



普通高等教育“十五”国家级规划教材

# 测量学

Surveying

● 主 编 熊春宝  
● 副主编 伊晓东



 天津大学出版社  
TIANJIN UNIVERSITY PRESS

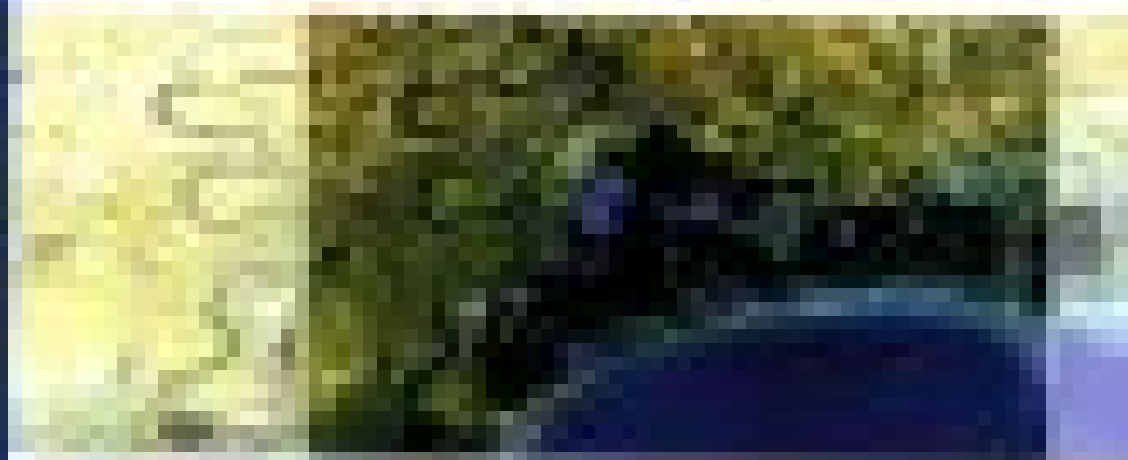


普通高等教育“十五”国家级规划教材

# 测量学

Surveying

主编 王 德 王 德  
副主编 王 德 王 德



测绘出版社

普通高等教育“十五”国家级规划教材

# 测 量 学

## Surveying

主 编 熊春宝

副主编 伊晓东



天津大学出版社

TIANJIN UNIVERSITY PRESS

### 内容简介

本书共分 11 章,系统介绍了水准测量、角度测量、距离测量、直线定向、坐标测量、控制测量、陆地碎部测量与水下地形测绘、摄影测量、地籍测量、测量误差的基本理论、地形图的基本知识与应用以及建筑工程、道路、管道、大坝、桥梁、隧道等工程的测量。本书在讲解测量学的基本概念、原理、方法的基础上,重点引入了代表当今测绘学科发展水平的全站仪、全球定位系统(GPS)、电子地图与地理信息系统(GIS)、遥感等高新测量仪器,并介绍了其技术及方法。

本书内容精练、要点突出、适用专业面广,既可作为高等学校非测量专业的测量学教材,也可供广大工程技术人员参考使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

测量学/熊春宝主编. —天津:天津大学出版社,2007.2

普通高等教育“十五”国家级规划教材

ISBN 978-7-5618-2391-0

I .测... II .熊... III .测量学—高等学校—教材  
IV .P2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 014794 号

出版发行 天津大学出版社  
出 版 人 杨欢  
地 址 天津市卫津路 92 号天津大学内(邮编:300072)  
电 话 发行部:022-27403647 邮购部:022-27402742  
网 址 [www.tjup.com](http://www.tjup.com)  
短信网址 发送“天大”至 916088  
印 刷 河北省迁安万隆印刷有限公司  
经 销 全国各地新华书店  
开 本 185mm × 260mm  
印 张 13  
字 数 333 千  
版 次 2007 年 2 月第 1 版  
印 次 2007 年 2 月第 1 次  
印 数 1—6 000  
定 价 23.00 元

# 前 言

本书是普通高等教育“十五”国家级规划教材,由天津大学、大连理工大学、东北大学、青岛建筑工程学院和大连水产学院等院校联合编写。本书适用于如下专业:建筑工程、建筑学、城市规划、城镇建设、地下工程、矿井建设、交通土建工程、给水排水工程、环境工程、水利工程、海洋工程、供热通风与空调工程、工程管理等。本教材共分 11 章,在介绍了测量学的基本知识、基础理论、测量仪器的构造和使用、测量方法与技术的基础上,还介绍了上述各专业所需的专业测量知识。另外,在有关章节中还介绍了电子水准仪、电子经纬仪、全站仪、电子求积仪、全球定位系统(GPS)、电子地图与地理信息系统(GIS)、摄影测量与遥感、数字化测图等新仪器和新技术。

本书由熊春宝主编、伊晓东任副主编。各章参编人员为熊春宝(第 1、3、5、6 章,第 8.3、8.5、9.5、10.1、10.6、10.7 节,附录)、伊晓东(第 2、4、11 章)、邓融(第 7 章)、金日守(第 8 章)、巩晓东(第 9 章)、郭宗河(第 10 章)。

