

444

P28-43  
G24

面向 21 世纪高等学校规划教材

# 数字测图原理与方法

高井祥 肖本林 付培义 编著  
梁 明 杨世清 梁洪有

中国矿业大学出版社

## 内 容 提 要

本书共分十章,第一至第六章为传统的大比例尺测图部分,内容包括测量基本知识、基本测量原理和仪器、测量误差基本知识、控制测量、地形图测绘概述、平板仪测绘大比例尺地形图;第七至第九章为数字测图部分,包括计算机地图制图的基本原理和方法、地形图的数字化、大比例尺地面数字测图;第十章为航空摄影测量及遥感成图简介。

本书主要适用于测绘工程、地理信息系统、土地资源管理等专业,也可作为其他专业测绘类课程的教学用书,亦可供相关专业技术人员参考。

责任编辑 何 戈  
责任校对 杜锦芝

### 图书在版编目(CIP)数据

数字测图原理与方法/高井祥等编著. —徐州:中国矿业大学出版社,2001. 4

ISBN 7-81070-320-X

I. 数… II. 高… III. 地图编绘-数字测量法-高等学校-教材 IV. P28

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 025872 号



中国矿业大学出版社出版发行

(江苏徐州 邮政编码 221008)

出版人 解京选

中国矿业大学印刷厂印刷 新华书店经销

开本 787×1092 1/16 印张 22.25 字数 540 千字

2001年4月第1版 2001年4月第1次印刷

印数 1~3000册 定价 28.00元

# 前 言

《测量学》是测绘工程专业重要的技术基础课教材之一,同时又是学习后续各种测绘类课程的入门课程。根据 21 世纪高等学校的教学要求和测绘科学的发展状况,以及全国测绘教学指导委员会对本课程教学大纲提出的指导性意见,在广泛调研和征求兄弟院校意见的基础上,决定对本门课程的内容及体系作出较大调整,教材名称也更名为《数字测图原理与方法》。

本教材的编写,本着有利于加强基础理论教学,有利于提高能力培养,有利于知识面的拓展和少而精的原则,努力做到先进性、实用性、通用性和高质量四者的统一,力争编写出一本内容先进、能反映当代测绘科学技术进展、符合新世纪高等教育改革潮流的新一轮测量学基础教材。

本书由中国矿业大学高井祥、湖北工学院肖本林、太原理工大学付培义、西安科技学院梁明、淮南工业学院杨世清、焦作工学院梁洪有共同编写。其中第一、第八章(第二节)由高井祥编写;第二、第七、第八章(第一、三节)由付培义编写;第三、第四章(第三节)、第十章由梁洪有编写;第四章(第一、二、四、五、六、七节)、第五章由肖本林编写;第六章由梁明编写;第九章由杨世清编写。本书由高井祥任主编,肖本林、付培义任副主编,高井祥对书稿做了统校工作。

在本书编写过程中,中国矿业大学空间信息系的朱鸿禧、盛业华、齐淑娟等老师提出了许多宝贵的意见;作者在编写过程中,参阅了大量文献,引用了同类书刊中的一些资料,在此,谨向有关作者表示衷心的感谢!中国矿业大学出版社为本书的编辑出版做了大量工作,在此也深表谢意!

本书在编写及出版过程中,编著者虽做了很大努力,但书中仍会有错漏及不妥之处,恳请广大读者批评指正。

作 者

2001 年 2 月

# 目 录

<b>第一章 测量基本知识</b> .....	1
第一节 测绘工作的任务及其在国民经济建设中的作用.....	1
第二节 地球的形状和大小.....	5
第三节 测量常用坐标系统.....	7
第四节 用水平面代替水准面的限度 .....	12
第五节 地形图的基本知识 .....	14
第六节 测量工作的内容与原则 .....	19
<b>第二章 基本测量原理和仪器</b> .....	22
第一节 角度测量与光学经纬仪 .....	22
第二节 电子经纬仪的原理及使用 .....	36
第三节 经纬仪的检验、校正及角度观测误差.....	43
第四节 水准测量与水准仪 .....	51
第五节 距离测量与测距仪 .....	64
第六节 全站仪测量系统 .....	78
<b>第三章 测量误差基本知识</b> .....	87
第一节 测量误差概述 .....	87
第二节 偶然误差的特性 .....	89
第三节 衡量精度的指标 .....	91
第四节 误差传播定律及其应用 .....	94
第五节 观测值的算术平均值及其中误差.....	101
第六节 由真误差计算中误差.....	104
<b>第四章 控制测量</b> .....	107
第一节 控制测量的基本概念.....	107
第二节 导线测量.....	112
第三节 小三角测量.....	126
第四节 交会定点.....	144
第五节 四等及等外水准测量.....	151
第六节 三角高程测量.....	159
第七节 GPS 卫星定位基本原理简介 .....	167
<b>第五章 地形图测绘技术基础</b> .....	171
第一节 地形测图概述.....	171
第二节 地形图的分幅与编号.....	174
第三节 测图技术规范.....	180
第四节 测图控制技术方案.....	183

第五节	测图技术设计·····	188
<b>第六章</b>	<b>平板仪测绘大比例尺地形图·····</b>	<b>197</b>
第一节	测图前的准备工作·····	197
第二节	平板仪的主要部件及使用·····	203
第三节	地形图的测绘方法·····	208
第四节	地物的测绘方法·····	215
第五节	地貌的测绘方法·····	218
第六节	地形图的拼接、整饰、检查、清绘和验收·····	225
第七节	地形图的应用·····	228
<b>第七章</b>	<b>计算机地图制图的基本原理和方法·····</b>	<b>241</b>
第一节	坐标变换·····	241
第二节	图形的裁剪·····	244
第三节	地图符号的自动绘制·····	249
第四节	规则图形的几何纠正·····	256
第五节	曲线的光滑·····	257
第六节	等高线的自动生成·····	259
第七节	图形数据结构·····	262
<b>第八章</b>	<b>地形图的数字化·····</b>	<b>269</b>
第一节	地形图数字化的原理与方法·····	269
第二节	手扶跟踪地形图数字化·····	270
第三节	扫描屏幕数字化·····	281
<b>第九章</b>	<b>大比例尺地面数字测图·····</b>	<b>288</b>
第一节	数字测图概述·····	288
第二节	大比例尺数字地面测图的技术设计·····	295
第三节	数字测图的数据采集·····	297
第四节	地形图的计算机编辑·····	311
第五节	成果的检查与验收·····	315
第六节	数字地面模型的建立与应用·····	320
第七节	地图数据库与地理信息系统简介·····	331
<b>第十章</b>	<b>航空摄影测量及遥感成图简介·····</b>	<b>339</b>
第一节	航空摄影测量及遥感概述·····	339
第二节	航空摄影测量成图简介·····	340
第三节	遥感成图·····	345
<b>参考文献</b> ·····		<b>349</b>

# 第一章 测量基本知识

## 第一节 测绘工作的任务及其在国民经济建设中的作用

### 一、测绘学的研究内容

测绘科学是一门研究如何确定地球的形状和大小及地面、地下和空间各种物体的几何形态及其空间位置的科学,为人类了解自然、认识自然和能动地改造自然服务。其任务概括起来主要有三个方面:一是精确地测定地面点的位置及地球的形状和大小;二是将地球表面的形态及其他相关信息测绘成图;三是进行经济建设和国防建设所需要的测绘工作。

