

高等学校教材



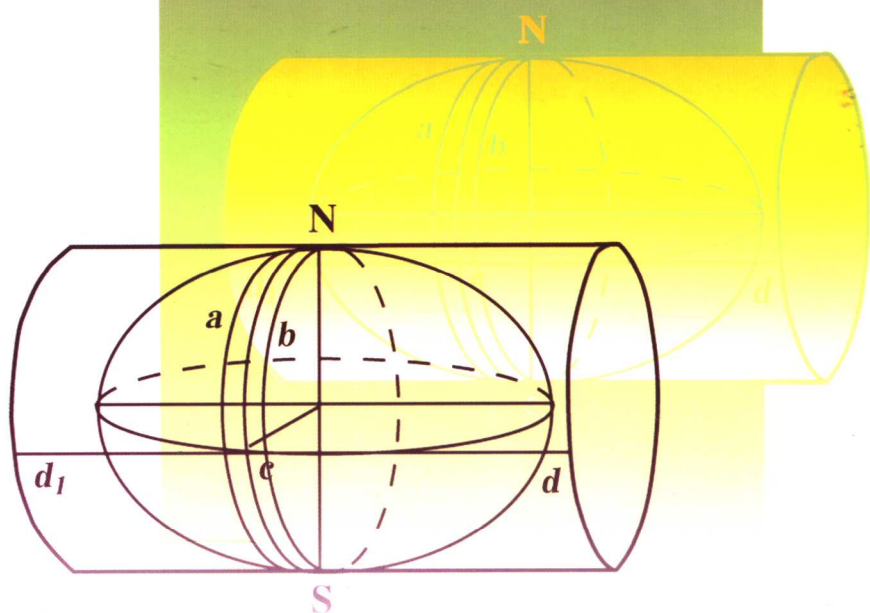
测绘科技专著出版基金资助

CEHUI KEJI ZHUANZHU CHUBAN JIJIN ZIZHU

测绘学

陆国胜 王学颖 编 著

基础



CEHUIXUE JICHU

测绘出版社

高等学校教材

测绘科技专著出版基金资助

测绘学基础

陆国胜 王学颖 编著

测绘出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

全书共分为12章。以测绘的基本知识、概念和原理为侧重点,首先论述了测量基准、坐标系、地图投影等理论基础,然后对距离、角度、高程测量方法及其所用测绘仪器的操作方法给予了阐述,介绍了误差处理基本方法以及各种测绘方法和作业模式,最后阐述了地理信息系统以及地形图的应用等有关知识,并对建筑施工放样基本原理进行了讲解。

该书可作为大本、大专测绘专业或与之相关专业的教材或参考书。也可作为有关人员的培训用书。

© 陆国胜 王学颖 2006

图书在版编目(CIP)数据

测绘学基础/陆国胜,王学颖编著. —北京:测绘出版社,2006. 11

ISBN 7-5030-1460-1

I. 测... II. ①陆... ②王... III. 测绘学
IV. P2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 085408 号

责任编辑:杨蓬莲/责任校对:董玉珍

封面设计:杨晓明/绘 图:郭 飞

测 绘 出 版 社 出版发行

地址:北京市西城区复外三里河路 50 号 邮编:100045

电话:(010)68512386 68531558 网址:www.sinomaps.com

北京通州区次渠印刷厂印刷 新华书店经销

成品尺寸:184mm×260mm 印张:13 字数:310 千字

2006 年 11 月第 1 版 2006 年 11 月第 1 次印刷

印数:0001—5000 册

ISBN 7-5030-1460-1/P·437

定价:23.00 元

如有印装质量问题,请与我社发行部联系

前 言

无论是大学、大专、中专等院校,凡测绘专业和与测绘工作相关的专业都有一门《测量学》(或类似的名称)课程。为适应社会的需求,1979年3月由武汉测绘学院组织编写组,写成《测量学》一书的第一版。编写组由蒋维恒、章书寿任主编,其他成员有郭迺瑜、鲁林成、陆国胜、张琰、尹传忠。编写大纲是在1961年版的《测量学》基础上,依据当时校内外有关人士的意见形成。经过几次教学实践,对书中的内容作了增补和对繁杂部分予以删除,于1984年3月完成第二版修订稿。又经过5年的教学实践,特别是注意到本课程对测绘专业而言,它的基础性性质,由陆国胜负责对本书又作了一些增删,于1989年3月完成了第三版的修订稿。该书的各版本对解决《测量学》课程的教学一直起着重要的作用。

但是《测量学》课程的内容及其在相应专业教学计划中所处的位置,则一直是从事该课程的教师和院校领导断断续续研究讨论的问题。特别是新技术快速进入测绘领域的上世纪90年代后,计算机技术应用于测绘学科的各个方面,促使测绘工作的工作方式和承担的任务均有了不同程度的改变。面对这种现实,对《测量学》教材予以修改乃是大势所趋。可是如何修改,内容如何选择,又成为一个争议的题目。虽然各种不同的观点各有所长,也各有其侧重面,但归根结底应能在社会实践中为较多的从事该课程的教学人员所采纳。

本人根据数十年的《测量学》课程教学实践体验,认为教材的体系(也就是课程的体系)主要在两方面存在问题:其一,是主题不明,学生有杂乱无章的感觉。主题不明必然表现在教材的编写结构上。其二,是教材在处理新技术或某种方法改进的方式,基本上是添加,而不是与原有内容相融合。

针对这两个主要问题,此次编写本书首先从结构改变入手,这是因为结构从属于主题。熟悉测绘工作的人们都知道,实际工作的许多任务都要确定一些点位(即计算出点的坐标值),实际上这个确定点位的工作就是教材的主题。为适应这个主题,本书采用了如下的结构层次:以说明表示点位的参考系(坐标系统)和确定点位坐标的数学模型为前导,以采集为解算数学模型的数据(测距、测角和测高)为手段,以数据的初步处理为质量保障,以此实现确定点位的任务。教材中不可缺少的地形图测绘仪是按数学原理:由点而线,而面,而体构建几何形体的应用,点位仍然是基础。这个结构就是本书与原有《测量学》的最大不同点。

