所达到的相邻精度高于设计要求。精密测量不仅是施工的质量保证，为整治工程病害提供可靠的资料，同时也能对整治效果作出精确评价。

瑞士阿尔卑斯山的哥特哈德特长双线铁路隧道长达 57km，为该工程的修改特别地重新作了国家大地测量（LV95），采用 GPS 技术施测的控制网，以厘米级的精度确定出了整个地区的大地水准面。为加快进度和避开不良地质段，中间设了三个竖井，共四个贯通面，较只设一个贯通面可缩短工期 11 年。整个隧道的工程投资预计约 15 亿瑞士法朗，计划于 2004 年全线贯通。整个工程的测量工作集中反映了工程测量的最新技术。

高耸建筑物方面，有人设想，在 21 世纪将建造 2000m 乃至 4000m 的摩天大厦，这不仅是建筑师的梦想，也是对测量工程师的挑战。

二、工程测量学的发展展望

工程测量的发展趋势和特点可概括为：测量内外业作业的一体化；数据获取及处理的自动化；测量过程控制和系统行为的智能化；测量成果和产品的数字化；测量信息管理的可视化；信息共享和传播的网络化。现代工程测量发展的特点可概括为：精确、可靠、快速、简便、连续、动态、遥测、实时。

测量内外业作业的一体化系指测量内业和外业工作已无明确的界限，过去只能在内业完成的事现在在外业可以很方便地完成。测图时可在野外编辑修改图形，控制测量时可在测站上平差和得到坐标，施工放样数据可在放样过程中随时计算。

数据获取及处理的自动化主要指数据的自动化流程。电子全站仪、电子水准仪、GPS 接收机都是自动化地进行数据获取，大比例尺测图系统、水下地形测量系统、大坝变形监测系统等都可实现或都已实现数据获取及处理的自动化。用测量机器人还可实现了无人观测即测量过程的自动化。

测量过程控制和系统行为的智能化主要指通过程序实现对自动化观测仪器的智能化控制。

测量成果和产品的数字化是指成果的形式和提交方式，只有数字化才能实现计算机处理和管理。

测量信息管理的可视化包含图形可视化、三维可视化和虚拟现实等。

信息共享和传播的网络化是在数字化基础上进一步锦上添花，包括在局域网和国际互连网上实现。

从整个学科的发展来看，精密工程测量的理论技术与方法、工程的形变监测分析与灾害预报、工程信息系统的建立与应用是工程测量学研究的三个主要方向。

展望未来，工程测量学在以下方面将得到显著发展：

•测量机器人将作为多传感器集成系统在人工智能方面得到进一步发展，其应用范围将进一步扩大，影象、图形和数据处理方面的能力进一步增强；

•在变形观测数据处理和大型工程建设中，将发展基于知识的信息系统，并进一步与大地测量、地球物理、工程与水文地质以及土木建筑等学科相结合，解决工程建设中以及运行期间的安全监测、灾害防治和环境保护的各种问题。

• 工程测量将从土木工程测量、三维工业测量扩展到人体科学测量，如人体各器官或部位的显微测量和显微图像处理；

• 多传感器的混合测量系统将得到迅速发展和广泛应用，如 GPS 接收机与电子全站仪或测量机器人集成，可在大区域乃至国家范围内进行无控制网的各种测量工作。

• GPS、GIS 技术将紧密结合工程项目，在勘测、设计、施工管理一体化方面发挥重大作用。

• 大型和复杂结构建筑、设备的三维测量、几何重构以及质量控制将是工程测量学发展的一个热点固定式、移动式、车载、机载三维激光扫瞄仪将成为快速获取被测物体乃至地面建筑物、构筑物及地形信息的重要仪器。

•数据处理中数学物理模型的建立、分析和辨识将成为工程测量学专业教育的重要内容。

综上所述，工程测量学的发展，主要表现在从一维、二维到三维乃至四维，从点信息到面信息获取，从静态到动态，从后处理到实时处理，从人眼观测操作到机器人自动寻标观测，从大型特种工程到人体测量工程，从高空到地面、地下以及水下，从人工量测到无接触遥测，从周期观测到持续测量。测量精度从毫米级到微米乃至纳米级。一方面，随着人类文明的进展，对工程测量学的要求愈来愈高，服务范围不断扩大；另一方面，现代科技新成就，为工程测量学提供了新的工具和手段，从而推动了工程测量学的不断发展。而工程测量学的发展又将直接对改善人们的生活环境，提高人们的生活质量起重要作用。

