



全国煤炭高职高专“十一五”规划教材

# 控制

# 测量

主 编 高绍伟 董俊峰

煤炭工业出版社

全国煤炭高职高专“十一五”规划教材

# 控 制 测 量

主 编 高绍伟 董俊峰  
副主编 冯新顶

煤炭工业出版社

·北 京·

## 内 容 简 介

本书主要包括:水平控制网的布设、精密测角仪器和水平角观测、电磁波测距导线、高程控制测量、椭球面上的测量计算和椭球面元素投影至高斯平面等。书中紧密结合目前测绘行业新仪器、新技术应用的发展,有较强的实用性。

本书是高等职业技术学院工程测量技术专业的教学用书,也可作为高等专科学校及中等专业学校的教学用书,亦可作为测绘工程技术人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

控制测量/高绍伟,董俊峰主编.—北京:煤炭工业出版社,2007.8

全国煤炭高职高专“十一五”规划教材

ISBN 978-7-5020-3074-2

I.控… II.①高…②董… III.控制测量-高等学校:技术学校-教材 IV.P221

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第054896号

煤炭工业出版社 出版  
(北京市朝阳区芍药居35号 100029)  
网址:www.cciph.com.cn  
北京京科印刷有限公司 印刷  
新华书店北京发行所 发行

\*

开本 787mm×1092mm<sup>1</sup>/<sub>16</sub> 印张 18<sup>3</sup>/<sub>4</sub>  
字数 450千字 印数 1—6,000  
2007年8月第1版 2007年8月第1次印刷  
社内编号 5875 定价 34.00元

**版权所有 违者必究**

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,本社负责调换

# 全国煤炭高职高专工程测量技术类“十一五”规划教材

## 编审委员会

主 任:纪奕君

副 主 任:薄志义 李天和 索效荣 李战宏

秘 书 长:赵国忱

委 员 (以姓氏笔画为序):

邓传军 冯大福 孙 江 孙金礼

任建华 刘永清 刘俊荷 米志强

宋文斌 李世平 李孝文 杨 楠

苗福林 贺英魁 钟来星 高绍伟

燕志明 姬 婧 梁振华 董俊峰

温继满

# 前 言

本教材是为适应当前工程测量专业高等职业教育的需要,由中国煤炭教育协会和中国矿业大学(北京)教材编审室共同组织编写的,是全国煤炭高职高专工程测量技术专业“十一五”规划教材之一。

《控制测量》主要讲述建立工程和国家水平及高程测量控制网的理论和方法。控制测量是高等职业教育工程测量技术专业的一门主干课程,在专业课程设置中具有重要地位和作用。

近年来,由于自动化精密测量仪器以及空间大地测量技术的迅速发展,使控制测量的内容发生了很大变化。特别是以 GPS 卫星定位技术为代表的空间大地测量技术的发展和运用,极大地促进着控制测量的发展,并大大丰富了课程内容。本教材紧密结合高职高专教育教学和测绘生产实际,为充分体现高职高专教育的特色,在编写过程中力求概念清晰、深入浅出、联系实际、突出实用,本着基础知识够用的原则,着重介绍现代测绘学中新技术、新方法的应用,如电子经纬仪、全站仪、数字水准仪, GPS 等内容。

本教材由高绍伟、董俊峰主编,由高绍伟统稿并定稿。具体分工如下:第一、七章由周显平(内蒙古科技大学高等职业技术学院)编写,第五、六章由董俊峰(山西煤炭职业技术学院)编写,第三章由冯新顶(河南理工大学高等职业学院)编写,第二、四章由高绍伟(北京工业职业技术学院)编写。

本书在编写的过程中,参阅了大量的文献资料,引用了同类书刊中的部分内容,在此谨向有关作者表示衷心感谢。

由于编者水平有限,加之时间匆忙,书中难免存在缺点、错误、疏漏,恳请读者批评指正。

编 者  
2007年5月

# 第一章 概 述

## 第一节 控制测量的基本任务及主要内容

### 一、控制测量的涵义

地形测量的基本目的是以测绘工作为手段,确定出地面点在空间的位置,并且把它表示成数据形式或者描绘在图面上,供工农业建设、工程设计和施工所应用。

控制测量也是为上述基本目的服务的。它与地形测量的区别在于:

(1) 测量的精度等级更高,工作更加严密。测量工作总是按照从整体到局部的逐级控制原则进行的。在广阔的范围内所进行的控制测量工作,必须对局部的具体测量工作负责,能够起到应有的支撑和控制作用。为此,控制测量就要研究更加精密的测量仪器、测量方法和数据处理方法等。

(2) 测量的范围更加广阔,常常是上百平方公里至数千平方公里。此时不能再将地球表面视为平面,必须研究地球曲率等多种因素对测量成果的影响。

由于地球形状接近于旋转椭球,其表面是一个不可展开的曲面。此时既要保证很高的测量精度,又要提供出局部测绘平面图所需要的控制测量成果,所以必须妥善解决地面观测成果到椭球面、再到平面上的转化问题,即投影的方法和投影的计算等问题。

(3) 地形测量侧重于从微观上将地球表面的形态加以模型化,并且形象地描绘在平面上。控制测量则要求从宏观上更加精密地测定点的位置,将这些点构成整体框架,控制整个区域的地形测图和工程测量工作。如果说地形图的测绘和应用是地形测量的研究对象,建立科学化、规范化的地面控制网的理论和方法就成为控制测量的研究对象。