测绘学的研究内容相当广泛,它和其他科学一样都是随着人们生产实践的需要而产生并随着社会生产和科学技术的发展而发展。测绘学是测绘科学技术的总称。随着测绘学研究的深入和各学科研究的相互渗透,测绘学在发展中产生了许多分支,并形成了相对独立的学科。下面简述测绘学各个分支研究的内容。

#### (一) 大地测量学

它是以地球表面大区域为研究对象,研究和测定地球形状、大小和地球重力场,以及测定地面点几何位置的学科。大地测量学中测定地球的大小,是指测定地球椭球的大小;研究地球形状,是指研究大地水准面的形状;测定地面点的几何位置,是指测定以地球椭球面为参考的地面点的位置。将地面点沿法线方向投影于地球椭球面上,用投影点在椭球面上的大地纬度和大地经度表示该点的水平位置,用地面点至投影点的法线距离表示该点的大地高程。地面点的几何位置也可以用一个以地球质心为原点的空间直角坐标系中的三维坐标来表示。这时必须考虑地球的曲率,因而在理论和方法上严密复杂。它为地球科学、空间科学、地震预报、陆地变迁、地形图测绘及工程施工提供控制依据。若只以国家三、四等控制为研究内容并为地形图测绘和施工测量提供控制基础,这种大地测量学特称为控制测量学。现代大地测量学包括几何大地测量学、物理大地测量学和卫星大地测量学三个主要部分。

#### (二) 地形测量学(又称普通测量学)

地形测量学是测绘科学的一个基础部分,是研究测绘地形图的基本理论、技术和方法的学科。由于地表形态的测绘工作是在面积不大的测区内进行的,又因地球曲率半径很大(平均为 6371 km),可视小区域球面为平面而不必顾及地球曲率及地球重力场的微小影响,从而使理论和方法都得到简化。把地球表面的各种自然形态,如水系、地貌、土壤和植被的分布,以及人类社会活动所产生的各种人工形态,如境界线、居民地、交通干线和各种建筑物的位置采用正射投影的理论,使用一定符号,按一定比例,相似地缩绘到平面图上,这种图叫做地形图。地形图的测绘和应用是地形测量学的核心内容,地形图在国民经济和国防建设中有着广泛的用途。

#### (三) 摄影测量学

摄影测量学是利用摄影或遥感的手段获取被测物体的信息(影像的或数字式的),经过

对图像的处理、量测、判释和研究,以确定被测物体的形状、大小和位置,并判断其性质的一门学科。按获取像片的方法不同,分为地面立体摄影测量学和航空摄影测量学。摄影测量主要用于测制地形图,它的原理和基本技术也适用于非地形测量。自从出现了影像的数字化技术以后,被测对象既可以是固体、液体,也可以是气体;可以是微小的,也可以是巨大的;可以是瞬时的,也可以是变化缓慢的。只要能够被摄得影像,就可以使用摄影测量的方法进行量测。这些特性使摄影测量方法得到广泛的应用。用摄影测量的手段成图是当今大面积地形图测绘的主要方法。摄影测量发展很快,特别是与现代遥感技术相配合使用的光源可以是可见光或近红外光,现在已发展为在电磁波其他范围内得到构像。其运载工具可以是飞机、卫星、宇宙飞船及其他飞行器。因此,摄影测量与遥感已成为非常活跃和富有生命力的一个独立学科。

#### (四) 工程测量学

工程测量学是研究工程建设在规划设计、施工放样和运营管理各阶段中进行测量工作的理论、技术和方法的科学,所以又称为实用测量学或应用测量学。它是测绘学在国民经济和国防建设中的直接应用。按工程建设进行的程序,工程测量在各阶段的主要任务有:在规划设计阶段所进行的测量工作,是将图上设计好的建筑物标定到实地,确保其形状、大小、位置和相互关系正确,称为放样;在施工阶段进行的各种施工测量,是在实地准确地标定出建筑物各部分的平面和高程位置,作为施工和安装的依据,以确保工程质量和安全生产;工程竣工后,要将建筑物群体测绘成竣工平面图,作为质量验收和日后维修的依据,称为竣工测量;对于大型工程,如高层建筑物、水坝等,工程竣工后,为监视工程的状况,保证安全,需进行周期性的重复观测,即变形监测。工程测量服务的领域非常广阔,有军事建筑、工业与民用建筑、道路修筑、水利枢纽建造等。

#### (五) 矿山测量学

它是综合运用测量、地质及采矿等多种学科的知识,来研究和处理矿山地质勘探、建设和采矿过程中由矿体到围岩、从井下到地面在静态和动态条件下的工作空间几何问题,以确保矿产资源合理开发、安全生产和矿区生态环境整治的一门学科。矿山测量学包括三项内容:一是矿山测量工程,研究矿区控制测量、地形测量、建井和开拓时期的施工和设备安装测量;矿山生产时期的井下控制测量、采区生产测量及各种生产设施的运行状况监测等,其作用被誉为“矿山的眼睛”;二是研究矿体几何和储量管理,确保矿产资源的合理开发和生产中准备煤量与开采煤量的合理接续;三是研究资源开采后所引起的岩层移动、地表沉陷规律以及露天矿边坡的稳定性和保护地面建筑物、造地复田和环境治理的理论和方法。

#### (六) 地图制图学

地图制图学是以地图信息传输为中心,探讨地图及其制作的理论、工艺技术和使用方法的一门综合性学科,它主要研究用地图图形反映自然界和人类社会各种现象的空间分布、相互联系及其动态变化,具有区域性学科和技术性学科的两重性,所以亦称地图学。主要内容包括地图编制学、地图投影学、地图整饰和制印技术等。现代地图制图学还包括用空间遥感技术获取地球、月球等星球的信息,编绘各种地图、天体图以及三维地图模型和制图自动化技术等。

## 二、测绘工作的作用

测绘工作是各项工程建设、资源开发、国防建设的基础性、超前性工作。测绘学的应用范

围很广。在城乡建设规划、国土资源的合理利用、农林牧渔业的发展、环境保护以及地籍管理等工作中,必须进行土地测量和测绘各种类型、各种比例尺的地形图,以供规划和管理使用。在地质勘探、矿产开发、水利、交通等国民经济建设中,则必须进行控制测量、矿山测量和线路测量,并测绘大比例尺地形图,以供地质普查和各种建筑物设计施工用。在国防建设中,除了为军事行动提供军用地图外,还要为保证火炮射击的迅速定位和导弹等武器发射的准确性,提供精确的地心坐标和精确的地球重力场数据。在研究地球运动状态方面,测绘学提供大地构造运动和地球动力学的几何信息,结合地球物理的研究成果,解决地球内部运动机制问题。具体来说,测绘学在国民经济建设和国防建设中的主要作用可归纳成以下几方面:

(1) 提供一系列点的大地坐标、高程和重力值,为科学研究、地形图测绘和工程建设服务。

(2) 提供各种比例尺地形图和地图,作为规划设计、工程施工和编制各种专用地图的基础。

(3) 准确测绘国家陆海边界和行政区划界线,以保证国家领土完整和邻邦友好相处。

(4) 为地震预测预报、海底资源勘测、灾情监测调查、人造卫星发射、宇宙航行技术等提供测量保障。

(5) 为现代国防建设和确保现代化战争的胜利提供测绘保障。

由此可见,在国民经济和国防建设中,测绘工作既是一项基础技术工作,又要为各项基本建设提供“先行”,所以测绘工作者又被誉为“建设尖兵”;在矿产资源开发中,由于测量工作在保证均衡生产、质量监督、安全导引等方面起着重要作用,所以矿山测量又被称为“矿山的眼睛”,这是测绘工作者的光荣。我国幅员辽阔,资源丰富,测绘任务十分繁重,所以在我国的现代化建设中,每一位测绘工作者都应兢兢业业,不避艰辛,努力当好国民经济建设的尖兵,为祖国的富强多做贡献。

### 三、测绘科学的发展

测绘科学是一门既古老又年轻的科学,测绘科学的发展与人类历史发展进程中的政治、经济、军事和科学文化的发展有着密切的联系。人类在同大自然的斗争中,积累和总结了许多经验,发现了许多自然规律,为人类的生存和文明提供了物质基础,同时也促进了测绘科学技术的发展。

我国是世界上的文明古国之一,对测绘科学的发展做出了不少卓越的贡献。早在公元前7世纪前后的春秋时期,管仲在所著兵书《管子》一书中已收集了早期的地图27幅,并谈到了地图在军事中的重要作用。公元前5世纪至公元前3世纪,我国已有最早的指南工具“司南”的记载。公元前2世纪,司马迁在《史记·夏本纪》中叙述了禹受命治理洪水的情况:“左准绳,右规矩,载四时,以开九州,通九道,陂九泽,度九山。”说明在几千年前,中国人为了治水,已经会使用简单的测量工具了。到了秦汉时代,国家得到统一,社会经济、科学技术开始发展,数学上有了分数四则运算和负数的运算,四大发明之一的造纸术问世,极大地促进了制图技术水平的提高。公元前130年西汉初期的《地形图》和《驻军图》,于1973年在长沙马王堆三号汉墓出土,这是我国迄今发现的最古老的地图实物。公元2世纪初东汉时期的张衡发明了浑天仪,为天文测量做出了贡献。西晋的裴秀(224~271年)编制了《禹贡地域图》十八篇,他创立的小比例尺地图编制理论——《制图六体》,是世界上最早的制图理论。公元3至4世纪的魏晋时期,刘徽在所著的《海岛算经》中论述了测算海岛距离和高度的方法。公元



724年,唐代僧人一行(本名张遂)主持进行了大规模的天文测量,第一次用弧度测量的方法测定了地球的形状和大小。宋代石刻《禹迹图》,采用“计里画方”制图法,开创了我国方格网制图法的先河。宋代沈括绘制《天下州县图》,他还用水平尺和罗盘测量地形,并最早发现磁偏角。在明代永乐年间,郑和七次出使大西洋,首次绘制了航海图。到公元18世纪初,我国进行了大地测量,并在此基础上开展全国测图工作,编制成《皇舆全览图》(含图41幅),包括的地域之广、精度之高和历经时间之长,在世界上也是罕见的。

世界各国测绘科学技术的发展主要始于17世纪初叶。当时世界正处在资产阶级革命时期,生产力得到解放,科学技术飞速发展。在这个时期,测绘科学在理论、技术和仪器等方面都有了长足的进步。17世纪初望远镜的发明,是测绘科学发展史上一次较大的变革,奠定了现代测绘仪器的基础。1617年,三角测量方法开始得到应用。约于1730年,英国的西森制成测角用的第一架经纬仪,大大促进了三角测量的发展,使它成为建立各种等级测量控制网的主要方法。在这一段时期里,由于欧洲又陆续出现小平板仪、大平板仪以及水准仪,地形测量和以实测资料为基础的地图制图工作也相应得到了发展。1859年,法国洛斯达首创摄影测量方法。随后,相继出现立体坐标量测仪、地面立体测图仪等。由于航空技术的发展,1915年出现了自动连续航空摄影机,因而可以将航摄像片在立体测图仪器上加工成地形图。这个时期,测绘理论有了重大突破:在地图制图方面,有德国墨托卡提出的“正形圆柱投影”、法国雅克·卡西尼提出的“横圆柱投影”和法国兰勃特提出的“正形圆锥投影”等理论,奠定了现代地图制图理论的基础;在测量计算方面,1806年和1809年法国的勒让德和德国的高斯分别发表了最小二乘准则,这为测量平差计算奠定了科学基础。

自20世纪50年代以来,不少新的科学技术如电子学、信息论、激光技术、电子计算机、空间科学技术等的飞速发展,又推动了测绘科技的发展。自1947年研究利用光波进行测距,到20世纪60年代中期,红外光、激光测距仪就相继问世了。20世纪40年代自动安平水准仪问世,1968年又生产出电子经纬仪。此后,电子速测仪、激光水准仪、数字水准仪相继问世,实现了观测记录自动化,测角、测距和计算一体化。以照片、遥感图像为处理对象的数据处理系统,已完全实现摄影遥感成图自动化。

1957年人类成功发射了第一颗人造地球卫星,开创了人类宇宙航行的新纪元。1966年开始进行人卫大地测量,随后,许多现代定位技术应运而生,其中最具代表性的是卫星全球定位系统(简称GPS定位),GPS定位具有全天候、高精度、定位速度快、布点灵活和操作方便等特点,目前,经典的平面控制测量正逐渐被GPS测量所取代。

新中国成立后,我国的测绘事业也进入了崭新的发展阶段。1950年解放军总参谋部设立测绘局,1956年国家测绘局成立,并相继创办解放军测绘学院和武汉测绘学院。科学院系统成立了测量与地球物理研究所,煤炭、冶金、地质、石油、水利、铁道、海洋等部门的大专院校相继设立测量系或测量专业。几十年来,我国测绘事业发展很快,在全国范围内建立了国家大地网、国家水准网、国家基本重力网和卫星多普勒网,并对国家大地网进行了整体平差。参加平差的点数,一、二等三角点和导线点以及部分三等三角点共约5万个,有30万个观测值,完成了大量不同比例尺的地形图,建立了我国“1980年国家大地坐标系”和“1985年国家高程基准”。在1992年,我国完成了GPS大地网的布测工作,培养了大批测绘人才。尤其在测绘仪器生产方面,从无到有,现在不仅能生产各种常规测绘仪器,而且还能生产现代化精密测绘仪器,如电磁波测距仪、自动安平水准仪、电子经纬仪、全站仪、GPS接收机等。可以

预期,在不久的将来,我国的测绘事业必能取得更多更新的成就。

## 第二节 地球的形状和大小

测量工作的主要研究对象是地球的自然表面,而地球表面又是高低起伏极不规则的,有高山、平原、丘陵、荒漠、河流、湖泊和海洋等。因此,为了合理处理测量数据和测绘地形图,正确认识地球的形状与大小是非常必要的。