§1—3 地球的形状和大小

测绘工作大多是在地球表面上进行的，测量基准的确定，测量成果的计算及处理都与地球的形状和大小有关。

在科学技术高速发展的今天，人类对自己居住的地球面貌已愈来愈清楚明白。但是，人们对地球到底是什么样子的认识，是经历了相当漫长的过程的。

古代，由于科学技术不发达，对地球的样子曾流传过许各传说和神话，人类只能通过简单的观察和想象来认识地球。例如，中国的古人观察到“天似穹窿”，就提出了“天圆地方”的说法。西方的古人按照自己所居住的陆地为大海所包围，就认为“地如盘状，浮于无垠海洋之上”。大约从公元前 8 世纪开始，希腊学者们试图通过自然哲学来认识地球。到公元前 6 世纪后半叶，毕达哥拉斯提出了地为圆球的说法。又过了两个世纪之后，亚里士多德根据月食等自然现象也认识到大地是球形，并接受其老师柏拉图的观点，发表了“地球”的概念，但都没有得到可靠的证明。

直到公元前 3 世纪，亚历山大学者埃拉托色尼首创子午圈弧度测量法，实际测量纬度差来估测地圆半径，最早证实了“地圆说”。稍后，我国东汉时期的天文学家张衡在《浑仪图注》中对“浑天说”作了完整的阐述，也认识到大地是一个球体。但在其天文著作《灵宪》中又说天圆地平。这些都说明当时人们对地球形状的认识还是很不明晰的。

从公元 6 世纪开始，西方在宗教桎梏之下，人们不但不继续沿着认识物质世界的道路迈步前进，反而倒退了。相反，中国的科学技术这时却在迅速发展。公元 8 世纪的 20 年代，唐朝高僧一行派太史监南宫说在河南平原进行了弧度测量，其距离和纬差都是实地测量的，

这在世界尚属首次。并由此得出地球子午线 1 度弧长为 132.3 公里，比现代精确值大 21 公里。之后，阿拉伯也于 9 世纪进行了富有成果的弧度测量。由此确认大地是球形的。但由于那时人类的活动范围很有限，其真实形状都没有得到实践检验。直到 400 多年前的 1522 年，航海家麦哲伦率领船队从西班牙出发，一直向西航行，经过大西洋、太平洋和印度洋，最后又回到了西班牙，才得以事实证明，地球确确实实是一个球体。

但是，人类对地球的认识并未就此结束。随着科学技术的发展和大地测量学科的形成与丰富，人们观测和认识地球形状的方法和手段越来越多。三角测量、重力测量、天文测量等等都是重要手段。近代科学家牛顿曾仔细研究了地球的自转，得出地球是赤道凸起，两极扁平的椭球体，形状像个桔子。到 20 世纪 50 年代末期，人造地球卫星发射成功，通过卫星观测发现，南北两个半球是不对称的。南极离地心的距离比北极短 40 米。因此，又有人把地球描绘成梨形。

以上，对地球的认识，仍是根据局部资料和间接手段得来的。1969 年 7 月 20 日，美国登月宇宙飞船“阿波罗”11 号的宇航员登上月球的时候，就看到了带蓝色的浑圆的地球，有如在地球上观月亮一样。科学家们根据以往资料和宇航员拍下的像片，认为最好把地球看作是一个“不规则的球体”。

地球的自然表面是很不规则的，其上有高山、深谷、丘陵、平原、江湖、海洋等，最高的珠穆朗玛峰高出海平面 8848.13m，最深的太平洋马里亚纳海沟低于海平面 11022m，其相对高差不足 20km，与地球的平均半径 6371km 相比，是微不足道的，就整个地球表面而言，陆地面积仅占 29%，而海洋面积占了 71%。因此，我们可以设想地球的整体形状是被海水所包围的球体，即设想将一静止的海洋面扩展延伸，使其穿过大陆和岛屿，形成一个封闭的曲面，如图 1-1 所示。静止的海水面称作**水准面**。由于海水受潮汐风浪等影响而时高时低，故水准面有无穷多个，其中与平均海水面相吻合的水准面称作**大地水准面**。由大地水准面所包围的形体称为**大地体**。通常用大地体来代表地球的真实形状和大小。

