

普通高等教育“十二五”土木工程系列规划教材

土木 工程测量

○ 曹晓岩 张家平 主编

EDUCATION



免费电子课件



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十二五”土木工程系列规划教材

土木工程测量

主编 曹晓岩 张家平
参编 林卫公 郑朝阳 魏 勇



机械工业出版社

本书在全面分析大土木工程专业测量知识能力要求的基础上,考虑了相近专业的共用原则,突出应用性原则,体现学以致用以及为工程建设服务的目的。本书主要内容包括测量基本理论与方法、工程应用测量两部分,前者包括水准测量,角度测量,距离丈量与直线定向,测量误差的基本知识,控制测量,大比例尺地形图的测绘与应用,现代测量仪器与技术;后者包括施工测量的基本方法,民用建筑施工测量,工业建筑施工测量,道路中线测量,路线纵、横断面测量,桥梁测量,隧道测量。

本书适用于土木工程、工程管理、安全工程、环境工程、建筑环境与设备工程、给水排水工程等专业,也可供土木工程技术人员参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

土木工程测量/曹晓岩,张家平主编. —北京:
机械工业出版社, 2014. 7

普通高等教育“十二五”土木工程系列规划教材
ISBN 978-7-111-46910-0

I. ①土… II. ①曹…②张… III. ①土木工程—工
程测量—高等学校—教材 IV. ①TU198

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 115839 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 马军平 责任编辑: 马军平 李 帅

版式设计: 赵颖喆 责任校对: 张晓蓉 肖 琳

封面设计: 张 静 责任印制: 乔 宇

北京铭成印刷有限公司印刷

2014 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 18 印张 · 480 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-46910-0

定价: 35.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010)88361066 教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售一部: (010)68326294 机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010)88379649 机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线: (010)88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

本书在全面分析大土木工程专业测量知识能力要求的基础上，考虑了相近专业的共用原则，该教材课程体系和结构安排在符合系统性要求的基础性上，突出应用性原则为核心和主线的思想，专业基本理论知识全、新，结构合理，深度适当，体现学以致用以及为工程建设服务的目的。突出强化“三基”，即基本概念、基本方法、基本技能，对教材内容体系进行了整体优化：测量基本技能与技术为普通测量学基础平台，满足土木工程相近专业的需要；工程测量原理与实践部分按照道路、桥梁、隧道、工业与民用建筑、管道、大坝等专业方向分类细化，注重理论与实践的紧密结合，努力做到更加贴近工程实际，为工程应用实践服务；现代测量技术内容章节单列，突出当代测量新技术新方法应用，并与专业测量相结合，利于学生学习和掌握新技术、新方法，培养学生的创新能力和发展后劲，以适应现代测量技术日益飞速发展的需要和社会发展的需要。

本书由曹晓岩、张家平任主编，林卫公、郑朝阳、魏勇任参编。第1、3、4、6、8章由曹晓岩(黑龙江工程学院)编写，第2、13、14、15章由郑朝阳(黑龙江工程学院)编写，第7、9章由魏勇(河南城建学院)编写，第10、11章由林卫公(宁夏大学)编写，第5、12章由张家平(黑龙江工程学院)编写。

限于编者水平，书中不妥之处，恳请读者批评指正。

编 者

目 录

前言	
第1章 绪论	1
1.1 测量学的任务与应用	1
1.2 测量学的发展与现状	3
1.3 测量学的基础知识	6
1.4 地面点位的确定	8
1.5 测量工作的基本概念	15
思考题与习题	16
第2章 水准测量	18
2.1 水准测量原理	18
2.2 水准测量仪器和工具	19
2.3 水准测量的实施和成果整理	23
2.4 DS ₃ 级水准仪的检验与校正	29
2.5 自动安平水准仪	32
思考题与习题	34
第3章 角度测量	35
3.1 角度测量原理	35
3.2 光学经纬仪	36
3.3 水平角测量	40
3.4 竖直角测量	44
3.5 经纬仪的检验和校正	46
思考题与习题	49
第4章 距离测量与直线定向	51
4.1 钢尺量距	51
4.2 视距测量	53
4.3 电磁波测距仪测距	56
4.4 直线定向	62
4.5 坐标方位角正算与反算原理	65
思考题与习题	67
第5章 测量误差的基本知识	68
5.1 概述	68
5.2 衡量精度的指标	72
5.3 误差传播定律	73
5.4 算术平均值及其中误差	76
5.5 权及加权平均值	77
思考题与习题	79
第6章 控制测量	80
6.1 概述	80
6.2 导线测量	83
6.3 交会定点	89
6.4 三、四等水准测量	91
6.5 三角高程测量	93
思考题与习题	95
第7章 大比例尺地形图的测绘与应用	97
7.1 地形图的基本知识	97
7.2 大比例尺地形图测绘方法	110
7.3 地形图的基本应用	119
7.4 地形图的工程应用	125
思考题与习题	132
第8章 现代测量仪器与技术	134
8.1 全站仪及其应用	134
8.2 GPS及其应用	147
8.3 3S技术及其集成	153
8.4 地形图数字化测绘方法	157
8.5 数字地面模型及其在 路线工程上的应用	160
思考题与习题	164
第9章 施工测量的基本方法	165
9.1 概述	165
9.2 施工测量的基本工作	166
9.3 施工控制测量	172
9.4 施工场地的高程控制测量	175
思考题与习题	175
第10章 民用建筑施工测量	176
10.1 概述	176
10.2 建筑物的定位和放线	177
10.3 建筑物基础施工测量	178
10.4 墙体施工测量	179
10.5 高层建筑施工放样	179
思考题与习题	181
第11章 工业建筑施工测量	182
11.1 概述	182