天津大学郭传镇教授审阅了全书并提出宝贵的修改意见,在此,表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中可能存在不少疏漏和错误,谨请专家、读者批评指正。

编者

2007 年 1 月

## 目 录

|                        |       |
|------------------------|-------|
| 第 1 章 绪论 .....         | ( 1 ) |
| 1.1 测量学概述 .....        | ( 1 ) |
| 1.2 测量的基准面与坐标系 .....   | ( 3 ) |
| 1.3 测量的基本要素与工作原理 ..... | ( 7 ) |
| 习题 .....               | ( 9 ) |
| 第 2 章 水准测量 .....       | (10)  |
| 2.1 水准测量的原理 .....      | (10)  |
| 2.2 水准测量的仪器和工具 .....   | (11)  |
| 2.3 普通水准测量 .....       | (16)  |
| 2.4 精密水准仪与水准尺 .....    | (23)  |
| 2.5 电子水准仪 .....        | (24)  |
| 习题 .....               | (25)  |
| 第 3 章 角度测量 .....       | (27)  |
| 3.1 水平角与竖直角测量原理 .....  | (27)  |
| 3.2 光学经纬仪 .....        | (28)  |
| 3.3 水平角测量 .....        | (32)  |
| 3.4 竖直角测量 .....        | (35)  |
| 3.5 电子经纬仪 .....        | (37)  |
| 习题 .....               | (40)  |
| 第 4 章 距离测量与直线定向 .....  | (42)  |
| 4.1 钢尺量距 .....         | (42)  |
| 4.2 视距测量 .....         | (44)  |
| 4.3 电磁波测距 .....        | (46)  |
| 4.4 直线定向 .....         | (49)  |
| 4.5 罗盘仪与磁方位角测量 .....   | (51)  |
| 4.6 陀螺经纬仪与惯性测量 .....   | (52)  |
| 习题 .....               | (54)  |
| 第 5 章 坐标测量 .....       | (55)  |
| 5.1 全站仪 .....          | (55)  |
| 5.2 全站仪坐标测量 .....      | (57)  |
| 5.3 全球定位系统(GPS) .....  | (61)  |
| 5.4 GPS 坐标测量 .....     | (65)  |
| 习题 .....               | (73)  |
| 第 6 章 测量误差的基本理论 .....  | (74)  |

|               |                    |              |
|---------------|--------------------|--------------|
| 6.1           | 误差概述               | (74)         |
| 6.2           | 精度指标               | (76)         |
| 6.3           | 误差传播定律             | (81)         |
| 6.4           | 等精度直接平差            | (84)         |
|               | 习题                 | (87)         |
| <b>第 7 章</b>  | <b>小区域控制测量</b>     | <b>(89)</b>  |
| 7.1           | 控制测量概述             | (89)         |
| 7.2           | 导线测量               | (91)         |
| 7.3           | 三、四等水准测量           | (97)         |
| 7.4           | 经纬仪交会法             | (99)         |
| 7.5           | 三角高程测量             | (100)        |
| 7.6           | GPS 控制测量           | (101)        |
|               | 习题                 | (103)        |
| <b>第 8 章</b>  | <b>地形图的基本知识及测绘</b> | <b>(104)</b> |
| 8.1           | 地形图的基本知识           | (104)        |
| 8.2           | 大比例尺地形图的测绘         | (114)        |
| 8.3           | 摄影测量与遥感            | (119)        |
| 8.4           | 地籍测量               | (123)        |
| 8.5           | 水下地形测绘             | (125)        |
|               | 习题                 | (129)        |
| <b>第 9 章</b>  | <b>地形图的应用</b>      | <b>(131)</b> |
| 9.1           | 地形图的识读和基本用法        | (131)        |
| 9.2           | 面积量算与电子求积仪         | (135)        |
| 9.3           | 场地平整时的土方量计算        | (137)        |
| 9.4           | 规划设计时的用地分析         | (140)        |
| 9.5           | 电子地图与地理信息系统(GIS)   | (143)        |
|               | 习题                 | (147)        |
| <b>第 10 章</b> | <b>建筑工程测量</b>      | <b>(149)</b> |
| 10.1          | 测设的基本工作            | (149)        |
| 10.2          | 建筑场地的施工控制测量        | (152)        |
| 10.3          | 激光测量仪器及其应用         | (153)        |
| 10.4          | 民用建筑的施工测量          | (154)        |
| 10.5          | 工业建筑的施工测量          | (156)        |
| 10.6          | 大坝施工测量             | (157)        |
| 10.7          | 建筑物的变形观测           | (159)        |
| 10.8          | 竣工测量               | (162)        |
|               | 习题                 | (163)        |
| <b>第 11 章</b> | <b>线路工程测量</b>      | <b>(165)</b> |
| 11.1          | 中线测量               | (165)        |

