

► 普通高等学校规划教材

测量学 (第二版)

主 编 余代俊

副主编 郑平元



地质出版社

普通高等学校规划教材

测 量 学

(第二版)

主 编 余代俊

副主编 郑平元

参 编 兰 燕 曾 涛

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 简 介

本书是普通高等院校非测绘专业的测量学教材。全书共十二章，主要包括：测量学的基本知识、主要测量仪器的认识与使用、测量误差的基本知识、小地区控制测量、GPS测量原理与方法、地形图的测绘与应用、航空摄影测量与遥感技术、施工测量的原理与方法等。

本书内容全面，实用易读，可供大中专院校非测绘专业作为测量学课程教学使用，也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

测量学 / 余代俊主编. —2 版. —北京：地质出版社，2012. 8

ISBN 978-7-116-07834-5

I. ①测… II. ①余… III. ①测量学—高等学校—教材 IV. ①P2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 200526 号

责任编辑：魏智如

责任校对：王洪强

出版发行：地质出版社

社址邮编：北京海淀区学院路 31 号，100083

电 话：(010) 82324508 (邮购部)；(010) 82324586 (编辑部)

网 址：<http://www.gph.com.cn>

电子邮箱：zbs@gph.com.cn

传 真：(010) 82324340

印 刷：北京地质印刷厂

开 本：787mm×1092mm 1/16

印 张：14.5

字 数：350 千字

印 数：1—3000 册

版 次：2012 年 8 月北京第 1 版

印 次：2012 年 8 月北京第 1 次印刷

审图号：GS (2012) 1465 号

定 价：22.00 元

书 号：ISBN 978-7-116-07834-5

(如对本书有建议或意见，敬请致电本社；如本书有印装问题，本社负责调换)

第二版前言

自 20 世纪 90 年代以来,随着计算机技术、无线通信技术、卫星定位技术和互联网技术的不断发展,电子测量仪器代替了光学测量仪器,电子记录代替了手工记录, GPS 代替了三角测量,数字化测图代替了模拟测图,数字摄影测量代替了解析摄影测量。测绘技术实现了电子化和数字化,并进一步走向信息化。测绘新技术、新方法的发展与广泛应用,要求非测绘专业的教学内容必须跟进求新,以满足相关专业对现代测绘技术了解和掌握的需求。本教材的编写注重以基本理论和基本概念为核心,以基本技能训练和熟练使用地形图为目的,全面介绍现代电子测绘仪器和测绘新技术、新方法,内容由浅入深,系统精炼。本教材在第一版的基础上,将 GPS 测量技术单独列为一章,并增加了电子地图、数字摄影测量等内容。

本教材共分十二章:第一章绪论,第二章水准测量,第三章角度测量,第四章距离测量,第五章测量误差的基本知识,第六章小地区控制测量,第七章 GPS 测量原理与方法,第八章大比例尺地形图测绘,第九章地形图的应用,第十章航空摄影测量与遥感技术,第十一章测设的基本工作,第十二章施工测量。

教材编写分工为:第一章、第二章、第五章、第六章、第七章由余代俊编写,第三章、第四章、第十一章、第十二章由郑平元编写,第八章、第九章由兰燕编写,第十章由曾涛编写。全书由余代俊任主编并统编定稿,全书插图由余代俊、曾涛负责绘制。

西南交通大学张献洲教授、西南科技大学李玉宝教授对本教材进行了认真、细致的审阅,并提出了许多宝贵意见,在此谨致谢意!教材中部分插图取自所列参考文献,在此向原作者表示衷心的感谢。

由于编者水平所限,书中难免存在疏漏与不足,敬请读者批评指正,以利再版时补正。

编 者

2012 年 4 月

第一版前言

本教材是在总结、完善多年地学类专业的测量学课程内容，为适应高素质人才培养的新形势、新理念、新要求，在广泛征求同行专家和其他相关专业人士意见的基础上编写的。本教材的编写，注重以基本理论和基本概念为核心，以基本技能训练和熟练应用地形图为目的，强调现代电子测绘仪器和测绘新技术对传统测绘方法的更新替代作用，内容由浅入深，力求精炼。

本教材共分 11 章，其中第 1, 2, 3, 4, 5, 6 章及第 7 章之第五节数字化测图概述由余代俊编写；第 7, 8 章由宋皑雪编写；第 9, 10, 11 章由郑平元编写。全书由余代俊担任主编并整理定稿。本书插图由曾涛、余代俊负责绘制。

