

建筑工程计算机应用系列教材

# 大比例尺数字测图的 原理、方法与应用

杨德麟 等 编著

清华大学出版社

(京)新登字 158 号

内 容 提 要

本书较全面、系统地阐述了大比例尺数字测图的原理、方法与应用。主要包括:数字测图计算机系统的基本知识、全站仪及其应用、计算机绘图的基本方法、数字测图的数据采集、建模和成图、EPSW 电子平板测图系统、控制测量的数据处理、地籍测量、综合地下管网测量等。

本书是在作者近十年对大比例尺数字测图技术研究的基础上编著的。理论、技术先进,内容丰富,资料翔实,可供广大测绘专业技术人员、研究人员学习、参考,并可作为测绘专业大专院校本科生、研究生的教材和参考书。

图书在版编目(CIP)数据  
大比例尺数字测图的原理 方法与应用/杨德麟编著. 北京:清华大学出版社, 1997  
ISBN 7-302-02800-1  
    . 大... . 杨... . 区域-地质调查, 比例尺-数字测量法 . P 623. 1  
中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 00040 号

出版者: 清华大学出版社(北京清华大学校内, 邮编 100084)  
    因特网地址: [www.tup.tsinghua.edu.cn](http://www.tup.tsinghua.edu.cn)  
印刷者: 北京市昌平区环球印刷厂  
发行者: 新华书店总店北京科技发行所  
开 本: 787x 1092 1/16 印张: 15.75 字数: 370 千字  
版 次: 1998 年 2 月第 1 版 1998 年 2 月第 1 次印刷  
书 号: ISBN 7-302-02800-1/TU · 129  
印 数: 0001 ~ 5000  
定 价: 15.00 元

## 序

随着计算机技术、空间技术、通讯技术和信息技术的不断进步,工业化社会将向信息化社会过渡。在信息革命浪潮推动下,数字化测绘技术与空间定位技术、航空航天遥感技术以及地理信息系统/土地信息系统技术相结合,正在形成面向 21 世纪的地理信息产业。

由于地面测量仪器的电子化和数字化,地面测量仪器可以通过电子手簿和便携式计算机,与各种全站仪或测距仪、电子经纬仪联结成一体化地面数字测图系统。利用 CCD 摄像技术,可以进一步提高自动化水平。数字式地面测图系统,由于它具有高精度、低成本、灵活、方便等特点,与 GPS 定位和航空航天遥感测图形成了极好的互补关系。

为了顺应地理信息产业的发展 and 我国各行各业对大比例数字测图的需要,由清华大学杨德麟教授主持,以近十年数字测图的研究、开发和应用为基础,编著了《大比例尺数字测图原理、方法与应用》一书。该书共分 14 章,内容丰富而精练。从叙述数字测图的历史发展和相应的电子计算机基础知识入手,接着介绍数字测图的主要仪器——全站型电子速测仪原理与应用、计算机绘图方法和野外数据的数字化采集原理与方法。针对大比例尺数字测图的需要,用 4 章的篇幅讨论地形图的数字化、图形数据的组织、处理与输出、图式符号库的设计、建立 DTM 的原理和方法等高线的生成。书中还以清华大学研制的 EPSW 电子平板测绘系统为实例,进一步阐明大比例尺数字测图原理与应用,并说明如何用这类数字测图系统来进行数字地籍测量和综合地下管线测量的方法和作业过程。为使读者更全面地掌握数字地面测绘技术,文中还介绍了控制测量的数据处理和 GPS 测量原理。

本书内容充分体现了测绘技术从模拟方法向数字方法进步的特点,理论性和实用性很强,具有广泛的应用和参考价值,是数字测绘技术园中的一朵盛开的鲜花。杨德麟教授具有四十余年教学与科研经验,年过六旬,依然充满活力与朝气,活跃在大比例尺数字测图的教学、科研和应用领域,其精神值得大家学习。我深信本书的出版和发行,将会推动我国大比例尺数字测图事业的发展!

于武昌珞珈山下

1997 年 7 月 1 日

# 前 言

人类正迈向信息社会,作为信息产业重要组成部分的地理信息产业有了蓬勃发展。近几年我国城市地理信息系统(UGIS)建设的势头亦很迅猛,GIS的建立离不开空间数据和数据的更新。没有数据,GIS不可能建立;有了数据,若不能随大地日新月异的变化及时地更新,GIS就会失去生命力。数字地(形)图及其更新是建立GIS最基础、工作量也最大的工作。

在各类土木工程建设中,计算机辅助设计(CAD)技术也得到飞速发展。设计所使用的地形图显示于屏幕,在交互式计算机图形系统的支撑下,工程设计人员可直接在屏幕上进行设计、方案的比较和选择等等。完整的土木工程CAD技术,离不开数字化的地形图。

因此,传统的大比例尺测图方法,必然要经历一场不可避免的革命性变化,变革最基本的目标就是数字化、自动化(智能化)。

我国从20世纪80年代初开始了数字测图技术的研究、开发、试用和不断完善,已涌现出一些比较好的和优秀的数字测图软件,清华大学土木系和清华山维公司研究开发的EPSW电子平板测图系统就是其中比较优秀的一个,在许多测绘部门已用它形成数字图的规模生产。数字测图技术正趋于成熟,终将取代人工模拟测图,成为地形测绘的主流。它是反映测绘技术现代化水平的标志之一。

为适应信息时代测绘技术的变革,为大比例尺数字测图技术发展的需要,作者在十余年从事大比例尺数字测图技术研究、软件开发和测图生产实践的基础上编著了此书。力图以清晰的思路、简明的语言、翔实的内容贯穿全书。理论分析与实际应用并重。

全书共分14章,较全面、系统地阐述了大比例尺数字化测图的原理、方法与应用。为适应各类技术人员的阅读参考,对数字测图计算机系统的基本知识、全站型电子速测仪及其应用等,也给予了一定篇幅的介绍。

本书由杨德麟教授主持编著,参加编写的人员有:杨德麟(第1,3,5~8,11,14章及附录,并参与了其它各章的编写和全书的统稿定稿)、林铸(第2,4,9,10章)、楼宇(第12章)、王孟和(第13章及12.7节)、孙俊(第14章)。参加本书编写的还有:陈辉、徐卫东、白立舜、张远智、张新宇等。梁文英、井兆骥参加了绘图,鞠占玲、王孟和、梁桂容等进行了初排版工作;清华山维新技术开发公司提供了有关技术资料。

华彬文编审、王侬教授、黄志文教授级高工提出了宝贵意见,在此表示衷心感谢!

数字测图是高新技术,其理论、方法还在不断完善。作者水平有限,书中难免有不当之处,恳请读者批评指正。

杨德麟

1997年2月于北京清华园

# 目 录

- 1 绪论 ..... 1
  - 1.1 数字测图发展概述 ..... 1
  - 1.2 大比例尺数字测图系统 ..... 3
  - 1.3 数字测图的发展与展望 ..... 5
- 2 数字测图计算机系统的基本知识..... 10
  - 2.1 概述..... 10
  - 2.2 计算机硬件..... 11
  - 2.3 计算机软件..... 20
- 3 全站型电子速测仪及其应用..... 22
  - 3.1 全站型电子速测仪发展概述..... 22
  - 3.2 电子经纬仪工作原理..... 24
  - 3.3 竖轴倾斜自动补偿器工作原理..... 33
  - 3.4 电子经纬仪轴系误差的检验、改正与补偿 ..... 34
  - 3.5 全站仪数据通信..... 41
  - 3.6 全站仪的特性及其使用要点..... 47
- 4 计算机绘图的基本方法..... 50
  - 4.1 坐标变换..... 50
  - 4.2 绘制直线..... 53
  - 4.3 绘制圆和圆弧..... 57
  - 4.4 绘制任意曲线..... 59
  - 4.5 二维图形的剪裁..... 59
  - 4.6 图形显示的分层处理..... 65
- 5 数字测图的野外作业..... 67
  - 5.1 野外数据采集原理..... 67
  - 5.2 野外作业的方法与步骤..... 73
  - 5.3 外业数据记录与数据文件格式..... 82
- 6 地形图的数字化..... 88
  - 6.1 数字化仪的工作性能..... 88

6.2	图纸定位.....	89
6.3	台板菜单及功能键定义模块.....	93
6.4	数据采集.....	94
6.5	图幅接边.....	96
6.6	数字化精度.....	97
6.7	扫描屏幕数字化.....	97
7	地形图的绘制 .....	100
7.1	概述 .....	100
7.2	坐标计算的批处理 .....	104
7.3	图形信息的组织与处理 .....	104
7.4	分幅与接边 .....	109
7.5	图廓 .....	115
7.6	层 .....	117
7.7	地形图的绘制 .....	118
8	图式符号库的设计 .....	121
8.1	建立图式符号库的一般原则 .....	121
8.2	图式符号库的设计原理 .....	122
8.3	基于 AutoCAD 建立图式符号库的基本方法 .....	123
8.4	EPSW 的图式符号库 .....	127
8.5	图形应用接口 .....	131
9	建立 DTM 的原理和方法 .....	133
9.1	概述 .....	133
9.2	数据的获取、转换及预处理.....	134
9.3	DTM 的数据结构 .....	135
9.4	TIN 的建立 .....	137
9.5	矩形格网的建立 .....	142
9.6	高程插值算法 .....	143
10	等高线的追踪与平滑处理.....	147
10.1	矩形格网的等高线追踪.....	147
10.2	TIN 等高线的追踪 .....	148
10.3	DTM 区域内部等高线的断开处理 .....	151
10.4	等高线的平滑处理.....	152
11	EPSW 电子平板测绘系统.....	156

11.1	EPSW 的测图功能 .....	156
11.2	面向 GIS 的前端系统 .....	166
11.3	EPSW 测绘图形基础平台 .....	167
11.4	EPSW 空间数据库 .....	168
11.5	EPSW 的符号扩充功能 .....	178
12	控制测量的数据处理.....	180
12.1	概述.....	180
12.2	坐标概算.....	180
12.3	控制网的数据结构与闭合差计算.....	182
12.4	粗差定位和剔除.....	187
12.5	控制网平差.....	191
12.6	GPS 控制网的建立及其数据处理 .....	193
13	数字地籍测量.....	203
13.1	地籍测量概述.....	203
13.2	数字地籍测量的基本概念和原理.....	205
13.3	数字地籍测绘系统.....	213
14	综合地下管网测绘系统.....	219
14.1	概述.....	219
14.2	地下管线探测概述.....	220
14.3	地下管线地形图的绘制.....	223
14.4	EPSP 管网测绘系统目标 .....	226
14.5	EPSP 的结构体系 .....	228
14.6	作业步骤.....	231
附录	GPS 测量的基本知识及其应用概述 .....	234
1	GPS 定位系统 .....	234
2	GPS 定位原理 .....	236
3	伪距测量和载波相位测量 .....	237
4	GPS 定位方法 .....	238
参考文献	.....	241

# 1 绪 论

## 1.1 数字测图发展概述

地形测量是利用测量仪器对地球表面局部区域内各种地物、地貌(统称地形)的空间位置和几何形状进行测定,并按一定的比例尺缩小,绘制成地形图。

传统的地形测量是用仪器在野外测量角度、距离、高差,作记录(称外业),在室内作计算、处理,绘制地形图(称内业)等。由于地形测量的主要成果——地形图是由测绘人员利用分度器、比例尺等工具模拟测量数据,按图式符号展绘到白纸(绘图纸或聚酯薄膜)上,所以又俗称白纸测图或模拟法测图。

科学技术的进步,信息化测量仪器——全站型电子速测仪的广泛应用,以及微型计算机硬件和软件技术的迅猛发展与渗透,促进了地形测绘的自动化,并成为大比例尺地形测量全面革新的最积极、最有活力的因素和最可靠的技术保障,地形测量从白纸测图变革为数字测图,测量的成果不仅是绘制在纸上的地形图,更重要的是提交可供传输、处理、共享的数字地形信息,即以计算机磁盘为载体的数字地形图,这将成为信息时代不可缺少的地理信息的重要组成部分。

数字地图是以数字的形式表达地形特征点的集合形态,数字测图实质是一种全解析、机助测图的方法。与模拟测图相比,具有显而易见的优势和广阔的发展前景,是地形测绘发展的技术前沿。

### 1.1.1 数字测图使大比例尺测图走向自动化

传统测图方式主要是手工作业,外业测量人工记录,人工绘制地形图;为用图人员提供蓝晒图纸,在图上人工量、算所需要的坐标、尺寸和面积等等。数字测图则使野外测量自动记录,自动解算处理,自动成图、绘图,并向用图者提供可处理的数字地图软盘。数字测图自动化的效率高,劳动强度小,错误(读错、记错、展错)几率小,绘得的地形图精确、美观、规范。

### 1.1.2 数字测图使大比例尺测图走向数字化

用软盘提供的数字地(形)图,存储了图的具有特定含义的数字、文字、符号等各类数据信息,同时可以传输、处理和多用户共享;可以自动提取点位坐标、两点距离、方位以及地块面积等等;通过接口,可以将数字图传输给工程 CAD(计算机辅助设计)使用;可供 GIS(地理信息系统)建库使用;可依软件的性能,方便地进行各种处理(如分层处理),从而可绘出各类专题图(如房屋图、道路图、水系图等);还可进行局部更新,如对改扩建的房屋建筑、变更了的地籍或房产等都可以方便地做到局部修测、局部更新,始终保持数字地



图整体的现势性。

总之, 地图的数字化信息赋予图以巨大的生命力, 大大提高了地形图的自身价值, 扩大了地形图的服务范围, 将在政府、业务管理、经济建设各部门发挥重要的作用。

### 1.1.3 数字测图使大比例尺测图实现了高精度

众所周知, 模拟测图方法的比例尺精度决定了图的最高精度, 无论所采用的测量仪器精度多高, 测量方法多精确, 都无济于事。例如 1 : 1 000 的地形图, 比例尺精度以图上 0.1mm 计, 则最好的精度也只能达到 10cm, 图经过蓝晒、搁置, 到用户手里, 用图的误差就更大了。若再考虑测量方法的误差, 一般也可达到图上 0.3mm 左右。总体上讲, 白纸测图还适应当时的仪器发展和测量科技水平, 如对 1 : 1 000 的图采用视距测量, 视距精度就是 20cm ~ 30cm, 与比例尺精度大致匹配。如测图比例尺再小, 则视距读数的精度还可以放宽。而对 1 : 500 的图, 在精度要求较高的地方, 如房屋建筑等, 视距的精度就不够, 要用钢尺或皮尺量距, 用坐标展点。普及红外测距仪以后, 测距精度大大提高, 为厘米级精度, 而白纸测图的成果——模拟图或称图解地形图, 却体现不出仪器测量精度的提高, 是被图解地形图的比例尺精度限制住了; 若采用全站仪(全站型电子速测仪)测量, 仍使用白纸测图方式测图, 则更是极大的浪费。

数字测图则不然, 全站仪测量的数据作为电子信息, 可自动传输、记录、存储、处理、成图、绘图。在这全过程中, 原始测量数据的精度毫无损失, 从而获得高精度(与仪器测量同精度)的测量成果。数字地形图最好地(无损地)体现了外业测量的高精度, 也就是最好地体现了仪器发展更新、精度提高的高科技进步的价值。它不仅适应当今科技发展的需要, 也适应了现代社会科学管理的需要, 如地籍测量、管网测量、房产测量等等, 既保证了高精度, 又提供了数字化信息, 可以满足建立各专业管理信息系统的需要。

### 1.1.4 数字测图使大比例尺测图进入了新时期

百余年来测绘技术的发展使地形测量有了比较成熟的理论和方法, 人们很少再去探索, 而将白纸测图归结为只掌握一些作业方法和经验。电子测绘仪器的发展和应用, 也一直被淹没在白纸测图的汪洋大海之中, 发挥不出应有的水平, 因而地形测量的理论与实践也就长期得不到应有的发展。

信息时代的到来, 电子测绘仪器和计算机的迅猛发展和广泛应用, 突破了传统的测绘技术和方法, 数字测图应运而生。数字地形测量的理论和实践不断得到发展, 诸如大比例尺数字地面模型的建模理论、等高线的插值和拟合理论、数据结构与计算机图形学、数字地形图内外业一体测绘的理论、数字地图应用的理论、电子测绘仪器(含计算机)的原理、检核与使用方法、测绘软件系统的设计理论与实施, 以及一些新的作业方法的建立, 如图根控制和碎部一次测量的一步法、自然地界分组作业法等等。

目前数字测图正处于蓬勃发展的时期, 还需不断深入地研究它的理论和方法, 使之在广泛的实践中得到创新和完善。数字测图必将成为地形测绘的主流, 并逐步代替白纸测图, 最后形成自身的新的学科体系。可以说, 数字测图标志着大比例尺测图的科学技术理论与实践的革命性进步, 标志着地形测绘科技发展的新阶段、新里程、新时期。

## 1.2 大比例尺数字测图系统

### 1.2.1 数字测图系统的概念

数字测图(digital surveying and mapping, 简称 DSM)系统是以计算机为核心, 在外连输入输出设备硬、软件的支持下, 对地形空间数据进行采集、输入、成图、绘图、输出、管理的测绘系统(图 1-1)。

图 1-1 数字测图系统概念框图

广义地理解数字测图系统如图 1-2 所示。采集地形数据输入计算机, 由机内的成图软件进行处理、成图、显示, 经过编辑修改, 生成符合国标的地形图, 并控制数控绘图仪出图(以后各章将作详细论述)。

在实际工作中, 大比例尺数字测图(或数字地形测图)一般是指地面数字测图, 也称全野外数字测图。传统的地形测量也是指地面测量(野外实地测量), 而其它的方法都有它自身的名称, 如航测数字测图、数字化仪数字化图或扫描数字化图等。

图 1-2 广义数字测图系统框图

### 1.2.2 地形数据的采集

数字测图系统, 由于空间数据的来源不同, 采集的仪器和方法也不同, 目前有如下几种方法:

#### (1) 野外数据采集

用全站仪(或半站仪)进行实地测量, 将野外采集的数据自动传输到电子手簿、磁卡或便携机内记录, 并在现场绘制地形(草)图, 到室内将数据自动传输到计算机, 人机交互编辑后, 由计算机自动生成数字地图, 并控制绘图仪自动绘制地形图。这种方法是从野外实

地采集数据的, 又称地面数字测图。由于测绘仪器测量精度高, 而电子记录又如实地记录和处理, 所以地面数字测图是几种数字测图方法中精度最高的一种, 也是城市地区的大比例尺(尤其是 1 : 500 的)测图中最主要的测图方法。

现在, 各类建设使城市面貌日新月异, 在已建(或将建)的城市测绘信息系统中, 多采用野外数字测图作为测量与更新系统, 发挥地面数字测图机动、灵活、易于修改的特点, 局部测量, 局部更新, 始终保持地形图的现势性。

(2) 原图(底图)数据采集

在已进行过测绘工作的测区, 有存档的纸介质(或聚酯薄膜)地形图, 即原图, 也称底图。为了图的计算机存档和修测, 为了建立该区的 GIS 或进行工程 CAD, 就必须将原图数字化, 才能将图输入计算机。数字化的方法有两种:

数字化仪数字化

通称的数字化仪实质是图形数字化仪, 是一种将图示坐标转换为数字信息的设备。数字化的过程, 即用数字化仪对原图的地形特征点逐点进行采集(称手扶数字化), 将数据自动传输到计算机, 处理成数字地图的过程。数字化的图还可通过绘图仪绘制图解地形图(即白纸上的可视地形图)。

数字化图的精度一般低于原图的精度, 尤其当作业员疲劳时, 精度更易受影响。目前, 在我国数字化仪数字化仍是建立 GIS 的主要数字化方法。

扫描仪数字化

扫描仪实质是图像(含图形)数字化仪, 仪器沿 x 方向扫描, 沿 y 方向走纸, 图在扫描仪上走一遍, 即完成图的扫描数字化, 将数据输入计算机, 存储、处理并可再回放成图。扫描数字化速度较快, 但此时获得的仅为栅格数据。

数字化仪采集的数据为矢量数据结构(图 1-3(a)), 扫描仪数字化的数据为栅格(格网)数据结构(图 1-3(b))。矢量数据是以 x, y 坐标来精确地表示点位, 能精确地定义位置、长度、大小等。栅格数据结构实际是像元阵列结构(网格的最小单元称像元或像素), 每一像元的位置由行号和列号确定, 其精度取决于像元的大小。

(a) 矢量数据结构

(b) 栅格数据结构

图 1-3

矢量数据结构是人们最熟悉的图形表达形式。人工绘图使用矢量数据是现实可行的, 也是最方便的。地形测量, 从原理到方法, 从测定地形特征点位置到线划地形图中各类地

物的表示, 以及设计用图, 或计算机辅助设计(CAD)等, 都是利用矢量数据和矢量算法, 数字测图也仍采用矢量法原理、矢量数据结构和画矢量图。矢量数据还具有一些优点, 如精确度高, 数据结构严密, 数据量小, 显示、输出的图形精确美观。此外, 相互连接的线形网络和多边形网络的生成和处理, 只有矢量数据结构模式才能进行, 有利于网络(如交通运输网络, 上水、下水管网等)的分析等。

栅格数据结构比矢量数据结构简单, 但图形数据量大; 其空间数据的叠置和组合十分简便, 一些空间分析也易于进行; 图像表现比较真切, 易于与遥感数据匹配应用和分析, 因此在 GIS 中, 它与矢量数据结构并用。在数字测图中, 对原图(矢量图)扫描数字化, 获得栅格图形数据后, 还必须将栅格数据转换为矢量数据, 而至今转换成矢量图的效率还较低, 一些技术问题的解决尚不尽人意, 因此扫描数字化的方法在大比例尺数字测图中应用尚少。由于扫描数据进入计算机后, 还要通过屏幕人机交互, 做矢量转换及屏幕数字化的工作, 所以又称为扫描屏幕数字化。尽管扫描屏幕数字化目前尚未完全成熟, 但它意味着高速高效及劳动强度较轻, 所以它还是原图数字化的发展方向。随着扫描屏幕数字化软件的不断完善, 扫描屏幕数字化的方法将因优于手扶数字化而得到广泛的应用。

(3) 航片数据采集

这种方法是以航空摄影获取的航空像片作数据源, 即利用测区的航空摄影测量获得的立体像对, 在解析测图仪上或在经过改装的立体量测仪上采集地形特征点, 自动传输到计算机内, 经过软件处理, 自动生成数字地形图, 并控制绘图仪绘制地形图。

一般城市大面积 1 : 2 000 比例尺测图多采用航测方法。由于传统的测绘工作只注重出地形图底图, 所以过去的航测也不出数字图。在一些城市建立 GIS 的工作中, 只能将原图数字化来获取数字图。今后, 再进行航空摄影测量时, 一定要有数字化的成果, 可直接进入 GIS, 而且能保证精度, 这是城市 GIS 数据获取的主要方法。

在我国目前条件下, 航测适于较大面积几年一次的测量工作, 在城市利用新的航测数据建立 GIS 以后, 只要用野外数字测图系统作为 GIS 地形数据的更新系统, 用地面测绘的数字图作局部更新, 即可保证 GIS 地形数据的现势性。

1.3 数字测图的发展与展望

无论是地形图的测绘, 还是小比例尺地图的编绘, 传统的作业方式都是手工作业和模拟法成图。计算机技术的迅速发展和信息革命浪潮的冲击, 测绘必然由模拟法向自动化、数字化、信息化方向发展。

数字化图首先是由制图自动化开始的。

20 世纪 50 年代美国国防制图局开始研究制图自动化问题, 即将地图资料转换成计算机可读的形式, 并由计算机处理、存储(磁带或磁盘), 继而能自动绘制地形图。这一研究同时也推动了制图自动化全套设备的研制, 包括各种数字化仪(手扶数字化仪及半自动跟踪数字化仪等)、扫描仪、数控绘图仪以及各类计算机接口技术等。随着计算机及其外围设备的不断发展、完善与生产, 70 年代初制图自动化形成了规模生产, 美国、加拿大及欧洲各国, 在相关的重要部门都建立了自动制图系统, 测绘部门都有自动制图技术的应用。当

时的自动制图主要包括数字化仪、扫描仪、计算机及显示系统 4 个部分。当一幅地形图数字化完毕后,由绘图仪在透明塑料片上回放出地图,与原始地图叠置,检查数字化过程中产生的错误并加以修正。

目前,数字化仪数字化已发展成极为普遍的数字化和自动成图的方法。

20 世纪 50 年代末,航空摄影测量都是使用立体测图仪及机械连动坐标绘图仪,采用模拟法测图原理,利用航测像对测绘出线划地形图。到 60 年代就有了解析测图仪,它是由精密立体坐标仪、电子计算机和数控绘图仪 3 个主要部分组成,将模拟测图创新为解析测图,其成果依然是图解地形图。但在解析测图仪直接量测并自动解算测点坐标的基础上,再键入相关信息,由计算机处理,便可生成数字地形图。威特(Wild)公司生产的 BC2, BC3、欧波同(OPTON)公司的 P2, P3 等都是后来生产的先进的解析测图仪,我国也研制和生产了解析测图仪,已投入使用。

为满足当前数字测图的需要,在生产、使用解析测图仪的同时,对原有模拟立体测图仪和立体坐标量测仪,逐渐地改装成数字测图仪。其原理框图,如图 1-4 所示。

图 1-4 改装模拟测图仪原理框图

由图可见,量测的模拟信息经编码器转换为数字信息,由计算机接受并处理,最终可输出数字地形图(以磁盘为信息载体或传输给计算机直接使用)和图解地形图(纸或聚酯薄膜图)。

科学技术总是不断地向前发展。80 年代末、90 年代初,又出现了数字摄影测量工作站(硬件)所支持的全数字化测图系统。徕卡(Leica)公司、Intergraph 公司等已有成熟的硬件及软件系统出售,但价格较贵。武汉测绘科技大学张祖勋教授主持,也研制出一套高水平的全数字化测图软件。摄影测量工作站(全数字化测图)是利用通用的计算机工作站为载体,建立数字立体影像进行测量的一种解析立体测图装置。计算机工作站在性能/价格上的优势,以及计算机迅猛发展和应用普及的势头,使得数字摄影测量工作站将不断完善并得到广泛应用,它是航测数字测图的发展方向。

实现数字摄影测量工作站的方法新颖,技术高新,其过程大致包括:

首先,利用高精度(几何精度为  $\pm 2\ \mu\text{m}$ )平台式数字扫描仪(photoscan),将航片立体像对扫描数字化,输入计算机工作站,像束可达  $7.5\ \mu\text{m}$  或  $15\ \mu\text{m}$ ,生成扫描数字化影像。

其次,利用立体观测系统观测立体模型,即在计算机工作站上安装特定的观测系统,以构成立体观测。它是采用 120Hz 的交替方式立体显示器和一对优质的有源液晶快门透镜(眼镜,戴在人眼上)、一个红外发射器(安装在工作站上)组合起来实现的。

交替方式立体显示器以 120Hz 的频率交替显示左影像奇数线和右影像偶数线。有源液晶快门眼镜由红外发射器控制,以 120Hz 频率暴光,当左眼液晶快门打开  $1/120\text{s}$ (右眼关闭)时,显示屏上显示左影像,而另  $1/120\text{s}$ ,右眼液晶快门打开(左眼关闭)时,显示屏上显示右影像。也就是说显示屏以 120Hz 的频率变换显示的影像,而眼睛却看不出它在闪烁变化。这样变换的效果则是左眼始终观测左影像,而右眼却始终观测右影像,从而建立起立体观测模型,进行人机交互的量测与处理。

第三,利用系统提供的一系列软件进行量测,如扫描数据处理、测量数据管理、数字定向、立体显示、地物采集、自动提取(或交互采集)DTM(数字地面模型)、自动生成正射影像等软件,其中利用了影像相关技术、核线影像匹配技术,使量测过程自动化。

数字摄影测量工作站技术的不断成熟和价格的下降以及微机化,将促进全数字测图应用的普及,航测也将得到更广泛的应用。

大比例尺地面数字测图,是 20 世纪 70 年代在轻小型、自动化、多功能的电子速测仪问世后发展起来的。80 年代全站型电子速测仪(电子速测仪+电子记录器,简称全站仪)的迅猛发展,加速了数字测图的研究与应用。如 80 年代后期国际上有较优秀的用全站仪采集、电子手簿记录、成图的测图系统,国内一些单位也引进了 GeoComp 软件试用。

我国从 1983 年开始,北京市测绘院、解放军测绘学院、武汉测绘科技大学和清华大学等数十个单位相继都开展了数字测图的研究工作。综观国际、国内地面数字测图技术,其发展的进程大体是“两模式”、“三阶段”。

(1) 数字测记模式:野外测记,室内成图。

第一阶段:用全站仪测量,电子手簿记录,同时配画标注测点点号的人工草图,到室内将测量数据直接由记录器传输到计算机,再由人工按草图编辑图形文件,并键入计算机自动成图,经人机交互编辑修改,最终生成数字图,由绘图仪绘制地形图。

使用的电子手簿可以是全站仪原配套的电子手簿(如 GRE3/4, FC5, ...),也可以是 PC-1500 或 PC-E500 改装的电子手簿。因后两者价格低廉,汉字菜单,操作简便,更符合国情,所以国内主要使用这类记录器。

这虽是数字测图发展的初级阶段,但达到了由野外测量直接测制数字地形图和绘制图解地形图的目标,人们看到了数字测图自动成图的美好前景。

初级阶段外业电子记录仍模拟白纸测图的单点测量记录;要求野外人工绘草图的技术高,又很费事;要人工编辑图形文件,人工键入,整体工作量比白纸测图还要大,再加上事后返工就更难办了,因此还必须向实用化改进。

第二阶段:测记的模式不变,但成图软件有实质性的进展。

开发了智能化的外业采集软件,它不仅作单点点位记录,而且记录成图所需的全部信息,并且有一些记录项可由软件自动默认,使作业人员键入的数据最少。

电子手簿的测量数据被传输到计算机后,由计算机自动检索编辑图形文件,也就无需人工键入图形文件了。从理论上讲,也不需要画草图,但实际上,对一些地形复杂的地方,还需画草图,以便参考。

为了减免人工画草图工作,外业采集软件(电子手簿内置的)也具备自动检索图形文件的功能,并可实时计算出点位坐标。如果为采集系统配置一个袖珍绘图仪(如 pp40c)

或 A3/ A4 小型绘图仪, 现场就可按坐标实时展点绘草图。此草图与人工描画的草图是不同的, 展点草图是按计算的测点坐标展绘, 且具有一定的精度, 从而可以检查测量数据的正确性, 即可在现场及时发现和纠正错测、漏测之处。

较完善的测记法测图软件使数字测图走向实用化。数字测记法具有电子手簿携带轻、操作方便的优点。

(2) 电子平板测绘模式: 内外业一体化, 所显即所测, 实时成图。

在第一节中阐述了数字测图的优点, 反之它也就是模拟法测图的缺点。但白纸测图也有优点, 即现场成图。即使采用经纬仪测记法, 多数也要带图板, 在仪器旁随测随展点, 发现错误, 及时修正, 从而保证测量成果的正确性。

要使数字测图任务(尤其在复杂地区)进行得顺畅, 外业也需要有成图这一步。仅有电子手簿记录是远远不够的, 用户比喻记录器为黑匣子, 不知记录的对或不对, 等到室内计算机处理成图后, 才发现错误, 再去返工就麻烦了。数字测记法的外业虽然可以配 A3/ A4 绘图仪, 但携带和操作还是比较麻烦, 电源问题也不易解决。所以数字测记法更适合于地形较简单的地区使用。

便携机的出现给发展数字测图提供了机遇。1993 年底清华大学及清华山维新技术开发公司在杨德麟教授主持下首创了电子平板测绘模式——全站仪+ 便携机+ 相应测图软件, 实施外业测图的模式, 并将安装了平板测图软件的便携机命名为电子平板。电子平板测图软件既有与全站仪通信和数据记录的功能, 又在测量方法、解算建模、现场实时成图和图形编辑、修正等方面超越了传统平板测图的功能, 从硬件意义上讲, 完全替代了图板、图纸、铅笔、橡皮、三角板、比例尺等绘图工具。高分辨率的显示屏作图面, 面上所显即所测。数字测图真正实现了内外业一体化, 外业工作完成, 图也出来了。测量出现的错误, 现场可以方便、及时地纠正, 从而使数字测图的质量与效率全面超过了白纸测图。它直接提供的高精度数字地形空间信息, 则是传统测图方法所不及的, 是理想的数字测图模式。

1995 年英国的 Pen map、瑞士的徕卡、日本的杰科都推出了类似的地面数字测图系统, 看来电子平板已成为数字测图发展的国际潮流。

随着便携机价格的下降, 电子平板将发展成为地面数字测图的主流。由于便携机需用于野外作业, 所以应选用保证质量的正牌产品。便携机除内置电池外, 应配外接电池备用。最好选用黑白显示器的便携机, 因为天越亮, 黑白显示越分明, 其价格也较便宜。

日本杰科还推出了在测站(全站仪)和棱镜站(便携机随棱镜站)之间建立无线数据传输的功能, 可将测站(全站仪)的测量数据传输到棱镜站的便携机接收、记录、成图。这种方法的优点在于便携机在棱镜站(以下简称镜站), 由作图的人亲自识别测点的地物属性(类别), 比较方便, 不易出错; 但

价格高。系统两端要配置数据链, 即小型无线数据传输设备, 使系统硬件价格更高。

测量速度受限制。野外作业熟练后, 尤其测区地形较复杂时, 为了提高作业速度, 往往有两人或三人跑镜, 便携机只能随一个跑镜员, 其它测量仍然需要靠跑镜员报告地物名称, 而且在测站、电子平板、跑镜员三者相互联系上也易出错。司电子平板的人又要记录两三把测尺的数据绘图, 还要跑镜, 太辛苦, 更易出错。这种具有无线数字通信功能的电子

平板,若配合自动跟踪式全站仪使用才更有效。或者利用无线数字通信,使电子平板可以在测站附近的树阴、屋檐下作业,也比较方便。在镜站和电子平板间有无线报话机联系的情况下,地物属性出错的可能性也不大。

展望未来,随着科技的进一步发展,新产品价格的不断下降,可以采取更自动化的模式:

1) 全站仪自动跟踪测量模式。测站为自动跟踪式全站仪,可以无人操作;棱镜站有跑镜员和电子平板操作员(甚至平板操作员兼任司镜员)。全站仪自动跟踪照准立在测点上的棱镜,测量的数据由测站自动传输给棱镜站的电子平板记录、成图。瑞典捷创力(Geotronic)、日本拓普康(Topcon)等推出的自动跟踪全站仪的单人测量系统,再加上电子平板即可实现此模式。1997年徕卡(Leica)推出的TCA全站仪+RCS 1000控制器(遥控器),实现了遥控测量(remote control surveying, RCS),使自动跟踪测量模式更趋于现实。测站无人操作,而在镜站遥控开机测量,全站仪自动跟踪,自动照准,自动记录,及时获取观测成果,还可在镜站遥控进行检查与编码。TCA遥控测量系统与电子平板连接,则可实现自动跟踪模式的电子平板数字测图。目前此种模式价格昂贵,适用于特定的应用场合。

2) GPS 测量模式。GPS(global positioning system)是全球定位系统的简称。它是美国国防部于1973年组织研制的军用导航定位系统,80年代商品化并推广到民用,引起各界广泛的注意。GPS定位方法精度高,方便灵活。GPS定位技术在测绘中的应用和普及,是测绘科技的一个重大的突破性进展。随着GPS接收站的全面建成和发展,GPS技术在普通测量与工程测量中的应用将成为现实。

近二三年推出的载波相位差分技术,又称RTK(real time kinematic)实时动态定位技术,能够实时提供测点(用户站)在指定坐标系的三维坐标成果,在测程20km以内可达厘米级精度。

RTK模式下,参考站(基准站)的GPS接收机,通过数据链将其观测值及站坐标信息一起发给流动站的GPS接收机(用户站),流动站不仅接收来自参考站的数据,还直接接收GPS卫星发射的数据,观测数据组成相位差分观测值,进行实时处理,实时给出厘米级的定位结果。

RTK作业模式测程(基准点与流动站的距离)可以达到10km~20km,若与电子平板测图系统连接,就可现场实时成图,避免了测后返工问题。实时差分观测时间短,并能实时给出点位坐标,实现一步数字测图,这将显著地提高开阔区域野外测图的可靠性和劳动生产率。

测图时基准站可置于测区的高点,通信流畅,对无人值守的自动化作业也比较安全。随着RTK技术的不断发展和系列化产品的不断出现,待生产出更轻小型(移动的GPS接收机要背在身上,必须轻、小)和价格低廉的RTK模式的GPS接收机时,GPS数字测图系统将成为地面数字测图新的里程碑,标志地面数字测图技术的新篇章、新时期,并将会在开阔地区取代全站仪数字测图。

有关GPS全球定位系统的基本知识请参阅本书附录。



## 2 数字测图计算机系统的基本知识

### 2.1 概述

数字测图系统是以计算机系统为核心组成的,它包括硬件和软件两部分。

硬件由全站仪、数据记录器(电子手簿)、计算机主机(便携机或台式机)、绘图仪、打印机、数字化仪及其它输入输出设备组成,其框图见图 2-1。

图 2-1 数字测图硬件系统框图

全站仪测得的野外数据通过数据记录器(电子手簿、PC 卡)输入到计算机。功能较全的全站仪可以直接与计算机进行数据传送。计算机包括台式、便携式(笔记本式)PC 机等。若是便携机作电子平板,则可将其带到现场,直接与全站仪通信,记录数据,实时成图。

绘图仪和打印机是机助成图系统不可缺少的输出设备。数字化仪常用于现有地图的数字化工作。其它输入输出设备还有图像/文字扫描仪、磁带机等。计算机与外接输入输出设备的连接,可通过自身的串行接口、并行接口及计算机网络接口实现。

数字测图系统的软件是系统的关键。一个完整的数字测图系统软件,应具有数据采集、输入、数据处理、成图、图形编辑与修改及绘图等功能。处理后的结果可以列表方式、文件方式或以地形图方式输出,绘制出符合国家标准图式的图纸。

数字测图软件的计算处理应采用运算速度快、处理数据量大的算法,同时要满足计算的精度要求。软件必须通用性强,稳定性好,数据的表示和编辑直观、简洁,使用时应该给用户尽可能提供方便,采用菜单驱动方式和鼠标工作方式。

由于提供外接设备的厂家很多,各厂家的产品系列中又有多种型号,因此在数字测图系统软件中,还应包括适用于常见的各种外部设备的驱动程序。随着计算机网络技术的发展,分布式处理方式将以其综合处理数据的高效率进入机助成图及其应用系统。

对于国内使用的系统,图形输出时的中文注记及制图规范必须符合国家标准,因此,软件系统对汉字的支持也是不可缺少的。

## 2.2 计算机硬件(hardware)

电子数字计算机已经有半个多世纪的发展历史。尽管现代计算机技术比 50 多年前有了极大的进步,但计算机硬件的基本结构与当年冯·诺依曼提出的设计没有根本的变化,只是各个部件的制造技术和性能得到了不断提高和完善。

现代计算机技术把控制器和运算器组合在一起,称为中央处理器(central processing unit, CPU)。用 CPU 表示的计算机结构见图 2-2。

计算机硬件就是由中央处理器(CPU)、存储器、输入输出设备组成的。硬件性能的提高是计算机技术发展的主要方向之一,其指标也是评价计算机性能的主要依据。

图 2-2 CPU 计算机结构示意图

不同的计算机的侧重面也不同,其主要的性能指标有:字长、存储容量及运算速度。

### 2.2.1 中央处理器(CPU)

中央处理器是计算机硬件的核心,计算机的运算是由 CPU 完成的。CPU 还控制着存储器和输入输出设备,其运算速度和处理能力决定了计算机硬件的运算速度和处理能力。

目前计算机电路制造技术处于超大规模集成电路阶段,电路的体积越来越小,运算速度越来越快。CPU 的所有部件都可制作在一块集成电路芯片上,这样的 CPU 被称为微处理器。

数字计算机的运算和控制采用二进制实现,指令和数据都是以二进制表示。CPU 只能识别二进制形式的信息,所有其它形式的指令和数据必须转换为二进制。CPU 一次运算(执行一条指令)可以处理的二进制位数称为 CPU 的字长。计算机也可以按 CPU 的字长分类,例如,某型号的计算机的 CPU 字长是 32 位,也可以说该计算机是 32 位机。常见的 CPU 字长有 8 位、16 位、32 位和 64 位。字长标志着计算能力和速度。字长越长,处理的信息越多,处理的速度越快。

目前广泛应用的个人计算机(PC)系统中的 CPU 以 Intel 公司的 X86 系统为主,其型号为 80386(16/32 位),80486(32 位)和 Pentium(奔腾)(32 位)。

### 2.2.2 存储器(memory)

存储器是计算机主机内部存放指令和数据的部件,又称为内存。程序(指令)必须放在内存中才能被 CPU 读出并执行。存储器的主要性能指标是存储容量和存取(读/写)速度。

表示内存容量的基本单位是字节(byte),一个字节由 8 个二进制位组成。更大的内存容量单位是 KB, MB 和 GB。

1KB= 1024 字节;1MB= 1024× 1024 字节;1GB= 1024MB。

不同类型的计算机主机配置内存容量也不同,最少只有几 KB,一般的 PC 机内存容量为 2MB~16MB,最多可达 64MB 或以上。目前的计算机主机大多设计成内存可扩充的

结构,即在需要时,系统中可增加一部分存储器件,扩大内存容量。

程序使用的内存容量主要由其处理的数据所需内存决定。数据占用的内存,可根据数据类型及程序中的静态数组大小进行估算。例如,程序中定义了一个  $1000 \times 500$  的二维数组,存放双精度浮点数据,由于一个双精度的浮点数要用 4 个字节表示,此数组要占用的内存容量是  $4 \times 1000 \times 500 = 2\,000\,000$  字节,约为 2MB。由此可见,程序中如果使用较多的、大的静态数组,则要占用大量的内存。

计算机配置的内存容量大,有利于大程序的运行和处理大量的数据及减少 CPU 与外部设备之间的数据传送等待的时间。随着 CPU 处理速度的不断提高,读/写存储器的速度成为影响计算机总体运行速度的重要因素之一。虽然已经设计并生产出高速存储器,但由于其价格很高,在一般的计算机系统中还不可能采用它作内存的主要部件。目前提高存储器存取速度的方法是:在 CPU 与内存之间设置一组容量较小的高速存储器作为缓冲存储器(cache),存放 CPU 正在执行和即将执行的指令代码和所需的数据。CPU 可以基本无延迟地存取 cache 中的信息,cache 的控制部件在 CPU 执行指令的同时,将低速内存中的后续指令和数据送入 Cache(图 2-3)。这种预先读取指令的方式可以使 CPU 不会因等待读/写低速内存而降低工作速度。

在有些型号的 CPU 中有内部 cache,它的存取可以认为没有等待时间,程序的执行速度更快。

目前广泛使用的 486 或 Pentium PC(奔腾)机系统中,一般配置 256KB 到 512KB 的外部 cache,而内存容量为 8MB 以上。

图 2-3 cache 配置示意图

计算机的运算速度用每秒钟执行指令的数量表示。现在通常用 CPU 的主时钟频率来衡量计算机的速度,主时钟脉冲信号是 CPU 一切操作的基本时钟和基本信号,其周期决定了计算机执行一条指令所花的时间。486 机的主频已达 50MHz 和 60MHz,奔腾机则有达 133MHz 和 200MHz 的。

2.2.3 外部设备(peripheral device)

输入设备的作用是把程序、数据送入计算机和控制计算机的工作。输出设备的作用是显示、打印、绘制、存储计算机数据和程序。

(1) 外部存储器(peripheral memory)

计算机内存中存储的信息在计算机电源切断后就会丢失,而且其内存的容量是有限制的,为了永久保存大量的数据(包括程序),在计算机系统中都配置了外部存储器设备。使用最广泛的是磁盘和磁带,它们都是利用磁性介质的特性来记录信息的。此外只读光盘 CD(compact disc)和可读写光盘也已经应用于计算机系统中。

磁盘存储器(disk memory)

磁盘存储器分为硬盘和软盘两种类型。硬盘的存储介质是在非磁性金属的盘片表面上涂布的磁性材料,而软盘的盘片是在柔性塑料圆盘表面涂上磁性材料制成。硬盘存储器的特点是存取速度快,存储容量大,但每个硬盘设备的容量是固定不变的,硬盘本身也是

固定在机箱中,不易移动,它用于存放系统软件和应用软件。各种型号硬盘的容量从十几 MB 到几千 MB,存取速度(平均寻址时间)一般为十几毫秒。

软盘的存储容量没有硬盘大,存取速度也比较慢,但在使用时可以随时更换盘片,常用于数据和程序的后备和传送。软盘体积小,便于携带,可用于不同计算机之间的数据交换。系统软件和应用软件一般也是要装入硬盘之后使用。计算机系统使用的软盘规格有 8 (用于早期的计算机系统), 5.25 和 3.5,每个盘片容量为 300KB ~ 2MB (3 盘为 1.44MB,5 盘为 1.2MB),平均存取时间在 100ms 左右。采用光-磁技术制造的光软盘是一种新型的大容量软盘存储器,一张 3.5 光软盘(可读/写的)容量达 20MB 以上,它可能是磁介质软盘的换代产品。

记录在磁盘上的信息分布在以盘片轴为圆心的环型磁道上(图 2-4)。每个盘片表面磁道的数目依磁盘驱动器的类型不同而不同。常用的 3.5 软盘的一面有 80 ~ 100 条磁道,而硬盘片上的磁道数目可达数千条。

磁盘在使用时一般先要进行分区和格式化处理。分区是把磁盘的全部存储空间划分为较小的区域,这样可以提高使用效率,保护数据,同时还可以满足不同操作系统的要求。一般情况下软盘不分区。格式化分低级格式化和高级格式化,低级格式化在磁盘表面建立磁道的格式信息,高级格式化在磁道上建立文件系统的格式信息。不同机型的计算机和不同的操作系统对磁盘进行的格式化处理,有可能产生不同的格式。所谓格式就是预先规定的数  
据、信息的排列形式。

图 2-4 磁道

磁带存储器(magnetic tape memory)

磁带存储器是用磁带介质记录信息。按磁带的宽度和记录方式分类,有 1/2 盘式磁带,1/4 盒式磁带,8mm 盒式磁带及 4mm DAT(digital audio tape)盒式磁带等。

磁带存储方式的特点是存储量大,价格低,但是存取速度慢,不能随意编辑存在磁带上的信息。以前磁带存储器作为数据后备最常用的方式,目前仍得到广泛应用,还不断有新技术出现。下面是常见的几种磁带的存储容量:

1/2 盘式磁带	100MB
1/4 盒式带	60MB ~ 1000MB
8mm 盒式磁带	2GB ~ 7GB
4mmDAT 盒式磁带	1.3GB ~ 4GB

光盘 CD 存储器

磁盘存储器利用磁头和磁盘盘片上的磁性物质的电磁感应原理存取信息;光盘存储器则是利用激光和光电转换原理进行信息的存取。

PC 机系统中常用的光盘存储设备是 CD-ROM 驱动器,用来读取存在 CD-ROM 上的信息。CD-ROM 是光盘存储介质中最常见的一种“只读光盘”,是在直径为 120mm 的盘片上,用激光一次性写入要存储的信息。由于激光光束具有极高的精度,因此一片 CD-

ROM 上存放的信息量可达 600MB, 是一种海量存储设备。读取 CD-ROM 上的信息时, 利用 CD-ROM 驱动器上读取头发出的激光光束, 根据盘片上反射出的光线的偏差转换为二进制的“0”或“1”, 从而读出盘上的内容。

不能修改存储在 CD-ROM 盘片上的信息, 只能反复读出。系统软件和应用软件产品以 CD-ROM 为介质存放, 可以提高存储的可靠性和读出速度, 同时降低所需的成本。

另一类光盘存储器是可读写光盘, 光盘上的信息可以像磁盘一样随时读出和写入。一片可读写光盘的容量可达 1GB 以上, 它既有硬盘容量大的优点, 又可像软盘一样随时更换盘片, 使用方便。目前可读写光盘大多数采用光-磁技术, 其缺点是读写速度较慢, 一般用作数据的后备装置。

## (2) 输入设备

输入设备包括键盘、鼠标、光笔、数字化仪和扫描仪等。

### 键盘(keyboard)

键盘是计算机的基本输入设备, 它的基本结构是由机械/电子开关组成的矩阵, 每当将键按下时, 键盘控制电路就会根据每个键在开关矩阵中的位置, 得到相应的按键编码发送给计算机主机。在计算机主机中存有一个按键编码表, 按表中的对应关系, 计算机就可以识别按下键的内容。

计算机系统中使用的键盘上按键的数目约为 100 个, 常见的是 84 键和 101 键的键盘。

使用键盘可以直接输入西文字符和数字。在配有中文系统的计算机上, 中文的输入可以借助各种输入编码、拼音等方法使用西文键盘输入汉字。我国大陆使用的五笔字型、香港特别行政区、台湾地区使用的仓颉码都是使用比较广泛的汉字输入编码。

除了字母、数字之外, 键盘上还配置了可由使用者自己定义的功能键, 用于对经常使用的和比较复杂的命令的简化输入。

另外还有一个副键盘区, 由数字键和常用的功能键组成。在进行大量的数字信息输入时, 使用副键盘区就很方便。

### 鼠标(mouse)

鼠标是机助成图系统中最常用的输入设备。在进行与图形有关的操作时, 用鼠标操纵光标在屏幕上移动, 直接确定位置, 便于快速、简单而准确地对图形进行编辑。目前图形菜单(图标)方式已经是通用的用户界面, 用鼠标配合图形菜单就不再需要从键盘敲入复杂的命令了。

鼠标分为光电式和机械式两类。光电式鼠标要与印有网格的垫板配合使用。鼠标上的发光元件发出的光线从垫板上反射到光电接收元件, 根据鼠标在垫板上移动的网格数目, 检测出鼠标移动的相对距离。

机械鼠标底部有一圆球, 圆球在平面物体上滚动时, 带动鼠标上相互垂直的两个电位器的轴, 通过电路参数的改变, 检测鼠标的相对位移。

鼠标上还有两个或三个按键, 可由软件设置成具有选择、执行等作用的功能键。

光电鼠标由于依靠光线的反射检测位移, 精度较高, 而机械式鼠标的价格低, 对环境的适应性较好。

鼠标器通常连接在计算机主机的串行通信口上, 同时在系统中还要有相应的驱动程序。使用鼠标之前, 先运行相应的驱动程序, 系统才能识别鼠标设备并接收来自鼠标的位移信息。

图形数字化仪(graphic digitizer)

图形数字化仪(简称数字化仪)如图 2-5 所示, 是将图形数据进行转换后输入计算机的重要设备。在地理信息系统中常用数字化仪将现有地图转换成数字化的计算机数据。

数字化仪由数字化板、定标器及控制电路组成。数字化板中嵌有相互垂直的导线构成的网格, 定标器中包含一感应线圈。用数字化仪工作时, 控制电路使扫描脉冲在数字化板上的导线网格中通过。当定标器位于数字化板上某一点时, 可以感应到该点的扫描脉冲, 经过逻辑电路的处理, 就得到定标器在图板上的坐标, 并通过接口送到主机。另一类数字化仪的工作过程是由定标器产生磁场信号, 根据在导线格网中产生的感应信号得到定标器的坐标。

图 2-5 数字化仪

数字化仪的精度(指量测坐标值与原图坐标值的符合精度)一般为  $\pm 0.025\text{mm} \sim \pm 0.25\text{mm}$ ; 分辨率(可分辨的最小距离)通常为  $\pm 0.01\text{mm} \sim \pm 0.1\text{mm}$ , 即 100 线/mm  $\sim$  10 线/mm。有效工作幅面最小为  $280\text{mm} \times 280\text{mm}$ , 最大可达  $1000\text{mm} \times 1200\text{mm}$ 。图纸的幅面由 A4  $\sim$  A0(参见表 2-1)。

扫描仪(scanner)

扫描仪(图 2-6)可以将图形、图像(黑白或彩色)快速、高精度地数字化后输入计算机。线划地形图、遥感和航测照片都可以用扫描仪数字化后输入计算机, 经过图像处理软件分析和人-机交互处理后, 生成可供利用的数据。

图 2-6 扫描仪

目前应用的扫描仪多数为电荷耦合器件(CCD)阵列构成的光电式扫描仪。基本工作原理是用激光源经过光学系统照射原稿,使反射光反射到 CCD 感光阵列,CCD 阵列产生的电子信号经过处理得到原稿的数字化信息,传送给主机。对黑白图像,扫描仪可产生包含不同灰度等级信息的数字信号。对于彩色图像,一般是用 3 种颜色(红、绿、蓝)分别进行处理,得到包含 3 种颜色比例信息的结果。扫描得到的是栅格数据,要经过矢量化软件处理,将栅格数据转换为矢量数据,生成矢量线划图,供 CAD, GIS 使用。

图像扫描仪的主要性能指标有:

- 扫描幅面,台式扫描仪一般为 8.5in× 14in,手持式扫描仪宽度为 2in ~ 4in(1in=25.4mm);
- 分辨率,一般为 300 点/in(dot per inch, dpi),高的达到 800 点/in, 1200 点/in。

对于文字、图形或图像,通过扫描仪获取的数据形式是相同的,都是扫描区域内每个像素的灰度或色彩值。对这些数据的解释(如区别特定的物体和背景、识别文字等)需要专门的算法和相应的处理程序。

此外,常用的手动输入装置还有光笔、跟踪球等。光笔指向屏幕时,可将所指之处的位置信息转换成电信息后送给计算机,适于菜单选择类的简单操作,快速、简便,很适合电子平板的野外操作。跟踪球是通过转动一固定在机壳一小空腔内的球来控制屏幕上光标的位置,从而给屏幕上的光标定位。

### (3) 输出设备

常见的输出设备包括显示器、打印机、绘图仪等。

显示器(display)

显示器是计算机系统的标准输出设备,分为单色显示器和彩色显示器,还可按显示功能分为字符显示器和图形显示器。

台式计算机使用最多的显示器是由阴极射线管(CRT)构成的,工作原理与电视机相同,是用电子束照射显示屏产生的光点组成字符和图形。CRT 显示器的体积和耗电量比较大,但可以输出质量很好的字符和图形。CRT 显示的分辨率可以达到 1280× 1024 以上,色彩和亮度也优于其它类型的显示器。

另一种类型的显示器是以液晶材料制成的,它耗电少,体积小,重量轻,虽然在亮度、分辨率和色彩上还不如 CRT 显示器,但显示质量正在不断改进和提高,并且已经在便携式计算机中得到了广泛应用。

打印机(printer)

按照输出的动作可以把打印机分为击打式和非击打式。

击打式打印机是通过打印头的运动击打色带,在打印纸上印出字符。常用的点阵式打印机的打印头上排列着细小的针,小针打印出的点可以组成字符、图形或图像。由于打印头上的针可以分别控制,点阵式打印机可以用于输出复杂的图形和文字,如汉字。点阵打印机输出的字符由点组成,字体不够美观。另一种全字符式打印机,打印每一个字符都用一个专用的打印头,可以打印出高质量的字符,但可打印的字符数目和字体是固定的,只能用于输出西文字符和数字。击打式打印机的特点是价格低,打印输出灵活性好,但打印速度慢,噪声比较大。

非击打式打印机主要有激光打印机和喷墨打印机。这两种打印机也是利用点阵组成字符输出。由于能够产生精细度更高的点,它们还可以输出质量较好的图形和图像。非击打式打印机减少甚至取消了打印头的机械动作,使噪声降低,并且提高了打印速度。

激光打印机由激光扫描系统、电子转印系统和控制系统构成。其基本工作原理是:利用激光束的扫描形成字符或图形静电潜影,再经过转印系统使静电潜影吸附墨粉,最后将墨粉印在纸上,产生字符或图形。激光打印机的分辨率可以达到 600 点/in 以上,一般为 300 点/in,输出速度一般为 10 页/min 左右。在出版印刷等要求高质量输出的领域,激光打印机是主要的输出设备,但其价格较高,备件和消耗材料的费用也较大。

喷墨打印机是将墨水通过极细的喷头喷到纸面,产生细小的墨点组成输出的字符或图形。喷墨打印机的分辨率可以达到 300 点/in 以上,还可输出彩色打印效果,价格比较低,重量较轻和体积较小,便于携带,因此喷墨打印机与笔记本式便携计算机配合使用,非常适合数字测图外业工作。

使用打印机输出西文字符不需要专门的驱动软件,而打印汉字和图形时,一般则需要专门的驱动软件。目前有些打印机都配有内置的汉字库,可以不要驱动软件打印特定字体的汉字。

数控绘图仪(digital plotter)

目前,数字测图系统中使用最多的图形输出设备是笔式绘图仪,主要分为平台式和滚筒式两类。

平台式绘图仪(图 2-7(a))由绘图平台、绘图笔架、导轨、滑轨、滑轨使动装置和控制电路组成,绘图纸用静电或真空吸附方法固定在平台上。安装在笔架上的绘图笔可沿导轨 x 方向和滑轨 y 方向运动。滚筒式绘图仪(图 2-7(b))通过滚筒的转动及送纸机构带动绘图纸前后移动(x 方向),笔架则沿滚筒轴滑轨方向(y 方向)运动,使绘图笔形成垂直于纸面沿 x, y 方向的移动。笔式绘图仪的基本操作是抬笔走、落笔走。它可使用墨水笔、圆珠笔、铅笔,还可以使用刻刀等特殊工具。

图 2-7 数控绘图仪

绘图时,绘图仪接受来自计算机主机的绘图命令,其中包括抬笔、落笔、移动笔的方向等信息。如果绘图仪有多支绘图笔,命令中还有选择笔的信息,绘图仪的控制电路根据命令控制机械传动系统完成绘图动作。绘图笔与纸的相对动作一般有 8 个基本方向,每次移



动一个步距,如图 2-8(a)所示。一般绘图仪只有+ x,+ y,- x,- y 4 个动作,分别由 x 方向和 y 方向的两个步进马达驱动产生,如果在两坐标点之间绘直线,则由上述 4 个基本方向的直线段组合成阶梯线近似而成(图 2-8(b))。由于步距很小,这个阶梯线看起来仍为光滑直线。这种分段逼近的算法也称插值,逼近直线采用一次插值,逼近圆采用二次插值,曲线则可采用曲线拟合插值。绘制这些图元的程序,在绘图仪中都形成了命令,绘图时只需调用即可。

图 2-8

功能较全的绘图仪内部有微处理器,可以根据主机的命令绘出字符、直线、圆弧等基本图形。更复杂的图形则需要在主机中绘图仪驱动程序的控制下完成。不同厂家、不同型号的绘图仪的驱动程序是不同的。在计算机辅助设计 CAD 软件产品(如 AutoCAD)中,通常包含适用于各种常见型号的绘图仪的驱动程序,可以根据实际情况选用。

绘图仪的主要性能指标有分辨率、最高绘图速度、精度和图纸幅面尺寸。

- 精度: 绘制地形图精度是最重要的指标,它包含定位精度和重复精度。定位误差是系统误差,可通过软件对 x,y 方向的长度比加以改正。重复误差则是绘图精度的主要误差。平台式绘图仪的绝对定位精度为 0.01mm ~ 0.1mm;滚筒式绘图仪的精度一般低于平板(台)式绘图仪。
- 绘图速度: 绘图速度主要指绘图笔作直线运动时所能达到的速度,其取决于驱动系统和绘图仪的结构,一般每秒为几十毫米到几百毫米。
- 分辨率: 即绘图笔一次移动的步距。一个电脉冲驱动电机与传动机构使绘图笔移动的距离称为步距。步距一般为 0.01mm ~ 0.05mm,步距越小绘图线条越光滑,精度越高。精密绘图仪的步距可达 0.00625mm。
- 图幅尺寸: 绘图仪标准图幅的规定参见表 2-1,最小为 A4 图纸,最大可绘制 A0 图纸;滚筒式绘图仪则可以绘出更长的连续图形。

新型的喷墨绘图仪采用了静电绘图技术,取消了抬笔、落笔等机械动作,使绘图速度大大提高,其原理与喷墨打印机基本相同。分辨率一般为 300 点/in 以上,甚至可以达到 720 点/in。喷墨绘图仪还能够完成区域填充、改变线条宽度、绘制阴影等一般笔式绘图机不能进行的操作。

接口

输入输出设备与计算机主机的连接设备,其接口分为两类: 串行接口和并行接口(参阅 3.5 节)。

表 2-1 标准图幅规格	
图纸规格	图幅尺寸/mm
A0	840× 1889
A1	594× 840
A2	420× 594
A3	297× 420
A4	210× 297

1) 串行接口 计算机系统使用的连接输入、输出设备的串行接口主要是 RS-232C 标准接口。主机与设备间以串行方式通信时,数据是以二进制位的顺序在一条信号线上传送,每次只传送一个数据位。PC 机上 RS-232C 标准接口使用 25 芯(图 2-9(a))或 9 芯(图 2-9(b))插头,信号功能如下:

信 号 功 能	25 芯接口针号	9 芯接口针号
ground GND 保护地(外壳)	1	1
TXD(transmitted data)发送数据	2	3
RXD(received data)接收数据	3	2
RTS(request to send)请求发送	4	7
CTS(clear to send)允许发送	5	8
DSR(data set ready)数据准备就绪	6	6
SG(signal ground)信号地	7	5
DTR(data terminal ready)数据终端准备就绪	20	4

图 2-9 RS-232C 标准接口

串行接口的设计比较简单,常用的数据传送速度为 2400b/s ~ 38400b/s(二进制位/秒, BPS, 即波特率)。串行接口用于对通信速度要求不是很高的设备,如字符终端、打印机、数字化仪及绘图仪。在这些通用的输入输出设备上都配有串行接口,可以很方便地用电缆直接与主机相连。

2) 并行接口 并行连接方式是通过多条数据线同时传送数据,可以达到很高的传送速度,它需要配置较多的信号线。PC 机上都配有适用于各种打印机的并行接口,一般为

25 芯插头。使用通用的并行打印机信号电缆,各种型号的打印机就能与 PC 机连接使用。

硬件配置

国内实际应用的数字测图系统主要是以个人计算机(PC)为主机的系统。

用于外业数据采集和作业控制的系统,一般采用笔记本式(notebook)便携 PC 机,其标准的硬件配置是:

- 486/ Pentium CPU;
- 8MB 以上内存;
- 彩色/ 单色平板型液晶显示器,分辨率 640× 480 或 800× 600;
- 540MB 或更大容量的硬盘;
- 3.5 1.44MB 软盘驱动器;
- 配有外接 CRT 显示器接口, RS -232 接口和并行接口;
- 可使用电池/ 交流电;
- 整机重量 3kg 左右。

内业作业一般使用台式 PC 机,目前标准的台式机硬件配置是:

- 486/ Pentium CPU;
- 64KB ~ 512KB 高速缓存( cache );
- 16MB 以上内存;
- 540MB 或更大容量的硬盘;
- CD-ROM 和软盘驱动器;
- RS -232 接口和并行接口;
- VGA 或更高性能的图形显示器,其分辨率为 1024× 768 或 1280× 1024。

随着计算机硬件技术的发展,PC 机的硬件配置会不断变化,性能将更先进,价格却更便宜。

## 2.3 计算机软件(software)

计算机软件是计算机硬件和使用者之间的接口。硬件在软件管理下才能正常工作,才能最有效地利用硬件全部的处理能力,所以,软件的质量影响着计算机系统的总体性能。

计算机软件由系统软件和应用软件组成。

### 2.3.1 系统软件

系统软件包括操作系统和操作计算机所需的其它软件。操作系统软件是系统软件的核心,是所有计算机必须配置的基本软件,所以称为系统软件。系统软件主要是管理计算机系统资源的使用,即中央处理器(CPU)、内存、外部设备和信息的使用。这样,计算机用户可以不必要了解计算机的内部结构、工作原理及其指令系统,经过短期学习,便可独立上机操作了。

#### (1) 中央处理器管理

中央处理器管理的主要任务是协调 CPU 的高速处理功能与其它部件低速之间的工

作时序,尽可能地减少 CPU 的等待时间。目前计算机 CPU 的运算速度达几千万条指令每秒,甚至数亿条指令每秒,而最高速的输入输出设备的传输速度仅有几百万字节每秒。除了提高硬件的数据传输速度外,还要靠操作系统的管理。操作系统提高 CPU 利用率,主要是采用多道程序技术,即同时运行一个以上的程序,每个程序轮流(插入)使用 CPU。某程序执行过程中, CPU 需要等待设备完成操作时,由其它程序使用 CPU,这样可以最大限度地使 CPU 总是处于有效工作状态。

(2) 内存管理

在运行时计算机程序必须存放在内存中,管理系统工作的程序和同时运行的用户程序都要占用内存,因此必须对内存进行有效的管理。系统程序对内存的管理包括:内存的分配、共享内存区的管理、数据和程序在内存中的更新和保护、地址范围(程序和数据集合)大于实际内存容量时的内存交换管理等。

(3) 设备管理

设备管理程序的功能是协调 CPU 与外部设备之间的数据传送,控制信号响应,解释控制命令,处理程序对设备的使用请求,分配设备的使用,进行设备的初始化等。

(4) 信息管理

计算机中的信息一般是以文件形式存放在磁盘上,信息管理主要是文件系统的管理,如文件系统的建立,文件的创建、删除、复制和命名等操作及文件存取权限的管理等。

目前 PC 机上的系统软件以磁盘操作系统(disc operating system, DOS)为主, DOS 提供了多种系统命令供使用者管理 PC 机。另一种广泛应用的 PC 机系统软件是 Windows 环境,它在 DOS 的基础上为使用者提供了图形化的界面,所有操作都可以用鼠标配合图标符号(icon)和图形菜单完成,不必记忆具体的键盘命令,对非计算机专业的使用者来说更易掌握。

2.3.2 应用软件

除系统软件以外的其它软件都可称为应用软件。应用软件是为处理某种专门类型的数据或实现特定功能的程序,如计算机语言处理程序、文字编辑程序、数值计算程序、数据库管理程序和机助成图程序等。