全书的结构仅确定了各章的安排,各章的内容则需要体现出新旧技术的融合,本书的办法是以基础原理为主要线条,同一细节中的新旧技术则取综合或分类书写。

地理信息系统本是一门独立的课程,它是计算机技术与测绘技术结合密切的体系。特别是近几年来,许多测绘部门都担负了建立地理信息系统的工作,因此,关于地理信息系统的概念和主要的基本知识,理应为测绘工作者了解,故本书单独列有一章介绍地理信息系统的概念。

本书知识层次的定位与测量学编写组编写的《测量学》第三版一致,即读者对象为具有高中文化的初学入门或仅有初步测绘知识的工作人员。在撰写时注意到对概念、原理和名词的叙述清晰、准确,以使读者在阅读后能得到正确的理解。此外,测绘技术发展至今,很多方面都有了深入的成果而属于专项技术,顾及到本书定位为“入门”的书,确实无法也没有必要将测绘学所包含的全部分支知识都包括在内。对某些具体问题,如涉及理论严谨性的限

差论证,过于繁琐的观测记录表格的填写等内容也未包含在本书中。

本书可作为学习测绘知识的教材或教学参考书。

关于本书的书名,主要是“测量”与“测绘”两个词的理解问题,虽然人们长期已经习惯于用“测量学”这一名词,但仔细琢磨起来总不如用“测绘学”这个词语更能表达这门学科的内涵。此外近几年来出版的书籍也大多用了“测绘学”这一词语,故本书定名为《测绘学基础》。

本书第九章的部分和第十章由陆国胜与王学颖共同讨论写成,其他均由陆国胜写成。

本书中用到的资料和图件,有些来自于各种参考资料,在此特别向资料的作者致谢。

全书完稿后承蒙花向红、岳建平、张勤、黄全义、黄声享五位老师的认真审阅,在此一并表示感谢。

书稿交付出版社后,另有两位专家对书稿又作了认真的审阅并提出了许多宝贵的建议,对本书的进一步改进有很大的帮助,在此对两位专家致以谢意。

还需感谢的是测绘出版社的编辑、总编对全书的认真审阅,使本书的质量得到很大的提高。

如果说读者阅读本书后能有所收益或启发,均与上述各位专家与编辑的功劳密不可分。

由于测绘学涉及的学科门类广泛,特别是近年来的电子技术和计算机技术的发展极快,有不足之处,恳请读者对书中出现的错误给予指正。

陆国胜

2006年6月

目 录

第一章 概论	(1)
§ 1.1 概述	(1)
§ 1.2 发展简史	(2)
第二章 基本知识和概念	(5)
§ 2.1 地球几何形体的初步概念	(5)
§ 2.2 地表点位的参考系	(9)
§ 2.3 测绘工作的几个基本要素	(15)
§ 2.4 用水平面代替球面的影响	(19)
§ 2.5 精密度、准确度和有效数字	(21)
第三章 基本数学模型	(23)
§ 3.1 确定点的地理坐标概念	(23)
§ 3.2 确定点的平面位置	(24)
§ 3.3 确定点的高程	(33)
§ 3.4 利用卫星定位的基本原理	(35)
§ 3.5 摄影测量的基本概念	(36)
§ 3.6 测绘工作的基本原则	(41)
第四章 数据采集——距离测量	(43)
§ 4.1 测距仪器	(43)
§ 4.2 测距方法	(46)
§ 4.3 测距结果的几项改正	(48)
§ 4.4 普通视距测量	(53)
第五章 数据采集——角度测量	(57)
§ 5.1 经纬仪的基本构造	(57)
§ 5.2 仪器结构和操作不完善的问题	(64)
§ 5.3 全站仪	(69)
§ 5.4 测量角度的方法	(72)
第六章 数据采集——高程测量	(80)
§ 6.1 水准测量	(80)
§ 6.2 三角高程测量的实施	(87)
§ 6.3 普通视距测量测高差	(89)
第七章 数据处理的初步知识	(90)
§ 7.1 误差的基本概念	(90)
§ 7.2 误差传播定律	(96)
§ 7.3 权及加权平均值	(99)

第八章 误差传播的应用	(105)
§ 8.1 高程测量	(105)
§ 8.2 水平角观测	(113)
§ 8.3 距离测量	(114)
§ 8.4 导线测量	(115)
§ 8.5 角度交会	(121)
§ 8.6 测边交会和自由设站点	(124)
第九章 地形图的测绘	(126)
§ 9.1 地形图	(126)
§ 9.2 数字地图	(144)
§ 9.3 测制数字地形图的模式	(155)
§ 9.4 用航空摄影测量测绘地形图	(156)
第十章 地理信息系统的初步概念	(159)
§ 10.1 概念	(159)
§ 10.2 数据结构	(160)
§ 10.3 数据库	(162)
§ 10.4 数据处理	(164)
§ 10.5 查询与分析	(167)
§ 10.6 可视化	(170)
第十一章 地形图应用简介	(171)
§ 11.1 量取图上一点的坐标和两点间的长度	(171)
§ 11.2 量测一点至另一点的坐标方位角	(172)
§ 11.3 量测地面两点连线的坡度和绘制路线的断面图	(173)
§ 11.4 确定汇水范围和面积计算	(174)
§ 11.5 确定一倾斜平面与自然地表的交线	(176)
第十二章 建筑施工放样	(178)
§ 12.1 概述	(178)
§ 12.2 施工控制网	(178)
§ 12.3 平面位置的放样方法	(180)
§ 12.4 曲线的测设	(182)
§ 12.5 高程的测设	(189)
§ 12.6 利用激光的专用测设仪器	(190)
附录一 角度的计量单位和相互换算	(193)
附录二 测量计算中的有效数字	(194)
附录三 几个常用的使用 VB(Visual Basic) 自定义函数代码	(196)

