

测量学

(第2版)

李玉宝 主编



CELIANGXUE



西南交通大学出版社
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

测 量 学

(第 2 版)

主编 李玉宝

编委 张文君 王卫红 唐一平 徐 兵 兰济昀
青 盛 周 波 宋怀庆 杨国强 肖荣健

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

内容提要

本书系统介绍了测量学的基本概念、理论、技术与方法,侧重当前技术条件下的工程应用。全书分 12 章,内容包括角度、长度、高差测量,测量误差基础理论,工程控制测量,大比例尺地形测量等测量学基础内容。在保证测量学基础理论系统性、完整性的基础上,力图用通俗易懂的语言,以当前工程实践符合的测量技术方法,详细地阐述测量学的工程应用问题。

本书内容宽厚,体系完整,用较多的篇幅介绍了测量新技术在工程实践中的应用,内容详尽,不仅适合作为测绘专业基础课程或非测绘专业测量专业课程教材使用,也可供从事测绘工程专业工作的人士参考。

图书在版编目(CIP)数据

测量学 / 李玉宝主编. —2 版. —成都: 西南交通大学出版社, 2010.2

ISBN 978-7-5643-0591-8

I. ①测… II. ①李… III. ①测量学 IV. ①P2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 027547 号

测 量 学

(第 2 版)

主编 李玉宝

*

责任编辑 刘婷婷

封面设计 本格设计

西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段 111 号 邮政编码: 610031 发行部电话: 028-87600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

成都蜀通印务有限责任公司印刷

*

成品尺寸: 185 mm×260 mm 印张: 18.375

字数: 456 千字 印数: 6 001—9 000 册

2006 年 8 月第 1 版 2010 年 2 月第 2 版 2010 年 2 月第 3 次印刷

ISBN 978-7-5643-0591-8

定价: 32.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

第2版前言

《测量学》第1版于2006年8月出版,2008年1月第2次印刷。3年多来,《测量学》被多所高校的测绘工程、地质工程、采矿工程、城市规划、土木工程等专业选作测绘学教材,迄今已发行了6000册。读者在对其内容系统完整、贴近工程实际的特点予以充分肯定的同时,也指出了许多不足和错误,这需要增补和修改。借此机会,编者深表谢意。另外,随着近年来测绘科技的迅猛发展,书中的部分内容已与生产实践不相适应,也需要调整。基于以上两点考虑,本书编者修订出版了第二版。

第二版对全书作了系统全面的修订、增补。纠正了读者指出及编者在教学实践中发现的一些错误,删除了部分已经不再适用的内容,并针对重要的内容,在表述上作了较多的修改。

西南科技大学测绘工程教研室全体教师参与了第二版的修订工作,具体分工如下:第一章:李玉宝;第二章:杨国强、肖荣健;第三章:周波;第四章:青盛、宋怀庆;第五、六、七章:兰济昀;第八章:青盛;第九章:杨国强、李玉宝;第十章:宋怀庆、李玉宝;第十一章:肖荣健;第十二章:宋怀庆。全书由李玉宝校对定稿。

在本书编写及修订过程中,编者查阅了大量的参考文献,并引述了其中部分资料,在此谨向有关作者表示衷心的感谢!

尽管在第二版出版过程中,编者对全书内容做了系统修订,并为此付出了艰辛的劳动,但受专业水平局限,书中不当之处在所难免,在此恳请广大读者批评指正。

编 者

2010年1月

前 言

自 20 世纪 80 年代以来,随着计算机、光电测距、空间卫星定位、遥感等高新技术的广泛应用,测绘理论与技术产生了很大的变革,测量仪器也由单纯的光学设备转变为综合了光学、机械、电子和计算机技术的数字化测绘设备。测量技术的进步不仅使得设备操作更方便、成果精度更高,也降低了劳动强度、提高了作业效率,从根本上改变了测绘工作的面貌,使得许多传统的测量方法已经不再适用。在这一背景下,根据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,本着面向测绘工程实践,充分反映测绘新技术应用的原则,本教材编写力图做到基础理论的系统性和技术方法的先进性、实用性的统一,侧重于测量技术在各类工程建设中的应用,使之成为一本有利于能力培养和知识面拓展,符合目前高等教育改革潮流,不仅能用于测绘工程专业基础课程,也可作为地质工程、采矿工程、交通工程、土木工程等诸多专业使用的测量学专业课程教材。

本教材由西南科技大学测绘工程教研室集体编写。其中第一章、第三章、第十二章由王卫红编写,第二章、第四章、第八章由唐益平编写,第五章、第六章由李玉宝编写,第九章、第十章由徐兵编写,第七章、第十一章由张文君编写。李玉宝担任主编,并完成了书稿的统校工作。

本教材在编写过程中,参阅了大量的文献,并引用了其中的一些资料,为此谨向有关的作者表示衷心的感谢!