地球的自然表面上有陆地和海洋。位于我国西藏与尼泊尔交界处的喜马拉雅山的主峰——珠穆朗玛峰,海拔高达 8 846.27 m(1992 年 9~10 月重新测定),而位于太平洋西部的马利亚纳海沟,则低于海平面 11 022 m,两者之间的高度差近 20 000 m。尽管有这样大的高低起伏,但从宏观上看,这些高低差异与巨大的地球半径(平均为 6 371 km)相比,仍可忽略不计。地球的表面形状十分复杂,不使用数学式来表达。通过测绘工作者的长期实践和科学调查,发现地球表面的总面积为 510 083 042 km<sup>2</sup>,其中海洋占 70.8%,而陆地仅占 29.2%。因此人们设想把地球总的形状看成是被海水面所包围的球体,即设想将静止的海水面向陆地延伸,形成一个封闭的曲面,这个曲面所包围的地球实体称为大地体,它代表了地球的自然形状和大小。

地球上的任一质点,因受地球的引力作用而不能脱离地球。同时,地球又在不停地自转,使质点受到离心力的作用,因此,一个质点  $O$  所受到的力实际上是地球引力  $F$  与离心力  $P$  的合力  $G$ ,这个合力就是大家所熟悉的重力(图 1-1)。重力的作用线  $OG$  又称铅垂线。

大地体的表面以海水为主,每个水分子都受到重力的作用。在重力位相同时这些水分子便不再流动而呈静止状态,形成一个重力位等位面,这个面称为水准面。由物理学可知,水准面处处与重力方向垂直。实际上,海水不是静止的,而是有波浪和潮汐,海水面忽高忽低,所以,水准面有无穷多个。通过平均海水面的水准面是海水静止时的水准面,称为大地水准面。所以,前面提到的大地体,实际上是指大地水准面所包围的形体。

大地水准面虽然比地球的自然表面要规则得多,但由于地球内部物质分布的不均匀性,导致地球上各点的铅垂线方向产生不规则的变化,这就使得大地水准面实际上是一个有微小起伏变化的不规则曲面。它的精确形态目前还无法用数学模型来描述。如果将地面各点投影到这样复杂的曲面上,根本无法进行测量计算工作。为了使测量计算和制图工作能够进行,可以采用一个和大地水准面非常接近而又能以数学公式表达的曲面来代替大地水准面。

通过大量的测量实践和卫星大地测量研究证实,地球实际上是一个南北两极略扁、北极稍凸、南极稍凹的类似于梨形的形体,其横切面接近一个圆,纵切面接近一个椭圆,与一个以椭圆的短轴为旋转轴的旋转椭球非常相似(图 1-2)。而旋转椭球是可以数学公式严格表示的。因此,测量上就是用这个旋转椭球体的表面来近似代替大地水准面,并以此作为测量

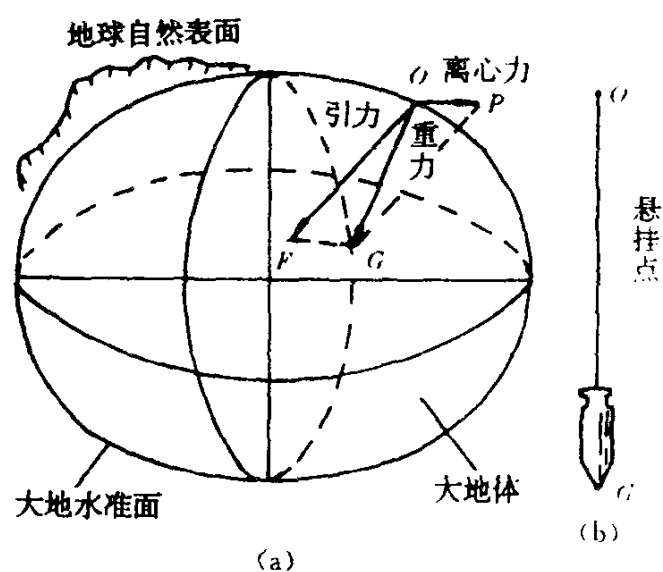


图 1-1

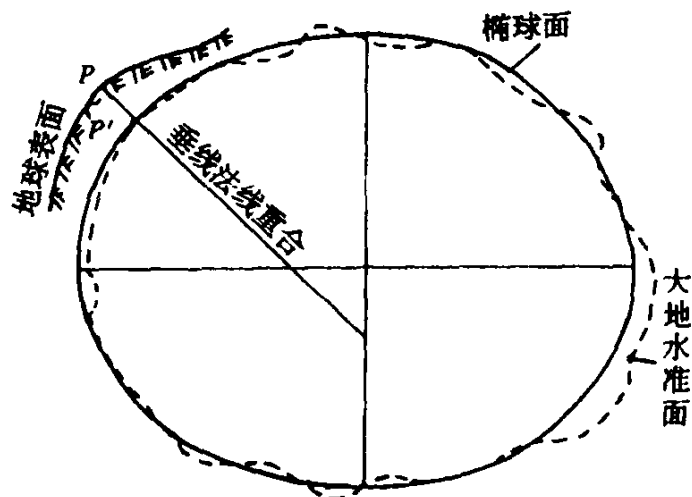


图 1-2

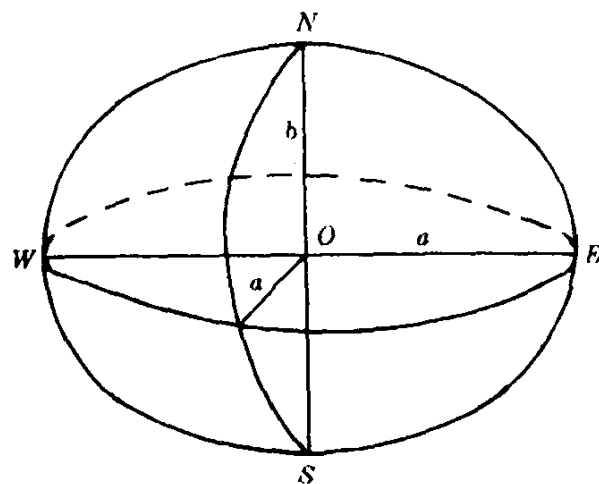


图 1-3

计算和制图的基准面(图 1-3)。椭球体的基本元素是:

长半轴  $a$

短半轴  $b$

$$\text{扁率 } \alpha = \frac{a-b}{a}$$

几个世纪以来,各国学者都在致力于研究这个椭球的元素值,使之能最接近于大地体。由于他们都利用局部资料推算出了表达椭球大小的有关参数  $a$ 、 $b$  和  $\alpha$ ,因此,这些椭球都有局限性,只能作为地球的形状和大小的参考,故称为参考椭球,其外表面称为参考椭球面。表 1-1 列出的是几次有代表性的椭球参数计算成果。

表 1-1 各国学者推算的椭球元素

椭球名称	长半轴 $a$ /m	短半轴 $b$ /m	扁率 $\alpha$ $\alpha = \frac{a-b}{a}$	推算年代和国家
德兰布尔	6 375 653	6 356 564	1 : 334	1800 年 法国
贝塞尔	6 377 397	6 356 079	1 : 299.2	1841 年 德国
克拉克	6 378 249	6 356 515	1 : 293.5	1880 年 英国
海德特	6 378 388	6 356 912	1 : 297.0	1909 年 美国
克拉索夫斯基	6 378 245	6 356 863	1 : 298.3	1940 年 前苏联
IUGG	6 378 140	6 356 755.3	1 : 298.257	1975 年国际大地测量与地球物理联合会