第一章 概 论

§ 1.1 概 述

测绘学,又称测量学,它的研究对象主要是地球的形状和大小,地球外表的自然形态及地球表面及浅层地下各种自然和人工物体的几何形状及其位置。

形成地球形状的主要因素是地球的地质结构和它的旋转运动。因此,要研究和测定地球的实际形状和大小,还必须进行重力测量,以便认识地球的重力场状况,所以确定地球重力场也是测绘学的任务之一。

由数学原理知,物体的几何形态及它的大小均可由此物体的特征点在某个坐标系(参考系)中的坐标(参数)来认知。例如,在以 x, y, z 为坐标轴的空间直角坐标系中,知道了某物体特征点的坐标值,即可了解到此物体的形状和大小。因此,首先要建立一个适当的坐标系,以便于恰到好处地描述地表的自然形态和物体的形状、大小。之后便是如何求得这些特征点在此坐标系中的坐标值。有些点可直接测得其坐标,有些点则需由数学关系推算得出它们的坐标。此项工作通常均称之为测定点位(简称为测定)。

此外,在工程建设中常有在规定的某个坐标系中对建筑物进行设计而指定了一些特征点的坐标值,建设时必须按它们的坐标找出这些特征点的实地位置。这种与测定点位相反的工作通常简称为测设(亦称放样)。

测绘工作者除进行测定和测设工作外,还需对某些社会信息和自然信息进行收集,其目的是给所研究的对象赋予某种属性。例如,一个山体的名称,一个村庄的名称,一块农业用地的种植物,一条河流的水流流向,行政区域的边界,等等。测绘的对象有了这些属性,在发布测绘成果时才具有它们的实用价值,使用户能一目了然地了解到地表自然形态和人工设施所具有的各种信息。

测绘学的研究成果有的用数据(文字和数字)表示,有的用图件表示。一般地说,测绘对象常配有其主要属性的数据。例如,测绘控制点的点名、点号、等级及其坐标,各种地物特征点的坐标值及其所在地的地名,道路的长度、宽度,铺装材料,某建筑物在使用过程中产生变形的大小等数据均可直接提供给用户使用。各种地图则是用图件表示的测绘成果。工程设计中所需的地面某一方向的纵断面图、横断面图等也是用图件形式表示测绘成果的例子。

根据多年研究证实,地球是近似于一个以椭圆的短轴为旋转轴旋转而成的椭球。由于椭圆的扁率不大,因而在一般情况下可将地球看成圆球,它的表面当然亦可看成为一个球面。实际上大多数测绘工作是在地球外表一个局部地区内进行的,由于地球的平均半径很大,约 $6\,371\text{km}$,因此在较小的地表范围内,例如 100km^2 或面积更小时即可将球面看成是平面,这对大多数情况下的测绘工作带来了很大的便利。

研究地球的形状、大小和在地表大范围区域内进行的测绘工作,称**大地测量**。

将测绘区域内的地球表面看作平面,即在地表的小范围内进行一般的测绘工作,称**普通**

测量。

专为工程建设进行的测绘工作,称**工程测量**。

用摄影或非接触传感器获得地表信息进行测绘工作,称**摄影测量和遥感**,实际上摄影就是用影像传感信息的方式,故也属遥感技术。

研究如何将地表的自然形态和各种物体在平面上表示(绘制成地图)的工作,称**地图制图**。

测绘学的理论主要是依靠数学,它利用数学,而且在一些方面也发展了数学。其他如天文学、地球物理学、地质学、地理学、海洋学、空间科学、环境科学、计算机科学、信息科学和其他工程科学等,也常与测绘工作有密切的关系。尤其是随着电子计算机技术的发展,测绘工作中的数据采集、数据处理、数据储存、数据分析、测量成果的形成和输出等均可用计算机来完成,这在很大程度上提高了测绘工作的效率,保证了测绘成果的质量。因此,计算机技术应用已经成为测绘工作中不可缺少的内容。

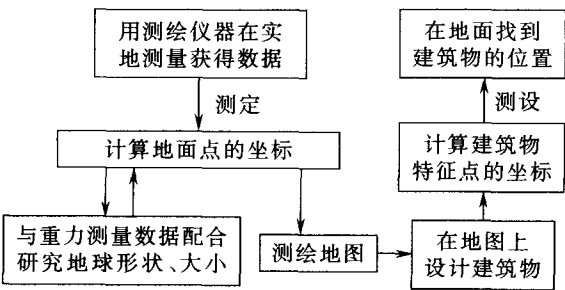


图 1-1 普通测绘工作的概略情况

测绘学的产生由人类的生产实践、生活需要和对地球的认知需求而来,又随着与之有关的学科的发展而发展。测绘学是一门技术性较强的学科,不仅需要理论指导,还需要有相应的工具来实施,例如,用怎样的尺子来量长度,用怎样的工具来测出一个地面点相对于另一个地面点的高度等。通常称这些工具为**测绘仪器**。通过使用测绘仪器不仅要能

获得测绘工作所需要的数据,尤其是要能使这些数据具有必需的精确度和准确度,因此对测绘仪器的设计、制造亦是很重要的方面。可见测绘学不仅仅研究测绘理论和测绘方法,还包括了对测绘仪器的研究。