应用软件是由软件开发商或软件的使用者自行开发的。计算机软件厂商对各类计算机都提供了多种编程语言。最常用的程序语言有 C++ , C, Fortran, Basic, Pascal, 汇编语言以及各种数据库管理语言,简单的应用软件可以是一个很短小的程序,复杂的应用软件则需要大量时间的研究及测试工作,产生的程序也相当庞大。开发如此复杂的应用软件,除了应对程序的功能、原理和算法有深入的研究外,还需借助先进的软件工程工具。计算机辅助软件工程(computer-aided software engineering, CASE)工具是大型应用软件开发时使用的一组工具,它具有对软件结构进行分析,对软件进行运行调试、错误跟踪、版本管理等功能。

应用软件的运行环境与系统软件有直接关系,如在 PC 机上运行的软件有的需要 DOS 环境,有的则必须在 Windows 支持下运行,因此在开发和选用应用软件时,除了考虑计算机硬件的需求之外,也不能忽视系统软件的因素。

### 3 全站型电子速测仪及其应用

#### 3.1 全站型电子速测仪发展概述

20 世纪初, 经纬仪经历了从游标经纬仪到光学经纬仪的发展, 其中光学度盘替代了游标盘; 光学测微器替代了游标读数; 望远镜由外调焦倒像发展为内调焦正像。优胜劣汰, 至五六十年代, 光学经纬仪就完全取代了游标经纬仪。

40 年代末, 精密电磁波测距技术有了突破性进展, 光电测距仪、激光测距仪相继问世, 并用于生产。但由于体积大, 仪器笨重, 耗电量大, 故难以推广。随着电子技术的发展, 半导体电子线路和集成电路的广泛应用, 到 60 年代末期, 以半导体发光管为光源的小型红外测距仪问世。七八十年代, 电磁波红外测距技术得到迅速发展和普及应用, 它几乎取代了钢尺量距。90 年代初, 红外测距仪的发展已趋于稳定, 各类测距仪因其体积小, 重量轻, 测程长, 精度高, 各项指标都按不同的需要, 形成了各档次的系列产品。精度分别有  $\pm(5\text{mm} + 5D \times 10^{-6})$ ,  $\pm(3\text{mm} + 2D \times 10^{-6})$ ,  $\pm(2\text{mm} + 2D \times 10^{-6})$ ,  $\pm(1\text{mm} + 1D \times 10^{-6})$  ( $\text{ppm} = D \times 10^{-6}$ ,  $D$  为公里数) 等等, 测程有 600m, 800m, 1.5km, 2.5km, 3.5km, 5km 以上, 等等。

在此期间, 人们主要是将红外测距仪与光学经纬仪组合在一起(称为组合式半站仪)使用, 如威特(Wild) 公司的  $T_1, T_2$  等光学经纬仪与 DI 系列的测距仪组合, 以及其它厂家仪器的组合等。当时只有原德意志民主共和国的蔡司(Zeiss) 厂生产的 EOT-2000, 是将光学经纬仪与红外测距仪设计成一体, 为整体式半站仪。半站仪又称电子测距经纬仪(electronic distance meter theodolite), 它对提高测绘作业的效率 and 精度发挥了巨大的作用, 已成为我国常规的测量仪器。

在电磁波测距技术发展的同时, 人们就在不停地探索地面测量自动化的道路, 角度测量自动化的思想也应运而生。其实质是将光学度盘改造为光电扫描度盘, 将人工光学测微读数改造为光电自动记数和显示记数, 即将目视读数发展为自动显示和自动记录, 由此导致了电子经纬仪的发展。电子经纬仪与测距仪的结合, 称为电子速测仪。再配以电子记录装置, 称为全站型电子速测仪(electronic theometer total station), 简称全站仪。1968 年西德 OPTON 厂最早将电子经纬仪与电磁波测距仪设计为一体, 研制了 Reg Elda 14 全站型电子速测仪。它以砷化镓发光二极管作光源, 测程  $1\text{km} \sim 2\text{km}$  (7 块棱镜), 测距精度  $\pm(5\text{mm} + 2D \times 10^{-6})$ , 测角精度  $\pm 3''$ , 数码管显示, 纸带穿孔数据记录, 称为记录式电子速测仪。由于受到当时电子元件的限制, 仪器体积较大, 重量达 28kg 之多。以后瑞典 AGA 厂研制的 AGA 700 Geodimeter 激光电子速测仪, 其光源为氦氖激光器, 测程 5km (3 块棱镜), 测距精度  $\pm(5\text{mm} + 1D \times 10^{-6})$ , 测角精度  $\pm 2''$ , 垂直角精度  $\pm 10''$ , 纸带穿孔

表 3-1 部分全站仪的主要技术指标

指标项		测角精度 (标准差) /	测距精度 / mm+ D × 10 <sup>-6</sup>	测程 (单棱镜) / km	自动补偿机构	补偿范围 /	补偿* 精度 /	数据记录装置	内置应用程序
徕卡 (Leica)	TC400	10	5+ 5	0.7	单轴	± 3	± 2	RS-232 接口	无
	TC600 5	5	3+ 3	1.1	双轴	± 3	± 2	内置内存或 RS-232 接口	有
	TC1100	3	2+ 2	3.5	双轴	± 3	± 1	PCMCIA 存储卡 或 RS-232 接口	有
	TC1800 / TC1700	1/ 1.5	2+ 2	3.5	双轴	± 3	± 0.3	PCMCIA 存储卡 或 RS-232 接口	有
	TC1500	2	2+ 2	3.5	双轴	± 3	± 0.3	PCMCIA 存储卡 或 RS-232 接口	有
	TC2002	0.5	1+ 1	2.0	双轴	± 3	± 0.1	REC 模块或 RS-232 接口	有
拓普康 (Topcon)	ET-2	1	3+ 2	2.7	双轴	± 3	1	RS-232 接口	有
	GTS-700	1	2+ 2	2.7	双轴	± 3	1	PCMCIA 存储卡	有
	GTS-701	2	2+ 2	2.7	双轴	± 3	1	PCMCIA 存储卡	有
	GTS-301S	2	2+ 2	2.7	双轴	± 3	1	RS-232 接口	有
	GTS-211D	5	3+ 2	1.2	双轴	± 3	1	RS-232 接口	有
索佳 (Sokkia)	SET2C/2B	2	3+ 2	2.7	双轴	± 3	± 1	SDC4 存储卡或 RS-232 接口	有
	SET5F	5	3+ 2	1.5	双轴	± 3	1	内置内存或 RS-232 接口	有
	SET2000	1	2+ 2	2.7	双轴	± 3	0.5	PCMCIA 存储卡 RS-232 接口	有
	NET2B	2	1+ 0.7	0.5- 1.0	双轴	± 3	1	RS-232 接口	有
尼康 (Nikon)	D-50	20	5+ 10	0.3	无			RS-232 接口	无
	C-100	10	5+ 5	0.5	单轴	± 3	不详	RS-232 接口	有
	DTM-A10LG	5	3+ 3	2.0 2.0	单轴	± 3	± 1	RS-232 接口或 NK-NET 接口	有
	DTM-A5LG	2	2+ 2	1.8 0.7	单轴	± 3	± 1	RS-232 接口或 NK-NET 接口	有
宾得 (Pentax)	PTS-V2	2	5+ 3	3.6	双轴	± 3	不详	RS-232 接口	有
	PCS-215	5	5+ 3	2.0	无			RS-232 接口	有
捷创力 (Geotronics)	GDM640M	1	2+ 2	3.5	双轴	± 6	± 1	RS-232 接口	有
	GDM640S	1	2+ 2	3.5	双轴	± 6	± 1	RS-232 接口	有

\* 附徕卡外,其他公司皆外补偿器分辨率。

打印记录,重量仍在 25kg 以上。直到 70 年代,随着集成电路及微型计算机处理器的出现和广为应用,小型化全站型电子速测仪才不断涌现,最早的实用型全站仪有 Wild 公司的 TC1,HP 公司的 HP3820A,OPTON 厂的 ELTA2 等。在全站仪的发展过程中,早期电子经纬仪与红外测距仪组合在一起(测距仪架在电子经纬仪支架上或架在望远镜上)的分体

组合式全站仪发展较快,但集测距仪和电子经纬仪于一体的整体式全站仪代表着全站仪发展的方向。目前,整体式全站仪已成为全站仪产品的主流,其产品已有几十种型号,且其精度、测程、重量、体积各项指标都稳步提高,以满足各种工程的需要。其中,重量最轻的只有 4.2kg。各等级仪器的测角精度可达 0.5,1,2,3,5,10 等,国内常用的一些知名厂家的部分全站仪的主要技术指标列于表 3-1,供读者参阅。

全站仪因能在测站上同时测量、显示、记录水平角、竖直角、水平距离、斜距、高差、高程、坐标等全部内容而受到测绘工作者青睐,如果将全站仪再配以电子平板等测图系统,则可自动(现场)成图,这套系统又称为全站仪(综合)测绘系统。这正是野外测量自动化的模式。

全站型电子速测仪的优势就在于它采集的全部测量数据能自动传输给记录卡、电子手簿到室内成图,或传输给电子平板,在现场自动成图(图 3-1),再经过室内一定的编辑,即可由电子平板(或台式计算机)控制绘图仪出图。因此,如果将全站型电子速测仪分别当作测距仪和电子经纬仪来使用,将是对全站仪的极大浪费。全站仪测绘系统在测量工作自动化的进程中起着重要的作用,也将成为地理信息系统(GIS)数据更新的重要手段,需要测绘工作者给予极大的关注,来使用它,开发它。

图 3-1 全站仪(电子平板)在现场测图

### 3.2 电子经纬仪工作原理

全站仪中有关测距仪部分(含测距的改正和归算),在《红外测距仪原理及检测》<sup>[9]</sup>一书中已作了详细的阐述,请读者参阅。这里仅就电子经纬仪的工作原理作简要的分析。

电子经纬仪与光学经纬仪主要的不同点在于,前者采用了光电扫描度盘自动计数和读数自动显示系统。

目前,电子经纬仪采用的光电扫描测角系统大致有 3 类:编码盘测角系统、光栅盘测角系统和动态(光栅盘)测角系统。

3.2.1 绝对式编码度盘测角原理

编码度盘为绝对式光电扫描度盘,即在编码度盘的每一个位置上都可以直接读出度、分、秒的数值,故编码测角原理又称绝对式测角原理。

下面先以二进制数为例,说明码盘的读数原理。表 3-2 列出了 0 ~ 15 十进制对应的 4 位二进制数值。二进制只有“0”和“1”两种数码,再大的数值也只需要用“0”和“1”两种状态来表示,这给光电计数提供了便利的条件。如利用编码盘上透光和不透光的两种状态就可以表示二进制的“0”和“1”。如图 3-2 所示(实际上,图中的虚线是没有的),度盘上刻有 4 条码道,表示 4 位二进制数,里圈代表高位数,外圈为低位数。最外圈刻有透光与不透光相间的 16 个格,依次对应“0”和“1”;同理刻第 2、第 3、第 4 条码道,沿径向由里向外可读出 4 位二进制数,如从图 3-2 中的 0000,顺时针方向可读得 0001,0010, ..., 直到 1111,对应十进制的 0 ~ 15。

图 3-2 编码盘

表 3-2 十进制数对应的二进制数

十进制	0	1	2	3	4	5	6	7
二进制	0000	0001	0010	0011	0100	0101	0110	0111
十进制	8	9	10	11	12	13	14	15
二进制	1000	1001	1010	1011	1100	1101	1110	1111

实现码盘读数的原理装置如图 3-3 所示,图中码盘透光为“0”,不透光为“1”;码盘上对应 9 所示的二进制数为 1001。关键是如何取得透光与不透光的光信号,又如何将它们转变为电信号,并进行电信号的处理。如图 3-3 所示,在码盘的上方,沿径向在各条码道相应的位置上分别安装 4 个照明器,一般采用发光二极管作照明光源。同样,在码盘下方相应的位置上安装 4 个接收光电二极管作接收器。每个二极管与一个三极管连接,三极管用于信号放大。

光源发出的光经过码盘,就产生了透光与不透光信号,被光电二极管接收。如透光,二极管产生光电流,使三极管导通,三极管的输出端为低电平“0”;如不透光,则光电二极管不产生光电流,三极管为截止状态,输出端为高电平“1”。由此,光信号转变为电信号,4 位组合起来就是码盘某一径向的读数,图中的读数即为 1001。再经过译码器,将二进制数转换成十进制数显示输出。

测角时码盘不动,而发光管和接收管(统称传感器或读数头)随照准部转动,并可在任何位置读出码盘径向的二进制读数,并显示十进制读数。



图 3-3 码盘光电读数原理

实用的码盘读数系统还需考虑:

上述二进制码盘易发生错误,如图 3-4,码盘读数应为 0111 和 1000(十进制 7 和 8),假设高位接收管位置有误差,把“0”读成了“1”,则 0111 变成了 1111(十进制的 15),这就出了大错。位数越多,产生错误的可能性就越大。又如 0111 向 1000 进位时,后面三位必须由“1”变为“0”,而前面一位数字则由“0”变“1”,才能完成进位,也就是说这四条码道,只要有一条码道转换不对,就会造成错误。为了避免这个缺点,有的仪器采用了循环码,又称格雷码,如图 3-5。

图 3-4 7,8 的二进制码盘

图 3-5 循环码码盘

表 3-3 列出了 0~15 十进制对应的 4 位循环码二进制数值。循环码中任何相邻的数值,只有一位数(一条码道)发生变化,因而即使发生上述误读的情况,所产生的误差也不会超过该读数的最小单位。但这种码不便于阅读,因为它的各位数没有固定的权,无法运算,必须先将它翻译成普通二进制码后,再进行数据处理。当然,这种变换比较简单,只需要设计出一组相应逻辑电路,制成固定的译码器即可解决。

为取得较高的测角精度,还必须采用码盘的电子细分、光电细分技术。设需获得的最小读数为 10"的码盘,其最外圈的码道将被分成 129 600( $360 \times 60 \times 6$ )等分,换算成二进制数值则为 11 111 101 001 000 000,即需要用 17 条码道表示,17 条码道最外圈的实际刻线为  $2^{17}$ (即 131 072)格,其分划值约为 9.89"。这 17 位码盘相应地需要 17 个传感器组

成光电扫描读数系统,如采用直径为 80mm 度盘来实现是不可能的,因此在实用的电子经纬仪中必须将码盘读数与各种细分方法结合起来。例如 Topcon 的 ET -2(1"级)全站仪是采用绝对式测角原理,其编码度盘如图 3-6 所示。

表 3-3 十进制数对应的循环码二进制数

十进制	0	1	2	3	4	5	6	7
循环码二进制	0000	0001	0011	0010	0110	0111	0101	0100
十进制	8	9	10	11	12	13	14	15
循环码二进制	1100	1101	1111	1110	1010	1011	1001	1000

图 3-6 ET-2 绝对式测角编码盘

图中里圈部分共有 400 个独立的编码地址图形,将整个度盘分成 400 等分,编码的分辨率为 54 ( $360 \div 400 = 0.9^\circ$ );最外圈为游标图案。全圆有 100 个游标块,每个游标块对应的角值为  $3.6^\circ$  ( $360 \div 100 = 3.6^\circ$ ),其中包含一个起始码(图 3-6 中黑色码)和一中间等分码,起始码与中间等分码之间插有 80 条刻线,即将一游标块分成 162 等分,每一游标刻线就对应  $80^\circ$  ( $3.6 \div 162$ )。为了读取角值,采用 CCD(电荷耦合器件)线性传感器,它是采用精密的半导体技术制造的连续排列的光电转换器件。CCD 线性传感器共有 162 个像素,总长对应一个游标块的长度,像素位置编码为 0~161,这样,CCD 线性传感器始终可以探测到某一游标块的起始码,而且起始码对应 CCD 传感器的某一像素的编码,由此可以确定 80 的整倍数的读数。为了确定小于 80 的角度值,还要将游标和 CCD 线性传感器结合起来使用。两者刻线的间距有微小的差别(差值),从而使两者建立了游标关系(参阅常规的游标原理),用于读取小于 80 的数值,此差值即为游标最小读数(最小分辨率)。根据 CCD 线性传感器

图 3-7 输出波形

的输出,产生统一的波形(如图 3-7 所示),只要测定偶数和奇数输出波形相交点的相位,就可以确定最后的角值,此角值分辨率可达到秒级。

由上例可知,绝对式测角原理中,各公司全站仪采用的编码度盘的线划形式可以各种各样,再加上相应的电子细分技术,即可测出高精度的角值。

3.2.2 增量式光栅测角原理

均匀地刻有许多一定间隔(一般为相等间隔)细线的直尺或圆盘称为光栅尺或光栅盘。刻在直尺上用于直线测量的为直线光栅(图 3-8(a)),刻在圆盘上的等角距的光栅称为径向光栅(图 3-8(c))。光栅的基本参数是刻线的密度(刻线条数/mm)和栅距(相邻两刻线之间的距离)。图 3-8(a)中,光栅的栅线宽度为  $a$ ,缝隙宽度为  $b$ ,通常  $a = b$ ,栅距  $d = a + b$ ,它们都对应一角度值。栅线为不透光区,缝隙为透光区,在光栅盘的上下对应位置上(图 3-9)装有光源、指示光栅和接收器(光电二极管),称为读数头,可随照准部相对于光栅盘转动。由计数器累计读数头所转动的栅距数,从而求得所转动的角度值。因为光栅盘上没有绝对度数,只是累计移动光栅的条数计数,故称为增量式光栅度盘,其读数系统为增量式读数系统。

图 3-8 光栅度盘

一般光栅的栅距很小,但其分划值却仍然较大,如 80mm 直径的度盘上刻有 12 500 条线(刻线密度为 50 线/mm),其栅距分划值为 1 44'。为提高测角精度,必须提高光栅固有的分辨率,即必须对光栅距进行细分。但直接对这样小的栅距进行细分也很困难,要设法将栅距放大,莫尔条纹技术则是常采用的放大技术。

图 3-8(b)中,一小块具有与大块主光栅相同栅距的光栅称为指示光栅,将这两块密度相同的光栅重叠起来,其间相距一个很小的距离,其刻线互成一微小的夹角时,便可观察到一组光学图案,这就是莫尔条纹,它的性质可用简单的几何图案来表示(忽略衍射现象)。如图 3-10 中一组竖直的光栅线条与另一组倾斜角的光栅线条重叠在一起时,便形成了一串透光菱形图案,它们组成莫尔条纹的亮暗条纹,两个暗条纹之间是亮条纹,它

的宽度  $W$  被称为纹距, 近似为

$$W = d / \alpha$$

式中  $W$  —— 莫尔条纹纹距;  
 $d$  —— 光栅的栅距;  
 $\alpha$  —— 两个光栅栅线间的交角。

就是说, 莫尔条纹纹距比栅距放大了  $1 / \alpha$  倍, 例如  $\alpha = 20$  则可近似放大 172 倍, 可见其放大作用非常明显。

图 3-9 读数头的结构示意图

图 3-10 莫尔条纹

当一块光栅静止(主光栅), 另一块光栅(指示光栅)沿着垂直于自身栅线方向移动了一个栅距  $d$  时, 莫尔条纹则沿着两个光栅交角  $\alpha$  的平分线方向移动一个纹距  $W$ ,  $W$  的宽度较大, 可以用接收元件累计出条纹的移动量, 从而推导出光栅的移动量, 即角度值。测角时, 例如测  $\angle AOB$ , 由  $A$  方向起, 照准  $B$  方向时, 读数头传感器(含指示光栅)相对于主光栅作横向移动, 所形成的莫尔条纹随之移动。设栅距的分划值为  $\tau$ , 则纹距分划值亦为  $\tau / \alpha$ , 在照准目标的过程中, 就可累计条纹移动的条数  $n$ (反方向移动则减去), 并细分不足一条纹的小数  $\delta$ , 则角值  $H$  可写为

$$H = n \tau / \alpha + \delta \tau / \alpha$$

细分的方法有光学的、机械的和电子的, 目前基本上都采用电子细分, 各厂家均有自己的方法, 下面举例说明。

如 Topcon GTS-300 系列全站仪采用增量式测角原理。光栅盘刻有 16 200 条栅线, 每个栅距(包括一透光和不透光间隔)的分划值为  $360^{\circ} / 16\,200 = 80''$ 。指示光栅刻有相同栅距的刻线, 以极小的间距与主光栅重叠, 且栅线方向与主光栅偏斜一微小角度。在光栅度盘的一侧安置发光源, 另一侧装有光电接收二极管, 将莫尔条纹移动的光信号转换为电信号, 从而自动读取角度值。

为了进行细分和提高细分的精度, 光栅测角系统提供四路电信号。为获得两路相位差为  $90^{\circ}$  的输出信号, 在指示光栅盘上还刻有相距  $1/4$  栅距宽度的另一组刻划。这样, 两个光电接收器从这两组刻缝所接收的正弦信号的初相位相差即为  $90^{\circ}$ ; 分别定为  $0^{\circ}$  和  $90^{\circ}$ (图 3-11(a))。这两种信号还可通过内插转换成初相位分别为  $45^{\circ}$  和  $135^{\circ}$  的正弦信号(图 3-11

(b), (c))。其中栅距整分划值, 可对 0 正弦信号进行计数, 即可获得 80 的倍数(图 3-11 (d)), 而不足 80 的计数则由下列公式计算:

$$1) \text{ 当 } 0 < \quad < 10 \quad \text{时, 比较 0 线与 45 线, 得}$$

$$= \frac{a}{a + b} \times 10$$

图 3-11 四路电信号

$$2) \text{ 当 } 10 < \quad < 20 \quad \text{时, 比较 45 线与 90 线, 得}$$

$$= 10 + \frac{a}{a + b} \times 10$$

$$3) \text{ 当 } 20 < \quad < 30 \text{ 时, 比较 90 线与 135 线, 得}$$

$$= 20 + \frac{a}{a + b} \times 10$$

$$4) \text{ 当 } 30 < \quad < 40 \text{ 时, 比较 135 线与 0 线, 得}$$

$$= 30 + \frac{a}{a + b} \times 10$$

$$7) \text{ 当 } 60 < \quad < 70 \text{ 时, 比较 90 线与 135 线, 得}$$

$$= 60 + \frac{a}{a + b} \times 10$$

$$8) \text{ 当 } 70 < \quad < 80 \text{ 时, 比较 135 线与 0 线, 得}$$

$$= 70 + \frac{a}{a + b} \times 10$$

总之,在每隔 10 的范围内,由依次两条都过零点的正弦曲线进行比较,即可获得 10 范围内的精确值。最后,将大数与小于 80 的粗精测值进行精粗衔接,即可获得最后的角值。

如仪器采用增量式光栅测角时,它的电子线路中还必须有判向电路与可逆计数器。判向电路用于判别照准时旋转的方向,若是顺时针旋转,则计数器累加,若逆时针旋转,则计数器累减。这就保证了人工观测(即使照准部出现随机抖动的情况)读数的正确性。此外,操作时照准部转动的速度要均匀,不可突快或太快,以保证计数的正确性。

3.2.3 动态(光栅或编码盘)测角原理

徕卡(Leica)的 T2000 电子经纬仪,是一个具有旋转光栅盘的动态测角系统。度盘刻有 1 024 条栅线,内含栅线和缝隙,相应为不透光和透光区,其栅距分划值为 21.094 , 设为  $\theta_0$ 。盘上有两个计数光栏(图 3-12),  $L_S$  为固定光栏,安置在度盘外缘;  $L_R$  为可动光栏,随照准部转动,安置在度盘内边缘;  $\alpha$  为照准某方向后  $L_S$  和  $L_R$  之间的角度,读  $\alpha$  角时,度盘开始旋转,计取通过两个光栏间的栅线数,即可求得角度值。

由图 3-12 可见,  $\alpha = n \theta_0 + \theta$  ,即  $\alpha$  角等于  $n$  个整周期  $\theta_0$  和不足整周期的  $\theta$  分划值之和,它们分别由粗测和精测求得。

图 3-12 动态测角原理示意

粗测: 求出  $\theta_0$  的个数  $n$

在度盘的同一径向的内外缘上设有 a, b 两个标记。相距 90 处同一径向的内、外缘上,另设有 c, d 两个标记。度盘旋转时,从 a 标记通过  $L_S$  光栏起计数器开始计取  $\theta_0$  的个数,当 b 标记通过  $L_R$  光栏时,计数器停止计数,此时所计数的值即为  $\theta_0$  的个数  $n$ 。同理, c, d 两个标记又可以获取另一组值,两组值可作校核。

精测: 测量

如图 3-12,通过光栏  $L_S$  和  $L_R$  分别产生两个信号 S 和 R,  $\alpha$  由 S 和 R 两组信号的相位差求得。照准目标后度盘开始旋转,当栅线通过  $L_S$  时得 S 正弦波信号,经整形得 S 方波信号;同理,当栅线过  $L_R$  时得 R 正弦波信号,经整形得 R 方波信号,由 S 的“上升沿”与 R 的“上升沿”比较,即可得出两信号的相位差  $\theta$ 。也就是说,从 S 的“上升沿”开始计数时钟脉冲的个数(一个脉冲所代表的角度值为已知),到 R 的“上升沿”停止计数,即可求得 S 和 R 的相位差  $\theta$  的角度值。每隔一条栅线检测出一个  $\theta_0$ ,度盘转一周,则可取 512 个独立的  $\theta_0$ ,求其平均值,即取得高精度的不足整周期的角度值。测角精度取决于精测精度。

由微处理器对精、粗测数据进行衔接处理, 即得角度值。

动态测角除具备前两种测角方式的优点外, 最大的特点在于消除了度盘刻划误差等, 因此在高精度(0.5 级)的仪器上采用, 但它需要马达带动度盘, 转动测角, 因此在结构上比较复杂, 耗电量也稍大一些。

图 3-13 电子经纬仪工作原理框图

下面以光栅测角系统为例, 简述电子经纬仪的工作原理。

在电子经纬仪中, 水平度盘和竖直度盘及其读数装置分别采用相同的两个光栅度盘和读数传感器。

两个光栅盘分别与经纬仪的竖轴和横轴连接在一起, 而两读数头则分别与支架连接在一起。测水平角时, 照准部带动读数头一起转动, 计取所扫描光栅度盘上的栅距(纹距)值, 求得水平角。测竖直角时, 则是由望远镜带动光栅盘一起转动, 读数头固定在支架上, 读取转动光栅扫描的纹距值, 求得竖直角。

有关读数头(读数传感器)的构造参见图 3-9。红外发光管发出的光透过主光栅与指示光栅, 形成莫尔条纹信号, 此光信号被安置在指示光栅一侧的光电接收二极管转成电信号。

图 3-13 中, 由角度传感器采集的光栅电信号(模拟电信号)被送入前置放大器, 经放大后, 送鉴幅器限幅, 采样保持, 再经 A/D(模拟/数字)转换器变成数字信号, 送入单片机 CPU 和判向电路。经判向送可逆计数器计数, 记录整栅距的角度值, 并送入单片机。经 A/D 转换直接送入单片机的信号, 经细分运算得精读数(有的仪器是进行细分处理后再进入单片机的)。最后由单片机将可逆计数器送来的粗角值与精角值组合, 得光栅盘照准位置的角度值。单片机通过接口, 将组合后的读数送显示器显示, 还可以将数据传送给电子手簿, 自动记录。图 3-14 为电子经纬仪软

图 3-14 电子经纬仪软件原理流程图

件原理流程图。

### 3.3 竖轴倾斜自动补偿器工作原理

传统光学经纬仪的检验与校正主要是轴系关系的校正,例如:

- 1) 水准管轴不垂直于竖轴;
- 2) 视准轴不垂直于水平轴(横轴);
- 3) 水平轴不垂直于竖轴;
- 4) 竖盘指标差。

第 2) ~ 4) 项校正不完善的残差还可以通过正倒镜观测,取平均值的方法加以消除,而第 1) 项的残差仍将影响观测值的精度。

电子经纬仪则由于内部装有自动扫描读数系统、单片微处理机及竖轴倾斜补偿器等,可以更加完善地对轴系误差自动加以改正与补偿。在一般的电子经纬仪中都具有仪器误差自动改正的功能,不仅提高了仪器的精度,同时也简化了角度测量的作业步骤,减轻了劳动强度,节约了作业时间,这些正是电子经纬仪的优越性。

关于各轴系误差的检验将在 3.4 节中阐述。本节仅就竖轴倾斜自动补偿器作简要的说明。

目前一些较高精度的全站仪都装有双轴液体补偿器,以补偿(自动改正)竖轴倾斜对水平角和竖直角的影响。精确的双轴液体补偿器,仪器整平到 3 范围以内,其自动补偿精度可达 0.1", 各类仪器补偿器的各项指标参见表 3-1。

(b) 示意图

图 3-15 双轴液体自动补偿器

OPTON 公司的双轴液体补偿器工作原理如图 3-15(a)所示,图中由发光管 1 发出的光,经物镜组 6 发射到液体 4,全反射后,又经物镜组 7 聚焦至光电接收器 2 上。光电接收器为一光电二极管阵列。一方面将光信号转变为电信号;另一方面,还可以探测出光落点的位置。光电二极管阵列可分为 4 个象限,其原点为竖轴竖直时光落点的位置。当竖轴倾



斜时(在补偿范围内),光电接收器接收到的光落点位置就发生了变化,其变化量即反映了竖轴在纵向(沿视准轴方向)上的倾斜分量  $L$  和横向(沿横轴方向)上的倾斜分量  $T$ 。位置变化信息传输到内部的微处理器处理,对所测的水平角和竖直角自动加以改正(补偿)。

若竖轴在纵向倾斜分量为  $L$ , 横向倾斜分量为  $T$ , 则补偿器对竖直角(或天顶距)和水平角的改正公式为

$$Z = Z_L + L \quad \text{或} \quad V = V_L + L \tag{3-1}$$

$$H = H_L + T/\text{tg}Z = H_L + T\text{ctg}Z = H_L + T\text{tg}V \tag{3-2}$$

式中  $Z$ ——显示(改正后)的天顶距;

$Z_L$ ——观测(未改正)的天顶距;

$V_L$ ——观测(未改正)的竖直角;

$V$ ——显示(改正后)的竖直角;

$H$ ——显示(改正后)的水平方向值;

$H_L$ ——观测(未改正)的水平方向值

(此处改正仅考虑了竖轴倾斜,而不涉及其它轴系误差改正)。

图 3-15(b) 为 Wild T2002/T3000 的双轴液体自动补偿器示意图。

### 3.4 电子经纬仪轴系误差的检验、改正与补偿

为了评定电子经纬仪的质量,保证测角精度,还必须对电子经纬仪进行检验。仪器在使用过程中,由于其内部的电子元件和光机部件的老化及变位,或运输过程中的振动等原因,会引起仪器性能指标发生变化,以至影响测量成果的质量,因此也必须进行定期的检验。检验的项目一般有:

脚螺旋、光学瞄准器、望远镜目镜、十字丝亮度、显示窗照明、望远镜调焦、水平及垂直制动、微动螺旋、竖轴旋转稳定性的检查;

长、圆水准管(器)的检校;

光学对点器的检校;

竖轴补偿器的补偿范围与补偿精度的测定;

视准误差的检验;

水平轴倾斜误差的检验;

竖盘指标差的检验;

水平度盘、竖直度盘偏心差的检验;

一测回水平与垂直方向观测中误差的测定。

下面重点对 ~ , 项检验进行分析。其余各项请参阅《红外测距仪原理与检测》<sup>[9]</sup>一书。

#### 3.4.1 补偿器的补偿范围与补偿精度的测定

补偿器的作用是当仪器的竖轴倾斜时,只要其倾斜量在补偿范围之内,且补偿器处于工作状态,则对角度的观测精度无影响。

(1) 补偿范围的测定

置平仪器,使基座上脚螺旋 A、平行光管与视准轴处于同一个铅垂面内,如图 3-16 所示,经纬仪与平行光管大致同高,同时,设置仪器天顶距为 90°:

顺时针旋转脚螺旋 A,使仪器向上倾斜,直至显示窗中竖盘读数不变为止,记录该读数 M<sub>1</sub>。

逆时针旋转脚螺旋 A,使仪器向下倾斜,直至显示窗中竖盘读数不变为止,记录该读数 M<sub>2</sub>。则应有

$$\pm 90^{\circ} - M_1 \leq$$

$$\pm 90^{\circ} - M_2 \leq$$

式中 ——仪器的标称补偿范围(一般为 3'),如果达不到上述限差,则需送仪器维修中心调整补偿器的位置。

(2) 补偿器补偿精度的测定

纵向补偿精度

- 1) 仪器安置如图 3-16 所示,置平仪器;
- 2) 盘左位置,用望远镜垂直微动螺旋精确照准平行光管水平丝,读取竖盘读数 M<sub>1</sub>;
- 3) 旋转脚螺旋 A,使仪器上倾 ( 为仪器标称的补偿范围),用竖直微动螺旋使望远镜重新照准平行光管水平丝,读取竖盘读数 M<sub>2</sub>;
- 4) 旋转脚螺旋 A,使仪器下倾 ,再用竖直微动螺旋使望远镜重新照准平行光管水平丝,读取竖盘读数 M<sub>3</sub>;
- 5) 旋转脚螺旋 A,使仪器上倾 ,用竖直微动螺旋使望远镜重新照准平行光管水平丝,读取竖盘读数 M<sub>4</sub>,则如下关系式应成立

图 3-16 补偿器检测示意图

$$M_1 - M_2 \leq m$$

$$M_1 - M_3 \leq m$$

$$M_1 - M_4 \leq m$$

补偿限差 m 的规定:前述观测相当于对竖直角进行了单面观测,设仪器的一测回方向中误差为 m<sub>0</sub>,则单面观测的精度 m<sub>s</sub>= m<sub>0</sub> /  $\sqrt{2}$ ,因此,两种状态下读数之差的精度 m= m<sub>s</sub> /  $\sqrt{2}$  = 2m<sub>0</sub>,取 3 倍中误差为权限误差,则限差 m= 6m<sub>0</sub>。例如,标称精度 m<sub>0</sub>= ±0.5 的 TC2002,则 m 的限差为 3'。

横向补偿精度

- 1) 仪器安置同图 3-16;
- 2) 盘左位置,用望远镜垂直微动螺旋精确照准平行光管水平丝,读取竖盘读数 N<sub>1</sub>;
- 3) 旋转脚螺旋 B,使仪器下倾 ( 4/ 5),转动脚螺旋 C,使望远镜重新照准平行光管水平丝,读取竖盘读数 N<sub>2</sub>;
- 4) 旋转脚螺旋 B,使仪器上倾 ( 4/ 5),转动脚螺旋 C,使望远镜重新照准平行光管水

平丝, 读取竖盘读数  $N_3$ ;

5) 旋转脚螺旋 B, 使仪器下倾 (4/5), 转动脚螺旋 C, 使望远镜再次照准平行光管水平丝, 读取竖盘读数  $N_4$ , 对如下关系式进行检查:

$$\begin{aligned} N_1 - N_2 &= m \\ N_1 - N_3 &= m \\ N_1 - N_4 &= m \end{aligned}$$

补偿限差  $m$  的规定同上, 如果 3 项中有一项超限, 则需对补偿器进行校正, 用户不要自行拆卸, 请送仪器维修中心修理。

3.4.2 视准误差的检验

电子经纬仪视准误差即视准轴不垂直于横轴(水平轴)的误差(图 3-17), 其检验原理与方法同光学经纬仪, 一般采用读数法和四分之一法。随竖直角的变化, 视准误差  $c$  对水平方向观测值的影响也随之变化, 其关系为

$$c = c / \cos V = c / \sin Z \tag{3-3}$$

式中  $V$ ——竖直角;  
 $Z$ ——天顶距。

读数法检验的方法是:

图 3-17 视准误差

盘左 瞄准目标 A(A 为平点,  $V = 0^\circ$ ), 读数为  $L$ ;  
盘右 瞄准目标 A, 读数为  $R$ , 则

$$c = R - L - 180^\circ \tag{3-4}$$

检验时, 由于电子经纬仪或全站仪往往采用程序化处理, 仪器将自动计算出视准误差, 故比较方便。不同型号的仪器或采用菜单, 或采用指令进行检验操作。虽菜单、指令不尽相同, 但基本方法是一致的。下面以徕卡 TC2002/T3000 仪器为例予以说明。

徕卡 TC2002/T3000 仪器视准误差的检验步骤为:

- 1) 整平仪器, 盘左位置, 望远镜照准一清晰目标 A(室内用平行光管, 室外照准目标距仪器约 100m, 视线大致水平);
- 2) 输入指令 SET MODE 11 RUN(下划线表示仪器按键, 下同), 仪器进入视准误差测量状态, 并显示已存储的视准误差值;
- 3) 输入指令 RUN, 观测目标的水平方向值并显示;
- 4) 盘右位置, 望远镜照准同一目标 A;
- 5) 输入指令 RUN, 计算、显示并存储新的视准误差值, 或输入指令 CE, 取消本次视准误差的检验而保留原先的  $c$  值。

视准误差一经测定并存储, 只要仪器设置了误差改正功能, 此后观测的水平角将自动进行视准误差改正。

在误差值较小的情况下(如对 TC2002, 视准误差  $c \pm 16''$ , 对于 TC1600 则  $c \pm 30''$ ), 一般不需要进行校正。若超限则需送仪器生产厂家指定地点进行校正, 对较低精度的仪器可按说明书自行校正。

3.4.3 水平轴倾斜误差的检验

水平轴倾斜误差(即横轴不垂直于竖轴的误差)的检验和光学仪器一样,一般采用高点法或平高点法。

设水平轴不垂直于竖轴的误差为  $i$ (图 3-18)。望远镜绕水平轴上下扫出一个向高端倾斜的斜面(不是竖直面),因而在不同高度的目标点,由  $i$  引起的水平方向观测值的误差是不同的,即

$$i = i_t \text{g} V = i_{ct} \text{g} Z \tag{3-5}$$

式中  $V$ ——目标点的竖直角;  
 $Z$ ——天顶距。

高点法的检验方法是:

图 3-18 水平轴倾斜误差

盘左 瞄高处目标点 B, 读数为  $L$ ;  
盘右 瞄高处目标点 B, 读数为  $R$ ;

则 
$$i = \frac{(L - R - 180^\circ) \text{ctg} V}{2} \tag{3-6}$$

若高点观测  $n$  个测回, 则

$$i = \frac{1}{2n} \sum_{j=1}^n [(L_j - R_j - 180^\circ) \text{ctg} V_j] \tag{3-7}$$

平高点法是把视准误差与水平轴倾斜误差结合到一起检测, 并考虑残存的视准误差, 其检测方法是在水平视线上( $V = 0$ )和水平视线之上各设置一目标, 进行盘左盘右平、高点观测, 则

$$c = \frac{1}{2n} \sum_{k=1}^n (L_k - R_k - 180^\circ)_{\text{平}} \tag{3-8}$$

$$i = \frac{1}{2n} \sum_{j=1}^n (L_j - R_j - 180^\circ)_{\text{高}} \text{ctg} V_j - \frac{c}{\cos V_j} \tag{3-9}$$

由于全站仪多采用程序化处理, 具体的检验过程中, 仪器可自动计算出水平轴倾斜误差值, 较为方便。由于仪器型号不同, 检验的操作步骤就不能一概而论, 下面仍以徕卡 TC2002/ T3000 为例, 说明水平轴倾斜误差的检验步骤。

- 1) 安置好仪器, 在距仪器 5m 左右的地方, 设置大致在同一铅垂线上的两个目标, 一个平点, 一个高点, 高点的竖直角应在  $5^\circ$  以上;
- 2) 盘左位置, 照准平点, 输入指令 SET MODE 13 RUN RUN, 存储盘左水平方向值;
- 3) 盘右位置, 照准平点, 输入指令 RUN, 仪器求出视准误差并存储;
- 4) 盘右位置, 照准高点, 输入指令 RUN, 测定水平方向值;
- 5) 盘左位置, 照准高点, 输入指令 RUN, 则仪器计算、显示并存储新的水平轴倾斜误差值。

水平轴倾斜误差一经测定并存储, 只要仪器设置了误差改正功能, 此后观测的水平角将自动进行倾斜误差改正。全站仪大都具备此项功能。在误差较小的情况下(如对 TC2002, 水平轴倾斜误差  $i \pm 10''$ ; 对于 TC1600 应  $i \leq 15''$ ), 一般不需要进行校正。

综上所述, 仪器的三轴误差都可通过补偿器补偿、仪器检验加以自动改正。如竖轴不竖直的误差, 通过双向液体补偿器补偿其纵向倾斜误差分量和横向倾斜误差分量(式(3-1), (3-2))。视准轴不垂直水平轴的误差, 通过检测利用式(3-3)加以改正。水平轴不垂直于竖轴的误差, 通过检测利用式(3-5)加以改正。

综合起来称之为三轴补偿(这与双轴补偿器的双轴是不同的两回事, 不能混为一谈), 其综合表示式(其中也考虑了竖盘指标差改正)可写为

$$H = H_0 + \frac{c}{\cos V} + (T + i) \operatorname{tg} V \tag{3-10}$$

$$H = H_0 + \frac{c}{\sin Z} + (T + i) \operatorname{ctg} Z$$

$$V = V_0 + L + \tag{3-11}$$

- 式中 H —— 显示的水平度盘读数;  
 H<sub>0</sub> —— 电子度盘测得的值(未加轴系改正的值);  
 c —— 视准误差;  
 V —— 显示的目标点竖直角;  
 T —— 竖轴倾斜误差的横向分量;  
 i —— 水平轴倾斜误差;  
 Z —— 显示的天顶距;  
 V<sub>0</sub> —— 电子度盘测得的竖直角值;  
 L —— 竖轴倾斜误差的纵向分量;  
 —— 竖盘指标差。

### 3.4.4 竖盘指标差的检验

全站仪的竖盘读数头是安装在仪器支架上的, 而竖盘(光栅)则是随望远镜转动的。当视线水平时, 读数头的读数指标线应对准竖盘的 90°; 但由于读数头的位置安装得不正确(图 3-19), 使其读数不为 90°; 其间的夹角 即为竖盘指标差。

竖盘指标差检验的原理和光学经纬仪的检验原理相同, 在关闭补偿器的前提下(不关闭则检测中会包含补偿器纵向指标误差), 采用正倒镜观测方法检验。

设目标的竖直角为 V,

盘左:  $V_{\text{左}} = 90^\circ - L + \tag{3-12}$

盘右:  $V_{\text{右}} = R - 270^\circ - \tag{3-13}$

则正确竖直角为

$$V = \frac{R - L - 180^\circ}{2} \tag{3-14}$$

图 3-19 竖盘指标差

$$= \frac{L + R - 360^\circ}{2} \tag{3-15}$$

大多数电子经纬仪在测定并存储 之后,观测的竖直角将自动进行竖盘指标差的改正,计算式为

$$\begin{aligned} V &= V_{\text{左}} + \quad = V_{\text{右}} - \\ V &= V_0 + \end{aligned} \tag{3-16}$$

式中  $V_0$ ——观测的竖直角值;  
 $V$ ——显示(改正后)的竖直角值。

对于高精度测角的全站仪,其情况还有所不同。由于补偿器可以打开,也可以关闭,而补偿器也存在着指标差  $c$ ,这是由于补偿器接收二极管阵列(图 3-15(a))安装的位置不正确,使补偿器轴不铅垂,表现为竖轴垂直时补偿器零点的观测值不为零,此补偿器轴与铅垂线之间的夹角即为补偿器的指标差。故对于高精度的全站仪,其竖盘指标差的检验有两方面的含意。

(1) 当补偿器打开时,仪器显示的天顶距  $Z$  是以铅垂线为参考方向,此时的公式为

$$Z = Z_L + z + L + c, \quad L = l + c \tag{3-17}$$

式中  $Z$ ——显示的天顶距;  
 $Z_L$ ——观测的天顶距;  
 $z$ ——竖盘伪指标差(指零指标线与竖轴之间的夹角,而不是与铅垂线间的夹角);  
 $L$ ——竖轴倾斜误差分量(竖轴与铅垂轴的夹角);  
 $c$ ——补偿器的指标差;  
 $l$ ——竖轴与补偿器轴的夹角。

投影到竖盘上的轴系如图 3-20 所示。

徕卡 TC2002/T 3000 仪器的指标差检验步骤为:

输入指令SET MODE 10 RUN,显示原存入的指标差;

盘左,照准一清晰目标,输入指令RUN,显示天顶距;

盘右,照准同一目标,输入指令RUN,计算、显示并存储新的  $L$  (补偿器视准轴方向指标差)值,或输入指令CE,保持原有值,并结束测定状态。

图 3-20 投影到竖盘上的轴系

输入指令RUN,显示并存储新的  $T$  (补偿器水平轴方向指标差)值,或输入指令CE,保留已有的  $L$  和  $T$ ,并停止测定指标差状态。

(2) 当补偿器关闭时

$$V = V_L + \tag{3-18}$$

这时指标差的检验步骤与打开时类似,只采用前三步,测出 值,略去求定  $L$  和  $T$  的过程。

3.4.5 一测回水平方向和垂直方向观测中误差的测定

进行此项检定的一般都是高精度测角的全站仪,其水平方向及垂直方向的标准差一般都小于 3。

(1) 水平方向观测中误差的测定

室内方向中误差  $\mu_{\text{内}}$  的检测

在室内,以平行光管作为照准目标。在稳定的仪器观测墩上整平仪器,采用全圆方向法测定 5 个或 5 个以上目标,所有观测限差均采用 J1 仪器二等方向观测法的限差,测 N 个测回,计算方向值的中数。

$$\begin{aligned} L_1 &= [l_{1i}] / N \\ L_2 &= [l_{2i}] / N \\ &\vdots \\ L_n &= [l_{ni}] / N \end{aligned}$$

(3-19)

式中 1, 2, ..., n——目标数;  
N ——测回数,一般 N = 10;  
 $l_{1i}, l_{2i}, \dots, l_{ni}$ ——第 i 测回的目标方向值;  
[ $l_{1i}$ ] ——第 1 目标 N 次观测值的总和。

求各测回方向观测值的改正数 为

$$\begin{aligned} v_{1i} &= L_1 - l_{1i} \\ v_{2i} &= L_2 - l_{2i} \\ &\vdots \\ v_{ni} &= L_n - l_{ni} \end{aligned}$$

由最小二乘法根据平均误差计算一测回观测值的中误差公式为

$$\mu_{\text{内}} = \pm \frac{1.253}{N(N-1)} \sqrt{\frac{[v_i^2]}{n}}$$

式中 n——方向数;  
[ $v_i^2$ ] ——各测回方向观测值的改正数 的绝对值之总和  $\sum v_i^2$ 。

求出的  $\mu_{\text{内}}$  一般需与仪器的标称精度相适应。

N 测回平均方向值的中误差 M 为

$$M = \frac{\mu_{\text{内}}}{N}$$

室外方向中误差  $\mu_{\text{外}}$  的检测

选择室外 3km 左右的 4 个以上觐标,外界观测条件中等以上,用全圆方向法观测方向值,测 10 个测回,观测限差同 J1 型仪器,二等测量限差,计算  $\mu_{\text{外}}$  的方法和步骤与室内检测相同,只是求出的  $\mu_{\text{外}}$  一般都比相应的  $\mu_{\text{内}}$  大。如徕卡仪器检测限差如下:

徕卡仪器	室内检测	室外检测
T1000/TC1000	$\mu \pm 2.0$	$\mu \pm 2.5$
T1600/TC1600	$\mu \pm 1.2$	$\mu \pm 1.6$
T2000S/TC3000	$\mu \pm 0.7$	$\mu \pm 0.9$
T 2002	$\mu \pm 0.7$	$\mu \pm 1.1$

### (2) 垂直方向观测中误差的测定

在室内布设平行光管组, 每组平行光管相互照准, 如图 3-21 所示。将被检仪器置于检定台上, 调整仪器高度至三对平行光管交点处, 观测按方向法进行。盘左依次照准目标 、 、 , 照准部转至 方向依次照准 、 、 , 盘右依次照准 、 、 , 照准部转至 方向后, 依次照准 、 、 , 并分别记录其观测值, 此即为一个测回, 观测的测回数及其限差要求与水平角观测相同。

图 3-21 测定垂直方向观测中误差示意图

相对两平行光管垂直角之差为

$$i = \angle V_i \odot \vdash - \angle V_i \odot \vdash$$

则

$$\mu = \frac{\overline{[i]}}{2Nn}$$

式中  $\mu$ ——一测回垂直方向观测中误差;  
 N —— 测回数;  
 n —— 方向数;  
 $[ \quad ]$  ——  $( \quad )$ 。

求出的  $\mu$ 一般需与仪器的标称精度相适应。

## 3.5 全站仪数据通信

全站仪数据通信是指全站仪和计算机之间的数据交换。目前全站仪主要用两种方式与计算机通信: 全站仪原配置的 PCMCIA 卡; 利用全站仪的输出接口, 通过电缆传输数据。

### 3.5.1 PCMCIA 记录卡

PCMCIA(personal computer memory card internation association, 个人计算机存储



卡国际协会)(简称 PC 卡)是该会确定的标准计算机设备的一种配件,目的在于提高不同计算机型以及其它电子产品之间的互换性,当前它已成为笔记本式计算机的扩展标准。大多数便携机都设置有 PCMCIA 接口,只要插入 PC 记录卡,便达到扩充系统的目的。

PC 记录卡的大小与信用卡相似,耗电量也很少,而储存容量却有 2MB。其尺寸和插头均是标准化的。目前使用的 PC 记录卡长为 85.6mm,宽为 54.0mm;但厚度有 3 种:3.3mm,5.0mm,10.5mm。一般以前者为主,不过后两种卡的边缘厚度均为 3.3mm,所以接口可以通用。

目前新推出的全站仪几乎都设有 PC 卡接口,只要插入 PC 卡,全站仪测量的数据将按规定格式记录到 PC 卡上。取出该卡后,可直接插入带 PC 记录卡接口的计算机上,与之直接通信。当然,也可很方便地将 PC 卡送(寄)回驻地,在室内进行数据处理。

Leica 公司全部测量仪器都处于一个开放的测量世界(open survey world),关键是它采用了统一的格式和数据载体以及统一的接口,即均采用 PC 卡及 PC 接口。这样,全站仪测量数据与 GPS 接收机的数据通过 PC 记录卡,可方便地相互传递和兼容使用。

### 3.5.2 电缆传输

全站仪数据通信的另一种方式是指全站仪(发送端)将测得或处理的数据(如水平角、竖直角、斜距或平距、坐标等),通过电缆直接传输到电子手簿或电子平板系统。

如第 2 章所述,测图系统硬件之间的通信,不外乎并行接口和串行接口两类,并行通信是各位数据同时并行传送,每位数要占用一条传送线。串行通信则是数据依次一位一位地传递,每一位数据占用一个固定的时间长度,只需一条线传送。由于全站仪每次传输的数据量不大,故几乎所有的全站仪都采用了串行通信方式。

最常用的串行通信接口是电子工业协会 EIA(Electronic Industries Association)规定的 RS-232C 标准接口,它是一个 25 针(或 9 针)的插头,每一针的传输功能都有标准的规定(参见图 2-9(c)),传输测量数据最常用的只有 3 条传输线,即发送数据线、接收数据线和地线,其余的线供控制传输用。RS-232C 标准接口的各信号电平也是标准的,以便传送相互间的信号。

RS-232C 标准对下述两方面作了规定:

- 信号电平标准;
- 控制信号定义。

RS-232C 采用负逻辑规定逻辑电平,将 -15V ~ -5V 规定为“1”,+15V ~ +5V 规定为“0”。由于信号电平与通常的 TTL 电平不兼容,故需作 TTL 与 RS-232C 标准之间的电平转换。但幸运的是在新型全站仪和所有计算机的输入输出端口上都采用了 RS-232C 标准,因而两者间的通信电平是匹配的,信号控制线直接按标准对应连接即可。需要考虑的只是发送端和接收端之间通信参数如何匹配的问题。

串行通信中常采用异步通信方式(同步通信要求用时钟来控制发送端和接收端之间同步,因而一般不采用),即用起始位表示字符的开始,用停止位表示字符的结束,一个字符的基本组成有起始位、数据位、校验位和停止位。

为实现发送端与接收端的正常通信,保持数据传输的正确性,两端设置的通信参数必

须一致。一般通信参数包括下列基本项(各仪器说明书中都有具体规定):

波特率(baud rate)

波特率表示信号传输的速度。对于二进制通信来说,波特率即指每秒传送的数据位(bit)数(b/s),最常用的波特率(国际规定的标准的波特率系列)有 110, 300, 600, 1200, 2400, 4800, 9600 和 19200 b/s。全站仪中多采用 1200 b/s 以上。

数据位

指单向传送的(测量)数据位数。数据的代码通常使用 ASCII 码(American Standard Code for Information Interchange, 美国信息交换标准码),常用 7 位或 8 位。

校验位(parity bit)

又称奇偶校验(parity check)位,是一种检查传输数据正确与否的方法。即将一个二进制数(校验位)加到发送的二进制数据“串”上,让这个“串”的所有位的和总保持是奇数或是偶数,以便在接收端检核传输的数据是否有误。有 3 种表示方法供选择。

None(无):不检查奇偶性。

Even(偶):偶校验。如果发送的所有二进制各位的数据总和是偶数,则校验位给 0,即保持其为偶数;如果是奇数,则校验位给 1,即仍保持其为偶数。接收端接收数据时,则以数据位总和是偶数作校验。

Odd(奇):奇校验。如果发送的所有二进制数据位总和是奇数,则校验位为 0;如果是偶数,则校验位为 1。即始终保持所发送的数据位总和为奇数,而接收端则按数据位总和为奇数来校验。

检验位一般为 1 位,N 或 E 或 O。

停止位(stop bit)

在检验位之后再设置一位(或二位)停止位,用来表示字符的结束。

有的全站仪还规定了自己的发送与接收端间的应答信息。也就是说,接收端没有发出请求发送的信息,全站仪任意送出的数据,接收端就不会接收,以确保采集数据传输的正确性。只要全站仪和电子手簿或电子平板双方设置的参数一致,则可实现两端的正常通信。

在 EPSW 电子平板测图软件中,已将各种全站仪(如 Leica, Topcon, Sokkia, Pentax, Geodimeter, Nikon, 北光等)按设定的参数条件编制相应的接口程序,并写入菜单中(图 3-22),用户只要根据自己的全站仪型号加以选用即可。

(1) 徕卡(Leica)全站仪的数据通信

徕卡全站仪设有数据通信接口,配专用 5 针插头,如图 3-23 所示,各针脚的含义如图右的说明。

用电缆将全站仪与电子手簿或电子平板的 RS-232C 标准接口的相应端连接起来,便完成了硬件的连接,即可用于两者的数据通信。但要能进行相互间的通信,还必须有相同的通信参数和相应的通信程序。

TC1600 及 TC2000 通信参数可由用户自行选择设置。

设置波特率: SET MODE 70 RUN n0 RUN

上述设置波特率的语句中 n0 处,依据选择的波特率输入 0~7 相应的数字。

图 3-22 全站仪通信接口菜单

图 3-23 Leica 的 5 针插头

n0= 0, 1, 2, ..., 6, 7  
0= 110  
1= 300  
2= 600  
3= 1200  
4= 2400  
5= 4800  
6= REP  
7= 9600  
设置奇偶校验项: SET MODE 71 RUN n1 RUN  
n1= 0, 1, 2  
0= 无校验  
1= 奇校验  
2= 偶校验  
设置终止符: SET MODE 73 RUN n2 RUN  
n2= 0, 1  
0= CR(回车)

1= CR LF(回车换行)

设置回答方式: SET MODE 75 RUN n3 RUN

n3= 0, 1

0= 无回答方式

1= 有回答方式

TC1000 的通信参数固定为 2400, E。

TC1010 及 TC1610 改进型的通信参数设置为菜单提示设置。菜单(MENU 431)中已默认(设置)了一种标准通信参数, 如果合适, 可使用该组通信参数(2400, E, CR LF), 选择以后再按 CONT 加以确认, 当然用户也可用菜单 MENU 432 来设置。

MENU 432, 液晶屏上显示有:

\* COMM \* USER:

> BAUD(波特率) > 9600

PARITY(校验) > EVEN

ENDMARK(终止符) > CR

然后, 可用 键来设置要求的通信参数, 最后按 CONT 确认。

(2) 拓普康(Topcon)全站仪数据通信

拓普康全站仪的通信接口配专用 6 针插头, 如图 3-24 所示。各针脚的含义如图右的说明。

图 3-24 Topcon 的 6 针插头

通信参数如下:

波特率	1200	b/ s
数据位	7	7 位二进制
校验位	E	偶校验
停止位	1	1 位二进制

拓普康全站仪发送的数据基本格式为:

数据种类识别符 ID	数值	单位	块检查符 BCC	ETX	(CR LF)
------------	----	----	----------	-----	---------

不同的测量模式(即数据种类), 具体的格式也不尽相同, 若为斜距测量模式, 其数据格式如下:

?	+ 01178481	m	0852030	+ 1203040d	+ 01174572	t	15+	00	+ 25	099	ET X	(CR LF)
ID	SD	m/f	V	H(d/ g/ m)	HD	t / *	L	P	O	BCC		

其中 ID——数据种类识别符,在斜距测量模式下为“?”(ASCII 3FH);  
SD——斜距,1178. 481 m(+ /- , 8 位数字);  
m/f——米/ 英尺,例中为 m;  
V——垂直角,85 20 30 (+ /- , 7 位数字);  
H——水平角,120 30 40 (+ /- , 7 位数字);  
d/ g/ m——度/ 百分度/ 密位,例中为 d,即 360 ρ(六十进制);  
HD——平距,1174. 572m(+ /- , 8 位数字);  
t/ \* ——温度改正,t 表示改正,\* 表示不改正;  
L——EDM 回光信号强度 15(2 位数字);  
P——EDM 大气改正+ D× 10<sup>- 6</sup>(D 为公里数)(+ /- , 2 位数字);  
O——EDM 加常数,+ 25mm(+ /- , 2 位数字);  
BCC——块检查符 099(3 位数字),它是根据所传数据的 ASCII 码异或构成;  
ETX——表示文本结束的 ASCII 码(03H);  
CR——回车(0DH);  
LF——换行(0AH)。

### (3) 索佳(Sokkia)全站仪数据通信

索佳全站仪的数据通信接口配专用 6 针插头,各脚的定义同 Topon。  
SET 系列电子速测仪通信参数为:

波特率	1200	b/ s
数据位	8	8 位二进制
奇偶校验	N	无校验
停止位	1	1 位二进制

### (4) 宾得(Pentax)全站仪数据通信

宾得全站仪的数据通信接口配有专门的 6 针插头,如图 3-24 所示。日本仪器的专配 6 针插头皆相同。  
各针脚定义如下:

针脚	表示	含义
1	TXD	发送数据
2	RXD	接收数据
3	RTS	请求发送
4	CTS	允许发送
5	GND	地
6	N. U.	空

仪器的 6 脚插头旁另有电源插口。

(5) 捷创力(Geotronic) 全站仪数据通信

捷创力全站仪的通信接口是 RS-232C 标准接口, 不再另述。

3.6 全站仪的特性及其使用要点

测角和量距作为测绘工作最基本的手段之一, 其操作的“频率”和“广泛性”是不言而喻的。也正因为如此, 全站仪自出现便受到了广泛的关注和肯定, 人们积极进行研究和适时投入使用。综观近年来全站仪的发展, 人们会发现, 电子技术和传统的光机技术的结合是如此的紧密, 以至于从某种程度上来说, 它改变了测量工作的作业习惯和方式。与此同时, 它还拓展了测量技术的一些概念和手段, 使全站仪有着越来越广阔的应用前景。

3.6.1 全站仪的特性

目前最新推出的全站仪一般都具备(或部分具备)如下一些功能和特性: 自检与改正功能、双向传输功能、程序化特性、特殊性、统一性和开放性。

(1) 自检与改正功能

现今的全站仪在轴系关系方面与以往的光学经纬仪并没有太多的区别(见 3.4 节), 所不同的是, 由于全站仪自检功能和软件功能的完善, 在一定的误差范围内, 仪器可以将校正后的轴系残留误差通过软件加以改正, 从而使观测得到的结果是在正确的轴系关系条件下的观测结果。仅就这一点来说, 现今全站仪的仪器工作稳定性和精度可靠性要较光学经纬仪高。

有关轴系误差的测定和改正设置, 请参阅相关仪器的操作说明。

(2) 双向传输功能

计算机和全站仪之间的通信不仅仅是指计算机从全站仪中接收数据, 通常计算机也可向全站仪传输数据、编码及程序, 或计算机实时控制全站仪的工作状态(在这种情况下, 全站仪成了计算机的一个终端)。全站仪发展到今天, 软件已渐渐从硬件的限制中摆脱出来, 这就使得全站仪在不必要更换任何元件的条件下, 功能会有所增加。

(3) 程序化特性

最初的全站仪只能提供观测值(水平方向、竖直角及斜距)或观测值的归算值(平距及高差), 从这一特点来说, 全站仪和过去的光学仪器及量距工具并没有本质的区别, 只不过是方便了而已, 但最新上市的全站仪则几乎都具备程序化的特性, 有的已有汉化界面, 有的使用了 DOS 操作系统。

所谓程序化, 是指仪器的内存中存储着一些常用的测量作业程序, 操作者据此可以按照仪器的设定进行观测, 仪器往往在现场给出结果。从这一特点来说, 现在的全站仪具备了“计算机”的一些功能, 是智能型的全站仪。在野外, 这些程序的使用常常能极大地提高作业的效率。

以徕卡 TPS1000 测量系统中的全站仪为例, 其目前已具备如下的一些应用程序: 1) 度盘定向和高程传递(用于使仪器的设备坐标与地方坐标系及高程系取得一致); 2) 后方

交会; 3) 联测点(计算出两个相邻目标点间的距离和方位角); 4) 放样; 5) 自由站(类似于后方交会, 但可观测多达 10 个后视已知点, 以平差得出测站的平面位置和高程); 6) 参考线(相对于所定义的参考线的放样程序); 7) 遥测高程(测定可见而不可到达点的高程); 8) 隐藏点(测定不可见点的平面位置和高程); 9) 面积; 10) 测回法测角; 11) 导线测量。

(4) 特殊性

为了满足测量工作中一些特殊的作业要求, 现今推出的一些全站仪从结构上来说有一些特殊性。如捷创力公司的带伺服马达和无线电通信的全站仪, 徕卡公司的带伺服马达和指引灯或遥控器的全站仪以及拓普康公司的带伺服马达的全站仪。这些仪器或可设置自动跟踪目标功能, 或可设置自动放样功能, 甚至实现测站无人值守, 由目标站来遥控测站, 实现所谓“单机作业系统”。

(5) 统一性和开放性

计算机的发展是建立在自身的标准性和兼容性基础之上的, 故能迅速地发展。而测量工作随着测量技术的进步, 对计算机的依赖也越来越大, 这就从客观上要求测量仪器具有某种“统一性”, 以便为仪器的发展、测量工作效率的大幅度提高铺平道路, 进而达到“开放性”。这种思想最先由徕卡公司于 1994 年初提出, 随后, 便向市场推出了这一思想方法的产物——Wild GPS300 接收机和 TPS1000 全站仪定位系统。

所谓“统一性”, 是指仪器间具备统一的存储介质(数据载体)、统一的数据接口和统一的数据格式; 所谓“开放性”, 是指由于仪器具备了统一性的条件, 故能够达到相互间的开放, 即仪器之间的数据交换与共享。同时, 由于“统一性”, 使得用户也易于加入到仪器软件开发的行列, 让仪器按照用户的特殊工作顺序和要求进行作业, 彻底改变了以往用户只能被动接受仪器的工作顺序和要求、无从“自主”的状态, 从而达到了对用户的开放。

举例说明。过去进行大范围地形图测绘的工作步骤是: 1) 进行外业等级控制测量和内业解算; 2) 图根控制测量和内业计算; 3) 展点、测图。而在开放性的指导下, 现在的工作步骤可以是这样: 1) 野外实时差分 GPS 进行等级控制测量; 2) 将 GPS 接收机中记录控制点坐标的 PCMCIA 卡取出, 插入全站仪, 进行图根导线测量, 全站仪实时解算出图根点坐标; 3) 展点、测图(若有电子平板测图系统的话, 可现场成图)。

综上所述, 由于全站仪的这些特点, 使之不仅是地面数字测图的主要仪器, 而且使用范围正在扩大, 从传统的测图、放样, 扩展到目前的实时变形监测、工业测量、特殊工程测量等。全站仪作为测量工作的最常规仪器之一, 将发挥越来越大的作用。

3.6.2 全站仪使用要点

全站仪使用要点列举如下:

- (1) 仪器由专人使用、保管。迁站、装箱时只能握住仪器的支架, 而不能握住镜筒, 以免损害仪器精度。
- (2) 没用滤光片时不要将仪器正对太阳, 否则会损坏内部电子元件。
- (3) 旋转照准部时应匀速旋转, 切忌急速转动。
- (4) 高温天气时仪器必须撑伞作业, 否则仪器内部温度容易升到 60 ~ 70 , 从而缩短使用寿命。高精度测量时, 都要给仪器和脚架遮挡直射的阳光。

(5) 任何温度的突变都会缩短仪器测程或可使仪器受潮, 注意使仪器有一个适应环境温度的缓变过程。

(6) 运输仪器时应有防震垫, 以防震动和冲撞。

(7) 长期不用仪器时应定期通电。依季节每 1 月 ~ 3 月通电一次, 约一小时。电池应定期充电(按说明书规定)。

(8) 清洁镜头时先用毛刷刷去尘土, 然后用洁净的浸有无水酒精(乙醚)的棉布擦拭。

(9) 清除箱中尘土时不要使用汽油或稀释剂, 应用浸有中性洗涤剂的清洁布清洗。

(10) 其它使用要点同光学经纬仪。



## 4 计算机绘图的基本方法

任何复杂的图形都是由基本图形元素(如点、直线、圆、弧等)组成的。为了能在图形输出设备上生成图形,计算机绘图程序要提供基本图形元素的类型以及确定其位置的坐标和其它有关参数,如颜色、线型等。由于计算机图形输出设备在二维空间(平面上)生成图形,所以其绘图程序的主要数学原理是平面解析几何和数值分析。