注: IUGG 为国际大地测量与地球物理联合会的英文缩写。

椭球的形状和大小确定之后,还应确定大地水准面与椭球面的相对关系,使椭球与大地体间达到最好的密合,这一工作称为椭球定位。当两者相对位置关系确定好之后,就可以将地面测量成果投影到椭球面上进行计算。如图 1-2 所示,椭球定位就是在本国范围内选择一个合适的地点  $P$ ,先将  $P$  点沿铅垂线投影到大地水准面上得  $P'$ ,使旋转椭球面与大地水准面在该点相切,这时椭球面上  $P'$  点的法线(过  $P'$  点与椭球面正交的直线)与过该点的大地水准面的铅垂线重合,而且使旋转椭球体的短半轴与地球的自转轴平行,这样,椭球体与大地体之间的关系就确定好了。切点  $P'$  称为大地原点,该点的大地坐标就是全国其他点球面坐

标的起算数据。

各国为处理其大地测量成果,往往根据本国及其他国家所进行的天文、大地、重力测量资料,采用适合本国领土范围的椭球参数并将其定位。我国在解放前采用海福特椭球,解放后曾一度采用克拉索夫斯基椭球。我国目前采用的是1975年“国际大地测量与地球物理联合会”推荐的椭球,称为“1980年国家大地坐标系”,其大地原点位于陕西省泾阳县永乐镇。

由于参考椭球的扁率很小,所以在地形测量的研究范围内,可以近似地将地球作为圆球看待,其半径采用椭球曲率半径的平均值,即:

$$R = \frac{1}{3}(a + a + b) = 6371 \text{ km} \quad (1-1)$$

### 第三节 测量常用坐标系

为了研究空间物体的位置,测量上常采用投影的方法加以处理。地面点的空间位置需要三个量来确定,其中两个量表示地面点沿基准线投影到基准面后,在基准面上的位置,所以又将这两个量称为坐标;第三个量表示地面点沿基准线到基准面的距离,在测量上称为高程。在这里,基准线可以是点的铅垂线,也可以是法线;基准面可以是椭球面,也可以是大地水准面或平面。实际测绘工作中,一般采用大地水准面和铅垂线作为基准面和基准线。

表示地面点位置的平面坐标和高程,都是针对某一特定坐标系和高程系而言的。测量工作中常用的球面坐标系是大地坐标系,平面坐标系是高斯—克吕格平面直角坐标系,常用的高程系是正高系,下面分别予以介绍。

#### 一、大地坐标系

如图1-4所示,NS表示椭球的旋转轴,N表示北极、S表示南极,包括椭球旋转轴NS的平面称为子午面,其中通过原格林尼治天文台的子午面称为起始子午面。子午面与椭球面的交线是一个椭圆,称为子午圈或子午线,子午圈也称经圈,它有无数个,图中NP'SN为过P'点的子午圈。垂直于旋转轴NS的平面与椭球面的交线称为平行圈,平行圈也称纬圈,平行圈也有无数个。其中通过椭球中心O且与旋转轴NS正交的平面称为赤道面,赤道面与椭球面的交线EFWE为赤道。

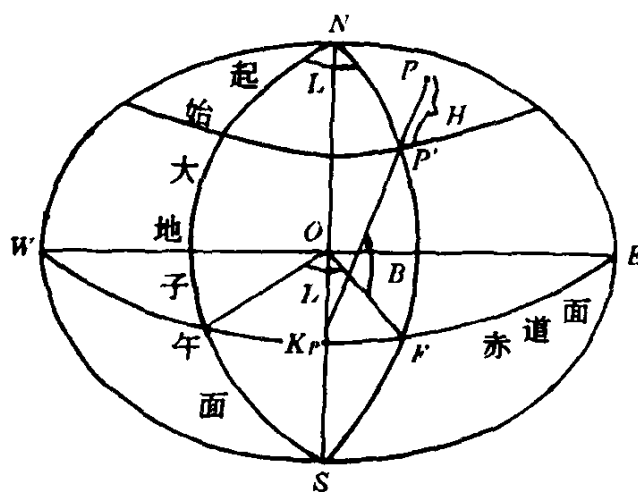


图 1-4

大地坐标系是以大地经度  $L$ 、大地纬度  $B$  和大地高  $H$  三个量来表示地面点空间位置的,称为点的大地坐标。图1-4中, $P$ 为地面上一点,将 $P$ 沿法线 $PK_P$ 方向投影到椭球面上,得 $P'$ 点, $P$ 点的大地经度 $L$ ,是指过 $P'$ 点的子午面与起始子午面间的夹角,由起始子午面起算,向东为正,称为东经,向西为负,称为西经,其值域为 $0^\circ \sim \pm 180^\circ$ ,实际上东经 $180^\circ$ 与西经 $180^\circ$ 是同一个子午面; $P$ 点的大地纬度 $B$ 是指过 $P$ 点的法线 $PK_P$ 与赤道面的夹角,由赤道面起算,向北为正,称为北纬,向南为负,称为南纬,其值域为 $0^\circ \sim \pm 90^\circ$ ; $P$ 点的大地高 $H$ 是 $P$ 点沿法线到椭球面的距离 $PP'$ ,由椭球面起算,向外大地高为正,向内为负。我国的疆域位于赤道以北的东半球,所以各地的大地经度 $L$

和大地纬度  $B$  都是正值。

大地坐标系是大地测量的基本坐标系,它对于大地测量计算、地球形状大小的研究和地图编制等都非常有用。

## 二、独立平面直角坐标系

在小区域内进行测量工作,若采用大地坐标来表示地面点的位置是不方便的,通常采用平面直角坐标。由于地球的半径很大,所以在较小区域内将椭球面看做平面而不失其应有的严密性。既然把投影面当做平面,就可以采用平面直角坐标来表示地面点在投影面上的位置(图 1-5)。测量工作中所采用的平面直角坐标系与数学中所介绍的相似,只是坐标轴互易。如图 1-5 所示,以  $x$  轴为纵轴,一般用它表示南北方向,以  $y$  轴为横轴,表示东西方向。纵横坐标轴的交点称为坐标原点。在象限的编号顺序上,测量坐标系按顺时针编号,而数学坐标系则按逆时针编号,如图

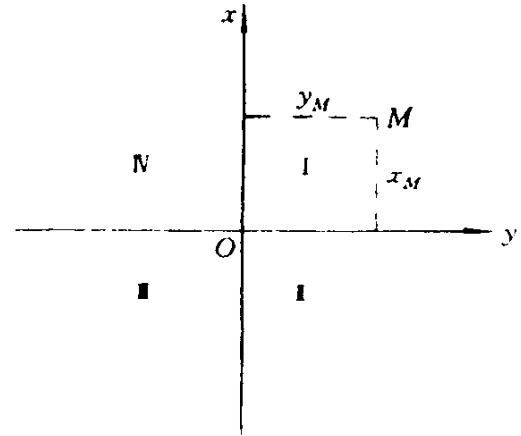


图 1-5

1-6 所示。这是因为测量上规定所有直线的方向都是从纵坐标轴北端起按顺时针方向量度的,而数学中的角度则是从横轴正方向起按逆时针方向量取的。把  $x$  轴与  $y$  轴互换后,全部三角公式都可在测量计算中直接应用。