控制测量与经典大地测量的关系极为密切。大地测量比控制测量的测量范围更加广阔,覆盖全国乃至更大范围,其任务也更加广泛。由于二者处理问题的途径和方法基本相同,所以很久以来大地测量也包括了控制测量。近几十年来,科学技术的发展突飞猛进,大地测量的研究内容日益丰富,先后形成了应用大地测量、椭球大地测量、物理大地测量、测量平差、卫星大地测量、惯性大地测量等不同分支。在这种形势下,控制测量应运而生,成为应用大地测量、椭球大地测量、测量平差、卫星大地测量之间的一个实用性很强的交叉学科,它的研究对象和研究内容是大地测量的不同分支所无法取代的。

控制测量是一门承上启下、直接服务于某个地区经济建设和工农业生产的基础性测量工作。

各种数据是控制测量成果的最终体现。按这些数据的来源和作用可以分成三类:起始数据、观测数据、推算数据。一般说来,控制测量的起始数据(如已知点坐标)是大地测量成果提供的;控制测量的观测数据是通过外业观测获取的;控制测量的推算数据是根据起始数

据和观测数据推算出来的。控制测量的推算数据也就是普通测量所需要的起始数据。

## 二、控制测量的基本任务和作用

### 1. 控制测量的基本任务

控制测量作为城市或工矿地区一切测绘工作的框架和基础,通常采用的办法是在全区范围内设置一系列能够长期保存、便于应用的固定点,称之为控制点。控制按不同的测量方式彼此联结构成统一的整体网形,形成控制网。通过实地观测和数据处理,精确地确定出控制点在全区统一坐标系统中的水平位置和高程位置,并且监测这些控制网点随时间的变化量。

上述内容就是控制测量的基本任务。为实现这项任务就必须研究有关的理论和方法,这也正是控制测量的研究对象。

### 2. 控制测量的作用

建立地面控制网,精确测定控制点的空间三维坐标,具有重要作用,下面以地形测图和工程建设工作为例来说明控制测量的作用及其要求。

#### 1) 为地形测图提供控制基础

地形测图是在控制测量所建立的控制网基础上,再进一步加密图根控制点,随后测绘地形、地物特征点,最后绘制成地形图。控制测量是通过以下途径发挥其控制作用的:

(1) 控制测图误差,保证地形图的应有精度。地形测图工作本来可以自一点开始,由近及远、由此及彼逐步展开和延伸。但是这样做的结果必然导致测图误差的不断积累和急剧增大,以至达到不能容许的程度。因此,地形测图必须依据高精度的控制点作为基础,使测量误差仅限定在控制点与周围的地形、地物特征点之间。这样一方面可以保证地形、地物在图面上的应有精度,另一方面也能使各图幅的精度均匀一致。

(2) 可以在不同地方同时开展测图工作,相邻的测绘成果能够衔接一起彼此利用。控制网的坐标系统在广大区域内都是统一的,这样就可以在不同地点、不同时间安排测图工作,按轻重缓急顺其需要,摆脱了时空的限制。所测的地形图又不会出现重叠和遗漏,均能相互拼接,彼此利用。

(3) 将地球曲面展成平面时,控制了由于褶皱和断裂造成的误差。地球接近于旋转椭球体,其表面是一个不可展平的曲面,而地形测图又必须在平面上实施。若硬性展平就会出现褶皱和断裂现象,即用一般方法是不能将球面上的地物、地形展绘到平面上的。但是,大地控制点在一定旋转椭球面上的位置(坐标)是可以精确测定的,并且可以按一定的数学方法将其换算为投影平面上的点位。即控制测量成功地解决了自地球表面投影到平面上的问题,利用控制测量所提供的控制点平面直角坐标,可以方便地将地形、地物测绘到平面图上,而不产生明显误差。

#### 2) 为各项工程建设提供基础控制

在工程建设过程中,大体上可分为设计、施工和运营3个阶段。每个阶段都对控制测量提出不同的要求,现分述如下:

(1) 在设计阶段建立用于测绘大比例尺地形图的测图控制网。该阶段,设计人员要在大比例尺地形图上进行区域规划和建筑物的设计,并在地形图上求得设计所依据的各项数据(距离、方位和坐标)。因此,控制测量的任务是布设作为测图用的图根控制网,以保证地形图的精确和各幅地形图之间的准确拼接。另外,这种测图控制网也是相应地籍测量的依

据。

(2) 在施工阶段建立施工控制网。在这一阶段,施工测量的主要任务是将图纸上设计的建筑物放样到实地上去。对于不同的工程来说,施工测量的具体任务也不同。如水库大坝、隧道桥梁、房屋建筑等。放样过程中,仪器所安置的方向、距离都是依据控制网计算出来的。因而在施工放样之前,需建立具有必要精度的施工控制网。

(3) 在工程竣工后的运营阶段建立以监视建筑物变形为目的的变形观测专用控制网。由于在工程施工阶段改变了地面的原有状态,加之建筑物本身的重量将会引起地基及其周围地层的不均匀变化。此外建筑物本身及其基础,也会由于地基的变化产生变形。这种变形,如果超过了某一限度,就会影响建筑物的正常使用,严重的还会危及建筑物的安全。因此,在竣工后的运营阶段,需对这些建筑物进行变形监测。为此需布设变形观测控制网,由于这种变形的数值一般很小,为了能足够精确地测出它们,要求变形观测控制网具有较高的精度。