本书分别由成都理工大学胡崇金教授和西南交通大学张献洲教授进行了认真细致的审阅，并提出了许多宝贵的意见，在此谨致谢意！在编写过程中，众多测绘专业同仁对本书的编写也提出了许多宝贵的意见和建议，在此表示衷心的感谢！由于编者水平所限，书中难免存在不少缺点和错误，敬请读者批评指正。

编 者

2004 年 1 月

目 录

第二版前言

第一版前言

第一章 绪 论	(1)
第一节 概述	(1)
第二节 地球的形状和大小	(3)
第三节 地面点位的确定及测量坐标系	(4)
第四节 水平面代替水准面的限度	(9)
第五节 测量工作概述	(11)
第二章 水准测量	(14)
第一节 水准测量原理	(14)
第二节 普通水准仪及水准尺	(15)
第三节 普通水准测量的外业	(22)
第四节 普通水准测量的内业	(26)
第五节 微倾式水准仪的检验与校正	(27)
第六节 水准测量误差分析	(30)
第七节 精密水准仪及水准尺	(32)
第三章 角度测量	(38)
第一节 角度测量原理	(38)
第二节 方位角与罗盘仪	(39)
第三节 普通光学经纬仪	(43)
第四节 水平角观测	(45)
第五节 竖直角观测	(49)
第六节 经纬仪的检验与校正	(52)
第七节 水平角测量误差分析	(55)
第八节 电子经纬仪	(57)
第四章 距离测量	(61)
第一节 钢尺量距	(61)

第二节	视距测量	(63)
第三节	光电测距	(66)
第四节	全站仪简介	(70)
第五章	测量误差的基本知识	(73)
第一节	测量误差概述	(73)
第二节	衡量精度的标准	(75)
第三节	误差传播定律	(77)
第四节	算术平均值及其中误差	(79)
第五节	加权平均值及其中误差	(81)
第六章	小地区控制测量	(84)
第一节	控制测量概述	(84)
第二节	导线测量	(88)
第三节	交会定点	(96)
第四节	三、四等水准测量	(100)
第五节	三角高程测量	(103)
第七章	GPS 测量原理与方法	(106)
第一节	卫星定位系统	(106)
第二节	GPS 系统的组成	(108)
第三节	GPS 的定位原理	(111)
第四节	GPS 测量的实施	(116)
第八章	大比例尺地形图测绘	(120)
第一节	比例尺	(120)
第二节	地形图符号	(121)
第三节	测图前的准备工作	(128)
第四节	碎部测量	(130)
第五节	地形图绘制	(132)
第六节	数字化测图	(135)
第九章	地形图的应用	(141)
第一节	地形图的分幅与编号	(141)
第二节	高斯平面直角坐标系	(149)
第三节	地形图的图外注记	(151)
第四节	地形图上的量测作业	(154)
第五节	野外使用地形图的基本内容和方法	(163)

第六节 电子地图简介·····	(165)
第十章 航空摄影测量与遥感技术·····	(172)
第一节 摄影测量概述·····	(172)
第二节 航空摄影与航摄像片·····	(173)
第三节 立体观察·····	(178)
第四节 立体测图·····	(181)
第五节 影像判读与调绘·····	(182)
第六节 遥感技术·····	(186)
第十一章 测设的基本工作·····	(192)
第一节 水平距离、水平角和高程的测设·····	(192)
第二节 点的平面位置测设·····	(195)
第三节 已知坡度直线的测设·····	(196)
第四节 圆曲线的测设·····	(197)
第十二章 施工测量·····	(202)
第一节 施工测量概述·····	(202)
第二节 民用建筑施工测量·····	(203)
第三节 线路工程的中线及纵横断面测量·····	(208)
第四节 道路施工测量·····	(217)
第五节 管道施工测量·····	(220)
参考文献·····	(223)

第一章 绪 论

第一节 概 述

测量学的经典定义是：测量学是研究地球的形状和大小，测定地面点的位置及高程，将地表形状及其他信息测绘成地形图的科学。测量学的主要任务有三个：一是研究确定地球的形状和大小，建立统一的测绘基准；二是将地球表面的地物地貌测绘成图；三是将图纸上的设计成果测设至现场。根据测量学研究的对象、任务及采用技术手段的不同，传统上又将测量学分为以下几个分支学科：

大地测量学 研究和确定地球形状、大小和重力场，测定地面点的几何位置和地球整体与局部运动的理论及技术的学科。其基本任务是：建立国家大地控制网，测定地球的形状、大小和重力场，为地形测图和各种工程测量提供基础起算数据；为空间科学、军事科学及研究地壳变形、地震预报等提供重要资料。按照测量手段的不同，大地测量学又分为常规大地测量、卫星大地测量及物理大地测量等。