---

|                         |       |
|-------------------------|-------|
| 11.2 纵横断面测量 .....       | (167) |
| 11.3 圆曲线测设 .....        | (171) |
| 11.4 缓和曲线测设 .....       | (174) |
| 11.5 道路施工测量 .....       | (176) |
| 11.6 桥梁施工测量 .....       | (180) |
| 11.7 隧道工程测量 .....       | (182) |
| 习题 .....                | (188) |
| 附录 1 微倾式水准仪的检验与校正 ..... | (189) |
| 附录 2 光学经纬仪的检验与校正 .....  | (192) |
| 附录 3 非等精度直接平差 .....     | (196) |

# 第 1 章 绪论

## 1.1 测量学概述

### 1.1.1 测量学的定义

测量学是研究地球的形状和大小以及确定地面、水下及空间点位的科学。它的主要内容  
包括两部分,即测定和测设。测定是指用测量仪器对被测点进行测量、数据处理,从而得到被  
测点的位置坐标,或根据测得的数据绘制地形图;测设是指把图纸上设计好的工程建筑物、构  
筑物的位置通过测量在实地标定出来。

自 20 世纪 90 年代起,世界各国将大学里的测量学(Surveying 或 Geodesy)专业、测量学机构  
和测量学杂志都纷纷改名为 Geomatics。Geomatics 是一个新造出来的英文名词,以前的英文词  
典中找不到此词,因此也没有与之对应的汉译名词。1993 年 Geomatics 才第一次出现在美国出  
版的 Webster 词典(第 3 版)中,其定义为:Geomatics 是地球的数学,是所有现代地理科学的技术  
支撑。接着,1996 年国际标准化组织(ISO)对 Geomatics 定义为:Geomatics 是研究采集、量测、分  
析、存储、管理、显示和应用空间数据的现代空间信息科学技术。Geomatics 由 Geo 和 matics 两  
部分构成,根据上述两个定义,Geo 可以理解为地球或地学,更准确地应理解为 Geo-spatial(地  
球空间)的缩写,matics 可以理解为 Informatics(信息学)或 Mathematics(数学)的缩写。从 Geo-  
matics 的兴起可以看出,借助现代科学技术且适应现代社会需求,测量学已发展成为另外一门  
新的科学:地球空间信息学。

### 1.1.2 测量学的任务与作用

测量是国家经济建设和国防建设的一项重要基础性、先行性工作,通过测量,对地球的  
形状、大小、地壳形变及地震预报等进行科学研究,建立国家基本控制网,提供各种地形图,为  
各项工程建设提供基本定位控制、地形测图和施工放样,为空间科技和国防建设提供精确的  
点位坐标和图纸资料。

在经济建设中,资源勘察、城乡建设、交通运输、江河治理、土地整治、环境保护、行政界线  
勘定都需要测量,例如,港口、水电站、铁路、公路、桥梁、隧道的建造,给水排水、燃气管道等市  
政工程的建造,工业厂房和民用建筑的建造等。在它们的规划设计阶段,需要测绘各种比例尺  
的地形图,以供工程的平面和竖向设计之用;在它们的施工阶段,必须通过测量将设计好的构  
筑物的平面位置和高程在实地标定出来,作为施工的依据;在它们竣工以后,需测绘竣工图,以  
供日后进行扩建、改建和维修之用;在它们运营管理阶段,还需要进行长期的变形观测,以保证  
工程的安全。

在国防建设中,国界勘定、军用地图测制、航天测控等都离不开测量。例如,远程导弹、人造卫星或航天飞船的发射,必须通过测量保证它们精确入轨,在飞行过程中根据测量随时校准轨道位置,最后准确地命中目标或就位。在科学研究方面,对地壳升降、海陆变迁、地震监测、灾害预警、宇宙探测等的研究,高能物理研究中的巨型粒子加速器和质子对撞机的精密安装等,也都依赖于测量技术。另外,目前地理信息系统正广泛应用于各行各业,测量成果作为地理信息系统的基础,提供了最基本的空间位置信息,同时,测量也是将来不断更新基础地理信息必不可少的手段。

### 1.1.3 测量学的分类

测量学包括普通测量学、大地测量学、摄影测量学、工程测量学和海洋测量学等分支学科。

普通测量学是在不顾及地球曲率的情况下,研究地球表面较小区域内测绘工作的理论、技术和方法的学科,是测量学的基础。

大地测量学是研究整个地球的形状、大小和地球重力场,在考虑地球曲率的情况下,大范围建立测量控制网的学科。根据测量的方式不同,大地测量学又分为常规大地测量学和卫星大地测量学。

摄影测量学是通过摄影、扫描等图像记录方式,获取目标模拟的和数字的影像信息,并对这些影像信息进行处理、判释和研究,从而确定被摄目标的形状、大小、位置、性质等理论、技术和方法的学科。根据摄影的方式不同,摄影测量学又分为地面摄影测量学、航空摄影测量学和遥感学。