11.2 厂房矩形控制网的建立	182	13.3 中平测量	227
11.3 厂房柱列轴线放样与 柱基测设	182	13.4 横断面测量	231
11.4 厂房预制构件安装测量	183	13.5 道路施工测量	235
11.5 烟囱与水塔施工测量	185	13.6 管道施工测量	238
11.6 变形测量	186	思考题与习题	241
思考题与习题	193	第 14 章 桥梁测量	242
第 12 章 道路中线测量	194	14.1 概述	242
12.1 概述	194	14.2 桥位控制测量	243
12.2 路线转角的测定和 里程桩的设置	197	14.3 桥墩、桥台施工测量	244
12.3 圆曲线的测设	202	14.4 涵洞施工测量	247
12.4 带有缓和曲线的平曲线测设	205	14.5 防护工程与大坝施工测量	248
12.5 虚交平曲线的测设	211	思考题与习题	253
12.6 复曲线测设	213	第 15 章 隧道测量	254
12.7 回头曲线测设	216	15.1 概述	254
12.8 道路中线逐桩坐标 计算与测设	217	15.2 隧道控制测量	255
12.9 用 GPS、RTK 技术测设 公路中线	221	15.3 竖井联系测量	258
思考题与习题	224	15.4 隧道洞内导线与洞 内中线测量	263
第 13 章 路线纵、横断面测量	226	15.5 隧道洞内水准测量	266
13.1 概述	226	15.6 隧道开挖断面测量	268
13.2 基平测量	226	15.7 辅助坑道施工测量	271
		15.8 隧道贯通误差分析	272
		思考题与习题	278
		参考文献	279

第1章 绪论

【重点与难点】

- 重点：**1. 测量学的含义与大地水准面。
2. 地面点位的确定(平面位置与空间位置确定)。
3. 测量基本工作与基本原则。
- 难点：**高斯平面直角坐标。

1.1 测量学的任务与应用

1.1.1 测量学及其分类

测量学是研究地球的形状和大小，以及确定地面(包括空中、地下、海底)点位的科学，它的主要任务包括测定和测设两个部分。测定是指使用测量仪器和工具，通过观测和计算，得到一系列测量数据，将地球表面的地物地貌测绘成地形图，供经济建设、规划设计、科学研究和国防建设使用；测设是将图上规划设计好的建筑物、构筑物的位置在地面上标定出来，作为施工的依据，工程上又叫放样。

随着测绘科学的发展，技术手段的不断更新，以全球定位系统(GPS)、地理信息系统(GIS)和遥感技术(RS)为代表的测绘新技术的迅猛发展与应用，测绘学的产品基本由传统的纸质地图转变为“4D”(DEM数字高程模型、DOM数字正射影像图、DRG数字栅格地图和DLG数字线画地图)产品。“4D”产品在网络技术的支持下，成为国家空间数据基础设施(NSDI)的基础，从而增强了数据的共享性，为相关领域的研究工作及国民经济建设的各行业、各部门应用地理信息带来了巨大的方便。

根据研究的具体对象及任务的不同，测量学可分为以下几个分支学科：

(1) 普通测量学 普通测量学是研究和确定地球表面小范围测绘的基本理论、技术和方法，不顾及地球曲率的影响，把地球局部表面视为平面，是测量学的基础。

(2) 大地测量学 大地测量学是研究和确定地球形状、大小，解决大地区控制测量和重力场的理论和技术的学科。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。由于人造地球卫星的发射和科学技术的发展，大地测量学又分为常规大地测量学、卫星大地测量学及物理大地测量学等。

(3) 摄影测量与遥感学 摄影测量与遥感学是研究利用摄影或遥感技术获取被测物体的信息(影像或数字形式)，进行分析处理，绘制地形图或获得数字化信息的理论和方法的学科。由于获取相片的方法不同，摄影测量学又分为地面摄影测量学、航空摄影测量学、水下摄影测量学和航天摄影测量学等。特别是随着遥感技术的发展，摄影方式和研究对象日趋多样，不仅固体的、静态的对象，而且液体、气体以及随时间而变化的动态对象，都属于摄影测量学的研究范畴。

(4) 海洋测量学 海洋测量学是以海洋和陆地水域为对象所进行的测量和海图编绘工作，

属于海洋测绘学的范畴。

(5) 工程测量学 工程测量学是研究在工程建设和资源开发中,在规划、设计、施工和管理各阶段进行的控制测量、地形测绘和施工放样、变形监测的理论、技术和方法的学科。由于建设工程的不同,工程测量又可分为矿山测量学、水利工程测量学、公路测量学及铁路测量学等。工程测量是测绘科学与技术国民经济和国防建设中的直接应用,是综合性的应用测绘科学与技术。

(6) 地图制图学 地图制图学是利用测量所得的成果资料,研究如何投影编绘和制印各种地图的工作,属于制图学的范畴。它的基本任务是利用各种测量成果编制各类地图,其内容一般包括地图投影、地图编制、地图整饰和地图制印等分支。