地形测量学 研究如何将地球表面局部区域内的地物、地貌及其他有关信息测绘成地形图的理论、方法和技术的学科。地形测量学又称普通测量学或测量学。地形测量学的主要内容包括：高程测量、角度测量、距离测量、控制测量、地形图测绘及地形图应用。按成图方式的不同，地形测图可分为模拟测图和数字化测图。在测图过程中无需考虑地球曲率的影响，用平面代替地球曲面。

摄影测量学 研究利用摄影或遥感的手段获取目标物的影像数据，从中提取几何的或物理的信息，并用图形、图像和数字形式表达测绘成果的学科。其基本任务是：通过对摄影像片或遥感图像进行处理、量测、解译，以测定物体的形状、大小和空间位置，进而制作成图。摄影测量学包括航空摄影测量、航天摄影测量（遥感）、地面摄影测量和近景摄影测量等。

地图制图学 研究模拟地图和数字地图的基础理论、设计、编绘和复制的技术方法以及应用的学科。它的基本任务是利用各种测量成果编制各类地图，其内容主要包括地图投影、地图编制、地图整饰、地图制印和地图应用等。随着计算机技术的引入，出现了计算机地图制图技术，使地图产品由纸质模拟地图向数字地图转变，从二维静态向三维立体和四维动态转变。数字地图的发展及广阔的应用领域为地图学的发展展现出光辉的前景，使数字地图成为 21 世纪社会生活中的主要测绘产品。

工程测量学 研究工程建设和自然资源开发中，在规划、勘察设计、施工和运营管理各个阶段进行的控制测量、地形测绘、施工放样、设备安装、变形监测及分析预报等的理论与技术的学科。工程测量学按其研究对象的不同又可分为：建筑工程测量、水利工程测

量、矿山测量、铁路工程测量、公路工程测量、桥梁工程测量、隧道工程测量、输电线路与输油管道测量、港口工程测量、军事工程测量、城市建设测量等。

海洋测量学 研究以海洋水体和海底为对象所进行的测量和海图编制理论与方法的学科。主要包括海洋大地测量、海道测量、海底地形测量、海洋重力测量及各种海图的编制。

随着近代电子技术、空间技术、计算机技术以及通信技术的发展,测量工作的方法、工具、对象和成果有了较大的变化,现代的测量学又改称测绘学。测绘学是研究对地球整体及其表面和外层空间中的各种自然和人造物体上与地理空间分布有关的各种几何、物理、人文及其随时间变化的信息进行采集、处理、管理、更新和利用的科学与技术。测量学这一古老的学科在这些新技术的支撑和推动下,出现了以全球定位系统(Global Positioning System,简称GPS)、遥感(Remote Sensing,简称RS)和地理信息系统(Geographic Information System,简称GIS)即以“3S”技术为代表的现代测绘科学技术,使测绘学科从理论到方法都发生了根本性的改变。GPS主要用于实时、快速地提供目标的空间位置;RS用于实时、快速地提供大面积地表物体及其环境的几何与物理信息,以及它们的各种变化;GIS则是对多种来源的时空数据进行综合处理分析和应用的平台。3S技术的集成应用是测绘技术的发展方向,从测绘学的现代发展可以看出,现代测绘学是指对空间数据的测量、分析、管理、存储和显示的综合研究。这些空间数据来源于地球卫星、航空航天传感器以及地面的各种测量仪器,采用信息技术,利用计算机的硬件和软件对这些空间数据进行处理和使用。原来各测绘分支学科之间的界限因计算机技术和通信技术的发展而逐渐变得模糊了,各测绘分支学科都因计算机和通信技术的发展而更加紧密地联系在一起,并结合地理学和管理学等学科知识,为现代社会对空间信息的各种需求提出全面的优化解决方案。这样,测绘学的现代概念就是研究地球和其他实体与地理空间分布有关的信息的采集、量测、分析、显示、管理和利用的科学与技术。由于将空间数据与其他专业数据进行综合处理、分析,致使测绘学科从单一学科走向多学科交叉,其应用已扩展到与空间信息分布有关的众多领域,显示出现代测绘学正朝向一门新兴学科——地球空间信息科学(Geo-Spatial Information Science,简称Geomatics)跨越和融合。