以上所述的施工控制网和变形观测控制网统称为专用控制网。

可见控制测量的主要作用在于:在各项测量工作中起着基础作用;控制全局的作用;具有限制测量误差的传递和积累的作用。

### 三、控制测量的主要内容

(1) 水平控制网的技术设计。包括水平控制网的布网原则、布网方案以及精度估算等。

(2) 研究高精度地面控制网(包括水平控制网和高程控制网)的建立原理、建网方法、观测作业和成果验算等。

(3) 建立地面控制网所必须的观测仪器和观测方法,例如精密角度测量、精密距离测量、精密水准测量等仪器的使用方法,以及消除或减弱各种误差影响的措施,以获得高精度测量成果。这些都是控制测量的基本内容,本书将分章阐述。

(4) 地球表面测量成果向椭球面再到高斯平面的数学投影变换及有关问题的测量计算。主要研究椭球的选择及其定位,椭球的数学性质和椭球面上的计算,大地坐标系统的转换,高斯投影的参数性质,高斯投影计算,平面坐标系统的转换和选择等。

## 第二节 控制网的布设形式

控制测量包括平面控制测量和高程控制测量。地面控制网通常分水平控制网和高程控制网。这样可以使测定地面点水平位置和高程位置的工作分别进行,技术上容易实现,经济上相对合理,对成果的实际应用也比较有利。

### 一、水平控制网的布设形式

水平控制网是以一定形式布设的图形,将控制点相互联结构成网状。观测网中的角度、边长等要素,并将它们都归算到统一选定的计算基准面上,然后根据必要的起始数据对全网进行平差,求算各控制点的水平位置。

#### 1. 天文测量

天文测量是根据天体的运动规律,在测点上通过观测某天体(如北极星、太阳和月亮)的高度和方位,并记录观测的时刻,从而确定该点的地理位置。这种方法是在一个点上独立进行的,它与地面各测点没有任何的联系。因此,它具有组织工作简单和观测误差不积累等优点。



点。其缺点是测定点位的精度不高,故一般不用它来直接测定点位。

### 2. 三角测量

#### 1) 测角网

在地面上选定一系列点位(使互相观测的两点通视),把它们按三角形的形式联结起来即构成三角网。如果测区较小,可以把测区所在的一部分椭球面近似看作平面,则该三角网既为平面上的三角网(图 1-1)。

在三角网中若外业只观测各三角形的内角,则称其为测角网。测角网中的观测量是网中的全部(或大部分)方向值,根据各方向值即可算出任意两个相邻方向之间的夹角。

若已知点 1 的平面坐标  $(x_1, y_1)$  以及点 1 至点 2 的平面边长  $S_{12}$  和坐标方位角  $\alpha_{12}$ ,便可用正弦定理依次推算出所有三角网的边长以及各边的坐标方位角和各点的平面坐标。即三角测量的基本原理和方法。

以图 1-1 为例,待定点 3 的坐标计算如下:

$$s_{13} = s_{12} \frac{\sin B}{\sin C} \tag{1-1}$$

$$\alpha_{13} = \alpha_{12} + A \tag{1-2}$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta x_{13} &= s_{13} \cos \alpha_{13} \\ \Delta y_{13} &= s_{13} \sin \alpha_{13} \end{aligned} \right\} \tag{1-3}$$

$$\left. \begin{aligned} x_3 &= x_1 + \Delta x_{13} \\ y_3 &= y_1 + \Delta y_{13} \end{aligned} \right\} \tag{1-4}$$

即由已知的  $s_{12}, \alpha_{12}, x_1, y_1$  和各观测角的平差值  $A, B, C$ 。即可推算求得  $x_3, y_3$ 。同理可依次求得三角网中其他各点的坐标。

测角网早在 17 世纪即被采用。随后经过前人不断研究、改进,无论从理论上还是实践上逐步形成为一套较完善的控制测量方法,这就是“三角测量”。由于这种方法主要使用经纬仪完成大量的野外测角工作,所以在电磁波测距仪问世以前,测角网是布设各等级平面控制网的主要形式。测角网的主要优点是:图形简单,网形精度较高,有较多的检核条件,易于发现观测中的粗差,便于计算。缺点是:在平原地区或隐蔽地区易受障碍物的影响,布网困难大,有时不得不建造较高的觐标。

#### 2) 测边网

随着电磁波测距技术的发展,在上述三角网中外业观测量不是三角形的内角,而是直接测定三角形各边长,利用这些边长求出各三角形的内角,进而推算网中各待定点的坐标,其方法与测角网方法相似。

三边测量的缺点同样要求相邻方向互相通视,而且检核条件较少。所以,纯测边网在实践中应用不多。

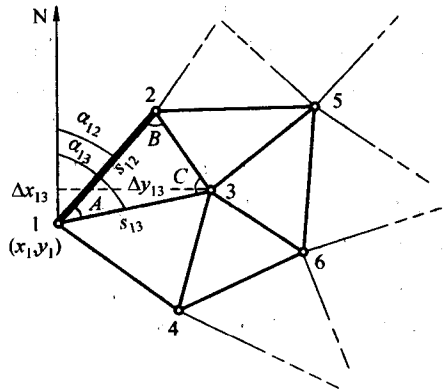


图 1-1 三角测量

### 3) 边角同测网

边角同测网(简称边角网)是指在上述三角网中,外业既观测角度又观测边长的以三角形为基本图形的三角网。实际上导线网也可以看作是边角网的特殊情况。边角网和测边网一般应用于高精度专用控制网,如高精度变形监测网。

