

测量学教程

主 编 吴学伟 于 坤
副主编 姜 芸 徐 锋
主 审 伊晓东



科学出版社

测量学教程

主 编 吴学伟 于 坤
副主编 姜 芸 徐 锋
主 审 伊晓东



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书重点介绍了测量学的基本理论和方法,并列举了测量学在经济建设各个领域的发展思路和实施方案,同时介绍了3S技术的基本理论知识。全书共12章,主要内容包括:绪论;水准测量;角度测量;距离测量与全站仪;测量误差的基本知识;小区域控制测量;大比例尺地形图测绘;地形图的应用;建筑施工测量;线路工程测量;水下地形测量;现代测绘技术简介。本书内容深入浅出,易教易学。

本书可作为高等院校地理信息科学类、土木工程类、交通工程类、农林类、环境工程专业类的本科生教材,也可作为相关工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

测量学教程 / 吴学伟, 于坤主编. —北京: 科学出版社, 2018. 2
ISBN 978-7-03-053909-0

I. ①测… II. ①吴… ②于… III. ①测量学-教材 IV. ①P2

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第303648号

责任编辑: 杨 红 程雷星 / 责任校对: 杜子昂

责任印制: 吴兆东 / 封面设计: 陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号
邮政编码: 100717
<http://www.sciencep.com>

北京九州迅驰传媒文化有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年2月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2018年2月第一次印刷 印张: 16

字数: 409 000

定价: 49.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

本书根据高等院校测量学课程的教学大纲要求,本着提高教学质量、培养高素质人才的目的,结合新形势下高等教育的发展需求,在总结近年来测量学课程教育教学改革成果的基础上,由东北林业大学、东北农业大学、大连理工大学等高校的测量教师在多次学术交流、教学研讨、使用修正、反复实践的基础上编写而成。

全书共 12 章,主要内容包括:绪论,介绍了测量工作的基础知识;第 2 章~第 4 章为测量基本原理、方法和仪器设备的使用,包括水准测量、角度测量、距离测量等基本知识和全站仪的原理与使用;第 5 章为测量误差的基本知识,介绍测量误差处理基础理论和方法;第 6 章介绍小区域控制测量,重点为导线测量;第 7 章和第 8 章介绍大比例尺地形图数据采集、绘制与应用方法;第 9 章介绍建筑施工测量,包括各类建筑施工测量、变形监测、竣工测量等;第 10 章介绍线路工程测量,包括道路施工测量、桥梁工程施工测量、地下工程测量、地下管道测量;第 11 章为水下地形测量,介绍水下地形测量的基本原理和方法;第 12 章为现代测绘技术简介,包括全球导航卫星系统、遥感、地理信息系统等。本书在编写过程中,既强调了经典的测量基本知识、基本理论和基本技能,也有测绘新技术、新仪器、新方法,增加了数字测图、水下地形测绘等新知识、新领域内容,介绍了以 3S 技术为代表的现代测绘技术理论和方法,形成了较新的教学内容和方法体系,以使师生利用最新的理论知识解决工程中的实际问题。

本书由吴学伟、于坤任主编,姜芸、徐锋任副主编。全书分工如下:第 1 章、第 5 章、第 6 章、第 12 章由东北林业大学吴学伟执笔,第 2 章、第 9 章、第 10 章由东北林业大学于坤执笔,第 3 章、第 4 章、第 8 章由东北农业大学姜芸执笔,第 7 章、第 11 章由大连理工大学城市学院的徐锋执笔。东北林业大学的武百超老师、田东弘研究生参与了部分章节的编写。

本书承蒙大连理工大学的伊晓东主审,他提出的宝贵的意见和建议对提高书稿质量具有重要作用;本书在编写过程中,参考了国内外有关教材和参考书,尤其是采用了东北林业大学何东坡教授、南京林业大学史玉峰教授编写的内容和实例,在此一并表示衷心的感谢。

由于作者水平所限,书中难免存在疏漏和不足之处,欢迎读者批评指正。

编 者
2017 年 10 月

目 录

| | |
|-------------------|----|
| 前言 | |
| 第 1 章 绪论 | 1 |
| 1.1 概述 | 1 |
| 1.2 地球的形状和大小 | 3 |
| 1.3 地面点位的确定与测量坐标系 | 5 |
| 1.4 地球曲率对测量工作的影响 | 9 |
| 1.5 测量工作概述 | 11 |
| 思考与练习题 | 12 |
| 第 2 章 水准测量 | 13 |
| 2.1 水准测量原理 | 13 |
| 2.2 水准测量的仪器及使用 | 15 |
| 2.3 水准测量的外业施测 | 21 |
| 2.4 水准测量成果的内业计算 | 24 |
| 2.5 微倾式水准仪的检验与校正 | 27 |
| 2.6 精密水准仪和电子水准仪 | 30 |
| 2.7 水准测量误差分析 | 35 |
| 思考与练习题 | 37 |
| 第 3 章 角度测量 | 38 |
| 3.1 角度测量原理 | 38 |
| 3.2 光学经纬仪的构造及使用 | 39 |
| 3.3 水平角测量 | 41 |
| 3.4 竖直角测量 | 47 |
| 3.5 光学经纬仪的检验与校正 | 50 |
| 3.6 电子经纬仪 | 54 |
| 3.7 角度测量误差分析 | 56 |
| 思考与练习题 | 59 |
| 第 4 章 距离测量与全站仪 | 61 |
| 4.1 钢尺量距 | 61 |
| 4.2 电磁波测距 | 65 |
| 4.3 全站仪 | 69 |
| 4.4 直线定向 | 72 |
| 思考与练习题 | 75 |