在21世纪的信息社会中,测绘资料是重要的基础信息之一。测绘产品已由过去的单一硬拷贝纸质图逐步向软拷贝的“4D”数字产品,即数字高程模型(Digital Elevation Model,简称DEM)、数字正射影像图(Digital Orthophoto Map,简称DOM)、数字线划图(Digital Line Graphic,简称DLG)和数字栅格图(Digital Raster Graphic,简称DRG)以及地理信息系统过渡。测绘工作承担着重要的信息采集、加工、整理及信息建库的任务。在国民经济建设、国防建设和科学研究方面,测绘工作被称为建设的尖兵。城乡规划与建设,国土整治,公路、铁路的修建,农林、水利建设,资源调查,矿产的勘探和开发,环境监测等都离不开测绘工作。在国防建设中,军事测量和军用地图是现代大规模诸兵种协同作战不可缺少的重要保障,而且对诸如远程导弹、空间武器、人造卫星和航天器的发射也起着重要的作用。测绘技术对于空间科学技术的研究、地壳形变、地震预报、地球动力学研究等是不可缺少的工具。由诸多测绘成果集成的地理信息系统现已成为现代行政管理和军事指挥的重要工具。

随着科学技术的日益发展,测绘学已全面进入数字化时代,正向着自动化、信息化和网络化的方向迈进。测绘对象已由地球表面扩展到空间星球,由静态发展到动态,3S技术已成为测绘工作的主要技术手段。测绘学的概念已被拓宽并注入了新的内容,成为一门名副其实的地球空间信息科学。本教材的主要内容是地形图的测绘与应用以及一般工程施工测量的施工测量。

第二节 地球的形状和大小

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

地球的自然表面很不规则,有高山、深谷、丘陵、平原、江湖、海洋等,最高的珠穆朗玛峰高出海平面 8844.43m,最深的太平洋马里亚纳海沟低于海平面 11034m,二者相对高差接近 20km,但与地球的平均半径 6371km 相比还是微不足道的;就整个地球表面而言,陆地面积仅占 29%,而海洋面积占了 71%。因此,我们可以设想地球的整体形状是被海水所包围的球体,即假设将静止的海水面扩展延伸,使其穿过大陆和岛屿,形成一个封闭的曲面,如图 1-1 所示。静止的海水面称为**水准面**。由于海水受潮汐、风浪等影响而时高时低,故水准面有无穷多个,其中与平均海水面相吻合的水准面称为**大地水准面**。由大地水准面所包围的形体称为**大地体**。人们常用大地体来代表地球的真实形状和大小。

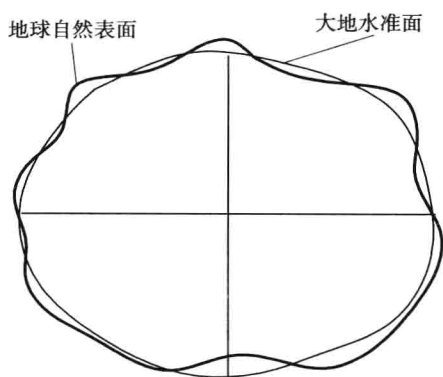


图 1-1 地球与大地体

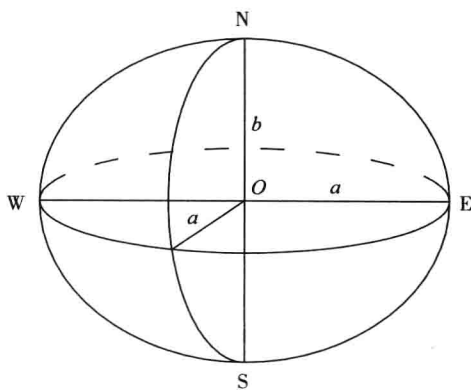


图 1-2 旋转椭球体

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

由于地球内部质量分布不均匀,致使地面上各点的铅垂线方向产生不规则变化,所以,处处与铅垂线垂直的大地水准面是一个不规则的无法用数学式表述的曲面,在这样的面上是无法进行测量数据的计算及处理的。因此,人们进一步设想,用一个与大地体非常接近的又能用数学式表述的规则球体即旋转椭球体来代表地球的形状,如图 1-2 所示,

它是由椭圆 NESW 绕短轴 NS 旋转而成。旋转椭球体的形状和大小由椭球基本元素确定, 即

长半轴: a

短半轴: b

扁率: $f = \frac{a-b}{a}$

某一国家或地区为处理测量成果而采用的与本国或本地区的大地体面形状最密合的旋转椭球称为**参考椭球体**。而着眼于全世界的测量数据处理, 选择在全球范围内与大地体的形状大小最密合的旋转椭球称为**总椭球体**。确定椭球体与大地体之间的相对位置关系, 称为**椭球体定位**。参考椭球体的定位对椭球体的中心位置无特殊要求, 而总椭球体的定位则要求椭球体的中心与地球的质心一致。椭球体面只具有几何意义而无物理意义, 它是严格意义上的测量计算基准面。