目前,在各种计算机系统中都已开发出了功能各异的图形软件开发工具。这些图形开发工具一般都提供了多种类型的函数库,用以产生点、直线和曲线及更复杂的图形。本章仅就计算机绘制地形图的有关几个问题作简要的说明。

### 4.1 坐标变换

#### 4.1.1 坐标系的概念

大比例尺数字测量系统中使用的坐标系有大地坐标系和绘图坐标系。

在进行外业测量和绘制地形图时使用大地坐标系,而在编制绘图软件用于计算机图形显示器和控制绘图仪时,使用的是相应的图形设备上的绘图坐标系,又称之为设备坐标系。

大比例尺数字测图中,大地坐标是采用高斯-克吕格平面直角坐标系或独立坐标系,以南北方向为 X 轴,东西方向为 Y 轴,以 Z 轴表示高程。测图成果一般是在平面地形图上加注高程和绘制等高线。由于计算机显示器屏幕对观察者也相当于平面绘图坐标(平面直角坐标系),因而地形图的屏幕输出或绘图仪输出类同于图纸上的表示。

大地坐标和绘图坐标(设备坐标)的不同之处除了空间与平面的区别之外,还表现在坐标的数值范围不同。大地坐标可以根据不同地区的参考点确定,坐标数值可以在很大范围内变化。而绘图坐标都是以绘图设备的某一固定参考点为原点(如显示屏以左上角点为原点,绘图仪则以左下角点为原点),坐标数值一般都限制在 0 至最大绘图范围之内。理论上讲大地坐标数值可以是任意实数,单位可以是 m, km 或其它长度单位,而绘图(设备)坐标一般只能是正整数,坐标单位是绘图(显示)设备的最小分辨率单位(如像素、绘图笔移动的步长)。

例如,图形工作站的绘图坐标范围是与配备的图形显示器分辨率有关的,对于分辨率是 1024×768 的图形显示器,其 X 轴(水平方向)的范围是 0~1023, Y 轴(垂直方向)的取值范围是 0~767,单位是像素。滚筒绘图仪的绘图坐标的 X 轴(绘图滚筒的轴向)坐标范围由其滚筒长度决定,而 Y 轴(走纸方向)的坐标则可以很大。利用滚筒绘图仪的这一特性,可以不必分割区域而连续绘制出狭长地带的完整地形图。

外业测量采集的大地坐标数据经过处理后需以图形方式输出时,要进行坐标变换,把

大地坐标转换为绘图坐标,以符合各种图形输出设备的绘图坐标范围。从图形设备(如数字化仪,鼠标)输入数据时,要把绘图坐标转换为大地坐标,因此坐标变换是数字绘图软件中常用的算法。

4.1.2 大地坐标到屏幕坐标的变换

图 4-1(a) 中,  $(x_T, y_T)$  为 T 点在该坐标系的坐标值, 图幅范围为  $(x_T, y_T)_{min}, (x_T, y_T)_{max}$  的矩形区。图 4-1(b) 中,  $(x_P, y_P)$  为 P 点在该坐标系的坐标值, 显示范围可由  $(x_P, y_P)_{min}, (x_P, y_P)_{max}$  表示。由图 4-1 可知, 大地坐标转换为屏幕坐标的转换公式为

$$\begin{aligned} x_P &= x_{Pmin} + K_x(y_T - y_{Tmin}) \\ y_P &= y_{Pmax} - y_{Pmin} - K_y(x_T - x_{Tmin}) \end{aligned} \tag{4-1}$$

式中  $K_x, K_y$ ——大地坐标转屏幕坐标的转换系数,

$$\begin{aligned} K_x &= (x_{Pmax} - x_{Pmin}) / (y_{Tmax} - y_{Tmin}) \\ K_y &= (y_{Pmax} - y_{Pmin}) / (x_{Tmax} - x_{Tmin}) \end{aligned} \tag{4-2}$$

图 4-1

由于  $K_x$  与  $K_y$  的值不相同, 在显示屏上显示时取  $K_x$  和  $K_y$  中的较小者作为变换系数。

4.1.3 大地坐标系到绘图坐标系的变换

绘图仪坐标系的原点一般位于绘图仪的左下角, 有的位于绘图仪的中心, 或位于左上角, 但一般都可以通过软件来设定。设绘图坐标系如图 4-1(c) 所示。

大地坐标转换为绘图坐标的计算式为

$$\begin{aligned} x_P &= x_{Pmin} + M(y_T - y_{Tmin}) \\ y_P &= y_{Pmin} + M(x_T - x_{Tmin}) \end{aligned} \tag{4-3}$$

式中  $M$ ——大地坐标转换为绘图坐标的转换系数, 即待绘地形图的比例尺。

4.1.4 同一坐标系的变换

同一坐标系的坐标平移变换、比例变换和旋转变换对于二维平面图形是比较简单的, 相应的变换公式如下:

(1) 坐标平移变换

$$\begin{aligned}x &= x - x \\ y &= y - y\end{aligned}\tag{4-4}$$

式中  $x, y$ ——原坐标系的坐标;  
 $x, y$  ——平移后的坐标系坐标;  
 $x, y$ ——新坐标原点在原坐标系中的位置(图 4-2(a))。

图 4-2

(2) 坐标比例变换

$$\begin{aligned}x &= K_x X \\ y &= K_y y\end{aligned}\tag{4-5}$$

式中  $(x, y), (x, y)$ ——新、旧坐标系中的坐标;  
 $K_x, K_y$ ——X 轴和 Y 轴方向上新旧坐标单位长度之比(图 4-2(b))。

(3) 坐标旋转变换

$$\begin{aligned}x &= x \cos + y \sin \\ y &= y \cos - x \sin\end{aligned}\tag{4-6}$$

新旧坐标系的原点为同一点, 而相应坐标轴之间的角度为 , 即坐标轴转动了 角度。设定逆时针方向为 的正方向(图 4-3)。

图 4-3 旋转变换

## 4.2 绘制直线

### 4.2.1 绘制直线的函数

平面直线可以由两个点唯一地确定,因此绘制直线的函数一般只需两个参数:位于直线上的两个点的坐标。同时由于数字绘图软件所处理的主要是直线段,直线函数的变量相应为线段的两个端点的坐标。绘制直线的函数的一般形式为

$$\text{Line}(x_1, y_1, x_2, y_2)$$

其中 $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$  分别是直线段端点的平面坐标。

计算机系统内的图形输出设备硬件可以识别程序中的绘制直线的指令,在图形显示器屏幕上或控制绘图仪的绘图笔绘出相应的直线段。在绘图时,一般需要按照输出图形的比例要求,对绘图坐标进行变换。通过对  $x$  和  $y$  方向的比例系数的分别控制,可以对图形进行线性变换。在直线函数中加入线性参数,就可以生成宽度不同的实线、虚线或点划线等形式不同的直线。

### 4.2.2 绘制直线的算法

在图形设备上生成直线时,是按照直线的延伸方向不断地生成光点的轨迹或绘出微小的线段,光点的间距及绘图笔移动的距离称为步长。实际生成的直线是由连续的像素或连续折线组成的。由于图形设备的分辨率(显示器像素间距或绘图笔移动的最短距离)限制,实际生成的点有可能偏离直线的理论位置。高质量的图形设备除了提高硬件分辨率之外,还要配置相应的高质量的算法,尽可能消除生成的直线与理论位置之间的偏差,同时还要保持高效率的绘图速度。常用的绘制直线算法有:

#### (1) 逐点比较法

在生成直线的过程中,每一步都与标准直线进行比较,根据偏差决定下一步的绘图方向。

以图 4-4 为例,为了生成直线 AG,先从起点 A 开始,在  $X$  方向绘出一个步长的线段,到达 B 点。由于 B 点位于直线的规定位置以下,所以下一次步进在  $Y$  方向进行,画出线段 BC。每绘出一个步长后,都要根据当前点的位置与规定位置的偏差,决定下一步进的方向。

以第一象限中生成直线的过程为例,图 4-5 中 OA 是要生成的直线的理论位置,起点是 O 点,终点是 A 点。设当前实际画出的点位置为  $X$  轴上的 1 点,斜率等于零且小于 ,可以决定下一次步进的方向为  $Y$  正方向。设前进一个步距的点为 B,OB 的斜率为 。如果  $>$  ,则  $tg > tg$  ,说明 OB 线位于 OA 线的上面,下一次应在  $X$  方向绘出一个步长的位移。如果  $=$  ,点位于直线上,下次仍然可以在  $X$  方向步进。如果  $<$  ,则  $tg < tg$  ,OB 线位于 OA 线以下,应从 B 点开始向  $Y$  的正方向步进。

设 A 点的坐标是 $(x_A, y_A)$ , B 点的坐标是 $(x_B, y_B)$ ,坐标单位是绘图的步长,则

$$tg - tg = y_B/x_B - y_A/x_A = (y_Bx_A - y_Ax_B)/x_Ax_B$$

图 4-4 逐点比较法

图 4-5 判别位置偏差

对于第一象限,  $x_A > 0, x_B > 0$ , 因此判别 B 点处的位置偏差可用

$$F_B = y_B x_A - y_A x_B$$

直线起点处  $F_0 = 0$ , 首先在 X 方向绘出单位步长, 到达点  $P_1(1, 0)$ 。此处

$$\begin{aligned} x_1 &= x_0 + 1, \quad y_1 = y_0 \\ F_1 &= y_1 x_A - y_A x_1 = y_0 x_A - y_A (x_0 + 1) \\ &= y_0 x_A - y_A x_0 - y_A = F_0 - y_A = -y_A < 0 \end{aligned}$$

从  $P_1$  开始的下一次步进方向是 Y 轴的正方向, 步进后到达  $P_2(1, 1)$  点。此处

$$\begin{aligned} x_2 &= x_1, \quad y_2 = y_1 + 1 \\ F_2 &= y_2 x_A - y_A x_2 = (y_1 + 1) x_A - y_A x_1 \\ &= y_1 x_A - y_A x_1 + x_A = F_1 + x_A \end{aligned}$$

由此, 在第一象限内的偏差判断公式可以简化为:

当  $F_i \geq 0$  时, 在 X 方向绘出一个单位步长,  $F_{i+1} = F_i - y_A$  (4-7)

当  $F_i < 0$  时, 在 Y 方向绘出一个单位步长,  $F_{i+1} = F_i + x_A$  (4-8)

简化后的偏差计算公式中只有加减运算, 而且只用到终点坐标  $(x_A, y_A)$ 。

在上述的讨论中, 直线的起点是原点, 对于起点不在原点的直线, 可以用坐标的平移对运算进行简化, 仍然可以利用上面的判别公式。对于其它象限的情况, 用同样的方法可以得到相应的简化判断公式, 如表 4-1。

表 4-1 偏差判断公式

	$F_i \geq 0$		$F_i < 0$	
	步进方向	判别公式	步进方向	判别公式
第一象限	+ X	$F_{i+1} = F_i - y_A$	+ Y	$F_{i+1} = F_i + x_A$
第三象限	- X		- Y	
第二象限	+ Y	$F_{i+1} = F_i + x_A$	- X	$F_{i+1} = F_i - y_A$
第四象限	- Y		+ X	

(2) 平面分割法

直线  $f(x, y) = 0$  将平面分成两个部分(如图 4-6 所示), 平面上所有的点分别属于下面的点集:

在直线上的点满足  $f(x, y) = 0$ ;

位于直线上半平面的点满足  $f(x, y) > 0$ ;

位于直线下半平面的点满足  $f(x, y) < 0$ 。

利用上述特征, 在绘制直线过程中每完成一步之后, 就根据当前位置  $(x_i, y_i)$  计算  $f(x_i, y_i)$ , 从而确定与标准直线的偏移, 然后可以决定下一步的绘制方向。这种方法实际是另一种逐步比较法。

图 4-6 平面分割法

(3) 数值微分法(DDA, digital differential analyzer)

直线的 DDA 算法的基本原理来自直线的微分方程。由于直线的一阶导数是

$$dy/dx = y/x = k \quad (k \text{ 为常数})$$

即绘制的每一步在 X 和 Y 方向的步长之比为常数。设当前位置的坐标为  $(x, y)$ , 在 X 方向上的步长为  $\Delta x$ , 则 Y 方向应移动的步长为  $\Delta y = k \Delta x$ , 相应的该位置的坐标是  $(x + \Delta x, y + k \Delta x)$ 。同样, 如果以 Y 方向上的步长  $\Delta y$  为依据, 下一位置的坐标应该是  $(x + \Delta y/k, y + \Delta y)$ 。根据选择步长的方式不同, DDA 算法又可分成简单 DDA 和对称 DDA。

简单 DDA 算法

简单 DDA 算法选择  $|\Delta x|$  和  $|\Delta y|$  较大者作为单位步长。一般的判断准则是: 当直线的斜率  $(k = dy/dx = y/x)$  的绝对值  $|k| \leq 1$  时, 选择  $|\Delta x|$  为单位步长, 即每次在 X 方向步进  $|\Delta x| \pm 1$ , 在 y 方向步进  $|\Delta y| \pm |k| \Delta x \pm |k|$ ; 当  $|k| > 1$  时, 选择  $|\Delta y|$  为单位步长。这样可以保证每一步都至少在一个方向上有一个步长的移动, 避免重复绘制同一点。

简单的 DDA 算法中的除法运算不使用硬件实现, 但作为绘图软件产生直线的算法是非常简单的。图 4-7 为  $|k| \leq 1$  时的简单 DDA 算法绘直线的流程图。

对称 DDA 算法

对称 DDA 算法是为避免除法运算而设计的。对称 DDA 算法中选择的准则是寻找一个整数 n, 使得

$$2^{n-1} < \max(|x_2 - x_1|, |y_2 - y_1|) < 2^n \tag{4-9}$$

式中  $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$  ——直线的端点坐标。

公式(4-9)可改写为

$$1/2 < \max(|x_2 - x_1|/2^n, |y_2 - y_1|/2^n) < 1$$

由此确定的  $\Delta x$  和  $\Delta y$  分别是

$$\begin{aligned} \Delta x &= |x_2 - x_1|/2^n \\ \Delta y &= |y_2 - y_1|/2^n \end{aligned} \tag{4-10}$$

根据公式(4-10)得到的  $\Delta x$  和  $\Delta y$  都小于一个分辨率单位步长, 但大于  $1/2$  分辨率单

图 4-7 简单 DDA 算法(图 4-1) 流程图

位步长(分辨率单位步长为一个像素或绘图仪的最小步长)。

虽然公式(4-10)是以除法形式表示的,但是由于除数是  $2^n$ , 可以用算术右移完成, 硬件技术上实现起来比较简单。公式中  $n$  的值可以根据公式(4-9), 对  $x_2 - x_1$  和  $y_2 - y_1$  进行算术左移得到。

对称 DDA 算法产生直线的实际过程, 是用两个寄存器分别保存步进过程中的位置参数  $x$  和  $y$ 。每个寄存器由整数部分和小数部分组成。在产生直线的过程中不断把选定的  $x$  和  $y$  分别加在  $x$  和  $y$  寄存器的小数部分, 当小数部分产生溢出时(即整数部分加 1), 用此时整数部分的值作为直线的下一点。如此循环, 直至线段的终点。为了进一步保证精度, 在取整时应进行四舍五入。通常的步骤是在初始化时就在  $x$  和  $y$  寄存器的小数部分预置 0.5, 以后的循环过程中取整时, 直接舍去小数部分就相当于做了四舍五入处理了。

## 4.3 绘制圆和圆弧

### 4.3.1 绘圆和圆弧的函数

在平面上可以用不同的参数确定圆和圆弧的位置, 计算机图形软件开发工具中提供的绘制圆和圆弧的函数形式也不相同。按照确定位置的参数类型, 圆和圆弧函数有以下几种主要形式:

(1) 用圆心和半径确定圆周, 这是绘圆周函数的最常用也是最简单的一种, 其一般表示形式为  $\text{Circle}(x, y, r)$ , 其中  $(x, y)$  为圆心坐标,  $r$  为圆的半径。

(2) 用圆周上的三点确定圆,  $\text{Circle}(x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3)$ , 其中  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3)$  是位于圆周上的三个不同点的坐标。

(3) 以圆弧的圆心、起始点和圆心角确定圆弧,  $\text{Arc1}(x_1, y_1, x_2, y_2, \theta)$ , 其中  $(x_1, y_1)$  是圆弧的圆心,  $(x_2, y_2)$  是圆弧的起点,  $\theta$  是圆弧的圆心角, 如图 4-8(a) 所示。

图 4-8 用不同参数确定圆和圆弧

(4) 三个点确定圆弧,  $\text{Arc2}(x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3)$ , 如图 4-8(b) 所示。

平面上的三点可以唯一地确定圆弧的位置, 其中  $(x_1, y_1), (x_3, y_3)$  分别是圆弧的起点和终点,  $(x_2, y_2)$  是位于圆弧上的另一点。

计算机图形显示器的硬件或相应的图形软件都支持绘制圆和圆弧的指令, 大多数绘图仪也能识别绘圆或圆弧的绘图命令。对于不能自动画出圆和圆弧的图形设备, 需要以设备的基本绘图指令为基础编制绘圆及圆弧的程序。

### 4.3.2 绘制圆和圆弧的算法

与产生直线的几种算法相似, 在计算机图形输出设备上生成圆弧或圆的算法也有逐点比较、数值微分(DDA)等方法, 另外还有多边形逼近、微分方程等算法。

#### (1) 逐点比较法

用逐点比较法生成圆弧, 是从圆弧的起点开始, 每绘制一个单位步长, 就与圆弧的理论曲线进行比较, 根据位置的偏移决定下一次步进的方向, 如图 4-9 所示。

对于笔式绘图仪, 用逐点比较法绘制出的圆弧实际上是由台阶形的折线组成的, 由于每步绘出的线段非常微小(通常小于 0.1mm), 看上去仍然是一条光滑的曲线。



图 4-9 逐点比较法

图 4-10 Bresenham 算法判别

圆弧是二次曲线, 逐次比较会有较大的计算量。为提高运算速度, 要对比较判断函数进行简化, 尽可能减少复杂运算。

(2) Bresenham 算法

Bresenham 算法与 DDA 算法类似, 是从圆弧的起点开始, 每次在最大变化方向上改变一个步长, 另一方向是否变化则要进行相应的判断。在图 4-10 中,  $P(x_p, y_p)$  是已经绘出的点, 下次步进可选择点为 E 和 SE, M 是 E 和 SE 之间距离的中点。

确定一个点与圆的相对位置的判别函数为  $f(x, y) = x^2 + y^2 - r^2$  ( $r$  为圆的半径)。当点位于圆内时,  $f(x, y) < 0$ ; 当点位于圆外时,  $f(x, y) > 0$ ; 当点位于圆上时,  $f(x, y) = 0$ 。如果中点 M 位于圆外, 则 SE 点更接近圆弧; 若 M 点位于圆内, 则 E 点更接近圆弧。判断 M 点位置的函数是

$$d = f(x_p + 1, y_p - 1/2) = (x_p + 1)^2 + (y_p - 1/2)^2 - r^2 \tag{4-11}$$

如果  $d < 0$ , 选择 E 为所绘圆弧的下一点, 其坐标是  $(x_p + 1, y_p)$ , 下一次判别中点的函数为

$$d_1 = f(x_p + 2, y_p - 1/2) = (x_p + 2)^2 + (y_p - 1/2)^2 - r^2 = d + 2x_p + 3 \tag{4-12}$$

如果  $d \geq 0$ , 选择 SE 为圆弧的下一点, 其坐标是  $(x_p + 1, y_p - 1)$ , 下一次所用的判别函数变为

$$\begin{aligned} d_2 &= f(x_p + 2, y_p - 3/2) = (x_p + 2)^2 + (y_p - 3/2)^2 - r^2 \\ &= d + 2(x_p - y_p) + 5 \end{aligned} \tag{4-13}$$

用 Bresenham 算法绘制圆弧的步骤可以归纳为:

- 计算判别函数  $d$  在当前点的值, 根据  $d$  的符号选择下一个步进的位置;
- 在选定的位置上画出点, 修改判别函数, 准备下一次判断;
- 如果未达到终点, 重复步骤 和 。

由于判断函数  $d$  是递推变化的, 在绘圆弧过程开始时要为  $d$  确定初始值。设圆弧的起点位于 Y 轴上, 起点坐标为  $(0, r)$ , 此时中点 M 位于  $(1, r - 1/2)$ , 且

$$d = f(1, r - 1/2) = 1 + (r - 1/2)^2 - r^2 = (5/4) - r \tag{4-14}$$

这样得出  $d$  的初始值为  $d = (5/4) - r$ , 但是其中包含实型数值, 会影响运算速度。为避免实数(浮点)运算, 在  $d$  的初始值上减  $1/4$ , 使  $d = 1 - r$ 。原来判断  $d < 0$ , 现在变为判断  $d < -1/4$ 。然而由于  $d$  的初始值是整数, 其变化量也都是整数  $(2(x_p - y_p) + 5$  或  $2x_p + 3)$ , 可以仍然以  $d < 0$  为判断标准。

图 4-11 是利用 Bresenham 算法在第一象限的  $45^\circ \sim 90^\circ$  内绘弧的程序流程图。对于圆心不在坐标原点和起点不在坐标轴上的圆弧, 可以通过坐标的线性变换, 简化计算过程。对于位于其它象限的圆弧, 可以利用对称画法绘制。

图 4-11 绘弧流程框图

## 4.4 绘制任意曲线

绘制任意曲线时, 通常是以曲线上或曲线附近已知的若干控制点坐标为依据的。最常用的方法是对这些控制点构成的折线进行平滑, 通过各种插值算法生成连续的曲线。

拟合曲线的常用算法有: 高次多项式插值、样条函数、最小二乘法等。更详细的说明请参见 10.4 节“等高线的平滑处理”一节。

## 4.5 二维图形的剪裁

数字测图软件的图形显示模块, 通常应具备对图形进行分块显示的功能, 如对某个特定区域进行放大显示, 对连续区域分段显示, 在人机交互方式下选择一个区域进行图形编辑等, 都需要选取已经生成的整个图形的一部分。为了实现这些功能, 绘图程序要进行图形的剪裁处理, 即在图形中选取规定形状区域(剪裁窗口)内的内容进行显示。对于与窗口边界相交的图形, 要能正确判断和选取位于窗口内的部分。由于测图软件显示内容以平面

图形为主,显示窗口通常是矩形区域,本节介绍有关用矩形窗口对二维图形进行剪裁的常用算法。

4.5.1 直线的剪裁

一条直线与矩形相交后,在矩形内部会生成一直线段。直线剪裁算法就是解决如何判断直线是否与窗口边界相交,如果相交,如何计算出窗口内部的直线段部分。在对算法的讨论中,如果直线与窗口边界重合,重合的部分也按包含在窗口之内进行处理。

本节的内容是矩形窗口剪裁直线的算法。由于对矩形及其它形状的多边形的剪裁都可以转化为对直线的剪裁进行处理,直线剪裁算法是二维及三维图形剪裁算法的基础。

图 4-12 是直线剪裁的几种可能的情况。矩形窗口边界分别与直线 CD, GH 相交,剪裁后在窗口内生成了线段 CD 和 GH ;未与窗口边界相交的直线 IJ 及 EF 不在窗口之内;与窗口边界没有交点但整体包含在窗口内的 AB 在剪裁后仍然保留。

图 4-12 直线剪裁的几种情况

判别直线上的点是否位于矩形内部的条件是:假定矩形的边分别由  $x_{min}, x_{max}, y_{min}, y_{max}$  确定,则位于该矩形内部的点  $(x, y)$  一定满足  $x_{min} \leq x \leq x_{max}, y_{min} \leq y \leq y_{max}$ 。根据直线的几何特性,剪裁直线时只需判断剪裁后得到的直线段端点,而不必沿着直线逐点比较。判断直线是否通过剪裁区域,实际上是判断直线与剪裁区域边界是否相交。

(1) Cohen-Sutherland 算法

该算法是目前直线剪裁简单实用的方法之一。它将平面划分为 9 个区域,如图 4-13 所示,矩形剪裁窗口位于中心,每个区域用 4 位二进制编码表示。此编码的每一位表示相对于矩形窗口边的位置。具体的定义如下(从左至右):

- 第 1 位= 1 表示  $y > y_{max}$ ,即位于窗口上边框之上;
- 第 2 位= 1 表示  $y < y_{min}$ ,即位于窗口下边框之下;
- 第 3 位= 1 表示  $x > x_{max}$ ,即位于窗口右边框以右;
- 第 4 位= 1 表示  $x < x_{min}$ ,即位于窗口左边框以左。

如果 4 位全是 0,即表示位于窗口之内(包括位于窗口边框上)。

图 4-13 区域编码示意

确定一个点所在区域的 4 位编码的方法是利用其坐标

(x, y)与窗口边的坐标  $x_{min}, x_{max}, y_{min}, y_{max}$  的差的符号位(当差 $< 0$ 时,符号位为 1):

- 第 1 位  $y_{max} - y$  的符号位;
- 第 2 位  $y - y_{min}$  的符号位;
- 第 3 位  $x_{max} - x$  的符号位;
- 第 4 位  $x - x_{min}$  的符号位。

在对直线进行剪裁时,如果直线两个端点的区域编码都是 0000,则该直线完全包含在窗口之内。如果两个端点的区域编码的逻辑乘(AND)结果不为 0,则直线全部位于窗口之外。如果不是上述两种情况,就要对直线进行分割,逐步找出位于窗口内的部分。

分割的方法是:首先确定直线与窗口一个边(包含边的延长线)的交点,舍弃从交点开始的不在窗口内的部分,余下的部分如果仍不是全部位于窗口之内,则继续分割和舍弃,直至余下的部分全部包含在窗口之内。从直线端点的区域编码就可以找到与直线有交点的窗口边(及其延长线)。每次确定分割点的顺序可以从窗口外的端点开始,按照区域编码的顺序,先上后下,先左后右,分别进行处理。即从编码左边开始的第一个为 1 的位所对应的窗口边开始进行判别。

图 4-14 中两条直线都有包含在剪裁窗口内的部分,具体剪裁过程如下:

对直线 AD,点 A 的区域编码是 0000,位于窗口之内,而 D 点的区域代码为 1001,此直线不是全部位于窗口之内,也不是全部

图 4-14 窗口剪裁示例

位于窗口之外。D 点是位于窗口之外的端点。根据 D 点的编码 1001,首先计算直线与窗口上边的交点。交点 B 将 AD 分为 AB 和 BD 两部分。由于 B 的区域编码为 0000,位于窗口以内,舍去位于窗口外的部分 BD,最后的剪裁结果是 AB。

对于直线 EI,先从位于窗口以外的端点 E 开始进行。因 E 的区域编码是 0100,所以 EI 与窗口的下边(或下边的延长线)有交点,得到第一个交点 F,其区域编码是 0000,位于窗口以内,因此舍弃 EF 段。下次判断从位于窗口以外的另一端点 I 开始,I 的区域编码是 1010,由此得到 FI 与窗口上边延长线的交点 H。舍弃窗口以外的部分 HI 后,由于 H 点仍在窗口以外,所以从 H 开始继续计算下一个交点,得到 FH 与窗口右边的交点 G,最后留在窗口之内的部分 FG 就是剪裁的结果。

Cohen-Sutherland 算法的效率不是很高,因为计算出的分割点不一定每次都是直线与窗口边的真正交点。算法的改进之一是把平面分为更多的区域,以避免计算不必要的交点。Cohen-Sutherland 算法的流程如图 4-15 所示。

(2) 中点对分算法

中点对分算法不需要进行浮点数的乘除运算,适于用硬件完成剪裁的环境。其基本原理是用对半搜索的策略,找到被剪裁直线端点所对应的最远可见点(即直线上距该端点最远的位于窗口内的点)。中点对分法的算法如下:

设直线的端点分别为  $P_A$  和  $P_B$ ,令  $P_1 = P_A, P_2 = P_B$ 。

步骤 1) 如果直线完全位于窗口之外或窗口之内,则处理结束。此判别可由  $P_1$  和  $P_2$

图 4-15 Cohen-Sutherland 算法流程

的区域编码的逻辑乘结果确定。

步骤 2) 如果  $P_2$  是可见点(位于窗口之内), 它即是最远可见点, 则转到步骤 4), 否则继续下一步骤。

步骤 3) 计算  $P_1P_2$  的中点  $P_m$ , 如果  $P_m$  为不可见点(位于剪裁窗口以外), 则令  $P_2 =$

· 62 ·

$P_m$ , 重复步骤 3)。如果  $P_m$  为可见点, 则令  $P_m$  为  $P_m P_2$  的中点, 若  $P_m - P_m$  的差大于精度要求, 令  $P_1 = P_m$ , 重复步骤 3)。当  $P_m - P_m$  的差达到精度要求时,  $P_m$  即是相对  $P_1$  的最远可见点。

步骤 4) 如果两个端点都已找到各自的最远可见点, 过程结束。否则对端点  $P_B$  进行同样处理, 此时设  $P_2 = P_A$ ,  $P_1$  为已经找到的相应于  $P_A$  的最远可见点。

以图 4-16 为例, 对直线  $P_1 P_2$  用中点对分法剪裁的过程如下:

由于  $P_1$  和  $P_2$  都是不可见点, 因此要分别对两个端点进行寻找最远可见点的计算。

计算  $P_1, P_2$  的中点  $P_m$ 。  $P_m$  为可见点, 所以对  $P_m P_2$  再进行对分, 计算出的中点为  $P_m$ 。  $P_m$  是不可见点, 则下次对  $P_m P_m$  进行对分, 得到新的中点(同时也是可见点)  $P_m$ 。接下去的对分是在  $P_m P_m$  上进行。如此反复后, 当前后两次计算出的中点偏差小于预定值时, 循环结束, 得到的点  $P_{m2}$  是相对于  $P_1$  的最远可见点。

图 4-16 中点对分法

对  $P_1 P_{m2}$  作同样的对半查找, 直至得到相对于  $P_{m2}$  的最远可见点  $P_{m1}$ 。  $P_{m1} P_{m2}$  就是剪裁后窗口内的可见部分。

中点对分算法可以用二进制移位运算完成, 用硬件实现比较简单。

4.5.2 任意多边形的剪裁

多边形剪裁的算法应该能够处理不同的图形相交时的情况, 凹多边形被剪裁后形成两个独立的多边形, 如图 4-17(a) 所示。在剪裁时要检查多边形的各条边是否与剪裁窗口相交, 在需要时能够增加、删除或分割原多边形的边界线, 并能处理剪裁结果生成的新的(和更多数目的)多边形。

图 4-17 任意多边形的剪裁

Sutherland-Hodgman 多边形剪裁算法:

S-H 算法的基本思想是把复杂的情况分解成可重复的简单算法, 所谓简单算法是用

剪裁窗口的一条边(及其延长线)去分割被剪裁的多边形。以矩形窗口为例,剪裁窗口的四条边顺序分割多边形,其结果综合之后,就是最后留在窗口内的部分,如图 4-18 所示。

图 4-18 S-H 算法

S-H 算法与 Cohen-Sutherland 直线剪裁算法不同的是:对多边形的剪裁是顺序检查剪裁窗口各条边与多边形相交的情况,而直线剪裁是根据端点的区域编码判断是否与窗口边框相交,只有当发生相交时才进行剪裁。

实际上 S-H 算法对二维平面图形的剪裁是通用的:用一凸多边形对另一多边形(凸的或凹的)进行剪裁,算法的输入参数是被剪裁的多边形的一组顶点  $V_1, V_2, \dots, V_n$ , 由此可确定被剪裁多边形的所有边。S-H 算法用剪裁窗口的边(及其延长线)对多边形进行分割,得到由另一组顶点所确定的剪裁后的多边形。在下一循环时,用剪裁窗口的下一条边对前一循环的输出结果进行剪裁。如此反复,直至窗口的所有边都依次处理完毕。

算法从被剪裁多边形的顶点  $V$  开始,按顺序向  $V_1, V_2, \dots$  循环,当循环过程回到顶点  $V$  时结束,剪裁结果存放在一个顶点表中。每一循环过程中检查由当前顶点与下一顶点构成的边与窗口边的关系。在每一循环后,输入的顶点表中将增加 1 个、2 个或 0 个顶点,判断是否增加顶点时,有四种可能的情况,如图 4-19 所示。

图 4-19 多边形剪裁举例

设当前处理的多边形边的起点是  $S$ , 终点是  $P$  ( $S$  已在前次循环中处理)。在图 4-19 (a) 中,被检查的边全部位于窗口之内,将  $P$  点加入顶点表(表 4-2(a))中。在图 4-19(b) 中, $SP$  与窗口边框的交点  $i$  被加入到顶点表中。在图 4-19(c) 中,由于  $SP$  全部位于窗口

之外, 顶点表中不再添加新的顶点, 即剪裁后的多边形中不再包含 P 点。在图 4-19(d) 中, 顶点表中要加入交点 i 和顶点 P。

表 4-2(a) 图 4-19 的顶点表				
(a)	...	S	P	
(b)	...	S	i	
(c)	...			
(d)	...	i	P	

表 4-2(b) 图 4-17(a) 的顶点表				
...	A	C	B	...

S-H 算法在某些情况下有可能引入多余的线段, 如图 4-17(a) 的情况下, 顶点表 4-2(b) 中可能会出现下面的结果: ..., A, C, B, ...。剪裁后有可能引入一不存在的线段 AC, 因此需要有一后处理程序除去此类无关线段。

### 4.6 图形显示的分层处理

在应用数字测图系统显示地形图和对图形进行编辑时, 经常需要区别不同类型的地物, 并分别显示在屏幕上。将显示的图形分成包含不同内容的若干层次, 这种处理方式便于更清楚地观察地貌与地物之间、不同类型地物之间的关系, 可以根据需要生成相关的图形输出。

实现分层显示的基础是不同类型数据的编码。根据编码在 DTM 数据库中检索出所有符合特征的数据, 构成一个显示层。在屏幕上同时显示多层图形时, 只需在区域内重复画出每一层的内容, 不同的物体就会按照各自的位置显示。如果不作特别处理, 在多层显示时, 后显示的内容覆盖在已经显示的图形上面。例如, 在屏幕上绘制包含等高线的地形图时, 将显示内容分为房屋层和等高线层。如果先画出等高线层, 再画房屋层, 由于房屋一般是按闭合(曲)线画出的, 最后的显示结果是在房屋内部有等高线通过。为了消除房屋内的等高线, 可以利用图形消隐显示的处理方法, 先画出房屋层, 将等高线层的内容设为房屋层后面的物体。在用图形消隐方式显示等高线时, 已画有房屋的位置上就不再画出等高线。这种处理方法可以不必进行等高线禁区的专门计算, 生成的等高线与房屋等不影响地形特征的地物无关。当这类地物发生变化时, 不用重新生成等高线。

在计算机显示三维图形时, 用于隐去对观察者不可见的曲线和曲面的技术被称为消隐。常用的消隐算法有深度缓冲区算法、扫描线算法及深度排序算法等。

深度缓冲区(z-buffer) 算法是图形消隐的最简单的算法。它根据被画的点在垂直于显示屏幕的方向(Z 轴方向)上的距离(深度)决定是否画出该点。显示区域的每一个点都有其对应的深度缓冲区, 用于存放该点的深度值。深度缓冲区的初始值被设成  $z_{max}$ , 即最大的深度值, 相当于离观察者最远的距离值。在将图形转换成屏幕上的点时, 对每一点都进行以下的处理:

- 计算被画点的深度值  $z$ 。
- 如果  $z$  小于深度缓冲区中的当前值, 则把深度缓冲区的值改为  $z$ , 并画出新的点;



如果  $z$  大于深度缓冲区中的当前值, 说明被画点被遮挡, 此时不改变深度缓冲区, 即不画出新的点。

深度缓冲区算法一般需要图形硬件的支持, 因为此算法需要更多的存储器。例如, 图形显示器的分辨率是  $1024 \times 768$ , 如果用深度缓冲区方式进行图形消隐, 设每个像素对应的深度缓冲区为 16 位二进制, 则一共需要容量为  $1024 \times 768 \times 16 = 1.5\text{MB}$  的存储器。由于存储器价格的不断下降, 采用深度缓冲区算法可以使程序在很大程度上得到简化, 越来越多的计算机图形系统采用了这种算法。

## 5 数字测图的野外作业

### 5.1 野外数据采集原理

#### 5.1.1 地形点的描述

按测量学定义,测量的基本工作是测定点位,或通过测量水平角、竖直角、距离来确定点位;或直接测定点的直角坐标以确定点位。传统的测图工作均是用仪器测得点的三维坐标,然后由绘图员按坐标(或角度与距离)将点展绘到图纸上,跑尺员根据实际地形向绘图员报告,测的是什么点(如房角点),这个(房角)点应该与哪个(房角)点连接等等,绘图员则当场依据展绘的点位按图式符号将地物(房子)描绘出来。就这样一点一点地测和绘,一幅地形图也就生成了。数字测图是经过计算机软件自动处理(自动识别、自动检索、自动连接、自动调用图式符号等),自动绘出所测的地形图。因此,对地形点必须同时给出点位信息及绘图信息。

综上所述,数字测图中地形点的描述必须具备 3 类信息:

- (1) 测点的三维坐标;
- (2) 测点的属性,即地形点的特征信息,绘图时必须知道该点是什么点:地貌点?地物(房角、消火栓、电线杆……)点?有什么特征等等;
- (3) 测点的连接关系,据此可将相关的点连成一个地物。

前一项是定位信息,后两项则是绘图信息。

测点的点位是用仪器在外业测量中测得的,最终以  $X, Y, Z(H)$  三维坐标表示。测点时要标明点号,点号在测图系统中是唯一的,根据它可以提取点位坐标。

测点的属性是用地形编码表示的,有编码就知道它是什么点,图式符号是什么。反之,外业测量时知道测的是什么点,就可以给出该点的编码并记录下来。

测点的连接信息,是用连接点和连接线型表示的。

野外测量时,知道测的是什么点,是房屋还是道路等,当场记下该测点的编码和连接信息;显示成图时,利用测图系统中的图式符号库,只要知道编码,就可以从库中调出与该编码对应的图式符号成图。也就是说,如果测得点位,又知道该测点应与那个测点相连,还知道它们对应的图式符号,那么,就可以将所测的地形图绘出来了。这一少而精、简而明的测绘系统工作原理,正是由面向目标的系统编码、图式符号、连接信息一一对应的设计原则所实现的。

#### 5.1.2 地形编码

计算机是通过测点的属性信息来识别测点是哪一类特征点,用什么图式符号来表示的,为此,在数字测图系统中必须设计一套完整的地物编码来替代地物的名称和代表相应

的图式符号,以表明测点的属性信息。

地形图的地形要素很多,《1 500 1 1000 1 2000 地形图图式 GB 7929—87》<sup>[38]</sup>已将它们总结归类,并规定出用以表达的图式符号。所公布的地形图图式符号约有410多个,按独立要素约有600余个。对数字测图软件来说,首先考虑到外业的方便,以最少位数的数码来代表点的地形分类属性,以地形图图式作为地形点属性编码的依据是适宜的,因此对每一个地形要素都赋予一个编码,使编码和图式符号一一对应。图5-1为部分编码举例。

图 5-1 编码举例

(1) 地形编码设计应遵循的原则

- 符合国标图式分类,符合地形图绘图规则;
- 简练,便于操作和记忆,比较符合测量员的习惯;
- 便于计算机处理。

(2) 现有系统所采用的地形编码方案

三位整数编码

三位整数是最少位数的地形编码,三位整数足够对全部地形要素进行编码。它主要参考地形图图式符号,对地形要素进行分类、排序编码。

按照《1 500 1 1000 1 2000 地形图图式》,地形要素分为十大类:

- 1) 测量控制点;
- 2) 居民地;
- 3) 工矿企业建筑物和公共设施;
- 4) 独立地物;
- 5) 道路及附属设施;
- 6) 管线及垣栅;
- 7) 水系及附属设施;

- 8) 境界;
- 9) 地貌与土质;
- 10) 植被。

在每一大类中又有许多地形元素,在设计三位整数编码时,第一位为类别号,代表上述大类;第二、三位为顺序号,即地物符号在某大类中的序号。例如,编码 105,1 为大类,即控制点类;05 为图式符号中顺序为 5 的控制点即导线点(参见图 5-1);106 为埋石图根点。又如 201 为居民地类的一般房屋中的混凝土房。每一大类中的符号编码不能多于 99 个。通过统计,符号最多的是第 7 类(水系及附属设施),超过 99,有 130 多个。符号最少的是第一类(控制点),只有 9 个。此外,测图系统中,一些特殊的线、层等也需要设系统编码;一些制作符号的图元及线型(虚线、点划线……)也需要设编码。因此,在实际测图软件的编码系统中,为了用三位编码概括以上需要,在上述十大类的基础上作适当的调整。如在 EPSW 系统中,水系及附属设施的编码就分为两段,由 700~799;再由 850~899。1 类控制点的编码少,就将植被放在 1 类编码中,编码为 120~189,而将绘制符号的图元都放在 0 类。由于以前编码尚无国标,各系统详细的编码需参阅各自测图系统的编码表。

三位整数编码的优点是:

- 1) 编码位数最少,最简单,操作人员易于记忆和输入;
- 2) 按图式符号分类,符合测图人员的习惯;
- 3) 与图式符号一一对应,编码就带有图形信息;
- 4) 计算机可自动识别,自动绘图。

#### 四位整数编码

《地形要素分类与代码 GB 14804—93》<sup>[40]</sup>采用四位整数编码,地形编码制定的原则同前,只是考虑到系统的发展,多留一些编码的冗余,以便编码的扩展。此外,还考虑到与原图式中编号的相似性,原图式的编号就有三位,在一个编号下还要细分几种类型,如图式中烟囱及烟道的编号为 327,此编号下还分三种:A、烟囱,B、烟道,C、架空烟道。若采用三位编码,则按顺序依次编下去,而四位编码则可编为 3271,3272,3273。

由于测图系统的编码早已就绪,且三位比四位终究少一位,因此一些测图系统野外测量的编码仍采用三位整数编码,操作、记忆都方便些。三位和四位在编码的思路和原则上是一致的,所以,在需要统一时,通过转换程序,即可以方便地将三位码转换为四位国标码。

#### 其它编码

在一些测图软件中,还采用了如下的一些编码方案:

- 1) 拼音字母编码,如独立房编码为“DLF”等。由于此法要会拼音,发音不准的容易拼错,同音异义的字容易混淆,重码率也较高,所以这种方案难以推行。
- 2) 五位、六位、七位数字编码,都是各自测图软件中自定义的编码体系。

如五位数字编码规定,前三位为整数,后两位为小数,整数为地物编码,且自定义地物的类别,如把常用的地物分为点、建筑物、圆形物、地面线状地物、地上(高空)线状地物以及独立地物等六大类。二位小数则用来进一步说明地物的方向或流向、楼层等。

又如七位数字编码,前三位为结合图式规定的地物编码,后四位则是将系统绘图要求

等情况考虑进去,第四、五位为同测站上的同类地物的编号,第六、七位为组成一个地物测点的顺序号。野外测量时用此法辨定编码及键入编码都比较麻烦。

七位数据编码定义						
1	2	3	4	5	6	7
地物类别码	同类地物中 顺序编码	同 2	同测站上同类 地物顺序码	同 4	一个地物的 测点顺序码	同 6

采用八位,甚至十一位编码的都有,各种编码都有各自的特点,但其中地物编码一般都是三位,只是将一些不是最基本的、规律的连接及绘图信息都纳入编码,由外业人员键入,这偏离编码设计的原则太远,对键入太多位数的编码,外业测量人员难以接受。

对测量人员,使用编码的主要障碍是难记,但对数字测图及其应用来讲,不论用什么方式、方法,地物编码系统是绝对必要的,编码是计算机自动识别地物的唯一途径。为解决这一矛盾,还采用了“无编码”、“无记忆编码”系统。

“无编码”系统

外业不用编码,通过相应的符号图标或菜单逐级索引,由系统内部转换为编码。这种方法虽然不用记忆编码,但每次都去逐级搜索图标,菜单也太繁琐,此外,对数字测图作业人员来讲,对编码没有概念,也不利于以后的处理。

“无记忆编码”系统

在 EPSW 电子平板测图系统中,将每一个地物编码和它的图式符号及汉字说明都编写在一个图块里,形成一个图式符号编码表(图 5-2),存储在计算机内,只要按一个键,编码表就可以显示出来;用光笔或鼠标点中所要的符号,其编码将自动送入测量记录中,用户无需记忆编码,随时可以查找。实际上,对于一些常用的编码,像导线点 105、图根点 106、一般混凝土房 201 等等,多用几次也就记熟了

数字测图的三位地形编码已被广为应用,但数字地图要为 GIS 服务,GIS 要为各行各业经济、社会管理和规划设计服务,所以,综合考虑测图与建库等方方面面,尤其对 GIS 来讲,三位编码远远不够,也不十分规则,一般需要六位。数字图的编码如何适应 GIS 的要求,如何形成统一的国标,还有待进一步的探讨。

5.1.3 连接信息

连接信息可分解为连接点和连接线型。

当测点是独立地物时,只要用地形编码来表明它的属性,即知道这个地物是什么,应该用什么样的符号来表示。如果测的是一个线状或面状地物,这时需要明确本测点与哪个点相连,以什么线型相连,才能形成一个地物。所谓线型是指直线、曲线或圆弧线等。如图 5-3 所示的大厅,测第 2 点,必须与 1 点以直线相连,3 点须与 2 点直线相连,5 点与 4 点,4 点与 3 点则以圆弧相连(圆弧至少需要测 3 个点才能绘出),5 点与 1 点以直线相连。有了点位、编码,再加上连接信息,就可以正确地绘出房屋大厅(地物)了。

为了便于计算机的自动识别,对线型可作数字代码的规定。在 EPSW 中规定,1 为直

图 5-2 图式符号编码表

线; 2 为曲线; 3 为圆弧; 空为独立点。由于连接线型只有四种, 一般是容易区别和记忆的, 有时圆或曲线不容易分辨, 均可以曲线论, 对绘图影响不大。

综上所述, 对每一个点来说, 获取了描述点的三类信息, 就具备了计算机自动成图的必要条件。

5.1.4 点信息的野外采集

传统的野外测量都是按一定格式的表格来记录测点的信息, 测量人员使用起来很方便, 也不易漏项记错。因此数字测图时, 记录测点的三类信息也采用表格形式记录。碎部点数据项的记录格式如表 5-1。

图 5-3 大厅测点示意

表 5-1 碎部点记录格式

点 号	编码	水平角	竖直角	斜距	觇标高	连接点	连接线型
P	C	H	V	S	T <sub>H</sub>	L <sub>P</sub>	L <sub>T</sub>

EPSW 电子平板在设计界面时, 就考虑到测量人员的习惯和上述记录格式中必要的记录项, 以及编辑及绘图所需的其它记录项, 即有计算机成图的必要和充分条件项, 编写了如图 5-4 所示的极坐标测量记录窗口。当选用极坐标测量时, 弹出此窗口, 称对话框。测点时, 由全站仪自动输入测量数据和键入其它信息, 确保点的各项记录齐全可靠。

在极坐标记录窗口中,

点号: 即点的测量顺序号。第一个点号输入以后, 其后的点号不必再由人工输入。每测一个点, 点号自动累加 1, 一个测区内点号是唯一的, 不能重复。

编码: 顺序测量时同类编码只输一次, 其后的编码由程序自动默认。只有测点编码变换时才键入新的编码。

H, V, S 各项: 由全站仪观测并自动输入。如果用半站仪, 由光学经纬仪观测角度值, 由人工键入。

觐标高: 由人工键入, 输入一次以后, 其余测点的觐标高则由程序自动默认(自动填入原觐标高), 只有觐标高改变了, 才重新键入新觐标高。

连接点: 凡与上一点相连时, 程序在连接点栏自动默认上一点点号。当需要与其它点相连时, 则需键入该连接点的点号。电子平板系统则可在便携机的显示屏上, 用光笔或鼠标捕捉连接点, 其点号将自动填入记录框。

线型: 表明点间(本点与连接点间)的连接线型。可用鼠标单击直线按钮, 改变线型时自动加入线型代码, 直线为 1; 曲线为 2; 圆弧为 3, 三点才能画圆或弧; 独立点则为空。

图 5-4 中其它项都是为完善测图系统而增加的功能项, 如“方向”按钮可随时修正有向线符号的方向等, 这里不再赘述, 将在 EPSW 测图系统中再作介绍。

图 5-4 极坐标对话框

图 5-5 在 A、E 站实测情况

记录连接点的点号有时是比较困难的。有的测图软件是在编码中解决测点顺序连接问题, 如前所述的七位编码方案中后四位就有地物顺序码和测点顺序码。输入的编码正确, 连接关系也就正确。但要去组织每个点并键入七位码, 不仅费事, 而且错误难免, 甚至较多。何况在测量时多数是不能完全按顺序地测完一个地物, 常常是测这个地物几个点, 又转测另一个地物, 随机跑点。此外在换测站或收工时都会产生一些断点。有的点(断点)今天(或这一站)测了, 明天(或下一站)或以后什么时候再测回来与这个点相连, 这时,

谁还能记住这个点的点号呢?用测记法时,只有查看现场绘制的草图上已标注的点号来帮助回忆。

EPSW 在解决连接点信息时考虑两种情况:一种情况是当顺序测点时,下一个测点一定与前一个测点相连,这时在记录连接点处,程序会自动将前一点的点号记录进去;另一种情况是与以前的断点相连,这时可较快地在屏幕显示的图形中查看到要连接的断点,用鼠标或光笔点中该断点,其点号将自动生成并记录到连接点处,操作者完全不用操心。

如图 5-5,野外测量时,在测站 A 测得 1, 2, 3, 4, 5, 6, ...点,在测站 E 测得 36, 37, 38, 39, ...点,每一测点都用极坐标对话框记录。归总起来如表 5-2 所示(省略点位信息),起点都没有连接点,连接线型 1 为直线连接。关于测点信息(包括连接信息)的处理请参阅第 7 章。

表 5-2 测点连接信息文件

点号	编码	连接点	连接线型
1	563		1
2	563	1	1
3	201		1
4	201	3	1
5	201		1
6	201	5	1
36	563	2	1
37	201	4	1
38	201	5	1
39	563	36	1

## 5.2 野外作业的方法与步骤

传统的测图作业步骤是先控制测量后碎部测量、先整体后局部。数字测图当然可以采用同样的作业步骤,但考虑到数字测图的特点,图根控制测量与碎部测量可同步进行,称为“一步测量法”或“一步法”测量。

### 5.2.1 图根控制测量

这里主要介绍 EPSW 中提出并编程实现的“一步测量法”,即在图根导线选点、埋桩以后,图根导线测量和碎部测量同步进行。

在一个测站上,先测导线的数据(角度、边长等),紧接着在该测站进行碎部测量。“一步测量法”也同时满足现场实时成图的需要。

现以附和导线为例加以说明。

图 5-6 中, J, K, Q, T 为已知点, m, n, o, p 为图根点, 1, 2, 3, ...为碎部点, 其作业步骤为:



(1) 全站仪安置于 K 点(坐标已知), 后视 J 点, 前视 m 点, 测得水平角  $\beta_K$  及前视天顶距、斜距和觇标高。由 K 点坐标即可算得 m 点的坐标( $x_m, y_m, z_m$ )。

(2) 仪器不动, 后视 J 点作为零方向, 施测 K 测站周围的碎部点 1, 2, 3, ..., 并根据 K 点坐标, 算得各碎部点的坐标。根据碎部点的坐标、编码及连接信息, 显示屏上实时展绘碎部点并连接成图。

(3) 仪器搬至 m 点, 此测站点坐标已知( $x_m, y_m, z_m$ ), 后视 K 点, 测得水平角及前视天顶距、斜距和觇标高, 可算得 n 点坐标( $x_n, y_n, z_n$ )。紧接着后视 K 点作为零方向, 进行本站的碎部测量, 如施测碎部点 8, 9, 10, ..., 并根据 m 点的坐标, 算得各碎部点坐标, 实时展绘碎部点成图。同理, 依次测得各导线点和碎部点坐标。“一步测量法”的步骤归结为: 先在已知坐标的控制点上设测站, 在该测站上先测出下一导线点(图根点)的坐标, 然后再施测本测站的碎部点坐标, 并可实时展点绘图。搬到下一测站, 其坐标已知, 测出下一导线点的坐标, 再测本站碎部点.....。

图 5-6 一步测量法示图

(4) 待导线测到 p 测站, 可测得 Q 点坐标, 记作 Q 点。Q 坐标与 Q 点已知坐标之差, 即为该附和导线的闭合差。若闭合差在限差范围之内, 则可平差计算出各导线点的坐标。为提高测图精度, 可根据平差后的坐标值, 重新计算各碎部点的坐标, 称碎部坐标重算(EPSW 备有坐标重算功能), 然后再显示成图。若闭合差超限, 则想办法查找出导线错误之处, 返工重测, 直至闭合为止。但这个返工工作量仅限于图根点的返工, 而碎部点原始测量的数据仍可利用, 闭合后, 重算碎部即可。

“一步测量法”对图根控制测量少设一次站, 少跑一遍路, 提高外业效率是明显的, 但它只适合于数字测图。白纸测图时, 必须先计算出图根控制点坐标, 并展绘到图纸上。因为在现场, 要根据它才能展绘碎部点成图。如果导线点位置错了, 本站所展的碎部点图就全部错了。一旦画错, 要全部擦除, 甚至返工重测, 这个工作量太大。数字测图则不然, 导线闭合差超限, 只需重测导线错误处, 且全站仪数字测图出错的可能性很小, 因而在数字测图中采用“一步测量法”是合适的。

在 EPSW 电子平板测图系统中编有“一步测量法”测量程序。在测定导线后, 可自动提取各条导线测量数据, 进行导线平差, 而后可按新坐标对碎部点进行坐标重算。

5.2.2 碎部测量

无论是“一步测量法”, 还是先控制测量后碎部测量, 在进行碎部测量时, 图根控制点及其坐标都是已知的, 且存入坐标数据库(文件)中, 这是现场实时成图的必要条件。

(1) 碎部测量的步骤

测站设置与检核

测站设置即安置好仪器后记录测站信息,有了这一步才能实时计算出碎部点的坐标。EPSW 中测站设置的对话框如图 5-7 所示,要输入测站点号、后视点号以及安置的仪器高度。根据点号即可提取测站和后视点的坐标,并可反算得到后视方向的方位角。为确保设站无误,可选择检核点,不通过检核则不能继续测量。

碎部点的采集

地面数字测图通常采用极坐标法进行碎部测量,并记录全部测点信息,如图 5-8(a)所示;图 5-8(b)是测点以坐标模式输入的对话框;图 5-8(c)为视距法对话框。如遇特殊情况,则可选用软件所提供的其它碎部点测量方法施测。记录点的全部信息后,程序自动计算出碎部点坐标,并可实时展点显示、成图。对 EPSW 电子平板系统来讲,现场成图工作自动完成,真正做到内外业一体化。外业实时成图的主要优点在于进行现场检查与修改,保证数字图的正确性。内业仅做一些整饰修改后,即可输出绘图。

图 5-7 测站设置对话框

(a) (b) (c)

图 5-8 对话框

(2) 碎部测量方法举例

下面列举 EPSW 中常用的几种点位测量方法和坐标计算公式。

极坐标法(图 5-9)

已知:  $P_1(x_1, y_1, z_1)$ ,  $P_2(x_2, y_2, z_2)$ ;

待求: P<sub>Q</sub> 点的坐标(x<sub>Q</sub>, y<sub>Q</sub>, z<sub>Q</sub>);

测法: 测站在 P<sub>1</sub> 点后视 P<sub>2</sub>, 后视方向方位角为 H<sub>0</sub>, 量得仪器高为 H<sub>i</sub>;

测得 P<sub>Q</sub> 点的水平角 H、天顶距 Z 和斜距 S 及觇标高 T<sub>h</sub>。

算法:

图 5-9 极坐标法

$$\begin{aligned}x_Q &= x_1 + S \sin Z \cos(H_0 + H) \\y_Q &= y_1 + S \sin Z \sin(H_0 + H) \\z_Q &= z_1 + S \cos Z + H_i - T_h\end{aligned}$$

视距法

当使用经纬仪施测时, 采用极坐标法测量的数据项与全站仪不同, 同时数据要由人工键入。图 5-8(c) 为视距测量对话框, 其中

水平角: H

竖直角: V

视距切尺读数: M

中丝读数: T<sub>h</sub>

为已知。

算法:

水平距离

$$\begin{aligned}D &= 100 \frac{M}{N} \cos^2 V \\x_Q &= x_1 + D \cos(H_0 + H) \\y_Q &= y_1 + D \sin(H_0 + H) \\z_Q &= z_1 + D \operatorname{ctg} V + H_i - T_h\end{aligned}$$

延长量边法(图 5-10)

图 5-10 延长量边

已知: 起始点 P<sub>1</sub>, 方向点 P<sub>2</sub>;

测法: 丈量边长 D;

待求: P<sub>Q</sub> 点坐标。

算法:

延长系数

$$\begin{aligned}r &= \frac{D}{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \\x_Q &= x_2 + r(x_2 - x_1)\end{aligned}$$

$$y_Q = y_2 + r(y_2 - y_1)$$

注意: 自 P<sub>1</sub> 开始, 沿 P<sub>1</sub> - P<sub>2</sub> 方向, 距离 D 为正, 反之为负; 高程无效。

垂直量边法(图 5-11)

- 已知: 起点 P<sub>1</sub>, 止点 P<sub>2</sub>;
- 测法: 量得过 P<sub>2</sub> 的垂直距离 D;
- 待求: P<sub>Q</sub> 点坐标。
- 算法:

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$$

$$r = D/d$$

$$x_Q = x_2 + r(y_2 - y_1)$$

$$y_Q = y_2 + r(x_2 - x_1)$$

注意: 自 P<sub>2</sub> 开始, 沿 P<sub>1</sub> - P<sub>2</sub> 方向, 右转 90° D 为正, 左转 90° D 为负; 高程无效。

图 5-11 垂直量边

图 5-12 垂足法量边

垂足法(图 5-12)

- 已知: 起点 P<sub>1</sub>, 止点 P<sub>2</sub>, 参考点 P<sub>3</sub>;
- 待求: 垂足点 P<sub>Q</sub> 的坐标。
- 算法:

垂距

$$D = [x_1(y_2 - y_3) - x_2(y_1 - y_3) + x_3(y_1 - y_2)]/d$$

$$x_Q = x_3 + D(y_2 - y_1)/d$$

$$y_Q = y_3 + D(x_1 - x_2)/d$$

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$$

注意: 高程无效。

直线方向交会

如图 5-13 所示。待测点 P<sub>Q</sub> 落在两点已知的直线上, 只要测得 P<sub>Q</sub> 的方位, 便可算出其坐标。

- 已知: 起点 P<sub>1</sub>, 止点 P<sub>2</sub>; 测站点 P<sub>3</sub>, 后视点 P<sub>4</sub>;
- 测法: 在测站 P<sub>3</sub> 测得水平角 H;
- 待求: P<sub>Q</sub> 点坐标。

图 5-13 直线方向交会

算法:

$$t = \text{tg}(H_0 + H)$$
$$x_Q = \frac{(x_2 - x_1)(y_3 - y_1 - x_3 t) + (y_2 - y_1)x_1}{y_2 - y_1 - (x_2 - x_1)t}$$
$$y_Q = \frac{(y_2 - y_1)((x_3 - x_1)t - y_3) + (x_2 - x_1)y_1 t}{(x_2 - x_1)t - (y_2 - y_1)}$$

注意: 高程无效; 防止平行方向。

直线距离交会

如图 5-14(a) 所示, 求直线  $P_1P_2$  与距离  $S$  的交会点  $P_Q$ 。即待测点  $P_Q$  落在两已知点的直线上, 只要量得  $P_Q$  到另一已知点的距离, 便可算出  $P_Q$  的坐标。

已知: 起点  $P_1$ , 止点  $P_2$ , 参考点  $P_3$ ;

测法: 丈量距离  $S$ ;

待求:  $P_Q$  点坐标。

算法:

$P_1P_2$ 距离	$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$
垂距	$D = \frac{(x_1 - x_3)(y_2 - y_1) + (x_2 - x_1)(y_3 - y_1)}{d}$
	$\sin = \frac{D}{S}$
$P_QP_3$ 方位角	$B = \alpha_{12} +$ $x_Q = x_3 - S \cos(B)$ $y_Q = y_3 - S \sin(B)$

注意: 自  $P_3$  到待测点  $P_Q$  方向与  $P_1, P_2$  方向成锐角时,  $S$  为正, 否则为负(如图 5-14(b)); 高程无效。

两直线求交(图 5-15)

已知: 两直线的四点  $P_1, P_2, P_3, P_4$ ;

待求: 两线交点  $P_Q$  坐标。

算法:

图 5-14

$$\begin{aligned}c_1 &= (x_2 - x_1)y_1 - (y_2 - y_1)x_1 \\c_2 &= (x_4 - x_3)y_3 - (y_4 - y_3)x_3 \\k &= (y_2 - y_1)(x_3 - x_4) - (y_4 - y_3)(x_1 - x_2) \\x_Q &= \frac{1}{K}[(x_1 - x_2)c_2 - (x_3 - x_4)c_1] \\y_Q &= \frac{1}{K}[(y_4 - y_3)c_1 - (y_2 - y_1)c_2]\end{aligned}$$

注意:  $P_1 - P_2$  与  $P_3 - P_4$  相交; 高程无效。

图 5-15 两直线求交

图 5-16 平行线交会

平行线交会

如图 5-16 所示。待测点为两已知线的平行线的交点  $P_Q$ , 只要分别量得平行线间的距离  $D_1, D_2$ , 即可求解  $P_Q$  的坐标。

已知: 两已知线的四点  $P_1, P_2, P_3, P_4$ ;

测法: 平行线间距  $D_1, D_2$ ;

待求:  $P_Q$  坐标。

算法: 先平移直线, 再使用直线交点算法。

$P_1P_2$  距离

$d_1 = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$

$$P_3P_4 \text{ 距离 } d_2 = \sqrt{(x_4 - x_3)^2 + (y_4 - y_3)^2}$$

$$x_Q = \frac{(x_2 - x_1)(d_2D_2 + x_3y_4 - x_4y_3) - (x_4 - x_3)(d_1D_1 + x_1y_2 - x_2y_1)}{(x_2 - x_1)(y_4 - y_3) - (x_4 - x_3)(y_2 - y_1)}$$

$$y_Q = \frac{(y_2 - y_1)(d_2D_2 + x_3y_4 - x_4y_3) - (y_4 - y_3)(d_1D_1 + x_1y_2 - x_2y_1)}{(x_2 - x_1)(y_4 - y_3) - (x_4 - x_3)(y_2 - y_1)}$$

注意: 距离  $D_1, D_2$  的符号同垂直量边, 右正左负; 高程无效。

0, 垂线交会

如图 5-17, 两条相交线的垂线的交点为  $P_Q$ 。

已知: 两直线  $P_1, P_2, P_4, P_5$ ; 垂足点  $P_3, P_6$ ;

待求: 交点  $P_Q$  坐标。

算法: 使用垂直量边算法, 先设定任意垂线的边长, 求出两条垂线, 再使用直线交点的算法。

$$k_1 = (x_2 - x_1)/(y_2 - y_1)$$

$$k_2 = (x_5 - x_4)/(y_5 - y_4)$$

$$x_Q = [k_2x_3 - k_1x_6 + k_1k_2(y_3 - y_6)]/(k_2 - k_1)$$

$$y_Q = (x_6 - k_2y_6 - x_3 + k_1y_3)/(k_2 - k_1)$$

注意: 高程无效。

图 5-17 垂线交会

图 5-18 两点前方交会

? 两点前方交会(图 5-18)

已知: 测站点  $P_1, P_2$ ;

测法: 测得水平角  $H_1, H_2$ ;

待求: 交会点  $P_Q$  坐标。

算法:

$$x_Q = \frac{x_1\text{ctg}H_2 + x_2\text{ctg}H_1 + (y_2 - y_1)}{\text{ctg}H_1 + \text{ctg}H_2}$$

$$y_Q = \frac{y_1 \operatorname{ctg} H_2 + y_2 \operatorname{ctg} H_1 - (x_2 - x_1)}{\operatorname{ctg} H_1 + \operatorname{ctg} H_2}$$

注意: P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub> 及 P<sub>Q</sub> 编号按逆时针排列; 高程无效。

? 后方交会(图 5-19)

已知: P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, P<sub>3</sub>;

测法: 测得水平角 H<sub>1</sub>, H<sub>2</sub>;

待求: P<sub>Q</sub> 点坐标。

算法:

$$a = x_1 - x_2 + \frac{y_1 - y_2}{\operatorname{tg} H_1}$$

$$b = y_2 - y_1 + \frac{x_1 - x_2}{\operatorname{tg} H_1}$$

$$c = x_2 - x_3 - \frac{y_2 - y_3}{\operatorname{tg} H_2}$$

$$d = y_3 - y_2 - \frac{x_2 - x_3}{\operatorname{tg} H_2}$$

$$k = (a + c) / (b + d)$$

$$x_Q = x_2 + \frac{a - kb}{1 + k^2}$$

$$y_Q = y_2 + k \frac{a - kb}{1 + k^2}$$

注意: P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, P<sub>3</sub> 及 P<sub>Q</sub> 点号按顺时针排列; 高程无效。

图 5-19 后方交会

图 5-20 距离交会

? 距离交会(图 5-20)

已知: P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub> 点坐标;

测法: 丈量长度 S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>;

待求: 交会点 P<sub>Q</sub> 坐标。

算法:

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$$



$$a = (x_2 - x_1) / d$$

$$b = (y_2 - y_1) / d$$

$$r = \frac{d^2 + S_1^2 - S_2^2}{2d}$$

$$D = \sqrt{d_1^2 - r^2}$$

$$x_Q = x_1 + ra - hb$$

$$y_Q = y_1 + rb + ha$$

注意:  $P_1$ ,  $P_2$  及  $P_Q$  点按顺时针排列; 高程无效。

还有许多碎部测量方法都可以编写在测图软件中, 测量后立即解算出坐标, 如使用电子平板则可实时展点绘图。

### 5.2.3 外业作业人员的组织

外业作业是对数字测图而言, 着重指碎部测量及其人员的组织。

(1) 测记法施测时, 作业人员一般配置为: 观测员 1 人, 记录员 1 人, 草图员 1 人, 跑尺员 1 人~2 人(依测量作业熟练情况而定)。

(2) 电子平板法施测时, 作业人员一般配置为: 观测员 1 人, 电子平板(便携机)操作人员 1 人(记录与成图), 跑尺员 1 人~2 人。

特殊情况下, 外业作业组最少人员配置为 2 人: 一个观测员, 还负责操作便携机; 一个跑尺员。只要便携机配置的测图软件所提供的操作十分方便(人称“傻瓜”软件), 而且作业人员对它的操作又很熟悉, 这个方案是可以实现的。