为本教材的出版,各位编写者虽然倾注了极大的热情,付出了艰辛的劳动,但是受学识水平局限,错误在所难免,在此恳请广大读者及专家学者不吝指正,以便修订时更正。

编 者

2006 年 7 月 8 日

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 测量学的研究对象	(1)
第二节 测绘学的发展历史	(3)
第三节 地球的形状和大小	(4)
第四节 测量坐标系的建立	(7)
第五节 测量工作的主要内容和基本原则	(10)
第六节 用水平面代替水准面的限度和本课程的研究对象	(12)
第二章 角度测量	(15)
第一节 角度测量的原理	(15)
第二节 光学经纬仪	(16)
第三节 经纬仪的检验与校正	(24)
第四节 水平角观测	(33)
第五节 竖直角观测	(36)
第六节 电子经纬仪简介	(40)
第七节 水平角测量的误差	(41)
第三章 距离测量与直线定向	(44)
第一节 概 述	(44)
第二节 钢尺量距	(44)
第三节 视距测量	(50)
第四节 光电测距	(53)
第五节 直线定向	(64)
第四章 高程测量	(67)
第一节 水准测量原理	(67)
第二节 水准测量的仪器和工具	(69)
第三节 水准仪的使用	(72)
第四节 自动安平水准仪	(74)
第五节 数字水准仪简介	(77)
第六节 水准测量的实施及成果整理	(77)
第七节 水准仪的检验与校正	(85)

第八节	水准尺的检验	(91)
第九节	水准测量误差的主要来源	(91)
第十节	三角高程测量	(93)
第五章	测量误差理论基础	(98)
第一节	测量误差的概念	(98)
第二节	偶然误差的统计规律性	(100)
第三节	偶然误差的分布	(101)
第四节	衡量精度的数字指标	(103)
第五节	精度数字指标的实际计算方法	(104)
第六节	误差传播定律	(105)
第七节	误差传播定律应用	(107)
第八节	相对精度指标——权	(109)
第九节	单位权中误差	(111)
第十节	测量平差原理	(112)
第十一节	误差理论基础应用实例	(114)
第六章	高斯投影简介	(118)
第一节	概述	(118)
第二节	地球椭球的基本元素及其相互关系	(118)
第三节	椭球面上的坐标系——大地坐标系	(119)
第四节	高斯投影概述	(120)
第五节	高斯投影原理	(121)
第六节	观测值的归算投影及处理	(122)
第七章	小区域控制测量	(124)
第一节	控制测量概述	(124)
第二节	导线测量	(126)
第三节	交会定点	(134)
第四节	GPS 测量	(138)
第八章	地形图的测绘和应用	(142)
第一节	地形图的基本知识	(142)
第二节	大比例尺地形图测绘	(159)
第三节	数字测图概述	(179)
第四节	航空摄影测量简介	(183)
第五节	地形图的应用	(185)
第九章	建筑工程施工测量	(193)
第一节	概述	(193)
第二节	施工控制网的建立	(193)

第三节	施工放样的方法·····	(196)
第四节	民用建筑施工测量·····	(202)
第五节	工业厂房施工测量·····	(205)
第六节	高层建筑施工测量·····	(207)
第七节	竣工总平面图的编绘·····	(210)
第八节	建筑限差及施工放样的精度·····	(211)
第十章	道路工程测量·····	(214)
第一节	道路工程测量概述·····	(214)
第二节	道路中线测量·····	(214)
第三节	道路曲线测设·····	(219)
第四节	线路纵、横断面测量·····	(226)
第五节	道路施工测量·····	(238)
第六节	桥梁工程测量·····	(240)
第七节	全球定位系统在道路工程测量中的应用·····	(244)
第十一章	工程变形测量·····	(246)
第一节	工程变形测量概述·····	(246)
第二节	变形破坏机理概述·····	(248)
第三节	变形观测的精度要求与频率·····	(251)
第四节	变形监测工作的实施·····	(253)
第五节	观测对象的移动与变形衡量指标·····	(255)
第六节	变形监测控制网的布设原则·····	(257)
第七节	垂直变形监测控制点与工作点·····	(259)
第八节	水平变形监测控制网·····	(264)
第九节	变形控制网的有关问题·····	(267)
第十节	变形观测成果整理与分析·····	(270)
第十二章	现代测绘技术及其发展趋势·····	(276)
第一节	全球定位系统·····	(276)
第二节	数字地图与电子地图·····	(280)
第三节	测绘与深空探测·····	(282)
第四节	测绘发展趋势·····	(283)
参考文献 ·····		(285)

第一章 绪 论

第一节 测量学的研究对象

一、测量学的定义

从远古时期开始，人类一直在不断地问自己：“我在哪里？”“我要去哪里？我要去的地方有多远？在哪个方向？”“我去过哪里？”“我怎样才能找到回家的路？”人类文明从认识自然发展到改造自然，要建造房屋、拦河筑坝、修路架桥等，又必须弄清楚：“在哪里进行？”所有这些问题，都可以归结为“定位”。测量学就是研究定位——确定地面点位在某一参照系中的位置的科学。