普通测绘工作的概略情况可用图 1-1 表示。

由于本书是讲述基本知识,因此所讨论的问题将以普通测量为主,即以在平面上进行的测量工作为主,必要处才对地表为球面的影响作一介绍。

§ 1.2 发展简史

1.2.1 大地测量的发展

测量学实际上是一门古老的学科,它是在农田整理、水利建设、军事行动等与人类社会的生产、生活有关活动的需求下逐步发展起来的。古代埃及的尼罗河每年洪水泛滥,淹没了土地的界线,水退之后又需要重新划定这些界线,这是早期的“测绘工作”。公元前 2 世纪,中国的司马迁在《史记·夏本纪》中叙述了禹受命治理洪水的情况,其中有“左准绳,右规矩”(准绳是一种测量物体平直的工具,规和矩是画圆形和方形的工具),表明当时已能使用简易

的测绘工具。

随着人类对生存范围认识的扩大,对地球本身认知的需求也逐步强烈,测绘工作也逐步由粗糙到精细方向发展。人们对星空的观察,推测地球应是一个圆球。公元前3世纪至公元前2世纪的埃拉托色尼(Eratosthenes)采用在两地观测日影的办法,推算出地球子午圈的周长,以此证实了地球是圆球。公元724年,中国唐代太史监南宫说(读 yue)在张遂(僧人,法名一行)的指导下,在现今河南滑县附近、开封西北、扶沟和上蔡四地用日圭测太阳的阴影求纬度之外,还用测绳丈量了其间的三段距离(长约300km),求得地球子午线一度之长相当于351.27唐里,这是世界上最早有记载的弧度实际测量。

17世纪末,英国的牛顿(I. Newton)和荷兰的惠更斯(C. Huygens)首次从力学的观点探讨地球的形状,提出地球是两极略扁的椭球体。1735—1741年,法国科学院派遣测量队在南美的秘鲁和北欧的拉普兰进行弧度测量,证明了这一观点。

19世纪初,随着测量精度的提高,通过对各处弧度测量结果的研究,发现测量时所依据的垂线(与静止的水面垂直的线)方向与地球椭球的法线方向不同,而且它们之间的差异还不能忽略。法国的拉普拉斯(Pierre Simon Laplace)和德国的高斯(Carl Friedrich Gauss)相继指出,地球的形状不能用旋转椭球来代表。由物理学知,垂线的方向与重力有关,1849年斯托克斯(Sir George Gabriel Stokes)依据地表所得的重力测量资料提出用重力测量的方法来确定地球形状的理论。1873年,李斯廷(J. B. Listing)创用“大地水准面”一词,以该面代替地球形状。自那时起,弧度测量的任务不仅是确定地球椭球的大小,而且还要求出各处垂线与地球椭球的法线之间的偏距,用以研究大地水准面的形状。

人类对地球形状的认识和测定,经过了球、椭球、大地水准面三个阶段,花去了约二千多年的时间,随着测定成果的愈益精确,精密计算地面点的平面坐标和高程才有了更可靠的保障,同时也不断丰富了测绘学的理论。

1.2.2 地图制图的技术

除了对地球的认识之外,在人类的生产和军事活动中还对地图有了需求。考古工作者曾经挖掘到公元前25世纪至公元前3世纪绘或刻在陶片、铜片或其他材料上的地图。这些原始地图实际仅是略图,没有比例和方位,可靠性很差。中国湖南省长沙马王堆汉墓中发现的绘在帛上的地图,是在公元前168年前制作的。这些地图是根据已有资料和见闻绘制的,它已注意到了比例尺和方位,讲求一定的精度。公元2世纪,古希腊的托勒密(Claudius Ptolemaeus)提出了地图投影问题。公元3世纪,中国的裴秀提出“制图六体”:分率、准望、道里、高下、方邪、迁直,即地图绘制时的比例尺、方位、距离等制图原则,提高了地图的可靠程度。从16世纪起,地图制图进入了一个新的发展时期。中国明代的罗洪先和德国的墨卡托(Gerhardus Mercator)都以编制地图集的形式,分别代表了16世纪之前中国和西方在地图制图方面的成就。从16世纪起,随着测绘技术的发展,尤其是三角测量方法的创立,西方一些国家纷纷进行大地测量工作,并根据实地测量的结果绘制国家规模的地形图。中国于1708—1718年完成《皇舆全图》,是首次在广大的范围内进行地形图的测绘工作。

19世纪50年代已有人用气球在城市上空对地面进行摄影,并用所拍摄片制成地图。1909年美国的W. 莱特(W. Wright)第一次从飞机上对地面拍摄像片,实现了真正的航空摄影。1915年德国制成第一台能自动连续对地面摄影的航摄仪,自此,航空摄影测量开始

得到快速发展。用航空摄影测量制作地图的方式最初是利用像片上的影像,采用模拟的办法。随着电子技术的发展,现在已采用数字处理的方法,无论是成图速度或质量都有了极大的提高。自从人造卫星上天不久的 20 世纪 60 年代,人们便将能获得多光谱(可见光、红外、微波等光谱带)的传感器安置到卫星上,所获得的地球上的光谱信息能反映物体的几何与物理特性,传回地球后即可利用它制成地图。这种利用非接触传感器遥测的技术被称为遥感(Remote Sensing),实际上航空摄影也是一种遥感技术的方式。当然遥感技术的用途远不止是制图,而在资源调查、环境保护、矿产探测等方面都有重要的作用。

20 世纪 60 年代,随着计算机技术的发展,编制专门的软件用于绘制地形图成为可能,这种利用计算机辅助完成地图制图的作法称为**机助制图**。与此同时,利用计算机对地理空间数据进行存储和管理,用计算机对地图内容进行分析、显示并提供诸如规划、管理等信息的系统也开始出现,这种基于地理数据使用计算机完成各种任务的系统被称为**地理信息系统**。