工程测量学是研究各种工程建设在勘测、设计、施工和运营管理阶段所进行的测量工作的学科。根据测量的工程对象不同,工程测量学又可分为土木工程测量、水利工程测量、矿山工程测量、线路工程测量、地下工程测量和精密工程测量等。

海洋测量学是研究测量地球表面各种水体(包括海洋、江河、湖泊等)的水下地貌的学科。

本教材主要介绍普通测量学及部分工程测量学的内容。

### 1.1.4 测量学的发展简史与趋势

测量学是伴随人类对自然的认识、利用和改造过程发展起来的。中国是一个文明古国,测量技术在中国的应用可追溯到四千年以前。《史记·夏本纪》记载了大禹治水“左准绳,右规矩,载四时,以开九州,通九道,陂九泽,度九山”的情况,这说明公元前 21 世纪中国已经开始使用测量工具。《周髀算经》、《九章算术》、《管子·地图篇》、《孙子兵法》等历史文献均记载有测量技术、计算方法和军事地形图应用的内容。

长沙马王堆汉墓出土的公元前 2 世纪的地形图、驻军图和城邑图,是迄今发现的世界上最古老、翔实的地图。魏晋的刘徽在《海岛算经》中阐述了测算海岛之间距离和高度的方法,西晋的裴秀编制的《禹贡地域图》十八篇反映了当时十六州郡国县邑、山川原泽及境界,提出了分率、准望、道里、高下、方斜、迁直的“制图六体”,归纳出地图制图的标准和原则。

公元 724 年,唐代高僧一行主持了世界上最早的子午线测量,在河南平原地区沿南北方向约 200 km 长的同一子午线上选择四个测点,分别测量了春分、夏至、秋分、冬至四个时段正午的日影长度和北极星的高度角,且用步弓丈量了四个测点间的实地距离,从而推算出北极星每差一度相应的地面距离。

北宋沈括发展了裴秀的制图理论,编绘了“一寸折一百里”(相当于比例尺 1:90 万)的《天下州县图》,发明了用分级筑堰静水水位法测量汴渠高差,用平望尺、干尺和罗盘测量地形的测量技术,并最早发现了磁偏角。

元代郭守敬在全国进行了天文测量,还通过多年的修渠治水,总结了水准测量的经验,且创造性地提出了海拔高程的概念。明代郑和七次下西洋,首次绘制了航海图。清朝康熙年间,开展了大规模的经纬度测量和地形测量,编制了著名的《皇舆全览图》。

测量学成为一门真正意义上的科学始于 17 世纪工业革命。17 世纪初发明了望远镜,人类借助于望远镜能够精确地观测到远处的目标,时至今日望远镜仍是各种常规测量仪器必不可少的部件。随后,又出现了三角测量方法、最小二乘法、高斯横圆柱投影等许多测量学理论。

20 世纪初,随着飞机和照相机的出现,发展了航空摄影测量。通过航空摄影测量可以快速完成大范围的地形测量,改变了测量手段,减轻了劳动强度,提高了工作效率,使测量学发生了一次革命。

20 世纪 50 年代起,得益于微电子学、激光、计算机、摄影等技术的迅猛发展,电磁波测距仪、电子经纬仪、全站仪、数字摄影测量系统等问世使测量学又实现了一次重大革命,地形测量从白纸测图变革为数字测图,测量工作实现了内外业一体化、数字化和自动化。

1957 年人造卫星的发射成功,使航天技术有了新的发展,1966 年出现了卫星大地测量,1972 年开始利用卫星对地球进行遥感。始建于 1973 年并于 1993 年全部建成的美国全球定位系统(GPS)可使测量用户在全球任何地点、任何时刻(不分白天和黑夜,无需测点之间的通视)实时地获取静态或动态测点的三维坐标。目前,遥感的分辨率能达到亚米级,GPS 的相对测量精度能达到毫米级,这些现代测量技术从根本上彻底改变了三维空间数据的获取方法。

当今,全球定位系统(Global Positioning System,简称 GPS)、地理信息系统(Geographical Information System,简称 GIS)、遥感(Remote Sensing,简称 RS)代表着测量学的最新发展方向,上述三者(简称“3S”技术)的集成将更新测量学的原有含义,使测量学以全新的面貌向更加广阔的应用领域发展。

## 1.2 测量的基准面与坐标系统

通过测量确定地面点的位置,实际上是要确定地面点与一个已知的基准面或坐标系统之间的相对位置关系,因此,测量之前必须建立基准面或坐标系统。

### 1.2.1 基准面

#### 1. 大地水准面

地球的自然表面是极不规则的,高差起伏很大,其中最高的为喜马拉雅山的珠穆朗玛峰,高出海平面 8 844 m(此值由中国国家测绘局于 2005 年测量后公布);最深的为马里亚纳海沟,其深度为 11 022 m,二者的相对高差接近 20 km。然而,与地球半径 6 371 km 相比,上述二者的相对高差可以忽略不计,而且整个地球表面约有 71% 的面积由海水面包裹,因此,我们寻求海水面作为测量的基准面。在测量学中,自由静止的水面称为水准面。由于潮汐风浪,海水面的位置总是变化的,因此水准面有无穷个,所以把通过平均静止的海水面并向大陆、岛屿延伸而