人类在从事生产活动的过程中必然要涉及测量科学。原始人在外出打猎时用树枝和石头作标记来确保自己不会迷路；距今大约 5 000 年前，古巴比伦人开始用地图来描绘周围的地理环境；古埃及法老通过测量土地面积确定征税数额；我国《夏本记》记载了大禹治水时的详细过程，称禹“左准绳，右规矩，载四时，以开九洲，通九道，陂九泽，度九山”。“准”、“绳”分别是取平和取直的工具；规矩即测量高低远近的工具，四时可能指确定方向的仪器。

由于测量定位成果用图形表示既形象又直观，因而常常通过绘制地形图来表示，测量学又因此被称为测绘学。随着科学技术的不断发展，测绘学已经成为一门根深叶茂的大学科，其应用范围由建立定位参照系统（各类地理坐标系）及为国防建设、城市规划与建设、矿产开发、交通建设等部门提供精确定位服务，扩展为人们出行提供实时导航定位服务，服务对象也由专业人士扩展为广大人民群众。现代定义是：研究与地球有关的基础空间信息的采集、处理、显示、管理、利用的科学与技术。要特别指出的是，在建设“数字地球”、“数字中国”、“数字省区”等项目中首先要构建一个用于集成各类自然、社会、经济、人文、环境等方面信息的统一地理空间载体，即建立国家空间数据基础设施。当前，测绘学的主要任务之一是为建立国家空间数据基础设施服务。

二、测绘学的分支学科

1. 大地测量学

如果研究对象是地球表面上的一个较大的区域甚至整个地球，就必须考虑地球的曲率；这种测绘工作属于大地测量学的范畴。传统大地测量的任务就是建立国家大地控制网，测定地球的形状、大小，研究关于地球重力场的理论、技术和方法。大地控制网是为研究地球有关的各种科学服务的，其作为大范围空间定位的统一参照系统，也是施测地形图的重要依据。现今大地测量被赋予了更广泛的任务，它不仅研究地球几何形状和重力场，以及它们的时间性变化和地球动力学现象（极运动、潮汐、板块运动、平均海面升降等），而且也研

究月球和太阳系其他行星表面和重力场,研究人造卫星的轨道运动。大地测量学可以分为数学大地测量学、物理大地测量学、卫星大地测量学、大地动力学、大地天文学、惯性测量和导航学等。数学大地测量学研究地球上点、线、面和空间的数学表示,以几何及微分几何为基础研究大地测量;物理大地测量学研究位(potential)理论、地球重力场、大地水准面的确定、大地边界值问题,以及地球内部结构的推定;卫星大地测量学主要利用人造卫星研究地球形状及重力场,人造卫星轨道的确定,以及全球性海面之监测;大地动力学研究地壳变动、板块运动、地球旋转和潮汐变化等;大地天文学主要研究天文经纬度和方位角的测定,以及时间系统;惯性测量和导航学主要利用惯性导航系统研究地球重力场的测定,导航和载体姿态角的决定。

2. 遥 感

遥感是指以人造卫星、宇宙飞船、飞机、热气球、车、船、活动高架等为遥感平台,通过传感器拍摄或扫描得到遥感图像或摄影像片来研究地表形状与大小的科学。根据遥感平台的不同可分为地面遥感、航空遥感、航天遥感、航宇遥感;根据传感器探测波段的不同可分为紫外遥感、可见光遥感、红外遥感、微波遥感、多波段遥感。遥感技术具有下列特点:①大面积的同步观测。如一张美国的 Landsat 卫星影像,覆盖面积为 $34\,225\text{ km}^2$,在 5~6 分钟内即可扫描完成。②时效性。遥感探测,尤其是空间遥感探测,可以在短时间内对同一地区进行重复探测,发现地球上许多事物的动态变化。③数据的综合性和可比性。遥感获得的地物电磁波特性数据综合反映了地球上许多自然、人文信息,同时由于遥感的探测波段、成像方式、成像时间、数据记录等均可按要求设计,因此其获得的数据具有同一性和可比性。④经济性。与传统的方法相比,遥感可以大大地节省人力、物力、财力和时间。由于上述特点,遥感技术在资源调查与应用、环境监测评价、全球宏观研究等领域得到了广泛的应用。随着遥感处理软件的进一步普及和高分辨率遥感影像价格的下降,遥感也日益成为中、小比例尺地形图成图的主要方法之一。

3. 工程测量学

在测绘界,人们把工程建设中的所有测绘工作统称为工程测量。工程测量包括在工程建设勘测、设计、施工和管理阶段所进行的各种测量工作,它是直接为各类工程项目的建设以及其运营管理中一系列工作服务的。可以这样说,没有测量工作为工程建设提供数据和图纸,并在施工过程中实现定位测量,任何工程建设都无法顺利进展并完成。工程测量按其工作顺序和性质分为:勘测设计阶段的工程控制测量和地形测量;施工阶段的施工测量和设备安装测量;竣工和管理阶段的竣工测量、变形观测及维修养护测量等。按工程建设的对象分为:建筑工程测量、水利工程测量、铁路测量、公路测量、桥梁工程测量、隧道工程测量、矿山测量、城市市政工程测量、工厂建设测量以及军事工程测量、海洋工程测量等。因此,工程测量工作遍布国民经济建设和国防建设的各个部门和各个方面。