1.2.3 测量工具的发展

17 世纪之前,人们使用简单的工具,例如中国的绳尺、步弓、矩尺和圭表等进行测量。这些工具都是机械式的,而且以用于量测距离为主。17 世纪初发明了望远镜并很快用于测绘仪器上。1617 年荷兰的斯涅尔(W. Snell)首创三角测量法,从此测绘工作不仅量测距离,而且开始了角度测量。约于 1640 年,英国的加斯科因(W. Gascoigne)在两片透镜之间设置十字丝,使望远镜能用于精确瞄准,用以改进测绘仪器,这可算光学测绘仪器的开端。约于 1730 年,英国的西森(Sisson)制成测角用的第一架经纬仪。在这一段时期里,欧洲又出现了小平板仪、大平板仪和水准仪。20 世纪 40 年代开始,雷达以及各种脉冲式、相位式导航系统的发展,促进了人们对电子测时技术、测相技术和高稳定度频率源等领域的深入研究。在此基础上,贝里斯特兰德(E. Bergstrand)和沃德利(T. L. Wadley)分别于 1948 年和 1956 年研制成功了第一代光电测距仪和微波测距仪,使距离测量工作由繁难变为易于操作。随着科学技术的不断进步,光电测距仪和激光测距仪的性能有了相当大的提高,仪器的体积也可制作得很小巧。20 世纪 80 年代初开始,出现了将光电测距仪与经纬仪的视准系统组合在一起的仪器。之后,又有将微处理器安装在仪器中可及时处理观测数据的全站仪,可直接由屏幕上看到观测结果或经计算后的测量成果,亦可将此结果储存在存储器中,再传输到计算机对数据作进一步的处理。随着技术的提高,全站仪的照准目标操作已可实现自动化,不必由操作人员完成,这对提高照准目标的速度和精度又有所提高。此外,已有 GPS 接收机与全站仪集成在一起的被称为“超站仪”的仪器,它不仅具有全站仪的功能,而且具有实现 GPS 技术的功能。20 世纪 40 年代自动安平水准仪的问世,标志着水准测量自动化的开端,而 90 年代数字水准仪的出现则做到了读数记录全自动化,使得高差测量工作的精度和效率都有了很大的提高。

测绘仪器的近代发展主要依赖于电子技术和计算机技术的发展,它不仅改善了测绘的具体操作条件和成果的精度,而且改变了测绘学的整体面貌。历史的发展说明,测绘工作实践需要改进测绘仪器,测绘仪器的改进又改变着测绘工作本身,这种相互影响的关系是测绘学发展过程的必然结果。

第二章 基本知识和概念

§ 2.1 地球几何形体的初步概念

2.1.1 地球的形状和大小

地球到底是一个怎样的形状? 公元前 6 世纪古希腊的毕达哥拉斯(Pythagoras)曾提出地球是球形,而中国在公元 1 世纪则有张衡的“天体圆如弹丸,地如鸡中黄”的说法。直到近两个半世纪的研究,才证实地球是接近于一个由旋转的椭圆而形成的旋转椭球体。地球形状的形成来自于地球内部物质的引力和自转,若地球是一个匀质的流体,那么它的平衡状态就应该是一个旋转椭球体。但是地球的构造十分复杂,所以地球只是一个近似于旋转椭球体的形体。研究发现,静止的海水面比陆地表面更接近于旋转椭球体这样的形状,而且从地球的外表面看,海水面的面积占有约 70%,而露出海水面的陆地面积仅有约 30%,所以用静止的海水面来表示地球的形状也就较为合理。对于任何一处的静止水面,通常称为水准面,为有区别,称静止的海水面为大地水准面。

选择一个很逼近于大地水准面的旋转椭球体,用它的大小来表示地球的大小,也是较为合理的事,通常称这个旋转椭球体为地球椭球体,其表面则称为地球椭球面(见图 2-1)。

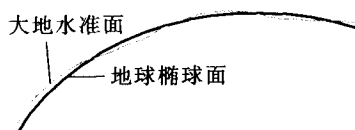


图 2-1 大地水准面与地球椭球面间的关系

由近代研究知,大地水准面与地球椭球面之间的差距为 -105m 至 75m 。由于旋转成地球椭球体的椭圆之长轴和短轴的长度相差不大(差值约为长轴的 $1/300$),故在很多情况下均可将地球近似地看成圆球。

表 2-1 地球椭球体的形状和大小

名 称	长半轴 a/m	短半轴 b/m	扁率 α	年代和国家
德兰布尔	6 375 653	6 356 564	1 : 334	1800, 法国
白塞尔	6 377 397	6 356 079	1 : 299.153	1841, 德国
克拉克	6 378 249	6 356 515	1 : 293.5	1880, 英国
海福特	6 378 388	6 356 912	1 : 297.0	1909, 美国
克拉索夫斯基	6 378 245	6 356 863	1 : 298.3	1940, 苏联
我国 1980 年国家大地坐标系	6 378 140	6 356 755	1 : 298.257	1975, 国际大地测量与地球物理联合会
WGS-84 系统	6 378 137	6 356 752	1 : 298.257 223 563	1984, 美国国防部制图局

地球椭球体的形状和大小,通常取椭圆的长半轴 a 表示它的大小,用扁率 α 表示它的形状。由于研究工作的技术水准受不同时代的科技状况的制约,加之地球本身的变化,不同年