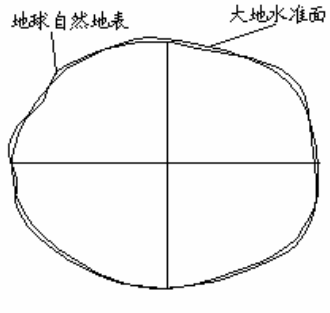


图 1－1 地球自然表面

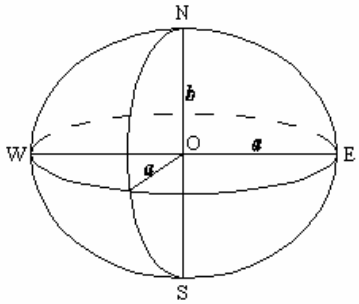


图 1－2 旋转椭球体

水准面的特性是处处与铅垂线相垂直。同一水准面上各点的重力位相等，故又将水准面称为**重力等位面**，它具有几何意义及物理意义。水准面和铅垂线就是实际测量工作所依据的面和线。

由于地球内部质量分布不均匀，致使地面上各点的铅垂线方向产生不规则变化，所以，大地水准面是一个不规则的无法用数学式表述的曲面，在这样的面上是无法进行测量数据的计算及处理的。因此人们进一步设想，用一个与大地体非常接近的又能用数学式表述的规则球体即旋转椭球体来代表地球的形状。如图 1-2 所示，它是由椭圆 NESW 绕短轴 NS 旋转而成。旋转椭球体的形状和大小由椭球基本元素确定，即

长半轴 a

短半轴 b

扁 率 $\alpha = \dfrac{a-b}{a}$

某一国家或地区为处理测量成果而采用与大地体的形状大小最接近，又适合本国或本地区要求的旋转椭球，这样的椭球体称为**参考椭球体**。确定参考椭球体与大地体之间的相对位置关系，称为**椭球体定位**。参考椭球体面只具有几何意义而无物理意义，它是严格意义上的测量计算基准面。

几个世纪以来，许多学者分别测算出了许多椭球体元素值，表 1-1 列出了几个著名的椭球体。我国的 1954 年北京坐标系采用的是克拉索夫斯基椭球，1980 国家大地坐标系采用的是 1975 国际椭球，而全球定位系统（GPS）采用的是 WGS-84 椭球。

表 1-1

椭球名称	长半轴 a (m)	短半轴 b (m)	扁 率 α	计算年代和国家	备 注
贝塞尔	6377397	6356079	1:299.152	1841 德国	
海福特	6378388	6356912	1:297.0	1910 美国	1942 年国际第一个推荐值
克拉索夫斯基	6378245	6356863	1:298.3	1940 前苏联	中国 1954 年北京坐标系采用
1975 国际椭球	6378140	6356755	1:298.257	1975 国际第三个推荐值	中国 1980 年国家大地坐标系采用
WGS-84	6378137	6356752	1:298.257	1979 国际第四个推荐值	美国 GPS 采用

由于参考椭球的扁率很小，在小区域的普通测量中可将地（椭）球看作圆球，其半径 $R=（a+a+b）/3=6371$km。

§1—4 地面点位置的确定

地面点的位置需用坐标和高程三维量来确定。坐标表示地面点投影到基准面上的位置，高程表示地面点沿投影方向到基准面的距离。根据不同的需要可以采用不同的坐标系和高程系。

一、地理坐标

当研究和测定整个地球的形状或进行大区域的测绘工作时，可用地理坐标来确定地面点的位置。地理坐标是一种球面坐标，视依据球体的不同而分为天文坐标和大地坐标。

1、天文坐标

以大地水准面为基准面，地面点沿铅垂线投影在该基准面上的位置，称为该点的**天文坐标**。该坐标用天文经度和天文纬度表示。如图 1-3 所示，将大地体看作地球，NS 即为地