形成的闭合曲面称为大地水准面,而大地水准面包裹的地球形体称为大地体,大地体与地球的总形体最拟合,因此我们把大地水准面作为测量工作的基准面。另外,在地球重力场中,大地水准面处处与重力方向正交,重力的方向线又称为铅垂线,因此我们把铅垂线作为测量工作的基准线。

## 2. 地球椭球面

尽管大地水准面的形状和大小与地球总形体最相似,但是由于地球内部质量分布的不均匀性,使得重力方向产生不规则变化,因此处处与重力方向正交的大地水准面也不规则,其表面也有微小的高低起伏,使得在其上无法进行测量数据的精确计算处理。为此,还必须另选一个与大地水准面非常接近且能用数学模型表达的规则曲面作为计算工作的基准面,这个面是用一个椭圆绕其短轴旋转而成的,称为旋转椭球面。

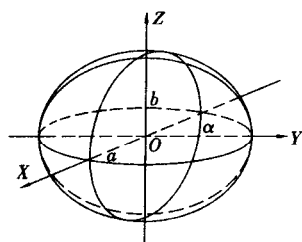


图 1-1

测量学中把拟合地球总形体的旋转椭球面称为地球椭球面,把拟合某一个区域的旋转椭球面称为参考椭球面。椭球的形状与大小用其长半轴  $a$  和扁率  $\alpha$  描述(如图 1-1 所示)。目前我国采用的参考椭球参数:  $a = 6\,378.140\text{ km}$ ,  $\alpha = (a - b)/a = 1:298.257$ (式中  $b$  为其短半轴),并对此椭球进行了实地定位,选择陕西省泾阳县永乐镇某点作为大地原点,由此建立的全国统一坐标系称为“1980 年国家大地坐标系”。

由于地球椭球的扁率很小,因此当测区范围不大时,可以近似地把椭球视为圆球,其半径为  $6\,371\text{ km}$ 。

### 1.2.2 坐标系统

除了当今最先进的 GPS 测量所用的 WGS—84 世界大地测量坐标系(以地球质心为原点的三维直角坐标系)以外,为了便于测量和计算,传统的常规测量通常将三维坐标系统又分成为高程系统和平面(或球面)坐标系统两种。

#### 1. 高程系统

地面点沿铅垂方向到高程基准面的距离称为高程。最常用的高程系统是以大地水准面为高程基准面起算的。地面点到大地水准面的铅垂距离,称为该点的绝对高程或海拔,用  $H$  表示(如图 1-2 所示)。在小范围的局部地区,如果引测绝对高程有困难时,也可以选定一个任意的水准面作为高程基准面,这时地面点至此水准面的铅垂距离,称为该点的相对高程或假定高程,用  $H'$  表示。两点的高程之差称为这两点之间的高差,用  $h_{ab}$  表示,即

$$h_{ab} = H_b - H_a = H'_b - H'_a \quad (1-1)$$

显然,  $A$ 、 $B$  两点之间的高差与高程基准面无关,另外,只要  $A$ 、 $B$  两点的高差已知,则可由  $A$  点的高程推求得  $B$  点的高程。

目前,我国采用“1985 年国家高程基准”,它是根据设在青岛海边的验潮站 1952 年至 1979 年水位的观测资料确定的黄海平均海水面(其高程为零)作起算面的高程系统,并在青岛观象山建立了水准原点,用来标示此高程系统,水准原点的高程为  $72.260\text{ m}$ ,全国各地的高程都以它为基准进行联测推算。

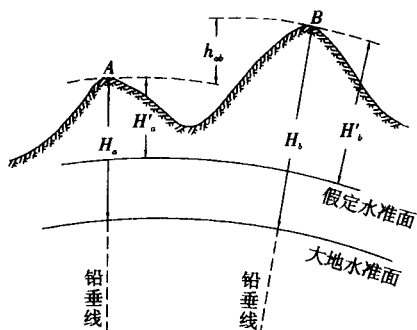


图 1-2

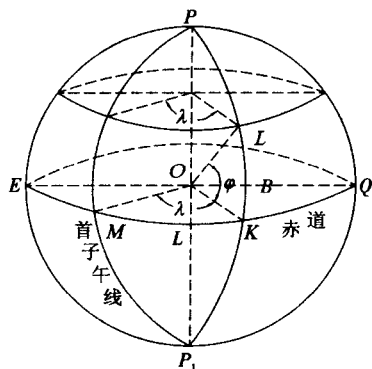


图 1-3

## 2. 平面(或球面)坐标系

### 1) 地理坐标

地理坐标是地面点在球面坐标系中的坐标值,通常用经度和纬度表示,如图 1-3 所示。

过地面点和地球南北极的平面称为过该点的子午面,子午面与地球表面的交线称为子午线,或称真子午线;过地心  $O$  且垂直于地球自转轴的平面称为赤道面,赤道面与地球表面的交线称为赤道。过地球表面某点  $L$  的子午面  $PLKP_1$  与过伦敦格林尼治天文台的首子午面  $PMP_1$  组成的二面角,称为该点的经度。从首子午面起算,分别向东西两个方向度量,向东称为东经,向西称为西经,各度量  $0^\circ \sim 180^\circ$ 。过地球表面某点  $L$  的法线或铅垂线  $OL$  与赤道面  $EMKQ$  的夹角,称为该点的纬度。从赤道起算,分别向南北两个方向度量,向北称为北纬,向南称为南纬,各度量  $0^\circ \sim 90^\circ$ 。