代所得的数据也不相同,表 2-1 列出了有代表性的几次数据,表中的短半轴 b 是由长半轴 a 和扁率 α 由式(2-1)计算而得。

$$\alpha = \frac{a-b}{a} \quad (2-1)$$

取地球为圆球时,按我国 1980 年国家大地坐标系(坐标系在 § 2.2 中叙述)的长、短半轴值,其半径由式(2-2)计算得 $R=6\,371\text{km}$ 。圆球的体积 $V_{\text{圆}}=\frac{4}{3}\pi R^3$,旋转椭球的体积 $V_{\text{椭}}=\frac{4}{3}\pi a^2 b$,若要圆球的体积等于椭球的体积,则圆球的半径为

$$R = (a^2 b)^{\frac{1}{3}}$$

将等号右端做一点改变,即

$$R = (a^3 - a^3 + a^2 b)^{\frac{1}{3}} = (a^3 - a^2(a-b))^{\frac{1}{3}}$$

因等式右端的 $a^2(a-b) < a^3$,故可将等式右端用二项式级数展开,得

$$R = a + \frac{1}{3}(b-a) + \dots$$

取前两项,得式(2-2)(由计算得地球椭球体的体积为 $1.083\,208\,8 \times 10^{21} \text{m}^3$,看作圆球时的体积为 $1.083\,212\,9 \times 10^{21} \text{m}^3$ 。)

$$R = \frac{2a+b}{3} \quad (2-2)$$

2.1.2 测绘工作的参考面和参考线

由于地球的构造十分复杂且其质量分布并不均匀,所以大地水准面不可能成为一个很规则的能用较简便的数学式表示的曲面,这对于测绘工作的计算是很不方便的,而地球椭球面则是一个很便于用数学式表示的曲面,由它来代替大地水准面就可使计算工作易于进行。因此,测绘工作的成果均取地球椭球面为基本参考面。但是要获得大地水准面并非易事,当然也就无法得到地球椭球面。这就是说,若要将在地面上测得的成果表现到地球椭球面上是一个非常困难的事。为此,对一个区域性地区,如一个国家,常选择一个参考面来代替大地水准面,我国在青岛海边设置了一个验潮站,观测海水的涨落情况,并取若干年来海水面的平均位置(称之为**平均海面**)作为参考面。如果选择一个适当大小的旋转椭球体,使其表面在该区域内与此参考面(平均海面)非常逼近,那么在此区域内的旋转椭球体的表面与参考面的差距将非常小,通常称此旋转椭球体为**参考椭球体**,称其表面为**参考椭球面**,用它代替地球椭球面,并作为测绘工作的基本参考面。这样一来,对一般的测绘工作而言,便可以取代替大地水准面的参考面(我国为平均海面)来替代参考椭球面而成为**测绘工作的参考面**,即测绘工作的基准面。本书以后所提到的大地水准面即是平均海面。

也就是说,无论在该区域内的任何位置所得的测绘成果,均按重力方向投影到大地水准面上。在实际操作时尚需利用其他工具来达到这一目的,下述的垂球和水准器就属这种工具。

依据形成水准面的物理学性质知,水准面上任意一个点的重力方向均与过该点的切平面垂直。过任意一点(如图 2-2 中的 O 点)的重力方向可以由该点悬挂的一个重物的细线来求得。为了将重力方向引导到地面上,常用一个金属做成的,其尖端为圆锥体的物件悬挂在

细线上,细线的延长线应通过圆锥体的尖端(如图 2-2 中的 G 点)。此物件称为**垂球**(亦称为**铅垂**),细线即为重力方向,通常称为**垂线**(亦称**铅垂线**或**竖直线**),图 2-2 中的 O, G 为在同一条垂线上的两点。由于垂线与水准面相互垂直,所以知道了垂线的方向也就知道了水准面的状态。使用垂球来求得垂线是很简便的事,所以垂线便成为测量工作中常用的**基本方向线**,即测绘工作的**基准线**。需要注意的是,地面上一点的垂线(重力)方向并不与地球对质点的引力方向重合,而是这个引力与地球自转产生的离心力的合力方向(见图 2-3)。



图 2-2 垂线

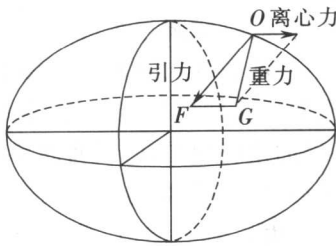


图 2-3 重力方向

此外,亦可用一个称为**水准器**的器件来获得与过某点的水准面相切的水平方向线,或过该点的重力方向线。图 2-4 为一般水准器的外形及水准器获得水平方向线的原理。水准器纵剖面上部的内表面为一圆弧,在圆弧中部设定一点(见图 2-4(a)中的 O 点)为**零点**。水准器内灌注液体,灌注时使液体有一定的温度,待液体冷却之后由于体积收缩便产生一个近似真空的空间,由外面看来此空间是一个气泡。无论将水准器安置成何种状态,在重力作用下,水准器内的气泡将始终居于最高的位置,若气泡的中间点与水准器的零点重合,则称为**气泡居中**。水准器的外形可做成管状或圆盒状,前者称为**管状水准器**,简称**水准管**(见图 2-4(b)),后者称为**圆盒水准器**,简称**圆水准器**(见图 2-4(c))。圆水准器顶部的内表面是一圆球面,其零点位于球面的中部。对水准管而言,过水准管内表面零点的切线称为**水准管轴**(见图 2-4(a)的 LOL 直线),若气泡居中,则水准管轴必是水平线。对圆水准器而言,因其顶部为圆球面,过其零点的法线称为**圆水准器轴**,若气泡居中,则圆水准器轴必是重力方向线。