用电子平板测图, 从人员组织到各种测量方法的自动解算和现场自动成图, 真正做到内外业一体化, 测图的质量和效率都将超过传统的人工白纸测图。

## 5.3 外业数据记录与数据文件格式

数字测图的外业测量数据记录, 是由电子手簿或电子平板通过所配置的软件来实现的。外业数据文件通常都采用可读的文本格式, 以便检查和交换。文件中表达信息的最小单位是数据项; 若干数据项组合到一起, 描述某一测量要素(如测站或测点), 称作记录。一个记录通常对应于文件的一行。外业数据文件中通常有若干不同作用的记录, 用相应的标志加以区分, 称为记录类型标志。记录中含有的那些数据项、各数据项的名称、在记录中的位置、长度、数据类型等称为记录的结构。记录的结构和长度可以固定, 便于阅读和存取; 也可以不固定, 减少不必要的数据存储空间。要求外业数据采集软件必须能够完整地记录成图信息。

下面列举 PC-E500, GRE3/4 和 EPSW 几种外业记录格式及原始记录的数据文件并加以说明。

### 5.3.1 PC-E500 的 EDR 采集软件的记录与数据文件格式

PC-E500 袖珍计算机是目前应用最广泛的一种电子手簿, 一些测记法测图软件也多

使用它。根据各自测图软件的需要, 在 PC-E500 中安装了配套的采集软件。下面仅以 CAMAP 的 EDR 采集软件为例予以简要说明。

EDR 采集软件中规定了 6 种记录, 分别存储了管理信息、测站信息、后视信息、前视信息、碎部信息、注释信息。各种记录项的长度都是固定的, 如表 5-3 所示。表中的后视信息、前视信息是供图根导线测量用的, 后视信息也供碎部测量用。

表 5-3 EDR 采集软件文件格式

类型	1	2	3	4	5	6
记录名	管理信息	测站信息	碎部信息	注释信息	后视信息	前视信息
第 1 项	观测者	测站号	点号	注释	点号	点号
第 2 项	记录者	编码	编码		编码	编码
第 3 项	测区号	仪器高	水平角		水平方向	水平角
第 4 项	日期		竖直角			竖直角
第 5 项	时间	温度	斜距			斜距
第 6 项	仪器号	气压	觇标高			觇标高
第 7 项		天气	连接点			
第 8 项			线型			
合计	6 项	6 项	8 项	1 项	3 项	6 项

观测数据文件举例:

1XBT	CH	100084	19930501	0930	KERN01	
21	107	1.48				
32	107	0.0000				
33	203	41.5616	87.4426	16.913	1.6	
34	203	50.2950	87.2524	14.596	1.6	
35	203	48.1506	87.1818	13.981	1.6	1
36	227	54.2824	87.5254	13.847	1.6	
37	227	14.3858	87.3410	8.567	1.6	1
38	203	13.0124	86.1254	9.827	1.6	
39	203	9.5808	87.1016	12.997	1.6	
310	203	13.3606	87.1046	13.136	1.6	3 1
311	202	9.5808	87.1016	12.997	1.6	
4 THIS IS AN EXAMPLE						

现对观测数据文件的举例作简要说明:

(1) 第一行为管理信息, 对一项工程只用一次。其中第一个字符“ 1 ”为记录类型标志 (下同, 第一列即为记录类型标志)。其后 XBT 为观测者, CH 为记录者, 100084 为测区号, 19930501 为日期, 0930 为时间, KERN01 为仪器号。这些数据项的写法用户可以自行

规定。

(2) 第二行为测站信息, 记录类型标志为 2, 测站号为 1, 编码为 107, 仪器高为 1.48m。

(3) 第三行记录类型标志为 3 的是碎部信息, 其中测站信息后的第一条记录为零方向点(后视点), 点号为 2, 水平角读数为 0.0000, 其它各项无意义; 第一个碎部点点号为 3, 水平角为 41.5616(41°56'16"), 天顶距为 87.4426(87°44'26"), 斜距为 16.913m, 棱镜高为 1.6m, 无连接点与线型。碎部点 5 中给出了线型 1, 表示 5 前的点 3, 4, 5 按顺序以直线相连。同理, 8, 9, 10 也是按顺序以直线相连。碎部点 10 的记录中有连接点 3, 表示点 10 要与 3 点相连。关于连接信息还可参阅第 7 章。

(4) 最后一行记录类型标志为 4, 是注释行。

5.3.2 GRE 3/4 的数据文件格式

表 5-4 GRE 3/4 字索引

WI	名称	含义	WI	名称	含义
11	PtNr	点号(测量块)	58	mm	加常数
12	FNr	出厂编号	59	ppm	比例改正数
13	Typ	仪器型号	71	REM1	注记 1
21	Hz	水平角	72	REM2	注记 2
22	V	垂直角	73	REM3	注记 3
31	/	斜距	74	REM4	注记 4
32	—	平距	75	REM5	注记 5
33	◎	高差	76	REM6	注记 6
41	Code	编码号(代码块)	77	REM7	注记 7
42	Inf1	信息 1	78	REM8	注记 8
43	Inf2	信息 2	79	REM9	注记 9
44	Inf3	信息 3	81	E	目标东坐标
45	Inf4	信息 4	82	N	目标北坐标
46	Inf5	信息 5	83	H	目标高
47	Inf6	信息 6	84	E <sub>0</sub>	测站东坐标
48	Inf7	信息 7	85	N <sub>0</sub>	测站北坐标
49	Inf8	信息 8	86	H <sub>0</sub>	测站高
51	PPMM	ppm/mm	87	hr	反光镜高
52	n/	测量数/均方差	88	hi	仪器高

(1) GRE 3/4 是威特(Wild)全站型电子速测仪配套的电子手簿。它把记录称作块, 把

数据项称作“字”。每个“字”可以存放 8 个字符,并且用一个“字索引”说明其类型。GRE 3/4 中有两种“块”:代码块和测量块。代码块中可以有一个“代码号”字和 4 个“信息字”(GRE3)或 8 个“信息字”(GRE4),可以存放各种注释信息。测量块的格式可以用GRE3/4 记录手簿设定,如设定在 HVS 方式下测量块中依次存放点号、水平角、竖直角、斜距和棱镜高,在 XYZ 方式下依次存放 N(X),E(Y),H(Z)。代码块必须以“代码号”字开始,测量块必须以“点号”字开始。各种常用的“字索引”(WI)见表 5-4。

(2) 观测数据文件举例

pos.	1	7	15	23	31	47	55	63	71	79
110001+	00142501	21. 102+	32129400	22. 102+	09900500	31.. 00+	00128091	51. ... +	0000+	000
110002+	00142502	21. 102+	01026200	22. 102+	08920200	31.. 00+	00009040	51. ... +	0000+	000
110003+	00142503	21. 102+	00012900	22. 102+	09156200	31.. 00+	00230536	51. ... +	0000+	000
410004+	00000005									
410005+	00000071	42. ... +	00724537							
410006+	00000010	42. ... -	00000120	43. ... +	00000005	44. ... +	00001750	45. ... +	00000009	

其中的 pos. 1, 7, 15, ..., 79 表示字符的位置,是本书为了说明问题外加的,表示字符位置的序号。根据字符索引的规定,每行的第一、二位为数据类型字,11 为测量块代码,第 3~6 位为每个记录行的行号;对测量块而言,第 7~15 位为测点点号,后面的数据为观测值,21, 22, 31, 51 均为数据类型代码(见表 5-4),第 23~31 位为水平角,第 39~47 位为竖直角,第 55~63 位为斜距,第 71~79 位为乘常数和加常数。对代码块而言,第 1, 2 位为 41,是编码块的代码,第 7~15 位为编码块的具体编码,如编码 5, 71, 10 等,第 23~31 位为信息 1,第 39~47 为信息 2,第 55~63 位为信息 3,第 71~79 位为信息 4。此外各地物编码及各信息字的内容都可由用户自定义。

如果采用 XYZ 方式,观测数据格式类似,但测量块中的代码 21, 22, 23 分别换成了 81, 82, 83,对应的观测值也换成了 E(Y),N(X),H(Z)。

5.3.3 EPSW 的 FLD 文件格式

EPSW 的.FLD 文件详细记录了系统运行中每一步操作和相关数据,以便复查和纠正错误,并且每一条记录都及时存入硬盘,以确保记录不被丢失(除非硬盘坏了)。

.FLD 原始记录格式作如下基本规定:

- (1) 每一行为一条记录,每条记录以记录类型标志开始,即每行前两位为标识位;
- (2) 标识位首位“0”为增加;“1”为修改;“2”为删除;
- (3) 数据项之间以冒号(:)隔开;
- (4) 在规定的数据项之后留有扩展的接口,可以扩充更多的项;

(5) .FLD 文件记录的是测量对话框界面中的内容。  
FLD 文件举例见表 5-5。

表 5-5 FLD 文件

0S: 1: 1. 50: 2:
00: 200: : 200: 45. 4534: 89. 3412: 33. 15: 1. 50: 1: 1: 1: 0: : : :
00: 201: 200: 200: 42. 1009: 89. 0012: 37. 0211: 1. 50: 1: 1: 1: 0: : : :
00: 202: 201: 200: 42. 1324: 89. 1200: 37. 3243: 1. 50: 1: 1: 1: 1: : : :
02: : : 201: 203: 202: 0: 4:
02: : : 200: 200: 201: 1: 6:
00: 208: : 548: 125. 3535: 87. 4332: 48. 445: 1. 50: 1: 1: 1: 0: : : :
00: 209: : 548: 147. 3453: 87. 2322: 89. 1313: 1. 50: 1: 1: 1: 1: : : :
2E: 200: 201: 200:
2E: 201: 202: 200:
2E: 206: 207: 200:
0A: 548: 200: 201: 202:
0A: 638: 201: 202: 203:
0A: 547: 204: 205: 206:
00: 210: : 563: 176. 4431: 89. 2543: 102. 231: 1. 50: 1: 1: 1: 0: : : :
2F: 200:
0!

表中第 1, 2 列皆为标识位(符), 供计算机识别此条记录是哪一类操作, 从而可以按规定的格式识别其后的数据。如

第 1 行, 0S 为测站的标识符, 测站记录格式规定为:

测站号: 仪器高: 后视点号:

根据格式规定, 可识别上述记录中测站号为 1, 仪器高为 1. 5m, 后视点号为 2。

第 2 行, 00 为极坐标法标识符, 极坐标法的记录格式规定为:

点号: 连接点: 编码: 水平角: 竖直角: 斜距: 觇标高: 线型方向: 高程: 高程注记: 地物号:

按此记录顺序可阅读第 2 行记录, 其中连接点一项无, 此处两个冒号(:)之间无数据。

第 5 行~ 6 行, 02 为二点房的标识符, 规定记录格式为:

待定点: 连接点: 从点: 到点: 方向: 距离:

第 9 行, 2E 为删线的标识符, 记录格式规定为:

从点: 到点: 编码:

第 12~ 14 行, 0A 为三点弧的标识符, 记录格式规定为:

编码: 前点: 中点: 末点:

第 16 行, 2F 为删点的标识符, 记录格式为:

点号:

由上可见, FLD 文件中记录了全部操作结果, 包括测量数据及增、删等操作数据, 因此可认为, FLD 是最重要的原始数据文件。

## 6 地形图的数字化

传统的地形图是空间信息的直观描述,是运用坐标位置、符号和注记,以图解的形式表达地面的形状大小与高低起伏。图解图形必须转换成数字信息,才能被计算机所接受、处理。为充分利用现有的大比例尺地形图,必须采用地形图数字化的方法,将纸上地形图转换为数字地形图(数字地形信息),这主要由数字化仪来完成。数字化仪分两大类:图形数字化仪(以下称数字化仪)和图像扫描数字化仪(以下称扫描仪)。本章着重阐述地形图的数字化仪数字化。数字化仪就是将图解图形信息转换成数字信息并可直接传输到计算机的一种设备(其简单工作原理参见 2.2 节),是以矢量方式从图纸上获取数据的主要工具;数字化是机助制图系统和建立地理信息系统(GIS)数据采集的主要方法之一。

### 6.1 数字化仪的工作性能

#### 6.1.1 数字化仪的工作方式

数字化仪常用的方法是手扶跟踪数字化。一般有 5 种工作方式(也称操作方式):

(1) 点式。按一下定标器(鼠标)的一个键,即将定标器上的十字丝交点在数字化板上的位置(以  $x, y$  坐标的形式)送入计算机。

(2) 开关流式。按住鼠标的一个键不放,并移动鼠标,它在图板上移动的轨迹,将以  $x, y$  坐标串的形式连续送入计算机,其速率可分别设置为 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100 点/s, 放松按键,鼠标便停止工作。

(3) 连续式。当送入连续式指令,从鼠标接触数字化板就开始计数,即将游标在数字化板上的位置,以  $x, y$  坐标串的形式连续送入主机,其速率与开关流式一样,也分 7 个档次,当鼠标离开数字化板时停止工作。这种方式省去了开关流式按键的动作,但要求有较高的操作技巧。

(4) 步进式。当鼠标在数字化板上移动时,数字化仪按一定的距离间隔向计算机输入  $x, y$  坐标串,距离间隔可在 0.025mm ~ 2.54mm 之间选择。

(5) 增量式。送入任何一条增量式指令后,便将鼠标在数字化板上的位置,以当前位置相对于上一点位置的坐标增量形式送入计算机,其速率跟连续式一样,分为 7 个档。数字化仪在增量式输出的是相对上一点的坐标增量,而在连续式输出的是相对数字化原点的坐标。

#### 6.1.2 数字化仪的性能指标

一般常用数字化仪的有效工作幅面有 A0 ~ A4 几种规格(参见表 2-1),可方便地用于各种图幅的地图数字化。

数字化仪的分辨率(能识别的最小间距)有两种单位:毫米(mm)和英寸(in),通常分辨率能达到 0.1mm(10 线/mm)~0.01mm(100 线/mm),0.01in(100 线/in)~0.001in(1000 线/in)。

数字化仪的波特率(异步通信的数据传送速度)有 1200, 2400, 4800, 9600, 19200b/s, 常用的为 9600b/s。

数字化仪发送数据的输出格式,一般有 ASCII 码和二进制码两种,具体的数据输出格式可根据需要自行设置。数字化仪的输出速度一般为 10 对/s~100 对/s。

奇偶检校及数据位:数据位一般为 7 位或 8 位,检校位为 1 位。奇偶检校有 5 种配置:7 位偶检校、7 位奇检校、8 位无检校、8 位偶检校、8 位奇检校。

常用的定标器有 3 种:4 按键、8 按键和 16 按键。16 按键定标器按 0~9, A~F 编号。

6.1.3 数字化仪与计算机的连接

数字化仪具有 RS-232C 标准串行接口,用一根串行线把数字化仪的串行接口和计算机的串行接口连接,即可实现数字化仪和计算机的数据通信。

各厂家随数字化仪将提供给用户一个检测程序,用以测试数字化仪的各种工作状态正常与否,以及根据用户驱动数字化仪软件的要求设置各种参数,这些参数包括串口号、波特率、校验方式、数据格式、数据位、工作方式、分辨率、原点位置及鼠标按键类型等。参数设置好以后,便可运行数字化仪的软件来进行数字化工作,《EPSW 电子平板测图系统》软件,可以方便地与多种数字化仪通信,进行数字化工作。

- 该软件实现通信的方法:
- (1) 打开指定的串口,设置接收数据缓冲区大小;
  - (2) 设置通信参数,包括波特率、数据格式、校验方式、工作方式、分辨率等等;
  - (3) 设定响应事件标志,如通信中断、出错或接收到数据时,可转入相应的处理程序;
  - (4) 定义串口事件处理程序,根据事件中相应的标志,确定串口产生了何种类型事件,若接收到数据,则按一定格式从中取出各种信息,然后分别进行相应的处理。

图 6-1 串口通信模块程序流程

6.2 图纸定位

当使用数字化仪对地图进行数据转换时,数字化仪所发送的坐标数据是数字化仪坐



标系的坐标,与地图坐标系不一致,因此必须把数字化仪坐标系的坐标数据转换成地图坐标系的坐标数据。图纸定位就是求出两个坐标系之间的转换参数,同时还要能有效地克服图纸的变形误差,以提高数字化的精度,因此变换模型的选择很重要。

### 6.2.1 线性正形变换

如图 6-2 所示,设 XOY 为地图坐标系, xoy 为数字化仪坐标系,两坐标系的坐标轴之间的夹角为  $\alpha$ 。地图西南角图廓点 O 的地图坐标为  $X_0$  和  $Y_0$ ,数字化仪坐标为  $x_0, y_0$ ,即 O 点相对于 xoy 坐标原点 o 的平移距离为  $x_0, y_0$ 。

图 6-2 坐标变换

对于任一已知点 P 的地图坐标(X, Y)和数字化仪坐标(x, y)进行线性正形变换的数学模型为

$$\begin{aligned} X - X_0 &= (x - x_0) \cos \alpha + (y - y_0) \sin \alpha \\ Y - Y_0 &= (x_0 - x) \sin \alpha + (y - y_0) \cos \alpha \end{aligned} \tag{6-1}$$

令

$$a = \cos \alpha \quad b = \sin \alpha$$

则

$$\begin{aligned} X &= a(x - x_0) + b(y - y_0) + X_0 \\ Y &= b(x_0 - x) + a(y - y_0) + Y_0 \end{aligned}$$

令

$$\begin{aligned} Q_x &= - (ax_0 + by_0) + X_0 \\ Q_y &= bx_0 - ay_0 + Y_0 \end{aligned}$$

则

$$\begin{aligned} X &= ax + by + Q_x \\ Y &= - bx + ay + Q_y \end{aligned} \tag{6-2}$$

式中  $k$  ——长度比;

$Q_x, Q_y, a, b$ ——待定转换系数。

当有 n 个已知点时,对于每个已知点都可列出一对误差方程式,即

$$\begin{aligned} v_{xi} &= ax_i + by_i + Q_x - X_i \\ v_{yi} &= - bx_i + ay_i + Q_y - Y_i \\ (i &= 1, 2, 3, \dots, n) \end{aligned} \tag{6-3}$$

按间接平差原理算法方程式系数,则法方程式为

$$\begin{aligned} nQ_x + [x]a + [y]b - [X] &= 0 \\ nQ_y + [y]a - [x]b - [Y] &= 0 \\ [x]Q_x + [y]Q_y + [x^2 + y^2]a - [xX + yY] &= 0 \end{aligned}$$

$$[y]Q_x + [x]Q_y + [x^2 + y^2]b - [yX - xY] = 0$$

由此可得

$$\begin{aligned} Q_x &= \frac{1}{n}([X] - [x]a - [y]b) \\ Q_y &= \frac{1}{n}([Y] - [y]a + [x]b) \\ a &= \frac{n[xX + yY] - [x][X] - [y][Y]}{n[x^2 + y^2] - [x]^2 - [y]^2} \\ b &= \frac{n[yX + xY] - [y][X] - [x][Y]}{n[x^2 + y^2] - [x]^2 - [y]^2} \end{aligned} \quad (6-4)$$

令

$$\begin{aligned} x_m &= [x]/n & y_m &= [y]/n \\ x &= x - x_m & y &= y - y_m \\ X_m &= [X]/n & Y_m &= [Y]/n \\ X &= X - X_m & Y &= Y - Y_m \end{aligned}$$

则

$$\begin{aligned} a &= \frac{[xX + yY]}{[x^2 + y^2]} \\ b &= \frac{[yX - xY]}{[x^2 + y^2]} \\ Q_x &= X_m - x_ma - y_mb \\ Q_y &= Y_m - y_ma + x_mb \end{aligned} \quad (6-5)$$

$$m = \pm \frac{[vv]}{2n - t} \quad (6-6)$$

式中  $[vv] = (vv)$ 。

如取 4 个定位点, 则  $n=4, t=4$ 。

由公式(6-5)可计算出 4 个定向系数  $a, b, Q_x, Q_y$ 。根据式(6-3)及式(6-6), 可求出定位中误差  $m$ 。中误差在允许范围内, 则确认此 4 个定向系数; 若超限, 则需重新进行图纸定位。

图纸定位、计算出定向系数后, 即可开始对地图要素逐点进行数字化, 此时所获取的坐标值, 则是由软件按式(6-2)自动计算出的地图坐标。

地图定位按已知点的类别可分为图廓点定位和控制点定位两种。一般采用 4 个内图廓点(格网点)作为已知点进行地图定位, 即数字化仪鼠标的十字丝交点分别对准地形图的左下角、左上角、右上角、右下角 4 个内图廓点, 依次获得它们的数字化仪坐标。当图幅内有分布均匀、点位精确清晰的已知控制点时, 可采用控制点进行地图定位。计算定位定向元素程序框图如图 6-3。

地形图定位定向的实质是进行坐标变换。线性正形变换方法, 除了一般的坐标轴平移和旋转外, 它还增加了比例尺因子的改正。用以上方法定向后再进行数字化, 可以有效地克服地图图纸的不均匀变形和提高数字化的精度。

图 6-3 地图定位元素程序框图

6.2.2 仿射变换

与线性正形变换相比, 仿射变换还顾及到了 X, Y 两个方向比例变化的不一致性, 其数学模型为

$$\begin{aligned} X &= a_1x + a_2y + a_0 \\ Y &= b_1x + b_2y + b_0 \end{aligned} \tag{6-7}$$

式中 X, Y——地图坐标系坐标;  
x, y——数字化仪坐标系坐标;  
a<sub>1</sub>, b<sub>1</sub>, a<sub>2</sub>, b<sub>2</sub>, a<sub>0</sub>, b<sub>0</sub>——6 个定向系数。

当有 n 个已知点时, 对于每个已知点都可列出一对误差方程式, 即

$$\begin{aligned} v_{xi} &= a_1x + a_2y + a_0 - X_i \\ v_{yi} &= b_1x + b_2y + b_0 - Y_i \end{aligned} \tag{6-8}$$

按间接平差原理, 可得矩阵形式的法方程式

$$\begin{matrix} x_i^2 & (y_i x_i) & x_i & a_1 & (x_i X_i) \\ (x_i y_i) & y_i^2 & y_i & a_2 = & (y_i X_i) \end{matrix} \quad (6-9)$$

$$\begin{matrix} x_i & y_i & n & a_0 & X_i \\ x_i^2 & (y_i x_i) & x_i & b_1 & (x_i Y_i) \\ (x_i y_i) & y_i^2 & y_i & b_2 = & (y_i Y_i) \\ x_i & y_i & n & b_0 & Y_i \end{matrix} \quad (6-10)$$

分别求解式(6-9)和(6-10),便可求得  $a_1, a_2, a_0, b_1, b_2, b_0$  六个变换参数。按前述步骤,即可求得数字化点的地图坐标。

此外,还有双线性变换、投影变换等。由于对各种变换考虑的因素不同,转换效果也不同。当可供选择的定位点较少时,采用线性正形变换或仿射变换。目前生产单位多采用线性正形变换。

### 6.3 台板菜单及功能键定义模块

在完成图纸定位后,便可对地图要素逐点进行数字化。数字化过程中,用鼠标对准地物特征点采集,得到相应点的平面坐标,同时还要输入该点相应的绘图信息,即不仅要得到地图要素的点位数据,同时还要得到地图要素的其它特征信息,如高程以及编码、线型、注记等,这些信息对成图及地理信息系统的建立是十分重要的。输入这些信息,势必要用计算机键盘,一方面在数字板上做数字化,另一方面还要输入属性等信息。这样,操作者就需要在数字化仪及计算机键盘之间来回操作,这无疑将使数字化的工作效率大大降低。为了提高速度,通常数字化软件都会建立台板菜单和定义鼠标功能键。在数字化仪桌面上开辟一个区域作为菜单区,该菜单是固定在该区上的一个菜单表格,菜单区内按行和列分成相同大小的小格(正方形或矩形),每个格子对应一个菜单项,菜单项用来表示常用的地形图图式符号和各种图形处理功能。

图 6-4 为 EPSW 软件的部分台板菜单。在使用台板菜单之前,首先要进行台板菜单定位。定位方法一般是给出台板菜单任意两个相对顶点的数字化仪坐标数据(例如左下角和右上角坐标),再依据小格的长、宽数据,即可求得每一个菜单项行列号;反之有了行列号,也可知菜单项。在地图数字化软件中,每一对行列号都与所对应的编码程序功能联系起来。当用户用鼠标点中台板菜单任一菜单项时,数字化软件自动根据数字化仪发送的坐标位置数据(此时是数字化仪坐标数据),判断出用户是在使用台板菜单而不是在进行数据采集,然后由该软件进一步判断出用户点中的行列点是哪一个菜单项,并提取该项内容,自动地绘制菜单项所表示的图式符号或执行菜单项所对应的图形处理功能,并以一定的数据格式把信息存储起来。软件依据所输入的信息,自动完成数字地形图的绘制,并且计算、显示在屏幕上。

采集	确认	捕捉	取消	开关	编码	高程	线型
回车	闭合	全屏	H= 9999	居中	刷新	开窗	功能切换
0	1	2	3	4	5	6	7
8	9		退格	光标左移	光标右移	是否注记	功能切换
存盘	转前窗口	转后控制	转前控制	砵*	砖	永	点前移
点后移	激活	反向					
一般房屋	破坏房屋	棚房	台阶	门墩	燃料库	地磅	加油站
气象站	烟囱	路灯	喷水池	假石山	垃圾台		
纪念碑	碑柱墩	塑像	旗杆	广告牌	亭台	独立坟	散坟
水塔	窑	粮仓	水轮泵	邮筒	信号灯	电话亭	

\* 砵为图式符号中的一个符号。

图 6-4 EPSW 软件的部分台板菜单

此外,现在的数字化仪通常都是使用 16 个按键的定标器,所以,数字化软件还可定义这 16 个按键,并设有多功能键。其作用和台板菜单一样,各个按键表示常用的地图图式符号和各种图形处理功能。这样用户既可以使用台板菜单,也可以使用定标器的 16 个按键来方便地输入各种信息和执行各种图形处理功能,例如 EPSW 软件系统不仅建立了台板菜单,而且还重新定义了定标器按键的功能。台板菜单中的各个菜单项允许使用者根据需要自己重新定义。

6.4 数据采集

地图数字化的数据采集与野外数字测量类似,只要对地形的特征点进行数字化仪采集,即可得到每一特征点的点位坐标,同时还输入它们的属性编码(由编码绘制图式符号)和连接信息(使本点与应该连接的点相连)。所不同的是,数字化是在图上采集而不是在实地进行,因而采集特征点的顺序可以更有规律性,例如,可按地物类型分类采集,先采集房屋,再采集道路等。一个地物可以被连续采完,这样,采集每一点所应输入的信息就可以大大省略,而且有效地防止了地物的漏采。如采集一条道路,只要在采集第一点时输入一次道路的编码,采集这条道路其它特征点的编码都可以由程序自动默认填写。连接信息也可以省略,因为都是顺序采点,当前所采的点一般都是与上一采点相连,这一信息自然可以由程序自动默认填写,只有在起始情况下才由人工键入。所以由数字化仪采集数据就比外业测量采集数据更简便快速。数字化软件就是考虑了数字化的这些特点而设计和编程的。

在数字化过程中,对于独立地物符号,只需采集符号的定位点;对于折线线状符号,只需采集各转折点;若是曲线线状符号,只采集曲线的特征点(如明显的转弯点),由程序自动拟合为曲线。对于有方向性的线状符号,如围墙、栏杆、陡坎、斜坡等要结合图式符号库的具体算法进行采集,只采集其定位线,采集时前进方向右侧(或左侧,按软件的图式符号库规定的方向)为短毛线或小符号。对于面状符号,则只需其轮廓线上的拐角点或特征点。若内部有填充符号,则轮廓线必须闭合,程序根据地物的编码和轮廓线的位置自动配置并

填充符号。对于闭合图形,数字化时也需要闭合,闭合的方法因数字化软件的不同而有所区别,有的软件能实现自动闭合,而有的软件则规定在闭合点处重复采集一次。至于注记,一般不进行数字化,在图形编辑时加入,目前的数字化软件都提供了注记功能。

对公共边的采集需要特殊规定:既满足多边形闭合的条件,以便计算面积,又希望对公共边只采集一次。对 EPSW 来讲,在结点处第二次采集需捕捉一次。如图 6-5 所示的多边形采集的步骤如下:

图 6-5

沿多边形 边界采集 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 各点;

沿多边形 采集 6, 10, 11, 12, 13, 14, 8 各点;结点 6, 8 只需捕捉,不必正规采集,公共边上的第 7 点由程序自动组合到 多边形内;

同理采集其它多边形。

采集时应注意的事项:

顺时针方向采集;

对结点,凡第二次或二次以上的采集,每次只进行捕捉,结点间公共边上的点不需采集,由程序自动组合到多边形;

当一组多边形采点结束后,外环多边形面积理论上应等于所含的内部各相邻多边形面积之和,由此可检验多边形采点的正确性。

为了保证点位采集的正确性,对地形图地物符号的定位点必须有一正确的认识,这里特作补充说明:

(1) 比例符号。对轮廓较大的地物,如房屋、湖泊、林地等,其形状按实测点(特征点)位置,配以特定的符号,依测图比例尺予以缩绘。

(2) 非比例符号。对轮廓较小、无法将其形状和大小按测图比例尺缩绘到图上,而又很重要的地物(如岗亭、独立树),必须表示到图上,这时,不管地物的实际尺寸,仅以规定的符号表示,这类符号称为非比例符号。其定位点(图 6-6 中黑点)的位置也因各种地物而异,采集与读图时应加以注意:

圆形、方形、矩形、三角形等几何图形符号,如三角点、导线点、检查井等,其几何图形的中心为定位点;

宽底符号, 如岗亭等, 其符号的底线中心为地物中心;

底部为直角形的符号, 如独立树、加油站, 其符号底部直角顶点为地物中心位置;

不规则的几何图形, 又没有宽底或直角顶点的符号, 如山洞、窑洞等, 其符号下方两端点连线中点为地物中心位置。

图 6-6 非比例符号及其定位点

(3) 线状符号。对于一些带状延伸的地物, 如窄道路、管道等, 其长度可按比例尺缩绘而宽度却无法缩绘, 这种长度按比例、宽度不按比例的符号称为线状符号, 其中心线即为实际地物的中心线。有些地物究竟是用比例符号或非比例符号还是线状符号表示, 主要由比例尺确定, 比例尺越大, 用比例符号的地物就越多, 如公路在大比例尺图中就可有宽度(按比例), 但在小比例尺图中就变成线状符号(宽度无法按比例表示)。

地图数字化的具体操作是在计算机和数字化仪组成的系统中进行的, 计算机内安装有地图数字化软件。数字化采集进行之前, 要将地图和台板菜单固定在数字化板面上, 以防在数字化过程中图纸和菜单被移动, 然后进行地图和台板菜单定位。如果在数字化过程中发现图纸有移动, 必须对地图重新定位, 之后即可开始大比例尺地形图数字化的工作。

地形图的数字化通常需要分层, 当然有些功能较强的数字化软件, 也可不分层进行数字化, 但在需要分层时, 数字地形图仍可任意分层。数字化采点时, 将数字化仪鼠标的十字交点对准地物的特征点, 按鼠标左键, 得到该点的平面坐标数据, 然后移动鼠标到菜单区, 对准该数字化点图式符号所在的小方格, 按一下鼠标键, 便自动把该点的编码输入到计算机中, 并与该点的坐标数据联系在一起, 同时在计算机屏幕上显示出刚数字化的图形。逐点进行各类地物的数字化, 直到整幅图数字化完成。成图的过程可参阅第 7 章。

## 6.5 图幅接边

数字化时经常碰到这样的情况, 一个地物跨过两幅图, 而在数字化每幅图时, 该地物都只能采集到一部分, 这两部分都是孤立的、无联系的点或线, 不能形成一个完整的地物, 同时也就丢失了这个地物应有的各种信息。图幅接边就是将其形成一个完整地物并恢复它的各种信息。接边方法可分为半自动法和自动法两种。

(1) 半自动法。就是采用人工判读与计算机处理相结合的地图接边处理方法。工作步骤如下:

将需接边的两幅图的图边部分同时显示到计算机屏幕上, 一般使接边图廓线位于屏幕中间;

人工判读两幅图接边情况, 将局部图形放大, 然后通过鼠标查询两幅图接边线上各有关的坐标, 若对应的两接边点坐标之差小于给定的接边误差限差, 例如小于图上 0.2mm 则取两点坐标平均值, 否则, 检查错误并修改接边点及其相关点坐标, 达到地图接边要求;

程序将修改后的接边点坐标自动写入接边图幅的绘图文件, 完成接边处理。

(2) 自动法。就是在采集点的过程中自动完成图幅接边工作(将本幅图的点直接与邻幅图相应的端点连接,参阅 7.4 节)。

对于要求严格的几何图形,在接边的同时还必须对其进行附加的数据处理,如房屋的直角化、直线道路的直线化等。图幅接边时,除进行几何接边外,还必须进行属性接边,即保持接边地物属性的一致性。

## 6.6 数字化精度

数字化精度是数字化工作必须考虑的问题,首先要保证原图的质量,要求图纸变形小和图面清晰。跟踪数字化过程中引起的误差比较复杂,它包括图纸定位误差、采样误差、仪器误差等。

### (1) 图纸定位误差

定位误差受到定位点本身的误差、定位点的分布情况以及坐标变换模型选择等因素的影响。不同的变换模型对于克服图纸的各种变形的效果不一样,一般需通过实验选用。定位点应均匀分布,图纸定位时应保证有一定的多余观测,即应有多余的定位点,一方面提高定位精度,另一方面也为剔除粗差创造条件,从而减少粗差的影响。

### (2) 采样误差

采样误差主要有采点时的对中误差和取点的代表性误差。采样误差属于偶然误差,当数字化一条粗线时,很难连续地把光标对准在线的中央。对等高线数字化时,操作上就可能产生更多的偏移误差,所以数字化的精度在很大程度上受到操作员的技能及责任心和疲劳情况的影响,另一方面还受到被数字化要素的宽度、密度及复杂性的影响。

### (3) 仪器误差

仪器误差是指由于数字化仪本身的结构及分辨率等因素引起的误差,属于系统误差。目前数字化仪的精度一般能达到 0.1mm ~ 0.2mm,这是可以满足数字化图的精度要求的。

对于图的数字化还没有可靠、有效地评价其精度的方法。通常采用对比的方法,就是将数字化后的数据通过绘图机回放图形,将此回放图形(一般是用较透明的纸或薄膜作图)套合在数字化原图上,选择明显地物点进行量测,分别计算出图幅的平面或高程中误差。

## 6.7 扫描屏幕数字化

手扶数字化仪数字化是目前国内外普遍采用的地(形)图数字化的方法,但手扶化的几何精度较低,速度较慢,劳动强度大,易疲劳。地图扫描则速度很快,在保证图纸质量的情况下,扫描精度也较高。如普通扫描仪的分辨率可达到 300 点/in ~ 800 点/in(dot per inch),高精度扫描仪分辨率可更高。但利用扫描仪(参见图 2-6)扫描,得到的是地图的点阵图像数据。一幅数字图像可视为一个矩阵,矩阵中一个元素对应图像中的一个像点,而每个矩阵元素的值则对应于该点的灰度级,称这个数字阵列元素为像素(pixel)。图像数



据存储的格式为栅格(raster)或网格(grid)数据格式。如果图像的所有像素仅有黑和白两个灰度级,则称为二值图像,否则称为灰度图像或彩色图像。常用的栅格数据标准文件格式有 TIFF, PCX, BMP 等。

栅格图像与矢量图形的区别是:

(1) 栅格图像是以点阵形式存储,它的基本元素是像素(像元),它是以像素灰度的矩阵形式记录的;矢量图形是以矢量形式存储的,它的基本元素是图形要素,图形要素的几何形状是以坐标方式按点、线、面结构记录的。

(2) 图像的显示是逐行、逐列、逐像元地显示,与内容无关;图形的显示是逐个图形要素按顺序地显示,显示位置的先后没有规律。

(3) 图像放大到一定的倍数时,图像信息会发生失真,特别是图像目标的边界会发生阶梯效应;图形的放大和缩小,其图形要素、目标不会发生失真。

(4) 表示效果相同时,栅格图像表示比矢量图形表示所占用的存储空间大得多。

依据上述的分析,考虑到地形图的应用,如进行点、线、面、坡度、断面等的计算、各类分析、统计等,数字图必须用矢量数据表示。也就是说,要将扫描的栅格图像数据转换成矢量图形数据,即以坐标方式记录图形要素的几何形状,这个转换过程称为矢量化。矢量化后的图形,再经过编辑、修改、加注即生成数字化图,亦可绘出线划图。

此外,人通过眼睛可以阅读复杂的地(形)图,这是由于人不仅具有视觉技能,而且还能自觉地利用大脑及各种专业知识来识别、理解地图的内容。扫描仪相当于计算机的视觉器,但通过计算机全自动识别地图的内容,并从栅格数据中提取各类地形要素及区别要素间不同的属性,这些目前还不能实现。为此矢量化的工作一般还需要人机交互来完成,最优的途径就是扫描屏幕数字化的方法。一般的原理框图如图 6-7 所示,图中:

- 预处理是指由于图纸不干净、线不光滑以及受扫描、摄像系统分辨率的限制,给扫描出来的图像线划带来黑色斑点、孔洞和毛刺、凹陷等噪声。在细化前要采用噪声和边缘平滑的方法除去这些噪声,否则就会造成细化误差和失真。
- 细化是指寻找扫描图像线条的图形原骨架(中心线)的过程。细化处理速度所需内存容量、处理精度和细化畸变是细化好坏的综合性能指标。

一般扫描处理用的计算机,内存容量要大,细化的畸变要小,精度要高。首先要保证原图的质量、扫描的质量。细化后,要能保证线段的连通性,但图像上难免存在一些断点(细线断开的点)和毛刺,需要进行断线修补和毛刺删除,要求细化的结果是原曲线的中心线。

- 矢量化是指将栅格图像转换为矢量图形的过程,一般的线段可做到自动跟踪矢量

图 6-7 扫描屏幕数字化方法原理框图

化,但由于地形图上线划分布比较复杂,尤其是大比例尺地形图,地物要素的多样、重叠、交叉以及一些文字符号、注记等,使得全自动跟踪矢量化更加困难。一般都采用人机交互与自动跟踪相结合的方法完成地图的矢量化,这一过程都是在屏幕上进行的,也称屏幕数字化。线段追踪算法的操作步骤如下:

给定线段的起点,记录其坐标;

以此点为中心,按 8 个方向(东、西、南、北、北东、北西、南东、南西)的邻近像束,搜索下一个未跟踪过的点,如果没有点则退出,若有点,则记下它的坐标(搜索方向);

将找到的点作为新的判别中心,转向操作,依次循环,直到追踪至另一端点(结点),线段上的所有点被自动追踪出来;

追踪结束。

若是追踪封闭曲线,其追踪方式与线段追踪基本相同,只是追踪到终点,其终点坐标应为起点坐标。

在线段追踪过程中,若遇线段有断点或遇分叉点,追踪即停止,需由人工干预(或指定走向,或越过断线),追踪才继续进行下去。

由于扫描矢量化在同等条件下(如纸张的变形程度,清晰程度)的精度比数字化仪数字化高(300 点/in 或 500 点/in 的扫描仪分辨率可达到 0.08mm ~ 0.05mm(800 线/mm ~ 500 线/mm)),自动化程度高,劳动强度小,是地图数字化的发展方向。随着大比例尺地形图矢量化软件更加成熟,扫描屏幕数字化将逐渐取代数字化仪数字化,而成为地形图数字化的主流。

目前国内已有一些扫描屏幕数字化软件投入使(试)用,基于 EPSW 的扫描屏幕数字化软件(EPSCAN)也已投入应用。再经过一个阶段的磨合与完善,将成为较优秀的扫描数字化软件。EPSCAN 定位在具有图像矢量功能的 GIS 数据采集软件上,并兼容了 EPS 的所有数据,拥有 EPS 大部分图形操作功能,在编码、符号、地物、目标等基本概念和管理方法上完全与 EPS 系列软件相同。

EPSCAN 采用 MSVC4.2 作为开发语言,是一种完全的 32 位应用软件。系统界面具有 WIN95 的标准特性:可移动的工具条、状态条、以不同的光标形状代表当前系统运行状态、上下文相关帮助等。熟悉 WIN95 风格的用户很容易根据帮助迅速掌握系统的使用。

EPSCAN 除具有一般矢量化软件的功能外,还具有以下特性:

以工程包为一个工程的数据源集合,工程包内含链接的图像、EPS 矢量图形库和 COR/NOT 等,此外还有文件名索引和图像定位信息以及有关工程数据,很好地解决了多数据源复合和共享问题;

两幅以上有接边关系的图像经定向和必要的切割(消除图像重叠部分)后可完成图像自动拼接;

基于图像完成的手工、自动跟踪,规则几何形状多边形的边角提取、多边形区域内线条自动提取等功能准确便捷,提高了矢量化的速度和精度;

矢量化中 EPS 符号全部实现可视化,可以直接在工具条上选择或键入属性数据;系统支持海量数据,实际容量仅受操作系统可用内存空间及磁盘空间的限制。

# 7 地形图的绘制

## 7.1 概述

在绘制地形图之前,先对外业数据进行处理,提取对绘图有用的各种信息,对其进行计算和整理,再按照规定的数据结构存储(图 7-1),建立起适合绘图、编辑处理并与 GIS (地理信息系统)接轨的地形数据库。据此,可生成数字地形图;可进行地形图的绘制;可向 GIS 提供地形(图)空间数据和属性数据。有关等高线的绘制参阅第 9, 10 章。

图 7-1 外业数据处理一般流程

### 7.1.1 原始数据的预处理

不同来源(如来自航测立体坐标量测仪、解析测图仪、各类全站仪或磁卡、PC-E500 等)的原始数据可能有不同的格式,都需要进行专门的处理,或者先转换成标准格式再做预处理,如图 7-2。

图 7-2 不同数据的不同处理过程

数字测图的原始数据的预处理,主要包括坐标计算和图形信息的处理(参见 7.2, 7.3 节)。预处理后,存入地形数据库。绘地形图时,由数据库中提取相应数据,经处理生成 .DWG 图形文件,利用 AutoCAD 软件出图即可。

下面讨论的外业数据处理,主要是针对已经形成文件的外业数据的集中式批处理。在

内外业一体化的 EPSW 软件系统中,记录外业数据的同时就进行处理,其结果存入地形数据库。EPSW 中提供的外业原始数据.FLD 文件的“重算”功能,其处理的基本原理和方法也相当于批处理。

7.1.2 系统文件的组织

对于一个数字测图系统,在一项大的测量工程或一次测量作业过程中,通常有大量的、不同类型和用途的数据,它们都是以文件的形式组织起来的,并存放在磁盘内,如已知控制点坐标文件、原始数据文件、等高线文件、(地形图)图形文件等。在早期的测图系统中,地形数据库是用简单的数据文件代替的,其中把计算整理后的外业数据处理结果分别建立文件存储,如坐标文件、表示连接关系并带有属性信息的图形文件等。

在新一代的 EPSW 中专门设计了面向对象的地形数据库,提供了更强大的输入、查询、编辑、输出等功能。

为了提高系统的自动化程度,程序必须用一套文件名命名规则来组织如此众多的文件,以便于操作和由程序自动确定有关数据文件的文件名,这样,避免了混乱和错误,而且也无须用户经常输入数据文件名。应用命名规则的另一个作用是区分不同工程或作业的数据,便于计算机同时管理。

计算机中完整的文件名包含路径(path)(即驱动器号(driver))、目录(directory)与子目录(subdirectory)、文件名(name)和扩展名(extension)4 部分。例如: C:\EPSW\Data-100084.XYZ, 其中路径用来确定文件的存放位置,如 C 盘。一般习惯上把一次作业的全部数据都存放在相同路径下,使用相同的文件名,而用不同的扩展名来区分不同类型的文件。这样组织起来的全部文件称作一个“工程”(project),它们共有的文件名称作“工程名”;扩展名可统称为.EXT。

在 EPSW 的早期版本,即 CAMAP 等软件中,还对工程名作了进一步的规定,即将工程名定为 6 位整数,其中前 4 位称为作业号,代表一个测区;后两位称为版本号,用来区分同一测区的不同测量版(如初测版或修测版等)。

例如文件名“110001.XYZ”,其中“1100”为作业号或测区号,“01”为版本号(01 为初测,以后修测可改作 02);“.XYZ”为后缀名,代表坐标文件。

另外,为了便于程序自动识别当前正在处理的某一测区的数据,一般还约定用一个专门的文件来存储系统当前正在处理的工程名。在 CAMAP 中这个文件是 JOB.VER,例如,当前正在处理的是 110001.EXT 数据文件,则 JOB.VER 内的数据为 110001。在 EPSW 中这个文件是存放在 Windows 目录下的 NEWEPS.INI 中。

CAMAP 中常用的扩展名如表 7-1 所示,EPSW 中常见的扩展名如表 7-2 所示。

7.1.3 EPSW 常用的数据格式举例

(1) 表 7-3 为从显示屏上(拷贝)打印出的.FLD 外业原始数据文件。关于.FLD 文件的说明请参阅 5.3 节。

(2) .KNW 控制点坐标文件举例如表 7-4 所示。

(3) .COR 公共交换文件举例如表 7-5 所示,它是按地物组织起来的数据。如第 9 行

内容为编码、点数、线型,第 10 行~13 行为组成 201(房屋)的顺时针排列的 4 个点(2, 5, 4, 3)的坐标等信息。

表 7-1 CAMAP 中的扩展名

. BC2	航测解析测图仪 BC2 采集的数据
. ALP	ALPHACORD 记录器采集的外业数据
. GRE	GRE3/ 4 记录器采集的外业数据
. 150	PC-1500 袖珍机采集的外业数据
. KWN	控制点坐标库
. STA	标准格式定位信息数据文件
. INF	标准格式的连接信息数据文件
. XYZ	坐标文件
. SCR	地形图图形描述文件

表 7-2 EPSW 中的扩展名

. EPS	地形数据库文件
. INI	参数文件(初始化文件)
. FLD	外业原始数据文件(操作日志)
. KNW	控制点坐标库文件
. DWG	地形图图形文件
. CNT	区域文件
. COR	公共交换文件
. NOT	注记交换文件
. PNT. PIN	三角网专用坐标文件
. TRI	三角网文件
. SCI	折线等高线文件
. DGX	等高线文件

表 7-3 .FLD 外业原始数据文件

表 7-4 (a) 已知坐标输入的对话框

表 7-4(b) .KNW 文件格式

表 7-5 .COR 公共交换文件格式

上面列举的各种数据格式,在 EPSW 软件开发者编写的技术手册中都有详细的说明。本文仅将其中几种常用格式展示出来,让读者了解数据格式既有丰富多彩性,又有非常明确的规律及统一性,这也体现了数字测图软件系统强大的数据处理能力。

## 7.2 坐标计算的批处理

外业原始测量数据文件的基本功能就是记录点位测量信息和绘图信息。也就是说,原始记录中记录了计算坐标的各个数据项,如水平角、竖直角、斜距;或丈量的距离;或交会的角度和距离等。

坐标计算批处理的基本过程是:扫描外业数据记录文件时,每读入一条存储点位的记录,就根据记录的类型标志确定记录的结构,从而提取所需的各数据项,再从控制点坐标库或从已计算出的坐标中查得起算点(如测站点、后视点、或量边的起始点等)的坐标,调用有关函数(如 5.2 节中坐标计算方法举例)计算出各测点坐标,并存入坐标文件,如 CAMAP 中的 .XYZ 文件。

在 EPSW 中,坐标计算是逐点实时进行的。当一个测点应有的数据项全部采集完成,并确认后,一方面送磁盘存储至外业原始数据(.FLD)文件;同时,又根据测站坐标计算出测点坐标,并显示。计算的坐标连同经过处理的图形信息一并存入地形数据库,当需要进行数据交换、合并时,可由库中调出相关信息,再写入地物坐标串文件,即 .COR 文件。需出图时,则由库内调出并写入 .DWG 文件,即 .DWG 格式的绘图文件。

EPSW 中的坐标重算功能,则类似于上述的坐标批处理过程,是一个很有用的功能。如采用图根与碎部同步测量的“一步法”时,在现场实时所成的图是根据未经平差的测站坐标计算的,待图根导线平差后,需根据平差后的坐标,将所有的碎部点坐标重算一遍,这时采用“重算”功能,对 .FLD 文件重新扫描计算,得出准确的坐标值;或者在某些处理中遇到麻烦,一些坐标和图形信息被破坏,这时也可以用重算功能,将 .FLD 文件重新批处理一遍,即可恢复所需的数据。

## 7.3 图形信息的组织与处理

经过坐标计算,得到的只是大量的离散点,这些点如何连接,以及它们分别代表什么地物,这要由图形信息来确定。表达图形信息的基础是编码及连接关系(连接点和连接线型),通过连接关系可以构成线,进一步构成面、区域。编码作为属性信息,对于图形信息处理是必不可缺的。

怎样组织图形信息,是设计数字测图系统的关键之一。早期的测图系统是根据现场绘制的草图直接由人工编辑“成图信息”,即图形文件,然后人工键入计算机。其后发展为由程序自动提取外业数据文件中的编码和连接信息(连接点、线型、编码、点号等),自动检索整理,生成图形文件。CAMAP 中图形文件(.LIK 文件)记录的就是点到线的构成关系,它可以提供给绘图模块直接使用。

7.3.1 图形文件(.LIK 文件)的结构

表 7-6 中每行的首项为编码(设 663 为道路, 220 为房屋), 第二项为线型, 以后是按该地物绘制顺序排列的点号。

表 7-6 .LIK 文件格式

编码	线型	点 号
663	1	1, 0
663	1	2, 3
663	3	3, 4, 5
663	1	5, 18
663	1	9, 8
663	3	8, 7, 6
663	1	6, 17
220	7	11, 12, 13
220	7	14, 15, 16
220	7	19, 20, 21
220	7	22, 23, 24
220	8	25, 26, 10, 000

线型和相应的点号排列约定如表 7-7, 这些约定可以根据需要进一步扩充。为了方便起见, 进一步约定点号排列的缩写形式和续行标志。点号排列缩写如: 123~154 或 154~123, 分别表示 123, 124, ..., 154 或 154, 153, ..., 123 各点。续行标志为行尾仍保留一个逗号“,”表示点号在下一行继续排列, 如

663, 2, 23, 28, 32~38,  
41, 43, 65~56, 52, 50

表示道路由 23, 28, 32, 33, ..., 37, 38, 41, 43, 65, 64, ..., 56, 52, 50 各点用曲线顺序相连。

表 7-7 线型和点号排列约定

线型	含 义	点 号 排 列
0 或空	独立点	$P_i$
1	直线	$P_1, P_2, \dots, P_n$
2	曲线	$P_1, P_2, \dots, P_n$
3	三点圆弧	$P_1, P_2, P_3$
4	三点圆	$P_1, P_2, P_3$
7	三点房	$P_1, P_2, P_3$
8	两点房	$P_1, P_2, \text{房宽}$

注: 房宽单位可为 m 或 cm(由程序定义)。



7.3.2 外业记录中连接信息的记录方法

在 CAMAP 适用的各种记录器如 GRE4, ALPHACORD, PC-1500(CDX), PC-E500 (EDR) 等中, 由于所配置的软件采集记录的功能有限, 只提供尽量简单的记录格式和方法; 为了表达图形信息, CAMAP 约定用“记录段”的方法(或称“断点法”)记录连接信息。

表 7-8 记录段格式

点 号	编 码	连 接 点	线 型
P <sub>1</sub>	C	L <sub>P</sub>	
P <sub>2</sub>	C		
P <sub>n</sub>	C	L <sub>P</sub>	L <sub>t</sub>

一个记录段由编码相同的、连续的、按顺序相连的若干条记录组成, 完整的记录段结构如表 7-8(仅列出了记录中表达图形信息的数据项): 编码相同的连续的各点 L<sub>P</sub>, P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, ..., P<sub>n</sub>, L<sub>P</sub>, 按顺序以 L<sub>t</sub> 线型相连。在一个记录段中, 连接点栏则可能有, 也可能无, 如道路的起始点就不会有上连的点。一记录段中, 只有段尾处才记线型, 表示此段记录以 L<sub>t</sub> 线型相连。

对于图 7-3, 可以从相应的外业数据文件中提取连接信息文件(.INF 文件), 如表 7-9(a)所示。程序由 .INF 文件自动检索出 .LIK 文件, 即图形文件(表 7-9(b))。绘出的图如图 7-3 所示。其中共有 13 个记录段。第一行 1 号点是第一个点, 还没有连接关系, 因此线型 L<sub>t</sub> 为 0, 构成第 1 个记录段。第二行、第三行构成第二个记录段。第 3 个记录 4 点要和已测的 3 点相连, 因此上连接点 L<sub>P</sub> 为 3, 表示 3, 4, 5 三点构成圆弧。第 4 个记录段也是三点圆弧。第 5, 6, 9, 10 记录段均表示与所标的连接点号以直线相连接。第 7, 8, 11, 12 记录段均表示三点房。第 13 记录段比较特别, 线型处的 8 表示两点房, 连接点 L<sub>P</sub> 处的 1000, 表示房宽 1000cm。

图 7-3

图 7-4

表 7-9( a) .INF 文件				
点号	编码	连接点	线型	段号
1	633		0	1
2	633			2
3	633		1	
4	663	3		3
5	663		3	
6	663			4
7	663			
8	663		3	
9	663	8	1	5
10	663	1	1	6
11	220			7
12	220			
13	220		7	
14	220			8
15	220			
16	220		7	
17	663	6	1	9
18	663	5	1	10
19	220			11
20	220			
21	220		7	
22	220			12
23	220			
24	220		7	
25	220			13
26	220	1000	8	

注：段号仅为说明用。

表 7-9(b) .LIK 文件		
编码	线型	点号
633	1	1, 10
633	1	2, 3
633	3	3, 4, 5
633	1	5, 18
633	3	6, 7, 8
633	1	6, 17
633	1	8, 9
220	7	11, 12, 13
220	7	14, 15, 16
220	7	19, 20, 21
220	7	22, 23, 24
220	8	25, 26, 1000

使用记录段方法时, 要注意避免可能出现的二义性, 必要的时候, 给出 0 线型或自身连接点(连接点与测点号相同) 以及空记录(空记录的点号为前面已经观测过的测点号)。0 线型和自身连接点可以用来避免不必要的连接错误, 空记录可以用来表达某一点上较多的连接关系, 如图 7-4 所示。

相应的连接信息文件如表 7-10 所示。其中第 1 行为了避免 150 点与 151 相连,使用了 0 线型;第 3 行为了避免 152 点与 151 点相连,使用了自身连接点;第 10 行为了表示 158, 159 两点构成两点房,使用了空记录, 158 点在上一行测得定位数据,而在本行不给出定位数据,表示点位不变。

7.3.3 自动检索、编辑连接信息

在提取连接信息文件(. INF 文件) 之后, 根据“ 记录段 ”的约定, 就可以生成图形文件(. LIK 文件)。

由于野外测量跑点的随机性, 原始记录的连接信息可能是比较散乱的一些小段, 在检索提取记录段的同时需要进行连接, 以形成完整的成图信息。比如一条很长的道路, 实测是分为若干段观测的, 野外记录时也是分为若干记录段来记录的, 程序自动编辑时将根据分段的成图信息进行处理, 连接成一个完整的以某一方向为序的连接点序, 供绘图程序处理时绘出正确的图形。

如图 7-5 所示, 有一条很长、曲线型小路, 点号的大小同时也代表观测的顺序, 则其成图信息记录段如表 7-11。

图 7-5 小路

表 7-10 图 7-4 的. INF 文件

行号	点号	编码	连接点	线型
1	150	220		0
2	151	220		0
3	152	220	152	
4	153	220		
5	154	220		7
6	155	220		
7	156	220	150	7
8	157	220	151	
9	158	220		7
10	158	0		
11	159	220	900	8

注：行号仅为说明用。

表 7-11 图 7-5 的记录段

点号	编码	连接点	连接线型
1	610		
2	610		
3	610		2
4	610		
5	610		
6	610		2
7	610	3	
8	610		
9	610	6	2

在上述记录段格式中, 小路的编码为 610, 曲线的线型代码为 2。第 1, 2, 3 行为第一个记录段, 整段信息表示 1, 2, 3 点以曲线相连。第 4, 5, 6 行为第二个记录段, 表示 4, 5, 6 点以曲线相连。第 7, 8, 9 行为第三个记录段, 其段头连接点为 3, 段尾连接点为 6, 表示 3, 7, 8, 9, 6 点以曲线相连。程序自动编辑成图信息时会自动查找连接点, 生成完整的成图信息: 1, 2, 3, 7, 8, 9, 6, 5, 4 以曲线相连。

由此原理可知, 尽管每个记录段的测量方向可以任意, 经过成图信息自动编辑以后, 一条完整线段的成图信息列点顺序是以第一个记录段的方向为准。上例中, 是以第一记录段的 1, 2, 3 点序为整条小路的方向, 这一点在绘制某些含约定方向信息的线段时就很重要, 如绘制陡坎, 坎线的方向就约定为线段前进方向的右边(或左边, 由软件确定)。

### 7.3.4 EPSW 内外业一体化的图形信息组织处理

由于 EPSW 基于便携机和中文 Windows 平台, 加上 EPSW 软件本身又设计了地形数据库, 并对数据信息进行库管理, 因此, 它不仅可以提供丰富的实时解算和交互手段, 而且使得组织图形文件更为迅速和简便。

在 EPSW 系统中, 在外业测量点位数据的同时, 就输入了属性编码和连接信息。这些信息一方面按测量顺序存入原始数据记录文件(.FLD, 直接存入磁盘, 以防丢失), 另一方面, 实时解算出该记录的坐标值, 并根据编码提取图示符号, 根据连接信息, 以应有的线型与连接点连接, 并实时在屏幕上显示。根据显示的点位和图形可以判断测量的正确与错误, 并可即时地进行现场编辑和修改。确认后, 该测点的坐标、编码、连接信息等便可存入地形数据库, 按库结构对地形空间数据和属性数据进行管理, 换句话说, 在库中存储的已是实时根据编码、连接信息处理后的, 按点、线、地物、目标等结构组织的全部空间和属性信息数据。

这些信息的组织, 都是在对每个测点测量以后实时进行处理的。测量结束, 图形文件实际上已按库结构存储在库中。出图时, 只需从库中取出数据, 按要求的.DWG 文件或其它图形文件格式输出绘图, 而无需在庞大的数据量中再去找寻连接关系形成图形文件。从上所述, 可明显地看出, EPSW 电子平板测图系统, 从外业到内业一体化的数据采集、处理、显示及组织都是在测量现场、实时并自动地进行的, 这无疑是简化了操作, 加速了测图的进程; 应用所提供的现场编辑、修改功能, 还保证了外业测量数据的正确性与可靠性, 从而大大减少或避免了事后返工。对于 EPSW 较详细的论述, 可参阅第 11 章。

## 7.4 分幅与接边

### 7.4.1 分幅的意义

在传统的作业方式中, 测制地形图是以图幅为单位进行的, 一幅图的大小通常是 40cm× 50cm 或者 50cm× 50cm。划分图幅才使规范测图绘图成为可能, 同时可以明确每个作业小组的任务范围, 便于组织和协调生产, 也便于统一管理和使用测量成果。

使用数字测图软件进行测图情况有所不同, 因为不再有图纸大小的限制, 利用计算机可以同时处理相当于几幅、几十幅 50cm× 50cm 图幅的数据, 甚至把整个测区的全部数据集中处理。但无论计算机容量如何大, 都不可能穷尽测量数据, 因此一个完善的系统必须要有分幅的手段, 才能彻底解决数据问题。此外, 数字测图软件必须考虑分幅, 还出于以下考虑:

- 出图的需要。为符合规范, 应按规定的图幅尺寸和图幅号分幅出图, 为满足用户的

需求,图幅之间应保证拼接的准确性和连续性。

- 提高计算效率的需要。一般说来,外业是分片跑尺测量,没有必要将各片集中到一起再处理。数据可以分片存储,在大于本片一定范围之外的数据,对本片的数据处理没有影响。分幅或分片处理可以大大减少数据处理量,提高运算速度和显示速度。
- 数据管理的需要。分幅管理是解决大量地形数据管理的基本方法。
- 组织作业的需要。多组协同作业时,至少目前还是各自独立工作,在现场并不共享各组的数据,这必然导致分幅或分片作业。

### 7.4.2 地形图的分幅

地形图一般采用正方形(50cm× 50cm)或矩形(40cm× 50cm)分幅。其中正方形分幅中,1 5 000 地形图图幅大小为 40cm× 40cm,1 2 000,1 1 000,1 500 的地形图图幅大小均为 50cm× 50cm(见表 7-12)。在工程用地形图中,也可根据实际需要,采用其它规格或任意分幅。

表 7-12 正方形分幅规格

比例尺	图幅尺寸 / cm	实地面积 / km <sup>2</sup>	一张 1 5 000 图幅 包含分幅图幅数
1 5 000	40× 40	4	1
1 2 000	50× 50	1	4
1 1 000	50× 50	0. 25	16
1 500	50× 50	0. 0625	64

为了便于保管和使用,每幅图都有一个编号,称图号。图号是根据地形图分幅规则和编号方法规定的,并把它标注在图幅上方中间。还可以用所在图幅的主要地名为该图幅命名,称图名。没有主要地物的也可不要图名。

### (1) 正方形图幅的分幅及编号

大比例尺地形图大多采用正方形分幅,即按统一的直角坐标格网分幅,其编号方法一般采用图幅西南角坐标公里数编号法(图 7-6(a));在小测区或带状地区,也可选用自左至右、自上至下的流水编号法(图 7-6(b))或行列编号法(图 7-6(c))。图 7-6(a)为 1:2 000 地形图西南角坐标公里数编号法示意图,编号为 10.0—21.0,1:500 地形图取至 0.01km,1:1 000,1:2 000 地形图取至 0.1km,1:5 000 取至 1km。

某些工矿企业、事业单位占地面积较大,而且要测绘不同比例尺的地形图,此时,编号一般以 1:5 000 图为基础,依次加注罗马字 I, II, III, 如图 7-7 所示。

图 7-7(a)为某一 1:5 000 图幅,以西南坐标公里数编号为 50—80,包括 1:2 000 图 4 幅,其编号是在 1:5 000 图编号的末尾分别加上 1、2、3、4,如 50—80—1 等;同理,如图 7-7(b)所示,1:1 000 图幅编号是在 1:2 000 的末尾分别加 1、2、3、4;1:500

图 7-6 正方形图幅分幅的编号法

图 7-7 不同比例尺地形图的编号法

的编号是在 1 : 1 000 编号的末尾分别再加 1, 2, 3, 4。

(2) 矩形图幅的分幅及编号

1 : 5 000 ~ 1 : 500 地形图采用矩形分幅时, 不论比例尺大小皆为 40cm× 50cm。

矩形分幅是以图幅西南角坐标分别除以图廓 x, y 方向的坐标差  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  作为该比例尺的图号, 在其前面再冠以测图比例尺分母 M 加圆括号, 即

$$(M) \frac{X_{\text{西南角}}}{\Delta x} - \frac{Y_{\text{西南角}}}{\Delta y}$$

例如, 1 : 2 000 比例尺图幅(40cm× 50cm), 西南角坐标为  $x = 20\,000$ ,  $y = 30\,000$ , 则其图幅编号为

$$(2\,000) \frac{20\,000}{800} - \frac{30\,000}{1\,000}$$

即 (2 000) 25- 30

### (3) 任意分幅及编号

譬如要将整个测区画到一张图纸上,或要将测区放在图幅的中心,或绘带状条图等,都可根据需要自行定幅及编号。

#### 7.4.3 分幅的步骤

为满足多方面的需求,在软件的分幅功能中设计了不同的模式和分幅步骤,下面以 EPSW 为例加以说明。

##### (1) 测区的划定

分幅前首先要划定工程作业范围(测区)。如图 7-8 所示,只要输入测区的西南角和东北角坐标,测区范围即可划定。测区西南角坐标可参考测区西南角已知控制点和测区范围以及图幅尺寸,按标准或取整确定。一般划定的范围比实际测区范围要稍大一些,以便于分幅和保证测区边界地形图的正确性和完整性。

图 7-8 测区的划定

##### (2) 分幅

当测区较大时,必须进行分幅处理,但不同的测图工程分幅的要求可能有所不同,通过图 7-8 所示的菜单即可调出国家标准、北京、上海、自由分幅等几种分幅的规定,因为各城市设定了本城市的坐标系统及分幅规定。用户也可设定自己的城市坐标系进行分幅,分幅大小自行设定。

#### 7.4.4 图幅间的接边处理

地形图图幅间的接边处理问题,可以分为平面图的接边处理和等高线的接边处理。

##### (1) 平面图的接边处理

野外实测时,若采用数字测记法,则应随时注意是否测出本幅图的测区,可以通过测

点坐标和图幅坐标比较进行判断;或通过测站和测点的距离进行估计。若采用电子平板仪,则在显示屏上即可一目了然。

在 EPSW 电子平板测图系统中,为简化接边处理,分组测量时采用了按自然地界分工,最后合并统一分幅;或按图幅分工,对接边处的房屋等地物测绘,则进一步规定“右下负责制”,这是指:凡本图幅的右、下边线所及的跨幅地物,应由本图幅测完整,而对左、上边线所及的跨幅地物则不予测量,由其它相关图幅的右、下边完整的测绘地物给予补充。在图 7-9 中,(a)为各组分幅测图拼接后的图;(b)为 1,2,3,4 组分幅测量的图,各负责本幅右、下边界所及之地物;(c)为裁剪出图后,各幅图应有的地物。对道路、河流一类的地物,则按上述规则以直线段、曲线段方法进行处理。