按坐标系依据的基准线和基准面的不同以及解算方法的不同,地理坐标又可进一步分为大地地理坐标(简称大地坐标)和天文地理坐标(简称天文坐标)。以参考椭球面为基准面,且以椭球面的法线为基准线而得的地理坐标称为大地坐标,分别用  $L$ 、 $B$  表示;以大地水准面为基准面,以铅垂线为基准线而得的地理坐标称为天文坐标,分别用  $\lambda$ 、 $\varphi$  表示。天文坐标是用天文测量方法直接测定的,而大地坐标是通过大地测量推算出来的。

### 2) 高斯平面直角坐标

地理坐标是一种球面坐标,只能确定点位在球面上的位置,不便直接用于测图,因此必须将球面坐标转换成平面直角坐标。在我国是采用高斯投影的方法进行转换。下面介绍高斯平面直角坐标系的建立方法。

(1)分带 为了控制从球面投影到平面引起较大的长度变形,高斯投影采取分带投影的方法,使每带内最大变形能够控制在测量精度允许的范围内。它采取  $6^\circ$  分带,即从格林尼治首子午线起每隔经差  $6^\circ$  划分为一个投影带,由西向东将椭球面等分为 60 个带,并依次编号  $N$ ,显然,  $6^\circ$  带中央子午线的经度  $L_0$  与其带号  $N$  的关系为

$$L_0 = 6N - 3 \quad (1-2)$$

(2)投影 设想将一个平面卷成一个空心圆柱,把它横套在地球椭球面上,使圆柱的中心轴线位于椭球赤道面内且通过球心,将椭球面上需投影的那个  $6^\circ$  带的中央子午线与圆柱面重合,采用等角投影的方式将这个  $6^\circ$  带投影到圆柱柱面上,然后沿着圆柱柱面过南北极的

两条母线将圆柱面切开并展成平面,便得到此 6°带在平面上的影像(如图 1-4 所示)。显然,距离中央子午线越远,投影变形越大。为了控制变形,满足精密测量和大比例尺测图的需要,有时还可采取 3°分带法或 1.5°分带法进行投影。3°分带从东经 1.5°开始,自西向东每隔 3°划分为 1 个投影带,带号  $N'$  依次编为 1~120。因此 3°带中央子午线的经度  $L'_0$  与其带号  $N'$  的关系为

$$L'_0 = 3N' \quad (1-3)$$

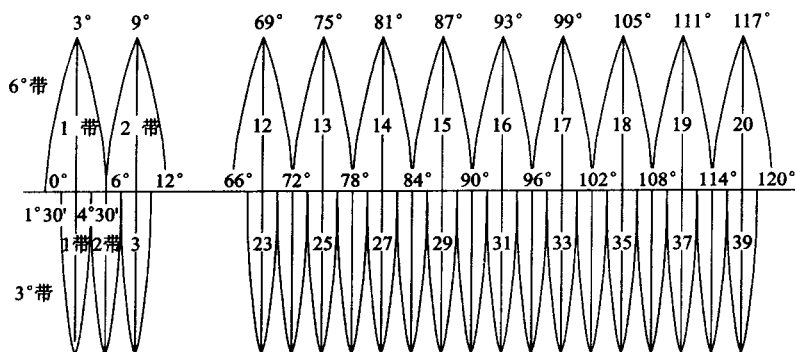


图 1-4

(3)建立坐标系 经投影所得的影像平面中,中央子午线和赤道的投影是直线,且相互垂直,因此以中央子午线投影为  $X$  轴,赤道投影为  $Y$  轴,两轴交点为坐标原点,即得高斯平面直角坐标系。考虑到我国领土全部位于赤道以北,各地面点的纵坐标均为正,为避免横坐标出现负值,将每带的坐标原点向西平移 500 km,这样无论横坐标的自然值原本是正还是负,加 500 km 后,则都能保证为正(如图 1-5 所示)。此外,为了判明点位所在的是哪一个投影带,规定横坐标值之前加上投影带号,因此我国高斯直角坐标系的横坐标是由带号、500 km 以及自然坐标值三部分组成,这样的横坐标值称为国家统一坐标系的横坐标通用值。在我国的领土范围内,经过分带,6°带号在 13~23 之间,而 3°带号在 25~45 之间,没有重叠带号,因此根据横坐标通用值就可判定投影带是 6°带还是 3°带。例如,某点位于第 20 带,其横坐标自然值为 -269 583.10 m,加上 500 km 应为 230 416.90 m,再加带号,则该点的横坐标通用值  $Y = 20\ 230\ 416.90$  m,该投影带为 6°带。