4. 地图制图学

地图是测量成果的主要表现手段之一。地图制图学主要研究模拟地图和数字地图的基本理论、设计、测绘和印制,包括地图的基本特征、表示内容、地图投影的理论与方法、地图数据和地图符号、地图图形、色彩和注记的设计、制图综合、地图的编辑与编绘、地图的出版印刷与分析应用等。

三、本课程的性质和地位

测量学是一门涉及面较广, 极具应用价值的科学技术。在各类工程的规划、勘察设计、施工建设、管理运营阶段都离不开测量学。现代社会中, 城市化及交通网络的建设, 均要按规划进行。任何重大工程建设项目, 都必须依据测量学提供的地形图和有关的地理信息精心规划设计, 并报主管部门审批。地形图和有关的地理信息是优化城市建设规划、有效利用土地、提高规划建设效益、促进现代化建设必不可少的重要资料。任何重大基本建设项目的规划设计, 都必须对所在区域的地势高低平斜、河流的宽窄深浅、已有建筑物的性质与分布做详细测绘, 获取大量基本地理信息, 才能顺利进行。在工程建设施工阶段, 测量工作在设计公路中心线的标定, 设计建筑物实际位置的确定, 大型建筑构件的精确安装, 地下隧道的准确贯通等项目中发挥着不可替代的作用。测量工作也是房产、地产管理的重要手段, 是检验工程质量和监视重要交通、土木工程设施安全营运的重要措施。

本课程是测绘专业学生重要的专业基础课, 也是地理信息系统、地质、采矿、环境、土木、交通等工程建设专业重要的专业课程之一。

第二节 测绘学的发展历史

测绘学是长期以来人类在认识自然、改造自然的生产实践中, 创造、发展起来的最古老的科学技术之一。历代王朝的统治者, 在战事运筹、疆域划分、水利建设、交通运输等有关国家兴亡的大计筹划, 都靠测绘资料了解国情和认识世界, 为其实施决策提供技术保证。不少古代杰出科学家们的光辉业绩和伟大的发明创造都与测绘有关, 如我国秦代的刘徽编著的世界巨著《九章算术》中就有一章专门介绍测绘理论。《墨经》、《周髀》、张衡地动说、祖冲之的“密率”等创立了古代测绘学的理论基础。2 000 多年前, 随着黄河流域堤防和灌溉工程的兴建, 产生了原始的农田水利地图测绘。

保存至今的地图, 在埃及和巴比伦已经有 5 500 年, 在中国也有 2 200 年。我国西晋的裴秀和古希腊的托勒密奠定了古代地图学的基石, 15 世纪制作的《郑和航海图》、罗洪先的《广舆图》、荷兰人墨卡托的《世界地图集》, 都反映了 16 世纪前东西方地图学的成就。其后, 采用经纬度制图法的《海国图志》和《历代舆地沿革险要图》等, 是我国近代地图的代表作。这些成果都建立在测量学、地理学、数学、天文学等学科的成就之上。

现代测绘科学的发展主要是从 17 世纪初逐步开始的。当时资产阶级革命兴起, 使生产力得到解放, 促进了科学技术的快速发展。17 世纪初, 望远镜应用于天象观测, 这是测绘科学发展史上一次较大的变革, 从此以后望远镜普遍应用于各种测量。至 1668 年, 已有放大倍率为 40 倍的望远镜出现, 使在可见光谱范围内进行测量工作大为方便, 并且提高了测量成果的精度。1617 年三角测量方法开始应用, 1683 年法国进行了弧度测量, 证明地球确实是两极略扁的椭球体。此后, 世界测绘科学无论在测量理论、测量方法及测绘仪器各方面都有不少创造发明。其中德国著名的数学家、天文学家、物理学家高斯于 1794 年提出了最

小二乘理论,对测量数据的处理理论产生了深远的影响,至今仍然是处理测绘数据最重要的理论基础;以后又提出了横椭圆柱投影学说,利用该投影方法建立的高斯直角坐标系是目前最常用的测绘坐标系。1899年摄影测量的理论研究得到发展,1903年飞机的发明,促进了航空摄影测量的发展,从而使测图工作很大一部分可以由野外转移到室内利用仪器描绘成图,相应的减轻了测图工作的劳动强度,特别有利于进行高山地区的测绘工作。