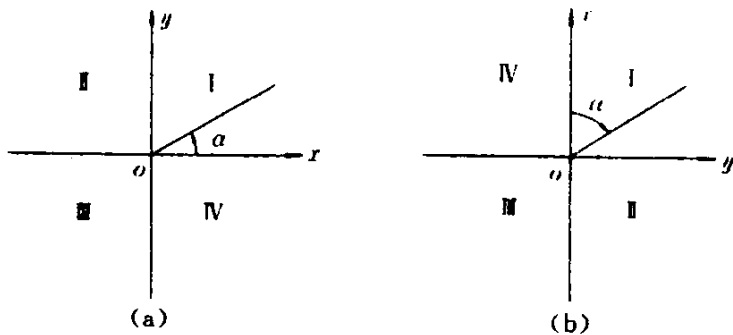


图 1-6

实际工作中,为了避免坐标出现负值,通常将平面直角坐标系的原点选在测量区域(测区)的西南角某点上,以北方向或建筑物的主轴线为纵坐标轴。由于这里介绍的平面直角坐标系未与国家统一坐标系相联系,故称为任意坐标系或独立坐标系。在没有国家控制点或不便于与国家控制点联测的小地区测量中,允许暂时建立独立坐标系以保证测绘工作的顺利开展。

## 三、高斯—克吕格平面直角坐标系

当测区范围较小时,可将地球表面看成平面,这时测得的地面数据可直接缩绘到平面图上。但是,如果测区范围较大,就不能再将地球表面当做平面看待,而应将地面点投影到参考椭球面上,按有关理论进行计算和制图。但人们在规划、设计和施工中又习惯使用平面图来反映地面形态,而且在平面上进行计算和绘图要比在球面上方便得多。这样就产生了如何将球面上的物体转换到平面上的投影变换问题。在测量工作中,是采用高斯投影的方法来解决的。

### (一) 高斯投影的概念

椭球面是一个不可展曲面,将椭球面上的图形转换到平面上,就必然要产生一定的变形。此种变形一般分为角度变形、长度变形和面积变形。尽管投影变形不可避免,但是变形的大小却是可以控制的。根据变形的性质,地图投影可以分为等角投影、等距离投影和等面积投影三种。从地形测图和用图的角度出发,最适宜的投影是等角投影。

等角投影,又叫正形投影,它能保证椭球面的微小图形与其在平面上的投影保持相似,这样测图时可以直接缩绘,用图时可以直接量取。正形投影有两个基本条件,一是保角性,即

角度投影后大小不变,这就保证了微分图形投影后的相似性;二是伸长的固定性,即长度投影后产生变形,但同一点上不同方向的微分线段,投影后长度比为一常数,如图 1-7 所示。

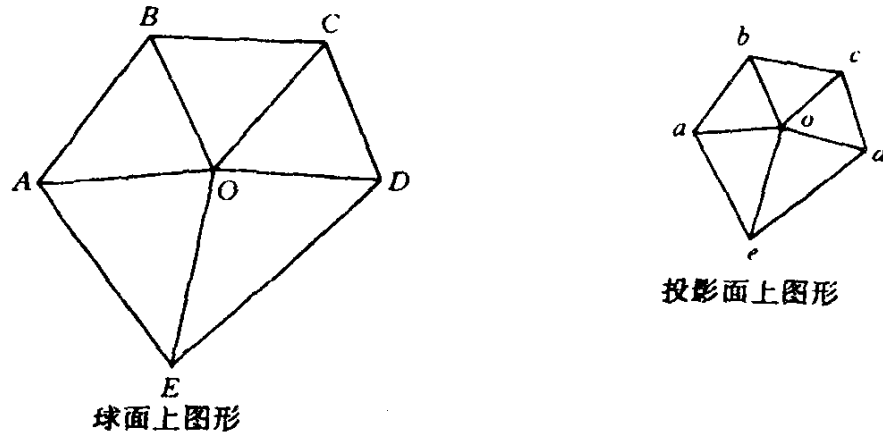


图 1-7

球面上无穷小的多边形  $ABCDE$  和它的正形投影  $abcde$ ,由于角度不变形,故其任意方向的长度比为:

$$m = \frac{bo}{BO} = \frac{do}{DO} = \frac{eo}{EO} = \frac{ao}{AO} = \text{常数}$$

即:

$$m = \frac{\text{投影面上长度}}{\text{球面上长度}} = \frac{ds}{dS} = k(\text{常数}) \quad (1-2)$$

高斯投影是正形投影的一种,最早由高斯提出,后由克吕格加以改进和完善,所以常称这种投影为“高斯—克吕格投影”,简称“高斯投影”。高斯投影是一种横椭圆柱投影。如图1-8

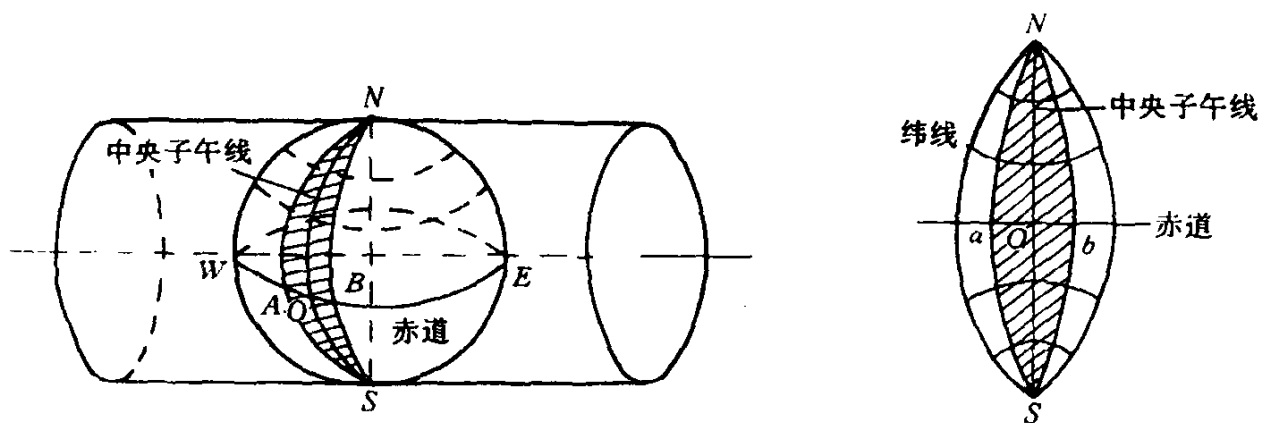


图 1-8

所示,设想将椭球装进一个椭圆柱内,使横椭圆柱内面恰好与椭球面上某个子午线相切,这条切线称为中央子午线或轴子午线。这样,中央子午线就毫无改变地转移到椭圆柱面,即投影面上。然后将中央子午线附近的一定经差(通常为中央子午线左右各  $3^\circ$  或  $1^\circ 30'$ ) 范围内椭球面上的点线按正形投影的条件向横椭圆柱上投影,并从两极将椭圆柱面剪开展为平面,此即高斯投影平面(图 1-8)。投影后,中央子午线为一直线,且长度不变,其他子午线投影后均为曲线,且对称地凹向中央子午线,赤道投影后为一直线,且与中央子午线正交,各平行圈投影为曲线,以赤道为对称轴凸向赤道,并与子午线正交。