### 3)独立平面直角坐标

当测区范围较小时,可直接把测区的球面视为平面,将地面点沿铅垂线投影到水平面上,在水平面上建立独立的平面直角坐标系。

测量所用的独立平面直角坐标系与数学上的基本相似,但纵坐标轴为  $X$  轴,正向朝北,横坐标轴为  $Y$  轴,正向朝东,象限编号按顺时针方向,这些与数学上的顺序恰好相反(如图 1-6 所示)。测量上对直线方向的表示,是以纵轴( $X$  轴)的北端起始,顺时针方向度量至此直线。这又恰好与数学上以  $X$  轴为准,逆时针方向度量直线角度的方法相反。上述这样做的目的都是为了可以直接采用数学上已有的三角公式进行坐标计算。

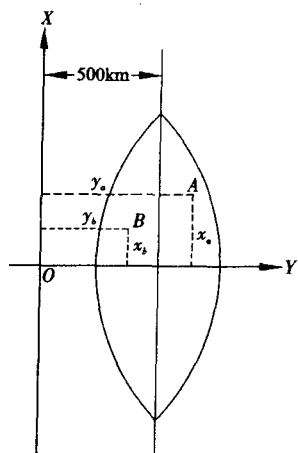


图 1-5

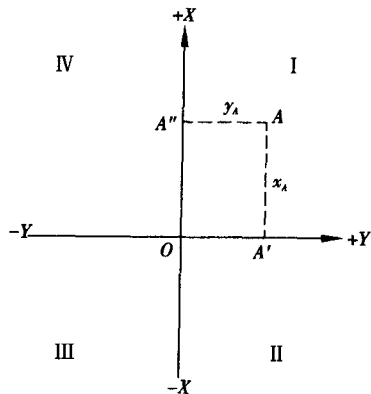


图 1-6

## 1.3 测量的基本要素与工作原则

### 1.3.1 测量的基本要素

测量地面点的三维空间位置,采用的方法有极坐标法和直角坐标法。对于极坐标法,如图 1-7 所示,已知 A 点的平面位置和高程及 AB 的水平方向,只要测出水平角  $\beta$ ,水平距离 AP 以及 A、P 两点间的高差,就确定了点 P 的空间位置,传统常规的测量均采用极坐标法;而对于直角坐标法,指的是使用全站仪或全球定位系统(GPS)等新一代的测量仪器或测量系统,直接测出地面点位的三维直角坐标的方法。由此可见,角度(即水平角)、距离(即水平距离)、高差(或高程)和坐标(即三维直角坐标)是测量的基本要素,角度测量、距离测量、高程测量和坐标测量是测量的基本工作。

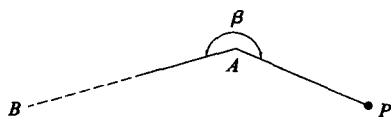


图 1-7

### 1.3.2 地球曲率对测量基本要素的影响

测量的基准面是大地水准面,而大地水准面是一个曲面,为了计算方便,当测区很小时,是否能用水平面代替大地水准面呢?下面探讨一下用水平面代替水准面时,地球曲率对上述测量基本要素中的水平距离测量和高程测量的影响。

#### 1. 对距离的影响

如图 1-8 所示,将大地水准面近似为球面,设在 A 点球面 P 与水平面 P' 相切, A、B 两点在球面上的弧长为 D,在水平面上的直线长度为 D',则

$$D = R \cdot \beta, D' = R \cdot \tan \beta$$

用水平长度 D' 代替弧长 D 所产生的距离误差为

$$\Delta D = D' - D = R \cdot \tan \beta - R \cdot \beta = R(\tan \beta - \beta)$$

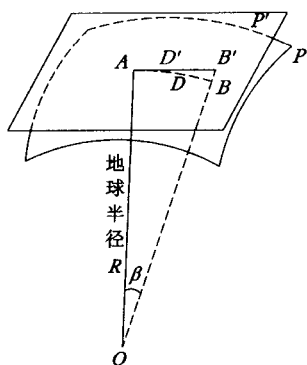


图 1-8

将  $\tan \beta$  按无穷级数展开,并略去高次项,得

$$\Delta D = R \left[ \left( \beta + \frac{1}{3} \beta^3 + \cdots \right) - \beta \right] = \frac{1}{3} R \cdot \beta^3$$