20世纪50年代前后开始,不少新的科学技术迅速发展,如电子学、信息论、相干光理论、电子计算机、空间科学技术等。测绘工作者密切关注相关科学的发展,并及时地将它们应用到测绘科学中,推动了测绘科学的发展。如1947年开始研究利用光波进行测距,60年代利用氦氖激光器作为光源的电磁波测距仪问世;20世纪40年代出现了自动安平水准仪,1990年研制出的数字水准仪,实现了读数与记录的全自动化;1968年生产了电子经纬仪,它采用光栅、光学编码来代替刻度分划线,以电信号方式获得测量数据,并可自动记录在存储载体上,若接通电子计算机还可立即根据观测数据算出所需成果;随后又在此基础上推出了测距、测角一体化的全能型测量仪器——全站仪。1957年第一颗人造地球卫星上天后,人们开始进行人造卫星大地测量研究,这种新技术具有不受气候的影响,可全天候观测,速度快、精度高,对洲际之间、岛屿和岛屿之间及岛屿和大陆之间的联测既快速又准确的优势。20世纪70年代,通过人造卫星应用黑白、单光谱段、多光谱段及彩色红外等拍摄地球的照片,使航天遥感技术有了广泛发展和应用。由于卫星运行的高度比飞机高几十倍到几百倍,故视野宽广,覆盖面积大,可以对同一地区重复摄影,便于监视自然现象变化,并且不受地理及气候条件的限制,对深山、荒漠及海洋都能进行有效的勘测。20世纪70年代开始发射的GPS全球定位系统卫星,在90年代完成了24颗卫星的发射任务。只要在地面待测点安置接收卫星信号的测量设备,可很快地确定地面点的位置。现在,GPS定位已深入人们的日常生活,各类车载、手持GPS定位仪精度越来越高,价格越来越便宜,成为人们出行的有力工具。

人类大约用了2000年的时间,才大体搞清楚地球上海陆的轮廓,又花费了300年的时间才测绘出陆地的30%。20世纪上半叶,航空摄影测量只用了50年的时间就测绘了陆地的70%,而20世纪下半叶,卫星遥感、全球定位系统、地理信息系统和卫星通讯网络等一系列高新技术的进步,已经彻底改变了地图的生产过程。“奋进号”载人航天飞船只用了11天的时间就获取了覆盖全球80%的图像数据,现代测绘科学技术的巨大进步因此可见一斑。

“经天纬地,开路先锋”是对测绘工作者的真实写照,可以肯定,进入21世纪的人类发展史,测绘学会扮演越来越重要的角色。

第三节 地球的形状和大小

一、大地水准面和大地体

测量工作在地球表面上进行,学习本课程,必须先了解地球的形状和大小。

最初由于人的视野非常有限,无法看到地球的真实表面,认为地球是方的或者扁平的。

经历了若干世纪艰难的认识过程，公元前 450 年，希腊学者费罗劳斯，第一个提出大地是一个球。直到公元 1522 年，葡萄牙航海家麦哲伦第一次成功地环绕地球一周，证实了地球是球形的假说。

地球的自然表面是不规则的，分布着高山、高原、洼地、盆地、平原等千姿百态的地貌。世界上最高的山峰是位于我国境内的珠穆朗玛峰，2005 年 5 月我国大地测量工作者测得其高程为 8 843.44 m；而在太平洋西部的马里亚纳海沟是世界上最深的海沟，深达 11 022 m。但是地球表面的高低起伏，相对于地球平均半径 6 371 km 是很小的。由于地球表面除了大约 29% 的面积是陆地外，大约 71% 的面积是海洋，所以在研究地球的形状和小时，我们可以把地球看做是一个被海水包围的球体，即假想有一个静止的海水面，向陆地延伸而形成一个封闭的曲面，以此静止海水面包围的地球体作为地球的形状。

地球上的任一质点，受地球引力影响而不脱离地球。同时，地球又在不停地自转，使质点受到离心力的作用，因此，一个质点实际上所受到的力是地球引力和离心力的合力，即重力（见图 1.1）。在测量外业观测中，我们很容易得到重力线方向：用一根细绳系一个垂球，细绳在垂球的重力作用下下垂形成的方向线就是该点的重力线方向。

根据物理学知识可知，等位面处处与产生势能的力方向垂直。静止的水面因为处处都与重力方向（也叫做铅垂线方向，简称垂线方向）垂直，水不会流动，所以是等位面，也称为水准面。水准面有无穷多个，其中设想为静止的海水面，称为大地水准面。大地水准面所包裹的形体叫做大地体。

大地水准面的确定是一件非常复杂的工作，地球形状不规则，内部的质量分布不均匀，引起地面上各点的重力线方向产生不规则的变化。例如：在山岳附近，引力方向偏向山岳；在湖海附近，引力方向偏离湖海；在金属矿藏附近，引力方向偏向矿藏，等等（见图 1.2）。

由于水准面都是处处与重力线方向正交的，所以水准面是不规则的曲面。长期以来，各国的大地测量工作者进行了大量的重力测量工作和海水面的观测工作（后者称为验潮），但是到目前为止，还没有得到一个被全球所公认的大地水准面。各国所采用的大地水准面，实际上只是最接近其所在区域平均海水面的水准面。