图 7-9 “右下负责制”测图示意

若接边处遇到直线或弧段,一般而言,对于直线段,要求测出图幅外一点即可;对于曲线段,则应测出图幅外二至三点;对于圆弧线,则应测完全部的三点;对于三点圆,也要求测完全部的三点。

直(弧)线接边处理的原理如图 7-10 所示。程序处理时,首先对两幅图接边区域内测点进行判断处理,消除可能重复观测的点,形成统一的一套点位坐标和绘图信息。例如图 7-10 中的直线段,对 A 图幅而言,测 A,A 点,对 B 图幅而言测 B,B ,利用 A,B 点绘制直线。当程序对测点进行判断时,判断 A ,B 距 AB 直线的垂直距离是否在规定的限差范围之内,若在,则删除非本幅的测点(如 A ,B 点)。又如图 7-10 中的弧线段,A 图幅中测了 A,A ,A 点,B 图幅中测了 B,B ,B ,由 A,B ,A ,B ,A ,B 拟合绘出弧线。这样,无论是直线还是曲线,对 A,B 图幅而言,都是同样的绘图信息,同样的点位坐标,绘出同一直线段 AB 和弧段 AB。对两图幅而言,接边的数据都是一样的,所以图幅的接边完全吻合。出图时,只要从图幅边框线处裁剪出图,即完全吻合。

(2) 等高线的接边原理

与平面图的接边类似,为了解决等高线的接边问题,需要在图幅外扩大一定的区域作为接边区(图 7-11 虚线所示)。在扩大后的区域内建立数字地面模型,绘制等高线。

如图 7-11, A 图幅和 B 图幅各自向外扩大了一定区域(一般为图上 0.1m ~ 0.05m),形成一个接边区。为了图示清楚,图 7-11 中有意将 A 图幅纵向绘得窄些, B 图幅纵向绘得宽些,而实际上两幅图是一样宽的。

在接边区内,对 A,B 两幅图而言,均利用同样的高程离散点来建立数字地面模型,连



图 7-10 直(弧)线接边处理

图 7-11 等高线接边处理

接三角网, 所以, 在接边区内, A 图幅的三角形网和 B 图幅的三角形网形是同样的。由于三角形的网形一样, 在接边区内, A 图幅和 B 图幅追踪出来的等值点是完全相同的。如图 7-11 的接边区内, 某一等值点序列为 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 对 A 图幅而言, 要用  $A_1, \dots, A_n$ , 1,  $\dots$ , 8 这些等值点来拟合绘制一条等高线; 对 B 图幅而言, 要用 1,  $\dots$ , 8,  $B_m, \dots, B_l$  这些等值点来拟合绘制一条等高线。下面来说明这两条等高线是基本吻合的。

机助成图程序一般采用三次张力样条函数来光滑等高线, 该函数通过所有等值点, 并且张力系数一致。所以对 A 图幅而言, 等高线必须按张力系数穿过 1,  $\dots$ , 8 点; 对 B 图幅而言, 等高线也必须按同一张力系数穿过 1,  $\dots$ , 8 点, 故此在接边区, 穿过 1,  $\dots$ , 8 点的两条等高线是基本重合的。这样, 就保证了等高线接边的吻合。

应该指出, A 图幅是用三次张力样条函数对  $A_1, \dots, A_n$ , 1,  $\dots$ , 8 这些等值点进行一次光滑处理; 同理, B 幅图是对 1,  $\dots$ , 8,  $B_m, \dots, B_l$  这些等值点进行一次光滑处理, 所以, 理论上讲这两条等高线在接边区不完全重合。但是, 由于接边区有一定的等值点数, 而这些等值点对接边区的等高线影响最大, 因此这两个等高线在接边区, 尤其在边框处是基本重合的, 所以完全满足测量规范的接边要求。

(3) 依据自然地界为分界线的接边处理

数字测图中往往是以自然地界, 如河流、道路、地类界等为各组任务的分界线。这种分

工情况,不仅对外业分工清晰,其接边处理也很简单。

如图 7-12 所示, , 组分工以河流为界, 组测至左岸, 组测至右岸。各组测完本组的任务后分别进行成图编辑处理。由于是以河流为界,两组的数据相互没有影响,因而各自处理起来比较方便。这就要求预先划定图幅并命名(可以公里数或以 A,B,C... 自命名),对合测的图幅则以“组名—幅名”命名。各组分别处理完后,对两组合测的图幅,按图名统一进行合并处理,之后即可全部按图幅出图。

图 7-12 合测图幅的命名

如在图 7-12 中,E 图幅由“ -E ”与“ -E ”两幅图合并,出图时,即可按完整的 E 图幅出图。

## 7.5 图廓

图廓是一幅图的边界,它直接关系到图幅的质量与美观。在《1 500,1 1 000,1 2 000地形图图式 GB 7929—95》<sup>[39]</sup>标准中,对图廓格式作了明确的规定。

图廓有内外之分。坐标格网线最外的四周边线为内图廓,它是一幅图的边界线,标注有坐标值,其内由每隔 10cm 绘制的 5mm 长的十字丝坐标线组成图幅的坐标格网线;外图廓是在内图廓外 12mm 处加绘粗 0.5mm 的图廓线,它使图幅更加紧凑、美观。

图廓的绘制比较规范,所以在一些测图软件中都有预先编制好的图廓样本。绘地形图时,在每幅图上套绘图廓即可。为保证图廓绘制的简便,EPSW 中绘制图廓有以下几个步骤:

划定测区,按图幅大小进行分幅。

填写接图表。接图表是说明本图幅与相邻图幅的关系,通常用周邻图幅的图名以表格的形式(图 7-13)表示,并画在图廓的左上方。由于在划定测区时就分定了图幅,并自动赋有编号,因此,在绘制接图表时,程序将自动填写接图表中相关各图幅的编号。需要时,也可手工键入。

填写图廓注记表(图 7-14)。表中各栏均为图廓周边的各项注记,设置一次以后,由程序自动将各项说明各就各位地绘制到图廓周边。对一个工程或一个测区来讲,内容基本

图 7-13

图 7-14

是相同的,唯有图名是每出一幅图须重新修改一次。绘图时程序将自动调用。

自动绘制图廓。通过前几个步骤的设置,将自动绘制出图中的格网、图廓、注记、接图表、图名、图号等,如图 7-15。

图 7-15

## 7.6 层

如果一个工程数据量过大,可以采取数据分割的手段来减少处理的负荷,减少占用有限的内存,提高数据处理效率。常用的数据分割手段有分片和分层两种方法。

如前所述,分幅、分片测量和分幅、分片存储都是测图过程常用的方法。按幅、按片进行数据处理也是提高数据处理效率惯用的手段;分层则不仅是为了提高数据处理效率,更重要的是适应需要。

层是地形特征属性在同一坐标平面的逻辑意义上的集合,在构造层时每一种属性数据可形成一个独立的层。在数字测图系统中可按地物的属性编码分层。在分层时要考虑地物的特征类别和应用的目的,可以将一种地物要素定义为一层,也可以将同一类的地物要素组合到一层内,如地形图可以构成各种层:图廓层、点号层、高程注记层、房屋(层)、道路、河道、上、下水、电力线、等高线等等。每一层可分别给定它的颜色、是否参加显示和其它操作,如输出等。分层后,对层的操作和使用都十分方便、快捷。如屏幕有限,为了图面清晰,只显示所需要的层;又如编辑地形图时,将等高线层关闭,仅留地物平面层,其编辑、刷新速度将得到提高。分层管理对出专题图也十分有效。测厂区竣工图后,要出房屋坐标图、上水、下水图、电力线图、通讯线路图和热力管网图等等,既可分层出专题图,又可叠加出综合地形管网图。在 EPSW 测图系统中,只要根据属性编码的设置,就可以输出各类专题图。各层还可以在设定颜色后输出。

分幅、分片是数据在平面上的分割,而分层则是数据在竖向上的分割。不论是那一种,它们都不改变数据的统一性、坐标的同一性。分割后坐标重新合并起来,不会带来错位、丢失或增加。因此分割的数据实质仍是一个整体。又如相同图号的一幅各分层图的叠加,仍可成为一幅图。如绘制地形图时,就是将地物平面图和等高线图叠加后绘制成的。可将各层图任意组合后输出。进行分层的另一个作用是可以灵活解决符号的压盖问题,如等高线遇高程注记断开的问题,就可以采取层的优先级来解决。首先设置各层的优先级,编制好的程序自动将优先级高的要素盖住优先级低的要素。路边检查井盖的符号应盖住马路,一些注记应盖住某地物线等。GIS 的数据都是分层来组织的。相应的测图软件只有具备图层管理功能,才能将采集的数据分层传输到 GIS,与 GIS 的数据匹配共享。

AutoCAD 的层称为 layer,其属性包括层名、颜色、线型、是否显示等,每个图形实体都属于某一个图层。

EPSW 的层为适应 GIS 的需要,可以任意设置,如图 7-16 为层次颜色设定对话框。如等高线层的设定,由编码 815~817 为一层(815 为计曲线,首曲线(等高线)为 816,注记为 817)。颜色可按要求设定。开关状态 0 为关闭,1 为开启。这种层的设定可以适应任何 GIS 不同层次设计的要求。

图 7-16

## 7.7 地形图的绘制

经过外业测量和相关的数据处理,就可以建立起测区的地形数据库。地形数据库中保存有全部地物、地貌特征的准确描述数据,但提交给用户应用的测量成果,一般还是采取可视的地形图的形式。因为只有通过图才能使人快速地认识测区整体地形的形象特征,单纯靠一些数据是很难建立实体地形的概念。即使是 GIS 和 CAD 系统所要求的数字地图,也是不仅仅有按通用的图形数据格式存储的图形文件,同时也要生成屏幕可视地形图。就外业测量而言,也是要通过图才能更好地发现观测成果的错误和评定成果的质量,因而可视地形图的绘制在数字测图中仍是十分重要的,何况传统的纸质地形图目前应用仍十分广泛。所以,一个完善的数字测图系统,既要能存储或输出完整的测量定位及图形和属性信息,又要能绘制精美、规范的纸质(聚酯薄膜)地形图。

根据地形测量数据文件和出图范围自动绘制地形图的一般过程如图7-17所示。图7-18为 EPSW 测图系统基于地形数据库自动绘制地形图的过程。

EPSW 在现场实时测量、实时显示成图,因此各类、各个地物数据在测量的同时,根据编码和连接信息等已经组织在一起,经过检验正确后,已存入地形数据库。也就是说一些绘图所需的地物元素结构已经组织在数据库中。在绘图时,只需按指定的出图范围,从库中直接提出地物元素结构,生成地物平面图(亦可随时打印出来检查),经过编辑、整饰,即可生成规定的图形(接口)文件(EPSW 采用 .DWG 的图形文件格式),绘制地形图,图7-19 为现场测绘的地形图。

等高线由于数据量很大,所以不是直接存在库内,而是单独建立等高线文件,与地物平面图数据汇合生成 .DWG 文件后,再绘制地形图,如图 7-20。

图 7-17 自动绘制地形图的一般过程

图 7-18 EPSW 基于地形数据库自动绘制地形图的过程

图 7-19 EPSW 现场测绘的部分地形图



图 7-20 EPSW 测绘的有等高线的地形图

## 8 图式符号库的设计

### 8.1 建立图式符号库的一般原则

地形图图式是地形图上表示各种地物和地貌要素的符号、注记和颜色的规则 and 标准,是测绘和出版地形图必须共同遵守的基本依据之一,是由国家统一颁布执行的标准。统一而标准的图式科学地反映了实地的形态和特征,是人们识别和使用地形图的重要工具,是测图者和用图者相互沟通的语言。为使数字地形图更好地满足各部门的需要,数字测图软件不仅需要建立一个完整的图式符号库,而且在其设计上,还应当遵守国家或部门的有关标准。

地形图图式中内容的表达,首先是将符号分类,规定每一种地物用什么样的符号来表示;其次是这些符号使用方法的規定,包括符号的定位点或定位线、是否依比例尺绘制、符号的方向和配置等方面的規定。

数字测图软件的图式符号库是实现以国家标准地形图图式表征数字图的重要手段,库的功能和内容要首先提供各种地物符号的绘制方法;其次是对这些符号的组织、检索、管理和应用的方法;此外还必须提供对符号库进行增加、删除、修改等操作的维护功能,以满足不同专业用户的需求。

对于不同的比例尺,图式中有不同的規定,这种不同可以体现在符号的类型图案以及依何种比例尺等方面。在一个完善的图式符号库中,应包括不同比例尺的符号。除了国家标准外,在铁路、电力等行业还制定有各自的部门标准,它们主要是针对专业特点作了若干补充,当然也可能带来符号分类体系的变化。随着测绘事业的发展,特别是计算机应用的推广,图式本身也存在更新的问题。所有这些都要求数字测图软件的图式符号库能适应不同应用条件的变化,适应图式自身的变化,因此,符号库应具有自我更新和调整的能力。

地形图图式是一个复杂的规则体系,各种符号的应用和配置方法对于人工来说还比较好掌握,对于机器来说就必须具备严格的转换规则,因此,原图式符号中的有些符号用计算机软件将其完全彻底地实现有相当大的难度,某些符号甚至很难用计算机绘制。因此设计图式符号库时,除了要考虑符号与规则的完整性,同时还要针对计算机绘图的特点,对这些符号根据实际应用和实现的情况进行必要的简化。国家测绘局标准化研究所已制定了计算机绘图的图式符号标准<sup>[39]</sup>,使计算机绘制地形图有了可行的统一的依据,但图式符号计算机化问题仍需探索。

## 8.2 图式符号库的设计原理

### 8.2.1 设计思想

数字测图软件的图式符号库的设计思想应当与其图形系统的实现方法相一致。对于早期不具备专用图形系统的软件,如 CAMAP 等来说,地形图的生成是依赖于 AutoCAD 环境,其符号库的建立,就不可避免地要以 AutoCAD 有关概念和方法为基础,如图块 (BLOCK)、线型 (LINETYPE)、填充 (HATCH) 等类符号的建立、使用和维护,基本上应用 AutoCAD 所提供的命令和数据结构。另外还有一些软件本身就是在通用的 CAD 图形软件(如 AutoCAD 或 Microstation)下开发和运行的,其符号库就更是如此了。

对于具有独立的图形系统的数字测图软件,如 EPSW 等,符号库的设计有两种方案,一种是沿用通用 CAD 图形软件的符号库系统,并实现与之兼容的应用程序;另一种是根据自己的图形数据结构和图形应用平台,开发专门的符号库结构和实现方法,并专门设计各种符号。无论是否应用通用的 CAD 图形软件,都会有一些图式符号难以用一般化的描述方法来实现,例如斜坡、广告牌、台阶等(图 8-1),只能分别编写专门的绘制程序,并形成各自的应用方法。

图 8-1 特殊符号类型

图 8-2 查询方法

### 8.2.2 编码与符号的分类

无论用什么方法实现图式符号库,地物编码都是最基本的索引项目,符号库必须根据编码来组织,在查询时主要根据编码来查找相应的图式符号或符号绘制方法,查询方法如图 8-2 所示。

对图式符号按其表征的方法特性进行分类,是简化符号库系统的重要手段。同一类的符号可以用相同的模式来描述,也就是说它们在实现和应用时的输入、输出项目是类似的,实现方法是相同的,只是数据不同而已。这样就可以将整个图式符号库分成若干子库,每个子库代表一类符号,按照该类符号的共同特点组织符号的描述数据,并对应统一的应用方法。因此,建立图式符号库时,分类的依据主要在于它的实现方法或操作。对图式符号进行分类时,还有赖于数字测图软件的图形支持系统所提供的符号绘制方法,例如 AutoCAD 中的 BLOCK、LINETYPE、HATCH 等功能, Microstation 中的 CELL, LINETYPE, MULTILINE, HATCH 等功能,就可用来绘制符号。一般看来,各种符号可分作点状、线状、面状三大类,并在大比例尺图式规范中作了一些具体规定。

(1) 点状符号只有一个定位点,对应一个固定的、不依比例尺而变化的图形符号。根据朝向不同,其又可以分为垂直于南图廓和按真实方向描绘两类。例如,消火栓、独立针叶

树属前者, 门墩、污水篦子及地下建筑物的地表出入口(不依比例尺)等属后者(图 8-3)。

图 8-3 两类点状符号

- (2) 线状符号的特点是根据定位线绘制, 依据线划构成的复杂程度不同, 它又分为:
- 比较简单的(用抬、落笔即可控制的)线型, 如大车路(一边虚线一边实线)、行政区境界线等(图 8-4);

图 8-4 简单线型

- 比较复杂的(需要用独立符号进行组合的)线型, 如行树、高压电力线、坎、石质无滩陡崖等(图 8-5)。

图 8-5 复杂线型

(3) 面状符号的定位线要求构成封闭的区域, 根据填充方式的不同, 又可分成点填充方式(如草地, 树林)及线填充方式(如房屋的晕线), 如图 8-6 所示。

图 8-6 面状符号的点、线填充方式

另外还有少数符号极具特殊性, 如坡、坡上线及坡下线符号, 上下关联; 又如广告牌, 局部依比例, 局部又不依比例。它们各具自己的特点, 需专门编程绘制, 归为特殊符号类。

### 8.3 基于 AutoCAD 建立图式符号库的基本方法

一些基于 AutoCAD 二次开发的软件, 如 CAMAP 等, 考虑在 AutoCAD 下建立图式符号库。本节介绍在 AutoCAD 中建立图式符号库的方法。与建立图式符号库有关的几个概念主要是 BLOCK(图块), LINETYPE(线型), HATCH(填充)等, AutoCAD 提供了建立用户定义的图块、线型和填充图案的手段和应用方法。

#### 8.3.1 BLOCK(图块)

AutoCAD 中的图形元素称作实体, 图块是若干实体的集合, 也是一个实体, 并被赋予一个名称。因此对图形中的图块可作为一个整体进行操作, 如拷贝、移动、选取、删除等,

图块定义有一个插入点,即定位点。图块可以保存在文件中。

(1) 图块的定义方法——BLOCK 命令、WBLOCK 命令

假定当前图形中画有导线点的符号,如图 8-7 所示,如下述操作可以把它定义成图块 G105,并保存在文件 G105.DWG 中:

```
Command: BLOCK [ENTER]
Block name(or?): G105 [ENTER]
Insertion base point: 5,5 [ENTER] (定位点的坐标)
Select objects: (选取该图形中需作定义的全部实体)
Select objects: [ENTER]
Command: WBLOCK [ENTER] (将图块定义写入文件)
File name: G105 [ENTER]
Block name: G105 [ENTER]
```

图 8-7 导线点的符号

其中下划线表示用户输入的内容,[ENTER]表示回车。

(2) 图块的使用方法——INSERT 命令

如前面建立的图块文件 G105.DWG,从下面说明可以看到图块的使用方法:

```
Command: INSERT [ENTER]
Block name(or?): G105 [ENTER]
Insert point: 123.456,123.456 [ENTER]
X scale factor< 1> /corner/XYZ: 1000 [ENTER]
Y scale factor(default= X): [ENTER]
Rotation angle< 0.0> : [ENTER]
```

以上操作将把名为 G105 的图块插在坐标点(123.456, 123.456)上,其中,Block name 提示输入图块名,AutoCAD 将首先在当前图形文件中查找该图块,如果不存在,则查找以它为名字的图形文件,将它作为图块插入到当前文件中。

Insert point 提示输入插入点的位置;

X scale factor 提示输入图块插入时,x 方向的缩放比例,当图块用图纸尺寸定义时,应当输入地形图比例尺的分母,上例中比例尺为 1 1000;

Y scale factor 提示 y 方向的缩放比例,默认值为与 x 方向相同;

Rotation angle 提示输入图块插入时的旋转角。

(3) 用图块功能建立点状(独立地物)符号库

应用上述建立图块的方法,可以将每一个点状符号制作成图块,并分别保存在文件中。图块和相应的图块文件的名称可以用对应地物的编码生成,如上例的 G105 中,105 就是导线点的编码。这样形成一组图块图形文件,在需要使用某一独立地物符号时,根据编码取得文件名,就可以直接得到以独立的图形文件形式存在的符号了。利用 AutoCAD 可以很方便地修改符号或新增符号。库的维护只涉及管理文件的操作。

8.3.2 LINETYPE(线型)

AutoCAD 中的 LINETYPE(线型)是线实体的属性之一,它主要由点和线划构成。

AutoCAD 定义的标准线型有以下几种(图 8-8):

图 8-8 AutoCAD 定义的标准线型

实体的线型可以在绘制实体前设定,也可以在绘制后进行修改。AutoCAD 允许定义用户自己的线型。

(1) 装入和设置线型——LINETYPE 命令

AutoCAD 使用线型文件时,一个线型文件中可以保存若干种线型的定义,默认 的线型文件是 ACAD.LIN。假设有线型文件 DAOLU.LIN,其中存有线型 XIAOLU,选用该线型的方法如下:

```
Command: LINETYPE [ENTER]
? / Create/ Load/ Set: L [ENTER]
Linetype(s) to load: XIAOLU [ENTER]
File to search< ACAD> : DAOLU [ENTER]
Linetype: XIAOLU loaded
? / Create/ Load/ Set: S [ENTER]
New entity linetype(or?)(BYLAYER): XIAOLU [ENTER]
? / Crente/ Load/ Set: [ENTER]
```

其中? / Create/ Load/ Set 为 LINETYPE 命令的四个子项,? 表示查询已装入的线型名称,Create 表示生成新线型的定义,Load 表示装入线型,Set 表示设置当前线型;

Linetype(s) to load 提示输入要装入的线型名称;  
File to search 提示输入要装入的线型定义所在的文件名称,默认为 ACAD.LIN。

(2) 定义用户自己的线型——LINETYPE 命令

以小路(图式符号如图 8-9 所示)为例,定义用户线型的方法如下:

```
Command: LINETYPE [ENTER]
? / Create/ Load/ Set: C [ENTER]
Name of linetype to Create: XIAOLU [ENTER]
File for storage of linetype< ACAD> : DAOLU [ENTER]
Creating new file
Descriptive text: XIAOLU- - - - [ENTER]
Enter pattern (or next line):
A, 0.004, - 0.001, [ENTER]
New definition written to file
```

图 8-9 小路的符号

? / Create / Load / Set: [ENTER]

其中的 Name of linetype to Create 提示输入要定义的线型名; File for storage of linetype 提示输入存储线型定义的文件名, 若该文件已存在, 新的线型将加入其中, 否则将创建新文件; Descriptive text 是指注释文字, 例中为四个下划线和其间一个空格, Enter pattern(or next line) 提示输入线型的定义, 各项之间用逗号隔开, 每一项可以是

- 字符 A: 标准方式(目前不支持其它标准方式);
- 正数: 如 0.004, 表示落笔前进长度;
- 负数: 如- 0.001, 表示抬笔前进长度;
- 0: 表示一个点(构造点划线时可用)。

由于只能使用点和线划, AutoCAD 的线型功能是极有限的, 只能建立一些简单线型的定义, 如实线、虚线、点划线等, 很难满足丰富多样的线状符号的要求, 用户须自行补充。

### 8.3.3 HATCH(填充)

AutoCAD 中的 HATCH 命令, 提供了用特写图案模式(Pattern) 填充封闭区域的功能。填充模式可以是晕线, 也可以是图块。填充区域内部允许有岛, 并且既可以考虑岛的内部不填充, 也可以忽略岛。AutoCAD 提供了标准的填充模式库, 也允许建立用户自己的填充模式库, 因而能够为整列式的面状符号建库。

#### (1) 填充封闭区域的方法——HATCH 命令

假设建立了草地的填充模式, 名为 G142, 用它填充一个封闭区域的方法如下:

Command: HATCH [ENTER]

Pattern( ? or name/ u, Style): G142 [ENTER]

Scale for pattern< 1000> :1000 [ENTER]

Angle for pattern< 0> :[ENTER]

Select objects: (选取区域边界)

Select objects: [ENTER]

其中的 Scale for pattern 提示输入填充比例尺, 例中的填充图案按地形图图式尺寸制作, 故输入图纸比例尺(1 1000) 分母, Pattern 提示输入填充图案名, AutoCAD 将首先在 ACAD.PAT 中查找该图案的定义, 如果没有, 则查找扩展名为.PAT 的同名文件。

#### (2) 定义填充模式的方法

AutoCAD 允许用户自定义填充模式, 用户可以用纯 ASCII 文本编辑器, 如 EDIT 等, 将模式定义写入 ACAD.PAT 或其它后缀为.PAT 的文件。

填充模式由若干线划构成, 它们在同一个坐标系中, 按各自的倾角和位移重复配置, 填满全部填充区域。

每个线划的定义由“倾角、起点 x 坐标、起点 y 坐标、径向位移、法向位移、线划长度”构成, 其中“线划长度”可以不止一项, 取正值表示落笔, 取负值表示抬笔;“径向位移”指重复该线划时起点沿线划方向的偏移量;“法向位移”为垂直线划方向的偏移量。

每个填充模式的定义由图案名及文本注释开始, 后面每行给出一个线划定义。例如草地的填充模式定义如下:

\* H142, Caodi

90, 0, 0, 0.01, 0.01, 0.0015, - 0.0185

90, 0.0008, 0, 0.01, 0.01, 0.0015, - 0.0185

其填充效果如图 8-10(a) 所示; 又如特种房屋:

\* H251, Tezhong Fangwu

45, 0, 0, 0, 0.0015(倾角, x, y, 径向位移, 法向位移)

135, 0, 0, 0, 0.0015(倾角, x, y, 径向位移, 法向位移)

填充效果如图 8-10(b) 所示。

图 8-10 草地和特种房屋的填充效果

## 8.4 EPSW 的图式符号库

对于具有独立的图形系统及界面的数字测图软件来说, 因为是直接调用和显示各类符号, 所以要根据其图形系统的功能和特点来组织、建立、使用自己的图式符号库。在这种情况下, 设计符号库有几种策略, 一种是采用 AutoCAD 或其它 CAD 软件的符号库, 这样大部分的建库和维护功能由 CAD 软件实现, 但是为了在自己的界面中显示各种符号, 就必须彻底了解 CAD 软件的符号库结构, 才能正确地调用; 另一种是自行设计图形描述方法和符号库结构, 这种设计可以充分考虑图形系统的特点, 最大限度地提高运行效率, 如果需要, 可在生成地形图并输出到 AutoCAD 等软件格式时, 将符号同时进行转换。

EPSW 的图形系统以 Windows 的图形设备接口 GDI 为核心, 设计开发了具有高度开放性的符号库系统。

EPSW 将全部图式符号分作六类: G 类(独立符号)、L 类(简单线型)、LC 类(复杂线型)、H 类(填充模式)、E 类(特殊符号)、Y 类(结构类符号)。其中, E 类和 Y 类中每个符号都用专门的程序实现, 其余四类各自有专门的符号定义体结构和通用的处理程序, 它们的定义体全部存放在一个名为“SYMBOL.DAT”及“SYMBOL.NAM”的系统文件中。

### 8.4.1 G 类符号(独立符号)

G 类符号是用来描述独立地物的点状符号, 在 EPSW 中也用其描述在复杂线型或填充模式中出现的各种图元。G 类符号不具有方向性, 始终朝向图廓北方向, 因此依真实方向绘制的独立符号, 如门墩等, 不在此类。G 类符号不依比例尺绘制, 其定义格式如下:

\* 编码 G

< 定义体> (\* 为起始标识符, G 为符号类别)



其中定义体可以有多个行, 每行是下列 5 种情况之一:

- 1. 两点直线       $x_1, y_1$        $x_2, y_2$   
直线起点坐标  $x_1$ , 直线起点坐标  $y_1$ , 直线终点坐标  $x_2$ , 直线终点坐标  $y_2$ ;
- 2. 连续折线       $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots$   
转折点坐标  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots$ ;
- 3. 圆  $(x, y, R)$   
圆心坐标  $(x, y)$ , 半径  $R$ ;
- 4. 圆弧(逆时针)  
圆心坐标  $(x_0, y_0)$ , 起点坐标  $(x_1, y_1)$ , 终点坐标  $(x_2, y_2)$ ;
- 5. 点      坐标  $(x, y)$ 。

以上数字 1, 2, 3, 4, 5 分别为 5 种情况的标识符。

G 类符号的插入点坐标为  $(0, 0)$ , 坐标的单位是 mm, 例如导线点(编码为 105)的定义如下:

```
* 105 G
5 0.0,0.0
1 - 1.0,1.0, - 1.0,- 1.0
1 - 1.0,- 1.0, 1.0,- 1.0
1 1.0,- 1.0, 1.0,1.0
1 1.0,1.0, - 1.0,1.0
```

EPSW 提供了一个自动转换 AutoCAD 图块文件的程序 EXSCR · EXE, 可以把 AutoCAD 的图块定义转换成 EPSW 的定义格式, 因而为建立符号库提供了简便的手段。

8.4.2 L 类符号(简单线型符号)

L 类符号为简单线型, 兼容 AutoCAD 所定义的线型。简单线型的线划结构的具体定义存放在 ACAD.LIN 中, 在 SYMBOL.DAT 的描述格式如下:

```
* 编码 L 线型号
```

例如线型号取 0 ~ 6, 相应的 ACAD.LIN 中有如下定义:

8.4.3 LC 类符号(复杂线型符号)

LC 类符号为复杂线型,它与简单线型的区别在于使用各种图元组合成线。LC 类又分作“行树、围墙类”和“电力线类”。

(1) 行树类。其特点是在一条连续的线间按一定规律插入图元,定义格式为:

\* 编码 LC

< 定义体>

其中定义体可以有多行,每行可以按需要重复出现,参数为

- G 图元名: 插入图元;
  - W 平行线间距(mm): 绘平行线(只可出现一次);
  - P 坐标 x, 坐标 y: 绘点;
  - L 或 R 或 M: 测点居左/右/中(只可出现一次);
  - C 笔号: 换笔;
- 线划长度(取正值落笔,负值抬笔)。

例如行树(编码为 133)的定义为:

\* 133LC  
G 0001- 10.0

其中,G 0001 为圆的图元,行树符号如图 8-11 所示。

图 8-11 行树符号

又如 1 500 的铁路(编码为 554)的定义为:

\* 554 LC  
G 0082+ 10.0W3 L

图 8-12 铁路符号

其中 G0082 为“枕木”符号的图元号。铁路符号如图 8-12。

(2) 电力线类。其特点是在两端点及其连线上插入图元, 定义格式为:

\* 编码 LC    n1    n2    n3    n4    n5  
    < 定义体>

其中定义体的规定与行树类相同, 其余几项为

- n1: 取 D 表示连线, 取 N 表示不连线;
- n2: 取 1 表示仅在中点上插图元, 取 2 表示在两端点插图元, 取 3 表示在中点和两端点插图元;
- n3: 取 A1 表示插图元时随连线方向旋转, 取 A0 表示不旋转;
- n4: 取 0.5 表示插入符号时离开插入点 0.5mm;
- n5: 取 Cn, 其中 n 表示中间线的颜色号。

例如低压电力线( 编码为 602) 的定义为:

\* 602 LC D2 A1 0.5 C2  
G 0009 G 0010

图 8-13 低压电力线

其中 G 0009, G 0010 分别为      和      的图元名, 符号如图 8-13 所示。

8.4.4 H 类符号(面状符号)

H 类符号为面状符号的填充模式, 其定义格式为:

\* 编码      H      边界线型号  
    < 定义体>

其中, 边界线型号与 L 类的规定相同; 定义体可以有多行, 每一行的基本格式为:

N1    N2    N3    N4    N5    N6

- 其中
- N1——“ 1 ”或“ 2 ”, 取“ 1 ”表示用 G 类符号填充, 取“ 2 ”表示用晕线填充;
  - N2, N4——线倾角 1, 线倾角 2;
  - N3, N5——线间距 1, 线间距 2;
  - N6——填充的图元编码。

例如水稻田( 图 8-14(a)) ( 编码为 164), 其边界为虚线, 填充图元的编码为 094, 图元位于 45 与 135 两组斜线的交点上, 线间距为 14.1mm, 且线本身不画, 则其定义为:

\* 164    H    1  
1    45    14.1    135    14.1    94

又如特种房屋( 图 8-14(b)) ( 编码为 251), 由实线边界和相互交叉的两组实线构成, 定义为:

图 8-14 水稻田和特种房屋的 H 类符号

*	251	H	0
	2	45	1.5
	2	135	1.5

#### 8.4.5 E 类符号(特殊符号)

特殊符号,即由程序内部处理的符号。定义为:

*	918	E	1	均分坡
*	919	E	2	垂线坡
*	406	E	3	广告牌
*	233	E	4	平行台阶
*	234	E	5	垂线台阶

其中,E 示进入特殊符号,序号用来区分符号。

以上各类符号的定义在 SYMBOL.DAT(Y 类定在 SYM- YACC.DAT)中顺序存放,为了提高查找效率,在 SYMBOL.DAT 起始部分存有全部符号的索引,包括各符号的类型和定义体位置等参数。根据编码可以查取对应符号的索引,查得定义体位置后就可以读出符号的定义数据了。

#### 8.4.6 Y 类符号(结构类符号)

Y 类,如天吊、依比例的水闸等以多点定位表示的符号,其特点是符号结构一定,但符号尺寸(长度和宽度)可变,取决于定位点位置。

定义格式如下:

*	编码	Y	结构代码
---	----	---	------

每个结构类符号由专用程序绘制。

### 8.5 图形应用接口

选择合适的图形应用接口,最关键的因素是数据的交换能力。生成的地形图需要被显示、编辑、输出、应用,因而地形图应以公用的图形数据格式存储和交换。

目前测图软件基本上都选用国内应用十分广泛的 AutoCAD 图形格式,这样不仅可以利用 AutoCAD 强大的图形编辑功能,对自动生成的地形图作进一步的整饰,还使得地形图成果能够与众多的 GIS 或 CAD 软件接轨。AutoCAD 的图形接口基本上有 3 种:SCR, DXF, DWG。

SCR 接口是 AutoCAD 提供的一种批处理命令输出方式,即将绘图的各种命令,连同批处理命令以及交互执行时需要的全部参数写入 SCR 文件,然后由 AutoCAD 从该文件中顺序读入和执行这些命令,生成地形图。这种方法的特点是接口设计简单,只要懂得 AutoCAD 的操作就能编程实现,但是最终生成图形和保存的图形文件必须经过 AutoCAD 处理且执行速度非常慢。早期的测图软件如 CAMAP 采用的就是这种格式。

DXF 文件是 AutoCAD 提供的一种公开的标准格式的图形文件,主要用于图形数据

交换。DXF 文件中直接存放图形中的全部实体的描述数据和各种图形参数, 由于采用文本格式, 文件的存储量非常大。DXF 文件可以被大多数图形系统接受, 被广泛地用作各种系统间的图形数据交换格式。

DWG 文件是 AutoCAD 的标准图形文件。在这 3 种方式中, AutoCAD 读入 DWG 文件并显示出图形的速度最快, 因此直接生成 DWG 文件是最理想的方式。

Microstation 的图形处理能力也非常强大, 它的 DGN 图形文件也是一种值得考虑的数据交换格式, 只是目前在国内的应用不如 AutoCAD 广泛。

转成 AutoCAD 或 Microstation 的格式输出地形图的好处是, 除了利用其格式的广泛兼容性和它们杰出的图形编辑功能外, 还可以利用它们丰富的设备驱动程序, 实现地形图的硬拷贝输出等功能。

## 9 建立 DTM 的原理和方法

### 9.1 概述

DTM(digital terrain model)即数字地面模型,简称数模,是以数字的形式按一定的结构组织在一起,表示实际地形特征的空间分布,也就是地形形状大小和起伏的数字描述。只有在 DTM 的基础上才能绘制等高线。数字表示方式包括离散点的三维坐标(测量数据)、由离散点组成的规则或不规则的格网结构、依据数模及一定的内插和拟合算法自动生成的等高线(图)、断面(图)、坡度(图)等等。

DTM 的核心是地形表面特征点的三维坐标数据,和一套对地表提供连续描述的算法。最基本的 DTM 至少包含了相关区域内平面坐标(x,y)与高程 z 之间的映射关系,即

$$z = f(x,y) \qquad x,y \text{ DTM 所在区域}$$

在航片数据采集中,数据点往往呈规则格网分布,其平面位置可由起始点坐标和点间格网的边长确定,只提供点的行列号即可。这时所指的地形特征仅指地面点的高程,所以不少文献又将这种数字地形描述称为数字高程模型(digital elevation model,DEM)。

通过 DTM 可以得到有关区域中任一点的地形情况,计算出任一点的高程并获得等高线。DTM 还可以用于计算区域面积,划分土地,计算土方工程量,获取地形断面和坡度信息等。

建立 DTM 需要在有关区域内采集相当数量的地形数据,采样点的位置和密度都可能影响 DTM 的精度,插值算法和数据结构的选择同样会影响 DTM 的精度和使用效率。目前,DTM 已经成为地理信息系统(geographical information system, GIS)的重要组成部分。GIS 的许多功能是以 DTM 为基础的,DTM 的原理还适用于水文、海洋及气象的数据处理。

DTM 系统主要是由计算机程序实现的,应用于各种类型计算机系统的 DTM 已经在许多国家开发成功,尽管使用的方法不同,用户界面各异,但主要功能都是从离散数据构造出相互联接的网格结构,以此作为地形的数字模型基础。等高线、断面和三维地形图都是根据这个模型生成的。

综上所述,建立一个数字地面模型系统必须具有以下几个基本组成部分:

- 数据的获取;
- 数据的转换;
- 数据的预处理;
- 构网建模;
- 存储和管理;
- 数模的应用。

由于实际地形表面有连续变化,也有断裂,而构造 DTM 时采集的数据量是有限的,因此如何选择构造 DTM 的算法及应用时的插值算法,以利用有限的数字准确地表达实际的地形变化,是 DTM 研究的重要课题。评价 DTM 系统性能的主要参数有精度、计算

速度、处理的数据量、用户界面和数据采集工作量等。

## 9.2 数据的获取、转换及预处理

### 9.2.1 数据的获取

DTM 的数据获取就是提取并测定地形的特征点,即将一个连续的地形表面转化为一个以一定数量的离散点表示的离散的地表。离散点数据的获取是建立数模最费工时而又最重要的一步,它影响着建模的正确性、精度、效率、成本。

完善的 DTM 系统应具有各种类型数据输入的接口,它可以接受野外测量仪器直接传输的数据,还可以接受由人工键入的测量数据;也可以接受航测照片经立体坐标量测仪或解析测图仪等量测的三维地形数据;遥感图像经图像处理系统处理后也可得到地形数据。因此 DTM 数据获取部分应包括计算机与不同的设备,如全站仪、电子手簿、数字化仪……进行数据传送的接口。

### 9.2.2 数据的转换

不同来源的原始数据类型可以是各种各样的,例如三维坐标或距离、方位角等。数据中除了离散点的坐标信息,还包含离散点之间的地形关系及地物特征等信息。因此,DTM 系统还要有数据格式转换的功能。不同类型的原始数据经过处理之后,转换成 DTM 系统的标准格式(一般为三维坐标)数据,但不能影响原始数据精度。转换模块需对原始数据进行分类,把坐标数据、连接信息、地物特征等按标准格式分别存放。

### 9.2.3 数据的预处理

(1) 通过数据采集、数据转换得到一组(或一个区域)的原始 DTM 数据,其中可能包含不符合建立数模要求的数据,甚至有错误的数据。为了顺利完成构网建模,首先要对原始数据进行必要的预处理,如数据过滤,剔除几乎重合的数据,给定高程限值,剔除粗差数据,进行必要的数据加密等等,同时程序还应提供编辑数据的工具。

(2) 除地面坐标数据之外,地形和地物的特征信息,如地性线、山脊线、山谷线、断裂线等,是 DTM 不可缺少的要素。为了便于计算机程序识别和提高工作效率,这些信息是由地形地物的特征代码及连接点关系代码表示的。从原始数据中提取地形地物特征信息的依据是数据记录中的特定编码,不同类型的原始数据可采用不同的编码方式,但在采集数据过程中要遵循测量软件规定的相应规则。

DTM 系统的特征提取部分功能包括:

- 识别原始数据记录中的特征编码;
- 将地性线特征编码和相关的空间定位数据转换成 DTM 标准数据格式;
- 提取地性线、断裂线以及处理特殊地形(如陡坎等);
- 数据编辑。

## 9.3 DTM 的数据结构

DTM 的数据结构对 DTM 的应用有着重要的影响,不同的数据结构采用的算法不同,占用的存储空间大小不同,进行计算时的效率也不相同。

DTM 是由离散数据点构造出的,其最简单的结构是离散点结构。这种结构的 DTM 中只包含了分块、分类存储的离散点坐标和某些断裂线地物的连接信息。由于离散点结构不利于 DTM 的进一步应用,实际中很少采用。

DTM 常用的数据结构是格网结构,即将离散点连接成为多边形格网。它可分为规则和不规则格网。

### 9.3.1 规则格网结构

规则格网结构是将离散的原始数据点,依据插值算法归算出规则形状格网的结点坐标,每个结点的坐标有规律地存放在 DTM 之中,最常用的结构是矩形格网(图 9-1(a))。航测内业一般是按规则格网结构采点。矩形格网的存储结构如图 9-1(b)所示。由于矩形格网中结点分布具有规律,各结点的坐标可以用它在格网中的位置代替,因此矩形格网可以用一个二维数组(矩阵)进行存储,并且仅存储各结点的高程。

图 9-1 规则格网结构

规则格网结构便于数据的检索,可以用统一的算法完成检索和插值计算。但它的建立过程中对原始数据进行归算时,所用的算法对数据精度有所影响。规则格网应用于不规则边界区域时,边界处需要特殊处理。

### 9.3.2 不规则格网结构

不规则格网是以原始数据的坐标位置作为格网的结点,组成不规则形状格网。实际应用中主要采用的是不规则三角形格网(triangle irregularation network, TIN),如图 9-2(a)所示。

建立不规则格网的算法比较复杂,但具有如下特点:利于用原始数据作为格网结点;不改变原始数据及其精度;保存了原有的关键地形特征;利用 TIN 追踪等高线的算法相对简单;TIN 能够较好地适应不规则形状区域。



图 9-2 不规则三角形格网及其存储结构

TIN 结点坐标的数据结构如图 9-2(b) 所示, 数据结构中仅使用了点号, 根据点号在坐标数据文件中查找坐标。这两部分的数据结构核心分别是坐标数组和三角形数组, 结点用其在坐标数组中的存储位置(或称下标)作为点号; 三角形用其在三角形数组中的存储位置作为三角形号。

三角形数组中也不允许重复存储, 因此规定每个三角形的三个顶点按顺时针(或逆时针)排列, 并且以点号最小的顶点作为第一顶点; 全部三角形按各自的第一顶点的点号大小顺序排列(图 9-2(c)), 即

$$\text{点号 } 1 < \text{点号 } 2, \quad \text{点号 } 1 < \text{点号 } 3, \dots\dots$$

当然, 也可以采用其它规则。TIN 的数据结构如图 9-2(d) 所示。

无论是规则格网或是不规则格网(主要是矩形格网和 TIN), 因各有特点, 所以都得到了广泛的使用。

DTM 的数据结构还包括等高线结构和带状断面结构, 由于等高线和断面都可以从

格网结构中获得,后两种结构也可以看成是格网结构的应用。

## 9.4 TIN 的建立

### 9.4.1 TIN 的概念

TIN(不规则三角形格网),是直接利用测区内野外实测的所有地形特征点(离散数据点),构造出邻接三角形组成的格网型结构。TIN 的每个基本单元的核心是组成不规则三角形的三个顶点的三维坐标,这些坐标数据完全来自原始测量成果。由于观测采样时选取观测点是由地形决定的,一般是地形坡度的变换点或平面位置的转折点,从而使得离散点在相关区域中非规则和非均匀分布。由这些点构成的三角形格网所包含的三角形,必然是不规则形状的三角形,网格中三角形的数目只有在格网形成之后才能确定。但根据计算几何学,设区域中共有  $n$  个离散点,它们可构成的互不交叉的三角形的数目最多不超过  $2n - 5$ 。

TIN 是不规则格网中最简单的形态,而且在等高线追踪、三维显示及断面处理等应用中也是最常用和最简单的结构。

在大比例尺数字测图的建模中,都是采用三角形格网法。它避免了内插方格网而牺牲原始测点的精度,从而保证了整个数模的精度。

### 9.4.2 TIN 格网的算法

建立 TIN 的基本过程是将最邻近的三个离散点连接成初始三角形,再以这个三角形的每一条边为基础连接邻近离散点,组成新的三角形。新三角形的边又成为连接其它离散点的基础,如此继续下去,直到所有的三角形的边都无法再扩展成新的三角形,而且所有离散点都包含在三角网中。在生成 TIN 的过程中,还要考虑地性线、地物等对格网的影响。为了保证 DTM 格网最大限度地符合实际地形,应用中通常把地性线等地形特征线作为 TIN 中三角形的边,扩展 TIN 时,先从地形特征线开始。

构造 TIN 时,由于取相邻离散点的判断准则不同,就产生了生成 TIN 的不同算法。常用的有:

- (1) 泰森(Thiessen)多边形算法
- 泰森多边形的概念是将分布在平面区域上的一组离散点用直线分隔,使每个离散点都包含在一个多边形之内(图 9-3 中虚线所示)。进行分隔的规则是:每个多边形内只包含一个离散点,而且包含离散点  $P_i$  的多边形中的任意一点  $Q$  到  $P_i$  的距离都小于  $Q$  点到任一其它离散点  $P_j(j \neq i)$  的距离。把每两个相邻的泰森多边形中的离散点用直线连结后生成的三角形称为泰森多边形的直线对偶,又称为 Delaunay 三角形。其特点是:每个 Delaunay 三角形的外接圆内不包含其它

图 9-3 泰森多边形

离散点,而且三角形的最小内角达到最大值。

可以通过构造泰森多边形产生 Delaunay 三角形格网,也可以根据 Delaunay 三角形的特点直接构成 TIN。

文献[ 19]提出了通过泰森多边形建立三角形格网的一种方法,分三步构造成一个泰森多边形。

建立离散点相邻数组

取一离散点 A,并以 A 为圆心确定一个圆方向,使所有可能与 A 相邻的离散点都包括在圆方向内,并将圆方向内全部离散点按图 9-4 所示顺序存入数组  $x(N)$ , $y(N)$  中。

图 9-4 A 点周边离散点排序

图 9-5 组构三角形

删除与 A 不相邻离散点

根据泰森多边形的性质,其顶点是 Delaunay 三角形外接圆的圆心,据此可删去 $x(N)$ 和 $y(N)$ 中的无关离散点,删除后留在数组中的即是组成三角网的顶点。

删除点的步骤是:从  $x(N)$  和  $y(N)$  中按顺序取出三点  $M_1$ ,  $M_0$  和  $M_2$ (图 9-5),过 A,  $M_1$ ,  $M_2$  作圆,若点  $M_0$  位于圆外,即圆的半径  $r_1$  小于  $M_0$  到圆心距离  $r_2$  时,就删除  $M_0$ ,否则保留  $M_0$ 。若删除  $M_0$ ,则由 A,  $M_1$  和数组中的下一点构造三角形,判别  $M_2$  是否在外接圆内。若保留  $M_0$ ,则下一次的比较是由 A,  $M_0$  和数组中的下一点构造三角形,判断  $M_2$  是否在外接圆内。比较和删除在数组中循环进行,每循环一次,数组中剩下的离散点就重新排序。当所有点都不满足删除条件时,删除过程结束。图 9-6 为删除非相邻点程序流程框图,按图所示,将 A 与数组中的点(点号重新排序,圈内为原点号)连接形成的三角形即是构造出的 Delaunay 三角形。

避免重复记录

在构造 DTM 三角形格网时,每个离散点形成一个泰森多边形,连接多个 Delaunay 三角形。每一个 Delaunay 三角形会重复形成三次(每个顶点各形成一次),记录时则只记一次。可规定当离散点 A 是该三角形水平底边的左下角顶点或 A 点的纵坐标小于其它两顶点的纵坐标时(图 9-7),才记录这个三角形,这样可避免重复记录。

以区域内每个离散点为中心,按上述三步循环,即可构造出区域的 TIN。

上述方法可进一步优化,如将区域划分为较小的矩形格网,每次搜索只在中心离散点所在的特定网格(或其相邻的网格)内进行,以减少计算次数;还可以改变循环与记录方

图 9-6 删除非相邻点程序流程

式,一次记录与泰森多边形相关的所有新构成的三角形,提高程序的效率。

(2) 最近距离算法

用这种算法生成 TIN 时,先在离散点中找到两个距离最近的点,以两点连线为基础,寻找与此段连线最近的离散点构成三角形,然后再对这个三角形的三条边按同样准则进行扩展,构成新的三角形。如此反复,直到没有可扩展的离散点或者所有的三角形的边都无法再构造出新的三角形为止。

判断选择最近离散点的依据是离散点与线段端点形成的角的大小。如图 9-8 所示,AB 为构造三角形的基础线段,选择能构成最大角度的点 C 组成三角形。实际应用中的判别方法是判断  $\cos$  值的大小, $\cos$  值较小者距离较近。

(3) 最小边长算法

图 9-7 应记录的三角形

在构成三角形时, 离散点的选择应当使构成三角形的三边边长之和达到最小值。

图 9-8 最近距离法

图 9-9 最小边长法

首先从离散点集合中选择两个距离最近的点 A 和 B(图 9-9)构成基础边 AB; 其次在其余的离散点中进行比较, 选择到 A 和 B 的距离之和最小的一点作为三角形的另一个顶点 C, 构成第一个三角形; 再次用同样的方法对此三角形的每条边进行扩展, 直到所有离散点都包含在三角形格网中时, 构造三角格网的过程即结束。

9.4.3 TIN 建立过程中特殊地貌和地物的处理

在建立 TIN 的过程中必须考虑特殊地貌和地物对 TIN 结构的影响, 并进行特殊处理, 以满足等高线和断面的生成、土方量计算、地图绘制等 DTM 应用的需要和正确性。

(1) 断裂线的处理

对于坡度变化陡峭的地形, 如陡坎、河岸等, 其变化不连续处的地形边线称为断裂线, 在建 TIN 时, 必须包含剧烈变化的地形——断裂线的特征信息, 才能使 DTM 最大限度地正确反映出实际地形。在输入数据及建立 DTM 之前进行数据预处理和分类的过程中, 把断裂线提取出来并扩展成一个极窄的条形闭合区域。如图 9-10(a) 所示, 陡坎的处理: 点 1~7 为实测的坎上点, 而 7~1 各点的平面位置是由 1~7 点向坎下方向平移 1mm 确定, 其高程则根据外业量取的坎下比高计算而得。坎上、坎下点合并连成一闭合折线, 并分别扩连三角形, 等高线遇闭合(折)线断开。坎上、坎下之间则绘制坎子的图式符号(图 9-10(b))。绘制图式符号的处理方法是, 根据断裂线的地物编码绘出地物的符号。

图 9-10

在绘制地形图时,等高线与地物是分层处理的,等高线层中等高线绘到闭合(折)线处断开,而在地物层闭合折线处正是坎子等地物符号绘制的地方,两层叠加输出,绘出的就是地形图。

(2) 地物的处理

绘制地形图时,要求等高线遇地物断开,如等高线遇房屋、道路等都需要断开,其处理的方法类似,也是将它们处理成闭合区,扩连三角形是由房屋边线向外扩展,等高线遇闭合区边界即终止(断开)。

( a) 三角形“ 悬空 ”

( b) 三角形“ 进入 ”地面

图 9-11

### (3) 地性线的处理

由于 TIN 结构的 DTM 是以三角形为基本单元表达实际地形的,山谷线、山脊线等地性线不应该通过 TIN 中的任一个三角形的内部,否则三角形就会“进入”或“悬空”于地面。图 9-11(a)为山谷线处三角形悬空的情形,1,4 为山谷左侧边坡上的点,2,3 为右侧边坡上的点。构网时,将 1,2,3 连成了三角形,则此三角形“悬空”于山谷线,意味着将山谷填平,与实际地形不符,数模有错。同理若将山脊线两侧边坡上的点也连成三角形,则三角形“进入”地面(图 9-11(b)),削平了山脊,数模也产生了错误。因此构造 TIN 时应使地性线包含在三角网的三角形边的集合中,以山谷线、山脊线为起始边,即需要在原始数据中包含地性线的信息。生成 TIN 的程序时,以组成地性线的线段作为基础,向两侧扩展出三角形格网,这样就保证了三角形格网数字地模与实际地形相符,图 9-12 为沿山谷线的正确构网。

在数字测图的数据采集时,必须记录地性线的编码信息,以保证建立数字地面模型和绘制等高线的正确性。

### (4) 影响三角形格网结构的其它因素

如不规则区域边界可能使程序在无数据区构造出三角形格网,或构造出与实际地形特征不相符的部分三角形格网,从而影响了三角形格网结构。为了解决这些问题,需要在构造三角形格网过程中加入对区域边界的识别,不允许 TIN 向区域边界外扩展,同时检查边界附近的三角形格网中是否有异常的三角形(如某个三角形的部分区域已处于边界以外)。

图 9-12 正确构网

## 9.5 矩形格网的建立

矩形格网是将区域平面划分为相同大小的矩形单元,以每个矩形单元顶点作为 DTM 的数据结构的基础。矩形格网是 DTM 数据结构中规则形状格网类型中最常用的,正方形格网是其特例,它还可以构造出规则三角形格网。

建立矩形格网的原始数据,若是利用航测仪器采集,一般是在航测的立体模型上按等间隔直接采集矩形格网的顶点坐标,构建规则格网数字地面模型;若是野外测量获得的离散点坐标,其分布一般是不规则的。为了建立矩形格网,必须通过数学方法计算出新的规则格网结点的坐标。格网结点的坐标是 DTM 构成和应用的基础,其精度将影响 DTM 的精度。因此,从离散点生成格网结点的插值算法必须最大可能地保持原始数据的精度,同时保持原始数据中地形特征的信息。在实际应用中,由于地形变化的趋势和幅度的复杂情况,不可能用明确的函数关系表达出来,只能根据有限数量的离散点(采样值)和适当的内插方法来进行近似的描述,此外还要考虑到处理的效率、可靠性、内插数据的用途等诸多因素来选用不同的计算方法,而不能孤立地说哪种计算方法最好。

## 9.6 高程插值算法

高程插值的过程就是根据给定的平面坐标  $P(x, y)$ , 利用邻近的已知高程的离散点作为参考点, 计算出  $P$  点的高程。其算法有线性插值、高次多项式插值、曲面重叠插值和最小二乘法插值等。

高程插值除了用于建立矩形格网,还用在 DTM 的应用方面,如等高线、断面的获取、土方量的计算等。

### (1) 线性插值

用被插值点 P 最邻近的 3 个点, 其测量值为  $P_1(x_1, y_1, e_1)$ ,  $P_2(x_2, y_2, e_2)$ ,  $P_3(x_3, y_3, e_3)$  构成一平面, 作为插值的基础, 计算出  $P(x, y)$  的相应高程  $z$ 。

$$Z = a_0 + a_1 X + a_2 Y \quad (9-1)$$

系数  $a_0, a_1, a_2$  可利用 3 个邻近的已知点求得。

这是最简单、也是精度较低的一种算法。地形表面一般不会绝对是平面的,但在地势平坦、数据点间隔较密且均匀的大比例尺测量情况下,一般都采用线性插值,可以很快得到计算结果。

## (2) 多项式(曲面)插值

多项式插值是利用  $z = f(x, y)$  ( $f(x, y)$  为  $x, y$  的多项式) 表示的曲面拟合被插值点  $P$  附近的地形表面。由于计算量的原因, 以及在参考点较少的情况下, 三次以上多项式往往会引起较大的误差, 一些实验研究表明, 二次曲面不仅是最简单的, 而且是逼近不规则表面最有效的, 所以  $f(x, y)$  的次数一般不大于 3, 多采用二次多项式。以二次曲面为例, 设二次曲面方程为

$$Z = a_0 + a_1X + a_2Y + a_3XY + a_4X^2 + a_5Y^2 \quad (9-2)$$

为了确定式(9-2)中的各项待定系数( $a_0, \dots, a_5$ ), 可以利用被插值点附近的已知高程的离散点坐标, 即可认为二次曲面(式 9-2)通过这些已知点, 至少需要 6 个离散点数据才能确定未知的系数。为了保证曲面的一致性以及与相邻曲面之间的连续性, 还可设定其一阶和二阶导数及边界条件, 这样得到的方程组可通过线性代数的矩阵运算, 求得各项系数。

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_0 &= \begin{bmatrix} 1 & \mathbf{x}_0 & \mathbf{y}_0 & \mathbf{x}_0\mathbf{y}_0 & \mathbf{x}_0^2 & \mathbf{y}_0^2 & -1 & \mathbf{z}_0 \end{bmatrix} \\ \mathbf{a}_5 &= \begin{bmatrix} 1 & \mathbf{x}_5 & \mathbf{y}_5 & \mathbf{x}_5\mathbf{y}_5 & \mathbf{x}_5^2 & \mathbf{y}_5^2 & & \mathbf{z}_5 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

用矩阵符号表示系数  $A$ , 得

$$\mathbf{A} = \mathbf{F}^{-1} \mathbf{Z}$$

$(x_0, y_0, z_0), \dots, (x_5, y_5, z_5)$  是被插值点  $P(x, y)$  附近的 6 个离散点的坐标数据。

某些算法对二次曲面的表达式进行了简单化, 删去其中的若干项, 即用抛物面或双曲面进行插值, 使运算更加简单。移动曲面拟合算法就是这种方法的应用, 移动曲面法是将被插值点  $P$  作为原点, 在四个象限的限定范围之内寻找离散点数据, 用多项式(一般是二次曲面)进行插值, 插值多项式的形式与找到的参考点数目有关。根据 Sima 的建议, 多项式函数形式的选取可按以下规则:



当参考点数大于 8 时

$$f(x,y) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy + a_4x^2 + a_5y^2$$

当参考点数为 6 或 7 时

$$f(x,y) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4y^2$$

当参考点数为 4 或 5 时

$$f(x,y) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy$$

(3) 最小二乘插值

最小二乘拟合插值也是利用曲面进行插值,但附加条件为最小二乘准则。

设  $z = f(x,y)$ ,  $f(x,y)$  为  $n$  次多项式,一般采用二次多项式。在确定  $f(x,y)$  中的各项系数时,应满足

$$(ee) = \sum_{i=1}^m [f(x_i, y_i) - z_i]^2 \quad \text{达到极小} \tag{9-3}$$

式中  $ee$ ——残差的平方;

$(x_i, y_i, z_i), i = 1, \dots, m$ ——待插值点  $P$  附近一组参考点的坐标。

用计算出的系数代入  $f(x,y)$ ,以此多项式对  $P$  点进行插值。具体过程如下。

$n$  次多项式曲面插值的误差方程组为

$$\begin{matrix} e_1 & 1 & x_1 & y_1 & \dots & x_1^{n-1} & y_1^{n-1} & x_1^n & y_1^n & a_1 & z_1 \\ & = & & & & & & & & & \\ e_m & 1 & x_m & y_m & \dots & x_m^{n-1} & y_m^{n-1} & x_m^n & y_m^n & a_m & z_m \end{matrix} \tag{9-4}$$

设

$$\begin{aligned} E &= [e_1 \quad \dots \quad e_m]^T \\ Z &= [z_1 \quad \dots \quad z_m]^T \\ A &= [a_1 \quad \dots \quad a_m]^T \\ F &= \begin{matrix} 1 & \dots & x_1^n & y_1^n \\ & & & \\ & & & \\ 1 & \dots & x_m^n & y_m^n \end{matrix} \end{aligned}$$

则式(9-4)可写为

$$E = FA - Z \quad \text{即 } E + Z = FA \tag{9-5}$$

问题转化为求  $A$ 。根据最小二乘原理使其满足  $\sum_{i=1}^m (ee)$  为极小值,按数学上求函数自由极值的理论求解,并根据矩阵代数变换得到

$$A = [F^T F]^{-1} F^T Z \tag{9-6}$$

用  $A$  作为  $f(x,y)$  的系数,得到插值曲面的方程,把被插值点  $P$  的平面坐标  $(x,y)$  代入,就可得到  $P$  点的高程。

矩阵求逆的计算量很大,可以用分解方法把求解过程简化。同时可以选择次数较低(如二次)的曲面以进一步减少计算量。

(4) 距离加权平均插值

离散点插值不利用任何曲面插值函数,直接使用被插值点  $P$  附近参考点的坐标数

据, 根据参考点距 P 点的距离, 计算该参考点对插值结果的影响。具体算法如下:

设 $(x_i, y_i, z_i)$ ,  $i= 1, \dots, n$  为被插值点  $P(x, y, z)$  附近的一组参考点坐标,  $P$  的高程插值计算公式为

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n (c_i z_i)}{\sum_{i=1}^n c_i} \tag{9-7}$$

$c_i$  是距离加权函数, 常用的形式是

$$c_i = 1/d_i^2 = 1/[(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2] \tag{9-8}$$

为了避免运算时的异常, 可修改为

$$c_i = 1/(d_i^2 + \epsilon) \quad \text{为一很小的常数。} \tag{9-9}$$

对应不同形式的权函数, 同一距离处的参考点对插值结果的影响不同。随距离变化较快的权函数适用于变化较大的地形, 而坡度较缓和的地形用缓慢变化的权函数则效果较好。常用的其它形式的权函数及其变化曲线如图 9-13 所示。

图 9-13 几种常用权函数的曲线

图中

$$\begin{aligned}
 & \text{a) } c_i = 1/d_i \\
 & \text{b) } c_i = 1/d_i^2 \\
 & \text{c) } c_i = e^{-d_i^2} \\
 & \text{d) } c_i = 1 - kd_i^2, \quad k = 0.5, \quad d_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \\
 & \text{e) } c_i = 1/d_i^n, \quad n = 3 \\
 & \text{f) } c_i = \frac{(1 - d_i^2)/d_i^2}{d_i + 1}
 \end{aligned}
 \tag{9-10}$$

### (5) 多层曲面插值

多层曲面插值是用多个曲面叠加进行插值, 叠加的每个曲面一般是较简单的二次多项式曲面。通过地形测量等实验研究, 证明二次曲面不仅是最简单的, 而且是逼近不规则表面最有效的。设

$$Q_i(x, y, x_i, y_i), \quad i = 1, 2, \dots, n$$

为插值区域上的一简单曲面, 则多层曲面插值可表示为

$$z = \sum_{i=1}^n (C_i Q_i(x, y, x_i, y_i)) \tag{9-11}$$

$C_i$  为各个简单曲面在叠加时的影响系数,  $n$  为叠加的曲面层数。 $Q_i(x, y, x_i, y_i)$  也称为核函数。

多层曲面插值通常使用同一类型的核函数进行叠加, 核函数的选择及系数  $C_i$  是多层曲面插值要确定的因素。目前作为多层曲面叠加的核函数有锥面、双曲面等, 大多数是实验性的结果, 尚未形成完备的经验公式。

## 10 等高线的追踪与平滑处理

格网型 DTM 将区域表示为规则或不规则的格网单元, 为了更直观地表示地形变化, 等高线(高程等值线)则是最简单、最方便的手段, 也是地形图的重要元素之一。在气象、水文、地质等领域, 等值线也具有很重要的作用。

利用格网数据结构存储的格网结点信息及附加的格网单元结构信息, 生成符合实际地形和绘制地形图要求的等高线, 一直是 DTM 应用的研究课题。

### 10.1 矩形格网的等高线追踪

追踪等高线是从矩形格网某个单元的边上开始的, 等高线的延伸方向是根据矩形格网结点的高程值决定的。由于一条等高线完全包含在一个矩形单元内的情况非常少见, 所以等高线追踪的主要问题是计算等高线与矩形单元边的交点。

一条边的两个端点的高程只有分别大于和小于某个高程值  $H$  时, 相应于高程值  $H$  的等高线才会与这条边相交。

对于图 10-1 矩形格网单元 4 个结点的高程中,

- —— 大于等高线高程值;
- 小于等高线高程值;

图 10-1 矩形格网等高点的判定

则有如下几种相交的可能(暂不考虑结点高程等于等高线高程值的情况): (1) 和(2)两种情况, 矩形单元的边不与等高线相交(四结点高程都大于或都小于  $H$  值); 只有(3) ~ (6)才会有等高线穿过矩形单元, 其中(3), (4)和(5)的等高线在单元内的走向比较容易确定, 如图 10-2 所示; (6)的情况比较复杂, 等高线的走向有多种可能性, 见图 10-3。

图 10-2 容易确定的几种等高线走向

图 10-3 几种可能的等高线走向

计算等高线与矩形单元边的交点, 一般采用线性插值。交点的坐标为

$$\begin{aligned}x &= x_2 - \frac{x_2 - x_1}{z_2 - z_1}(z_2 - z) \\ y &= y_2 - \frac{y_2 - y_1}{z_2 - z_1}(z_2 - z)\end{aligned}\tag{10-1}$$

其中 $(x_2, y_2, z_2), (x_1, y_1, z_1)$ 为矩形单元相邻结点  $P_2$  和  $P_1$  的坐标; $(x, y, z)$  是高程为  $z(z_1 < z < z_2)$  的等高线与  $P_2P_1$  边的交点坐标。

矩形格网结点高程等于等高线高程的情况并不常见,但是在矩形的 4 个顶点中如果有一个顶点的高程与等高线值相等,就会使判别等高线走向的复杂程度增加很多,如图 10-4 所示。图中 为高程等于等高线高程的顶点。

图 10-4 某等高线的高程等于某格网顶点的高程

由于计算机计算精度的因素,在实际应用中可能有图 10-3 和图 10-4 中的情况出现。在复杂情况下,最终决定等高线的走向,需要参考邻近矩形单元的情况,也可以把矩形单元进一步细分,在更小的单元内判断等高线走向。例如图 10-5(a) 中,等高线从矩形单元的 AB 边上进入矩形,但走向还确定不了。对 ABCD 作进一步划分(如图(b))后,根据 A, E, F, G 点的高程可以判断出等高线的走向。