| | |
|------------------------------|-----|
| 第 5 章 测量误差的基本知识 | 77 |
| 5.1 测量误差概述 | 77 |
| 5.2 衡量观测值精度的标准 | 81 |
| 5.3 误差传播定律 | 83 |
| 5.4 等精度直接观测平差 | 87 |
| 5.5 不等精度直接观测平差 | 90 |
| 思考与练习题 | 94 |
| 第 6 章 小区域控制测量 | 95 |
| 6.1 控制测量概述 | 95 |
| 6.2 导线测量 | 98 |
| 6.3 交会定点 | 106 |
| 6.4 高程控制测量 | 110 |
| 6.5 三等、四等水准测量 | 111 |
| 6.6 三角高程测量 | 114 |
| 思考与练习题 | 116 |
| 第 7 章 大比例尺地形图测绘 | 118 |
| 7.1 地形图的基本知识 | 118 |
| 7.2 大比例尺地形图的传统测绘方法 | 126 |
| 7.3 大比例尺数字化测图 | 132 |
| 思考与练习题 | 140 |
| 第 8 章 地形图的应用 | 141 |
| 8.1 地形图的识读 | 141 |
| 8.2 地形图的基本内容 | 142 |
| 8.3 水库设计与汇水面积计算 | 145 |
| 8.4 面积量算与电子求积仪 | 146 |
| 8.5 场地施工土方量计算 | 148 |
| 8.6 规划设计时的用地分析 | 152 |
| 思考与练习题 | 154 |
| 第 9 章 建筑施工测量 | 155 |
| 9.1 建筑施工测量概述 | 155 |
| 9.2 施工放样基本工作及点的平面位置测设 | 160 |
| 9.3 建筑施工测量方法 | 166 |
| 9.4 工程建筑物的变形监测 | 174 |
| 9.5 竣工测量与总平面图的编绘 | 180 |
| 思考与练习题 | 181 |
| 第 10 章 线路工程测量 | 182 |
| 10.1 线路工程测量概述 | 182 |
| 10.2 道路中线测量 | 183 |

| | | |
|---------------|-----------------|------------|
| 10.3 | 路线纵横断面测量 | 198 |
| 10.4 | 道路施工测量 | 206 |
| 10.5 | 桥梁工程施工测量 | 208 |
| 10.6 | 地下工程测量 | 212 |
| 10.7 | 地下管道测量 | 214 |
| | 思考与练习题 | 217 |
| 第 11 章 | 水下地形测量 | 218 |
| 11.1 | 水下测量概述 | 218 |
| 11.2 | 水下测量 | 218 |
| 11.3 | 测线布设 | 221 |
| 11.4 | 内业成图 | 222 |
| | 思考与练习题 | 222 |
| 第 12 章 | 现代测绘技术简介 | 223 |
| 12.1 | 全球导航卫星系统简介 | 223 |
| 12.2 | 遥感概论 | 238 |
| 12.3 | 地理信息系统概述 | 241 |
| | 思考与练习题 | 246 |
| | 主要参考文献 | 247 |

第1章 绪论

内容提要

本章阐述了测量学研究的对象、内容和分类,以及我国测绘事业的发展;宏观介绍了地球的形状大小;叙述了地面点空间位置的确定与平面坐标系统和高程坐标系统,并对测量工作的基本内容和基本原则进行了阐述。

1.1 概述

1.1.1 测量学研究的对象与内容

测量学是一门古老的学科,有着悠久的历史。1880年,赫尔默特(Helmert)将测量学定义为以地球为研究对象,对它进行测定与描绘的科学。随着科学技术的发展和社会的进步,测量学的概念与研究对象也在不断发展变化。测量学一个比较完整的基本概念为:研究对实体(包括地球整体、表面及外层空间各种自然和人造的物体)中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信息的采集、处理、管理、更新和利用的科学与技术。

针对地球而言,测量学的研究内容是测定空间点的几何位置、确定地球形状、地球重力场和各种动力现象,研究采集和处理地球表面各种形态及其变化信息并绘制成图的理论、技术和方法,以及各种工程建设中的测绘理论、技术和方法。

众所周知,地球表面极不规则,有高山、丘陵、平原、盆地、湖泊、河流和海洋等自然形成的物体,还有房屋、工厂、道路、桥梁等人工建造的建筑物和构筑物。测量学将这些地表物体分为地物和地貌。测量的主要任务包括两大类:测定和测设。其中,测定是使用测量仪器和工具,通过测量和计算,将地貌和地物的位置按照一定的比例、规定的符号缩小绘制成图,供科学研究和工程建设使用。测设也称为“放样”“放线”“定位”等,是指按设计文件要求将建筑物(构筑物)的关键点(如桥墩中心)或关键轴线(如隧道中线)等在实地测量后标定出来,作为施工的必要依据。