### 3. 精密导线测量

精密导线网是目前水平控制网中较常用的一种布设形式。在地面上选择一系列相互通视的点(导线点),以折线的形式将它们联结起来,构成导线。它包括单一导线和具有一个或多个结点的导线网。网中的观测值是角度(或方向)和边长。若已知导线中一个点的坐标和一条边的方位角,则可以依次推算出其他各导线点的坐标,确定其平面位置。

导线网与三角网相比,主要优点在于:

(1) 网中各点上的观测方向数较少。除结点外只有两个方向,因而受通视要求的限制较小,易于选点和降低觇标高度,甚至无须造标。

(2) 导线网的图形非常灵活,选点时可根据具体情况随时改变,坐标传递迅速。

(3) 网中的边长都是直接测定的,因此边长的精度较均匀,导线纵向误差较小。

导线网的缺点是:导线网中的多余观测数较同样等级的三角网要少,有时不易发现观测值中的粗差,因而可靠性不高。控制面积小,方位角误差积累大,横向误差较大。

由上述可见,导线网特别适合于障碍物较多的平坦地区或隐蔽地区。随着电磁波测距仪和全站仪的普及和应用,精密导线测量已成为布设水平控制网的主要方法。我国传统的水平控制网是采取以三角测量为主,以精密导线测量为辅的方法建立的。

### 4. 卫星定位测量(GPS网)

应用 GPS 卫星定位技术建立水平控制网,具有精度高、速度快、费用低等优点。目前 GPS 卫星定位技术正在取代传统的三角测量,成为建立水平控制网的重要方法。

GPS 定位的基本原理是根据高速运动的卫星瞬间位置作为已知的起算数据,采用空间距离后方交会的方法,来确定待测点的位置。观测时刻的卫星位置可通过导航信息获得,从而求得卫星的三维坐标。因而接收机观测到至少 3 颗卫星的距离,则形成一个空间测边交会图形,就可计算出测站点的坐标,如图 1-2 所示。实际测量时考虑到接收机时钟有偏差,因此需要至少同时观测 4 颗以上卫星,以便解算测站点三维直角坐标和接收机钟差四个未知数。

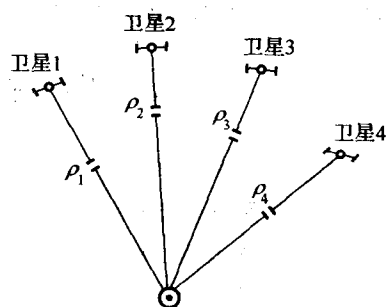


图 1-2 GPS 定位的基本原理

GPS 定位有绝对定位和相对定位两种形式。绝对定位又称单点定位,其点的位置是地心坐标系中的绝对坐标,其精度只有 20 m 左右。

目前的 GPS 控制测量基本是采用相对定位的方法。相对定位即在两个测站上用 2 台接收机同步观测相同的 GPS 卫星进行载波相位测量,以确定两点间的相对位置。同样,多台接收机安置在不同的测站上同步观测 GPS 卫星,可以确定多条基线向量,在一个端点坐标已知的情况下,可用基线推求另一点的坐标。载波相对定位分为静态相对定位和动态相对定位。静态相对定位即将 GPS 接收机固定在测站上不动,对 GPS 卫星作同步观测。静

态相对定位一般采用载波相位观测值为基本观测量,在此基础上作差分处理,即对观测值作差分,消除一些多余参数,利用观测值线性组合成误差方程。这种差分方法可消除或减弱多种误差对定位的影响,且减少了解算工作量。差分法有单差法、双差法和三差法等形式。静态相对定位在同步观测 1 h~2 h 的情况下,相对定位精度可以达到毫米级。

动态相对定位是一台 GPS 接收机固定在已知的基准点上,另一台接收机在运动中对 GPS 卫星进行同步观测,并同时接收来自基准点上接收机发出的数据信号,从而解算运动接收机瞬间的坐标,这种实时动态定位(RTK, Real Time Kinematic)技术,其精度可达厘米级。可作为低等控制测量用,如地形测量和施工放样测量等。

GPS 相对定位精度,在几十公里的范围内可达  $1/1\ 000\ 000 \sim 1/100\ 000$ ,可以满足《城市测量规范》对城市二、三、四等网的精度要求(二等最弱边相对精度  $1/300\ 000$ )。然而在高程方面,GPS 测得的高程是相对于椭球面的大地高,而水准测量求出的则是相对于大地水准面的高程,两者之差就是大地水准面差距  $N$ 。目前在大多数情况下,其值难以精确决定,因此,GPS 暂时只能用于水平控制网的布设。要想获得准确的高程必须采用一定的高程处理的方法。

## 二、高程控制网的布设形式

### 1. 几何水准测量

国家高程控制网是用水准测量方法布设的,它的基本原理是利用水准仪直接测定两点的高差,进而逐点推算出地面点高程。它的优点是精度高。

### 2. 三角高程测量

三角高程测量的基本原理是:测定地面两点的距离和垂直角,依据三角公式计算出两点的高差,进而求出地面点高程。它适用几何水准测量不易达到的三角点和导线点的高程传递。三角高程测量作业简单,布设灵活,不受地形条件的限制。缺点是:由于大气垂直折光的影响,垂直角观测值含有较大的误差,使得三角高程测量的精度较低。