图 10-5 细分格网,追踪等高线

## 10.2 TIN 等高线的追踪

由 TIN 生成等高线的原理与矩形格网的等高线生成原理基本相同,但它是依据三角形顶点的高程值与等高线高程的关系,判断等高线是否与三角形的边相交。由于三角形顶点数目少于矩形,需要判断的情况要比矩形格网简单。

从图 10-6(a) 和(b) 中容易判断出三角形内等高线的走向。高程为  $z$ (或  $H$ ) 的等高线与三角形边的交点位置  $P(x, y, z)$  的计算方法与矩形格网时计算相同(图 10-7), 为:

$$\begin{aligned}x &= x_M - \frac{x_M - x_L}{z_M - z_L}(z_M - z) \\ y &= y_M - \frac{y_M - y_L}{z_M - z_L}(z_M - z)\end{aligned}\tag{10-2}$$

TIN 中追踪等高线时,首先寻找追踪起点。比较常用的方法是检索所有三角形,根据三角形三顶点的高程坐标,判断是否有相应于追踪高程的等高线与三角形边相交。判断公式为

$$e = (H_1 - H_i)(H_2 - H_i)\tag{10-3}$$

式中  $H_1, H_2$ ——某条边两个端点的高程;

图 10-6 三角形内等高线的判定

$H_i$ ——追踪的等高线高程。

- 若  $e < 0$ , 则等高线与此边相交;
- 若  $e > 0$ , 则没有交点, 即等高线不通过此边进入该三角形;
- 若  $e = 0$ , 等高线从三角形顶点通过。

寻找到等高线的一个起点所在的三角形(起始三角形)就可以开始追踪。当等高线不从三角形的顶点通过时( $e < 0$ ), 在三角形内部等高线的走向由公式(10-2)计算。

图 10-7 等高点 P 的位置的计算

在 TIN 中, 追踪等高线的过程从起始三角形开始, 依次处理邻接的三角形。根据邻接三角形具有共同边的性质, 逐一确定等高线延伸方向上的三角形。追踪时, 等高线经过的每一个三角形都被加注标记, 以避免重复检索。当等高线延伸返回起始三角形或追踪到位于边界的三角形时, 这一条等高线的追踪过程结束, 同时也确定了等高线是闭合的曲线还是开放的曲线。由于在一个区域中可能有多条同一高程的等高线存在, 所以还要在未被标记的三角形中重复寻找等高线起点, 继续追踪, 直到整个 TIN 都被检索, 如图 10-8。

当采集数据的密度足够大、完全包含了实际地形特征时, 如果出现图 10-6 中的(c)和(d)两种情况, 对应于高程  $H$ , 没有等高线与三角形相交, 三角形内部也没有闭合等高线存在。在追踪等高线的过程中, 不会有高程为  $H$  的等高线延伸至这两种类型的三角形。和矩形格网相同, 三角形格网也可能出现顶点高程等于某条等高线高程的情况, 此时需要专门的程序分别处理。如果三角形中有一个顶点的高程与等高线高程相等, 则等高线通过该顶点时进入或离开此三角形的条件是: 顶点所对的三角形的边与该等高线也有交点, 如图 10-9 中的 ABC 和 CDE。

在 ABC 中追踪等高线时, 等高线从邻接的 FAB 进入 ABC, 入口点为 G, 可以直接选择 C 为等高线延伸方向上的下一点。但在判断等高线离开 ABC 后的走向时, 就要在除 ABC 外所有包括点 C 的三角形中追踪。在追踪过程中还可能出现三角形中有两个甚至三个顶点的高程与等高线高程相同的情况, 除极少数地形是如此之外, 也可能由下列各种因素促成:

- 原始数据错误;
- 原始数据采样密度较低, 缺少地形细部特征数据;
- TIN 是由等高线数字化得到的数据, 或数据保留位数较少(精度要求较低)。

处理上述情况需要参考邻接的多个三角形的数据, 以选择正确的等高线延伸方向。

图 10-8 TIN 中追踪等高线的流程

图 10-9 等高线追踪

### 10.3 DTM 区域内部等高线的断开处理

相应于某一高程的等高线在某一区域内不一定是闭合曲线,如在地形断裂线和河流等处,等高线会发生中断。在 DTM 的边界之外,也没有可以生成等高线的数据。因此追踪等高线的程序应该能够识别处理闭合和非闭合的等高线。

格网型 DTM 的数据结构中除了格网结点的坐标,还可以附加其它信息,如相邻的格网单元位置等。在追踪等高线时根据这些信息可以判断出当前格网单元的位置。当追踪到区域边界处,程序会自动停止搜索。断开处理的方法有:

#### (1) 格网预处理方法

预处理方法是在构造格网结构时,同时确定等高线断开的区域,把这些区域的边界信息附加在格网结构中,追踪等高线时可根据边界信息决定等高线是否继续延伸。

预处理方法在构造 DTM 格网时需要的计算量较大,把地性线和区域内部地物边界、地形断裂信息都包括在 DTM 数据结构之中,使 DTM 的信息量增大,应用 DTM 时不必再进行相应处理。绘制等高线和地形图是 DTM 最主要的用途,预处理法能够提供较快的结果。在追踪等高线时,可使用一致的算法处理区域内部禁区 and 外部边界,处理速度较快。如果实际地形发生变化,用预处理方法建立的 DTM 就要改动甚至重新构造。

#### (2) 后处理方法

后处理方法在构造 DTM 格网时,不考虑地形、地物对等高线断开的影 响,只根据原始离散点数据和地性线、断裂线等地形信息构造 DTM 格网结构。DTM 生成等高线的过程是在其覆盖的整个区域上进行的,判断等高线在何处断开是通过计算禁区与等高线的交点决定的。

后处理方法在构造 DTM 格网时计算量不大,DTM 中包含的信息比较简单。地物信息可以独立于 DTM 格网,地物的变化一般不会影响 DTM 的结构,使得 DTM 可以应用于多种环境,特别是在区域规划等应用中具有适应性好的特点。但是这种 DTM 结构在应用时所需的计算量比较大,如追踪等高线时,要计算每条等高线与每个禁区的每条边界的交点,如果等高线的密度大及地物较多时,大量计算就会严重影响处理速度。



## 10.4 等高线的平滑处理

实际地形一般是连续变化的,但是从格网型 DTM 中生成的等高线,是由每个格网单元内追踪的直线段组成的折线(图 10-9 中的虚线),以图形方式输出等高线。如显示图形或绘制地形图时,必须对等高线进行平滑处理,使等高线成为连续光滑的曲线(图 10-9 中的细实线)。平滑处理不仅为了图形的美观,而且是使等高线能更准确地描述实际地形的变化。

平滑处理的基本原理是曲线拟合,选择不同的拟合算法,将得到不同的平滑结果。为了适应不同的地形,平滑处理程序可以包含不同的拟合算法,以得到最接近实际的结果。

### 10.4.1 线性迭代法

线性迭代法又称为抹角法,是用反复的线性迭代产生加密的折线,对等高线进行光滑处理。

迭代过程如图 10-10 所示,折线 ABC 是从格网中产生的等高线。第一次迭代插值产生出 D 和 E 点,抹去了 B 点,即用 ADEC 代替了 ABC。继续迭代产生 F, G, H, I 点,使等高线进一步光滑,成为 AFGHIC。迭代过程可以不断进行下去,直到光滑程度满足图形输出要求为止。

图 10-10 线性迭代处理

线性迭代的算法简单,但光滑后的等高线会偏离原有的数据点(如图 10-10 中的 B 点)。

### 10.4.2 分段三次多项式

这种方法是在等高线上每两个点之间(即每条折线线段上)建立起一条三次曲线,在整条曲线上具有连续的一阶导数。每一点上的一阶导数是以该点为中心,加上前后各相邻的两个点(共 5 个点)共同确定的,所以又称为五点光滑法。

如图 10-11 中 3 号点处的导数的计算公式为

$$t_3 = \frac{k_4 - k_3}{k_4 + k_3} + \frac{k_2 - k_1}{k_2 + k_1} \quad (10-4)$$

式中  $k_i$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) 是四段弧  $A_{12}, A_{23}, A_{34}, A_{45}$  的斜率,

$$k_i = (y_{i+1} - y_i) / (x_{i+1} - x_i)$$

$(x_i, y_i)$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) 为各点的平面坐标。

图 10-11 分段三次多项式拟合

三次曲线方程为

$$y = a_0 + a_1(x - x_i) + a_2(x - x_i)^2 + a_3(x - x_i)^3 \tag{10-5}$$

确定  $a_0, a_1, a_2, a_3$  条件是:

- a) 点  $(x_i, y_i)$  和  $(x_{i+1}, y_{i+1})$  通过该曲线;
- b) 根据公式(10-4)确定的在点  $(x_i, y_i)$  和  $(x_{i+1}, y_{i+1})$  处的导数  $t_i$  和  $t_{i+1}$ 。

由于导数的计算需要 5 个参考点, 在闭合等高线的起点和终点处, 可利用等高线上原有的点进行推算; 对于开放的等高线, 则要在两端补足两点, 补点时, 一般假设它们在以  $(x_i, y_i)$  为顶点的抛物线上。

10.4.3 二次多项式加权平均法

从等高线的起点开始, 每通过三点构成一条二次曲线, 对通过相邻两点的两条不同的曲线进行加权平均处理, 作为相邻两点间最终的曲线表达式。

构造二次曲线一般选用抛物线方程。根据抛物线轴的取向, 还分为正轴抛物线法和斜轴抛物线法。而权函数则常用三次多项式, 这样, 最后的加权平均结果为五次多项式。

以图 10-12 为例, 设顶点在 2 号点的抛物线方程为

$$y_2(x) = a + bx + cx^2 \tag{10-6}$$

顶点在 3 号点的抛物线方程为

$$y_3(x) = d + ex + fx^2 \tag{10-7}$$

加权函数是  $w_2(x)$  和  $w_3(x)$ , 且  $w_2(x) + w_3(x) = 1$

2 号点和 3 号点之间最终曲线方程表达式为

图 10-12 二次多项式加权平均处理

$$y_{23}(x) = w_2(x)y_2(x) + w_3(x)y_3(x) \tag{10-8}$$

10.4.4 张力样条插值法

样条函数是曲线拟合的常用算法, 其中三次样条函数由于具有二次连续导数, 在计算机辅助设计/ 计算机辅助制造(CAD/CAM) 领域得到广泛应用, 而且产生了多种改进形式。在数字等高线程序中常用的张力样条函数是在三次样条函数中加入张力系数。当 0 时, 张力样条函数转变成为三次样条函数; 当 时, 它就成为线性函数。 取值的

变化可以控制张力样条曲线的弯曲程度,使光滑后的等高线表示不同类型的地形变化。

张力样条函数是由平面上一组离散数据点定义的。设 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ 是一组已知的数据点,且 $x_1 < x_2 < \dots < x_n$ 。张力样条函数是一个具有二阶连续导数的单值函数 $y = f(x)$ ,它满足

$$y_i = f(x_i), \quad i = 1, 2, \dots, n \tag{10-9}$$

同时 $f(x) - \frac{1}{2}f''(x)$ 还必须连续,在每个区间 $[x_i, x_{i+1}]$  ( $i = 1, 2, \dots, n-1$ )呈线性变化,即

$$f(x) - \frac{1}{2}f''(x) = [f(x_i) - \frac{1}{2}y_i] \frac{x_{i+1} - x}{h_i} + [f(x_{i+1}) - \frac{1}{2}y_{i+1}] \frac{x - x_i}{h_i} \tag{10-10}$$

其中 $\frac{1}{2}$ 是一不等于0的常数,称为张力系数;

$$h_i = x_{i+1} - x_i \quad (x_i \leq x \leq x_{i+1})$$

为了便于编制计算机程序,用累加弦长 $s$ 作为参数,张力样条函数可表示为

$$\begin{aligned} y &= y(s) \\ x &= x(s) \end{aligned} \tag{10-11}$$

离散数据点则可以表示为

$$\begin{aligned} y_i &= y(s_i) \\ x_i &= x(s_i) \\ i &= 1, 2, \dots, n \end{aligned}$$

式中 $s_i$ ——累加弦长。

$$\begin{aligned} s_{i+1} &= s_i + \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2} \quad i = 1, 2, \dots, n-1 \\ s_1 &= 0, \quad s_1 < s_2 < \dots < s_n \end{aligned}$$

对于不等于0的常数 $\frac{1}{2}$ , $x(s) - \frac{1}{2}x''(s)$ 和 $y(s) - \frac{1}{2}y''(s)$ 在每个区间 $(s_i, s_{i+1})$  ( $i = 1, 2, \dots, n-1$ )上呈线性变化,公式(10-10)又可以表示为

$$\begin{aligned} x(s) - \frac{1}{2}x''(s) &= [x(s_i) - \frac{1}{2}x_i] \frac{s_{i+1} - s}{h_i} + [x(s_{i+1}) - \frac{1}{2}x_{i+1}] \frac{s - s_i}{h_i} \\ y(s) - \frac{1}{2}y''(s) &= [y(s_i) - \frac{1}{2}y_i] \frac{s_{i+1} - s}{h_i} + [y(s_{i+1}) - \frac{1}{2}y_{i+1}] \frac{s - s_i}{h_i} \end{aligned} \tag{10-12}$$

其中 $h_i = s_{i+1} - s_i$ ,方程组(10-12)的解为

$$\begin{aligned} x(s) &= \frac{1}{\sinh(\frac{1}{h_i})} [x(s_i) \sinh((s_{i+1} - s)) + x(s_{i+1}) \sinh((s - s_i))] \\ &\quad + x_i - \frac{x(s_i)}{2} \frac{s_{i+1} - s}{h_i} + x_{i+1} - \frac{x(s_{i+1})}{2} \frac{s - s_i}{h_i} \\ y(s) &= \frac{1}{\sinh(\frac{1}{h_i})} [y(s_i) \sinh((s_{i+1} - s)) + y(s_{i+1}) \sinh((s - s_i))] \\ &\quad + y_i - \frac{y(s_i)}{2} \frac{s_{i+1} - s}{h_i} + y_{i+1} - \frac{y(s_{i+1})}{2} \frac{s - s_i}{h_i} \end{aligned} \tag{10-13}$$

只要确定二阶导数 $x''(s_i)$ 和 $y''(s_i)$ ,公式(10-13)所表示的张力样条函数就可被确定。具体

过程是: 对式(10-13) 进行微分, 再利用节点关系及端点条件, 以  $x(s)$  为例( $y(s)$  的计算相同),

$$x(s_i^-) = x(s_i^+) \quad (x(s_i) \text{ 连续})$$

(10-14)

闭曲线

$$x(s_1) = x_1 = x(s_{n+1})$$

$$x(s_i) = x(s_{n+1})$$

(10-15)

开曲线

$$x(s_1) = y_1$$

$$x(s_n) = y_n$$

(10-16)

可以得到两种情况下的关于  $x(s_i)/h^2$  的线性方程组:

$$\begin{matrix} b_1 & c_1 & & & a_1 & \frac{x(s_1)}{h^2} & d_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 & & & & \\ & a_3 & b_3 & c_3 & & & \\ & & j^{\alpha} & j^{\alpha} & j^{\alpha} & & \\ & & j^{\alpha} & j^{\alpha} & j^{\alpha} & & \end{matrix}$$

(10-17)

(闭曲线)

$$\begin{matrix} & & & & a_{n-1} & b_{n-1} & c_{n-1} & \frac{x(s_n)}{h^2} & \\ c_n & & & & a_n & b_n & & d_n \\ b_1 & c_1 & & & & \frac{x(s_1)}{h^2} & d_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 & & & & \\ & a_3 & b_3 & c_3 & & & \\ & & j^{\alpha} & j^{\alpha} & j^{\alpha} & & \\ & & j^{\alpha} & j^{\alpha} & j^{\alpha} & & \end{matrix}$$

(10-18)

(开曲线)

方程组(10-17)和(10-18)的系数矩阵都是非奇异的, 因此都只有唯一解, 可以用追赶法求出, 将得到的一组解

$$x(s_i)/h^2, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

代入公式(10-13), 即得到所求的张力样条函数, 用于对等高线的平滑处理。张力系数  $\alpha$  值的计算公式为

$$= (n-1)/(s_n - s_1) \quad (\text{开曲线})$$

$$= n/(s_{n+1} - s_1) \quad (\text{闭曲线})$$

多数资料和实际应用系统中所选用的  $\alpha$  值为 1.5,  $s_i$  的单位为 cm。改变  $\alpha$  的值, 可以控制张力样条曲线的弯曲程度。

## 11 EPSW 电子平板测绘系统

EPSW 电子平板测绘系统是内外业一体化数字测绘系统。它首先是一个地面数字测图系统, 又是一个面向 GIS 的前端数据处理系统, 还是一个测绘平台, 即在 EPSW 平台的基础上, 可开发一系列与测图有关的计算机辅助测量、辅助设计、辅助管理(CAS, CAD, CAM)等测图应用模块。

由于地形数据及其处理的复杂性, 除空间位置外, 还有其间的相互关系, 如位置的相邻、高程的相关、区域的划分、图形的表示等等; 考虑到数据库对数据管理的优越性, 如完整、准确的数据结构和数据格式, 大容量, 少冗余, 完备性、实时性, 安全性、开放性等; 因此, 为了全面地、发展地解决测绘数据处理的各种问题, EPSW 建立了空间数据库。数据库及其管理成为 EPSW 系统及其它模块的核心。本章将着重阐述 EPSW 的主要功能特性及其数据库管理。

### 11.1 EPSW 的测图功能

EPSW 是在 Windows 环境下用 C++ 语言开发的, 具有七大功能模块: 作业准备、测站设置、图形编辑、数字地模、目标编辑、窗口查询、数据处理。这七大功能包括了由工程准备、外业测量、数据处理与显示、成果输出等测图工作的全过程。它按测图工作进程, 集成了几乎全部有关的测量方法, 最大限度地实现了测图工作的自动化。

EPSW 是电子平板式测图系统, 电子平板突出的特点是实时成图: 现场测绘, 不需纸笔, 不画草图, 随测随显, 所显即所测, 直接生成地形图。及时发现错误, 及时编辑修改, 避免返工, 工作效率大大提高, 是真正做到了内外业一体化的实时测图系统。

电子平板的存储容量大, 建立了编码驱动的图式符号库, 无需专门记忆, 可随时显示查询, 图示符号实时上图, 所以, 随测随显的图已经是图式符号表示的地形图。

#### 11.1.1 以汉字菜单驱动, 对话框方式输入

以作业准备为例, 它的一、二级菜单如图 11-1 所示。

“点取”菜单, 即可弹出相应的对话框。如点取层次颜色设置菜单, 即弹出层次颜色设定对话框(图 11-2)。此窗口分 3 部分:

(1) 最上面的是一个显示窗, 将已设置好的层次、颜色显示出来。

窗中“起始编码、终止编码”表示本层所含地物的一段连续编码。起、止编码相同的, 表示该层只有一种地物。

“颜色号”表示该层显示和绘图所采用的颜色、笔号及笔粗。

“开关状态”为“1”表示此层打开, 为“0”则表示关闭。

(2) 中间部分是增改编辑窗, 用于对显示窗中所列各层地物进行修改和添加, 可将要

图 11-1

图 11-2

修改的内容键入编辑窗内。

(3) 最下面的部分为控制按钮,用于控制对编辑窗的操作。

通过清晰的界面,使地形图复杂的分层、层的颜色和层的开、关都能简便地按需要设置,快速,无误。

11.1.2 多种碎部测量方法

EPSW 提供了 30 种碎部测量方法, 集仪器测量、勘丈测量及几何作图方法于一体, 再加上点、线的捕捉与增删和实时显示等手段, 为碎部测量提供了一个极为方便、快捷的环境, 大大提高了碎部测量的工作效率与可靠性。

在第 5 章中已经列举了一些碎部测量的方法, 这里再举几例。

(1) 十字尺法

十字尺法是仿真手工“推尺”的作图方法, 将直角关系放到屏幕上, 上下左右地随意推尺。对测站上观测不到的、且以直角推进的建筑物点, 用十字尺法施测十分方便, 比手工推尺更准确、灵活、快捷。

图 11-3(a)为十字尺测量对话框, 图 11-3(b)中 101, 102 两点为极坐标法测得的点。用鼠标捕捉 101 点作为原点(已知点), 并自动记录到十字尺对话框相应的栏目中。再用鼠标捕捉 102 点作为方向点(亦为已知点), 并自动记录到对话框中, 这时十字尺到位显示。键入例如 5m 并记录, 即显示 103 点。十字尺跟踪到 103 点(图 11-3(b))。再以 103 点为原点, 以 101 点为方向点, 键入 103 点至 104 点的距离值, 即得 104 点。依次操作, 直至对该房屋测完为止。十字尺法对建筑区测量十分有效。

图 11-3 十字尺测量法

(2) 过点平行线及距离平行线

过一已知点, 作一线状地物的平行线, 如图 11-4(a), 点 206 为道路边上一已测点, 点 201, 202, 203, 204, 205 为已测的道路边线点, 用鼠标在屏幕上捕捉其中任一点, 其它点将自动被获取, 即获取了道路边线(被捕捉地物上的点都以小方块表示), 且其地物号将自动

提入对话框。再键入被求地物的编码,捕捉经过点 206,按 OK,即可求得平行于道路边线的另一边线。同理,如已知路宽 D,则可用距离平行线法,用图 11-4(b)捕捉任意点 207,则已测道路边线被获取,其地物号 \$ 7 被自动显示,键入路宽 3m、道路编码 548,并用鼠标指点给出方向(向右为- 1,左为+ 1),按 OK,即绘出道路的另一边线。

道路中心测量:测道路中心,绘道路两边线,此问题也就解决了。

(a) 过点平行线

(b) 距离平行线

图 11-4

(3) 坎类测量

这里包括坎和坡的测量。

坎的测量

坎测量的对话框如图 11-5(a) 所示。用极坐标法测得坎上 241, 242, 243, 244, 245 点,按程序的约定:坎子的坡毛线画在测点前进方向的右侧。按上述约定 241 点 ~ 245 点(点号依次代表了测点的顺序)显示的坎毛线方向却与实地不符(图 11-5(b))。对话框中有个方向按钮,用鼠标(光笔)点一下按钮,即有反向的功能,241 ~ 245 坎的毛线全部反向,即

(a) 对话框

图 11-5 坎的测量



为坎的正确表示(图 11-5(c))。

坎下的测量,一般是在进行坎上测量的同时,量出坎上、坎下的比高,并键入对话框。经程序处理后,在坎上线右侧 2mm 处,自动生成相应的坎下点,坎下点参照坎上点的连接关系自动相连,构成一个“隐含地物”(存在而不显示,只显示比高),以备建立数字地模时用。如果坎的方向与实地反了,坎下线也就同时生成反了。这时,可利用“地物编辑”将坎上线全部反向,再利用“距离平行线”功能,以原“坎下线”为基准,向正确方向平移 4mm,再生成一条坎下线,利用“删除地物”功能将原坎下线删除。

坡的测量

坡与坎的测量不同,仅在于坡脚线为实测的,坡毛线必须由坡上延伸到坡脚线(图 11-6)。如何使计算机自动识别坡脚线,曾是数字地形图绘制中的一大难题。

图 11-6 坡毛线的绘制

EPSW 定义了目标的数据结构,这个问题就迎刃而解了。将坡上与坡脚线合并为一个目标,计算机也就可将坡毛线自动延伸到坡脚线了。

同理可解决台阶等的绘制。

定向记忆

如对电杆实测时,电力线有好几条,电杆位置用极坐标法量测,这时连接关系容易出错。针对这种情况,EPSW 提供了编码注记及回忆相同编码和上一点点号的功能,并定义一个键来进行此项操作,以便把每条线区别开来,电杆分别按线自动连接。

例如,电杆的编码为 601,把一排电杆编码设为 601a,另一排电杆编码为 601b。只要在编码栏中输入 601a(601b),再按一下 F7 键,则当前测的 a 线电杆将自动与上一点 a 线电杆相连,并把连接点号自动记入对话框的连接栏内;如测的 b 线电杆,则按 F7 键后,当前 b 线点自动与 b 线上一点连接,连接点号自动记入对话框。这样在现场就能很简便地将电力线走向测绘得清清楚楚,避免了错误和返工。

同理,定向记忆的方法可使用到地下管网测量等方面。

三人跑尺

外业测量时一般有 2 名 ~ 3 名跑尺员,为保证测量记录、显示成图不出错误,EPSW 提供了三人跑尺跟踪测量的功能。

选择极坐标测量菜单,弹出极坐标对话框(图 11-7)。设 3 把尺子分别测 3 种地物,A

尺跑房子, B 尺跑坎子, C 尺跑电杆。当观测第一把测尺 A 时, 按 F5 键, 对话框中地物号一栏即出现 A 尺; 点号一栏自动出现当前点号; 键入房屋编码, 如 200, 编码一栏显示 200; 连接点一栏此时应为空(起点)。如有点号, 按 F6 键可自动取消连接点号。按 F1 键, 全站仪观测的数据全部相应传输到水平角、竖直角、斜距栏内。再键入标杆高(或认可已默认的标杆高值)(如图 11-7(a))。按 Enter 键或鼠标右键, 屏幕上即出现所测的点。下一个如观测 B 尺, 按 F5 键, 地物号栏出现 B 尺, 用上述方法观测、输入、显示(如图 11-7(b))。再按 F5 键, 出现 C 尺(利用 F5 键可控制 A, B, C 尺循环出现)。同法观测 C 尺。测完以后, 再测 A 尺时, 点号、编码、标杆高都自动默认, 只要选择(把光标移到)连接记录栏, 按 F9 键, 则自动回忆编码相同的连接点号, 连接栏内也自动记录了相应的点号, 屏幕上也显示出与上一房屋点相连的房屋边。余类推, 关键在熟悉使用 F5 和 F9 键。

(a) (b)

图 11-7 三人跑尺跟踪测量

吞吐测量

无论从容量上看, 还是从速度上讲, 试图把整个测区的数据用一个文件全部装入是不现实的(很小范围的测图除外), 吞吐测量即是一种解决容量与速度的矛盾以及分组测量、测区数据合并的有效方法。

测量数据的调(进)入为“吞”, 将整块的地形数据掏出为“吐”。吞吐式测量就是在测完一部分地区以后, 将与后续测量无关的数据掏出, 生成坐标文件存盘。用时, 涉及到哪块再调入哪块。

具体操作时, 先用“坐标输入”, 以编码为 800 的点将要掏出的地区用多边形围起来, 然后选择“区域内点输出”, 程序自动将区域内的所有信息以新的文件名生成一个“.COR"文件, 存盘。如有汉字, 还生成“.NOT"文件。

同理, 选择“调入坐标数据”, 程序便自动以叠加方式将要合并的数据调入(吞进), 坐标相同的点并为一点, 保证不重点。

采用这种方法使测量的点数不受限制, 效率也不受影响, 对分组测量、无接边测图等

的数据合并都极易实现。

无接边测量

这是数字测图特有的概念, 由于数字测图精度高, 又不必按规定图幅大小分幅测图, 因而可采用自然分界法和右下负责制(参见 7.4 节)进行无接边测量。

自然分界法是指以自然分界(如道路、河流等划分)的、相对独立(无互连)的区域, 每个区由一个组负责实施测图, 组与组无接边关系。施测时, 可先测与它组相邻的边缘地区, 并可将该区掏(吐)出给它组, 它组用吞进(调入)的方法接收, 以便测量时衔接。出图时, 仍可按规定的分幅(或其它尺寸)分组出图, 或统一出图。

右下负责制是指按图幅分组作业时, 规定每组负责对右、下边的跨幅完整地物测完, 而对跨左、上边线的地物可以不测。再将本组右、下边测的跨组地物, 剪切后掏出给相邻的组, 这样, 出图时各组出的图都是完整的幅图。

无接边测图方法简单、实用, 综合效率高。

11.1.3 EPSW 中 DTM 模块的功能

从模拟测图到数字测图, 效率和质量都大大提高, 其中提高最显著的要算等高线(地貌)测绘。手工绘等高线不仅工作量大、繁琐, 而且勾绘等高线的技艺要求也较高。而数字测图在保证外业地形点测量正确的条件下, 能很快地建立数字地面模型和生成等高线, 两者速度是无法比拟的。但数字测图的前提是建模与生成等高线的程序要求比较完善, 否则是建不起正确的数字地模的。

有关数字地面模型建立及等高线绘制的理论和实践问题, 在第 9, 10 章中已作了较详细的阐明。这里仅就 EPSW 提供的七大功能之一——数字地面模型模块作一简要说明。

在 EPSW 的主菜单中选择“数字地模”, 即弹出数字地模的对话框, 如图 11-8 所示。

图 11-8

作业时, 只要选择“建立三角网”、“生成曲线等高线”, 程序可将工程名范围内的有

效数据实施建模(连成三角网, 建立内插机制), 并在所建三角网的基础上, 生成等高线。

按等高线的高程, 在三角网上追踪出来的等高线是折线等高线。用张力样条函数对追踪的各条折线等高线进行拟合, 才生成曲线等高线。下面是 EPSW 对有关建模和生成等高线时的几个问题的处理。

(1) 地性线问题

外业数据采集时, 对地性线上的高程点要另行编码, 如高程点的编码为 904, 而地性线(点)编码为 803, 以示区别。建模时, 可首先提取地性线。

(2) 等高线遇地物断开问题

DTM 对话框中提供了“合并断裂编码”、“封闭断裂编码”两项功能, 以便在自动的基础上, 可采用交互方式做修改、补充, 以解决等高线遇地物断开问题。

一些地物, 如坎、坡、道路等, 都由坎上、坎下、坡上、坡下、道路两边线等, 用目标合并形成, 它们将自动形成闭合环线。将自动或人为补充写进“合并断裂编码文件”中, 追踪等高线时, 遇这些地物将自动断开。断裂线内不连三角网。如断裂线内有高程点则可能生成三角形, 应预先删除这些高程点。

封闭断裂编码是指一些建筑物本来就是闭合的地物, 它们将自动或人为补充写入“封闭断裂编码文件”; 等高线追踪到此断裂线时自动断开。

(3) 建模时应考虑设置的参数

- 比例尺: 影响计曲线注记预留开口的长度;
- 等高距: 对生成折线等高线有效;
- 搜索网距: 影响建模的速度, 越小则越快, 但太小会导致网形的错误;
- 线加密间距: 用于加密断裂线、地性线等, 以改善网形;
- 拟合系数: 对改善曲线等高线的光滑程度有效, 拟合系数越大, 曲线越接近于折线。拟合系数一般取 1.5 ~ 5。

(4) 建模与生成等高线的编辑功能

大比例尺数字测图时, 跑点的质量对建模与生成等高线影响较大, 但实地跑点不合适, 错误也在所难免。为了保证建模与生成等高线的正确性, 程序增加了下述编辑功能:

- 增点、删点;
- 增加三角形;
- 删除三角形;
- 牵拉等高线, 极个别情况下(由于跑点不均匀、缺点或错点)等高线不合理, 可操作“牵拉等高线”进行修改;
- 剪裁等高线, 在测区边缘由于缺“点”, 所生成的等高线不合理; 或建筑区不需要生成等高线等, 用此功能可将其剪裁掉;
- 加密折线等高线, 其间距可改善曲线等高线质量。

(5) 提取纵、横断面数据

给定选线的起点、折点、终点的坐标, 即由程序自动生成规定(由用户指定)间距的纵、横断面上点的平面坐标, 这些点的编码为 808, 生成 Lxyz.in 坐标文件(此时, z 是没有的), 再依据此文件在数模上插值, 求定各点的高程 z, 即提取的纵、横断面数据, 生成

Lxyz.out 文件, 供设计人员使用。

#### 11.1.4 图形编辑与窗口查询

EPSW 电子平板测绘系统是按面向对象的设计思想和方法建立的, 在进行图形编辑时, 较好地体现了这种设计思想的优越性。所有图形编辑的命令不是针对测量的基本点, 而是针对所选择的某种操作对象进行处理。

所谓操作对象, 是指在图中可以捕捉到的具有相对独立的图形, 实质是在系统数据库中具有的相对独立的数据结构(详见 11.4 节)所支持的对象, 如:

- 点, 指一个测量点位, 一个点可以用于多个地物;
- 线, 由相连的两端点组成, 线属于某一地物;
- 地物, 由具有相同编码且互连的点构成, 它可以是一个点的独立地物, 也可以是由两个端点构成的线段地物或多个点连通组成的线状地物;
- 目标, 为一定目的或若干相互关联的地物组成的一个地物群, 一个地物只能属于一个目标。若干个(不属任何目标的)地物聚合成一个目标, 称为目标合并; 也可以将一个目标分裂成若干地物, 称为目标分离。这些操作对象都编排在屏幕窗口右边的“加速棒”中(图 11-9), 以便操作。

##### (1) 图形编辑功能

进行编辑时, 首先选择上述操作对象, 一旦选中一种, 后续的编辑命令就一直针对这种操作对象, 直到选择另一种操作对象为止。选择操作对象可通过按鼠标左键“点取”屏幕右边的加速棒中的项来完成。

由于操作对象的数据结构的严密性, 在进行各项操作时, 都是把与对象关联的数据全部包含在内。例如删除(操作对象)功能:

- 删点, 还会删除所有与之相连的线;
- 删线, 可能会使原来的线状地物分裂成两个;
- 删除地物, 会删除地物中所有的点、线;
- 删除目标, 会删除目标包含的所有地物。

EPSW 提供的图形编辑功能如图 11-9 所示, 下面简单举例说明:

##### 加点

加点是常用的图形编辑手段, 相当于手工插点、补点。选择“坐标输入”即可, 亦可进行连续加点, 如用于划定一个区域的边界或进行高程点加密等。

##### 删点

选择“操作对象”为“点”(线、地物或目标亦同), 然后再选“对象删除”, 出现对话框, 用鼠标在屏幕上捕捉需要删除的点, 其点号及编码将在对话框中显示, 选择删除或回车, 即删除该点。删除一个点时把与该点有关的所有线一同删除。

##### 地物修改

主要用于修改地物编码、地物符号反向、自动顺向、统一线型等。也可以将地物统一赋予某高程。都可以通过选择“对象修改”, 弹出对话框, 按项操作, 完成以上修改。

- 1) 选择操作对象为地物(或目标), 并选择“对象修改”, 弹出对话框。

图 11-9 图形编辑窗口

2) 在屏幕上捕捉需要修改的地物(或目标),实际只是捕捉该地物的一个点或线,在对话框地物号一栏中出现 \$<sub>xx</sub>(地物号),表示地物被捕捉到,同时,屏幕上该地物的所有点也都以小方块显示出来,如图 11-4 中道路边线的捕捉。地物号是由程序内部自动编写的,每个地物都有一个地物号,用户一般看不到,但用到地物号时,它将自动出现在对话框地物号一栏内或需要的地方。

3) 选择你所需要的修改项,如全部反向,自动顺向,输入新编码或新线型。

4) 确认此项操作,刷新即为修改后的图形。

#### 注记编辑

注记的内容可以修改,可以复制,注记的位置可以移动。

高程注记可以移动,可以筛选,可以恢复。筛选是指在规定的间隔内,只保留一个高程注记。筛得不合适,还可以用点修改加以恢复。因为原来筛掉的,只是将它关闭而已。

#### 点拖动、地物拖动、平移复制

点拖动即修改已知点坐标。选择本功能后,按住鼠标左键并移动,至目的位置松开左键。移动时,可观察被拖动点及其连线情况。

线上插点是指对一连线中某一处进行拖动,改变连线情况并生成一新点。本功能常用于曲线修改。另外,还有地物拖动、平移复制等功能。

## (2) 窗口查询功能

EPSW 还提供了窗口查询的功能, 如

点查询: 输入点号, 则对话框中显示出该点的所有信息。若图中没有该点, 则在对话框中得不到任何信息。

距离方位查询: 选择此功能, 弹出对话框, 用鼠标捕捉两已知点, 程序自动计算出该两点间的距离和方位, 并显示在对话框中。

编码查询: 可从所有的编码信息中查找所要的编码。

另外, 还有当前点居中、测站居中、全屏显示、回到前次显示……, 这些功能可以查看希望看到的图形。

EPSW 提供了较强劲的图形编辑和窗口查询功能, 便于现场实时查看和编辑修改, 并可参照实际地形交互来增、删、改和拖动点, 使生成的图更符合实际地形。

## 11.2 面向 GIS 的前端系统

我国城市基础地理信息系统(GIS)的建立是近十年的事, 走在前列的如深圳、海口、厦门等城市。采用原图数字化的方法, 完成了基本地形数据的录入之后, 图的修测、补测、更新等工作就被提到日程上, 且变得紧迫起来。因而急需一个比较成熟的、面向 GIS 的测图系统, 作为 GIS 的前端数据更新系统。

在我国, 数字测图与 GIS 联系起来, 也只是近几年才被认识的。最初的数字测图称为机助成图系统, 成图软件的目标是面向图形, 能控制绘图仪自动绘出模拟(纸上)地形图, 达到图纸的正确、美观、规范即可。而 GIS 需要的不仅仅是图, 更重要的是信息(空间和属性信息), 以便进行各类查询、分析、统计等。因此, 数字测图的功能既要面向图形, 又要满足信息系统的需要, 建立 EPSW 电子平板测绘系统正是这样考虑的。由早期的 CAMAP 机助测图系统发展(重新设计、改版更新)到 EPSW 测绘系统, 正是在面向图形和面向信息两个方面都有了质的飞跃, 对图和信息都考虑得比较周全, 形成 EPSW 自身的特点, 这也正适应了 GIS 的需要。

作为 GIS 图的更新系统, 尤其是城市大比例尺地形图的更新系统, EPSW 是适宜的。这是由于:

- EPSW 电子平板数字测图系统的高精度、直观性、实时性、多功能性、方便、高效和商品化等, 使其不失为一个优秀、成熟、有我国自主知识产权的测图软件。
- EPSW 的吞吐功能, 可以将需要更新的旧图掏出来(也可不掏), 将重新测出的内容调入, 并与原图既能衔接又可区分, 这个功能非常适合于修测与更新。
- EPSW 的信息完备, 每一步操作有日志, 有 FLD 原始记录, 有分设的数据库和图式符号库, 信息与图可分别发挥作用。库中存储了全部有用的信息, 数据结构严密, 信息完备, .COR 公共交换格式完整清晰。
- EPSW 提供从 GIS 中(如 ARC/INFO, MGE 等)调数据的接口。

以上这些特点使 EPSW 适合于修测、补测, 适合为 GIS 的数据更新系统。

EPSW 作为 GIS 的前端软件, 必须既要方便测图生产, 又要能与 GIS 交换数据, 而不

带来很大匹配的工作量。为此,在 EPSW 的基础上进行了再开发,以适应与 GIS 的信息和图形的交换。开发后的成果被称为 EPSG(EPS for GIS),增加了以下功能:

(1) 确定了数据交换格式

ASC 数据格式: 信息不完全,测量的数据不能全息进入 ARC/INFO。

DXF 数据格式: 它是一种图形文件的格式,只能分清实线、虚线等,一些编码属性信息全丢失,以致无法分清哪些线是什么地物等。必须对 DXF 格式进行种种“改用”、“规矩”后,才能将数据转入 ARC/INFO,这对测图一方带来的工作量太大,而且 DXF 本身信息的冗余量太大。

DLG 数据格式: 这是美国国家地质测量局的标准格式,是一种比较适合于测量的数据格式,信息精炼而全面,包含了全面的拓扑关系。

EPSG 就是采用 DLG 作为与 ARC/INFO 的数据交换格式,即 EPSG 的输出格式除公共交换格式 COR 以外,增加了 DLG 格式。

(2) EPSG 有一张灵活的与 GIS 的对照表

EPSG 的编码与 GIS 的编码要一一对应;EPSG 的分层与 GIS 的分层要层层对应。由于目前各部门 GIS 的编码和分层尚无统一的国标,都是自行规定的,所以要针对每个部门建立起这样一张编码、层的对照表。

EPSW 原来就有层的设置,而且根据编码可以任意分层,这就适应了 GIS 的分层需要,根据 GIS 的分层来设置 EPSG 的层即可。EPSG 有一套适合 GIS 的比较完全的编码表,对应各个 GIS 应用方面的不同,可能还会有些增、改,最终必须做到一一对应。

(3) EPSG 以“地物”结构为核心,有点、地物、隐含的面(地块)、目标

GIS(ARC/INFO)根据应用的需要分成若干层后,每层中都含有点、线、面三种结构和相应的拓扑关系。DLG 中每层有结点、线、面(label 点)记录类型,并含有拓扑关系和若干属性对,ARC/INF 的层(coverage)与 DLG 的层,在空间信息上具有直接的映射关系。因为 EPSG 以“地物”结构为核心,有点、地物、隐含的面(地块)、目标,所以在将上述结构转换成每层上的点、线、面时,仅对图形符号起作用的辅助线或符号线另给专用编码。

(4) EPSG 所有的汉字注记通过 DXF 进行转换

(5) EPSG 中增加了属性信息入口

GIS 要求的信息一般比普通地形图多,如楼房栋号、层数、材料等各种属性信息,因此在 EPSG 中增加了属性信息入口。通过 EPSG 与一些城市测绘地理信息系统的实际接轨应用(有的还完成了几平方公里地形图的更新实测任务),取得了较为满意的效果。其步骤是:EPSG 先接收 GIS 输出的需要更新的地形图数据,再进行外业测绘更新,归并以后,又将更新后的成果传输到 GIS 中,与 GIS 数据归并为一体。

### 11.3 EPSW 测绘图形基础平台

由于 EPSW 具有较强的地形数字采集、实时成图、图形编辑、空间数据库及管理功能,又有较科学的数据结构、系统体系,使得 EPSW 逐渐发展成为一个地形测绘与测绘图形平台。利用 EPSW 测图功能,再在其基础上进行二次开发和增加专用的应用模块,形成



了一个 EPS 测图与应用系列软件,以满足各业与地形信息有关的 CAS, CAD, CAM 的需要。

目前在 EPS 基础上已挂接下列模块:

- GIS 转换模块(EPSG, 其中包含了 EPSW 测图系统);
- 地籍模块(CM), 进行地籍测量及地籍信息的预管理;
- 地下管网测图与管理模块(pipe), 进行地下管网测绘及预管理;
- 土石方计量模块(CF), 按日、月施工量计算土石方工程量;
- 平面与竖向布置模块(PV), 在数字地形图基础上进行厂区平面与竖向设计;
- 测设(layout), 进行规划红线放线;
- 电力线路测量模块(power);
- 控制网平差模块(NASEW), 进行等级控制网测量;
- 数字化仪数字化模块(digit);
- 扫描数字化模块(scan);

以上模块有的已投入使用, 有的正进行试用, 它们将在不断改进中得到完善。

图 11-10 为 EPS 系列软件结构示意图。

图 11-10 EPS 系列软件结构示意

## 11.4 EPSW 空间数据库

### 11.4.1 EPSW 数据库的作用与特点

#### (1) 数据的文件管理阶段

在过去二十多年间, 通用数据库系统都已得到应用, 尤其是用于管理信息系统或商业

数据管理等。但是对空间数据,这些通用的数据库系统并不能满足要求,因为空间数据具有自己的专业计算和处理;而通用数据库系统所提供的诸如保密措施与并发控制等,对于空间数据的初步管理来讲,并不是十分急需,因此,大多数空间数据的管理都还基于文件系统的管理。

以 AutoCAD 为例,它接受数据以后,将数据以各种文件格式存放,要使用这些格式文件,就必须了解它的结构。一个工程项目对数据的管理,就是对这些格式文件的半手工管理(这些文件以什么样的目录结构存放,有哪些文件,哪一个文件包含什么样的数据等等,管理员都要十分清楚)。为防止由于硬盘或软盘损坏造成的数据损失,管理员要有意识地复制若干数据的备份保存起来。对于大的工程项目,数据文件可能多至几百个,要知道哪个文件存储什么内容,也需要管理员另外编目。

在计算机管理中,文件管理早在 20 世纪 50 年代后期就开始了,那时有了磁盘、磁鼓等直接存取的存储设备,也已经有了专门的软件,即文件系统。从此以后,工作人员只须知道文件名和要存储的内容,系统就自动将文件内容写到磁盘的若干个扇区上。尽管对于内容单一、规模较小的空间信息来讲,文件管理具有使用简单、容易理解等优点,但是,随着计算机应用的逐步深化与推广,文件管理的方法越来越无法满足要求,诸如:

数据缺乏组织,造成数据冗余度大,独立性小,维护困难。缺乏组织的数据必然造成同一数据重复存放,进行修改时需要将各存放处的数据同时进行修改,给维护工作造成困难。比如,一个单位的职工资料,如年龄、简历等,进行职称评定要用,调工资要用……。如果不统一,就会在人事部门、财务部门各保存一份;一旦要修改,如某人要调走,就要在各个部门中将此人资料删除,否则就可能造成某人调走了,仍给他发工资的情况。对于空间信息同样如此。

无法满足数据共享的要求。空间数据库关系到较大范围的空间信息,必然要满足很多人同时访问数据库的要求,单靠文件系统是很难实现复杂的并发控制的。例如,某人正在查询一个文件的内容,同时另一个人要对该文件进行修改,如何实现这两个操作而又不影响结果?这必须利用数据库技术才行。

数据安全性缺乏保障,出现了非法数据难以发现,数据丢失后难以恢复。

所有这些都说明,用数据库来管理空间数据是必然的趋势,关键是要找到一个良好的数据模型来存放空间信息。

(2) 数据库管理空间信息的优越性

用数据库进行空间信息的管理,与文件系统管理相比,具有很多优越性:

可面向复杂的数据结构。空间信息数据有复杂的关系,如同一个位置就有许多连接关系,又有管网、电缆等许多层次,用数据库技术就可以方便迅速地描述这些数据。

数据冗余度小,易扩充。由于数据库是从整体上来看待和描述数据,各部分间的数据可以统一存放,既节省存储的空间,减少存取时间,又可避免数据的不一致性。

具有较高的数据和程序的独立性。使用文件管理方法时,数据文件与程序是密切相关的,不同程序处理的文件格式各不相同,自然不能进行数据的共享。例如 AutoCAD 的文件格式与其它系统的文件格式就不相同。使用数据库管理数据以后,不同的系统面对着同一个数据库系统,用相同的接口函数访问同一个数据库系统,这就大大提高了不同系

统之间数据共享的能力。

统一的数据控制功能。数据库系统不仅将数据组织起来,同时也提供了对数据的特殊控制功能,如并发控制、数据安全性控制、数据的保密、数据的完整性控制等。

总之,利用数据库技术进行空间数据的管理,可以实现空间数据的最小冗余与最大共享。

(3) EPSW 数据库的特点

为了更好地保存和方便地处理信息数据,并考虑到空间数据库系统的发展,利用文件系统和现有的通用数据库管理系统,为 EPSW 系统设计了一套完整的数据库系统,同时利用 EPSW 强大的图形处理功能,提供一套对地理信息对象的存取机制和各种处理转换功能,为 EPSW 上层功能服务,如图 11-11 所示。

EPSW 数据库系统有如下特点:

实现了对 EPSW 的空间数据对象的存储及管理功能;建立空间对象的拾取、检索等机制,得以进行快速查询等。

为 EPSW 上层功能提供了完备而又有效的服务,上层功能的实现不再考虑地理对象的存储、分割、合并等一系列复杂的算法,使软件结构层次清晰,可靠性高。

使 EPSW 成为一个开放式软件系统。EPSW 数据库系统向上提供了一套数据接口函数,向下则只需使用标准的数据库访问语言,这使得 EPSW 能够通过数据库系统与其它系统共享数据,为系统功能的扩展提供了方便。

图 11-11 EPSW 数据库系统的作用

目前有一些数字化软件,它们得到的图形文件并没有保留编码等信息,而只有点、各种线型地物的图,这实际上只是从传统的白纸图过渡到计算机绘图,只注重了图,而丢失了信息,也谈不上建数据库和信息系统。其实数字测图系统更主要的是通过空间信息库完成检索、查询、设计、分析、统计计算等复杂的功能。

11.4.2 EPSW 数据库的性能

EPSW 作为地理信息系统的前端工具,其数据库系统应满足空间数据库的各种要求:

(1) 大容量,少冗余。一项工程的测绘数据量很大,往往达到几百兆甚至几千兆字节,这就要求 EPSW 数据库具有处理大数据的能力。EPSW 提出了目标、地物、点等一系列概念,分析了它们的空间特性,以合理的结构存储各种空间对象,使数据冗余度达到最小。同时,EPSW 利用一系列快速简化的算法,实现了对图形对象的各种处理,为处理大容量数据创造了坚实的基础。

(2) 实时性。测量的现场作业都要求迅速得到响应,如果敲击键盘或按下鼠标后系统因忙于搜索或其它工作,而迟迟不应答用户的操作,就满足不了现场工作的需要。实时性

就是要求系统在一定时间限度内响应用户的操作。EPSW 采用了一系列的高效实用的算法和一套索引机制,保证了系统实时性的要求。

(3) 开放性。EPSW 系统是一个完整的地理信息系统的一部分,因此 EPSW 必须有与其它系统交换数据的能力。由于 EPSW 数据库向上提供了一套完整的数据接口函数,向下利用标准的数据库数据操作语言,因此保证了系统的开放性。

(4) 完整性约束。EPSW 内部的数据要符合一定的规范,这大体上分两大类:一类是值的要求,有些字段不能为空(如点号、属性);但有些值有一定范围要求,如坐标;另一类是值的关系的约束,例如:如果某个地物的点全部被删除,地物就会被自动删除,等等。

完整性约束保证了系统内不含错误的、无意义的数 据,如一个空地物、测量范围之外的点等。

(5) 数据安全性保证。由于各种原因,数据文件总有可能被破坏,如停电、磁盘坏等。典型的数据库系统以日志的形式记录保存,使数据被破坏的可能性降至最小,除了底层数据库系统的日志可以保障数据恢复外,EPSW 还提供了一个特殊的日志文件——细部重算文件,它记录着系统的所有测量活动,一旦数据库被破坏,可以根据细部重算文件进行恢复。细部重算文件的其它一些用途,就不在此细述了。

总而言之,EPSW 数据库系统是一个大型空间数据应用系统的一部分,其本身也是一个完整独立的空间数据库应用系统。

### 11.4.3 EPSW 数据库的设计

#### (1) EPSW 数据库中的基本概念

分析 EPSW 野外测量的数据处理过程,综合出下面一些基本概念。

点。一个抽象点的基本特征是它的空间位置,如点的三维直角坐标。为了指明是哪个点,还需对每个点赋予一个点号。在一项工程中,一个点的点号是唯一的,一经产生就不再改变,直至该点被删除,且在库中不再存在。点号就是点的名字,是访问点的可靠途径。

为了提高访问速度,EPSW 提供了点索引。点的索引是点在内存中的存储地址,它与点号的区别有两点:点号一经产生便不再改变,而点的索引是不断变化的,因为整个系统中的点的队列是动态的,它不断接受新的点,删除那些过时的、无用的点。通过点号访问点的速度较慢,是通过索引访问的时间 10 倍以上。这在日常测量过程中没有任何关系,但在需要连续大量进行点的计算(如碎部坐标重算)时,区别就很明显了。

一个抽象的点总是隶属于某个或某几个地物,因此在每次具体测量一个地物时,同时还要对点赋予一个地物号。

综上所述,对一个点的基本要求是:唯一的点号, $x$ 、 $y$ 、 $z$  坐标值,一个或多个地物号。

地物。地物是指同类点的顺序连接的组合。地物可以是由若干个点顺序连接组成的一条线,或一个多边形,或是若干个点决定的一个圆、一段圆弧。从图论上讲,一个地物是一个连通图,是一个不可再分的基本测量对象。从这个定义来讲,这里的地物与测量上常讲的地物还有一定区别。例如,测量上道路与坡都是一个地物,但在 EPSW 中道路的两边线各算一个地物,有各自的编码,这样定义后,才能彻底解决测绘地形图中所遇到的各种问题(参见目标定义)。在 EPSW 中制订了一套严密而又灵活方便的地物连接分裂机

制,如两个编码相同的线状地物被一条编码相同的线连接起来,这三者就自动连成一个地物;反之,若一个地物被删去一条线后变成了互不连通的两部分,则该地物被自动分裂成编码相同的两个地物。地物的这种连接分裂机制,保证了地物与其点输入的顺序无关,从而提供了灵活而又友好的用户接口。

每一个地物有一个唯一的地物号。地物一经产生,其地物号就被确定下来,直至该地物不再独立存在;而地物一经与别的地物合并,或分解成两个地物,它就变成了新的地物,原编号也就相应消失。

与点相同,地物也有一个索引值,代表地物在内存中的位置。地物号和索引的区别:地物一经产生其地物号就被确定了,它在所有地物中是唯一的。只要该地物不合并或分裂,该地物号就存在。而地物的索引则随着地物数量的改变而改变。通过地物号访问地物所需时间,是通过索引访问的时间的 10 倍以上。

不同的地物类型有不同的图式符号。对每一地物赋予一个规定的编码,EPSW 可根据编码对数据进行操作,使其表现出不同的图形及符号。

目标。目标是指为了某一目的而合并在一起的诸地物的总体,也称地物群。经过目标操作,在圈定的范围内,所有的地物都属同一个目标(地物群),称为目标合并;反之,将一个目标打散,目标内的地物分离成孤立地物,称为目标分裂。例如上述的道路和坡的问题,在目标定义下,通过合并,就可以统一。等高线遇道路应断开,若将道路左边线和右边线合并为一个目标,计算机识别合并,它们将自动形成一闭合区,等高线便不能穿过。又如坡的绘制,只有将坡上和坡下合并成一个目标后,才知道将坡上的毛线画到那条线为止。

目标是 EPSW 系统管理中的最大单位,一个地物属于一个目标或不属于任何目标。一个目标则可包含一个或多个地物。如果某个目标中的地物被删除完了,目标也就不存在了。

注记。注记就是在图上显示的一串文字。它可能显示在某个地物旁,也可能用来标注某个目标,分别称之为地物的注记和目标注记。如果它不属于任何对象,就称为游离注记。注记的属性主要是注记内容和显示方式,如字串角度、字体角度、字体高度等等。

索引。为了提高系统搜索速度,将整个测量空间用网格分成若干相同的正方形方格,并记下落在每个正方形方格的点、地物与目标。这样在搜索某个点、地物或目标时,首先找到目前所处的方格,再从落在此方格内的点、地物、目标中找到合适的点、地物或目标,就可以大大加快搜索速度。这就是建立的从方格到点、地物或目标的索引。

索引的建立是自动的,在点、地物、目标产生时自动将新的点、地物或目标加到所属方格的索引链中。

(2) EPSW 数据库的逻辑结构设计

系统 E-R 图

E-R 图即实体(enty)-关系(relation)图,是进行数据库设计的常用工具,它显示了数据库中所包含的实体以及相关实体间的对应关系,即数量比例。

EPSW 系统的 E-R 图如图 11-12 所示。下面进行具体分析。

目标、地物间是 1 m 的关系,又叫一对多的关系,也就是说,一个目标可以有一个或多个地物,而一个地物最多属于一个目标。

地物与点之间是 m n 的关系,又叫多对多的关系,也就是说,一个地物含有一个或多个点,一个点也可以被一个或多个地物所用。

目标、地物与注记的 1 1 的关系说明,一个目标或地物只有一个注记,而一个注记只属于一个目标或地物。

点的存储

图 11-12 E-R 图

考虑到经常需要通过点号来检索点,为此,用一个有序的一维数组来存放点。

从系统 E-R 图可以看出,一个点可以被多个地物所用。为了提高处理速度,为每个点建立一个地物链,用来存放所用该点的所有地物,如图 11-13 所示。

图 11-13 点的地物链

地物链是由若干链结点连接而成,每个链结点有两个元素:地物号和指向下一个链结点的指针,最后一个链结点的指针为 0。

例如,有两个点,点 1 被地物 10 和 11 所用,点 2 仅被地物 11 所用,则点队列及每个点的地物链表示如图 11-14。

图 11-14 两个点的地物链

为此定义点的存储结构为:

```
struct POINT{
    char id [ 10]; //点号
    .....( 点的其它属性)
    struct GRDBODYCHAIN * grdbody; //指向地物链首的指针。
}
```

地物链结构为:

```
struct GRDBODYCHAIN{
    char id [ 10]; //地物号
    struct GRDBODYCHAIN * nextgrdbody; //指向下一结点的指针,0 表示已到队尾。
```

}

## 地物的存储

前面已经讲过,地物是一个连通图。图的表示有多种,如数组法、十字链表法、邻接表法等等。

考虑到测量中地物的形态,采用简化的邻接表法。在这种表示方法中,每个地物由若干个折线组成。图 11-15 表示的是几种典型的地物邻接表。

图 11-15 几种典型的地物邻接表

图 11-15(a)的折线和(b)中的三点弧的邻接表结构完全相同,区别在于它们的线型不同:直线段组成的折线和弧线。其它还有样条曲线、拟合线等各种线型。在邻接表的结点中有一个值域记录着线型信息。

图 11-15(c)中的地物是由两条折线:1-2-5 和 2-3-4 组成。

定义地物的结构为:

```
struct RDBODY{  
    char id[10]; //地物号  
    char code[200]; //地物编码  
    char ownerid[10]; //地物所属的目标号,空串表示它不属于任何目标  
    char noteid[10]; //地物的注记号,空串表示无注记  
    struct ADJACENTLIST * adjacentlist; //指向地物邻接表的指针  
}
```

前面已经介绍过地物号。地物的另一个重要属性是编码,是符合国家标准的地物类型编码。地物的其它属性含义可参考注释。

对地物的维护要比对点的维护复杂得多。如前所述,为了方便用户操作,我们制订了一套地物合并、分裂的规则。每向地物中插入一条线,不仅要保证新加的线与该地物相连通——至少有一个端点存在地物中,而且还要检查新加的线是否将该地物与其它相同编码的地物连通起来,如果是,则要将两个地物合并成一个。无论地物合并与否,都要引起邻接表的一系列变化。这一点在下节还要涉及到。

## 目标的存储

对目标队列的维护相对来说简单多了,它是一个有序数组,只需要指明目标所包括的地物即可,这需要为每个目标指定一个地物链(图 11-16)。

图 11-16 目标的地物链

#### 11.4.4 EPSW 数据库的数据操作

##### (1) 双向指针的一致性

EPSW 数据库中有两对指针需要保持绝对一致: 一对处于地物与点之间, 一对处于目标与地物之间。

每个地物都包含若干个点, 对所包含的每一个点, 在其点队列的地物链中, 一定包含此地物的编号。

假设地物 1 中含有点 A, 则 A 一定出现在地物 1 的邻接表中(图 11-17)。

图 11-17 地物邻接表存有点 A

在点队列中, 地物 1 一定出现在点 A 的地物链中(图 11-18)。

图 11-18 A 的地物链中有地物 1

如果两对指针不一致, 系统内就出现了错误数据, 并将导致不可预料的结果。在目标和地物之间, 也有类似情况。如果包含某地物, 则该地物出现在该目标的地物链中, 该地物的属主编号一定是此目标的属主编号, 否则就会导致错误。

因此, 程序员应用 EPSW 数据库接口函数时一定十分小心, 不要让错误数据进入系统。

##### (2) 点的操作

系统提供了对点队列的维护函数, 如点的建立、修改、查询, 这些都比较简单, 只需将必要信息填到一个特定结构中, 再调用接口函数即可。



值得一提的是点的遍历与删除操作。点的遍历是指对所有的点进行一遍操作。例如,假定要将所有点的高程显示在屏幕上,函数 `display-height(index)` 显示一个点 `index` 的高程,`index` 为点的索引,则可如下编程:

```
int index; //定义一个变量存储点索引
index= getfirstpoint( ); //取库中第一个点
while(index> 0){ // (返回,表示点已取完)index> 0 表示还有点
    display-height(index); //显示该点的高程
    index= getnextpoint( ); //取库中下一个点
}
```

首先调用 `getfirstpoint` 函数,取库中第一个点,再反复调用 `getnextpoint` 函数,取库中下一个点,直至取完所有点为止。

下面还会看到,对地物、目标采用了同样的游标式遍历方法。

点本身的删除并不复杂,只需从点队列中删除该点即可。问题在于,点的删除导致所有以它为端点的线段的删除,这又引起了地物的分裂。如图 11-19 所示,删除点 3 后,线段 23, 34 都被删除,原有地物分裂。

图 11-19 点删除

还有一个问题是,如果有一个孤立(独立)点地物(如一棵独立树),点的删除也会引起地物的删除(空地物应被删除),进一步又会引起空目标被删除。

综合起来,删除一个点的操作流程如图 11-20 所示。

(3) 地物的操作

地物的操作有地物的产生、删除、浏览。随着测量过程的进行,地物不断增多,刚产生的地物总是一个孤立点地物,从图形学上讲,一个孤立点地物只有一条折线,该折线只含一个点。插入一个与该点相连的线段后,就生成了含两个点、一线段的地物,以后又逐步增大。

地物的删除涉及到的变化,从前面的点的流程图中也可看到一部分,即需要从目标中将地物删去,可能会引起空的目标的删除。地物的删除还意味着将其所有线段删除,内存释放,并将该地物从它的地物链中删去。如果该点号为该地物所用,也会被删去。

地物的遍历机制与点类似,不过需要三层循环:地物队列中地物的遍历、每个地物中折线的遍历、折线中点的遍历。

我们已经知道,地物队列中有若干个地物,地物的遍历过程与点完全相同:

```
int index;
inedx= getfirstgrbody( ); //取库中第一个地物
while(index> 0) { //index> 0 表示还有地物(处理索引为 index 的地物)
```

图 11-20 点删除的操作流程

```
index= getnextgrdbody( );    //取下一个地物
}
```

每个地物都有一条或多条折线, 每条折线表现为邻接表中的一行。对某个地物, 依次处理它的每条折线的程序为:

```
struct - ADJACENTLIST * alist;    //定义一个指向折线类型的指针
alist= getfirstadjacentlist( );    //取该地物的第一条折线
while(alist< > NULL) {           //(返回空指针表示折线已经取完)处理这条折线
alist= getnextadjacentlist;        //取该地物的下一条折线
}
```

对地物的每条折线, 都有一个或多个结点连成一串: 一个结点的折线只有一个点, 两个结点的折线为一线段。依次访问某折线的所有结点的程序为:

```
struct- ADJACENT POINT * apoint; //定义一个指向点结构的指针
apoint= getfirstadjacentpoint( ); 取折线的首点
while (apoint< > NULL) {          //表示未到折线尾, 处理该结点。返回值为 NULL, 表示已到折线尾
apoint= getnextadjacentpoint( );   //取下一结点
}
```

综合上面的程序, 如果要对所有地物中所有结点作一次循环的话, 程序应如下所示。注意这与点队列的遍历不同。点队列遍历对每个点只访问一次, 而这个循环中某个点被几条线段所用, 就被访问几次。

```
int index;
struct - ADJACENTLIST * alist;
struct - ADJACENTPOINT * apoint;
index= getfirstgrdbody ( );
while (index > 0 ) {
    alist= getfirstadjacentlist ( );
    while (alist< > NULL) {
        apoint= getfirstadjacentpoint ( );
        while (apoint< > NULL) {
            处理该结点;
            apiont= getnextadjacentpoint ( );
        } //折线内点循环结束
        alist= getnextadjacentlist ( );
    } //地物内折线循环结束
    index= getnextgrdbody( );
} //地物队列中地物循环结束
```

(4) 线段的操作

几乎每次测量都要导致线段的增加, 所增加的每条线段, 除了两个端点外, 还具有一个属性——编码, 要根据该编码进行下列操作:

如果两端点都不处于编码与该编码相同的地物, 则需要产生一个新地物, 编码为该编码, 含有两个点和一条线段。

只有一个端点或两个端点都处于编码为该编码的地物中, 则将该线段加入该地物的邻接表中。

如果两端点分别处于两个编码都与该编码相同的地物中, 则要将两地物及该线段合并成一个地物。注意不能忘了每个点的地物链的变化。

线段的删除更复杂。每删除一根线(不删除端点), 都要判断剩下的地物是否连通, 若不连通, 则分成两个邻接表, 即一个地物也就分成了两个编码相同的较小地物。这个过程, 由一个较为复杂的图形算法实现, 注意不能忘了地物链的变化。

(5) 目标的操作

对目标的操作没有太复杂的处理过程, 主要是将若干孤立的地物合并成一个目标, 或将一个目标分成若干个孤立地物。删除目标则要将目标及所有地物删除掉。

11.5 EPSW 的符号扩充功能

EPSW 不仅拥有一套完整的图式符号库, 建立了自身的符号体系(参阅 8.4 节), 同时还具备了系统化的扩充能力。

EPSW 符号库的设计详见 8.4 节。在显示或绘图时, 根据编码到库中提取符号(图 11-21)绘制, 这使得数据与符号的关系更为清晰, 信息与图的要求都得到保证。数据与符号之间的唯一联系是编码。

此外, EPSW 还提供了独立符号的补充制作功能, 根据专门设置的格网, 进行网点捕捉, 即可描绘出符号的图形。这种制作符号的方法, 使符号扩充变得轻而易举。图 11-22 为制作独立符号的界面, 在制作完符号的图形(目标)后, 先选中目标, 选中插入点(符号的定位点), 再给出编码及中文名称, 就可自动生成符号了。

图 11-21 数据与符号的关系

图 11-22 制作独立符号的界面

## 12 控制测量的数据处理

### 12.1 概述

在 5.2 节中讲到, 数字测量的图根控制可采用“一步法”测量, 但对于高等级的控制测量, 还必须遵循“先控制后细部”的测量原则。所谓“先控制后细部”就是先进行控制测量, 建立测量控制网, 然后在控制网的基础上, 开始图根控制和细部测图工作。

由在测区内选定的若干个控制点构成的几何图形称为控制网。控制网分为平面控制网和高程控制网两种。测定控制点平面位置( $x, y$ )的工作, 称为平面控制测量, 测定控制点高程( $H$ )的工作, 称为高程控制测量。

控制网是进行各项测量工作和定位科学研究工作的基础, 建立控制网的作用在于:

- (1) 控制全局;
- (2) 限制测量误差的传递和积累。

近些年来随着测绘科学的不断发展, 全球定位系统(GPS)在控制测量中的应用越来越广泛, 目前已经在很大程度上取代了常规测量方法, 成为控制测量中的一种先进手段。有关 GPS 定位技术的基本原理请参见本书附录, 有关 GPS 的应用请参阅有关文献。