球的自转轴，N 为北极，S 为南极，O 为地球体中心。包含地面点 P 的铅垂线且平行于地球自转轴的平面称为 P 点的**天文子午面**。天文子午面与地球表面的交线称为**天文子午线**，也称**经线**。而将通过英国格林尼治天文台埃里中星仪的子午面称为**起始子午面**，相应的子午线称为**起始子午线**或**零子午线**，并作为经度计量的起点。过点 P 的天文子午面与起始子午面所夹的两面角就称为 P 点的**天文经度**。用 λ 表示，其值为 0°~180°，在本初子午线以东的叫东经，以西的叫西经。

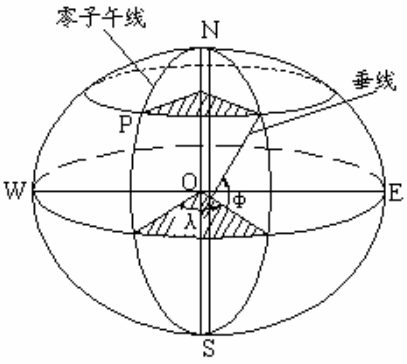


图 1－3 天文坐标

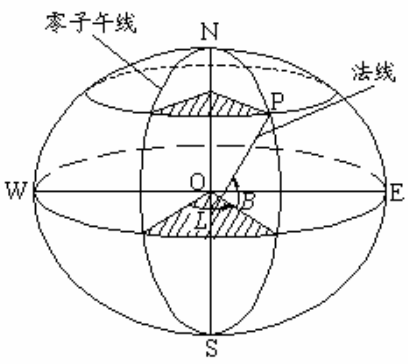


图 1－4 大地坐标

通过地球体中心 O 且垂直于地轴的平面称为**赤道面**。它是纬度计量的起始面。赤道面与地球表面的交线称为**赤道**。其它垂直于地轴的平面与地球表面的交线称为**纬线**。过点 P 的铅垂线与赤道面之间所夹的线面角就称为 P 点的**天文纬度**。用 φ 表示，其值为 0°~90°，在赤道以北的叫北纬，以南的叫南纬。

天文坐标（λ，φ）是用天文测量的方法实测得到的。

2、大地坐标

以参考椭球面为基准面，地面点沿椭球面的法线投影在该基准面上的位置，称为该点的**大地坐标**。该坐标用大地经度和大地纬度表示。如图 1-4 所示，包含地面点 P 的法线且通过椭球旋转轴的平面称为 P 的**大地子午面**。过 P 点的大地子午面与起始大地子午面所夹的两面角就称为 P 点的**大地经度**。用 L 表示，其值分为东经 0°~180°和西经 0°~180°。过点 P 的法线与椭球赤道面所夹的线面角就称为 P 点的**大地纬度**。用 B 表示，其值分为北纬 0°~90°和南纬 0°~90°。我国 1954 年北京坐标系和 1980 年国家大地坐标系就是分别依据两个不同的椭球建立的大地坐标系。

大地坐标（L，B）因所依据的椭球体面不具有物理意义而不能直接测得，只可通过计算得到。它与天文坐标有如下关系式：

$$\begin{aligned} L &= \lambda - \frac{\eta}{\cos\varphi} \\ B &= \varphi - \xi \end{aligned} \tag{1-1}$$

式中的 η 为过同一地面点的垂线与法线的夹角在东西方向上的垂线偏差分量，ξ 为在南北方向上的垂线偏差分量。

二、平面直角坐标

在实际测量工作中，若用以角度为度量单位的球面坐标来表示地面点的位置是不方便

的，通常是采用平面直角坐标。测量工作中所用的平面直角坐标与数学上的直角坐标基本相同，只是测量工作以 *x* 轴为纵轴，一般表示南北方向，以 *y* 轴为横轴一般表示东西方向，象限为顺时针编号，直线的方向都是从纵轴北端按顺时针方向度量的，如图 1-5 所示。这样的规定，使数学中的三角公式在测量坐标系中完全适用。

1、独立测区的平面直角坐标

当测区的范围较小，能够忽略该区地球曲率的影响而将其当作平面看待时，可在此平面上建立独立的直角坐标系。一般选定子午线方向为纵轴，即 *x* 轴，原点设在测区的西南角，以避免坐标出现负值。测区内任一地面点用坐标（*x*，*y*）来表示，它们与本地区统一坐标系没有必然的联系而为独立的平面直角坐标系。如有必要可通过与国家坐标系联测而纳入统一坐标系。经过估算，在面积为 300km^2 的多边形范围内，可以忽略地球曲率影响而建立独立的平面直角坐标系，当测量精度要求较低时，这个范围还可以扩大数倍。