几个世纪以来, 许多学者分别测算出了多组椭球体参数值, 表 1-1 列出了几个著名的椭球体。我国的 1954 年北京坐标系采用的是克拉索夫斯基椭球体, 1980 西安坐标系采用的是 1975 国际椭球体, 它们属于参考椭球体定位的参心坐标系; 全球定位系统 (GPS) 采用的是 WGS-84 椭球体, 我国的 2000 国家大地坐标系采用的椭球体与 WGS-84 椭球体近似, 它们属于总椭球体定位的地心坐标系。

表 1-1 地球椭球体的几何参数

椭球体名称	长半轴 a/m	扁率 f	计算年代和国家	备 注
贝塞尔	6 377 397	1 : 299.152	1841 年, 德国	
海福特	6 378 388	1 : 297.0	1910 年, 美国	1942 年国际第一个推荐值
克拉索夫斯基	6 378 245	1 : 298.3	1940 年, 苏联	1954 年北京坐标系采用
1975 国际椭球体	6 378 140	1 : 298.257	1975 年, 国际第三个推荐值	1980 年西安坐标系采用
WGS-84	6 378 137	1 : 298.257 223 563	1984 年, 美国	美国 GPS 采用
CGCS 2000	6 378 137	1 : 298.257 222 101	2000 年, 中国	2000 年国家大地坐标系采用

由于旋转椭球的扁率很小, 在普通测量中可将地球当作圆球看待, 其半径

$$R = \frac{a+a+b}{3} \approx 6371\text{km}$$

第三节 地面点位的确定及测量坐标系

测量工作的基本任务是确定地面点的三维空间位置, 测量上通常将三维空间分解为确定点位置的二维坐标和一维高程。坐标表示地面点投影到基准面上的位置, 高程表示地面点沿投影方向到基准面的距离。根据不同的需要可以采用不同的坐标系和高程系来表示地面点的位置。

一、地理坐标系

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

1. 天文坐标系

以大地水准面为基准面,地面点沿铅垂线投影在该基准面上的位置,称为该点的**天文坐标**,该坐标系用天文经度和天文纬度表示。如图 1-3 所示,将大地体视作地球,NS 即为地球的自转轴,N 为北极,S 为南极。包含地面点 P 的铅垂线且平行于地球自转轴的平面称为 P 点的天文子午面。天文子午面与大地水准面的交线称为**天文子午线**,也称**经线**。而将通过英国格林尼治天文台埃里中星仪的子午面称为**起始子午面**,相应的子午线称为**本初子午线**或**零子午线**,并作为经度计算的起点。过点 P 的天文子午面与起始子午面所夹的两面角就称为 P 点的**天文经度**,用 λ 表示,其值为 $0^\circ \sim 180^\circ$,在起始子午线以东的为东经,以西的为西经。

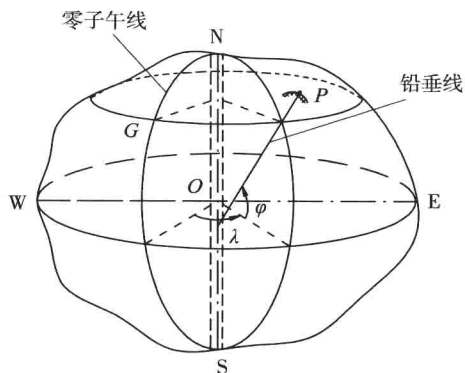


图 1-3 天文坐标

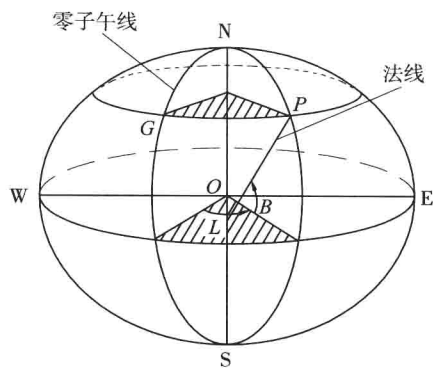


图 1-4 大地坐标

通过地球体中心且垂直于地轴的平面称为**赤道面**,它是纬度计算的起始面。赤道面与地球表面的交线称为**赤道**。其他垂直于地轴的平面与地球表面的交线称为**纬线**。过点 P 的铅垂线与赤道面之间所夹的线面角就称为 P 点的**天文纬度**,用 φ 表示,其值为 $0^\circ \sim 90^\circ$,在赤道以北的称为**北纬**,以南的称为**南纬**。