本书主要介绍普通测量学和部分工程测量学的内容。

测量学应用很广,在国民经济和社会发展规划中,测绘信息是重要的基础信息之一,各种规划和地籍管理,首先要有地形图和地籍图。另外,在各项经济建设中,从建设项目的勘测设计阶段到施工、竣工、运营阶段,都需要进行大量的测绘工作。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。至于远程导弹、空间武器、人造卫星和航天器的发射,要保证它精确入轨,随时校正轨道和命中目标,除了应算出发射点和目标点的精确坐标、方位、距离外,还必须掌握地球的形状、大小的精确数据和有关地域的重力场资料。在科学试验方面,诸如空间科学技术的研究,地壳的变形、地震预报、灾情检测、空间技术研究,海底资源探测、大坝变形监测、加速器和核电站运营的监测等,以及地板周期性运动的研究,都需要测绘工作紧密配合和提供空间信息。即使在国家的各级管理中,测量和地图资料也是不可缺少的重要工具。

测量学在土木工程专业的工作中有着广泛的应用。例如,在勘察设计的各个阶段,需要测区的地形信息和地形图或电子地图,供工程规划、选择厂址和设计使用。在施工阶段,要进行施工测量,将设计好的建构筑物的平面位置和高程测设于实地,以便施工;伴随着施工的进展,不断地测设高程和轴线(中心线),以指导施工;根据需要还要进行设备的安装测量。在施工的同时,要根据建(构)筑物的要求,开始进行变形观测,直至建(构)筑物基本上停止变形为止,以监测施工的建构筑物变形的全过程,为保护建构筑物提供资料。施工结束后,及时进行竣工测量,绘制竣工图,供日后扩建、改建提供依据。在建构筑物使用和工程的运营阶段,对某些大型及重要的建构筑物,还要继续进行变形观测和安全监测,为安全运营和生产提供资料。由此可见,测量工作在土木工程专业应用十分广泛,它贯穿着工程建设的全过程,特别是大型和重要的工程,测量工作是非常重要的。

测量学是土木工程专业的专业基础课。土木工程专业的学生,学习完本课程后,要求达到掌握普通测量学的基本知识和基本理论;了解先进测绘仪器原理,具备使用测量仪器的操作技能,基本掌握大比例尺地形图的测图原理和方法;对数字测图的过程有所了解;在工程规划、设计、施工中能正确应用地形图和测量信息;掌握处理测量数据的理论和评定精度的方法;在施工过程中,能正确使用测量仪器进行工程的施工放样工作。

测量学是一门综合性极强的实践性课程,要求学生在掌握测量学基本理论、技术和方法的基础上,应具备动手操作测量仪器的技能。因此,在教学过程中,除了课堂讲授之外,必须安排一定量的实习和实训,以便巩固和深化所学的知识,这对掌握测量学的基本理论及技能,建立控制测量和地形测绘的完整概念是十分有效的。通过实习可以培养学生分析问题和解决问题的能力,并为利用所学理论和技能解决相关问题打下坚实的基础。

1.1.2 测量学在国家经济建设和发展中的作用

随着科学技术的飞速发展,测量学在国家经济建设和发展的各个领域发挥着越来越重要的作用。工程测量是直接为工程建设服务的,它的服务和应用范围包括城建、地质、铁路、交通、房地产管理、水利电力、能源、航天和国防等各种工程建设部门。

(1) 城乡规划和发展离不开测量学 我国城乡面貌正在发生日新月异的变化,城市和村镇的建设与发展,迫切需要加强规划与指导,而搞好城乡建设规划,首先要有现势性好的地图,提供城市和村镇面貌的动态信息,以促进城乡建设的协调发展。

(2) 资源勘察与开发离不开测量学 勘探人员在野外工作,离不开地图,从确定勘探地域到最后绘制地质图、地貌图、矿藏分布图等,都需要用测量技术手段。随着测量技术的发展,如重力测量可以直接用于资源勘探。工程师和科学家根据测量取得的重力场数据可以分析地下是否存在重要矿藏,如石油、天然气、各种金属等。

(3) 交通运输、水利建设离不开测量 公路、铁路的建设从规划、选线、勘测设计、施工建设、竣工验收、工后运营、养护管理等都离不开测量。大、中水利工程也是先在地形图上选定河流渠道和水库的位置,划定流域面积,储流量,再测得更详细的地图(或平面图)作为河渠布设、水库及坝址选择、库容计算和工程设计的依据。如三峡工程从选址、移民,到设计大坝等,测量工作都发挥了重要作用。

(4) 国土资源调查、土地利用和土壤改良离不开测量 地籍图、房产图对土地资源开发、综合利用、管理和权属确认具有法律效力。建设现代化的农业,首先要进行土地资源调查,摸清土地“家底”,而且还要充分认识各地区的具体条件,进而制定出切实可行的发展规划。测量为这些工作提供了一个有效的工具。地貌图,反映出了地表的各种形态特征、发育过程、发育程度等,对土地资源的开发利用具有重要的参考价值;土壤图,表示了各类土壤及其在地表分布特征,为土地资源评价和估算、土壤改良、农业区划提供科学依据。