## 第三节 控制测量新技术的发展情况

控制测量的基本任务,就是精确测定地面点的空间位置。过去采用的主要方法,是常规的三角测量和几何水准测量。自上世纪 80 年代初期,由于电子技术、激光技术、电子计算机和空间技术的迅速发展,使得控制测量在理论和技术上都产生了重大变革。下面仅对这些新方法的发展作一简略的介绍。

### 一、精密水准仪的发展概括

水准测量仪器一是构成水平基准线的水准仪,二是量测水平基线到待定点高度的水准尺。随着技术的发展,水准仪置平和照准精度,标尺分划标志的准确度和信息传递方式都在不断地提高。自 1912 年拉列曼提出高精度水准测量的定义后,就出现了微倾式水准仪,配置了高倍率望远镜和高灵敏度水准器。为了提高读数精度,配置了平行玻璃测微器。20 世纪 30 年代,瑞士威特(Wild)N3 和德国蔡司(Zeiss)Ni004 都属于这种类型的仪器。到了 50 年代,利用重力平衡和强制阻尼的原理,制成了带有精密补偿器的自动安平水准仪,它的特点是对气温变化不灵敏,精度稳定,工效高,可在 1 s 的时间内,将倾斜不大于  $10'$  的视准线自动置平,达到  $0.05''$  的精度。德国 Zeiss 公司研制的 Ni002 自动安平水准仪属于这种类型

的仪器。并用于(摩托化)水准测量,即用汽车运载仪器、标尺和作业人员,以提高作业效率,减轻劳动强度。该仪器采用悬挂式摆镜,可以旋转 $180^\circ$ 并在两个位置上读数,视线绝对水平。仪器的目镜可旋转,观测者在固定座位上可进行前、后视读数。此外,脚架和标尺都作了改变以适应摩托化的要求。汽车上备有数据记录装置,用以记录观测数据,一段水准路线完成后,立即获得高差。20世纪80年代末期,瑞士徕卡厂研制出第一台数字水准仪NA2000,采用线传感器识别水准标尺的条码分划,用影像相关技术,由电子计算机计算出水平视线读数和视线长度,并记录在数据模块中,数值的分辨率达到 $25\ \mu\text{m}$ ,它与自动补偿器配置,每千米水准测量的中误差为 $\pm 1.5\ \text{mm}$ 。新型号的NA3000数字水准仪,每千米水准测量的中误差为 $\pm 0.3\ \text{mm}$ 。与这种类型仪器精度相当的还有德国蔡司厂DiNi10/20型数字水准仪(采用几何法原理读数)、日本拓普康厂的DL-101C/102C型数字水准仪(采用相位法原理读数)。

数字水准仪具有测量速度快、读数客观、精度高的特点,减轻了作业员精密照准的劳动强度,使测量数据直接输入记录卡中,有利于实现水准测量内外业数据的电子传输和处理。但标尺光线太暗或遮挡太多时,不能工作。目前数字水准仪分为两个精度等级,中等精度的每千米水准测量偶然中误差为 $0.3\ \text{mm}\sim 1.5\ \text{mm}$ ;高精度的每千米水准测量偶然中误差为 $0.3\ \text{mm}\sim 0.4\ \text{mm}$ 。

## 二、精密测角仪器的发展概况

经纬仪的变革首先是以玻璃度盘的 $\text{D}$ 光学经纬仪取代了金属度盘的游标经纬仪,随后将自动安平水准仪的自动补偿原理引入经纬仪的竖直度盘指标系统,实现了竖直度盘指标自动归零。光学对中器的应用使垂球对中精度由 $3\ \text{mm}$ 提高到了 $0.5\ \text{mm}$ 。

精密测角仪器的重大发展是从20世纪60年代以来实现读数的数字化开始的。由于采用光栅度盘或编码度盘代替了光学玻璃度盘,测量数据可直接在屏幕上显示出来或自动记录在磁盘上,进而同微型计算机相结合,实现了角度观测过程中观测值的获取、传输、处理的自动化,这种经纬仪称为电子经纬仪。

它与光学经纬仪比较具有以下优点:

- (1) 野外测量结果自动记录在电子手簿上,减少了读数的误差和记录的粗差,为实现室内数据处理自动化打下基础;
- (2) 利用电子经纬仪中的微处理机,通过传感器,可以自动地改正轴系误差,提高测量精度;
- (3) 角度测量时自动扫描整个度盘并取平均值作为测量结果,从而消除了度盘分划误差和偏心差。
- (4) 提高了工作效率和作业精度,减轻外业人员劳动强度,并为测量的自动化创造了条件。

## 三、电磁波测距仪发展概况

20世纪50年代,电磁波测距仪已经成为正规的精密测距仪器,并应用于生产实际。以后,由于激光、半导体、微电子技术的发展,促进了电磁波测距仪向着体积小、质量轻、精度高和自动化方向产生飞跃的变化。

第一代电磁波测距仪用普通光源,它只能在夜间观测。后来,用激光光源代替普通光源,出现了激光测距仪。这种测距仪既缩小了仪器的尺寸和质量,又能昼夜进行测距,最长

可测至 50 km。激光测距仪的最新发展有两种类型:一是短程高精度测距仪,如 kern 公司的 ME-5000 测距仪,在 8 km 的测距范围内误差小于 2 mm;另一种是采用双频激光的测距仪,它可用两种不同载波频率的激光测距,以便自动改正气象的影响,它的最大测程约 30 km,每公里精度可达 0.2 mm。然而由于这种仪器的技术要求复杂,价格昂贵,至今未能批量生产。