天文坐标 (λ, φ) 是用天文测量的方法实测得到的。

2. 大地坐标系

以椭球体面为基准面,地面点沿椭球面的法线投影在该基准面上的位置,称为该点的**大地坐标**,该坐标系用大地经度和大地纬度表示。如图 1-4 所示,包含地面点 P 的法线且通过椭球旋转轴的平面称为 P 的**大地子午面**。过 P 点的大地子午面与起始大地子午面所夹的两面角就称为 P 点的**大地经度**,用 L 表示,其值分为东经 $0^\circ \sim 180^\circ$ 和西经 $0^\circ \sim 180^\circ$ 。过点 P 的法线与椭球赤道面所夹的线面角就称为 P 点的**大地纬度**,用 B 表示,其值分为北纬 $0^\circ \sim 90^\circ$ 和南纬 $0^\circ \sim 90^\circ$ 。

大地坐标 (L, B) 因所依据的椭球体面不具有物理意义而不能直接测得,只可通过

计算得到。它与天文坐标有如下关系式：

$$L = \lambda - \frac{\eta}{\cos\varphi} \quad (1-1)$$

$$B = \varphi - \xi$$

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

二、平面直角坐标系

在实际测量工作中，若用以角度为计量单位的球面坐标来表示地面点的位置是不方便的，通常是采用平面直角坐标。测量工作中所用的平面直角坐标系与数学上的笛卡尔直角坐标系实质上相同而形式不同，测量上的平面直角坐标系以纵轴为 x 轴，一般表示南北方向，以横轴为 y 轴，一般表示东西方向，象限为顺时针编号，直线的方向都是从纵轴北端按顺时针方向度量的，如图 1-5 所示。这样的规定，使数学中的三角公式在测量坐标系中完全适用。

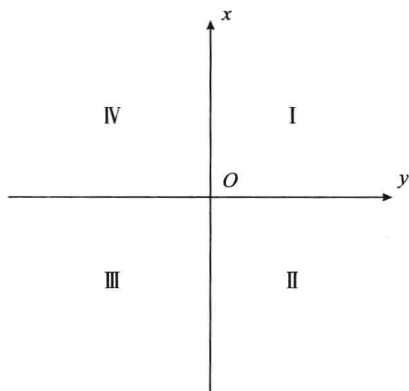


图 1-5 测量平面直角坐标系

即 x 轴，原点设在测区的西南角，以避免坐标出现负值。测区内任一地面点用坐标 (x, y) 来表示，它们与本地区统一坐标系没有必然的联系而成为独立的平面直角坐标系。如有必要可通过与国家坐标系联测而纳入统一坐标系。

1. 独立测区的平面直角坐标系

当测区的范围较小，能够忽略地球曲率对该区的影响而将其当做平面看待时，可在此平面上建立独立的直角坐标系。一般选定子午线方向为纵轴，

2. 高斯平面直角坐标系

当测区范围较大时，要建立平面坐标系，就不能忽略地球曲率的影响，为了解决球面

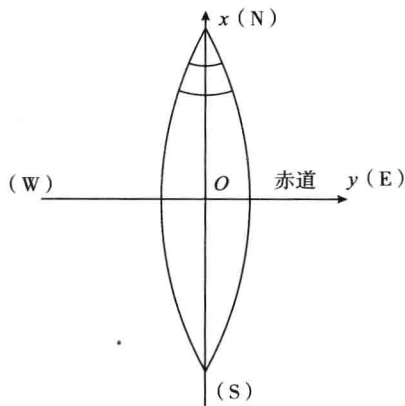


图 1-6 高斯平面直角坐标系

与平面的这对矛盾，则必须采用地图投影的方法将球面上的大地坐标转换为平面直角坐标。目前我国的国家基本比例尺地形图采用高斯-克吕格投影，建立了高斯-克吕格平面直角坐标系，简称高斯平面直角坐标系，如图 1-6 所示。对应任一地面点的大地坐标 (L, B) ，应用高斯投影公式可将其转换成高斯平面直角坐标 (x, y) 。但球面上的地物转换到平面上时总是会产生变形，为了限制这种投影变形，一般是控制依子午线划分成的瓜瓣投影带的经差大小，例如，规定其经差为 6° ， 3° 或 1.5° 等。有关高斯投影的原理及建立高斯平面直角坐标系的详细情况，请参见本书第九章第二节高斯平面直角坐标系。