1.1.2 测量学的分类

1) 大地测量学

大地测量学(geodesy)主要是研究地球的形状及大小、地球重力场、地球板块运动、地球表面点的几何位置及其变化的科学。大地测量学是整个测量学科各个分支的理论基础,也是开展其他测绘工作的前提。大地测量学的基本任务是建立高精度的地面控制网及重力水准网,为研究地球形状及大小、地球重力场及其分布、地球动力学研究、地壳形变及地震预测等提供精确的位置信息,同时为各类工程施工测量及摄影测量提供依据,为地形测图及海洋测绘提供控制基础。

2) 普通测量学

普通测量学(surveying)简称测量学,它是研究地球表面较小区域内测绘工作的基本理论、

技术和应用方法的学科。它研究的对象只是地球表面上局部区域内各类固定性物体的形状和位置,所进行的工作即地形测量和一般工程测量。由于地球半径较大,地球表面曲率较小,在一定条件下,地面上的小区域可以近似地看成平面。因此,有关地形测量的许多问题,都是以平面为依据进行的。地形测量的基本任务包括图根控制测量和地形测图,具体工作有距离测量、角度测量、高程测量、定向测量和观测数据的处理与绘图等。

3) 摄影测量学与遥感

摄影测量学(photography)与遥感(remote sensing, RS)是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、图像或数字形式表达测绘成果的学科。它的主要研究内容有获取目标物的影像,对影像进行处理,将所测得的成果用图形、图像或数字表达。

摄影测量与遥感是一种快速获取地球表面上地貌及地物影像的技术,在通信技术、航空航天技术、计算机技术等的支持下,可以实时地获取地物、地貌的相关信息,并形成数字地图,为地理信息系统(geographical information system, GIS)提供基础信息数据。利用遥感技术(电磁波、光波及热辐射)也可快速获取地球表面、地球内部、环境景象及天体等传感目标的信息信号,它在农业调查、土地性质分析、植被分布调查、地下资源探测、气象及环境污染监测、文物考古及自然灾害预测中应用非常广泛。

4) 工程测量学

工程测量学(engineering surveying)主要是研究在工程施工和资源开发利用中的勘测设计、建设施工、竣工验收、生产运营、变形监测和灾害预报等方面的测绘理论与技术。工程测量的特点是应用基本的测量理论、方法、技术及仪器设备,并结合具体的工程特点采用具有特殊性的施工测绘方法。它是大地测量学、摄影测量学及地形测量学的理论与方法在具体工程中的应用。

5) 地图学

地图学(cartology)是以地图信息传递为中心,研究地图的基本理论、地图制作技术和地图应用的综合性科学。地图学由地图理论、地图制图方法及地图应用三大部分组成。地图是测绘工作的重要产品形式之一。地图学科的不断发展,促使地图产品从模拟地图向数字地图转化,从二维静态向三维立体、四维动态转变。数字地图的发展和应用领域的不断拓宽,为地图学的发展及地图应用开辟了新的前景。

6) 海洋测量学

海洋测量学(marine surveying)是以海洋水体及海底地形为对象,研究海洋定位,测定海洋大地水准面及平均海平面、海面及海底地形、海洋重力及磁力等自然和社会信息的地理分布,并编制成各种海图的理论与技术的学科。

1.1.3 我国测绘事业的发展

60多年来,我国测绘工作的主要成就是:①在全国范围内(除台湾)建立了高精度的天文大地控制网,建立了适合我国的统一坐标系统——1980年国家大地坐标系统;20世纪90年代,利用全球定位系统(global positioning system, GPS)测量技术建立了包括AA级、A级和B级在内的国家GPS控制网;21世纪初对喜马拉雅山进行了重新测高,测得其主峰海拔为8844.43m;建立了CGCS(China geodetic coordinate system)2000大地测量坐标系。大地坐标系为地心坐标。②完成了国家基本地形图的测绘,测图比例尺也随着国民经济建设的发展

而不断增大,城市规划、工程设计都使用大比例尺的地形图。测图方法也从常规经纬仪、平板仪测图发展到全数字摄影测量成图和GPS测量技术及全站仪地面数字成图。编制并出版了各种地图、专题图,制图过程实现了数字化、自动化。③制定了各种测绘技术规范(规章)和法规,统一了技术规程及精度指标。④在工程测量方面取得显著成绩,先后完成了一系列大型工程建设和特殊工程的测量定位工作,如长江大桥、葛洲坝水电站、宝山钢铁厂、三峡水利枢纽、正负电子对撞机和同步辐射加速器、核电站、杭州湾大桥、中国大剧院、国家体育场(鸟巢)等。⑤建立了完整的测绘教育体系,测绘技术步入世界先进行列,研制了一批具有世界先进水平的测绘软件。⑥测绘仪器生产发展迅速,不仅可以生产出各等级的经纬仪、水准仪、平板仪,还能批量生产电子经纬仪、电磁波测距仪、自动安平水准仪、全站仪、GPS接收机、解析测图仪等。⑦测绘技术及手段不断发展,传统的测绘技术已基本被现代测绘技术(GPS、RS、GIS,简称“3S”)所代替。