20 世纪 60 年代初,采用砷化镓发光管发射的红外光代替普通光,出现了所谓红外测距仪,如瑞士 Wild 公司的 DI-5 红外测距仪。这类测距仪小巧精致并能自动显示测距,精度为  $(3 \text{ mm} + 2 \times 10^{-6} D)$ ,用于精密测边测角的专用控制网或导线网中最为合适。这类仪器的最大测程约 3 km~5 km。瑞典 AGA 公司的 AGA-14 型红外测距仪测程为 10 km 左右,从而改变了红外测距仪只能进行短程测距的看法。之后,电磁波测距仪与电子经纬仪相结合,从而形成既能测距又能测角的全能仪器,通常称其为全站型电子速测仪。这种仪器具有测距、测角、记录、计算甚至平差等多种功能。在一个测站上就可以得到所需的全部测量数据(甚至包括坐标、方位角等推算数据),简称全站仪。

第一台全站仪 Elta-14 是 Opton 公司于 1968 年生产的,其体积虽然较大且比较笨重,但却具备了现代全站仪的雏形。该仪器包括 4 个基本组成部分:电子经纬仪、电磁波测距仪、数据记录仪、反射镜和电源。从仪器结构上来看,全站仪可分为两类:一类是整体式结构,另一类是组合式结构。

1990 年 Geotronics 公司和 Leica 公司率先研制成功各自的测量机器人并投放市场。所谓测量机器人,是在前述普通全站仪的基础上,采用伺服电机驱动和其他光电技术,进一步实现了寻找和照准给定目标自动化的测量系统。

Leica 公司的测量机器人系统简称为 APS(Automated Polar System)主要硬件设备为自动经纬仪 TM3000V 加测距仪,此外还有反射镜、外部微机和控制器。TM3000V 后面的字母 V 表示仪器望远镜上带有目镜 CCD 摄影机,其功能是实现自动识别目标并使其影像聚焦。测距仪用字母 D 表示,因此 TM3000V/D 表示经纬仪上既有 CCD 摄影机,也有测距仪。该系统的观测程序完全由外部微机中的软件(名 APS Win)控制运行。运行中,仪器自动搜寻目标是以内存中的参考文件的数据为根据的。

#### 四、电子计算机在测量上的应用

电子计算机的应用使人类生活的各个领域,其中包括控制测量的计算工作,都发生了巨大的变革。以往,测量的计算工作采用手摇计算机进行,因而在内业工作上花费了大量的人力和时间。如今这些工作几乎全部由电子计算机所代替。由此产生的高效率是空前的。我国天文大地网的平差计算就是利用大型电子计算机完成的。全网由一、二、三等三角网(锁)和导线网组成,总共约有 5 万个控制点和 30 余万个观测方程式,平差工作历时 6 年多。如果不是使用大型电子计算机,要完成规模如此巨大的控制网整体平差是难以设想的。

电子计算技术不仅应用于控制测量的数据处理,而且也普遍用于现代化的数据采集设备(全站仪、数字水准仪、测距仪以及下面将介绍的卫星定位系统、惯性系统等)本身的计算、控制和管理。此外,还应强调的是,由于计算机除具有数值计算的功能外,还具备信息处理的功能,并且随着计算机技术的迅速发展而日益完善。其应用受到社会的普遍重视,各种数据库应运而生,并在此基础上形成大型的信息系统,如 GIS(地理信息系统)等,成为各种领域中的信息管理、分析、决策的重要工具。

## 五、全球定位系统和 ISS 系统

### 1. GPS 系统

GPS(Global Positioning System)系统,是美国从 20 世纪 70 年代开始研制,历时 20 年,耗资 200 亿美元,于 1994 年全面建成,具有在海、陆、空进行全方位实时三维导航与定位能力的新一代卫星导航与定位系统。GPS 以全天候、高精度、自动化、高效益等显著特点,广泛应用于大地测量、工程测量、航空摄影测量、运载工具导航和管制、地壳运动监测、工程变形监测、资源勘察、地球动力学等多种学科,从而给测绘领域带来一场深刻的技术革命。

GPS 由空间部分、地面监控系统和用户设备三个独立的部分组成。空间部分由 21 颗工作卫星,3 颗备用卫星组成。卫星高度约为 20 200 km,分布在 6 个近似圆形的轨道上运行,轨道面相对赤道面的夹角为  $55^\circ$ ,每个轨道面上有 4 颗卫星,相邻轨道面的临近卫星的相位差  $30^\circ$ 。卫星发播两个频率的无线电信号, $f_1=1\ 575.42\ \text{MHz}$ , $f_2=1\ 227.60\ \text{MHz}$ 。地面监控系统由 1 个主控站,3 个注入站,5 个监测站组成。主控站的任务是收集、处理本站和监测站收到的全部资料,编算出每颗卫星星历和 GPS 时间系统,将预测的卫星星历、钟差、状态数据以及大气传播改正编制导航电文传送到注入站。注入站的主要任务是在每颗卫星运行至上空时把导航数据及主控站的指令注入卫星。监测站的主要任务是取得卫星观测数据并将这些数据传送至主控站。用户设备部分用来接收 GPS 卫星发射信号,以获得必要的导航和定位信息,经数据处理,完成导航和定位工作。