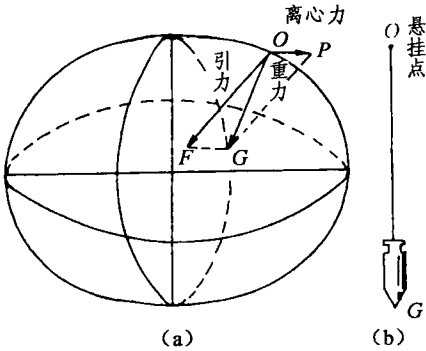


图 1.1 重力与重力线

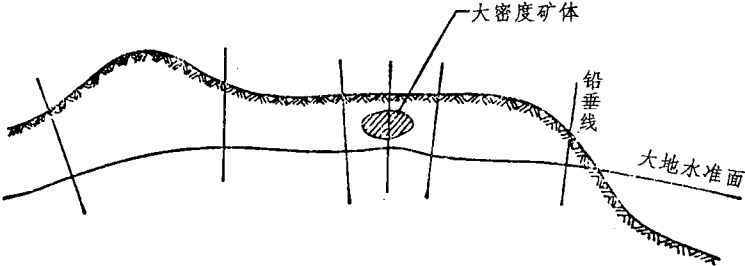


图 1.2 重力线方向的不规则变化

二、总椭球体与 WGS84 椭球体

大地水准面是不规则的曲面，无法在这个表面上进行测量结果的计算，因此必须寻找一个与大地体非常接近的，能用简单的数学模型表示的规则形体来代替大地体。

长期的测量实践证明，地球的形体与一个旋转椭球体极为接近。旋转椭球体是一个椭圆绕其短轴 NS 旋转而成的（见图 1.3），也就是说包含旋转轴 NS 的平面与椭球面相截的线是一个椭圆，而垂直于旋转轴的平面与椭球面相截的线是一个圆。椭球体的基本元素是：长半轴 a ，短半轴 b ，扁率 $\alpha = \frac{a-b}{a}$ 。

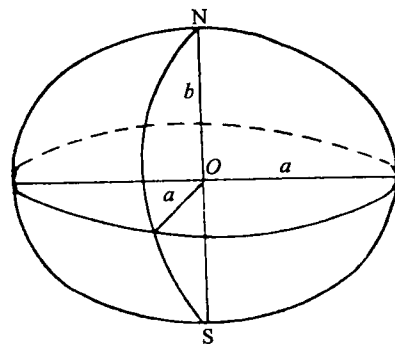


图 1.3 旋转椭球体

与大地体最接近的地球椭球，叫做总地球椭球体，简称总椭球体或总椭球，其表面叫做总椭球面。总椭球体必须满足以下几个几何条件：

- (1) 总椭球体的中心应与地球质心重合；
- (2) 总椭球体的旋转轴应与地球自转轴重合，过椭球中心垂直于旋转轴的平面应与地球赤道面重合；
- (3) 总椭球体的体积应与大地体的体积相等，大地水准面与总椭球面之间的距离平方和最小；
- (4) 总椭球体的总质量应等于地球的总质量；
- (5) 总椭球体的旋转角速度应等于地球的旋转角速度。

1984 年，国际大地测量与地球物理联合会通过的模拟地球的椭球体——WGS84 椭球体，是目前应用比较广泛的总椭球体，全球定位系统 GPS 观测采用的就是该椭球体。

三、参考椭球体

推求在全球范围内与大地水准面符合最好的总椭球体，需要运用全球范围内的观测资料，这是很难做到的。二百多年来，世界上主要大国的测量学者，都是各自采用与本国或本地区的大地水准面符合较好的椭球面，作为测量计算的基准面。这种椭球体仅采用本国或本地区的天文、大地和重力测量资料推算，因而只能做到椭球面与所用资料区域的局部大地水准面密切符合，测量学上称这样的椭球体为参考椭球体，简称参考椭球。

显而易见，理论上总椭球只有一个，而参考椭球可有无数个，它们都不尽相同。如果各个国家或地区的测量成果需要进行交流、互用，应该统一采用总椭球面作为测量计算的参考面。但是，一方面，各个国家和地区为了保证原有测量成果的延续利用；另一方面，一般来说总椭球面与所在国家或地区的大地水准面符合程度不如参考椭球面好，所以许多国家和地区仍继续沿用参考椭球面。

我国 1952 年前采用海福特椭球，1953 年起改用克拉索夫斯基椭球，1978 年后开始采用 1975 年由国际大地测量与地球物理联合会（IUGG）颁布的椭球体（椭球元素见表 1-1 所示），并以此建立了我国新的大地坐标系——1980 年国家大地坐标系（C80）。