1.1.4 测量学的学习目的与要求

测量学是国民经济建设各相关专业的技术基础课。相关专业的学生学习该课程后,要求掌握测量学的基础理论和基本知识;具有使用常规测量仪器的操作技能,初步掌握新型测绘仪器的原理与使用方法;基本掌握大比例尺地形图测图的原理、方法;掌握数字测图的原理、过程和方法;在工程规划设计与施工过程中能正确使用地形图和测绘信息;掌握有关测量数据处理理论和精度评定方法;在施工工程中,能够正确地使用测量仪器进行一般工程的施工放样工作。同时,在学习测量学后,还要对测绘科学技术的发展现状有所了解和认识。

测量学是一门以学习地球空间信息科学知识为主导的基础技术课,其不仅教授传统的地球空间信息数据采集方法,更是为了实现不同学科专业对地球空间信息的采集、管理、传播、使用和综合开发。测量学的实践性很强,在教学过程中,除了课堂教学外,还有实验课和集中教学实习。学生在掌握教师课堂讲授内容的同时,要认真参加实验课,巩固和验证所学理论。测量教学实习是一个系统的教学实践环节,只有自始至终地完成实习各项作业,才能对测量学的系统知识和实践过程有一个完整的、系统的认识。

测量工作的主要任务是按照各种规范和规定提供点位的空间信息,工作中稍有不慎,发生错误,将造成巨大损失,甚至造成人民生命、财产的损失,这是绝对不允许的。因此,学习测量学还要注意以下几个方面:要养成认真细致的工作习惯,尽可能减少粗差和错误;坚持处处时时按照规范作业的原则,以保持测量工作和成果的严肃性;树立和加强检核工作的高度责任感,以保证数据的正确性;测量工作大多是集体作业,有的是外业工作,工作环境条件较差,因而要有团结合作的集体主义精神和吃苦耐劳的工作作风,以保证测量工作的顺利进行和成果的高质量。

1.2 地球的形状和大小

地球表面是错综复杂的,有高山、平原和丘陵,有纵横交错的江河湖泊和浩瀚的海洋。其中,海洋水面约占整个地球表面的71%,而陆地仅占29%。陆地最高的是珠穆朗玛峰,海拔8844.43m,海洋中最深的是马里亚纳海沟,海拔-11022m,但这样的高度差相对于地球平均半径6371km是很微小的。由于地球的质量和自转运动,地球上任何一点都同时受到地心

引力和地球自转运动的离心力影响，这两个力的合力称为地球重力，重力的方向线称为铅垂线。设想一个自由静止的海水面(只有重力作用，无潮汐、风浪影响)，并延伸通过大陆、岛屿形成一个包围地球的封闭曲面，这个曲面就称为水准面。水准面是一个处处与重力线方向垂直的连续曲面。水准面有无数多个，其中与平均海水面相吻合的水准面称为大地水准面；大地水准面包围的地球形体称为大地体。大地水准和铅垂线是测量外业所依据的基准面和基准线。

地球内部质量分布不均匀，使铅垂线的方向产生不规则变化。因此，大地水准面是不规则的、很难用数学表达的复杂曲面。如果

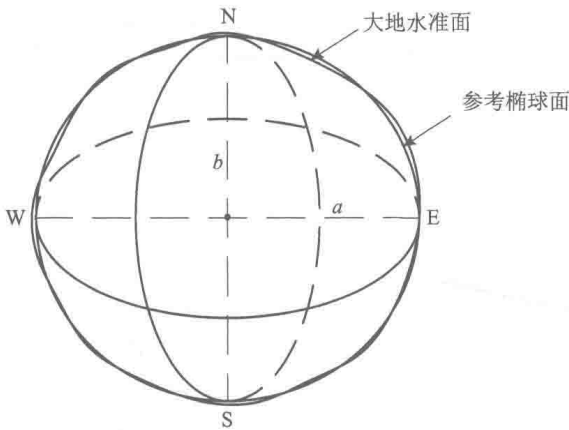


图 1.1 地球的形状

将地球表面的物体投影在这个复杂的曲面上，人们还是无法在这个曲面上直接进行测量的数据处理。为此，通常用一个非常接近大地体的旋转椭球体作为地球的参考形状和大小，如图 1.1 所示。旋转椭球体也称为参考椭球体，又称为地球椭球体，其表面称为参考椭球面；由地表任一点向参考椭球面所作的垂线称为法线。法线和参考椭球面是测量计算的基准线和基准面。决定参考椭球面形状和大小的元素是椭球的长半轴 a 、短半轴 b ，根据 a

和 b 还定义了扁率 f 、第一偏心率 e 、第二偏心率 e' ：

$$f = \frac{a - b}{a} \tag{1.1}$$

$$e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2} \tag{1.2}$$

$$e'^2 = \frac{a^2 - b^2}{b^2} \tag{1.3}$$

表 1.1 给出了我国曾先后采用过的 1954 北京坐标系、1980 西安坐标系和 2000 国家大地坐标系及 GPS 测量采用的 WGS-84 坐标系的参考椭球元素值。

表 1.1 参考椭球元素值

| 坐标系名称 | a/m | f | e^2 | e'^2 |
|--------------|---------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 1954 北京坐标系 | 6378245 | 1 : 298.3 | 0.006693421622966 | 0.006738525414683 |
| 1980 西安坐标系 | 6378140 | 1 : 298.257 | 0.00669438499959 | 0.00673950181947 |
| 2000 国家大地坐标系 | 6378137 | 1 : 298.257223563 | 0.00669467999013 | 0.00673949674223 |
| WGS-84 坐标系 | 6378137 | 1 : 298.257222101 | 0.00669438002290 | 0.00673949677548 |