三、地心坐标系

卫星大地测量是利用空中卫星的位置来确定地面点的位置。由于卫星围绕地球质心运动,所以卫星大地测量中需采用地心坐标系。

该系统一般有两种表达式,如图 1-7 所示。

1. 地心空间直角坐标系

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

2. 地心大地坐标系

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

于是,任一地面点 P 在地心坐标系中的坐标,可表示为 (X, Y, Z) 或 (L, B, H) 。二者之间可用下式进行换算:

$$\left. \begin{aligned} X &= (N + H) \cos B \cos L \\ Y &= (N + H) \cos B \sin L \\ Z &= [N(1 - e^2) + H] \sin B \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

式中: N 为椭球体卯酉圈的曲率半径; e 为椭球体的第一偏心率。

当由空间直角坐标转换为大地坐标时,则用下式换算:

$$\left. \begin{aligned} L &= \arctan\left(\frac{Y}{X}\right) \\ B &= \arctan\left[\frac{Z + Ne^2 \sin B}{\sqrt{X^2 + Y^2}}\right] \\ H &= \frac{Z}{\sin B} - N(1 - e^2) \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

在纬度 B 的计算中,需用逐次趋近法作迭代计算。

美国的全球定位系统 (GPS) 采用的 WGS-84 坐标就属于这类坐标。

四、我国的大地坐标系

新中国成立以来,我国先后采用了三套大地坐标系。

1. 1954 年北京坐标系

20 世纪 50 年代,由于国家建设的急需,我国地面点的大地坐标是通过与苏联 1942 年普尔科沃 (Pulkovo) 坐标系联测,经过我国东北传算过来的,该坐标系定名为“1954 年北京坐标系”。实际上,该坐标系是苏联 1942 年普尔科沃坐标系的延伸,它采用的是克

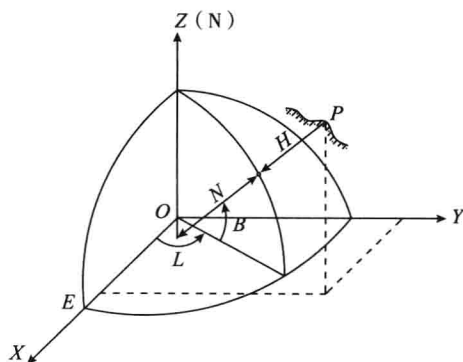


图 1-7 地心坐标系

拉索夫斯基椭球体元素值,大地原点(即坐标系大地经纬度的起算点)在苏联列宁格勒(现为俄罗斯圣彼得堡)普尔科沃天文台。由于大地原点距我国甚远,在我国范围内该参考椭球体面与大地水准面存在明显差异,并不适合作为我国的大地坐标系。

2. 1980 西安坐标系

以 1954 年北京坐标系为基础,经过近 30 年的测量,在获取大量的地面点数据后,采用 1975 年国际大地测量与地球物理联合会(IUGG)推荐的第三个椭球体作为参考椭球体,将大地原点选定在我国中部的陕西省泾阳县永乐镇,椭球短轴平行于地球质心指向我国定义的地极原点 $JYD_{1968.0}$ 方向,起始大地子午面平行于我国的起始天文子午面,由此建立了我国新的“1980 年国家大地坐标系”,简称“1980 西安坐标系”。该坐标系建立后,对全国的天文大地控制网进行了整体平差解算。

3. 2000 国家大地坐标系

由于卫星大地测量在测绘工作中的广泛应用,参心坐标系愈来愈不能适应现代测绘的要求,因此,我国于 2008 年 7 月 1 日正式启用了“2000 国家大地坐标系”,即 China Geodetic Coordinate System 2000,简称 CGCS 2000。该坐标系采用的椭球体与 GPS 的 WGS-84 椭球体近似,椭球体中心即坐标系原点与地球质心重合, Z 轴由原点指向历元 2000.0 的地球参考极方向,该历元的指向由国际时间局给定的历元为 1984.0 的初始指向推算, X 轴由原点指向格林尼治参考子午线与地球的赤道面(历元 2000.0)的交点, Y 轴与 Z 轴、 X 轴构成右手正交坐标系。