将  $\beta = \frac{D}{R}$  代入上式,得

$$\Delta D = \frac{D^3}{3R^2} \quad (1-4)$$

其相对误差为

$$\frac{\Delta D}{D} = \frac{D^2}{3R^2} \quad (1-5)$$

已知地球半径  $R = 6\,371\text{ km}$ , 当距离  $D$  等于不同值时代入上式, 则可得出表 1-1 的结果。从表 1-1 中可见, 当距离等于 10 km 时, 地球曲率影响距离测量而产生的相对误差为 1:1 220 000, 而目前最精密的距离测量容许误差为其长度的 1:1 000 000, 因此在半径为 10 km 的范围内用水平面代替大地水准面, 可以不考虑地球曲率对水平距离测量的影响。

表 1-1

| 距离 $D(\text{km})$ | 距离误差 $\Delta D(\text{cm})$ | 相对误差 $\frac{\Delta D}{D}$ |
|-------------------|----------------------------|---------------------------|
| 10                | 0.8                        | 1:1 220 000               |
| 25                | 12.8                       | 1:195 000                 |
| 50                | 102.6                      | 1:48 700                  |
| 100               | 821.2                      | 1:12 000                  |

## 2. 对高程的影响

如图 1-8 所示,  $A$ 、 $B$  两点在同一水准面  $P$  上, 其高差应为零, 即  $\Delta h = 0$ 。但是, 当  $B$  点投影到过  $A$  点的水平面上得到投影点  $B'$  时, 则  $BB' = \Delta h$  就是用水平面代替水准面所产生的高程测量误差。由图可知

$$\Delta h = OB' - OB = R \cdot \sec \beta - R = R(\sec \beta - 1)$$

将  $\sec \beta$  展开成无穷级数, 得

$$\sec \beta = 1 + \frac{1}{2} \beta^2 + \frac{5}{24} \beta^4 + \cdots$$

略去高次项, 并以  $\beta = \frac{D}{R}$  代入, 得

$$\Delta h = R \left( 1 + \frac{1}{2} \beta^2 - 1 \right) = \frac{D^2}{2R} \quad (1-6)$$

同样用不同的距离  $D$  值代入上式, 得到表 1-2 列出的相应高程误差值。

表 1-2

| $D(\text{km})$        | 0.1  | 0.5 | 1 | 2  | 3  | 4   | 5   | 10  |
|-----------------------|------|-----|---|----|----|-----|-----|-----|
| $\Delta h(\text{cm})$ | 0.08 | 2   | 8 | 31 | 71 | 125 | 196 | 785 |

由式(1-6)可见, 高程误差与距离的平方成正比, 当距离  $D = 1\text{ km}$  时, 表 1-2 中所列高程误

差达到 8 cm,这是高程测量所不允许的。因此,进行高程测量时,即使距离很短也不能用水平面代替大地水准面。

### 1.3.3 测量的工作原则

在实际测量工作中,为了避免测量错误,防止测量误差的积累,要遵循的基本原则是:布局要“从整体到局部”,程序是“先控制后碎部”,精度按“由高级到低级”,工作做到“步步有检核”,这样才能确保测量成果精确可靠。

例如测绘地形图,首先不能直接测地形,应在测区内先均匀选取少量测点,用精密仪器较精确地测定它们的位置,作为测区的骨架,这些骨架点称为控制点,测定控制点位置的工作称为控制测量。控制测量是带全局性的精度较高的测量工作,在范围较大的测区,控制测量要由高级到低级,按不同精度的等级逐步进行,而且每步都有严格的检核措施。其次,以控制点为依据,对各控制点周围的地形进行详细测量。被测区域的地形可分为地物和地貌两大类:地面上的固定性物体,如道路、河流、建筑物等称为地物;地面上的高低起伏形态,如平原、丘陵、凹地等称为地貌。地物轮廓拐角点和地貌坡度及方向变化点统称为碎部点。地形测量时,实际上是要测量这些碎部点的位置,这一步工作称为碎部测量。在控制测量和碎部测量的基础上,最后绘制出整个测区完整的地形图。这样,不仅控制点的精度高,而且所有碎部点之间不存在测量误差的相互传递,因此整个测区的精度均匀统一。

## 习 题

1. 名词解释:测量学、测定、测设、大地水准面、地球椭球面、绝对高程、相对高程、6°带、高斯平面直角坐标。
2. 测量学主要包括哪两部分内容? 二者的区别是什么?
3. 简述 Geomatics 的来历及其含义。
4. 测量学的平面直角坐标系与数学上的平面直角坐标系有何不同?
5. 简述我国采用的高斯平面直角坐标系的建立方法。
6. 设我国某处  $P$  点的横坐标  $Y = 19\,729\,513.12\text{ m}$ ,问该坐标值是按几度带投影计算而得?  $P$  点位于第几带?  $P$  点位于中央子午线东侧还是西侧,距中央子午线有多远? 该点在投影带中真实的自然横坐标值是多少?
7. 目前我国统一采用的高程系统和大地坐标系统各叫什么? 我国的高程原点和大地原点各在哪里?
8. 地面点的三维空间位置通常是怎样测得的? 测量的基本要素有哪些?
9. 测量的工作原则是什么? 为什么要遵循这些原则?
10. 测量工作中,地球曲率对距离测量和高程测量的影响如何?