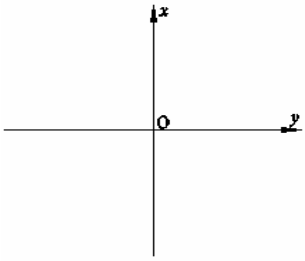


图 1－5 测量平面直角坐标系

2、高斯平面直角坐标系

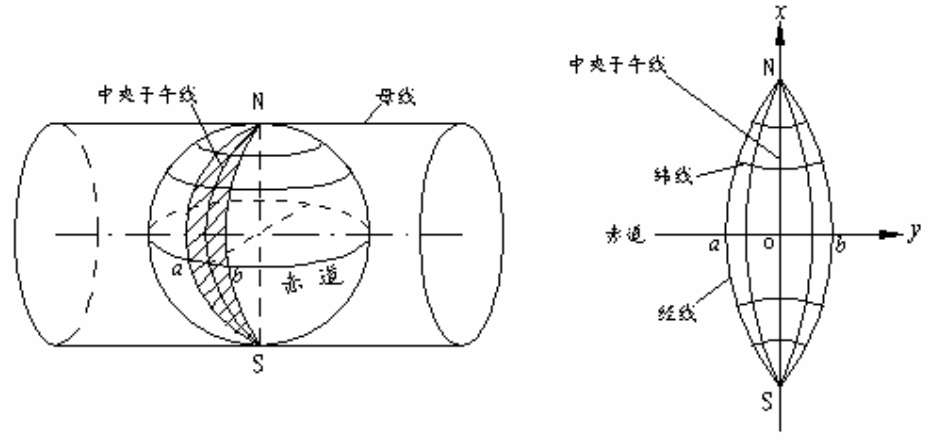
当测区范围较大时，要建立平面坐标系，就不能忽略地球曲率的影响，为了解决球面与平面这对矛盾，则必须采用地图投影的方法将球面上的大地坐标转换为平面直角坐标。目前我国采用的是高斯投影，高斯投影是由德国数学家、测量学家高斯提出的一种横轴等角切椭圆柱投影，该投影解决了将椭球面转换为平面的问题。从几何意义上看，就是假设一个椭圆柱横套在地球椭球体外并与椭球面上的某一条子午线相切，这条相切的子午线称为**中央子午线**。假想在椭球体中心放置一个光源，通过光线将椭球面上一定范围内的物象映射到椭圆柱的内表面上，然后将椭圆柱面沿一条母线剪开并展成平面，即获得投影后的平面图形，如图 1-6 所示。

该投影的经纬线图形有以下特点：

1、投影后的中央子午线为直线，无长度变化。其余的经线投影为凹向中央子午线的对称曲线，长度较球面上的相应经线略长。

2、赤道的投影也为一直线，并与中央子午线正交。其余的纬线投影为凸向赤道的对称曲线。

3、经纬线投影后仍然保持相互垂直的关系，说明投影后的角度无变形。



(a) (b)

图 1－6 高斯投影概念

高斯投影没有角度变形，但有长度变形和面积变形，离中央子午线越远，变形就越大，为了对变形加以控制，测量中采用限制投影区域的办法，即将投影区域限制在中央子午线两侧一定的范围，这就是所谓的分带投影，如图 1-7 所示。投影带一般分为 6° 带和 3° 带两种，如图 1-8 所示。

6° 带投影是从英国格林尼治起始子午线开始，自西向东，每隔经差 6° 分为一带，将地球分成 60 个带，其编号分别为 1、2、… 、60。每带的中央子午线经度可用下式计算：