由于参考椭球的扁率很小，当测区范围不大时，可以将参考椭球近似看作半径为 6371 km 的圆球。

1.3 地面点位的确定与测量坐标系

测量工作的根本任务是确定地面点的位置。表示地面点的空间位置需要三个分量。测量工作中一般是用地面某点投影到参考曲线上的位置和该点到大地水准面间的铅垂距离来表示该点在地球上的位置,即地面点的坐标和高程。随着卫星大地测量学的发展,地面点的空间位置也采用空间直角坐标表示。

1.3.1 大地坐标系

大地坐标系是表示地面点在参考椭球面上的位置,它的基准是法线和参考椭球面。大地坐标系如图 1.2 所示,表示为 $P(L, B, H_0)$: L 指 P 点的子午面和起始子午面(通过英国格林尼治天文台的子午面)所夹的两面角,叫做 P 点的大地经度,由起始子午面起算,规定向东为正,称东经($0^\circ \sim 180^\circ$),向西为负,称西经($0^\circ \sim 180^\circ$); B 指 P 点的法线与赤道面的夹角,称为 P 点的大地纬度,由赤道面起算,规定向北为正,称北纬($0^\circ \sim 90^\circ$),向南为负,称南纬($0^\circ \sim 90^\circ$)。如果 P 点不在椭球面上,还要附加另一参数——大地高 H_0 ,其定义为从观测点沿椭球法线方向至椭球面的距离。我国自 2008 年 7 月 1 日起正式启用 2000 国家大地坐标系。

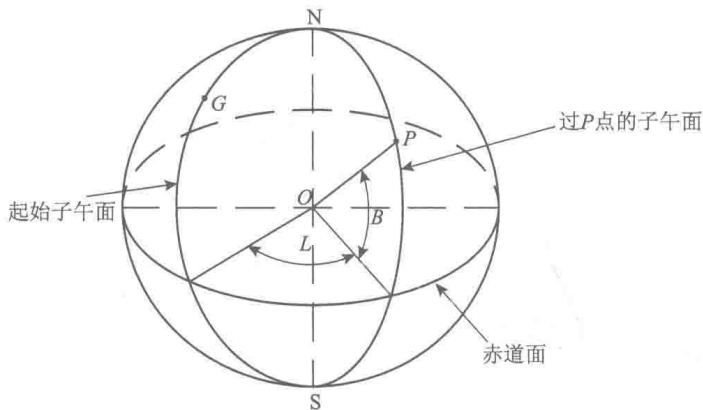


图 1.2 大地坐标系

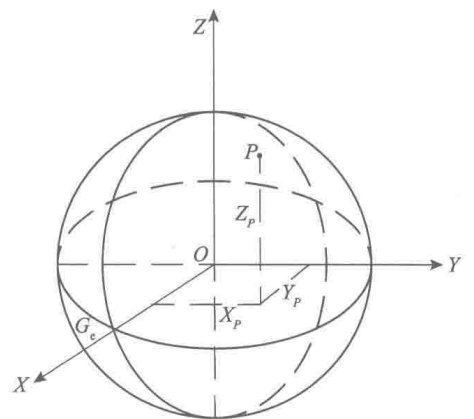


图 1.3 空间直角坐标系

1.3.2 空间直角坐标系

如图 1.3 所示,空间任一点的坐标表示为 (X, Y, Z) ,坐标原点在总地球质心或参考椭球中心, Z 轴与平均自转轴相重合,指向某一时刻的平均北极点, X 轴指向平均自转轴与平均格林尼治天文台所确定的子午面与赤道面的交点 G_c ,而 Y 轴与 XOZ 平面垂直,且与 X 轴、 Z 轴构成右手坐标系。

1.3.3 平面直角坐标系

1) 高斯投影

大地坐标系只能用来确定地面点在旋转椭球面上的位置,而大比例尺地形图的测绘相对于水平面而言,其测量计算也是在平面上进行的。为此,有必要将旋转椭球面上的点位投影到平面上,这种投影称为地图投影。地图投影的方法很多,我国采用的是高斯-克吕格投影方法(简称高斯投影)。使用高斯投影的国家主要有德国、中国与俄罗斯等。

高斯投影是一种横轴等角切圆柱投影。如图 1.4 所示。设想用一个横椭圆柱套在参考椭球外面，并与某一子午线相切，称该子午线为中央子午线；地球的赤道面的投影与椭圆柱面相交成一条直线，其与中央子午线正交；圆柱的中心轴 CC' 通过参考椭球中心 O 并与地轴 NS 垂直；将中央子午线东西各一定经差范围内的地区投影到横椭圆柱面上，再将该横椭圆柱面展开即称为投影面，如图 1.4 所示。高斯投影具有以下三个特点：①投影后角度保持不变；②中央子午线的投影是一条直线，并且是投影点的对称轴；③中央子午线投影后长度无变形。