表 1-1 几种椭球体的椭球元素比较

椭球体	年代	国家或机构	长半轴	短半轴	1/扁率
海福特	1909	美 国	6 378 388	6 356 912	298.3
克拉索夫斯基	1940	苏 联	6 378 245	6 356 863	298.3
1975 国际椭球	1975	国际大地测量与 地球物理联合会	6 378 140	6 356 755	298.257 221 01
WGS84	1984	国际大地测量与 地球物理联合会	6 378 137.000	6 356 752.314	298.257 223 563

第四节 测量坐标系的建立

测量的本质工作是定位，定位需要一个基准，即需要一个特定的坐标系。在不同的国家和地区，对于不同精度、等级、范围的测量，可能采用不同的坐标系。

一、测量工作的基准面和基准线

要确定一个点的空间位置，可以通过确定这个点在某个基准面上的投影以及该点沿基准线到该基准面的距离来进行。

上节已经提到，在野外进行测量时，很容易得到重力线方向，因此，测量外业工作采用的基准面和基准线分别是水准面和与之垂直的重力线。但是由于大地水准面形状不规则，不能作为内业计算的基准面，所以内业计算是采用总椭球面或参考椭球面作为基准面，采用与椭球面处处垂直的法线作为基准线。

采用不同的基准面和基准线，可以建立不同的坐标系来对地面点进行定位。在测量工作中，一般确定某点在基准面上的投影位置可以采用大地坐标、天文坐标和高斯平面直角坐标，而确定某点沿基准线到基准面的距离可以采用大地高和正高。大地坐标、天文坐标和平面直角坐标可以统称为坐标，而大地高和正高可以统称为高程。要确定一个空间点的位置，实际上就是要确定其坐标和高程。

二、大地坐标和大地高

在图 1.4 中，NS 为椭球的旋转轴，N 表示北极，S 表示南极。通过椭球旋转轴的平面称为子午面，而通过原英国伦敦格林尼治天文台的子午面称为起始子午面或首子午面。子午面与椭球面的交线称为子午圈、子午线或经线。通过椭球中心且与椭球旋转轴正交的平面称为赤道面，它与椭球面相截得到的曲线称为赤道。其他与椭球旋转轴正交，而

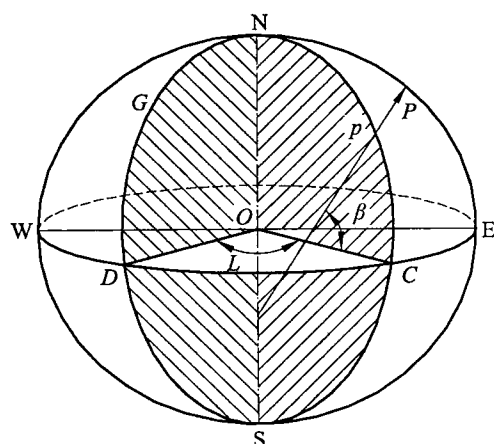


图 1.4 大地坐标

不通过球心的平面与椭球面相截所得曲线称为平行圈、纬圈或纬线。起始子午面和赤道面，是在椭球面上确定某一点投影位置的两个基本平面。在测量工作中，点在椭球面上的位置用大地经度 L 和大地纬度 B 表示。所谓某点（如 P 点）的大地经度，就是通过该点的子午面与起始子午面的夹角；如果在椭球面上的 P 点作一条法线（该法线与通过 P 点所作的椭球体的切平面垂直），大地纬度就是这条法线与赤道面的交角。由此可见，大地经度和大地纬度以椭球面作为基准面，以法线作为基准线，它们统称作大地坐标，表示了空间点在椭球面上的投影位置。

一般地面点不在椭球面上，则地面点沿过该点的法线到椭球面的距离，即以椭球面为基准面的高程，叫做大地高。

由于椭球面并不是物理曲面，而是抽象的数学曲面，在测量中无法实际得到某点的法线，因此，大地坐标和大地高都不能直接测量，而只能通过观测数据计算得到。

三、天文坐标和正高

用经度、纬度、大地高表示一点位置的大地坐标系是在球面上建立的，所以称为球面坐标系，也称为地理坐标，属于曲面坐标系统。

如前所述，大地坐标是不能直接测定的，实践中是以大地水准面和重力线代替椭球面和法线，采用天文测量的方法测定一个点的天文经度和天文纬度，然后借助于重力测量等资料，计算转化为大地经度和大地纬度。

天文经度和天文纬度定义与大地经度、纬度类似，不同的是基准面为大地水准面，基准线为重力线（铅垂线）。

地面点沿该点的重力线到大地水准面的距离，即以大地水准面为基准面的高程，叫做正高，也叫做绝对高程或海拔高度，简称海拔。如果不特别指出，我们通常所说的高程，都是指绝对高程。

在新中国成立之前，我国曾在不同时期以不同方式建立吴淞口、青岛和大连等地验潮站，得到不同的高程基准面。在新中国成立之后的 1956 年，我国根据基本验潮站应具备的条件，对以上各验潮站进行了实地调查和分析，于 1957 年确定青岛验潮站为我国基本验潮站。青岛验潮站建在地质结构稳定的花岗石上，以 1950 年至 1956 年 7 年间的潮汐资料所求的平均海水面作为我国的高程基准面，称之为“1956 年黄海高程系统”。此后由于观测数据的积累，黄海平均海水面发生了微小的变化，因此启用了新的高程系，即“1985 年国家高程基准”。青岛水准原点的高程，在 1956 年黄海高程系统中为 72.289 m，在 1985 国家高程基准中为 72.260 m。