五、高程系统

在一般的测量工作中,都以大地水准面作为高程起算的基准面。因此,地面上任一点沿铅垂线方向到大地水准面的距离就称为该点的绝对高程或海拔,简称高程,用 H 表示。

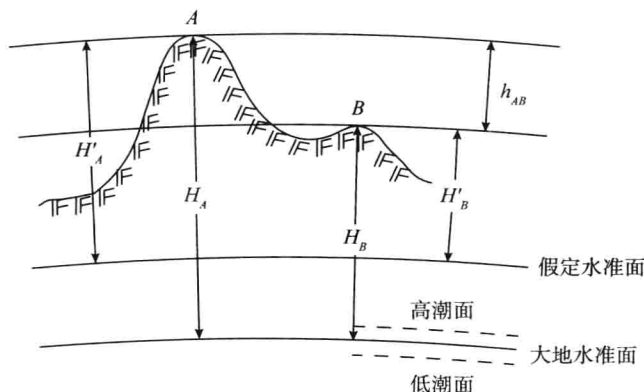


图 1-8 地面点的高程

如图 1-8 所示,图中的 H_A , H_B 分别表示地面上 A, B 两点的高程。我国原以 1950~1956 年间青岛验潮站多年记录的黄海平均海面作为我国的大地水准面,由此建立的高程系统称为“1956 年黄海高程系”。为了明显而稳固地表示高程基准面的位置,在青岛市观象公园的观象山山顶建立了一个与黄海平均海面相联系的水准点,这个水准点称为水准原点,如图 1-9 所示。通过精密

水准测量的方法测出该原点高出黄海平均海面 72.289m。水准原点是推算国家高程控制点高程的起算点。1985 年,国家测绘局又根据青岛验潮站 1952~1979 年间的验潮资料重新计算并确定了黄海平均海面位置,测得水准原点的高程为 72.260m,依此建立的高程系统被称为“1985 国家高程基准”,并于 1987 年 5 月正式开始启用。

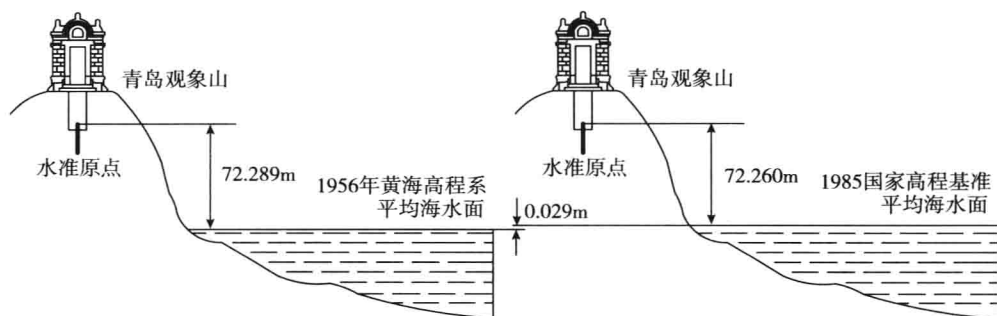


图 1-9 水准原点与高程系统

“1985 国家高程基准”与“1956 年黄海高程系”比较，水准原点和验潮站点位置未变，只是数据更精确，两者相差 0.029m，两高程系统成果互换时需要考虑此差值。

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

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

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

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

第四节 水平面代替水准面的限度

在一定的测量精度要求及测区范围不大的情况下，可以用水平面直接代替水准面，但这必定会影响到距离、角度和高程的测量精度。下面分析，在多大的测区范围内，用水平面代替水准面所产生的误差才不会超过测图误差的允许范围。

一、水准面的曲率对水平距离的影响

如图 1-10 所示，设 DAE 为水准面，AB 为其上的一段圆弧，长度为 S ，其所对圆心角为 θ ，将大地水准面假设为一个半径为 R 的圆球面。自 A 点作切线 AC，设长度为 t ，如果用切于 A 点的水平面代替水准面，即以相应的切线段 AC 代替圆弧 AB，则对应距离将产生误差 ΔS ，由图可得

$$\Delta S = t - S = R \tan \theta - R\theta \quad (1-5)$$

因 θ 角一般较小，故可将 $\tan \theta$ 展开成级数，并略去

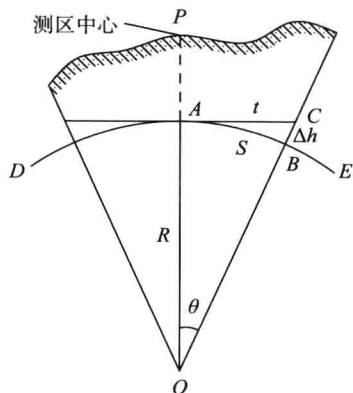


图 1-10 水平面代替水准面的影响