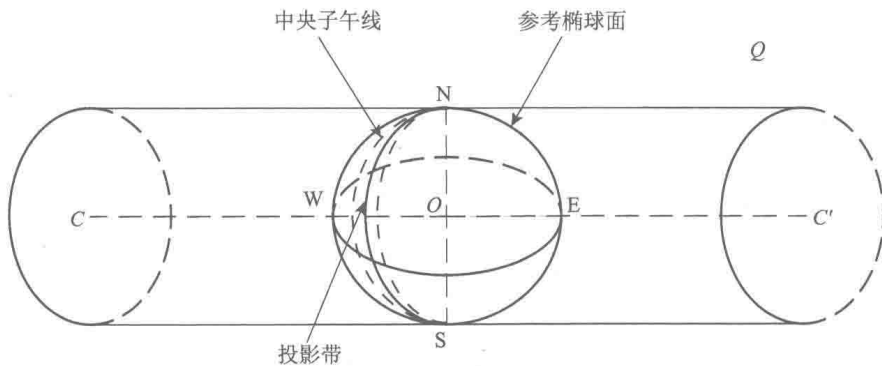


图 1.4 高斯投影

2) 高斯平面直角坐标系

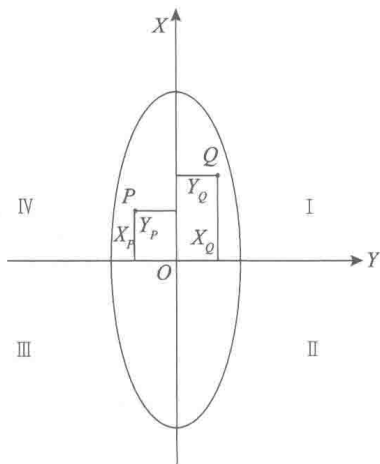


图 1.5 高斯平面直角坐标系

如图 1.5 所示，以中央子午线与赤道的交点 O 作为坐标原点，以中央子午线的投影为纵坐标轴 X ，规定 X 轴向北为正；以赤道投影为横坐标轴 Y ，规定 Y 轴向东为正；这就构成了高斯平面直角坐标系。象限则按顺时针方向编号，这样就可以将数学上定义的各类三角函数在高斯平面坐标系中直接应用，不需做任何变更。

3) 投影带

为了控制长度变形，将地球椭球面按一定的经度差分成若干范围不大的带，称为投影带，常用带宽为 6° 、 3° ，分别称为 6° 投影、 3° 投影。

6° 投影：如图 1.6 所示，从首子午线起，每隔经度 6° 自西向东将整个地球划分为 60 个投影带，依次编号 1, 2, 3, ..., 60，任意带的中央子午线经度

L_0 与投影带号 N 的关系表示为

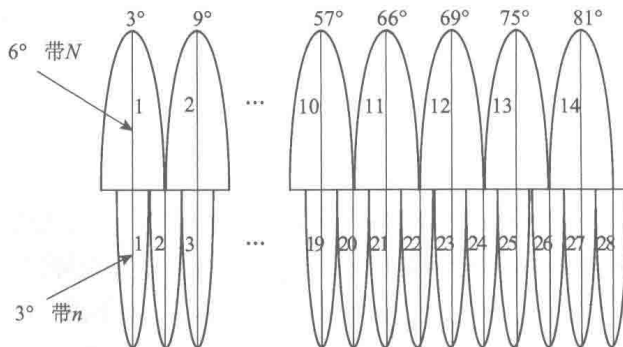


图 1.6 3° 带/ 6° 带分带方法

$$L_0 = 6N - 3 \quad (1.4)$$

反之, 已知地面任一点的经度 L , 要计算该点所在 6° 带编号的公式如下:

$$N = \text{Int}\left(\frac{L}{6}\right) + 1 \quad (1.5)$$

式中, Int 为取整函数。

3° 投影: 如图 1.6 所示, 从东经 1.5° 子午线起, 每隔经差 3° 自西向东分带, 依次编号为 1, 2, 3, \dots , 120, 投影带号 n 与相应中央子午线经度 l_0 的关系表示为

$$l_0 = 3n \quad (1.6)$$

反之, 已知地面任一点的经度 L , 要计算该点所在的 3° 带编号的公式如下:

$$n = \text{Int}\left(\frac{L}{3} + 0.5\right) \quad (1.7)$$

式中, Int 为取整函数。

我国领土所处的经度概略范围为 $73^\circ 27' \text{E} \sim 135^\circ 09' \text{E}$, 根据式 (1.5) 和式 (1.7) 求得的 6° 带投影与 3° 带投影的带号范围分别为 $13 \sim 23$ 与 $24 \sim 45$ 。

4) 国家统一坐标

我国位于北半球, X 坐标值恒为正值, Y 坐标值则有正有负。为了避免 Y 坐标出现负值, 我国统一规定将每带的坐标原点西移 500 km, 即给每个点的 Y 坐标值加上 500 km, 使之恒为正, 且在 Y 坐标值前冠以带号, 以标定在哪个投影带内, 这种坐标称为国家统一坐标。例如, P 点的高斯平面直角坐标为 $X_P = 3567291.233 \text{m}$, $Y_P = -233425.601 \text{m}$, 若该点位于第 20 带内, 则国家统一坐标表示为 $X_P = 3567291.233 \text{m}$, $Y_P = 20266574.399 \text{m}$ 。