1.2 测量学的发展与现状

1.2.1 测量学的发展简史

科学的产生和发展是由生产决定的。测量学也不例外,它是一门历史悠久的学科,是人类长期以来,在生活和生产实践中逐渐发展起来的。由于生活和生产的需要,人类社会在远古时代,就已将测量工作用于实际。早在公元前21世纪夏禹治水时,已经使用了“准、绳、规、矩”四种测量工具和方法;埃及尼罗河泛滥后,在农田的整治中也应用了原始的测量技术。在公元前27世纪建设的埃及大金字塔,其形状与方向都很准确,这说明当时就已有放样的工具和方法。我国早在2000多年前的夏商时代,为了治水就开始了水利工程测量工作。司马迁在《史记》中对夏禹治水有这样的描述:“陆行乘车,水行乘船,泥行乘橇,山行乘撵,左准绳,右规矩,载四时,以开九州,通九道,陂九泽,度九山。”这记录的就是当时的工程勘测情景,准绳和规矩就是当时所用的测量工具,“准”是可揆平的水准器,“绳”是丈量距离的工具,“规”是画圆的器具,“矩”是一种可定平、测长度、高度、深度和画矩形的通用测量仪器。早期的水利工程多为河道的疏导,以利防洪和灌溉,其主要的测量工作是确定水位和堤坝的高度。秦代李冰父子主持修建的都江堰水利枢纽工程,曾用一个石头人来标定水位,当水位超过石头人的肩时,下游将受到洪水的威胁;当水位低于石头人的脚背时,下游将出现干旱。这种标定水位的办法与现代

水位测量的原理完全一样。北宋时沈括为了治理汴渠，测得“京师之地比泗州凡高十九丈四尺八寸六分”，是水准测量的结果。

在天文测量方面，我国远在颛顼高阳氏(公元前 2513—前 2434 年)便开始通过观测日、月、五星，来确定一年的长短，战国时制出了世界上最早的恒星表。秦代(公元前 246—前 206 年)用颛顼历定一年的长短为 365.25 天，与罗马人的儒略历相同，但比其早四五百年。宋代的《统天历》，确定一年为 365.2425 天，与现代值相比，只有 26s 的误差。由此可见，天文测量在古代已有很大的发展。

在研究地球形状和大小方面，在公元前就已有人提出丈量子午线的弧长，以推断研究地球形状和大小。我国于唐代(公元 724 年)在一行僧主持下，实量河南白马到上蔡的距离和北极高度角，得出子午线 1° 的弧长为 132.31km，为人类正确认识地球作出了贡献。1849 年，英国的斯托克斯提出利用重力观测资料确定地球形状的理论，之后又提出了用大地水准面代替地球形状，从此确认了大地水准面比椭球面更接近地球的真实形状的观念。

17 世纪以来，望远镜的应用，为测量科学的发展开拓了光明的前景，使测量方法、测量仪器有了重大的改变。三角测量方法的创立，大地测量的广泛开展，对进一步研究地球的形状和大小，以及测绘地形图都起了重要的作用。与此同时，在测量理论方面也有不少创新，如高斯的最小二乘法理论和横圆柱投影理论，就是其中重要的例证，至今仍在沿用。地形图是测绘工作的重要成果，是生产和军事活动的重要工具。公元前 20 世纪已被人们所重视，我国最早的记载是夏禹将地图铸于鼎上，以便百姓从这些图画中辨别各种事物，这是地图的雏形，说明中国在夏代已经有了原始的地图。可惜，原物在春秋战国时因战乱被毁而失传。此后历代都编制过多种地图，由此足以说明地图的测绘已有较大发展，但测绘工作仍使用手工业生产方式。1903 年飞机的发明，使摄影测量成为可能，不但使成图工作提高了速度，减轻了劳动强度，而且改变了测绘地形图的工作现状，由手工业生产方式向自动化方式转化，开创了光明的前景。

1.2.2 测量学的发展现状

1. 测量学的发展现状

20 世纪中叶，新的科学技术得到了快速发展，特别是电子学、信息学、计算机科学和空间科学等，在其自身发展的同时，给测量学的发展开拓了广阔的道路，推动着测量技术和仪器的变革和进步。测绘科学的发展很大部分是从测绘仪器发展开始的，然后使测量技术发生重大的变革和进步。1947 年，光电测距仪问世，20 世纪 60 年代，激光器作为光源用于电磁波测距，彻底改变了大地测量工作中以角度换算距离的境况，因此，除用三角测量外，还可用导线测量和三边测量。随着光源和微处理机的问世和应用，测距工作向着自动化方向发展。氦氖激光光源的应用使测程达到 60km 以上，精度达到 $\pm(5\text{mm} + 5 \times 10^{-6}D)$ 。80 年代开始，多波段(多色)载波测距的出现，抵偿、减弱了大气条件的影响，使测距精度大大提高。ME5000 测距仪达到 $\pm(0.2\text{mm} + 0.1 \times 10^{-6}D)$ 标称精度。与此同时，砷化钾发光管和激光光源的使用，使测距仪的体积大大减小，质量减轻，向着小型化大大迈进了一步。

测角仪器的发展也十分迅速，随着科学技术的进步而发展，经纬仪从金属度盘发展为光学度盘、电子度盘和电子读数，且能自动显示、自动记录，完成了自动化测角的进程，自动测角的电子经纬仪问世，并得到应用。同时，电子经纬仪和测距仪结合，形成了电子速测仪(全站仪)，其体积小，质量轻，功能全，自动化程度高，为数字测图开拓了广阔的前景。最近又推出了智能全站仪，瞄准目标都能自动化。

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始。之后，激光水

准、激光扫平仪的发展,为提高水准测量的精度和用图创造了条件。近年来,数字水准仪的应用,也使水准测量的自动记录、自动传输、存储和处理数据成为现实。

20世纪80年代,全球定位系统(GPS)问世,采用卫星直接进行空间点的三维定位,引起了测绘工作的重大变革。由于卫星定位具有全球性、全天候、快速、高精度和无需建立高标等优点,被广泛应用在大地测量、工程测量、地形测量、军事导航定位上。世界上很多国家为了使用全球定位系统的信号,迅速进行了接收机的研制。现在已生产出第五代产品,它体积小,功能全,质量轻。