$$L_6 = (6n-3)° \tag{1-2}$$

式中 n 为 6° 带的带号。6° 带的最大变形在赤道与投影带最外一条经线的交点上，长度变形为 0.14%，面积变形为 0.27%。

3° 投影带是在 6° 带的基础上划分的。每 3° 为一带，共 120 带，其中央子午线在奇数带时与 6° 带中央子午线重合，每带的中央子午线经度可用下式计算：

$$L_3 = 3°n' \tag{1-3}$$

式中 n' 为 3° 带的带号。3° 带的边缘最大变形现缩小为长度 0.04%，面积 0.14%。

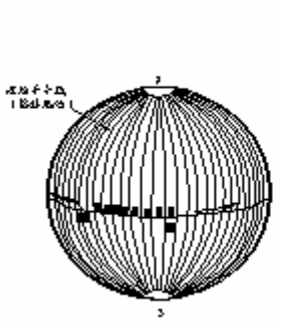


图 1－7 投影分带

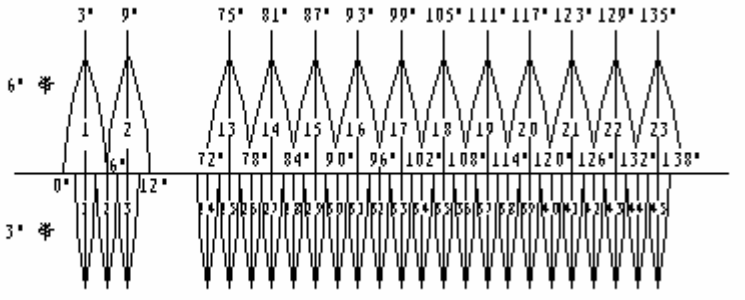


图 1－8 6° 带和 3° 带投影

我国领土位于东经 72°—136°之间，共包括了 11 个 6° 投影带，即 13—23 带；22 个 3° 投影带，即 24—45 带。成都位于 6° 带的第 18 带，中央子午线经度为 105° 。

通过高斯投影，将中央子午线的投影作为纵坐标轴，用 x 表示，将赤道的投影作为横坐标轴，用 y 表示，两轴的交点作为坐标原点，由此构成的平面直角坐标系称为**高斯平面直角坐标系**。如图 1-9 所示。对应于每一个投影带，就有一个独立的高斯平面直角坐标系，区分各带坐标系则利用相应投影带的带号。

在每一投影带内，*y* 坐标值有正有负，这对计算和使用均不方便，为了使 *y* 坐标都为正值，故将纵坐标轴向西平移 500km（半个投影带的最大宽度不超过 500km），并在 *y* 坐标前加上投影带的带号。如图 1-9 中的 A 点位于 18 投影带，其自然坐标为 *x*=3395451m，*y*=－82261m，它在 18 带中的高斯通用坐标则为 *X*=3395451m，*Y*=18 417739m。

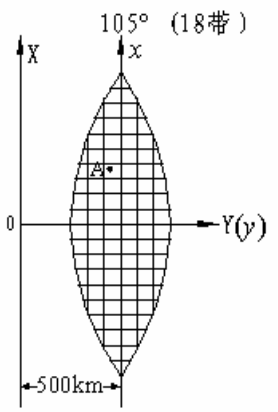


图 1-9 高斯平面直角坐标

三、地心坐标系

卫星大地测量是利用空中卫星的位置来确定地面点的位置。由于卫星围绕地球质心运动，所以卫星大地测量中需采用地心坐标系。该系统一般有两种表达式，如图 1-10 所示。

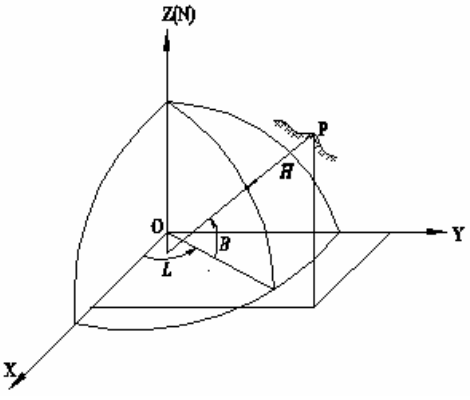


图 1－10 空间直角坐标系

地心空间直角坐标系：坐标系原点 O 与地球质心重合，Z 轴指向地球北极，X 轴指向格林尼治平子午面与地球赤道的交点 E，Y 轴垂直于 XOZ 平面构成右手坐标系。

地心大地坐标系：椭球体中心与地球质心重合，椭球短轴与地球自转轴相合，大地经度 *L* 为过地面点的椭球子午面与格林尼治平子午面的夹角，大地纬度 *B* 为过地面点的法线与椭球赤道面的夹角，大地高 *H* 为地面点沿法线至椭球面的距离。