本章主要讨论各工程部门最常面临的常规控制测量中的控制网设计、记录和平差方面的计算机原理和方法, 以及建立局部性 GPS 控制网的工作方法及其数据处理方法。本章研究对象是工程控制网, 测量手段是常规测量(即角度测量、距离测量和水准测量)和 GPS 控制测量(即 GPS 卫星定位测量), 处理方法基于计算机技术, 服务于数字化测图。

讨论将基于国内应用广泛的优秀控制测量软件 NASEW(network adjustment of surveying engineering for Windows), 该软件内含智能推理机制, 可以用统一方式自动处理各种形式和规模的平面和高程控制网(包括秩亏、拟稳、多期变型监测网、不等精度混合网等)的概算、平差和设计, 其概貌如图 12-1。图中:

- 控制点坐标、高程显示编辑区;
- 测站信息显示编辑区;
- 测站观测值显示编辑区;
- 控制网网形、精度显示控制区。

和 区是电子表格, 区是动态可视化显示图形。数据可直接进入或手工键入, 所有处理在系统平台中自动完成。

### 12.2 坐标概算

由于控制网的结构千差万别, 观测值种类较多, 因此网类划分复杂。为坐标概算需要,

图 12-1 NASEW 软件的编辑、控制区

一般程序都要求输入网形格式和数据编排顺序,要用户按程序的描述需要对数据进行编号,将待定点组成某种几何图形,通过测定几何元素(如角度、边长、高差等)来求出点的位置。以平面网为例,通常按某种编号或顺序用方向和边长观测值来计算坐标。

这种输入方式的缺点是显而易见的:掌握编号规则需要理解程序和分析网形,增删数据比较困难,往往由于插入一个观测值需要对全网重新编号,使程序的通用性及可扩展性很差。

为自动推理的需要,必须寻求一种与网形和数据编排无关的通用计算公式,由系统分析推理出网形信息,自动组成控制网,从而实现与网形无关的通用平差系统。图 12-2 中,当一端坐标已知,通过测站方位角,方向值就能转化为“方向射线”;若测站方位角未知,而两个方向观测的照准点已知时,可求出这三点构成的“外接圆”的圆心和半径;对边长观测值,若一端已知,就构成了已知圆心和半径的“定点圆”。所以对任何网形结构,其观测值用于坐标推算时,总是能表示成直线和圆,也就是说,总是能通过求解直线和直线、圆和圆、直线和圆的交点来算出坐标。

将以上的“方向射线”、“外接圆”和“定点圆”统称为“计算条件”,在坐标计算时,只要检索出任意点处两个相互独立的“计算条件”,该点坐标便可求出。新求出的点又可为其它点生成新的“计算条件”,求出其它点的坐标,直至全部,这是一个递归的计算过程。

在求解直线和圆、圆和圆的交点时会出现双解,这时可根据射线方向、解不能与已知点重合等条件剔除大部分非法解,再通过多余观测的比较和筛选,可基本消除双解。对确

图 12-2 计算条件分析

无法判定的双解,可将其直接显示在网图的相应位置,由用户直接选择。

NASEW 通过这种自动推理机制自动组网,即根据已知点和观测值,自动构成控制网的图形结构,而与点和观测值的输入顺序及编号无关,也无需编码,保证了数据的自由输入。在功能强大的数据处理集成环境的支持下,用户可以按自己熟悉的方式组织和处理控制网数据。

### 12.3 控制网的数据结构与闭合差计算

传统的控制网可划分为三角网、三边网、导线网、边角网、水准网、三角高程网等等,种类繁多,形式各异,控制网处理中要求对数据编辑、概算、观测质量评价、平差和精度分析等。若要实现一个通用的具有自动推理功能的智能系统,还必须有一种能对控制网结构进行拓扑分析的方法。

图论是研究由顶点和边组成的线图的理论。测量控制网正是由点和边组成的网,所以应用图论原理来分析控制网拓扑最为自然,也非常有效。在自动组网和网形分析中,将控制网作为线图来研究可获得简明的结果。

本节将讨论这种系统所需的数据结构和各种闭合/附合路线遍历和优化的方法。

#### 12.3.1 控制网的数据结构

数据结构是一个软件系统的基础,直接影响到算法的选择和效率。常用的线性表和树结构无法清楚地表达出控制网的拓扑关系,需强制规定数据列的序列关系,这样就限制住了系统的扩展性和通用性。

从图论和数据结构的角度来分析控制网,可以看出控制点之间的关系是任意的,其关系比树形结构更为复杂,具有明显的图结构。如图 12-3 所示,控制网  $G$  可以是高程网(图(a)),可以是平面网(图(b)),图(c)为其抽象的控制网图。控制点为图中的顶点(结点),观测值则为连接顶点的弧段或边。

方向观测值、高差为有向边;距离观测值为边;而归心元素、仪器高等观测量则为过顶点的自环。所以控制网中的各种观测值总是可以归纳为图论中的边来表示。

图的数据结构有多种表示,常用的有相邻矩阵、邻接表和邻接多重表等。用相邻矩阵法表示图,需要存储一个  $n \times n$  的相邻矩阵来表示顶点间的相邻关系。邻接表和邻接多重表法表示图需要  $n + m$  个单元( $n$  为顶点数,  $m$  为边数,包括自环),邻接多重表在管理上较为复杂。实践证明控制网适宜采用邻接表来表示。

图 12-3 控制网图

设图 12-4(a)所示的控制网图为  $G$ , 若图  $G = (V, E)$  含有  $n$  个顶点, 则用  $n$  个链表来表示  $G$ 。链结点(测站)的结构是

顶点域          vertex          链域          link  
(注: link 表示一连接链, 由多个 edge 构成。)

在第  $i$  个链表中所出现的顶点都是邻接于  $V_i$  的顶点(照准点)。把各链表的表头指针存入指针链中, 形成广义邻接表。 $G$  的邻接表举例如图 12-4(b)所示。其中  $V$  为顶点号,  $v$ -data 为顶点的数据域, 可包括点名、坐标、高程、属性(如 1 为固定, 0 为待定)等。 $e$ -data 为弧段数据, 由观测值、属性和分类(如  $da$  为边长,  $ca$  为方向值,  $ha$  为高差)等构成。

图 12-4

用 C 语言可表示为:

```
struct v_data{           // * * * * 顶点数据结构 * * * *
double x,y,h;           // 点的三维坐标
    short xy_att;        // 点平面坐标的属性
    short h_att;         // 点高程的属性
struct v_data * next;    // 下一个顶点数据结构的指针
struct e_data * first;   // 首弧段的结构指针
};

struct e_data{           // * * * * 弧段数据结构 * * * *
```



```

struct v_data * targ;    // 邻接顶点(照准点)指针
double observe;         // 观测值
short obs_att;          // 观测值属性(边长、方向等)
short adj_att;           // 精度等级(固定、三等、图根等)
struct e_data * brother // 隶属于同站的下一个弧段的指针
};

```

在这种存储结构中,包括了结点数据(坐标、高程、属性等)、观测数据和网图数据,构成了控制网的数据结构。因为与一个结点相关联的所有边都链接在同一链表里,为以站形式组织各类观测数据的输入和编辑以及自动组网推理机制的实现提供了方便。

### 12.3.2 控制网条件路线的生成方法

基于上述数据结构,可按间接平差方法逐站逐项直接组成误差方程。在控制网概算阶段,为了解观测精度,由软件自动生成所有独立条件路线是非常重要的。

在某些按条件平差的程序中,依靠判断某点与相邻点间观测情况来形成三角形和极条件等,但由于传递形式构成的条件,如基线条件、方位角条件等等,在确定走向时计算复杂,仍需用户输入路线信息。

如前所述,根据需要可将控制网分解为仅含某类观测量的简单子图,如由高差组成的高程网,由方向观测值组成的方向网都属于简单图。在后面的讨论中都是针对这种简单图进行的,并假设为连通图。

从图论上讲,求闭合条件路线就是求图的基本回路,求附合条件路线则是求固定点间通路的问题。这些回路和通路的求解可通过对图的遍历来完成。对图的遍历是指按一定的规则使图上的元素被访问一次且仅被访问一次。遍历图的规则通常有两种,分别体现在深度优先搜索法和广度优先搜索法中。

对连通图可通过遍历生成关于图的一棵树,如图 12-5(a) 为图  $G_1$ 。按深度优先搜索法遍历图的过程如下:首先访问任意指定的起始点  $V_1$ ,从  $V_1$  出发,在访问了任意一个和  $V_1$  邻接的顶点,如  $V_2$  之后,再从  $V_2$  出发,访问和  $V_2$  邻接且未被访问过的任意点,如  $V_4$ ,然后从  $V_4$  出发,重复上述过程,直到所有邻接点都被访问过为止。图 12-5(b) 表示出了该法遍历图  $G_1$  时生成的一棵树。对图  $G_1$  按广度优先搜索法的结果如图 12-5(c) 所示。以下讨论采用深度优先搜索法。

图 12-5

树上的边称为树枝,非树上的边称为连枝。每一连枝与树枝构成一独立的回路,即为测量上所说的闭合路线。对照图 12-5( a)与( b),  $V_2 - V_3, V_2 - V_5, V_1 - V_3, V_7 - V_8$  为( b) 树的连枝,与树枝构成图 G1 的 4 条基本回路:  $C_2, C_3, C_4, C_5$ 。附和路线则可由连接固定点的树枝构成。若  $V_1$  和  $V_8$  为固定点,则路径  $C_1 - V_1 - V_2 - V_4 - V_8$  为附和路线。

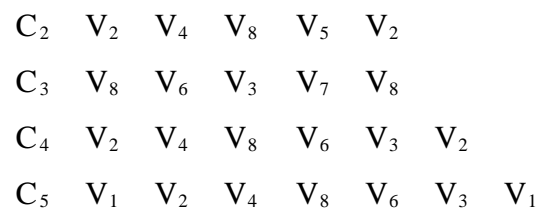


图 12-6 G1 的 4 条基本回路

这些回路和通路的求解可在对图的遍历中完成。算法如下:

首先将用来存放遍历状态的栈初始化为空。为生成附和路线的需要,遍历的始点应选为固定点。对高程网,邻接边指两点间的高差路线。对方向网,邻接边指两点间存在对向方向观测值的边。当所有点和边均已访问,遍历结束,所构成的 4 条回路和一条固定点间的通路构成图 G 的基本条件路线集。

图 12-7 的算法可解决高程网和方向闭合路线的求解,但对方向附和路线因通路的两端是附和在固定方向上而不是固在定点上,所以在求方向条件路线时,应将图 12-7 中第 7 步的判断条件改为: 该邻接边是否为固定方向? 再则,固定方向允许为单向观测。若某方向路线上存在一一对应的边长观测值,则构成一导线路线。

图 12-7 高程网和方向闭合路线的求解框图

在此生成过程中,需一长度为顶点数的栈,因回路和通路的形成是通过对栈的回溯来完成的,遍历时为  $O(m+n)$  ( $m$  为图所含的边数,  $n$  为顶点数)。

12.3.3 路线优化

通过以上遍历过程,得到以点集表示的各路线。这些路线构成了图的基本条件路线集,集中各路线相互独立。对连通图,集中的

$$\begin{aligned} \text{闭合路线个数} &= \text{边数} - \text{顶点数} + 1; \\ \text{附和路线个数} &= \text{固定点或固定方向数} - 1。 \end{aligned}$$

习惯上还要求基本条件路线集中的路线最短,即经过的点最少。优化方法有多种。如对回路的优化,因每一回路均包含唯一的连枝,若求出除连枝外的两点间最短路径 (Floyed 或 Dijkstra 法),与连枝构成的回路即最短。但这种方法需相邻矩阵,而且还需进行重复性判断,算法较为复杂。这里提出如下算法:

在深度优先遍历中生成的通路和回路,具有点序一致和相邻路线递增/递减排列的特点。通过对基本条件路线集中的路径进行环和运算来完成迭代优化。

设  $C_i, C_j$  为基本条件集中的两条路径(路线),  $C_k$  为它们的环和( 为逻辑加):

$$C_k = C_i \cup C_j$$

若  $C_i$  和  $C_j$  至少有一个公共边,  $C_k$  非空,且路径的长度满足

$$d(C_k) < \max \{d(C_i), d(C_j)\}$$

则以  $C_k$  替换  $C_i, C_j$  中长度大者。可以证明这种替换不会改变基本条件集中各条路径的独立性。

例如对图 G1,通过  $C_4$  与  $C_5$  的环和得

$$C_3 = C_4 \cup C_5 = (C_4 \cup C_5) - (C_4 \cap C_5) = \{V_1, V_3, V_2, V_1\}$$

图 12-8 闭合差统计表

式中 为逻辑并, 为逻辑交。 $C_3$  长度  $d(C_3) = 3$ ,  $C_1$  的长度  $d(C_1) = 5$ ,  $C_3$  的长度  $d(C_3) = 6$ 。所以基本条件集中的  $C_3$  由  $C_3$  替换。

极条件和基线条件是由三角形构成的通路。三角形可以是测边三角形、测角三角形(至少测两个角)。为能对这种路线进行图的运算, 对其进行拓扑变换, 形成满足线图定义的图<sup>[25]</sup>。

在 NASEW 中自动计算出闭合差后显示如图 12-8。

## 12.4 粗差定位和剔除

### 12.4.1 粗差自动剔除方法概述

对粗差, 由用户通过闭合差比较、可靠性分析来人工剔除, 或选用一种稳健迭代权法, 进行粗差自动剔除。

可靠性研究的一个最现实目的是如何在平差过程中自动地发现粗差的存在, 并正确地指出粗差的位置, 从而将它从平差中剔除, 这就是所谓的粗差自动定位问题。处理观测值中所包含的粗差基本上有两条途径:

一种是将粗差归入函数模型, 可以把含粗差的观测值看作与其它同类观测值具有相同的方差、不同的期望的一个子样。可根据平差的结果严格构建相应的统计量, 在给定的显著水平  $\alpha$  下, 便可与临界值  $K_\alpha$  相比较, 从而判断相应的观测值是否包含粗差。

另一种途径是将粗差归入随机模型, 可以把含粗差的观测值看作与其它同类观测值具有相同的期望、不同的方差的子样, 含粗差观测值的方差将异常的大。可根据逐次迭代平差的结果来不断地改变观测值的权, 最终使含粗差的权趋向于零, 从而达到剔除粗差的目的。此方法的核心是如何选择合理的权函数。目前有从稳健(robust)估计法出发的各种经验给权方法, 其中尤以丹麦法出名, 另外亦可以直接由最小二乘法验后方差估计原理出发, 导出其权函数。

还有一种直接从  $\sum |v_i| \min$  条件出发, 即从改正数绝对值总和最小条件出发的非最小二乘直接解法(即线性规划法), 在进行粗差定位中亦有应用前景。

### 12.4.2 粗差归入函数模型时的粗差检测方法

#### (1) 单个粗差的检测方法

在已知单位权方差的情况下, 有下列正态变量的检验量——标准化残差:

$$w_i = \frac{v_i}{\sqrt{\hat{\sigma}_v^2 r}}$$

式中  $v_i$ ——残差;  
 $\hat{\sigma}_v^2$ ——方差估值;  
 $w_i$ ——标准化残差;  
 $r$ ——多余观测分量。

通过  $t$  分布的检验量进行检验。

#### (2) 多个粗差的检测方法

比较简单的办法是连续使用一维的数据探测法。

一种处理方法是:从全部观测值参加平差出发,进行一维的数据探测,并剔除标准化残差最大的那个观测值。在下一步由  $n-1$  个观测值参加平差,又一次进行数据探测,逐个地剔除粗差,称为“向后选择法”。

另一种方法是:从最小可能的无粗差的数据组开始进行平差,根据平差结果来计算那些被怀疑而未参加平差的观测值的改正数,对它们进行数据探测,从而判断它们是否真的含有粗差。

也可以采用组合的向前-向后选择法:在第一阶段中先采用数据探测法向后选择,找出那些怀疑有粗差的观测值,然后在向前选择过程中再来决定那些被怀疑的观测值是否真的含有粗差,或仍为正常观测值应参与平差。

12.4.3 粗差归入随机模型时的粗差定位方法

选择权迭代法的基本思路:由于粗差未知,平差仍从惯常的最小二乘法开始,但在每次平差后,根据其残差和其它有关参数,按所选择的权函数,计算每个观测值在下步迭代平差中的权。如果权函数选择得当,且粗差可定位,则含粗差观测值的权将越来越小,直至趋近于零。迭代终止时,相应的残差将直接指出粗差的值,而平差结果将不受粗差的影响。这样便实现了粗差的自动定位和改正。

迭代中权函数按其内容区分为:

- 1) 残差  $v_i$  的函数;
- 2) 标准化残差  $w_i$  的函数;
- 3) 方差估值  $\sigma_i$  的函数。

现将常用的一些权函数列举如下:

(1)  $L_q$  迭代法(最小范数迭代法)

$$\begin{aligned} P_{k+1} &= 1 / ( \sum v_k^q + c ), & q &= 1 \\ P_{k+1} &= 1 / ( ( \sum v_k^2 ) \exp(2) + c ), & q &= 0 \\ P_{k+1} &= 1 / ( \sum v_k^q \exp(2 - q) + c ), & 0 < q < 2 \end{aligned}$$

(12-1)

式中  $P_k$ ——第  $k$  次迭代时的权;

$c$ ——一适当小的正数,引入它是为了在改正数为零时不致引起迭代求解的困难。

(2) 丹麦法

由 Kubik 提出,其出发点也是常规最小二乘平差。用第一次平差的残差,根据下列权函数计算各观测值下一次迭代的权:

$$P_{k+1} = \frac{P_k}{P_k \exp( \sum v_i^2 / (m_0 c) )}$$

$$\begin{aligned} & \text{若 } \sum v_i^2 / m_0 < c \\ & \text{若 } \sum v_i^2 / m_0 \geq c \end{aligned}$$

(12-2)

式中  $P_0$ ——权系数;

$m_0$ ——观测中误差;

常数  $c=3$ 。

(3) 带权数据探测法

由 EL-HAKIM 提出

$$P_{k+1} = \begin{cases} 1 & w_i < 4.13 \\ 1/w_i^2 & w_i \geq 4.13 \end{cases} \tag{12-3}$$
$$w_i = \frac{1}{\sqrt{q_{vi}}}$$

式中  $q_{vi}$ ——权系数矩阵中观测量的权倒数。

(4) Huber 估计法

$$P_{k+1} = \begin{cases} 1 & \text{当 } |v| \leq c \\ c/|v| & \text{当 } |v| > c \end{cases} \tag{12-4}$$

式中  $c$  可取 0.7 ~ 2.0

(5) 周江文法

观测值的权为  $P_i$ , 迭代权为  $w$ , 等价权  $P = P_i w$ 。

估计函数分 3 段:

- 残差 < 1.5 , 采用最小二乘估计;
- 残差 = 1.5 ~ 2.5 , 采用  $L_1$ (一次基数)最小估计;
- 残差 > 2.5 时为 0。

对于稳健权迭代法, 以各观测值的验后方差作为权函数的基本成分, 并取指数函数形式, 是用于粗差定位的较为理想的权函数。

12.4.4 粗差剔除方法

NASEW 软件中选用了丹麦法、带权数据探测法、Huber 法、周江文法和多粗差向后剔除法 5 种具有代表性的方法。用这些方法对边角导线混合网 ex41.obs(如图 12-9)进行了测试, 结果如表 12-1。从试验结果看到, 各种稳健迭代权法均对粗差剔除有一定效果, 其中多粗差后剔法效果最好。

表 12-1 粗差剔除结果

粗差 观测值	1 ~ 7 方向含 5			1 ~ 8 边含 1m			1 ~ 7 含 20 , 1 ~ 8 含 0.1m			
	m	迭代次数	v	m	迭代次数	v	m	迭代次数	v 方向	v 边
丹麦法	2.1	7	5.01	2.0	7	0.968m	3.6	2	13.3	0.038m
带权探测法	1.7	6	5.01	1.9	4	0.861m	2.0	4	20.0	0.055m
Huber 法	8.3	7	4.57	5.5	7	0.718m	2.7	7	19.0	0.037m
周江文法	1.8	4	5.01	1.5	3	1.387m	1.7	7	21.0	0.079m
多粗差后剔法	1.7	3	5.01	1.6	3	0.997m	1.6	4	21.0	0.097m

注: 表中  $m$  为中误差,  $v$  为改正数。

目前任一种粗差检测方法的定位能力的好坏与该平差系统的多余量密切相关, 多余量愈大粗差定位能力愈强, 而且与初始权比、粗差大小和位置有一定关系。

特别在含多个粗差且多余观测测量很少的情况下, 即使线性规划或多粗差后剔法也不能解决问题。这就要靠人工定位来剔除了: 通过闭合差和条件路线的任意组合进行分析,

图 12-9 边角导线混合网测试界面

对比每个观测值的权、多余观测分量、残差、标准化残差等可靠性数据来定位粗差。

由于 NASEW 提供了与网形无关的处理功能, 在控制网观测中若条件允许应尽量做多余观测, 如导线网测量中增加方向观测, 以提高控制网的可靠性。

粗差处理的一般过程为:

- (1) 使用纯迭代法以减少因概算不准而引起的误差;
- (2) 使用验后权法合理确定各类观测值不同的权比;
- (3) 使用某种稳健迭代权法进行粗差自动剔除, 若误差仍很大, 且无法剔除粗差, 则转(4)。
- (4) 使用“粗差\可靠性分析”找出标准残差  $w$  最大的观测值和多余观测分量最小的值, 选其一暂时剔除(观测值属性置 7), 重复第(3)步, 然后做出分析, 进一步确定真正含粗差的值;
- (5) 也可使用“闭合差计算”功能, 通过分析闭合差来确定粗差位置;
- (6) 粗差剔除后, 进行第(2)步, 并打印成果。

注: 一般认为粗差应在标准残差分量  $w$  最大(而不一定是  $v$  最大)的观测值上。NASEW 将  $w > 2$  的观测值用红色表示。当  $w$  有多个大值时, 理论上只剔除  $w$  最大的观测值(不能同时剔除多个)。

# 12.5 控制网平差

本节主要介绍 NASEW 进行平差时所采用的基本方法。在大型测区,基本控制和加密测量往往是同步进行的,不等精度混合平差既可提高整网的精度和可靠性,又能统一原始数据的录入。NASEW 提供了对这种新的需求的支持。它允许对每个观测值直接指定权(中误差形式),更为方便的是它直接支持将观测值划分为两个精度级,然后统一指定它们的精度。在 NASEW 中约定,同属第 1 个精度等级(如四等网)的观测值称为 0 类观测值,属于第 2 个精度等级(如城市二级导线)的观测值称为 4 类观测值。

## 12.5.1 中误差和权的确定

平差所采用的方法为间接平差。在秩亏网和拟稳网中采用角度作为平差元素。支持不等精度混合平差,即 0 类(属性为 0 的)观测值和 4 类(属性为 4 的)观测值可同时参加平差。平差前需指定各观测量的先验中误差,系统将据此来确定权。

### (1) 单位权

平面网单位权指 0 类方向观测值的权,而在秩亏网和拟稳网中指测角中误差,高程网单位权指 0 类直接高差(一般指水准测量高差)的权。

单位权中误差均不得为零,若用户置为零,系统将强制赋予默认值 0.00017(0 类方向中误差 1.7 )和 0.010m(0 类直接高差中误差)。

### (2) 观测值中误差

#### 方向中误差

一般为测角中误差的  $1/\sqrt{2} = 0.707$  倍。可按相应的等级套算,如对四等网,方向中误差=  $0.707 \times 2.4 = 1.7$ ,输入为 0.00017。

#### 边长中误差

由固定误差和比例误差组成。对激光测距仪,一般取其标称精度值或经验值。对钢尺量距,一般取经验值。注意,边长比例误差以  $10^{-6}$ (ppm) 为单位。如,钢尺导线的丈量精度为  $1/5000 = 0.0002$ ,则比例误差为  $200 \times 10^{-6}$ (即 200ppm)。

边长的权= (0 类方向中误差/ (边长固定误差+ 边长 $\times$  比例误差))<sup>2</sup>

#### 直接高差中误差

直接高差是类值为 h 的高差,一般指水准测量的高差。若高差路线以距离表示,则误差指每公里高差中误差,权=  $1/\text{路线长}$ (路线长/km);若为站数,则指每站高差中误差,权=  $1/\text{站数}$ 。

确定测段权倒数的次序为:用户直接输入的测段长度或测段站数,由两端坐标反算边长。若均不成功,则不能进行平差或精度估算。

#### 间接高差中误差

间接高差是类值为 \$ 的观测值,一般指可由三角高程或高程导线测量计算出的高差。间接高差中误差指每公里高差中误差,权=  $1/(\text{距离})^2$ (距离/km)。

以上 4 种误差均有 0 类和 4 类之分。



4 类观测值的权 = (单位权中误差 / 4 类观测值中误差)<sup>2</sup>

若控制网中无 4 类观测值, 则无需指定其中误差。

通过不等精度混合平差, 可解决复杂网的平差问题, 如某高程网中包括三等水准测量、图根水准测量、光电高程导线、三角高程测量。若要同时平差, 则可分别将它们规定为 0 类直接高差、4 类直接高差、0 类间接高差、4 类间接高差, 并给出各自的先验中误差。

假如某平面网中有三等三角测量、5 小三角测量、GPS 基线测量、光电测距, 若同时平差, 则可分别指定为 0 类和 4 类观测值。

### 12.5.2 平差过程

对秩亏网和拟稳网应特别注意以下几点约定:

- 只要存在固定点, 就按常规网处理(这时拟稳点按待定点处理);
- 若有拟稳点(属性为 2 的值), 采用拟稳平差;
- 采用独立角度值参加秩亏网或拟稳网的平差, 即在照准了  $n$  个方向的中心点上仅有  $n-1$  个独立角值(不是  $n$  个, 应特别注意这一点);
- 对平面网, 秩亏度必须  $\geq 2$ , 可处理仅含  $x$  和  $y$ (位置)秩亏的网, 但不能处理仅含尺度或方位秩亏(而位置固定)的网。这一点与第一条约定是相同的。

应注意“独立网”与“自由网”的区别。在独立网中一个点的位置、一条边的方位和(或)边长已经被设定为固定值, 而“自由网”与“秩亏网”属同一概念。

平差分为“单次平差”和“选择平差”。用户可指定迭代次数, 系统终止迭代的条件为: 达到迭代次数, 或本次平差后单位权中误差与前次平差后单位权中误差之差小于先验单位权中误差的  $1/100$ 。对控制网按“精度估算”处理时, 只有“单次平差”一种方式。

平差开始后, 系统执行以下过程:

(1) 预处理, 分析概算的完成情况, 即是否仍有待定点的坐标或高程未算出, 是否能确定所有观测值的权;

(2) 组成法方程;

(3) 解出法方程的逆阵;

(4) 对平差网求出改正后的坐标或高程;

(5) 对多次迭代, 若条件不满足, 继续第(2)步;

(6) 对平差网进行观测值改正;

(7) 精度评定。

平差中系统随时报告平差的进展情况, 如预处理, 正在某次迭代等。若平差成功, 系统报告平差后各观测量的验后中误差。若失败, 系统报告失败的原因, 如

——预处理出错, 检查概算是否完成, 是否有非法观测值等;

——组成法方程失败, 可能有非法观测值, 或同点不同名等情况;

——必要观测数不够, 平差要求至少有一个多余观测值, 精度估算要求观测数与必要观测数至少相等;

——法方程解算失败, 可能是某个待定点上的必要观测数不够等。

平差中系统自动对所有点和所有观测值的边进行点位误差(平面或高程)、点间误差

(相对误差、比例误差或高差中误差)评定。用户可指定任意两点(无观测值联结),让系统评定其点间误差,平差前输入一个属性为# 的观测值。

对平面网可按“方向”或“角度”进行平差。平面网平差时要求知道先验的方向中误差(单位为 $^{\circ}$ 、 $'$ )和测距的固定误差(单位为 m)及比例误差(单位为  $D \times 10^{-6}$ , D 为公里数),4 类观测值可用来进行不等精度平差,若网中含 4 类观测值,则需确定相应的精度值。

对控制网平差时可选择(其界面参见图 12-10,点按平差方法下拉式选择框,即可弹出各种平差方法菜单):

- 单次平差——仅进行一次普通平差,不进行粗差分析;
- 丹麦法——一种指数形式的由改正数定权的稳健迭代权法平差;
- 带权探测法——由标准化残差定权的稳健迭代权法平差;
- Huber 法——由改正数定权的稳健迭代权法平差;
- 周江文法——由改正数确定变权或剔除的稳健迭代权法平差;
- 多粗差后剔除法——由标准化残差逐次剔除粗差的向后剔除法平差;
- 纯迭代平差法——不修改权,仅由新坐标修正误差方程的迭代法;
- 验后定权法——不同类观测值混合平差时由各类测值的验后方差确定相应类权的平差方法。

图 12-10 平差方法选择菜单

## 12.6 GPS 控制网的建立及其数据处理

### 12.6.1 GPS 控制网的特点

通常将应用 GPS 卫星定位技术建立的测量控制网叫做 GPS 控制网(有时也简称 GPS 网),可将其分为两大类:一类是国家或地区性的高精度 GPS 控制网,这类网中相邻点的距离通常是从数百公里至数千公里,其主要任务是作为高精度三维国家大地测量控制网,用以求定国家大地坐标系与世界大地坐标系的转换参数,为地学和空间科学等方面的研究工作服务;或者是对 GPS 网进行重复观测,用以研究地区性的板块运动或地壳形变规律等问题。另一类是局部性的 GPS 控制网,包括城市或矿区 GPS 控制网,或者

其它工程测量 GPS 控制网;一般说来,这类网中相邻点间的距离为几公里至几十公里,其主要任务是为城市建设或工程建设服务。

应用 GPS 卫星定位技术建立测量控制网与常规方法相比,具有以下主要特点:

- (1) 采用相对定位方法,即通过若干台 GPS 接收机同步观测,确定各点之间的相对位置;采用载波相位测量技术,可得到高精度的测量结果;
- (2) 不要求各点之间互相通视,使得控制点的点位选择灵活方便;
- (3) 可以全天候进行工作,使得测量工作更具有计划性;
- (4) 观测时间短,当测站之间的距离小于 30km 时,同步观测时间 1h ~ 2h 便可得到较好的观测成果;当测站之间的距离小于 10km 时,还可采用快速定位方法,观测时间可以缩短为 10min ~ 20min,甚至更短;
- (5) 观测数据自动记录,且数据处理的自动化程度很高,能较好地满足数字测图的要求。

12.6.2 建立局部 GPS 控制网的工作程序和方法

建立局部 GPS 控制网与用常规地面测量方法建立测量控制网类似,按其工作性质可以分为外业工作和内业工作两大部分。外业工作主要包括选点、建立测站标志、野外观测作业等;内业工作主要包括 GPS 控制网的技术设计、数据处理和技术总结等。

(1) GPS 控制网的技术设计

一般原则

建立城市或其它局部性 GPS 控制网是一项重要的基础性工作,而技术设计则是建立 GPS 网的第一步,是保证 GPS 成果质量可靠的关键性工作,因此,必须科学地、严谨地做好这一工作。GPS 网技术设计的一般原则包括以下几个方面:

1) 充分考虑 GPS 控制网的应用范围

对于工程建设的 GPS 网,应当既考虑勘测设计阶段的需要,又要考虑到施工放样等阶段的需要。对于城市 GPS 控制网,既要考虑近期建设和规划的需要,又要考虑远期发展的需要,还可以根据具体情况扩展 GPS 控制网的功能。例如,因为 GPS 测量具有高精度和不要求通视的优点,有的城市已经考虑将城市 GPS 网建成为兼有监测三维形变功能的控制网。这样监测 GPS 网既可以为城市建设提供发现隐患、预防灾害的极有价值的信息,也有利于充分发挥 GPS 网在城市建设中的作用。

2) 采用分级布网的方案

分级布网是建立常规测量控制网的基本方法,由于 GPS 测量具有许多优越性,所以并不要求 GPS 网按常规控制网分很多等级布设,但有计划地分级布设 GPS 网,有利于测区的近期需要和远期的发展。例如,大城市的 GPS 控制网可以分为三级:首级网中相邻点的平均距离大于 5km;次级网中相邻点平均距离为 1km ~ 5km;三级网相邻点平均距离可小于 1km,且可采用 GPS 与全站仪相结合的方法布设。对于小城市,分两级布设 GPS 网即可。

为提高 GPS 网的可靠性,各级 GPS 网必须布设成为由独立的 GPS 基线向量边(或简称为 GPS 边)构成的闭合图形网,闭合图形可以是三角形、四边形或多边形,也可以包

含一些附和路线,但网中不允许存在支线。GPS 网的网形设计的有关问题将在后面加以讨论。

3) GPS 测量的精度标准

GPS 测量的精度标准通常用网中相邻点之间的距离中误差表示,其形式为

$$= a + bd$$

式中 ——距离中误差, mm;

a——固定误差, mm;

b——比例误差系数,  $10^{-6}$ ;

d——相邻点的距离, km。

国家测绘局 1992 年制订的我国第一部《GPS 测量规范》,将 GPS 的测量精度分为 A ~ E 5 级(见表 12-2)。其中 A, B 两级一般是国家 GPS 控制网,而 C, D, E 3 级则是针对局部性 GPS 网规定的。在 GPS 网的技术设计中,应根据测区大小和 GPS 网的用途来设计网的等级和精度标准。

表 12-2 GPS 的测量精度

	A	B	C	D	E
固定误差 a/ mm	5	8	10	10	10
比例误差系数 b/ $10^{-6}$	0. 1	1	5	10	20
相邻点最小距离/ km	100	15	5	2	1
相邻点最大距离/ km	2000	250	40	15	10
相邻点平均距离/ km	300	70	15 ~ 10	10 ~ 5	5 ~ 2

4) 坐标系统与起算数据

GPS 采用的 1984 年世界大地坐标系(world geodetic system, WGS84 坐标系)是一个协议坐标系,其空间直角坐标系的原点是地球的质心, Z 轴指向国际时间局(BIH 1984. 0)定义的地极方向。而实用上需要得到的是参心坐标系,在我国即 1980 年国家大地坐标系和 1954 年北京坐标系(或地方独立坐标系)的坐标,“参心”意指参考椭球的中心。为此,在 GPS 网的技术设计中,必须有 GPS 网的成果所采用的坐标系和起算数据,即 GPS 网所采用的基准,或称之为 GPS 网的设计基准。

GPS 网的基准与常规控制网的基准类似,包括位置基准、方位基准和尺度基准。GPS 网的位置基准,通常都是由给定的起算点坐标确定;方位基准可以通过给定起算方位角决定,也可以 GPS 基线向量的方位为方位基准;尺度基准可以由地面的电磁波测距边确定,或由两个以上的起算点之间的距离确定,也可以由 GPS 基线向量的距离确定。

为了得到 GPS 网正常高,应使一定数量的 GPS 点与水准点重合,或者对部分 GPS 点联测水准。为了便于进行水准联测,且便于进行 GPS 观测,提高作业效率, GPS 点一般应设在交通方便的地方。

5) 选点原则与点位标志

GPS 观测站之间不要求相互通视,但考虑到所测 GPS 点要为后期的常规测量或图根控制服务,所以选点时还应适当兼顾各点之间的相互通视。由于 GPS 点点位的选择对其观测工作的顺利进行并得到可靠的成果有重要意义,所以,应根据测量目的和测区范围、精度和密度的要求等,充分收集和了解测区的地理情况,以及原有控制点的分布和保存情况,以便恰当地选定 GPS 点的点位。在选定 GPS 点位时应遵循以下原则:

- 点位周围应便于安置天线和 GPS 接收机,视野开阔,点位周围障碍物的高度角一般应小于 10°;
- 点位应远离大功率无线电发射源(如电视台、微波站及微波通道等)及高压电线,以避免周围磁场对信号的干扰;
- 点位周围不应有对电磁波反射(或吸收)强烈的物体,以减弱多路径效应的影响;
- 点位应选在交通方便的地方,以提高作业效率;
- 选定点位时,应考虑便于用其它测量手段联测和扩展;
- 点位应选在地面基础坚固的地方,以便长久保存。

此外,有时还需要考虑点位附近的通信设施、电力供应等情况,以便于各点之间的联络和设备用电。在利用旧点时,应检查标石的完整性和稳定性。点位选定后,不论是新点或旧点,均应按规定绘制点之记,选点工作结束后,还要编写选点工作总结。

GPS 控制网的图形设计

对于常规方法布设的三角网、三边网或导线网,图形设计是非常重要的一项工作。良好的图形设计可以减少野外选点的工作量,节省造标的经费,也为得到较高精度的成果打下基础。由于 GPS 的同步观测不要求通视,因此,GPS 网的图形设计也具有很大的灵活性。

为了说明 GPS 网图形设计的方法,有必要首先说明 GPS 同步观测的一些特点。

GPS 同步观测是指使用 N 台(N ≥ 2)GPS 接收机,在相同的时间段连续跟踪接收相同的卫星组的信号。N 台 GPS 接收机在一个时段内同步观测,可以由软件计算得到各点间的 GPS 基线向量(GPS 边),这些 GPS 边可以构成的同步图形如图 12-11。不难理解,N 台 GPS 接收机构成的同步图形中包含的 GPS 边数  $n_b$  为

$$n_b = N(N - 1)/2 \tag{12-5}$$

但其中仅有(N-1)条是独立的 GPS 边,其余的都是非独立的 GPS 边。从理论上说,非独立的 GPS 边可以由独立的 GPS 边推算得到,对应于图 12-11 的独立 GPS 边可以有不同的选择(如图 12-12)。

当 N ≥ 3 时,独立的 GPS 边和非独立的 GPS 边将构成闭合的多边形环,称为同步闭合环。同步闭合环的最少个数  $n_r$  应为

$$n_r = n_b - (N - 1) = \frac{1}{2}(N - 1)(N - 2) \tag{12-6}$$

接收机数 N 与 GPS 边数  $n_b$  和同步闭合环数  $n_r$ (最少个数)的对应关系如表 12-3 所示。

从理论上讲同步闭合环中各 GPS 边的坐标差之和(即闭合差)应为零,但因为各台 GPS 接收机有时并不严格同步,同步闭合环的闭合差不等于零。有的 GPS 接收机定位软件规定了同步闭合差的限差。对于同步较好的情况,应遵守此限差的要求;但当由于某种

图 12-11 N 台 GPS 接收机构成的同步图形

图 12-12 对应图 12-11 的独立 GPS 边

原因同步不是很好时, 应适当放宽此项限差。

表 12-3 N 与  $n_b, n_r$  的关系

N	2	3	4	5	6
$n_b$	1	3	6	10	15
$n_r$	0	1	3	6	10

值得注意的是, 当同步闭合环的闭合差较小时, 通常只能说明 GPS 基线向量的计算合格, 并不能说明 GPS 边的观测精度高, 也不能发现接收的信号受到干扰而产生的某些粗差。

为了确保 GPS 观测效果的可靠性, 有效地发现观测成果中的粗差, 必须使 GPS 网中的独立边构成一定的几何图形。这种几何图形可以是由数条 GPS 独立边构成的非同步多边形(或称为非同步闭合环), 如三边形、四边形、五边形……。当 GPS 网中有若干个起算点时, 也可以是由两个起算点之间数条 GPS 独立边构成的附和路线。GPS 网的图形设计也是根据对所布设的 GPS 网的精度要求和其它方面的要求, 设计出由独立 GPS 边构成的多边形网(或称为环形网)。

因为同步观测得到的 $[N(N - 1)/2]$ 条 GPS 边中, 只有 $(N - 1)$ 条独立边, 且可作不同

的选择, 所以, 在对一个 GPS 网按某种方式观测之后, 以所得到的 $(N - 1)$ 条 GPS 独立边及其方差阵参与 GPS 网的平差计算, 则 $(N - 1)$ 条独立边的不同选择方式是完全等价的。如果对每条 GPS 边单独计算, 忽略它们之间的相关性, 则不同的选择方式会使 GPS 网的成果有一定的差异, 但对于一般的局部 GPS 网的研究表明, 从精度和可靠性指标看, 这种差异甚小。

下面来分析 GPS 网中独立的 GPS 边数与由它们构成的非同步多边形(或闭合环)数之间的关系。

设 GPS 网中有  $N_P$  个点, 如果网中的独立边数  $n = N_P$ , 则不难理解, 网中只能构成一个多边形(如图 12-13(a)); 如果网中独立 GPS 边数  $n = N_P$ , 且由  $n$  条 GPS 边构成三边形网, 则由图 12-13(b) 可以看到, 1, 2 两点之间有一条 GPS 边, 以后每增加一个点, 就增加 2 条 GPS 边。因此, 构成三边形网的总边数  $n$  与点数  $N_P$  之间的关系是

$$n = 2(N_P - 2) + 1 = 2N_P - 3$$

构成的三边形个数为

$$r = (2N_P - 3) - (N_P - 1) = N_P - 2$$

图 12-13 GPS 网的点数与边数的关系

当要求 GPS 网由  $m$  边形组成时, 独立的 GPS 边数  $n$  构成的  $m$  边形的个数  $r$  应为

$$\begin{aligned} n &= k_1(m - 1) + k_2 \\ r &= n - N_P + 1 \end{aligned} \tag{12-7}$$

式中

$$\begin{aligned} k_1 &= \text{int} \frac{N_P - 2}{m - 2} \\ k_2 &= \begin{cases} \text{int} \frac{N_P - 2}{m - 2} - k_1 + 2 & \text{当} ((N_P - 2)/(m - 2)) - k_1 > 0 \\ 1 & \text{当} ((N_P - 2)/(m - 2)) - k_1 = 0 \end{cases} \end{aligned}$$

int 表示取整数;  $k$ ——时段数。

对于不同的  $N_P$  和  $m$ , 可按(12-7)式得到相应的  $n$  和  $r$ 。当 GPS 网中的总点数  $N_P = 40$ , 欲使所构成的闭合环边数  $m = 6$  时, 则由表 12-4 可查得  $n = 52, r = 13$ 。

不难看到, 在根据测区范围和精度要求确定  $N_P$  和  $m$  之后, 由表(12-4)可以得到需要观测的独立 GPS 边数  $n$  和闭合环数  $r$ , 从而对布设 GPS 网的工作量有一个恰当的估计。有的 GPS 规范未对 GPS 网中非同步闭合环的边数作明确要求, 只要求在每个点上至少设站 2 次(即至少观测 2 个时段)。对于一个有  $N_P$  个点的 GPS 网, 如果每个点设站 2 次, 则共应设站  $2N_P$  次。如果用于观测的 GPS 接收机有  $N$  台, 则需要观测的时段数  $k$  为

$$k = \begin{matrix} \text{int}(2N_P/N) & \text{当 } \text{int}(2N_P/N) = 2N_P/N \\ \text{int}(2N_P/N) + 1 & \text{当 } \text{int}(2N_P/N) < 2N_P/N \end{matrix}$$

表 12-4 不同的 N<sub>P</sub> 和 m 对应的 n/r 值

m		3	4	5	6
	10	17/ 8	13/ 4	16/ 7	11/ 2
	20	37/ 18	28/ 9	25/ 6	27/ 8
N <sub>P</sub>	40	77/ 38	58/ 19	56/ 17	52/ 13
	60	117/ 58	88/ 29	81/ 22	72/ 18
	100	197/ 98	148/ 49	136/ 37	127/ 28

此时, 独立的 GPS 边和网中闭合环数为

$$\begin{matrix} n & k(N - 1) \\ r & k(N - 1) - (N_P - 1) \end{matrix} \tag{12-8}$$

对于不同的 N<sub>P</sub> 和 N, 可按( 12-8) 式得到 n 和 r。当 N<sub>P</sub>= 40, N = 4 时, 由表 12-5 可查得 n = 60, r = 21。这一结果与要求构成的闭合边数 m = 4 的情况相近。但只有 N = 2 台 GPS 接收机进行观测, 按每一个点设站 2 次, 则只有一个闭合环。显然, 对发现网中的粗差是不利的。当 N = 3 时, 在每个点设站 2 次, 独立 GPS 边数 n 与要求网中的闭合环的边数 m= 5 的情况相当。值得注意的是, 如果在构成网形时, 一部分闭合环中的 GPS 边数较少( 如 m= 3), 则另一部分闭合环的边数就会大于 5, 而使得网的可靠性变差。

表 12-5 不同的 N<sub>P</sub> 和 N 对应的 n/r 值

N		2	3	4	5	6
	10	10/ 1	14/ 5	15/ 6	16/ 7	20/ 11
	20	20/ 1	28/ 9	30/ 11	32/ 13	35/ 16
N <sub>P</sub>	40	40/ 1	54/ 15	60/ 21	64/ 25	70/ 31
	60	60/ 1	80/ 21	90/ 31	96/ 37	100/ 41
	100	100/ 1	134/ 35	150/ 51	160/ 61	170/ 71

从以上的分析可以看到, 当要求 GPS 网中闭合环的边数 m = 5 或 4 时, 也必然满足对每个点设站 2 次的要求, 即规定边数和规定设站次数基本上是等价的。但对闭合环边数的规定具有以下优点:

- 1) 在观测之前, 可根据交通状态和实际情况对 GPS 网进行图形设计, 从而使观测者可以有计划地选择同步观测的独立边;
- 2) 独立边的边数不随 GPS 接收机的不同而不同;
- 3) 便于及时对 GPS 网中的环闭合差进行检核;
- 4) 避免了将“ 在一个点上观测 2 个时段 ”理解为“ 每条边观测 2 个时段 ”。



为保证 GPS 网的精度并提高工效, 建议规定首级 GPS 网闭合环的边数不超过 4 条 ~ 5 条, 可规定次级网或加密网闭合环(或附合路线)的边数不超过 6 条 ~ 7 条; 建议根据这种规定作好 GPS 网的图形设计, 并按此图形进行观测和选择 GPS 独立边。

(2) GPS 测量数据处理

与常规测量技术不同, GPS 测量的观测值是卫星发射的无线电信号的相位(载波相位、码相位), 其几何意义是接收机天线相位中心至卫星发射天线中心的距离, 而不是地面上点间的相对关系量(如边长、角度、高差等), 这就使得 GPS 测量数据的处理具有显著不同的特点, 也使得 GPS 测量数据处理成为 GPS 技术研究的一个重点。

GPS 测量数据处理与常规测量数据处理相比具有如下显著特点:

- 1) 数据量大。按每 15 秒钟记录一组观测值, 则在一小时的连续观测中, 将有 240 组数据。每一组数据中含载波相位观测值和码相位观测(即伪距)以及其它信息(如时间)。如此大量的数据处理没有计算机是不可能的。
- 2) 处理过程复杂。从原始的记录在各种数据载体上的数据开始至最后成果的获得包括许多步骤, 其中每一步都有大量数据的组织、计算和分析工作。
- 3) 处理形式多样。由于目前 GPS 测量数据处理技术尚未完全成熟, 同一问题的解决方法也不尽相同, 这就使得数据处理的数学模型、算法等形式多样。
- 4) 处理自动化程度高。尽管有大量数据及复杂的过程, 但由于计算机技术和软件水平的提高, GPS 数据处理在数据流程自动化和数据处理集成化程度方面较之常规技术数据处理要高。

鉴于 GPS 测量外业观测的简单方便以及上述 GPS 数据处理的显著特点, 使得 GPS 测量数据处理问题成为最受用户关注的 GPS 技术。

图 12-14 GPS 测量数据处理基本流程

GPS 测量数据处理过程基本步骤可划分如下: 数据采集和实时定位、数据的粗加工、数据的预处理、平差计算以及 GPS 成果与地面网成果的综合处理。图 12-14 是 GPS 测量数据处理的基本流程图。

数据采集和实时定位在外业测量过程中完成, 详情可参见有关接收机的操作使用说明书。下面就其它各步骤作一简单说明, 有兴趣的读者可参阅有关文献。

数据的粗加工

GPS 测量数据的粗加工包括数据的传输、分流及数据格式的转换。对于以盒式磁带作为数据载体的接收机来说, 首先要将磁带上的数据传输至计算机磁盘上, 再进行数据分流。对于直接将数据记录于内存接收机, 是在将数据从接收机传输至计算机的同时完成数

据的分流。

数据分流是指将数据中的各类信息按照类别特性分放于几个数据文件中,以供后续处理所用。一般而言这些数据文件有:观测值文件、星历文件、测站控制信息文件。经分流后的数据文件应转换成标准格式,以使用统一的后处理软件进行数据处理。

数据的预处理

GPS 测量数据预处理在 GPS 数据处理中的比重最大。预处理所采用的模型、方法的优劣和合理性将直接影响作业效率和成果质量。目前, GPS 测量数据预处理大致具有以下 4 项内容:

1) GPS 卫星轨道方程的标准化。 标准化的主要目的是以统一的格式提供观测时段内被测卫星的轨道位置,从而使卫星轨道位置的计算快速方便,且在观测时段内轨道连续。

2) 时钟误差处理。 时钟误差包括卫星时钟误差和接收机时钟误差。GPS 接收机采用的时钟为高质量的石英钟,其钟差大约为 100ns,在平差计算时给予解决,作为一个未知参数引入计算过程中。卫星钟一般采用原子钟,与 GPS 时标的偏差可达到 1000ns 以内。利用星历中给出的 3 个参数( $a_0, a_1, a_2$ )对时钟进行改正:

$$dt = a_0 + a_1(t - t_0) + a_2(t - t_0)^2$$

式中  $dt$ —— $t$  时刻的时钟改正数;

$t_0$ ——参考时刻;

$a_0$ ——钟偏;

$a_1$ ——频偏;

$a_2$ ——频漂。

3) 初始整周模糊度的预估和整周跳变的发现和修复。 大多采用伪距观测值估算整周模糊度的初值,并以此作为平差时整周模糊度的近似值。由于各种原因造成接收机载波相位测量的暂时中断,从中断到重新锁定信号继续测量开始这段时间内,接收机中的计数器停止计数,因而使得中断后的相位观测值与未失锁情况下的相位观测值相差一个整数(若干整周期),称此现象为整周跳变。必须发现并对存在整周跳变的观测值加以改正,否则将会严重影响成果质量和精度。一般要求纠正  $\pm 0.5$  周以上的整周跳变。

4) 观测值的标准化。 将观测值按平差处理程序所要求的格式标准化成一数据文件。

平差计算

经过预处理后,对观测值作了某些必要的修正,成为“净化”的数据,并提供了卫星轨道、时钟参数的标准表达式,估算了整周模糊度初值,就可以组成相位观测值的误差方程,组成法方程,进行平差计算。平差计算中一般以点间的坐标差作为平差未知数,因而也称为 GPS 基线解算。

GPS 成果与地面网成果的综合处理

由于 GPS 成果属于 WGS84 坐标系统,因而必须将它们转换到实用的国家或地方坐标系中去,这是通过与地面网成果的综合处理来解决的。根据不同坐标系统之间的转换关系,以各 GPS 点的大地坐标(或直角坐标)和转换参数为未知数,以 GPS 基线向量和地面

观测数据为观测值,列出误差方程,利用间接平差方法求得各点的坐标和参数。转换参数的选取应根据不同的情况而定,对于城市 GPS 控制网往往取两个参数,1 个是尺度参数,1 个是旋转参数。对于大规模的 GPS 控制网一般取 4 个参数,其中 1 个尺度参数,3 个角度旋转参数。

## 13 数字地籍测量

### 13.1 地籍测量概述

#### 13.1.1 地籍的基本概念与分类

地籍一词最早来自拉丁文“caput”和“capitastrum”，前者意为课税的对象，后者意为课税对象的登记或清册。可见，地籍的古典含义就是土地的登记簿册，是为征税而建立的一种田赋清册或簿册，其主要内容有应纳课税的土地面积、土壤质量及土地税额的登记。随着社会的发展，地籍的概念和内容也在不断充实和完善。现代地籍的含义已不仅仅是课税对象的登记簿册，还包括有关土地的自然属性、社会经济状况和法律状况的调查及其隶属关系的一系列记录，这些记录不仅仅反映土地的位置、数量、质量、权属和用途等基本状况，还包括土地等级、地价及有关文件、数据和图件。

地籍的种类较多，比较有意义的是下面两种。

一种是按地籍工作的目的和发展阶段分为税收地籍、产权地籍和多用途地籍。

税收地籍的主要内容是地块丈量和土地评价，最后按土地等级和面积征税。

产权地籍亦称法律地籍，是为保护土地产权和进行土地交易、转让服务的。主要内容反映宗地的界线和界址点的精确位置、产权登记的准确面积等。因此，它对地块的丈量比税收地籍要求更高，即要求精确测定界址点并准确计算面积。

多用途地籍是税收地籍和产权地籍的进一步发展，它不仅收集土地本身的信息，而且收集与土地相关的信息。因此，它不仅可用于地籍管理、土地交易和土地征税，而且可用于城市规划、市政管理、人口统计等，具有多种用途，可为众多用户服务。它大大丰富了地籍测量的内容，促进了地籍测量的发展，并使之在社会经济发展中成为一个活跃的因素。

另一种是结合我国的实际情况而分为初始地籍和变更地籍。

初始地籍是对辖区内的土地进行全面调查、定级、登记和统计，是一项基础性工作。变更地籍是在初始地籍的基础上，为掌握土地信息的动态更新、保证土地信息的现势性而进行的经常性的、现势性的地籍工作。

#### 13.1.2 地籍测量的基本内容和方法

地籍测量的主要目的就是测定每宗土地的权属界线、位置、形状、数量等基本状况，作为其成果的图件资料称为地籍图。

##### (1) 地籍测量的基本内容

地籍测量应按国家土地管理局的《城镇地籍调查规程》及国家测绘局的《地籍测量规范》执行。

##### 地籍平面控制测量

地籍平面控制测量是进行地籍测量工作的基础,其目的在于提供统一的参考坐标系,以便在测区内协调各种测量活动。地籍平面控制,在精度上要满足测定界址点坐标精度的要求;在密度上要满足测区内地籍细部测量的要求;在点位埋设和保存上要顾及日常地籍管理的需要。地籍平面控制测量一般包括基本控制测量和图根控制测量。

权属调查

权属调查是通过对宗地权属及其权利所及的界限的调查,在现场指界确认,并标定宗地界址位置,绘制宗地草图,调查土地用途,填写地籍调查表,为地籍测量提供工作草图和依据,以便地籍测量工作顺利进行。

地籍细部测量

地籍细部测量包括测定界址点坐标位置和测绘地籍图。地籍图由与地籍内容有关的地形要素和地籍要素构成。其中地形要素为通常地形图所表达的内容;地籍要素为境界、权属界(含宗地图信息)及土地的类别、等级和利用状况等。

面积量算

地籍测量的面积量算包括各宗地的权属面积和宗地内各种土地利用现状分类面积的量算。

地籍图绘制

地籍图绘制就是对地籍原图进一步整饰、着墨清绘的过程以及绘制相应的宗地图。宗地图的内容包括:本宗地号、地类号、宗地面积、界址点及界址点号、界址边长、邻宗地号及邻宗地界址示意线等。

地籍测量应提供如下成果资料:

- 测量设计书;
- 控制点略图、分幅图及街坊编号图;
- 控制点点之记及委托保管书;
- 控制点观测手簿及平差计算手簿;
- 控制点成果表;
- 界址点观测手簿、计算手簿及界址点成果表;
- 地籍原图;
- 宗地面积量算手簿;
- 测量技术总结;
- 测量员或测量单位资格审查证书的复印件;
- 仪器及量尺的检定资料。

(2) 地籍测量的方法

根据地籍精度不同以及所采用的作业方式不同,地籍测量的基本方法有解析法、图解勘丈法和部分解析法 3 种。

解析法地籍测量

解析法是用比较精密的仪器直接测定或间接算出点的坐标,并据此绘制地籍图的一种测量方法,是精度较高的地籍测量方法。测区内界址点的坐标全部由野外解析法测定。

通常数字地籍测量(digital cadastral surveying)为全解析法。一般有全野外解析法和

航测数字解析法,也可以有图解解析法。全野外解析法是用全站仪或半站仪实地采集全部或绝大部分数据,在相应计算机软件控制下进行数据处理并输出各种地籍成果资料。这种方法,可将任一宗地与测量控制网联测,埋设永久性界石,自动化程度和测量精度都比较高,是我国城市特别是大中城市应当采用而且可以采用的一种方法。

此外,用航测像片作数据采集对象,利用解析测图仪或光电立体坐标量测仪进行数字地籍要素采集,也是一种解析法。

图解勘丈法地籍测量

此法是通过直接量距并在近期大比例尺图上图解定出点的位置而绘制地籍图的一种测量方法,精度较低,其主要特征是只进行地籍图测绘,而不直接测定界址点的坐标。

部分解析法地籍测量

部分解析法以街坊为单位进行,以街坊外围界址点和部分内部界址点坐标或有控制作用的解析坐标点为控制点,并依据宗地草图实际量得的数据填绘地籍图。

13.2 数字地籍测量的基本概念和原理

13.2.1 数字地籍测量的基本概念

数字地籍测量是地籍测量中一种先进的技术和方法,实质上是一个融地籍测量外业、内业于一体的综合性作业系统,是计算机技术用于地籍管理的必然结果。它的最大优点是在完成地籍测量的同时就建立了地籍图形数据库,从而为实现现代化地籍管理奠定了良好的基础。

数字地籍测量是一种全解析法,利用数字化采集设备采集各种地籍信息数据,再利用相应的应用软件对所采集的数据加以处理,最后输出并绘制各种所需的地籍图件和表册的一种自动化测绘技术和方法。其主要过程如下:

下面就从数据采集、数据处理、成果输出以及数据存储、管理 4 个方面分别予以介绍。

(1) 数据采集

数据采集过程就是利用一定的仪器和设备,获取有关的地籍要素信息数据,并按照规定的格式存储在相应的记录介质上或直接传输给数据处理设备的过程。根据采样所使用的仪器以及作业方法的不同,目前常用的有如下几种:

测记法

全站仪(或半站仪)+ PC-E 500,或+ 全站仪原配套的电子记录簿(如 GRE3/GRE4 等)。

这种采集方式是利用全站仪在野外实地测量各地籍要素的数据,在数据采集软件的控制下实时传输给 PC-E500 电子手簿(由通信电缆将全站仪与 PC-E500 相连接),经过预

处理后按相应的格式存储在数据文件中,同时配绘草图。

电子平板法

全站仪+ 便携式(笔记本式)微机+ 相应软件(如 EPSW+ 地籍处理模块)。

这是一种集数据采集和数据处理于一体的数字地籍测量方式,由全站仪在实地采集全部地籍要素数据,并由通信电缆将数据实时传输给便携机,由数据处理软件实时地处理并显示所测地籍要素的符号和图形,原始采样数据和处理后的有关数据均记录于相应的数据文件或数据库中。

数字化法

这种数据采集方式是用手扶跟踪数字化或扫描数字化方法对已有大比例尺地形图采集数字化地籍要素(不包括各宗地的界址点)数据,而界址点的坐标数据则由野外实际测量和计算得到,然后将这两部分数据叠加并在数据处理软件的控制下得到各种地籍图和表册。

航片量测法

这种采集数据的方式是以经过外业调绘过的航空像片为数据采集对象,利用精密立体坐标量测仪在航片上采集地籍要素的数据,并通过电子坐标数据接口与计算机串行口相连接,由软件来处理所采集的数据,从而获得所需要的坐标数据。

综上所述,前两种方法是利用全站仪(或半全站仪)在野外采集数据,这对于尚未测绘大比例尺地形图的城镇地区是一种可行和非常值得推荐的方法,所采集的数据经过后续软件处理,便可得到该地区的大比例尺地形图、地籍图以及其它各种专题图,同时还可以建立该地区的数字化地籍数据库。而第三种方法则必须在已有地形图上进行,只适于已经测绘了大比例尺地形图的城镇地区,但是界址点仍需在实地测量。第四种方法是在航片上采集数据,属于摄影测量的一种,对于已有航片的地区是一种较好的方法。

应该提及的是不论采用哪种方法,所获取的原始数据都必须经过一定的处理,然后在相应的软件支持下计算宗地面积,汇总分类面积,绘制宗地图、地籍图,打印界址点坐标表等。

(2) 数据处理

对于用不同的方法采集得到的数据,经过通信接口及相应的通信软件传输给计算机,然后经过相应的预处理软件处理,将数据归化为某种标准的数据格式,最后经数据处理软件的处理计算出各宗地的面积,绘制宗地图和地籍图等。

(3) 成果输出

经过数据处理之后,便可按照国家土地管理局的《城镇地籍调查规程》<sup>[36]</sup>,输出地籍测量所需要的各项成果。

(4) 数据库管理

为了便于今后地籍变更以及地籍信息的自动化管理,所采集的原始数据和经过数据处理的有关数据均需加以存储,并建立地籍数据库,为地籍信息系统提供数据。

在数字地籍测量中,数据处理过程是一个最复杂、同时也是最重要的环节,这表现为数据源的多样性和地籍(地形)要素的复杂性,因而数据处理的方法也呈现其复杂、多样的特点,使软件的开发具有一定的难度。

### 13.2.2 数字地籍测量的基本原理

这里的首要问题是如何使各种地籍要素能为计算机所识别。地籍要素包括反映隶属关系的行政名称、地理名称和宗地名称,反映权属关系的界址点和界址线,反映土地利用现状的独立地物、线状地物和面状地物,反映位置关系的定位坐标,反映数量关系的土地占有面积和土地利用面积,以及反映地物特征的某些说明、注记等。众所周知,计算机只能识别数码,因此必须将地籍要素数字化。从地籍要素的图形特征和属性特征的分析表明,地籍要素可分解为两类信息:一是图形信息,用平面直角坐标、编码和连接信息表示;另一是属性信息,用数码式文字表示。

#### (1) 地籍信息编码

地籍信息编码就是采用规定的代码表示一定的地籍信息,从而简化和方便了对地籍信息的各种处理。在数字地籍测量中,地籍信息编码是有效地组织数据和管理数据的手段,它在数据采集、数据处理、数据库管理及成果输出的全过程中都起着至关重要的作用。

##### 地籍信息编码的特点

- 信息量大,内容多,涉及面广,并且数据和图形一一对应,构成一个有机整体;
- 信息变化快,为了保持地籍信息的现势性和连续性,必须不断更新编码;
- 地籍信息具有法律效力,必须保持地籍信息的准确性和权威性;
- 地籍信息服务面广,部门和个人都可是其服务对象,地籍信息应具有较强的查询功能和输出功能。

因此,地籍信息编码在数字地籍测量中具有十分重要的意义,必须建立一套完整和科学的编码体系。

##### 地籍信息编码的内容

地籍信息是一种多层次、多门类的信息,对地籍信息如何分类、编码,目前尚无充分的论证和统一的规定,根据有效组织数据和充分利用数据的原则,对地籍信息的编码至少应考虑如下4个信息系列:

1) 行政系列。包括省(市)、市(地)、县(市)、区(乡)、村等有行政隶属关系的系列,这个系列的特点是呈树状结构。

2) 图类系列。包括地籍图、土地利用现状图、行政区划图、宗地图(即权属界线图)等,及其符号系列。这些图类均来源于地籍信息,只是各有侧重点。

3) 符号系列。包括各种独立符号、线状符号、面状符号以及各种注记。它有两个特点:第一,该系列由地籍图形要素组成,它包括地物要素(如房屋、道路等)和表示权属的要素(如界址点、线、权属面积等),而要素信息是构成地籍图形信息的基础,要素信息错了,必然影响地籍图信息的可靠性;第二,图形与数据必须保持一一对应关系,而且应有正确的编码,否则图形与数据将不一致,造成结果的混乱。地籍要素是在地形图图式的基础上,再增加地籍信息所特有的符号与编码。

4) 地类系列。包括城镇地类和农村地类,它们都是根据土地利用现状的客观属性进行分类的,各种地类具有平行的关系。

总之,地籍信息编码应以地籍信息的内容和分类为基础,需遵循简单明了、科学实用、



规律性强、便于应用和处理的原则。

(2) 地籍信息的数据结构

数据结构是对数据元素相互之间存在的一种或多种特定关系的描述。在数字地籍测量中, 数据结构应当反映出各种地籍要素间的层次关系和必要的拓扑关系, 并经数据处理后所生成的图、数、文三者之间呈一一对应关系, 这样才便于对数据进行各种操作, 如检索、存取、插入、删除和分类等。

目前, 在数字地籍测量中使用较普遍的是矢量数据结构, 在此结构中, 通常把地物从几何上分为 3 类空间目标——点、线、面。点实体以表示其空间位置的坐标值的数字形式存放, 线实体以一系列有序的或成串的坐标值存放, 而面实体用表示其周边的字符串或用一些与确定该面相关的点来存放。常用的矢量数据结构大致有如下几种:

顺序结构

这是一种线性结构表示方法, 是机助制图初期常采用的数据结构形式, 如图 13-1 所示。

对于各个制图实体和面积计算单元, 其数据记录如下:

$$\begin{aligned} &M_0 \\ &M_1\text{——}x_1, y_1; x_2, y_2; \dots; x_i, y_i; x_{i+1}, y_{i+1}; \dots; x_{n-1}, y_{n-1}; x_n, y_n; \\ &M_2\text{——}x_1, y_1; x_2, y_2; \dots; x_6, y_6. \end{aligned}$$

数据记录  $M_0$  为道路闭合标志, 它指示按记录  $M_1$  的数据计算道路面积。记录  $M_2$  是一个闭合多边形的数据, 可以计算其面积。这种数据结构的优点很明显, 一是便于数控绘图仪绘图, 二是便于计算面积, 但利用这种结构的信息进行其它的空间分析和数据管理, 就比较困难了。

链-结点结构

在采用这种结构的多边形中, 线段的交点称结点。两个结点(起点和终点)之间的线段称为链, 对链的数据只采集一次, 一条链可以和一个或多个地物要素发生联系, 如图 13-2 所示。链 5(线段 5)与居民地边界、道路和植被区界均有联系。由于无需多次数字化, 多次存储, 从而提高了数据质量, 减少了冗余。如果道路发生了变化, 也只需修改一次, 绝不会产生裂隙。