除了美国研制GPS定位系统外,前苏联研制了GLONASS定位系统,还有欧洲空间局的全球卫星导航系统(NAVSATD)等都开展了工作。我国也在进行卫星导航定位系统的研究,制定了“北斗计划”,所研制的双星定位系统已取得很大进展,不久即将问世。

由于测量仪器的飞速发展和计算机技术的广泛应用,地面的测图系统,由过去的传统测绘方式发展为数字测绘。地形图是由数字表示的,用计算机进行绘制和管理既便捷又迅速,并且精度可靠。测量学的发展趋势和特点可概括为:测量内外业作业的一体化;数据获取及处理的自动化;测量过程控制和系统行为的智能化;测量成果和产品的数字化;测量信息管理的可视化;信息共享和传播的网络化。现代工程测量发展的特点可概括为:精确、可靠、快速、简便、连续、动态、遥测、实时。

2. 我国测量事业的发展

中华人民共和国成立后,测量科学的发展进入了一个崭新的阶段。1956年成立了国家测绘总局,建立了测绘研究机构,组建了专门培养测绘人才的院校。各业务部门也纷纷成立测绘机构,党和国家对测绘工作给予了很大的关怀和重视。

建国以来,我国测绘工作取得了辉煌的成就:

1) 在全国范围内(除台湾省)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——1980西安坐标系。20世纪90年代,利用GPS测量技术建立了包括AA级、B级等在内的国家GPS网,21世纪初对喜马拉雅山进行了重新测高,并测得其主峰海拔高程为8844.43m。

2) 完成了国家基础地形图的测绘,测图比例尺也随着国民经济建设的发展而不断增大,测图方法也从常规的经纬仪、平板仪测图,发展到全数字摄影测量成图、GPS测量技术及全站仪地面数字地图。编制出版了各种地图、专题图,制图过程实现了数字化和自动化。

3) 制定了各种测绘技术规范(规程)和法规,统一了技术规格和精度指标。

4) 建立了完整的测绘教育体系,测绘技术步入世界先进行列,开发研制了一批具有世界先进水平的测绘软件,如全数字摄影测量系统——Virtuo Zo,面向对象的地理信息系统——GeoStar,地理信息系统软件平台——MapGIS,数字测图系统——清华三维的EPSW、武汉瑞得的RDMS、南方的CASS等,使测绘数字化、自动化的程度越来越高。

5) 测绘仪器生产发展迅速,不仅生产出各个等级的经纬仪、水准仪、平板仪,而且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。

6) 测绘技术和手段不断发展,传统的测绘技术已基本被现代测绘技术“3S”(GPS、GIS、RS)所替代;测绘产品应用范围不断拓宽,并向用户提供“4D”数字产品。

测绘工作十分精细严密,其测绘成果和成图质量的优劣将对国民经济建设发展产生重大影响。为了使测绘成果更好地服务于国民经济建设发展的各行各业,必须努力学习,勇于实践,在学好传统测绘理论的基础上,掌握现代测绘理论与技术,发扬测绘技术人员的真实、准确、细致和按时完成任务的优良传统,只有这样,才能使我国的测绘事业不断发展,测绘水平不断提高,测绘成果应用领域不断扩展。

1.3 测量学的基础知识

测量工作的主要研究对象是地球的自然表面，但地球表面形状十分复杂，且很不规则，其上有高山、深谷、丘陵、平原、江湖、海洋等。通过长期的测绘工作和科学调查，了解到地球表面上海洋面积约占 71%，陆地面积约占 29%，世界第一高峰珠穆朗玛峰高出海平面 8844.43m，而在太平洋西部的马里亚纳海沟低于海平面 11022m。尽管有这样大的高低起伏，但相对于地球半径 6371km 来说仍可忽略不计。因此，测量中把地球总体形状看做是由静止的海水面向陆地延伸所包围的球体。

由于地球的自转运动，地球上任意一点都要受到离心力和地球引力的双重作用，这两个力合称为重力。重力的方向线称为铅垂线，铅垂线是测量工作的基准线。由前所述，我们可以设想地球的整体形状是被海水所包围的球体，即设想将一静止的海洋面扩展延伸，使其穿过大陆和岛屿，形成一个封闭的曲面，如图 1-1 所示。静止的水面称为水准面。水准面是受地球重力影响而形成的，水准面的特性是处处与铅垂线垂直。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，它具有几何意义及物理意义。水准面和铅垂线就是实际测量工作所依据的面和线。与水准面相切的平面称为水平面。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并向大陆、岛屿内延伸而形成的一个闭合曲面称为大地水准面。大地水准面是测量工作的基准面，由大地水准面所包围的地球形体称为大地体。通常用大地体来代表地球的真实形状和大小。

大地水准面和铅垂线是测量外业所依据的基准面和基准线。用大地体表示地球形体是恰当的，但由于地球内部质量分布不均匀，引起地面上各点的铅垂线方向产生不规则变化，致使大地水准面是一个不规则而复杂的曲面，在这样的面上是无法进行测量数据处理的。为了使用方便，通常用一个与大地水准面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，作为测量工作的基准面。如图 1-2 所示，旋转椭球体的形状和大小是由基本元素决定的。它由椭圆 NESW 绕短轴 NS 旋转而成。旋转椭球体的基本元素为长半轴 a 、短半轴 b 和扁率 $\alpha = (a - b)/a$ 。