需要指出的是,高斯投影不是几何透视投影,而是一种复杂的数学投影。

## (二) 高斯投影分带

高斯投影保持了投影前后图形的等角条件,但除中央子午线投影后为一直线,且长度不变外,其他长度都产生变形,投影面上的长度总比球面上为大,且离中央子午线愈远,变形愈大。长度变形过大,会影响测图、施工的精度,因此,必须对这种变形加以限制,使其不超过某一限度,限制的方法就是采用分带投影,使每一投影带只包括位于中央子午线两侧的邻近部分。

投影带宽度是以相邻子午面间的经度差  $l$  来划分的,有  $6^\circ$  带和  $3^\circ$  带两种。这样,就将椭球面沿子午线划分成若干个经差为  $6^\circ$  或  $3^\circ$  的投影带,每个投影带按高斯投影的规律分别进行投影,位于各带中央的子午线就是该带的中央子午线,而各带边缘的子午线则称为分带子午线或界子午线。

$6^\circ$  带是自起始子午面起,自西向东每隔经差  $6^\circ$  划分一带,全球共分 60 个带,编号为 1~60,各带的中央子午线的经度  $L_0$  依次为  $3^\circ, 9^\circ, 15^\circ, \dots, 357^\circ$ 。 $3^\circ$  带是自东经  $1^\circ 30'$  开始每隔经差  $3^\circ$  划分的,全球分 120 个带,编号依次为 1~120,各带的中央子午线的经度  $L_0$  依次为  $3^\circ, 6^\circ, 9^\circ, \dots, 360^\circ$ ,如图 1-9 所示。

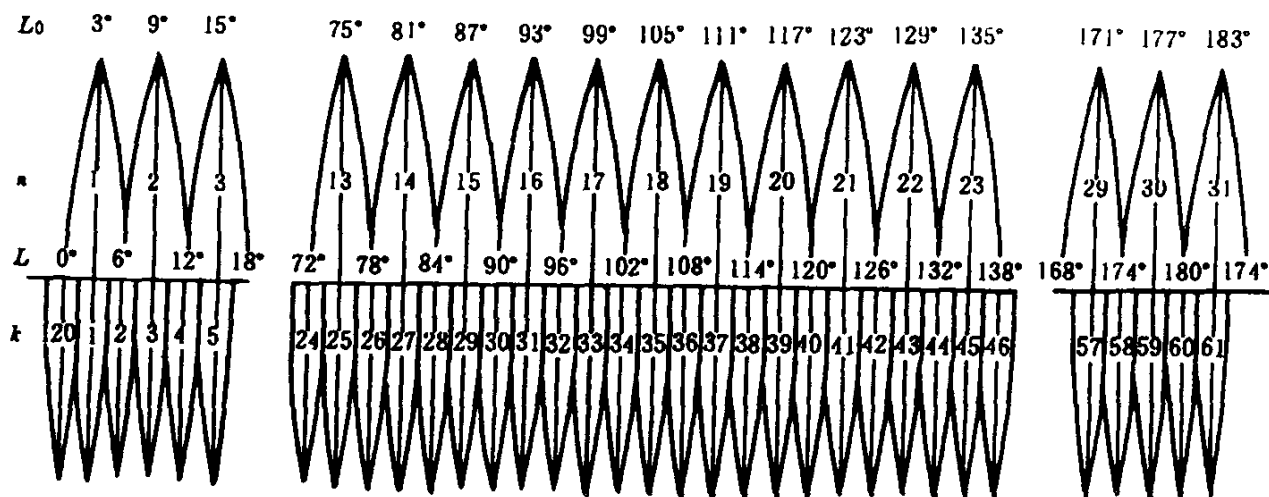


图 1-9

我国境内有 11 个  $6^\circ$  分带,带号由 13 带到 23 带;有 21 个  $3^\circ$  分带,带号由 25 带到 45 带,两者之间无重叠带号。不难看出, $3^\circ$  带的中央子午线经度有一半与  $6^\circ$  带中央子午线经度相同,另一半是  $6^\circ$  分带子午线的经度。

带号与中央子午线经度  $L_0$  的关系式为:

$$\left. \begin{aligned} L_0^6 &= 6n - 3 \\ L_0^3 &= 3k \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

式中: $L_0^6$ 、 $L_0^3$  分别为  $6^\circ$  带和  $3^\circ$  带的中央子午线经度; $n$ 、 $k$  分别为  $6^\circ$  带和  $3^\circ$  带的带号。

例如,首都北京位于东经  $116^\circ 23'$ ,所在  $6^\circ$  带和  $3^\circ$  带的中央子午线经度  $L_0^6 = L_0^3 = 117^\circ$ ,则由式(1-3)得:

$$n = (L_0^6 + 3) / 6 = 20$$

$$k = L_0^3 / 3 = 39$$

可见,北京的  $6^\circ$  带带号为 20, $3^\circ$  带带号为 39。

### (三) 高斯—克吕格平面直角坐标系

采用分带投影后,各带的中央子午线与赤道垂直相交于  $O$  点,称为坐标原点(图 1-10)。

以每一带的中央子午线为纵坐标轴,用  $x$  表示,赤道以北为正,赤道以南为负;以赤道为横坐标轴,用  $y$  表示,中央子午线以东为正,以西为负。这样,各带就构成了独立的平面直角坐标系,称为高斯-克吕格平面直角坐标系。对  $6^\circ$  带而言,有 60 个这样的坐标系,对  $3^\circ$  带而言,有 120 个这样的坐标系。

地面点在高斯平面直角坐标系的坐标,用点到两个坐标轴的垂直距离量度。我国位于北半球,纵坐标均为正值,而横坐标则有正有负。为了避免横坐标出现负值,把纵轴自中央子午线向西移动 500 km(图 1-11),即在  $y$  坐标上统一加上 500 km,由于赤道上经差为  $3^\circ$  的平行圈长约为 330 km,当纵轴西

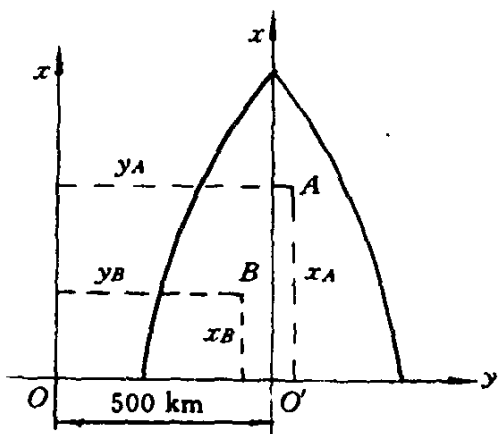


图 1-11

以带号,则通用坐标值为:

$$y_A = 38\ 536\ 210.140\ \text{m}$$

$$y_B = 38\ 458\ 386.930\ \text{m}$$

测绘管理部门提供的坐标成果均为通用值,而在实际使用时一般采用自然值,以方便计算。

#### 四、高程系

为了确定地面点的空间位置,除了要确定其在基准面上的投影位置外,还应确定其沿投影方向到基准面的距离,即确定地面的高程。

地面点沿铅垂线到大地水准面的距离,称为该点的绝对高程或海拔、标高,简称高程,以  $H$  表示,如图 1-12 所示,  $H_A$ 、 $H_B$  表示地面点  $A$  和  $B$  的绝对高程。如果基准面不是大地水准面,而是任意假定水准面时,则点到假定水准面的距离称为相对高程或假定高程,用  $H'$  表示。图 1-12 中的  $H'_A$  和  $H'_B$  表示  $A$ 、 $B$  两点的假定高程。可见,建立高程系的核心问题是如何建立高程起算面。