5) 独立平面直角坐标系

当测区面积较小时 (如小于 100km^2), 常把球面投影面看作平面, 这样地面点在投影面上的位置就可以用平面直角坐标系来确定。测量工作中采用的独立平面直角坐标系规定: 南北方向为纵轴 X , 向北为正; 东西方向为横轴 Y , 向东为正; 如图 1.7 所示, 将中心点 C 沿铅垂线投影到大地水准面上的 c 点, 用过 c 点的切平面来代替水准面, 在切平面上建立的测区平面直角坐标系 XOY 称为独立平面直角坐标系, 其坐标原点选在测区西南角处, 使测区内坐标值均为正值, 将测区内任一点 P 沿铅垂线投影到切平面上得 p 点, 通过测量, 计算出的 p 点坐标 (x_p, y_p) 就是 P 点在独立平面直角坐标系中的坐标。

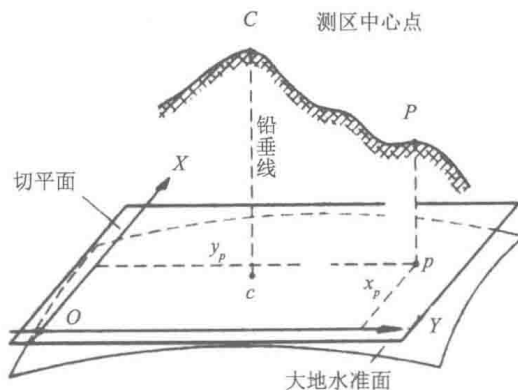


图 1.7 独立平面直角坐标系

1.3.4 高程系统

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，简称高程，通常用 H 加点名作下标表示。如图 1.8 中， A 、 B 两点的高程表示为 H_A 、 H_B 。高程系是一维坐标系，它的基准是大地水准面。1956 年我国采用青岛大港验潮站 1950~1956 年共 7 年的潮汐记录资料推算出的大地水准面，以其为基准引测出水准原点的高程为 72.289 m，以该大地水准面为高程基准建立的高程系称为 1956 年黄海高程系。

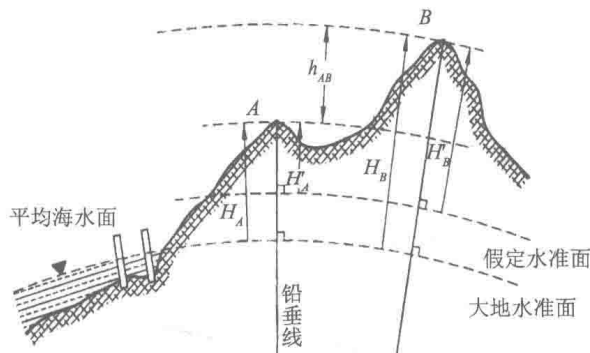


图 1.8 高程及高差的定义

20 世纪 80 年代，我国又以青岛大港验潮站 1953~1977 年共 25 年的潮汐记录资料推算出的大地水准面为基准引测出水准原点的高程为 72.260 m，以这个大地水准面为高程基准建立的高程系称为 1985 国家高程基准。

在局部地区，当无法知道绝对高程时，也可假定一个水准面作为高程起算面，地面点到假定水准面的垂直距离，称为假定高程或相对高程，通常用 H' 加点名作下标表示。图 1.8 中， A 、 B 两点的相对高程表示为 H'_A 、 H'_B 。

地面两点间的绝对高程或相对高程之差称为高差，用 h 加两点点名作下标表示，如 A 、 B 两点高差为

$$h_{AB} = H_B - H_A = H'_B - H'_A \tag{1.8}$$

同一点高程随着高程基准面的不同而变化，但是两点间高差不管基准面如何，其值为固定值，且在比较高差时，两点必须基于同一基准面。

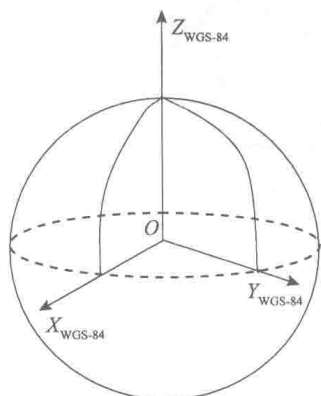


图 1.9 WGS-84 大地坐标框架

1.3.5 WGS-84 坐标系

1987 年 1 月 10 日开始采用的 1984 世界协议大地坐标 (world geodetic system) 是由美国国防部研制的。其几何定义为：原点位于地球质心， Z 轴指向国际时空局 BIH 于 1984 年定义的协议地球极 (conventional terrestrial pole, CTP) 方向， X 轴指向 BIH1984 零子午面和 CTP 赤道的交点， Y 轴按构成右手坐标系取向，如图 1.9 所示。同时对应的有 WGS-84 椭球，其主要计算参数见表 1.2。

表 1.2 地球椭球和参考椭球的基本几何参数

| 参数名称 | 地球椭球 | | 参考椭球 | |
|----------------|-------------------|------------------|-------------------|--|
| | WGS-84 | 1980 西安坐标系 | 1954 北京坐标系 | |
| 长半轴 a/m | 6378137 | 6378140 | 6378245 | |
| 短半轴 b/m | 6356752.3142 | 6356755.2882 | 6356863.0188 | |
| 扁率 α | 1/298.257223563 | 1/298.257 | 1/298.3 | |
| 第一偏心率平方 e^2 | 0.00669437999013 | 0.00669438499959 | 0.006693421622966 | |
| 第二偏心率平方 e'^2 | 0.006739496742227 | 0.00673950181947 | 0.006738525414683 | |