### 2. GLONASS 全球定位系统

GLONASS 是前苏联从 20 世纪 80 年代初开始建设的与美国 GPS 系统相类似的卫星定位系统,也由卫星星座、地面测控控制站和用户设备三大部分组成,现在由俄罗斯空间局管理。GLONASS 和 GPS 系统整体结构相似,其主要不同在卫星设计、信号载波频率和卫星识别方法不同。卫星 24 颗,卫星高度 19 100 km,轨道周期 11 h15 min,有三个轨道,每个轨道有 8 颗卫星,轨道倾角  $64.8^\circ$ 。载波频率  $f_1=1\ 602.000\ 0+0.562i\ \text{MHz}$ , $i$  为卫星的频道编号 ( $-7\leq i\leq 24$ ), $f_2=1\ 246.000\ 0+0.432i\ \text{MHz}$ 。

### 3. 伽利略(GALIEO)全球定位系统

GALIEO 系统是欧洲自主、独立的全球多模式卫星定位导航系统,可提供高精度、高可靠性的定位服务,同时实现完全非军方控制和管理。该系统由 30 颗卫星组成,其中 27 颗工作卫星,3 颗备用卫星。卫星分布在 3 个中地轨道上,轨道高度 23 616 km,轨道倾角  $56^\circ$ 。每个轨道上部署 9 颗工作卫星和 1 颗备用卫星,某颗卫星失效后,备用卫星将迅速进入工作位置代替其工作,而失效的卫星将转移到高于正常轨道 300 km 的轨道上。GALIEO 系统计划 2008 年完成,耗资约 40 亿欧元。一些专家称该系统可与 GPS 和 GLONASS 兼容,但比二者更安全、更准确。GALIEO 系统按不同层次分为免费和有偿服务两个级别。免费服务包括:提供  $f_1$  频率基本公共服务,与现有的 GPS 民用基本公共服务信号相似,预计定位的精度为 10 m。有偿服务服务包括:提供附加的  $f_2$  或  $f_3$  信号,可供民航等用户提供可靠性、完好性和高精度的信号服务。我国对该系统参加了投资与开发。

### 4. 北斗双星定位系统

2000 年底,我国发射了两颗“北斗导航实验卫星”,加上地面中心站和用户一起构成了双星导航定位系统(北斗一号)。双星导航定位系统空间部分由三颗地球静止轨道卫星(其中一颗备用)组成;地面中心站包括地面应用系统和测控系统,具有位置报告、双向报文通信

及双向授时功能;用户部分即车辆、飞机以及各军兵种低动态及静态导航定位的用户。服务区域在东经  $70^{\circ} \sim 145^{\circ}$ , 北纬  $5^{\circ} \sim 55^{\circ}$  范围内。定位精度为:平面  $\pm 20$  m, 高程  $\pm 10$  m。虽然精度较低,但它作为一种起步,是我国自己开发的局部卫星定位系统。相信在不久的将来,我国的卫星定位系统事业将会达到更高的水平。

### 5. ISS 系统

ISS 系统全名为 Inertial Surveying System, 即惯性测量系统。它是根据惯性导航原理制成的一种自动提供地面点坐标的装置。该装置用汽车或直升飞机运载,从一个已知点出发向待定点前进。从起程开始该装置连续不断地测定自身在固定的空间坐标系中沿三个坐标轴方向的加速度  $(\bar{a}_x, \bar{a}_y, \bar{a}_z)$ , 通过系统中的计算机将它们对时间进行 2 次数值积分, 求出相对已知点的三维坐标差, 并进而求得其自身在任一时刻的空间坐标。

惯性系统包括惯性平台、加速度计、计算机 3 个主要部分。惯性平台的作用主要是建立一个能自动跟踪起始点地理坐标系的三维固定坐标系。加速度计分别安置在与惯性平台的  $x, y, z$  轴平行的方向上, 以便时刻测定系统本身运动的加速度在 3 个轴上的分量。计算机的用途是: 实现多功能坐标差和系统的瞬时坐标的实时控制; 对加速度进行 2 次数值积分以求得相对起始已知点的坐标差和系统的瞬时坐标; 控制 3 个电动机(用来控制惯性平台的纵摇、横摇和方位旋转)的旋转, 使惯性平台始终跟踪起始点的地理坐标; 控制整个系统的工作状态和对观测结果的数据处理。

惯性系统适合于用导线的形式加密控制点。为了提高观测的精度, 在作业过程中宜每隔 3 min ~ 5 min 停止一次, 以纠正各项误差。

## 本章小结

本章概括了控制测量的涵义; 控制测量的任务和作用; 控制测量学的内容; 水平控制网和高程控制网的布设形式。目的是让学生对控制测量有一个整体的概念。最后对控制测量新技术的发展做了简要介绍。

## 思考题与习题

- 1-1 何谓控制测量? 控制测量的基本任务是什么?
- 1-2 控制测量研究的内容有哪些?
- 1-3 水平控制网的布设形式有哪些? 高程控制网的布设形式有哪些?
- 1-4 控制测量在国民经济建设中的作用如何?
- 1-5 简述测角网、导线网、边角网的适用范围及其优、缺点。
- 1-6 简述控制测量新技术发展的几个方面。