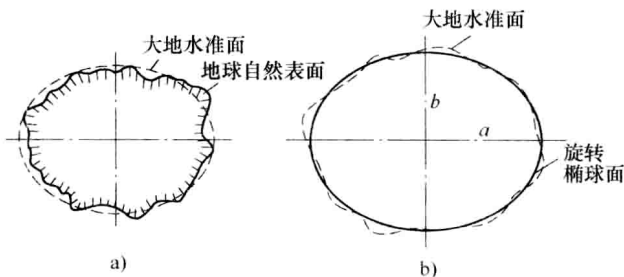


图 1-1 大地水准面

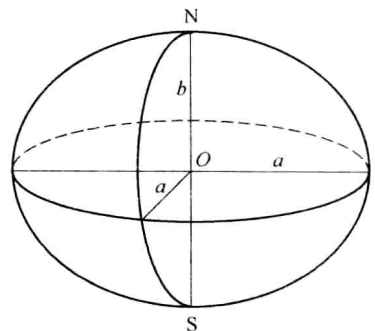


图 1-2 旋转椭球体

在几何大地测量中，地球椭球体的形状和大小通常用长半轴 a 、扁率 α 表示。其值可用传统的弧度测量和重力测量的方法测定。许多国内外学者曾分别测算出了不同地球椭球体的参数值，见表 1-1。

表 1-1 地球椭球体的几何参数

椭球名称	长半轴 a /m	短半轴 b /m	扁率 α	计算年代/国家	备注
贝塞尔	6377397	6356079	1:299.152	1841年/德国	—
海福特	6378388	6356912	1:297.0	1910年/美国	1942年国际第一个推荐值
克拉索夫斯基	6378245	6356863	1:298.3	1940年/前苏联	中国1954年北京坐标系采用
国际椭球	6378140	6356755	1:298.257	1975年/国际	IUGG第17届大会推荐, 中国1980年国家大地坐标系采用, 第三个推荐值
WGS-84	6378137	6356752	1:298.257	1979年/国际	美国GPS采用, 第四个推荐值
克拉克	6378249	—	1:293.459	1880年/英国	—
德兰布尔	6375653	—	1:334.0	1800年/法国	—

注: IUGG 为国际大地测量与地球物理联合会 (International Union of Geodesy and Geophysics)

我国采用的参考椭球体有中华人民共和国成立前的海福特椭球体和中华人民共和国成立初期的克拉索夫斯基椭球体。由于克拉索夫斯基椭球体参数同1975年国际推荐值相比, 其长半轴相差105m, 因而在1978年, 我国根据自己实测的天文大地资料, 推算出适合本地区的地球椭球体参数, 采用了1975年国际椭球, 该椭球的基本元素是: $a = 6378140\text{m}$, $b = 6356755.3\text{m}$, $\alpha = 1:298.257$ 。

根据一定的条件, 确定参考椭球体与大地水准面的相对位置所做的测量工作, 称为参考椭球体的定位。在一个国家适当地点选一点 P , 射向大地水准面与参考椭球面相切, 切点 P' 位于 P 点的铅垂线方向上 (见图 1-3), 这样椭球面上 P' 点的法线与该点对大地水准面的铅垂线重合, 并使椭球的短轴与自转轴平行, 且椭球面与这个国家范围内的大地水准面差距尽量地小, 从而确定参考椭球面与大地水准面的相对位置关系, 称为椭球体定位。这里, P 点称为大地原点。我国大地原点位于陕西泾阳永乐镇。在大地原点上进行了精密天文测量和精密水准测量, 获得了大地原点的平面起算数据, 基于此建立的坐标系为“1980年国家大地坐标系”。参考椭球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。由于参考椭球的扁率很小, 在小区域的普通测量中可将地(椭)球看做圆球, 其半径 $R = (2a + b)/3 = 6371\text{km}$ 。

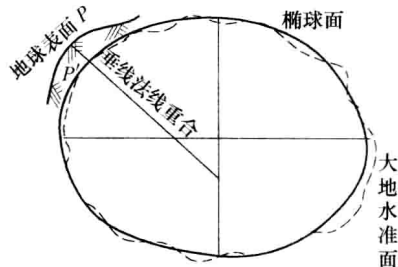


图 1-3 参考椭球体的定位

1.4 地面点位的确定

测量工作的基本任务是确定地面点的空间位置。在测量工作中,通常采用地面点在基准面(如椭球面)上的投影位置,以及该点沿投影方向到基准面(如椭球面、大地水准面)的距离来表示。

在一般测量工作中,常将地面点的空间位置用大地经度、纬度(或高斯平面直角坐标)和高程表示,它们分别从属于大地坐标系(或高斯平面直角坐标)和指定的高程系统,即使用一个二维坐标系(椭球面或平面)与一个一维坐标系的组合来表示,即需用坐标和高程三维量来确定。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。由于卫星大地测量的迅速发展,地面点的空间位置也可采用三维的空间直角坐标表示。

1.4.1 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,可用地理坐标来确定地面点的位置。地理坐标系是一种球面坐标,依据球体的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。该坐标用天文经度和天文纬度表示。如图 1-4 所示,将大地体看做地球,NS 即为地球的自转轴,N 为北极,S 为南极, O 为地球体中心。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。天文子午面与地球表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,相应的子午线称为起始子午线或零子午线,并作为经度计量的起点。过点 P 的天文子午面与起始子午面所夹的二面角就称为 P 点的天文经度,用 λ 表示,其值为 $0^\circ \sim 180^\circ$,在本初子午线以东的叫东经,以西的叫西经。