如果某个测区无法与按国家高程点推算的已知高程联测，则只能求得地面点到某假定水准面的垂直距离，这样的垂直距离叫相对高程或假定高程。

四、平面直角坐标

大地坐标的基准面是椭球面，用大地坐标表示点位，不便于表示小范围内点的相对关系，加之椭球面上的计算工作非常复杂，所以大地坐标对于工程应用而言十分不便。工程应用中，测绘成果通常需要绘制在地图平面上，工程设计与计算也是在平面上进行的，所以需

要将大地坐标（曲面坐标）采用适当的地图投影换算成平面直角坐标。地图投影的方法有很多，测量工作中最常用的是高斯-克吕格投影，简称高斯投影，由此建立的平面直角坐标称为高斯平面直角坐标。

高斯投影的基本思想是：设想将截面为椭圆的一个柱面横套在旋转椭球外面，并与旋转椭球面上某一条子午线相切，同时使圆柱的轴位于赤道面内，且通过椭球中心，相切的子午线称为高斯投影面上的中央子午线（见图 1.5）。将旋转椭球面上的点投影到横椭圆柱面上，然后将椭圆柱面沿过南极、北极的母线剪开，展成平面，此平面即为高斯投影平面（见图 1.6）。

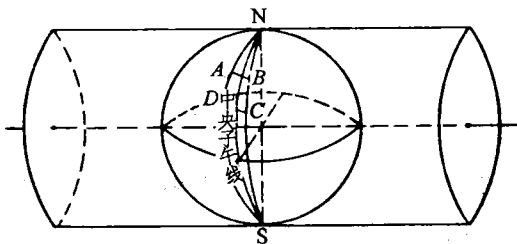


图 1.5 高斯投影

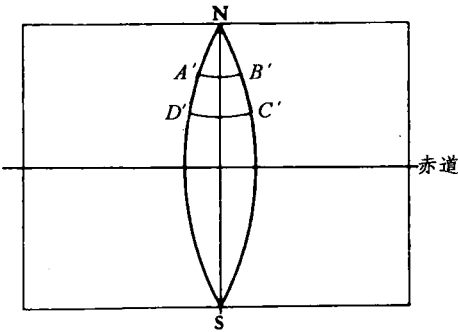


图 1.6 高斯投影平面

在高斯投影平面上，中央子午线投影后的长度不变，其余子午线的长度大于投影前的长度，离中央子午线愈远长度变形愈大。为使长度变形不大于测量能容许的范围，高斯投影采用将整个地球表面分作若干个投影带的方法，对长度变形的限制要求越高，投影带就划分越细。例如，6°带投影是从首子午线起每隔经度 6°为一带，自西向东将整个地球分成 60 个带，各带的带号 N 用阿拉伯数字表示。而 3°带投影是从东经 1°30′开始自西向东每隔 3°为一个投影带（见图 1.7），每个 3°带又可分做两个 1.5°带。

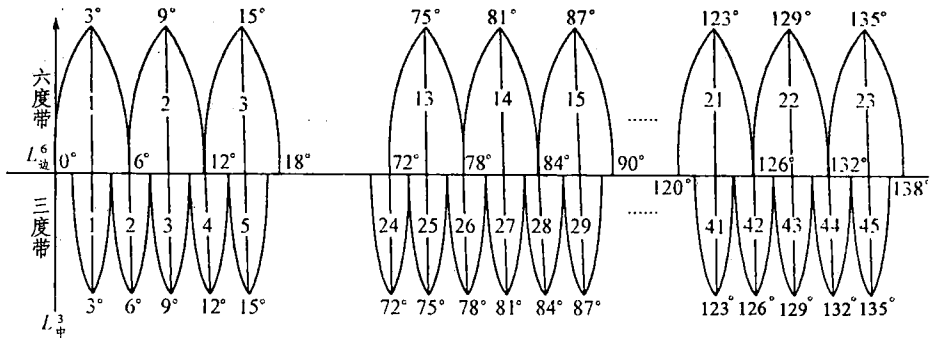


图 1.7 高斯投影的分带

在高斯平面直角坐标系中，以每一带的中央子午线的投影为直角坐标的纵轴 X ，向北为正，向南为负；以赤道的投影为直角坐标的横轴 Y ，向东为正，向西为负（见图 1.8）。为了避免负值，将每一带的坐标原点向西移 500 km，则每一点的横坐标均为正值。为了根据横坐标值能确定某一点位于哪一个带内，一般在横坐标前冠以带号，如 $y_a = 20\ 648\ 680.54\text{ m}$ 表示 A