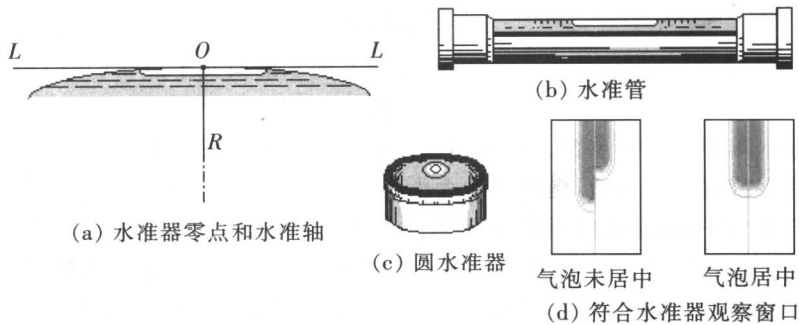


图 2-4 水准器

水准器上气泡的中心点是无法标定的,在实际操作时,水准器可能处于不同的状态,其

中的气泡会在不同的位置移动,为了能判断气泡是否居中,必须利用气泡边缘所处的位置。因此,在水准器上需刻有与零点对称的标记。对于水准管,是在玻璃管上对称于零点刻上间隔 2mm 的直线,使用时需直接观察气泡的位置,当气泡的两端各位于相对称的刻线位置时,表明气泡已经居中。对于圆水准器,则以零点为圆心刻有一圆圈,当气泡边缘与此圆圈呈同心圆位置时,则表明气泡已经居中。为使观察水准管气泡两端的对称状态更准确,利用棱镜使气泡两端的影像经过反射对称地显示在一个窗口内,这种水准器称为符合水准器。因为气泡的影像是在观察窗口内对称地显示,所以当气泡两端的影像吻合为圆弧时(通常称为气泡符合)便表明气泡已经居中(见图 2-4(d))。

水准器内表面的圆弧(或圆球面),可因其半径长短不同而有不同的曲率。现有两个曲率不同的水准器,若气泡在各自的内表面移动一个相同的距离(例如 2mm),则因它们的曲率不同而会使水准器有不同的倾斜角度,曲率小者倾斜角度小,曲率大者倾斜角度大。可见,若两水准器倾斜的角度相同,内表面曲率小的水准器的气泡移动量将大于内表面曲率大的水准器的气泡移动量。这种因水准器内表面曲率的大小而使水准器产生不同倾斜量的能力称为水准器的灵敏度。曲率越小,反映气泡越易移动,灵敏度越高,反之则灵敏度愈低。代表水准器曲率大小的技术参数是水准器的分划值。定义圆弧长 2mm 所对圆心角为水准器的分划值。分划值越小,灵敏度越高,反之则灵敏度越低。一般的水准管的分划值为 $20''$,灵敏度很高的水准管的分划值可达 $2''$ 。圆水准器的分划值一般为 $8'$ 。需要提及的是水准器中气泡的移动有时还受制造的质量影响,特别是内表面的琢磨质量,如果不够精细常会使气泡的移动量与水准器的倾斜量不成比例。

2.1.3 参考椭球体定位的概念

确定地球表面上物体的几何形状需要有一个参考系,即建立一个坐标系,依据物体各处(点)的坐标值便能真实地描述出它的几何形状。测绘工作的坐标系可取空间直角坐标系或

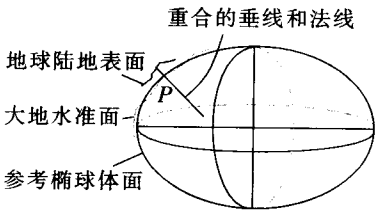


图 2-5 参考椭球体定位

平面直角坐标系,平面直角坐标系是建立在前述的参考椭球面上。但是参考椭球面并不就是大地水准面,必须妥善安置参考椭球的位置,使它与大地水准面之间的差距非常的小,此项工作称为参考椭球体定位。椭球体的定位工作从概念上讲大体情况为:在地面上选择一个合适的点,过此点的垂线与大地水准面交于点 P(见图 2-5)。将椭球面设置成在 P 点与大地水准面相切,此时椭球面的

法线与大地水准面的垂线重合。再使椭球体的短轴与地球自转的旋转轴平行。如果地面点的位置选择得确实十分合适,椭球体的大小也选用得很恰当,那么椭球面与大地水准面之间的差距将会非常小,这是人们所希望达到的条件,而 P 点(或相应的那个地面点)则称为大地原点。应该注意的是这个大地原点并不是坐标系的原点,而是参考椭球定位的原点。只有在较为满意的参考椭球体定位条件下,大地水准面与参考椭球体面的差别才较小。由于实际工作中获得水准面的方法较为简单,除了对测绘的结果要求十分严格之外,还可以用水准面代替参考椭球面,使工作更为方便。另外,在涉及一些计算时,用圆球计算比用椭球计算更为简便,而本书是基础概念的叙述,故以后的讨论,除有特殊说明外,均用大地水准面

代替参考椭球面,并近似地用圆球表示。

§ 2.2 地表点位的参考系

测绘工作中表示一个点位的坐标系通常分为平面和高程两种:平面坐标系是指在椭球表面上的关系(此处的“平面”含义并非数学意义的“平面”,而是指日常生活中所说的东南西北不包括高低关系的这种含义);高程是指点位高出大地水准面的垂线长度,经过计算可求得高出椭球面的长度。此外,还可不将平面和高程分开,直接采用空间大地直角坐标系。

2.2.1 地理坐标系

地理坐标系是一种以角度计量的球面坐标系,但在测绘中属于平面坐标系的范畴,测绘中用到的地理坐标系亦称**大地坐标系**,它是建立在旋转椭球面上的,由子午线(经线)和纬线构成。如图 2-6(a)所示,过椭球体旋转轴的平面称为**子午面**,子午面与椭球面的交线为**子**