## 第二章 水平控制网的布设

### 第一节 国家水平控制网的布设原则和方案

#### 一、布设原则

在一个国家范围内,按照国家统一的标准、规范和统一坐标系统所建立的平面控制网称为国家水平控制网。我国从 1951 年开始组织人力、物力、财力进行野外工作,一直延续到 1971 年基本结束,完成了国家天文大地网的建网工作。显然,为做好这项规模巨大的工程,必须全面规划、统筹安排,制定一些基本原则。

#### 1. 分级布网,逐级控制

我国疆域辽阔,自然地理状况复杂,如果以大密度、高精度的控制网一次覆盖全国,是很难做到的,也不可能保证各个地区的建设需要。为了适时地保障国家经济建设和国防建设用图的需要,我国采用了由高级到低级,由整体到局部的分级布网,逐级控制,依次加密的原则。即先以精度高而稀疏的一等三角锁或一等导线,尽可能沿经纬线方向纵横交叉地迅速布满全国,形成统一的骨干大地控制网,然后在一等锁环内逐级加密二、三、四等平面控制网。

#### 2. 应有足够的精度

国家控制网是测图和一切工程测量的基础。控制网的精度和密度必须满足测图和各项工程的需要。作为国家大地控制网骨干的一等控制网,应力求精度更高些才有利于为科学研究提供可靠的资料。

#### 3. 应有足够的密度

为了满足控制测图需要,国家控制点必须有足够的密度。控制点的密度主要根据测图方法及测图比例尺的大小而定。控制点的密度用每个控制点控制的面积或三角网中三角形的平均边长表示。各种比例尺地形图对平面控制点的密度要求见表 2-1。

表 2-1 各种比例尺地形图对平面控制点的密度要求

测图比例尺	每幅图要求点数	每个三角点控制面积/km <sup>2</sup>	三角网平均边长/km	等级
1:50 000	3	约 150	13	二等
1:25 000	2~3	约 50	8	三等
1:10 000	1	约 20	2~6	四等

为保证测图精度所需要的控制点,一部分可以是国家点,一部分可以是解析点和进一步加密的图根点。因为建立国家控制点的作业过程严密,费用较大,所以,在保证测图精度的



前提下,可以加密图根点,而国家控制点只要达到必要的精度即可。

#### 4. 应有统一的规范

由于我国三角锁、网的规模巨大,必须有大量的测量单位和作业人员分期分区同时进行作业。如果没有统一的布网方案、精度指标和作业规格,就很难建成合乎要求的国家控制网。为此,国家测绘局专门颁发了《国家三角测量和精密导线测量规范》(以下简称《国家规范》)。对各级控制网的起始数据,观测数据的精度和网中的图形结构等,均提出明确的要求。

国家三角锁、网布设规格及其精度见表 2-2。

表 2-2 国家三角锁、网布设规格及其精度

等级	边长/km		图形强度限制				测角 中误差	起算元素精度			最弱边长相 对中误差 $\frac{m_s}{s}$
	边长 范围	平均 边长	单三角形 任意角	中点多 边形 任意角	大地四 边形 任意角	个别 最小角		三角形 最大闭 合差	起算边 长相对 中误差 $\frac{m_b}{b}$	天文观测	
一	15~45	平原 20 山区 25	40°	30°	30°		±0.7"	±2.5"	1:350 000	$m_a < \pm 0.5''$ $m_\lambda < \pm 0.02''$ $m_\phi < \pm 0.3''$	1:150 000
二	10~18	13	30°	30°		25°	±1.0"	±3.5"	1:350 000	同一等	1:150 000
三		8	30°	30°		25°	±1.8"	±7.0"			1:80 000
四	2~6	4	30°	30°		25°	±2.5"	±9.0"			1:40 000

## 二、布设方案

国家平面控制网根据当时施测时的测绘技术水平,我国决定采取传统的三角网作为水平控制网的基本形式,只是在青藏高原特殊困难的地区布设了一等电磁波测距导线。现将国家三角网的布设方案和精度要求概略介绍。

### 1. 一等三角锁布设方案

按照建网的第一原则,国家第一级三角网是一等锁。一等三角锁是国家大地控制网的骨干,其主要作用是控制二等以下各级三角测量,并为地球科学研究提供资料。一等锁着重考虑的是精度问题而不是密度问题。

一等三角锁尽可能沿经纬线方向布设成纵横交叉的网状图形,如图 2-1 所示。锁系交叉点间的部分称为锁段,锁段长度规定在 200 km 左右,一等锁主要由近似的三角形构成。锁段内三角形的个数一般为 16~17 个。锁段三角形的任一角不得小于 40°,在地形比较复杂的地区,可在单锁中插入一些大地四边形和中点多边形,其求距角应不小于 30°。在一等锁交叉处设置起算边,以获得精确的起算边长,并可控制锁中边长误差的积累,起算边长度测定的相对中误差精度不低于 1:350 000。一等锁在起算边两端点上精密测定了天文经纬度和天文方位角,并结合三角锁成果推算作为起算方位角,用来控制锁、网中方位角误差的积累。一等天文点测定的精度是:纬度测定中误差  $m_\phi \leq \pm 0.3''$ ,经度测定的中误差  $m_\lambda < \pm 0.02''$ ,天文方位角测定的中误差  $m_a < \pm 0.5''$ 。角度观测的精度,按一锁段三角形闭合差计算所得的测角中误差应小于  $\pm 0.7''$ 。所以,国家一等三角锁也称国家天文大地网。一等锁的平均边长,山区一般约为 25 km,平原区一般约为 20 km。