1.3.6 2000 国家大地坐标系

经国务院批准,我国自 2008 年 7 月 1 日起,启用 2000 国家大地坐标系。2000 国家大地坐标系为地心坐标,是采用国家测绘地理信息局、总参测绘局、国家地震局等多个部门的对地观测结果联合平差得到的。

国家大地坐标系的定义包括坐标系的原点、3 个坐标轴的指向、尺度及地球椭球的 4 个基本参数的定义。2000 国家大地坐标系的原点为包括海洋和大气的整个地球的质量中心;2000 国家大地坐标系的 Z 轴由原点指向历元 2000.0 的地球参考极的方向,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,定向的时间演化保证相对于地壳不产生残余的全球旋转; X 轴由原点指向格林尼治参考子午线与地球赤道面(历元 2000.0)的交点; Y 轴与 Z 轴、 X 轴构成右手正交坐标系。2000 国家大地坐标系采用的地球椭球参数的数值为长半轴 $a=6378137m$;扁率 $f=1/298.257222101$;地心引力常数 $GM=3.986004418 \times 10^{14}m^3/s^2$;自转角速度 $\omega=7.292115 \times 10^{-5}rad/s$ 。

1.4 地球曲率对测量工作的影响

当测区范围较小时,可忽略地球曲率的影响,将大地水准面近似当作水平面看待。下面讨论用水平面代替大地水准面对距离、高差和角度的影响,以便给出水平面代替水准面的限度。

如图 1.10 所示,设地面 C 为测区中心点, P 为测区内任一点,两点沿铅垂线投影到大地水准面上的点分别为 c 点和 p 点。过 c 点作大地水准面的切平面, P 点在切平面上的投影为 p' 点。图中大地水准面的曲率对水平距离的影响为 $\Delta D = D' - D$,对高程的影响为 $\Delta h = pp'$ 。

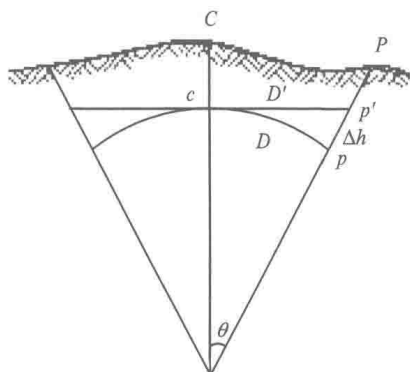


图 1.10 切平面代替大地水准面的影响

1.4.1 地球曲率对水平距离测量的影响

由图 1.10 可知：

$$\Delta D = D' - D = R \tan \theta - R\theta = R(\tan \theta - \theta) \quad (1.9)$$

式中， θ 为弧长 D 所对的圆心角，以弧度为单位； R 为地球的平均曲率半径。

将 $\tan \theta$ 按级数展开并略去高次项，得

$$\tan \theta = \theta + \frac{1}{3}\theta^3 + \dots \approx \theta + \frac{1}{3}\theta^3 \quad (1.10)$$

结合式 (1.9) 和式 (1.10)，并顾及 $\theta = \frac{D}{R}$ ，得

$$\Delta D = R \left\{ \left(\theta + \frac{1}{3}\theta^3 \right) - \theta \right\} = R \frac{\theta^3}{3} = \frac{D^3}{3R^2} \quad (1.11)$$

$$\frac{\Delta D}{D} = \frac{D^2}{3R^2} \quad (1.12)$$

以不同的 D 值代入式 (1.12)，求出距离误差 ΔD 及其相对误差 $\Delta D/D$ ，列于表 1.3。

表 1.3 切平面代替大地水准面的距离误差及其相对误差

| 距离 D/km | 距离误差 $\Delta D/\text{mm}$ | 距离相对误差 $\Delta D/D$ |
|------------------|---------------------------|---------------------|
| 10 | 8 | 1/120 万 |
| 25 | 128 | 1/20 万 |
| 50 | 1027 | 1/4.9 万 |
| 100 | 8212 | 1/1.2 万 |

由表 1.3 可知，当距离 D 为 10 km 时，所产生的相对误差为 1/120 万，相当于每千米的误差为 0.8 mm，这样小的误差，即使是精密量距，也是允许的。因此，在以 10 km 为半径的圆面积之内进行距离测量时，可以用切平面代替大地水准面，而不必考虑地球曲率对距离的影响。

1.4.2 地球曲率对水平角的影响

由球面几何学可知，球面三角形内角和与平面三角形内角和之差为球面角超 ε ，它的大小与图形面积成正比。其公式为

$$\varepsilon = \rho \frac{P}{R^2} \quad (1.13)$$

式中， P 为球面三角形面积； R 为地球半径； $\rho \approx 206265''$ 。当 $P = 100\text{km}^2$ 时， $\varepsilon = 0.51''$ ，这表明，对于 100km^2 范围内的水平角测量工作，地球曲率对其影响只有在最精密的测量时才考虑，一般情况下不予考虑。