于是，任一地面点 P 在地心坐标系中的坐标，可表示为（*X*，*Y*，*Z*）或（*L*，*B*，*H*）。二者之间有一定的换算关系。美国的全球定位系统（GPS）用的 WGS-84 坐标就属这类坐标。

四、高程

在一般的测量工作中都以大地水准面作为高程起算的基准面。因此，地面任一点沿铅垂线方向到大地水准面的距离就称为该点的**绝对高程**或**海拔**，简称**高程**，用 H 表示。如图 1-11 所示，图中的 H_A、H_B 分别表示地面上 A、B 两点的高程。我国规定以 1950~1956 年间青岛验潮站多年记录的黄海平均海水面作为我国的大地水准面，由此建立的高程系统称为“1956 年黄海高程系”。新的国家高程基准面是根据青岛验潮站 1952~1979 年间的验潮资料计算确定的，依此基准面建立的高程系统称为“1985 国家高程基准”。并于 1987 年开始启用。

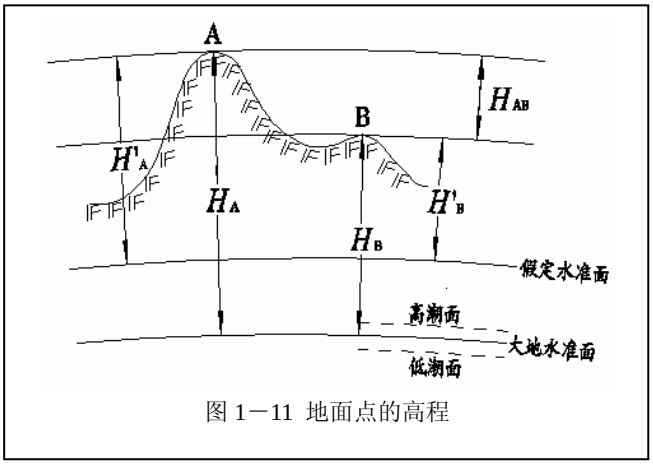


图 1－11 地面点的高程

当测区附近暂没有国家高程点可联测时，也可临时假定一个水准面作为该区的高程起算面。地面点沿铅垂线至假定水准面的距离，称为该点的**相对高程**或**假定高程**。如图 1-8 中的 H'_A、H'_B 分别为地面上 A、B 两点的假定高程。

地面上两点之间的高程之差称为**高差**，用 h 表示，例如，A 点至 B 点的高差可写为：

$$h = H_B - H_A = H'_B - H'_A \tag{1-4}$$

由上式可知，高差有正、有负，并用下标注明其方向。在土木建筑工程中，又将绝对高程和相对高程统称为**标高**。

§1－5 测量工作概述

测量工作的基本任务是要确定地面点的几何位置。确定地面点的几何位置需要进行一些测量的基本工作，为了保证测量成果的精度及质量需遵循一定的测量原则。

一、测量的基本工作

如图 1-12 所示，A、B、C、D、E 为地面上高低不同的一系列点，构成空间多边形 ABCDE，图下方为水平面。从 A、B、C、D、E 分别向水平面作铅垂线，这些垂线的垂足在水平面上构成多边形 abcde，水平面上各点就是空间相应各点的正射投影；水平面上多边形的各边就

是各空间斜边的正射投影；水平面上的角就是包含空间两斜边的两面角在水平面上的投影。地形图就是将地面点正射投影到水平面上后再按一定的比例尺缩绘至图纸上而成的。由此看出，地形图上各点之间的相对位置是由水平距离 D、水平角 β 和高差 h 决定的，若已知其中一点的坐标（x，y）和过该点的标准方向及该点高程 H，则可借助 D、β 和 h 将其它点的坐标和高程算出。因此，不论进行任何测量工作，在实地要测量的基本要素都是：