解放前,我国采用的高程起算面十分混乱,新中国成立后,我国的绝对高程以设在山东省青岛市的国家验潮站 1950 年到 1956 年观测的验潮资料推算的黄海平均海面作为全国高程的起算基准面,以此基准面的高程为零而建立的高程系统,称为“1956 年黄海高程系”。为了明显而稳固地表示高程起算面的位

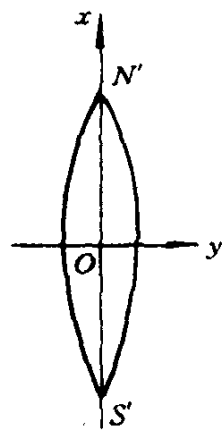


图 1-10

移后,凡位于中央子午线以东的点,它的横坐标值都大于 500 km,而位于中央子午线以西的点,其横坐标值都小于 500 km,但均为正值。此外,为了区分某点位于哪一带,还规定在横坐标值前冠以带号。通常把未加 500 km 和带号的横坐标值称为自然值,加上的则称为通用值。图 1-11 中,设  $A$ 、 $B$  两点位于  $3^\circ$  带的第 38 带内,横坐标的自然值分别为:

$$y'_A = +36\ 210.140\ \text{m}$$

$$y'_B = -41\ 613.070\ \text{m}$$

将  $A$ 、 $B$  两点横坐标的自然值加上 500 km,并在前面冠

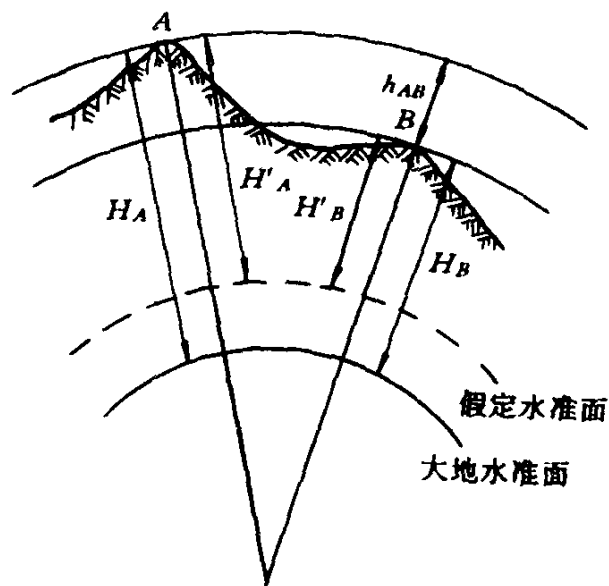


图 1-12



置,国家于1956年在青岛建立了一个与平均海水面相联系的水准点,称为水准原点,其高程为72.289 m,作为布设国家高程控制网的高程起算点。20世纪80年代初,国家又根据青岛验潮站1953年到1979年的观测资料,重新计算水准原点的高程为72.2604 m,称为“1985年国家高程基准”,该基准已于1985年1月1日起执行。

全国各地的地面点的高程,都是以青岛国家水准原点的黄海高程为起算数据,因而高程系统是全国统一的。在局部地区,如果远离已知高程的国家水准点,也可建立假定高程系统,即假定某个固定点的高程作为起算点,测算出其他各点的假定高程(也称相对高程)。

高程值有正有负,在基准面以上的点,其高程值为正,反之为负。

相邻两点的高程之差称为高差,用 $h$ 表示。图1-12中A点到B点的高差为:

$$h_{AB} = H_B - H_A = H'_B - H'_A \quad (1-4)$$

高差有正负之分,它反映相邻两点间的地面是上坡还是下坡,因此,高差值前应冠以正负号。如果 $h_{AB}$ 为正,表示地面上B点高于A点,是上坡; $h_{AB}$ 为负,表示B点低于A点,是下坡。

#### 第四节 用水平面代替水准面的限度

在普通测量中,虽然可将地球作为圆球看待,但如果将地面点先投影到圆球面上,然后再投影描绘到平面图纸上,将是很麻烦的。因此,在实际测量工作中,在满足一定的测量精度要求和测区面积不大的情况下,往往用水平面来直接代替水准面,即直接把地面点沿铅垂线投影到水平面上来决定其位置。这样既可简化一些复杂的计算,又不会影响工程质量。但在多大面积范围内允许以平面投影代替球面投影的问题,是本节将要讨论的内容。

用水平面代替水准面,通常会对距离、角度和高程产生影响,下面分别加以讨论。

##### 一、地球曲率对水平距离的影响

如图1-13所示为地表的一个小区域,A、B、C为地面点,它们在大地上水准面上的投影为 $a$ 、 $b$ 、 $c$ ,如果用切于 $b$ 点的水平面代替水准面,且地面点在其上的投影为 $a'$ 、 $b'$ 、 $c'$ 。设 $S$ 为B、C两点在大地上水准面上的距离, $t$ 为B、C两点在水平面上的距离, $\theta$ 为 $S$ 所对的圆心角, $R$ 为地球平均曲率半径。若以平面上的直线距离 $t$ 代替圆弧长 $bc$ ,则在距离方面将产生误差 $\Delta S$ ,即:

$$\Delta S = bc' - \widehat{bc} = t - S \quad (1-5)$$

其中

$$bc' = t = R \tan \theta$$

$$\widehat{bc} = S = R \cdot \theta$$

代入式(1-5),并将 $\tan \theta$ 按级数展开:

$$\tan \theta = \theta + \frac{1}{3} \theta^3 + \frac{2}{15} \theta^5 + \dots$$

因 $\theta$ 角很小,略去五次方以上各项,并以 $\theta = S/R$ 代入,则得:

$$\Delta S = \frac{1}{3} \frac{S^3}{R^2} \quad (1-6)$$

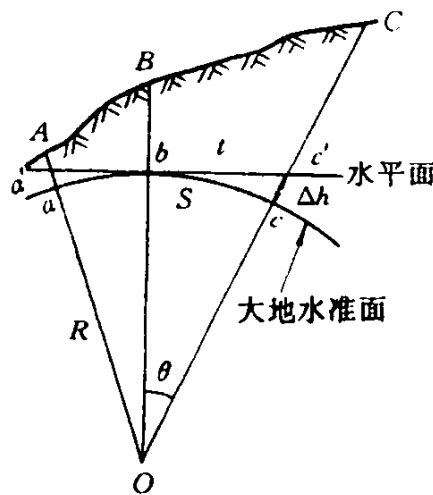


图 1-13