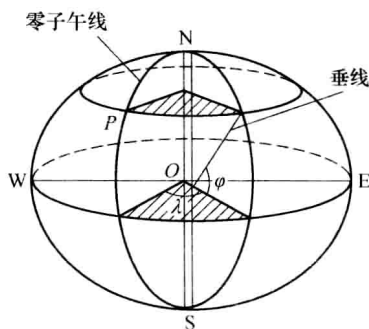


图 1-4 天文坐标系

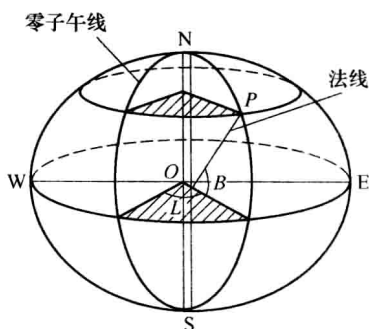


图 1-5 大地坐标系

通过地球体中心 O 且垂直于地轴的平面称为赤道面,它是纬度计量的起始面。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 $0^\circ \sim 90^\circ$,在赤道以北的叫北纬,以南的叫南纬。

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

大地坐标系是以参考椭球面为基准面,以起始子午面(即通过格林尼治天文台的子午面)和

赤道面作为椭球面上确定某一点投影位置的两个参考面。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。该坐标用大地经度和大地纬度表示。如图 1-5 所示,包含地面点 P 的法线且通过椭球旋转轴的平面称为点 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二面角称为 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 $0^\circ \sim 90^\circ$ 。我国 1954 年北京坐标系和 1980 年国家大地坐标系就是分别依据两个不同的椭球建立的大地坐标系。

大地坐标 (L, B) 因所依据的椭球面不具有物理意义而不能直接测得,可先由天文观测法测得 P 点的天文坐标 (λ, φ) ,再利用 P 点的法线与铅垂线的相对关系(称为垂线偏差)改算为大地坐标 (L, B) 。一般测量工作中可以不考虑这种算法。

1.4.2 空间直角坐标系

以椭球体中心 O 为原点,起始子午面与赤道面交线为 X 轴,赤道面上与 X 轴正交的方向为 Y 轴,椭球体的旋转轴为 Z 轴,指向符合右手规则。在该坐标系中, P 点的点位用 OP 在这三个坐标轴上的投影 x, y, z 表示(图 1-6)。

任一地面点 P 在空间直角坐标系中的坐标,可表示为 (X, Y, Z) 或 (L, B, H) ,二者之间有一定的换算关系。美国的全球定位系统 GPS 用的 WGS—84 坐标就属这类坐标。

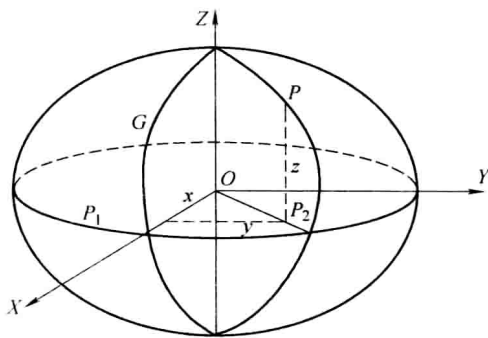


图 1-6 空间直角坐标系

1.4.3 独立平面直角坐标系

当测区的范围较小(如小于 100km^2)时,常把球面投影看做平面,这样地面点在投影面上的位置就可以用平面直角坐标来确定。测量工作中采用的平面直角坐标系如图 1-7a 所示,规定南北方向为纵轴,即 X 轴,向北为正;东西方向为横轴 Y 轴,向东为正。测区内任一地面点用坐标 (x, y) 来表示。

坐标原点有时是假设的,假设的原点位置应使测区内的点的 x, y 值为正。一般设在测区的西南角,以避免坐标出现负值。测量平面直角坐标系与数学平面直角坐标系的区别如图 1-7 所示。

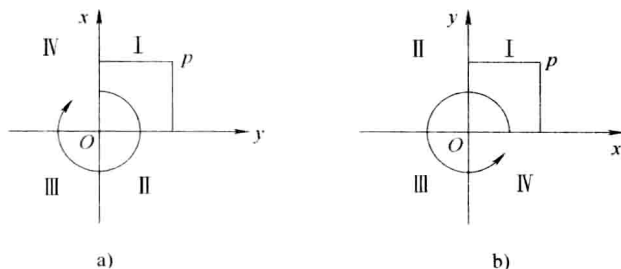


图 1-7 测量平面直角坐标系

a) 测量平面直角坐标系 b) 数学平面直角坐标系

1.4.4 高斯-克吕格平面直角坐标系

1. 高斯投影

地理坐标建立在球面基础上,不能直接用于测图、工程建设规划、设计、施工,因此,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。为了解决球面与平面这对矛盾,需将球面坐标按一定数学法则归算到平面上,即按照地图投影理论(高斯投影)将球面上的大地坐标转换为平面直角坐标,就是地图投影。其过程可用方程表示

$$x = F_1(L, B), y = F_2(L, B) \quad (1-1)$$

式中 L 、 B ——椭球体面上某点的大地坐标;

x 、 y ——该点投影到平面上的直角坐标。

由于旋转椭球体是一个不可直接展开的曲面,如果将该面上的元素投影到平面上,其变形是不可避免的。投影变形一般可分为角度变形、长度变形和面积变形三种。因此,地图投影也有等角投影、等面积投影和任意投影。尽管投影变形不可避免,但人们可以选择适当的投影方法,使某一种变形为零,也可使整个变形减小到某一适当程度。