1. 距离（水平距离或斜距）；
2. 角度（水平角和竖直角）；
3. 直线的方向；
4. 高程（高差）。

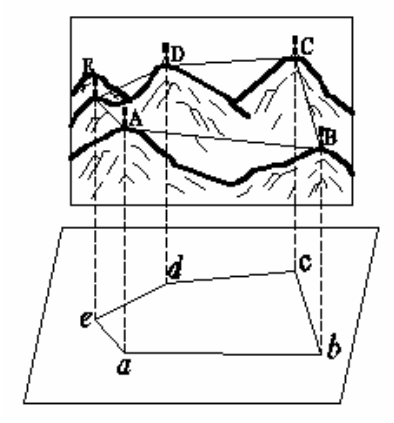


图 1-12 测量的基本工作

二、测量工作的原则

测量工作必须遵循的第一条基本原则是“从整体到局部”，“先控制后碎部”的原则；

测量工作的目的之一是测绘地形图，地形图是通过测量一系列碎部点（地物点和地貌点）的平面位置和高程，然后按一定的比例，应用地形图符号和注记缩绘而成。测量工作不能一开始就测量碎部点，而是先在测区内统一选择一些起控制作用的点，将它们的平面位置和高程精确地测量计算出来，这些点被称作**控制点**，由控制点构成的几何图形称作**控制网**，然后再根据这些控制点分别测量各自周围的碎部点，进而绘制成图，如图 1-13 所示的多边形 ABCDEF 就是该测区的控制网。

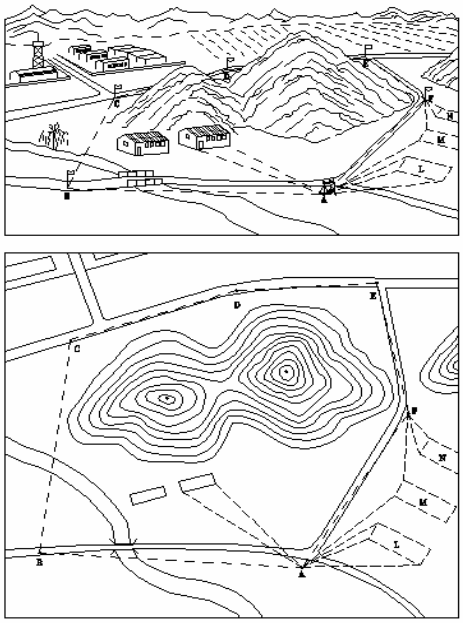


图 1－13 控制测量与碎部测量

思考与练习题

1、 名词解释题

(1) 水准面

(2) 大地水准面

(3) 高斯直角坐标系

(4) 高程

(5) 相对高程

(6) 任意直角坐标系

(7) 水平面

(8) 参考椭球

2、 填空题

(1) 测量工作中的铅垂线与_____面垂直。

(2) 水准面上的任意一点都与_____垂直。

(3) 地球陆地表面上一点 A 的高程是 A 至平均海水面在_____方向的长度。

(4) 珠穆郎玛峰的高程是 8848.48m，此值是指该峰至_____处的_____长度。

(5) 测量工作中采用的平面直角坐标与数学中的平面直角坐标不同之处是_____。

(6) 确定地面上的一个点的位置常用三个坐标值，它们是 1._____ 2._____ 3._____。

(7) 实际测量工作中依据的基准面是_____面。

(8) 实际测量工作中依据的基准线是_____线。

(9) 局部地区的测量工作有时用任意直角坐标系，此时 X 坐标轴的正向常取_____方

向。

(10)普通测量工作有三个基本测量要素，它们是 1._____ 2._____ 3._____。

3、 选择题

(1) 任意高度的平静水面_____（都不是，都是，有的是）水准面。

(2) 不论处于何种位置的静止液体表面_____（并不都是，都称为）水准面。

(3) 地球曲率对_____（距离，高程，水平角）的测量值影响最大。

(4) 在小范围内的一个平静湖面上有 A、B 两点，则 B 点相对于 A 点的高差_____（＞0，＜0，＝0，≠0）。

(5) 大地水准面_____（亦称为，不同于）参考椭球面。

(6) 平均海水面_____（是，不是）参考椭球面。

4、 地球的形状为何要用大地体和旋转椭球体来描述？

5、 水准面的特性如何？

6、 球面坐标与平面坐标有何区别？天文坐标与大地坐标有何区别？

7、 测量工作的基本原则是什么？

8、 何谓高程？何谓高差？若已知 A 点的高程为 498.521m，又测得 A 点到 B 点的高差为 -16.517m，试问 B 点的高程为多少？