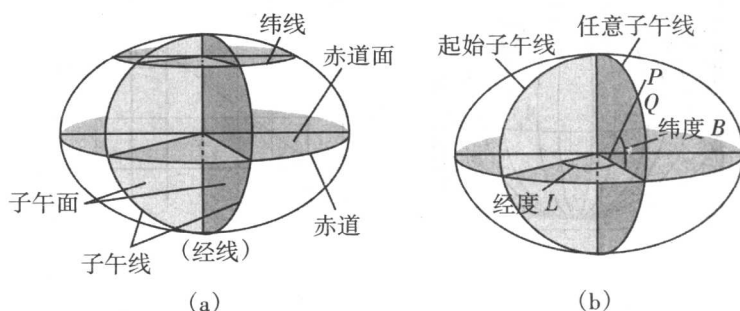


图 2-6 地理坐标系

午线(经线)。与椭球体旋转轴垂直的平面与椭球面的交线为**纬线**,若垂直于椭球体旋转轴的平面与椭球的长轴重合则此平面称为**赤道面**,此条纬线即为**赤道**。一个点的大地坐标用经度和纬度表示。过英国格林尼治天文台旧址的子午线为**起始子午线**,定为经度 0° 。过地面点(见图 2-6(b)的 P 点)的子午面与 0° 子午面之间的两面角并从 0° 子午面起计算的角度为该点的**经度值**,经度值的范围为 $0^\circ \sim 180^\circ$ 。由 0° 子午线起向东称**东经**,由 0° 子午线起向西称**西经**。赤道面是计算纬度的基准面,过地面一点作椭球面的法线,法线与赤道面在该点子午面内的交角便是该点的**纬度值**。纬度值的范围为 $0^\circ \sim 90^\circ$ 。由赤道向北称**北纬**,由赤道向南称**南纬**。大地坐标系的经度常用大写字母 L 表示,纬度常用大写字母 B 表示。实际上,地面点的大地坐标,必须是在已经定位的参考椭球面上,我国现在使用的是 1980 年国家大地坐标系,大地原点位于陕西省泾阳县永乐镇。在使用 1980 年国家大地坐标系之前,使用的是 1954 年北京坐标系。1954 年北京坐标系是前苏联 1942 年大地坐标系的延伸,采用克拉索夫斯基椭球,大地原点当然是 1942 年大地坐标系的原点。

2.2.2 地图投影直角坐标系

椭球面是一个不可展开为平面的曲面,为了将地表的情况转换到平面上来表示,必须应用地图投影的方法。最早的地图投影是采用几何透视的办法,即由一个点光源(例如地球的

球心)发射的光线,将地球上的曲线投影到一个能展成平面的投影面上(例如圆柱面、圆锥面)。随着人们对平面上表象的地球实际状况的要求逐渐提高,例如要求平面上与地球上的对应图形(地块)的面积相等,对应点上各方向射线间的角度相等……现代地图投影则在透视图像的基础上用数学理论满足人们所要求的条件。因此,现在的地图投影大都是非透视的数学转换。自一点起的各射线间角度不变的投影称为**正形投影**(亦称**等角投影**),平面上图形的面积与原椭球面的面积相等的投影称为**等积投影**。测绘工作中常用的是正形投影。1569年荷兰数学家、地理学家墨卡托首创正形投影的方法,它是正圆柱等角投影,即用一个圆柱外表面南北向套在地球上,使地球赤道与之相切(见图2-7(a))。按等角条件用数学的方法将地球表面的图像投影到圆柱面上,再将圆柱面展开即成平面图形(见图2-7(b))。此种投影的主要特点是地球的经纬线均为直线,且互为正交。地球上任意一条线段,只要其与经线的交角相等,那么在平面上则必为直线。这种投影对航海定向是非常有用的,因此多用于绘制航海地图。之后又有其他学者作了改变和改进。

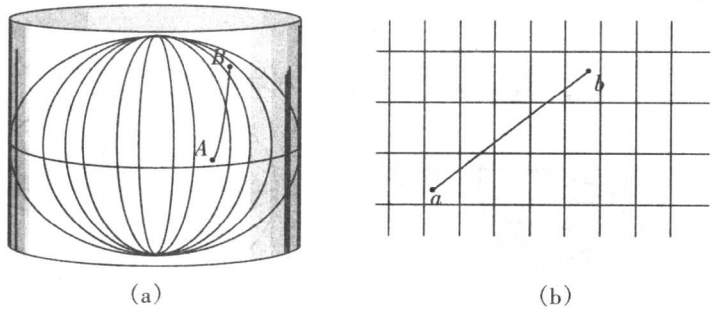


图 2-7 正圆柱投影

我国测绘工作采用的是由德国数学家、物理学家和天文学家高斯创立的横轴正形投影,其投影直角坐标系称为**高斯投影直角坐标系**(简称**高斯直角坐标系**或**高斯坐标系**)。高斯坐标系可用图2-8来说明。高斯投影是用一个直径与地球椭球体的长、短轴等长的椭圆柱横

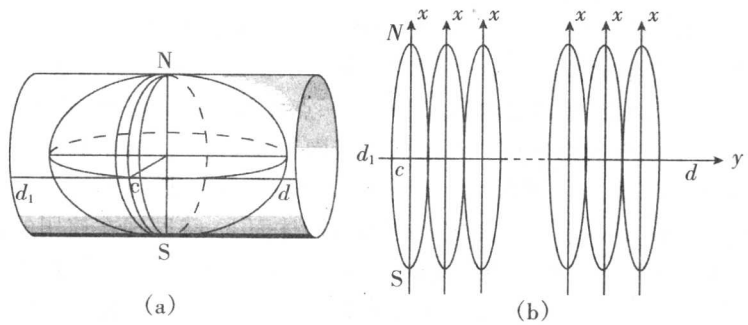


图 2-8 高斯投影

向套在椭球体外面,椭圆柱的中心线与椭球的长轴重合,此时必有一条子午线与椭圆柱面吻合,如图2-8(a)中的NcS子午线。椭球的赤道面与椭圆柱面相交得 d_1cd 直线。将椭圆柱面展成平面,可以看到NcS子午线与 d_1cd 直线相互垂直,这就是高斯坐标系的坐标轴。为