图 13-1 顺序结构示意图

图 13-2 链-结点结构

在顺序结构中,是一个要素对应一条线段的关系,而在链-结点结构中,关系可以是一个要素对应一条线段或多条线段,也可以多个要素对应一条线段。图 13-2 中要素 1(道路)和线段(链) 2, 3, 5, 6, 7 相关,要素 2 与线段(链) 1, 3, 5, 6 相关。由图 13-3 可以看出要素与线段之间的关系。

链、结点和它们之间的关系构成了链-结点数据结构,与顺序结构相比,其建立难度较大。在采集数据时,不仅要获取其位置、属性等基本信息,还要获取其相互之间的逻辑关系信息。

拓扑结构

图 13-3 要素与线段的关系

拓扑结构是按拓扑学原理设计的、用于表示多边形实体的数据结构。在拓扑学中,把 3 条以上线段的交点称为结点,两个结点之间的曲线或折线称为链。由若干链组成的封闭图形称为区。拓扑结构以链为基础,每一条链包括一至多条线段。链文件由链的编码、链的长度、起点号、闭点号、左区号、右区号及地址指针组成。拓扑数据文件由点、结点、链和多边形文件组成,表 13-1 ~ 表 13-3 表示的是图 13-4 所示图形的拓扑数据文件。

图 13-4 拓扑关系示意图

- 结点结构: 7 个结点,弧段进结点为正,出结点为负。
- 弧段结构: 11 条弧段线,方向如图 13-4 所示。
- 多边形结构: 5 个多边形。

采用拓扑结构比较简洁,可以有效地存储地籍要素的点、线、面之间的关联、包含及邻接关系。

以上介绍的顺序结构、链-结点结构和拓扑结构这 3 种数据结构,主要反映了制图实体的位置及其空间关系,很少与制图实体的属性联系起来。实际上,目前一些商业系统都

采用拓扑结构加关系结构的数据结构,即以拓扑数据结构表示地物的位置和空间关系,以关系结构表示地物的属性数据。

表 13-1  结点结构

结点号	线段邻接表			线段数
1	- 5	- 13	11	3
5	- 19	- 16	1	3
19	- 14	- 16	5	3
14	- 11	- 16	19	3
11	- 1	13	14	3
13	1	16	- 11	3
16	14	- 13	5 19	4

表 13-2  弧段结构

弧 段 号	首 点	尾 点	中 间 点	点 数
A	11	1	10  9  3  2	6
B	1	13	8	3
C	13	11	12	3
D	1	5	4	3
E	5	16	6  7	4
F	16	13		2
G	14	16	15	3
H	14	11		2
J	19	14	20  21  22	5
I	19	16		2
K	5	19	17  18	4

表 13-3  多边形结构

多边形号	弧段号	弧段数
	A  B  C	3
	- B  D  E  F	4
	- E  K  I	3
	- I  J  G	3
	- G  H - C	3

(3) 地籍符号库的设计原则

图式符号是测绘地籍图过程中必须共同遵循的原则, 根据国家土地管理局颁布的《城镇地籍调查规程》<sup>[36]</sup>, 由国内统一执行。无论采用何种方式或手段测绘的地籍图, 都必须符合这一标准。因此, 在数字地籍测量中建立一个地籍符号生成及相应管理的地籍符号库是十分重要的。具体的符号设计参阅第 8 章。

(4) 面积计算原理

在地籍测量中, 土地面积的计算和统计是一项十分重要的工作, 其成果是各级政府对国土资源进行量化管理的重要依据。

由于自然力和人类生产活动的结果, 使土地的表面形状极其复杂。但归纳起来, 其形状无非是规则图形和不规则图形两大类: 前者就是直边多边形; 后者则包括由任意曲线围成的曲边形和由部分曲线与部分折线围成的混合图形。

直边多边形的面积计算

图 13-5 所示的即为一个直边多边形, 这是最常见也最普遍的一类图形。

图 13-5 直边多边形的面积计算

设图中多边形各顶点的高斯平面直角坐标分别为  $1(x_1, y_1), 2(x_2, y_2), \dots, n(x_n, y_n)$ , 从图中可以看出, 该任意多边形的面积  $A$  为

$$\begin{aligned} A &= \text{梯形 } 1\ 122 \text{ 的面积} + \text{梯形 } 2\ 233 \text{ 的面积} + \text{梯形 } 3\ 344 \text{ 的面积} \\ &\quad - \text{梯形 } 1\ 1nn \text{ 的面积} - \text{梯形 } k\ knn \text{ 的面积} - \text{梯形 } k\ k44 \text{ 的面积} \\ &= \frac{1}{2}(x_2 + x_1)(y_2 - y_1) + \frac{1}{2}(x_3 + x_2)(y_3 - y_2) + \frac{1}{2}(x_4 + x_3)(y_4 - y_3) \\ &\quad - \frac{1}{2}(x_n + x_1)(y_n - y_1) - \frac{1}{2}(x_k + x_n)(y_k - y_n) - \frac{1}{2}(x_4 + x_k)(y_4 - y_k) \\ &= \frac{1}{2}(x_1y_2 - x_2y_1 + x_2y_3 - x_3y_2 + \dots + x_ny_1 - x_1y_n) \\ &= \frac{1}{2} \begin{vmatrix} x_1 & y_1 \\ x_2 & y_2 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} x_2 & y_2 \\ x_3 & y_3 \end{vmatrix} + \dots + \begin{vmatrix} x_n & y_n \\ x_1 & y_1 \end{vmatrix} \end{aligned} \tag{13-1}$$

或表示为

$$A = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (x_{i+1} + x_i)(y_{i+1} - y_i) \quad i = 1, 2, \dots, n \tag{13-2}$$

式中  $n$ ——多边形顶点的个数;

$$x_{n+1} = x_1, y_{n+1} = y_1。$$

## 不规则图形的面积计算

不规则图形是另一类具有普遍意义的图形。过去由于技术上的原因, 这类图形的面积只能粗略计算, 而现在则可相当精确地计算出来, 目前普遍采用下列两种算法。

### 1) 梯形面积积分法

假设不规则图形如图 13-6 所示, 图中任一曲边梯形 BCEF 是不规则图形中极小的部分。这个不规则图形可以看作是由许多微小的曲边梯形所组成, 只要求得每个曲边梯形的面积, 逐一累加即得整个不规则图形的面积。这就是梯形面积积分法的基本思路。

实际上不规则图形 ABCDEFA 的面积是图形 ABCDLKA 与图形 AFEDLKA 的面积之差。对于曲边梯形 BCHG, 其面积为

$$S = \frac{1}{2}(x_B + x_C)(y_C - y_B) \quad (13-3)$$

图 13-6 不规则图形的面积计算

而对于曲边梯形 FEHG, 其面积为

$$S = \frac{1}{2}(x_E + x_F)(y_F - y_E) \quad (13-4)$$

上述两式中,  $y_C - y_B > 0$ , 而  $y_F - y_E < 0$ , 故沿 ABCD 计算的面积带正号, 而沿 DEFA 计算的面积带负号, 将这两部分取代数和即可。

上述两个曲边梯形面积公式应用到整个不规则图形, 则可得不规则图形的面积计算公式为

$$A = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (x_{i+1} + x_i)(y_{i+1} - y_i) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (13-5)$$

式中  $n$ ——不规则图形边界上坐标点采样的个数。

比较(13-2)式和(13-5)式, 可知两个公式一样, 这说明对于计算图形面积来说, 规则图形只是不规则图形的一个特例。

(13-5)式的积分形式为

$$A = \frac{1}{2} \int_{y_i}^{y_{i+1}} (x_i + x_{i+1}) dy \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (13-6)$$

从上式可以看出, 要提高不规则图形面积计算的精度, 就得在图形边界上增加采集坐标点的个数。

### 2) 插值点坐标计算法

对于不规则图形, 可以先在其边界上采集明显拐弯点的坐标, 然后采用曲线光滑的方法(如分段三次多项式法或张力样条函数插值法)进行插值而求得插值点坐标, 最后按采集点和插值点的坐标由下式计算其面积:

$$A = \frac{1}{2} \left| \begin{matrix} x_1 & y_1 \\ x_2 & y_2 \end{matrix} \right| + \left| \begin{matrix} x_2 & y_2 \\ x_3 & y_3 \end{matrix} \right| + \dots + \left| \begin{matrix} x_m & y_m \\ x_1 & y_1 \end{matrix} \right| \quad (13-7)$$

式中  $m$ ——采样点个数和插值点个数的总和。

### 3) 混合图形面积计算

对于混合图形的面积计算,可以在曲线部分进行插值计算后,作为一个完整的图形直接用(13-7)式求出,也可以分别按折线部分和曲线部分求出其面积,最后取这两部分面积的代数和。

## 13.3 数字地籍测绘系统

数字地籍测绘系统(digital cadastral surveying and mapping system,DCSM)是以计算机为核心,以全站仪、数字化仪、立体坐标量测仪、解析测图仪等自动化测量仪器为输入装置,以数控绘图仪、打印机等为输出设备,再配以相应的地籍测绘软件,构成一个集数据采集、数据处理及成果输出于一体的高度自动化的地籍测绘系统。关于硬件的配置请参阅第2章。本节仅讨论地籍测量软件系统,其一般功能如图13-7所示。

图 13-7 数字地籍测量系统功能框图

下面以 EPS/CM 地籍成图与管理系统为例,简要地说明地籍测绘的主要功能(有关 EPSW 系统参阅第 11 章)。

### 13.3.1 EPS/CM 模块

EPS/CM 模块(地籍成图与管理)是以 EPSW 电子平板测图系统为基础,再配置地籍测绘专用模块 CM(cadastral mapping and management system),来完成地籍测绘及地籍预管理。EPS/CM 具有电子平板测绘的优点:高精度、高效率;外业测量,所显即所测;现场实时编辑,实时修正,实时成图;内外业一体化。同时,通过 CM 地籍管理模块完成地籍测绘的专题功能,即在权属调查和外业的测绘获取原始地籍图形和属性数据的基础上,用文字、数据、图件来表示每一权属单元土地的位置、界线、面积、权属和利用现状等信息。

13.3.2 CM 模块与数字测图软件的关系

地籍成图与管理系统(CM)接收数字测图软件传来的外业测量数据和键入的地籍调查所得的属性数据,然后进行处理及成果输出。.INI,.COR,.NOT 3 个文件是 EPS/CM 中由 EPSW 外业测量后生成的,其中:

- .INI 为初始文件,用于放置各种参数;
- .COR 为地物坐标串文件,其标准格式(公共交换格式)为

地物编码	点数	连接线型	
点号	x 坐标	y 坐标	z 坐标

· .NOT 为注释文件。

CM 模块调用上述 3 个文件,即利用 EPSW 测得的地籍图形数据,再利用 CM 提供的功能,方便地录入地籍调查所获得的地籍属性信息,经 CM 处理,输出最终成果,生成地籍图形及表格,为地籍管理信息系统提供准确可靠的地籍空间和属性信息。CM 与其它软件的关系如图 13-8 所示。

图 13-8 CM 与其它数字测图软件的关系

由其它测图软件采集的数据,只要转成.COR 格式,都可以进入 CM 模块,由于.COR 的格式非常简练,所以这种转换实现起来是很方便的。

13.3.3 EPS/CM 模块的主菜单(图 13-9)

- 输入输出:用于管理地籍文件的调入、信息的键入和地籍成果的输出。
- 地籍编辑:用于对地籍要素进行编辑。
- 图形:设置各种参数,控制地籍图的生成、显示和输出。
- 地块功能:此功能为 CM 的核心,是用于建立地块的拓扑关系,并对其进行管理,以便进行地块的查询。地块是具有属性(如权属主、边界、利用类别等)的地籍最小单元,是由规定边界围成的互不重叠的最小闭合多边形。
- 查询:对点、两点距离、方位、面积等的查询。
- 宗地功能:用于对宗地进行管理。

图 13-9 EPS/CM 模块的主菜单

单一权属主的权属界线所封闭的地域称为宗地。一个地块只能属于一个宗地, 但一个宗地可能包含多个地块。对存在非单一权属主封闭的地块, 也称宗地, 例如某宗地中的某建筑物的权属归另一权属主。

#### 13.3.4 建立分类地块

由于地籍成果及地籍管理信息系统的要求, 如地块的分类、各地类面积的统计、地籍的变更等, 必须建立起地块的拓扑结构才有可能方便地进行操作, 实时地获得相应的结果。因此, 对一个好的地籍测绘软件来讲, 必然要有建立拓扑关系的功能。

测量时, 是以地物编码来区分界址点、建筑边界、绿化带边界等最后地物特征的。在“地块功能”主菜单下, 选“按编码建立拓扑结构”子菜单项, 按其对话框的要求, 输入宗地的编码(或建筑物编码), 再选择地块的“类型”为宗地(或建筑物); 选择“全自动生成”项, 程序将全自动建立宗地的拓扑结构, 如选择地块“类型”为建筑物, 则自动建立起建筑物的拓扑结构。

若有的多边形应该是封闭的但却没有封闭, 这样的多边形在建立拓扑结构时, 就不会被识别。此外, 在“地块功能”主菜单下选择“建立地块”子菜单, 采用人机交互的方式, 键入或用鼠标捕捉多边形顶点, 经确认后便形成一个新的地块, 同时也建立了拓扑结构。

为了更好地识别地块及检查地块的闭合性, 对成功建立起来的地块填上不同的颜色, 便于发现那些应该建立而其多边形又没有闭合的地块。



建立地块是以自动搜索最小闭合多边形为基准的,其基本算法如下(图 13-10):

- 1) 去掉桥(如 A, B);
  - 2) 找到最外点(最小或最大的坐标值,如 M);
  - 3) 右行原则(遇结点就向右转),取得闭合多边形如 ;
  - 4) 去掉最外边,如 1, 2, 3;
  - 5) 重复步骤 2) ~ 4),直到点数小于 3。
- 此外还应考虑“岛”等各种情况。

图 13-10 搜索最小地块示意图

13.3.5 自动分区赋值

对于地籍测绘,每个宗地甚至每个地块都有它自身的各种信息,这些信息一般需要人工键入,最后以表格的形式作为成果输出。在 CM 中开辟了属性赋值空间,根据各地块的类别提供输入各地块的属性值。由于“街道”、“街坊”等属性具有区域性,即有的属性在某区域内是相同的,CM 中专门设置了“地块通用属性定义”子菜单项。选择此项功能后,可任意划定一个区域,对该区域内通用的属性有一次赋值的功能,这样该区所有地块都将具此属性。这可以节约大量赋值的时间和人力,同时,也可随时提取任一地块,赋属性值,即用于输入该地块的地籍信息。

此外,还可按街坊统一编写地号,适合初始地籍。

13.3.6 绘制地籍图、宗地图和打印成果表

地籍图与地形图相比不需要表示高程(多用途地籍图除外),地形方面也只要求表示永久性建筑物和构筑物、道路、水域和平面控制点等。另外更重要的是加绘界址点、界址线、行政区域界、街道、街坊、宗地、地块及其编号、土地利用类别等。EPSW 可完成地籍图的测绘任务。

EPSW/CM 模块则在地籍图的基础上进一步提供了宗地功能,对已经建立了拓扑关系的宗地进行处理,完成自动切割绘制宗地图、宗地图编辑、各地类项面积的计算、统计和成果表的打印输出。图 13-11 为宗地图,图中表示了宗地的编号、宗地面积及四至关系,有的还要求表示宗地内建筑和道路等。

CM 还可自动打印各类成果表,如界址点坐标成果表、宗地成果表(图 13-12)、宗地新旧成果对照表(图 13-13)等。

13.3.7 其它功能

由于 CM 有自动建立地块的拓扑结构功能,因此该系统对地籍变更、修测、各地类面积的计算与统计、查询等项的进行都十分便利。被分割或合并或新增、删后的界址点、建筑物角点、地块等的编号,可分别按区内各类编号的最大号续编,各类成果表需相应地更新。

图 13-11 宗地图

图 13-12 宗地成果表

图 13-13 新旧成果对照表

## 14 综合地下管网测绘系统

### 14.1 概述

#### 14.1.1 城市地下管网的特点

了解城市地下管网的空间分布、属性信息及其管理,是城市规划、建设和管理的一项重要基础性工作。地下管网是一个纵横交错的巨型网络,这个网络的特点是:

(1) 规模巨大。目前我国特大城市,如北京市的地下管线总长度均在10 000km以上,而一般省会城市管线的总长度均在3 000km左右,中等城市的管线总长度也超过1 000km。

(2) 情况复杂。现代化城市地下管线种类繁多,大致有给水、排水、电力、电信、热力、天然气、工业管道等。这些管线敷设情况复杂,相互之间有并行、交叉、上下分层等多种情况,如同一个超大规模的地下迷宫。

(3) 增长速度快。随着城市发展速度的日益加快,地下管线作为一类重要的基础设施,其发展、更新的速度也是惊人的,如北京市的地下管线目前正以每年400km的速度增长,重庆市的增长速度也达到了每年300km以上。

#### 14.1.2 城市地下管网管理的必要性

对于如此复杂的地下管网,因它与人民生活息息相关,弄清其基本情况并进行有效的管理是极为必要的,但由于种种原因,这在我国绝大部分城市都是一个薄弱环节,具体表现在:

(1) 没有完整、准确的竣工图。一部分城市由于管线建设年代久远,原来根本就没有任何图纸,而单凭老技术人员的记忆、经验来管理;另一部分城市虽然是近几年发展起来的,但由于在建设管线时对该问题未引起足够的重视,没有对管线进行准确的竣工测量并留下详细的图纸及文本资料,有的仅仅是设计图,而一般施工后管线的实际位置与设计有一定的差距。

(2) 没有对已有数据进行有效的管理,多数单位现有的管线信息基本上是通过图纸及文本资料保存起来的。利用这类介质保存的资料,由于管线信息量极大,快速查询起来有一定的困难,进行综合统计、分析及预测更是不易;此外,也不利于长期保存。

(3) 地下管网事故不时发生。由于无法清楚地了解地下管线的敷设情况,在施工中对已有管线造成破坏,从而对人民生命财产造成巨大损失的事例屡见不鲜;对管网进行科学管理的问题得不到解决,大量的事故隐患随时有可能爆发。

综上所述,对城市管线进行全面普查,对新敷设的管线进行准确的竣工测量并获得精确的数据,以及利用现代化的管理手段对相关信息进行高效的管理势在必行。目前已有城

市正着手进行全市的地下管网普查。

现在, GIS(地理信息系统)在我国获得了越来越广泛的应用, 它将地理空间数据及其它信息通过图形及属性数据结合起来, 从而可以准确地描述现实空间世界。在这个信息系统中, 可对其中包含的信息进行快速查询、统计和空间分析, 并进行多种形式的信息输出, 同时, 还可以对其进行信息修改及补充, 以保持信息系统的现势性。从这个角度来看, 利用 GIS 来管理城市综合地下管网是极为适合的, 我们称这一系统为综合地下管网信息系统。管网信息系统离不开翔实准确的数据, 而数据的获取在建立 GIS 中花费的工作量是最大的, 通常要占用 80% 的工作量, 同时系统一旦建立, 还要及时进行数据更新, 确保系统的现势性。因此, 如何高效地获取精确的管线数据, 是建立综合管线 GIS 的一个重要问题。管网数据的获取通常是通过对于原有管线进行普查以及对于新铺设的管线进行竣工测量而获得的。普查涉及相当多的内容, 包括调查、探查管线的各类属性, 测量管线的点位, 获得管线的详细敷设情况及其周围的相关信息, 并将这些信息按照一定的标准格式记录下。计算机及其它高新技术的发展, 使传统的测量手段——白纸测图正逐渐被数字测图所替代, 数字测图所具有的优点——精度高、现场成图以及可直接进入 GIS 等也可以在管线勘测中体现出来。因此考虑如何结合管线测量的特点, 利用已有的大比例尺数字测图技术, 提高管线测量成图效率, 保证数据精度, 并直接为综合管线信息系统提供数据是很有意义的, 本章仅就综合地下管网测绘系统作简要的介绍。

## 14.2 地下管线探测概述

地下管线探测的对象包括埋设于地下的给水、排水(包括雨水、污水)、燃气、热力、电力、电信、工业等管线七大类(也有城市将雨水及污水分开, 从而将其分为八大类), 应查明和测量这些地下管线的平面位置、走向、埋设方式、埋深(或高程)、规格、性质、材料、建设年代及其地面相关设施等等, 并编绘地下管线图, 整个过程如图 14-1 所示。

### 14.2.1 前期准备工作

在进行地下管线探测前, 要收集测区范围内已有的地下管线资料和有关测绘资料, 主要包括:

- (1) 已有各类地下管线图, 包括设计图、施工图、竣工图及技术说明资料等;
- (2) 相应比例尺的地形图;
- (3) 测区及其邻近测量控制点的坐标和高程。

将收集到的相应资料进行整理和分析,

图 14-1 探测地下管线的过程

并进行必要的踏勘,以便对资料的可靠性进行评价,从而对测区内的实际情况(包括测量控制点的位置)有一个较为详细的了解。

根据以上情况,编制地下管线探测示意图,底图可采用 1 : 2 000 的地形图或地形图草图,并在图上标出探测范围,按大类分色(表 14-1)或分页标出要探测的管线分布与走向等,同时应在图上对管线点进行预编号,以备现场调查、标点时参考。最后编写技术设计书,并对即将进行的工作进行详细的技术设计。

编号时应注意:

管线编号要有线号和点号,对一条线的来龙去脉要清楚,如起点、终点、折点、分支点、变径点、变坡点、附属构筑物等,都要包含并标明;

管线交叉点只有一个编号,四通处应顺干线编号,支线管点号可按主干线管点号向外顺向编号,尽量避免点号过长,以支一次为宜,如支多次,可另编线;

重力管道(如雨水、污水)应顺水流方向编号。

14.2.2 管线调查与探查

该过程主要是在现场查明各种地下管线的敷设状况及其在地面上的投影位置和埋深。首先要进行现场踏勘,按大类在地面上设置管线点标志,并参考管线探测示意图上的预编号在地面标明每个管线点的编号,如与预编号不符的,在示意图上对编号进行修改。管线点分为明显管线点(如检查井、污水井等)和隐蔽管线点(埋在地下的),在明显点上应进行实地调查和量测,在隐蔽管线点上应用仪器(探管仪)探查地下管线的地面投影位置及埋深。管线点通常设置在管线的特征点或其地面投影位置上,特征点包括交叉点、分支点、转折点、起止点以及管线上的附属设施中心点,对长距离的直线管线应按一定的间距增设管线点。对地下管线的探查通常要采用实地调查与仪器探查相结合,以便充分查明管线的所有属性。

表 14-1 按类分色

管线类别	颜色
给水	天蓝
# 下水 雨水	灰色
煤气	橙色
电力	朱红
电信	草绿
公业	粉红
热力	紫色

表 14-2 市政管线应探测的项目

管线类别	需探测的管线
给水	管径 50mm( 100mm)
排水	管径 200mm( 300mm)
燃气	管径 50mm( 75mm)
工业	全测
热力	全测
电力	全测
电信	全测

管线仪器探查技术也称地下管线探查技术(专门探测隐蔽管线点),它已经形成了一个专门的研究领域,属于地球物理学中的测地学的特种电磁测量技术,在土木工程应用

中,它又被俗称为工程或环境地球物理探测。由于要求对地下管线空间位置的精确描述,所以探测技术及探管仪器也应具有高精度。

地下管线探测项目的取舍标准应根据具体情况来确定。对于市政管线,一般按表14-2的要求取舍。对于明显管线点、需要查明地下管线的各种建、构筑物 and 附属设施,见表 14-3。对于要进行调查的项目一般按表 14-4 来取舍。

表 14-3 建、构筑物 and 附属设施应探测的项目

专业	建、构筑物	附属设施
给水	水源井、给水泵站、水塔、清水池、净化池	阀门、水表、消火栓、排气阀、排泥阀、预留接头、阀门井
排水	排水泵站、沉淀池、化粪池、净化构筑物	检查井、跌水井、水封井、冲洗井、沉泥井、进出水口
燃气、热力及工业管道	抽水井、调压房、煤气站、锅炉房、动力站、储气罐	涨缩器、排水装置、凝水井、阀门井
电力	变电站、配电室、电缆检修井、各种塔(杆)	杆上变压器、露天地面变压器
电信	变换站、控制室、电缆检修井、各种塔(杆)、增音站	交接箱、分线箱

表 14-4 一般调查项目的取舍

管线类别		埋深		断面尺寸		载体		管道 材质	管道 流体 性质	电缆 根数	附属 设施	权属单 位埋设 日期
		管外 顶	管内 底	管径	宽×高	压力 (电压)	流向					
给 水												
排水(含 雨、污水)	管道											
	方沟											
煤 气												
电力	直埋											
	沟道											
电信	直埋											
	管沟											
工业管道												

注:表中带“ ”为应调查项目。

记录管线点要素情况的表格称为管线点调查表,在探查过程中要将探测结果记录在

表格中, 供编绘管线图、出成果表之用。表 14-5 为填有数据的电信管线调查表。

表 14-5 电信管线调查表

管线 点号	管线 类别	埋深 / m	断面尺寸 / mm	管道 材质	电缆 根数	附属 设施	权属单位	埋设年份	备注
T 10	电信	0.5	700× 500	塑料	10	入孔	市电信局	1986	
T 11	电信			塑料	10	出地	市电信局	1986	
T 12	电信	0.3	700× 500	塑料	4	入孔	市电信局	1986	
T 13	电信			塑料	1	出地	市电信局	1986	
T 14	电信	0.45	700× 500	塑料	14	入孔	市电信局	1986	
调查者					校核				

14.2.3 地下管线的测量

地下管线测量主要包括: 根据测区及邻近区域已有的控制点进行控制测量; 对地下管线点联测并测绘以管线为中心的带状地形图; 编制管线测量成果表。该测量应按照现行《城市测量规范》来进行, 对地下管线空间位置应直接利用图根控制或其以上等级控制作为测量依据。地下管线的测量可分为以下四大类:

(1) 已有地下管线的测量。主要测量地面上管线点的三维坐标和带状地形, 再利用调查数据归并, 获取地下管线的纵、横断面数据。

(2) 新建地下管线的定线测量。按照批准的线路设计施工图, 根据已有的各种控制来完成实地定线。

(3) 新建地下管线的竣工测量。一般是在新建管线覆土前进行, 否则应将相应管线点的施工位置准确引到地上测量, 具体测量方式与(1)相同。

(4) 地下人防测量。测量内容主要包括通道、出入口、竖井、附属设施的平面布置、底板高程和室内净空高等; 此外, 对折点、交点、变坡点、竖井底等均要测量高程。

上述工作可用全站仪或测距经纬仪, 测量所有点的三维坐标。在测量过程中, 可将数据记录下来, 回到内业去处理或直接利用数字测图技术现场成图。

14.3 地下管线地形图的绘制

完成管线探测, 获得所需数据及资料后, 就可根据这些数据来出成果。成果包括:

地下管线图。这些图可以绘在图纸上, 也可作为数字图形式存放在计算机中。

成果表。为了减轻管线图的负荷, 可将管线点、线的属性用表格的形式表示出来。

地下管线图应是对地下管线的准确描绘, 由于它极为复杂, 根据需要, 可通过综合管线图、专业管线图及横断面图等几种形式结合起来表示。



14.3.1 综合管线图

该图应表示测区内所有探测过的各种管线及其附属设施、有关地面建(构)筑物与地形特征,包括各种专业管线及表 14-3 指定的各类构(建)筑物及附属设施以及背景地形特征,它还包括沿管线两侧的地形、地物,例如道路边线、临街建筑物向街一面的外轮廓线、结构、层数、单位名称等等。背景地形图一般采用黑色绘制,各专业管线特征则采用规定的颜色绘制,将管线点、线按其坐标展绘并利用规定的图示符号表示出来。对于管线点、线的属性(包括管线点号、管线规格、材料、埋深等等)、路名、单位名称等要利用文字注记来表

图 14-2 综合管线示意图

示,不必将所有的信息都注记在图中,注记的选择以能在图上清楚表达信息为准。注记不能压盖图上其它任何要素。对于过于复杂的管线,可利用一段示意线将其放在相对较空的位置来进行注记,同时还要结合专业管线图及横剖面图来表示。图 14-2 为一幅综合管线示意图。

14.3.2 专业管线图

该图采用与综合管线图相同的背景地形图,但图中只绘制一种专业管线及其属性注记,专业管线要素的颜色及注记方式均应与综合管线一致。利用它可以更清楚地表示某一类专业管线的具体情况。

14.3.3 管线纵断面图

沿管线中心,以中心线上各管线点的里程(该点距管线起点的距离)或间距(点间相互的距离),以及点的高程,绘制管线的纵断面图,以明确显示某条管线的高低起伏。

14.3.4 管线横断面图

该图表示垂直于管中心线的同一横断面上各种管线之间、管线与地面建(构)筑物之间关系的管线图,一般在起点、终点、转折点、规定的间隔点、变径点及变坡点等处需绘制横断面图。图中应包括:断面地面地形变化、地面高、地上和地下建筑物、路边线、各种管线的位置及相对关系、埋深、断面几何尺寸、断面号等。对于管线分布极为复杂的地带,利用断面图来对管线分布进行更清楚的描述。比例尺则按图上不作任何取舍和移位能表示清楚上述内容为原则来选定,一般为 1/200,图上标注。横断面图中各种管线的表示见表 14-6。

表 14-6 横断面中各种管线的表示

要素	表示
一般管线	3mm 空心圆
直埋电力、电信电缆	1mm 实心圆
小于 1m× 1m 的管沟	4mm× 4mm 正方形
大于 1m× 1m 的管沟	实际比例
其它构建物、地物	实际比例

除上面的各种管线图外,一般作为成果提交的还有管线成果表。此表以图幅为单位,分专业进行整理编制,然后装订成册。表 14-7 为成果表格式。

表 14-7 成果表格式											
管线种类:			图幅编号:			权属单位:					
管线 点号	管线 材料	类别	平面坐标/ m		高程/ m			管径或断面 尺寸/ m	电缆 根数	埋设 日期	备注
			x	y	地面	管顶	管底				
调查者								校核			

## 14.4 EPSP 管网测绘系统目标

随着 GIS 的发展,基本上所有城市的市政设施都要利用各种 GIS 来进行管理,如何保证 GIS 的数据自动录入及更新,将越来越显得重要。毫无疑问,数字测图技术的蓬勃发展,已为实现这些目标展示了美好的前景。EPSP 是在 EPSW 的基础上开发了管网测绘模块形成的数字管网测绘系统。

### 14.4.1 数字管线图测绘概述

如果我们将实际管线(包括管道、管沟等等)抽象成线,而将管线上的各种附属设施、构(建)筑物抽象成结点,则整个管网就是若干通过结点相连线段的集合。如图 14-3 所示,其中所有的线段、结点除具有空间属性(三维坐标、连接关系)外,还具有一系列非空间属性(类型、材料、管径、流向等等)。

图 14-3 管网的抽象表达

通常为了表示管线的空间属性,要按照其坐标将各种点、线要素符号化后展绘在地形图上,同时将部分非空间属性用注记形式标注在图中(图 14-4, 14-5),为了获得所有详细的信息,将所有管线点、线的各种属性(包括空间及非空间属性)以成果表的形式表述。

图 14-4 管线空间属性的注记

图 14-5 管线非空间属性注记形式

为此, EPSP(EPS/ pipe) 系统提供一系列适应于管线数据输入及管线图编辑、成图的功能, 使其成为适应于管线测绘的管网测绘系统。

#### 14.4.2 EPSP 系统目标

综合考虑管线测绘的特点及其应用的广泛性, EPSP 的基本目标为:

- (1) 利用 EPSW 进行野外地形图及相应管线点的测量;
- (2) 建立管线属性数据库管理系统, 并实现管线图形与属性的一一对应;
- (3) 提供一个外业管线属性数据记录工具(如 E-500 管网调查模块等), 以便外业管线调查人员方便、快速地记录管线属性数据, 同时可以方便地将该数据装入 EPSP 的管线属性数据库中;
- (4) 建立准确反映现实管线世界的拓扑结构, 根据此结构对管网进行基本管理;
- (5) 对综合管线进行分层管理, 可将某一类专业管线、管线上的构(建)筑物及附属设施、对管线的各种标注(如流向、点号、属性注记)设为一个专业管线层, 背景地形图设为基本图层;
- (6) 系统包含一系列增强编辑功能, 可方便地对管线图进行编辑;
- (7) 能生成符合国家标准的管线平面、纵、横断面图及成果表;
- (8) 作为 EPS 系列软件的一个子系统, EPSP 具有 EPSW 的公共数据交换格式;
- (9) 最终结果能输入通用 GIS。

## 14.5 EPSP 的结构体系

EPSP 保留了原 EPSW(参见第 11 章)的实时测图、现场成图、图示符号库、丰富的面向目标的编辑功能及强大的输入输出功能,包括输出测量原始记录文件、坐标数据文件、DWG 格式的图形文件,供出图、输出坐标及属性数据,供与其它系统交换数据,还可与通用 GIS 交换数据。

EPSP 与 EPSW 最本质的区别在于管线点、线均是有属性的,这里所指的属性是指除管线空间坐标、点号及其编码外,所有通过管线探查得到的数据及信息。因此,EPSP 的结构除可以存储图形数据外,还必须能存储属性数据,并在此基础上来构筑管线测量的基本功能。

EPSW 空间数据库是以点、地物为基本结构,而没有专门的线结构,线存在于地物结构的各点的连接关系中。因此,在以点、线为主的 EPSP 中,必须扩充原有的点、线结构,以保证空间与非空间属性的对应。

### 14.5.1 非空间属性与空间数据的对应

在 EPS 体系结构中,所有元素的空间数据结构(三维坐标、编码及连接关系)均是相同的,而在现实管线世界中,从实际管线中抽象出来的点、线的非空间属性结构不一定是相同的。

尽管不同的元素有不同的非空间属性(或根本就没有),但是同一类元素的属性结构是相同的。举例来说,给水管线类的属性一般有下面几项:管外顶、管径、管道材料、权属单位、埋设日期;下水类的属性则有:管内底、管径、流向、管道材料、权属单位、埋设日期等等。在 EPS 结构中,对具有相同类编码的同一类元素,可以将这类编码与属性对应起来,并利用属性数据库中的记录、表来存储、管理非空间属性数据。

在数据库中,表是一种属性结构的集合。表 14-8 中每一列值的类型(包括数值型、字符串型等)是相同的,称其为表项,每一行则称为表的一条记录。

表 14-8 给水管线属性表

管外顶	管径	材质	权属单位	埋设日期

编码与属性表应有下面的对应关系:一个编码可以不与任何属性表相对应,这就意味着该类元素没有非空间属性;一个编码对应一张属性表,意味着该类元素的属性均存放在这张表中,不同的元素对应同一表中的不同记录。多个编码对应一张属性表,意味着不同元素的属性结构是相同的,它们的属性值均存放于这张表中。图 14-6 表示基本元素、编码、属性表、属性记录之间的关系。

利用图 14-6 可查询任何元素的属性。首先获取该元素的编码;再在编码表中找到与

该编码对应的属性表项中的值, 若该值为空, 则该类元素没有任何非空间属性, 否则说明该元素的属性存在, 且就在与该编码对应的属性表中; 最后判断该元素的记录号, 若该记录号有效, 则在先前找到的编码表中找到对应的属性表, 该表中的记录号与元素记录号相同的记录则为该元素的非空间属性。

图 14-6 基本元素、编码、属性、属性记录间的关系

这个结构的另一特点是用户可自己定义、扩充非空间属性表结构。EPSP 提供了一个工具, 可以由用户任意定义或修改非空间属性表, 定义好该表后, 只要将该表与某一种或几种元素的编码对应起来, 则该表中就可以存储该类元素的属性。

14.5.2 点、线、注记结构的扩充

EPSW 系统是以地物为基本结构的, 一个地物包含若干个(至少一个)有一定连接关系的点, 每个点的基本空间数据是三维坐标。只有地物才有编码(如独立地物就有编码), 而点是没有编码的。由此, 解决一个点可以属于几个地物的问题。此外, 线也存在于地物中。考虑到点、线是管线的基本元素, 因此, 在 EPSP 中建立了自身的点、线结构。点、线至少应有类型标识(EPSP 结构中为记录号), 才能构成上面的空间与非空间属性的对应。

- 管线点(管线节点)的结构为:  
点——点号、三维坐标;  
编码——表示该点为管线上的何种附属物及设施;  
记录号——该点的非空间属性在属性表中的记录号;

线链——与该点相连的所有管线,这是建立管线点、线拓扑关系的基础;

注记关联——指明哪些注记是属于该点的。

· 线结构(只有管线才可存放在该结构中)包含下面几项:

编码——表明该管线的类型,还可通过此编码查找该管线对应的属性表;

起点号——该段管线的起点;

终点号——该段管线的终点;

记录号——该管线段在其对应的属性表中的记录号;

注记关联——表明哪些注记是与该段管线关联的。

EPSW 中的注记是独立的结构,它仅表明注记的位置、内容及表现形式。管线图中要利用大量的文字注记来标注管线的各种属性,这些注记应该与它的主体关联起来,一旦它所注记的主体被删除,则该注记也应该自动被删除。为此,将注记结构扩充两项:

关联元素类型——点或线;

关联元素索引——通过该值可以找到对应的点或线。

### 14.5.3 非空间属性表的定义

为了满足不同用户的需求,用户可以自己定义、扩充非空间属性表并将其与编码对应起来。为了描述每张表的详细结构,且使其具有唯一性,可通过下列结构参数来定义:

(1) 名称——该表的表名;

(2) 标识值——唯一的整数值,用来区别不同的表;

(3) 总项数——该表含有的表项数目;

(4) 总长度——该表中所有项的长度总和;

(5) 每一表项的描述——包含该项值的类型(数值型或小数点型)、长度、小数点位数。

### 14.5.4 属性的自动注记

前面已将注记结构进行扩充,以便将注记与点、线关联起来,但这些注记必须由 EPSP 提供的注记工具完成。一旦该点、线的属性被修改,则用户必须自己修改该注记内容,以便使注记内容与其关联元素的属性一致。考虑到许多管线点、线必须利用注记来反映其属性,若属性被修改,则注记也应自动修改,且一般同一类元素的注记与该元素的相对位置是相同的,为此,设计了属性注记描述结构来实现属性的自动注记。每一个属性注记描述应该与编码相对应,只要该编码有对应的属性表,就可以利用该表的某些项来注记。该结构包含下面的内容:

(1) 利用属性表中的哪些项来注记;

(2) 注记的格式,包括长度、字体、大小等等;

(3) 注记相对于元素的位置,例如对点来讲,就是相对于点的偏移位置。

有了上面的结构,用户就可以定义任意一类元素的注记方式,用户对元素的属性作任意修改后,其属性会以注记方式自动在图上显示出来。

14.5.5 层的结构

在 EPSP 中, 一般将同一类管线及其附属设施放在一层中, 背景地形图另为一层。一个层应该包含若干编码, 这样, 同一类编码的元素就放在同一层中。对层可以进行开关控制及颜色定义, 当打开该层时, 所有包含在该层中的编码元素以及与该元素关联的注记均可按指定的颜色显示; 若关闭该层, 则不显示这些元素。此外, 出图时只绘出打开的层( 关闭的层不绘出), 该功能对于查看专业管线的情况及出专业管线图均是非常有意义的。

首先, 定义一个缺省的层, 任何没有放在其它层中的编码均属于该层, 实际上可以将该层看成是背景层。其它的层则包含下面的内容:

- (1) 若干编码;
- (2) 层次开关控制;
- (3) 层次缺省颜色。

其次, 除了一个层可以统一控制其中所有的编码外, 为了具有更大的灵活性, 还可以定义每一个编码的显示颜色、线型及开关控制, 如果该编码被“ 关闭 ”, 即使其所在的层被打开, 也将无法显示该类元素。

需要指明的是, 一个编码只能属于一层, 以便更好地进行层的管理。

14.5.6 编码的结构

前面描述的诸多概念及结构, 许多均是与编码相关的。的确, 编码是 EPSP 的中心概念, 这里将对每个编码所包容的内容作一个总结, 以便大家对其有更深入的理解。每个编码实际包容着下面几项内容:

- (1) 颜色;
- (2) 开关状态;
- (3) 类型——点或线或管线类型;
- (4) 对应的属性表;
- (5) 属性注记描述。

14.6 作业步骤

图 14-7 为利用 EPSP 来进行综合管网测绘的流程图。下面介绍如何利用 EPSP 来完成一项工程的步骤。

(1) 综合调查

城市地下综合管网总是很复杂的, 用户首先必须按 14.2 节中“ 前期准备工作 ”进行调查, 搞清楚该工程中有哪些类别的管线及管线的走向, 并进行编号; 每类线都必须包含哪些属性; 测区地形情况如何。将所有这些情况整理出来, 以便进行技术设计和编制工作计划。

(2) 建立系统结构

用户对该项工程有了足够清楚的了解后, 接下来就要完成下面的工作:



分层设计。 根据需要将不同的专业管线(包括管线点、管线、管线点的附属物等)放在不同的层中,背景地形图则属于单独的一层,每一层中包含若干编码。这样,与各层中编码对应的元素就各属各层;同一类管线,其线与各种设施等也可分在不同的层内。

属性数据的设计。 不同专业类别的管线有不同的属性项,如对天然气管线需要考虑管线能承受的最大压力,而对下水管线则不考虑。EPSP 按不同类别的属性,建立了不同管线的属性数据结构。在 EPSP 中,不同管线类别是以编码来区分的,而每类管线的属性数据结构是与编码对应的。用户在充分了解工程的每一项内容后,如发现本项目所拥有的属性信息与 EPSP 默认的属性结构有所不同,则可自行加以扩充和修改,EPSP 系统提供了一个专门的工具来供用户编辑属性表。用户必须充分考虑好每种管线的属性后,再来修改并建立管线属性表,一旦属性表建立好并开始输入数据后,若再修改属性结构将需要很大的工作量,并可能导致原有数据的丢失。

图 14-7 综合管网测绘流程

(3) 管线的调查与探查

此项作业按 14.2 节中“ 管线调查与探查步骤 ”进行工作,就是要实地为测区管线点(将管线中的各种井、构筑物抽象为点)编点号,查清管线类型、各点的连接关系以及管线的各种属性,这些数据统称为调查数据,它是管线成图、建立信息系统及管线拓扑关系的基础部分。对隐蔽的管线要用探管仪探查,查明管线走向(起止点、转折点)及埋深等。

外业探查过程中,必须把数据记录下来,可将调查数据记入 EPSP,也可记入 PC-E500 记录器。由于在外业调查中只是记录数据,并不处理数据,考虑到方便性,EPSP 提供了一个在 PC-E500 上使用的程序来记录这些数据,同时提供了一个接口程序,可以将 PC-E500 的记录数据传输到微机的 EPSP 中。

(4) 外业测绘

外业测绘主要是完成带状地形及管线的测绘,EPSP 基本上继承了 EPSW 所有的测绘功能,在外业完全可以完成地形图与管线图的测绘,还可实时发现错误,进行编辑修改,避免返工。

(5) 内业汇集

将有关的管线调查数据,如管线类型、连接关系、属性等数据送入 EPSP 中,和测量数据汇集,通过管线点号对应,在 EPSP 中建立起完全的管线拓扑结构及空间属性与非空间属性的对应关系。

尽管 EPSP 提供了 PC-E500 记录程序,但该程序是以 EPSP 默认的管线属性结构为基础的,由于 EPSP 可以让用户修改管线属性表结构,一旦属性表结构被修改,必须使两者按某种格式对应起来,PC-E500 记录的属性数据才能进入管线属性数据库,这时,就可以使用 EPSP 特意提供的方便、快捷的工具来完成属性对应这一过程。

(6) 编辑整理

在 EPSP 中完成数据汇集后, 考虑到最终的要求, 包括出图、出成果表、送入 GIS 等, 对 EPSP 中已有的数据进行下列处理:

检查数据的正确性。汇集进来的数据可能有误, 必须对数据进行检查, 以保证后面成果的准确。EPSP 提供了两个工具来供用户检查数据的正确性: 一是下水管线高程矛盾检查, 根据下水管线的流向来判断高程是否正确; 另一个是流向显示, 用户可以显示某管线结点上的每一条管线方向, 从而分析方向是否合理。

注记。通常在管线图上需要注记管线的部分属性, EPSP 提供了属性注记的功能。用户能以统一的方式, 将管线的某些属性注记到该类管线的某一位置上, 可进行图面及属性注记统一性、正确性的检查。这样统一处理可能导致有些管线注记的位置不合理, 用户还可以将个别不合理位置的注记消掉, 自己选择合适的位置进行注记。

(7) 出图、出成果表

完成了上面所有的工作并进行仔细的检查后, 接下来用户可按照自己的要求来出管线图, 也可将地形与任意一种或多种管线进行叠加出图。出图的流程与 EPSW 一致。

此外, 还可以出管线的纵、横断面图。

另一项重要的任务就是出成果表, 表中包含每个管线点的属性。可以按管线分类来出成果表, 其格式有两种: 一种是包含制表符的 ASCII 文件, 用户可以直接打印该文件即可得到成果表; 另一种为通用的 DBF 文件格式, 现在许多通用的软件包括 Word, Excel, dBASE 均支持该数据格式, EPSP 是利用 FoxPro, Word, Excel 提供强大的制表功能, 得到漂亮的成果表格。

出表的过程中, 一旦用户发现其数据(通常是 EPSP 中的数据)有误, 可以根据表中相应的点号在 EPSP 中找到相应的记录, 利用系统交互方式来编辑数据。

(8) 数据进入 GIS

EPSP 作为 EPS 系列软件的一个成员, 其重要的角色就是要作为 GIS 前端软件。随着 GIS 的不断发展及完善, 测绘不仅是出图、出表, 更要面向 GIS 系统。EPSP 提供了两种方式来完成这种转换, 一种是采用通用的 GIS 数据交换格式——DLG 格式, 另一种则采用现在越来越多的数据交换方式——带格式的 ASCII 文件。

在转换数据的过程中, 主要考虑两个系统在以下几个方面的对应:

- 编码对应;
- 层次对应;
- 属性数据结构的对应。

对于这几种对应关系, 用户必须对 EPSP 和 GIS 两个系统有足够的了解, 而 EPSP 则提供了专门的工具来保证快速、完全的转换。

# 附录 GPS 测量的基本知识及其应用概述

## 1 GPS 定位系统

GPS 定位系统可分三大部分组成:

- 卫星星座(空间部分);
- 地面监控系统(地面部分);
- GPS 接收机(用户设备部分)。

### (1) GPS 卫星星座

星座由 24 颗卫星组成, 其中 21 颗工作卫星, 3 颗备用卫星, 大致均匀分布在 6 个轨道面上, 如附图-1 所示。

附图-1 GPS 星座

轨道面相对于地球赤道面的倾角为  $55^{\circ}$ ; 各轨道平面之间交角为  $60^{\circ}$ ; 卫星距地球约 20 000km, 运行周期为 11 小时 58 分钟, 即每天可以提前 4 分钟见到该颗卫星。在世界任何地区任何时候至少可以同时接收 4 颗卫星信号, 最多可以接收到 11 颗卫星信号。每颗卫星上装有 4 台高精度的原子钟(2 台铯钟、2 台铷钟), 称卫星钟, 以提供高精度的时间标准。

GPS 卫星主要的功能是: 连续不断地发送导航定位的 GPS 信号; 以导航电文提供自身的现时位置及其它卫星的概略位置; 接收存储或执行地面监控站发来的导航信号和控制命令。

### (2) 地面监控系统

该系统由 5 个监测站、1 个主控站、3 个注入站组成, 分布在美国本土的科罗拉多和三大洋的美国军事基地, 共 5 个地方( 附图-2)。

附图-2 地面监控系统分布

它主要的功能是: 完成对 GPS 卫星信号的实时监测( 还包括卫星上设备是否正常工作、卫星是否沿轨道运行等); 向每颗卫星提供其编写并播发的导航电文, 包括卫星星历( 即一系列描述卫星运动及其轨道参数的数据)、卫星钟差和大气修正参数等。

(3) GPS 接收机

GPS 接收机是能够接收、跟踪、变换和量测 GPS 信号的接收设备, 其基本结构见附图-3。GPS 卫星发送的导航定位信号, 即 GPS 信号, 是一种全球共享的信息资源。各类用户, 在任何地点、任何气候、任何时刻均可用 GPS 接收机接收信号, 进行导航定位测量。

附图-3 GPS 基本结构图

接收机种类很多, 按用途分为:

导航型, 定位精度较低, 价格便宜。用于船舶、车辆、飞机等实时定位及导航。

大地型, 定位精度高, 价格昂贵, 结构复杂。用于精密大地测量、工程测量、变形观测等, 随着技术的发展和价格的下降, 已有用于普通测量与一般工程测量的可能。大地型 GPS 接收机中又分单频接收机和双频接收机, 后者精度高, 测量距离长, 可达几百公里以

上。几种主要 GPS 大地型接收机的技术参数见附表 -1。

授时型, 用于提供精密时标, 如天文台授时或一些工业系统的时间同步控制等。

附表-1 几种 GPS 大地型接收机的技术参数

公司名称	GPS 接收机	频 型	精 度	距 离
徕 佶 (Leica)	350	双 频	$5\text{mm} + 1D \times 10^{-6}$	100km ~ 几百公里
	( 300, 200)			
	200	单 频	$5\text{mm} + 1D \times 10^{-6}$	< 10km
	200S			
	350	双频(RTK)	$10\text{mm} + 1D \times 10^{-6}$	< 10km
天 宝 (Tramble)	300+ 数据链			
	300	双 频	$5\text{mm} + 1D \times 10^{-6}$	> 100km
	4000SSI			
	4600LS	单 频	$5\text{mm} + 2D \times 10^{-6}$	< 10km
阿 斯 泰 克 (Ashtech)	4400	(双频) RTK	$10\text{mm} + 1D \times 10^{-6}$	< 10km
	Z12	双 频	$5\text{mm} + 1D \times 10^{-6}$	> 100km
	STEP1	单 频	$10\text{mm} + 1D \times 10^{-6}$	> 20km
	RE	RTK	$10\text{mm} + 1D \times 10^{-6}$	< 10km

注: ppm=  $D \times 10^{-6}$ , D 为公里数。

无论那种类型的仪器, 其结构基本类似, 可分为天线单元和接收单元两部分。

- 天线单元。当微弱的 GPS 信号到达天线, 天线将 GPS 信号的电磁波能量转换为电流, 并送至前置放大器, 将微弱电流放大。在大地型接收机中, 为获得稳定的定位精度, 前置放大器还起变频作用, 将接收的高频信号变为中频信号进行处理。
- 接收单元。信号波道是接收机的核心部件。由于接收机类型不同, 波道数有 1 ~ 12 不等。通过波道得到纯净的数据码, 进而解译出 GPS 卫星所发送的导航电文。

存储器中存放接收的信息、人工量测的数据以及处理后的各类信息。

微处理机及其相应的软件对接收信息进行实时处理, 实时计算出测站( 天线相位中心处) 的三维坐标, 并根据预设置的更新率, 不断更新( 计算) 点位坐标。通过面板键盘的控制, 可以从显示屏上读取所需要的数据信息。

频标器( 产生标准频率) 与频率合成器是利用标准频率生成接收机自身工作所需的各种频率的信号。

2 GPS 定位原理

GPS 定位系统的基本观测量是距离, 基本定位原理是空间后方交会( 附图 -4)。

在待定点上安置好接收机天线, 测定某颗卫星( 第 i 颗) 发送信号的時刻到接收该信号的時刻, 即时间延迟  $t_i$ , 求定卫星到接收机天线的距离  $\rho_i$ 。即

$$\rho_i = t_i C$$

(附 -1)

式中  $c$ ——电磁波在大气中传播的速度。

由于测定中存在卫星钟误差、接收机钟误差以及卫星信号在大气中传播的延迟误差,

因此接收机测定  $\rho_i$  有误差, 所测定的距离也就有误差, 这个距离值称为伪距, 用  $\rho_i$  表示, 则

$$\rho_i = \rho + c(\delta t_i + \delta t_r) + \delta \rho_i \quad (\text{附 -2})$$

式中  $\rho_i$ ——第  $i$  颗卫星的信号发射瞬间的卫星钟误差改正数, 由卫星导航电文中给出, 可施改正;  
 $\delta t_r$ ——信号接收时刻的接收机钟误差改正数, 不易准确求得, 一般视为未知数;  
 $\delta \rho_i$ ——大气传播延迟改正数, 可采用数学模型计算后加以改正。对精度要求不高的定位, 还可以忽略不计。

附图-4 GPS 基本定位原理

经过  $\delta t_i$ ,  $\delta \rho_i$  的改正, 式(附-2)可写为

$$\rho_i = \rho + c \delta t_r \quad (\text{附 -3})$$

即几何距离为测定的伪距加上接收机钟误差改正数乘以大气中的电磁波速。我们需要求定的是待测点的三维坐标。几何距离、卫星坐标、接收机天线(待测点)坐标之间的关系可写为

$$\rho_i = [(X_s - x)^2 + (Y_s - y)^2 + (Z_s - z)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{附 -4})$$

式中  $X_s, Y_s, Z_s$ ——卫星坐标, 根据导航电文求得;  
 $x, y, z$ ——待测点坐标。

考虑到式(附-3), 则可得

$$\rho_i = [(X_s - x)^2 + (Y_s - y)^2 + (Z_s - z)^2]^{\frac{1}{2}} - c \delta t_r \quad (\text{附 -5})$$

式中  $\rho_i$  由接收机测得, 所以, 式(附-5)中包括了  $(x, y, z)$  和接收机钟误差改正数  $\delta t_r$  四个未知数。为此, 用户需要同时观测 4 颗卫星, 测得 4 个伪距, 求解 4 个未知数, 从而求出待测点坐标  $x, y, z$ 。

### 3 伪距测量和载波相位测量

如前所述, GPS 接收机的基本观测量为距离, 常用的距离观测方法有:

#### (1) 伪距测量

式(附-1)~(附-3)已对伪距测量作了简要说明, 即通过卫星信号发射时刻和天线接收时刻的时间延迟, 乘以电磁波的波速而求得伪距。伪距测量方法简单、可靠, 但时间延迟不易测得很准确, 因此伪距的测量精度较低。

#### (2) 载波相位测量

载波相位测量是提供高精度观测数据的方法, 它是测定卫星载波信号在卫星处某时刻的相位  $\phi_s$  与到达接收天线时刻的相位  $\phi_r$  间的相位差  $\phi$ 。即

$$= (\varphi_r - \varphi_s) = 2\pi N + \quad \text{(附 -6)}$$

式中  $N$  —— 整周期数(整波数);  
           —— 不足整周期的相位差。  
 卫星与接收机间的距离则为

$$= \frac{r}{2} = \lambda N + \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \quad \text{(附 -7)}$$

由于相位测量只能测定不足一个整周期的相位差，无法直接得到整周数  $N$ ，从而使载波相位测量与计算过程比较复杂。

实际上, 我们无法测量到  $\varphi_s$ , 而在接收机中的本地振荡器能产生一个频率和初相与卫星载波信号完全相同的基准信号, 将接收的卫星信号与接收机的基准(参考)信号进行相位比较, 即可得出相位差。而  $N$  (整周未知数或称整周模糊度) 则可由其它多种方法求出, 这里暂不赘述。

载波相位观测量是利用卫星载波波长为单位进行量度的。载波  $L_1$  的波长  $\lambda_1 = 19\text{cm}$ ,  $L_2$  波段波长  $\lambda_2 = 24\text{cm}$ , 如果测相(比相)的精度达到百分之一周期, 则测量的分辨率分别为  $0.019\text{cm}$  和  $0.024\text{cm}$ , 测距中误差分别为  $\pm 3\text{mm} \sim \pm 5\text{mm}$  和  $\pm 3\text{mm} \sim \pm 7\text{mm}$ , 从而保证了测量和定位的高精度。

#### 4 GPS 定位方法

按定位目标的状态可分为静态定位和动态定位; 按定位模式可以分为单点定位、相对定位和差分定位。

##### (1) 静态定位和动态定位

待测点相对于周围固定点无觉察的运动, 或者说运动非常缓慢, 以致在一次观测时间内觉察不出来, 只有在两次或多次观测之间(如变形观测), 运动才被反应出来。测这些待定点的位置称为静态定位。它通过大量的重复观测来提高精度, 是一种高精度定位方法。为了正确求解整周模糊度, 一般一个点上要观测一二个小时或更长的时间, 事后进行处理, 计算出坐标。此法常用于大地测量、精密工程测量、地震监测。随着快速计算整周模糊度技术的出现, 作业时间可大大减少, 因而也可用于普通测量、工程测量等。

反之, 动态定位就是用 GPS 测定相对于周围固定点的可觉察或显著运动的待定点位置(即相对于地球运动物体的位置)的方法。

##### (2) 单点定位和相对定位

单点定位又称绝对定位。在一个待测点上, 用一台接收机独立跟踪 GPS 卫星, 测定待测点(天线位置)的绝对坐标。由于单点定位受卫星星历误差、大气延迟误差等影响较大, 所以定位精度较低, 一般为  $25\text{m} \sim 30\text{m}$  左右。在美国实施 SA(有选择利用技术, 即对 GPS 卫星信号加上人为的干扰)政策下, 致使非特许用户的定位精度人为地降低为  $100\text{m}$  左右。定位时间约  $1\text{次/s} \sim 20\text{次/s}$ 。单点定位多用于船舶、飞机导航、勘探、海洋业等方面。据讯美国于 1996 年 4 月声明取消 SA 政策。

相对定位是用两台或多台接收机同步跟踪相同的卫星信号(同一卫星在同一频率上发播的同一信号), 求定各台接收机之间相对位置(三维坐标差或基线向量)的方法。只要

给出一个站的坐标,其余点的坐标即可求出。由于各台接收机同步观测相同的卫星有许多误差(如卫星钟的钟误差、卫星星历误差、卫星信号在大气中传播的误差等)是大体相同的,在相对定位过程中可以有效地消除或大幅度削弱,从而提高定位精度。一般采用载波相位测量,其相对定位精度可达到 $\pm(5\text{mm}+1\text{D}\times 10^{-6})$ (D以km为单位),多用于大地、工程、变形测量等精密定位领域。

(3) 差分定位

这是采用两台以上的GPS接收机完成的,用一台GPS接收机安置在地面已知点上作为基准站,其余一台或多台用户接收机分别安置在待测位置上。根据基准站的测定坐标和已知坐标即可求出定位结果的改正数(位置差分)或伪距观测值改正数(伪距差分)。通过基准站与用户站间的数据链把这些(基准站的)改正值实时传送给用户站,以便对用户接收机的定位结果坐标或伪距观测值进行改正。差分GPS定位已将卫星钟误差和星历误差消除,并将大气电离层延迟和对流层延迟误差部分消除,从而大大提高了定位精度。它的特点是:克服了单点定位误差大的缺点,也克服了相对定位成果(坐标增量、基线向量)的相对性,而给出了消除(或削弱)公共误差的较准确单点的绝对坐标成果。

上面提到的基准站与用户站间数据传输是由数据链完成的,该数据链是由调制解调器和电台组成,如附图-5所示。

附图-5 基准站与用户站间的数据传输

基准站的调制解调器是将改正数进行编码和调制,然后通过电台发射,被用户接收机电台接收,将数据解调后,送入用户接收机进行改正。数据链有两类,一类是由直接波以25W功率直接通视方式传输,因此,天线必须建在高处,例如高塔上,作用距离可达20km~100km;另一类为地波传输,信号沿地表传输,能绕过建筑物和山丘,作用距离可达1000km~2000km。在GPS数字测图系统中是采用直接通视方式,若测点通视距离较



短,几瓦功率的电台即可。

大地型接收机利用载波相位进行静态基线测量,可获得很高精度( $10^{-6} \sim 10^{-8}$ ),但为了可靠地求解出相位模糊度,要求静态观测一二个小时或更长的时间,这就限制了在工程作业中的应用。20 世纪 80 年代末建立在整周末知数快速逼近技术(FARA)上的快速静态测量,为短基线作业闯出了一条新路,基线观测时间缩到 5min 左右,其精度仍能保持双频机所具有的  $\pm ((6 \sim 10)\text{mm} + 1D \times 10^{-6})$  (D 以 km 为单位)的水平,并且创新了许多快速作业模式,例如,快速静态、准动态(stop and go)、往返重复设站和动态。它们都是建立在测后数据处理模式基础上提供定位成果的,无法实时提交成果及评定成果质量。其质量能否达到要求,也是事后才能确定的,很难避免检查不合格造成的返工现象,有时不得不在几天甚至几周后再进行返工。

差分 GPS 技术能实时给定载体的位置。精度为 m 级的,只满足部分精度不太高的测量项目,如水下地形测量。近二三年推出的载波相位差分技术,又称 RTK(real time kinematic)实时动态定位技术,能够实时提供测点(用户站)在指定坐标系的三维坐标成果,在测程 20km 以内可达 cm 级精度,将在实时定位与实时测图技术中得到广泛应用(参阅 1.3 节)。

在我国,经过近十多年的发展,GPS 定位技术已成为地面控制测量(新建控制网或改造与加密旧网)、航空摄影像片的空中定位、建筑物变形监测(如高层建筑、大坝变形、地面沉陷及海上勘探平台的沉降等)和精密工程测量(如桥梁、大型精密设备安装.....)等领域中极为有效的手段。GPS 与其它新技术的结合建立了新的功能系统,如自动测图系统、水上自动测深系统、惯性导航与定位系统、车辆导航系统、GIS 空间数据采集系统等等,显示了 GPS 更为广阔的应用前景。

## 参 考 文 献

- [1] 清华大学土木系测量教研组. 普通测量. 第四版. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990
- [2] 苏鸿根. 怎样使用 Auto CAD R12. 北京: 清华大学出版社, 1995
- [3] 毋河海. 地图数据库系统. 北京: 测绘出版社, 1991
- [4] 李德仁等. 地理信息系统导论. 北京: 测绘出版社, 1993
- [5] 薛师煜, 王珊. 数据库系统概论. 第二版. 北京: 高等教育出版社, 1995
- [6] 潘正风, 杨德麟, 黄全义, 罗学年. 大比例尺数字测图. 北京: 测绘出版社, 1996
- [7] 杨定国. 数字地形测量. 北京: 解放军出版社, 1993
- [8] 王来生, 杨时光, 郭侠雄等. 大比例尺地形图机助绘图算法及程序. 北京: 测绘出版社, 1993
- [9] 杨德麟等. 红外测距仪原理及检测. 第二版. 北京: 测绘出版社, 1995
- [10] 张良琚, 陈一飞. 电子经纬仪检验方法. 北京: 解放军出版社, 1991
- [11] 许隆文. 计算机绘图. 北京: 机械工业出版社, 1989
- [12] 孙家广, 杨长贵. 计算机图形学. 北京: 清华大学出版社, 1995
- [13] 胡正家等. 计算机概论. 北京: 高等教育出版社, 1985
- [14] 普雷帕拉塔 FP, 沙莫斯 M I 著. 计算几何导论. 庄尺谷译. 北京: 科学出版社, 1990
- [15] 刘榴娣等. 显示技术. 北京: 北京理工大学出版社, 1993
- [16] 王德人, 杨忠华. 数值逼近引论. 北京: 高等教育出版社, 1990
- [17] 王继志等. 微机图形显示系统原理. 北京: 气象出版社, 1991
- [18] Carter James R. Digital Representations of Topographic Surfaces. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1988, 54( 11)
- [19] 陈春. 泰森多边形的建立及其在计算机制图中的应用. 测绘学报, 1987, 16(3)
- [20] 柯正谊等. 数字地面模型. 北京: 中国科学技术出版社, 1993
- [21] 杨俊志, 张贵和. 电子经纬仪轴系补偿问题. 测绘通报, 1995(5)
- [22] 杨德麟, 白立舜. EPSW 电子平板测绘系统. 测绘通报, 1996(6)
- [23] DATE C J. An Introduction to Database Systems. Addison-Wesley Publishing Company. 1983, II.
- [24] Deo N. Graph Theory with Application to Engineering and Computer Science Prectice. Mall, Englewood Cliffs N. J. , 1974
- [25] 楼宇, 席志芳. 用图论方法生成控制网条件路线集的研究. 测绘学报, 1991, 24( 1): 15 ~ 21
- [26] 同济大学大地测量教研室等. 控制测量学. 北京: 测绘出版社, 1985
- [27] 宋其友. 数字地籍测量. 北京: 测绘出版社, 1991
- [28] T. H. . 齐格勒著. 地籍测量概论. 高时浏, 张正禄译. 北京: 测绘出版社, 1988
- [29] Burruogh P A. Principles of Geographical Informatoin Systems for Land Resources Assessment. CLarendon Press, 1986
- [30] 王广运, 郭秉义, 李洪涛. 差分 GPS 定位技术与应用. 北京: 电子工业出版社, 1996
- [31] 刘基余, 李征航, 王跃虎, 桑吉章. 全球定位系统原理及其应用. 北京: 测绘出版社, 1993
- [32] 刘大杰, 施一明, 过静馨. 卫星定位系统(GPS)与数据处理. 上海: 同济大学出版社, 1996
- [33] 屠卓文. 自动拓扑结构建立算法研究及地籍信息系统软件开发: [ 硕士学位论文 ]. 北京: 清华大学, 1996

[34] 马妮. 地下管网信息系统数据建模及测绘系统的开发: [ 硕士学位论文 ]. 北京: 清华大学, 1996

[35] 魏文革. 基础地理信息系统中数据的采集与交换及精度的初步分析: [ 硕士学位论文 ]. 北京: 清华大学, 1996

[36] 国家土地管理局. 城镇地籍调查规程. 北京: 地质出版社, 1993

[37] 城市测量规范 CJJ 8—85. 北京: 中国建筑工业出版社, 1985

[38] 国家测绘局标准化研究所. 1 500 1 1000 1 2000 地形图图式 GB 7929—87. 北京: 测绘出版社, 1987

[39] 国家测绘局标准化研究所. 1 500 1 1000 1 2000 地形图图式 GB 7929—95. 北京: 中国标准出版社, 1996

[40] 国家测绘局标准化研究所. 地形要素分类与代码 GB 14804—93. 北京: 中国标准出版社, 1994