高斯投影就是设想将截面为椭圆的柱面套在椭球体的外面,如图 1-8 所示,使柱面轴线通过椭球中心,并使椭球面上的中央子午线与柱面相切,而后将中央子午线附近球面上的点、线等角投影(也称为正形投影)到柱面上,再通过极点 N 的母线将柱面剪开,展成平面,即为高斯投影平面。目前我国采用的是高斯投影,高斯投影是由德国数学家、测量学家高斯于 1825 ~ 1830 年首先提出,到 1912 年由德国测量学家克吕格推导出实用的坐标投影公式,所以又称高斯-克吕格投影。它是一种横轴等角切椭圆柱投影,该投影解决了将椭球面转换为平面的问题。从几何意义上看,就是假设一个椭圆柱横套在地球椭球体外并与椭球面上的某一条子午线相切,这条相切的子午线称为中央子午线。假想在椭球体中心放置一个光源,通过光线将椭球面上一定范围内的物象映射到椭圆柱的内表面上,然后将椭圆柱面沿一条母线展开成平面,即获得投影后的平面图形,如图 1-8 所示。

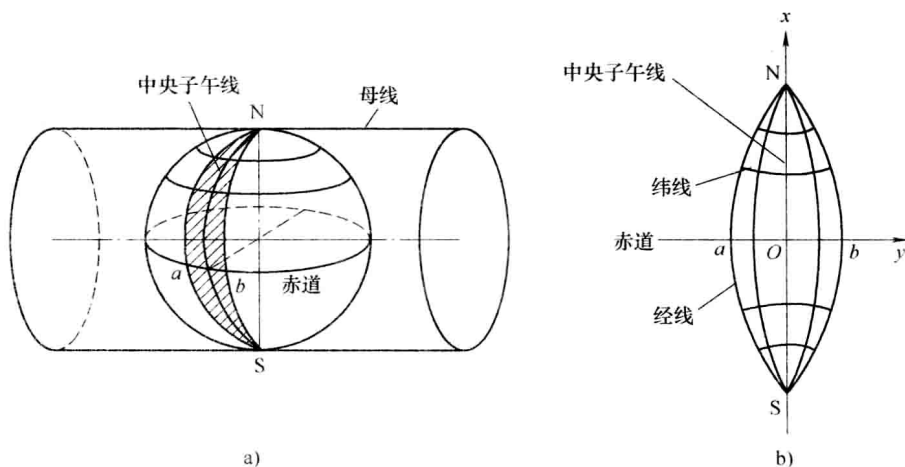


图 1-8 高斯投影概念

该投影的经纬线图形有以下特点:

1) 投影后的中央子午线为直线,无长度变化。其余的经线投影为凹向中央子午线的对称曲线,长度较球面上的相应经线略长。离中央子午线越远,变形就越大。

2) 在椭球体上, 除中央子午线外, 其余子午线投影后均向中央子午线弯曲, 且对称于中央子午线和赤道, 并收敛于两极。赤道的投影为一横线, 并与中央子午线正交。其余纬线的投影为凸向赤道、凹向两极的对称曲线。

3) 经纬线投影后仍然保持相互垂直的关系, 说明投影后的角度无变形。

高斯投影没有角度变形, 称等角投影, 也称为正形投影。在投影中, 使原椭球面上的微分图形与平面上的图形始终保持相似。正形投影有两个基本条件, 一是它的保角性, 即投影前后保持角度大小不变; 二是它的伸长固定性, 即长度投影虽然会发生变化, 但在任一点上各方向的微分线段投影前后比为一常数

$$m = \frac{ds}{dS} = k \quad (1-2)$$

式中 ds ——地面上任一点各方向投影前的微分线段;

dS ——地面上任一点各方向投影后的微分线段;

k ——常数。

2. 高斯平面直角坐标系

在投影面上, 中央子午线和赤道的投影都是直线。以中央子午线和赤道的交点 O 作为坐标原点, 将中央子午线的投影作为纵坐标轴, 用 x 表示, 向北为正; 以赤道的投影作为横坐标轴, 用 y 表示, 向东为正, 两轴的交点作为坐标原点, 由此构成的平面直角坐标系称为高斯平面直角坐标系, 如图 1-9 所示。

高斯投影中, 除中央子午线外, 其余各点均存在长度变形, 且距中央子午线越远, 长度变形越大。为了对长度变形加以控制, 将地球椭球面按一定的精度差分成若干范围不大的带, 称为投影带, 如图 1-10a 所示。投影带带宽分为经差 6° 和 3° , 分别称为 6° 带和 3° 带, 如图 1-10b 所示。

6° 带投影是从英国格林尼治起始子午线开始, 自西向东, 每隔经差 6° 分为一带, 将地球分成 60 个带, 其带号 n 分别为 1, 2, ..., 60。 6° 带的最大变形在赤道与投影带最外一条经线的交点上, 长度变形为 0.14%, 面积变形为 0.27%。每带的中央子午线经度可按下式计算

$$L_6 = (6n - 3)^\circ \quad (1-3)$$

3° 投影带是在 6° 带的基础上划分的。每 3° 为一带, 共 120 带, 其中中央子午线在奇数带时与 6° 带中央子午线重合, 3° 带的边缘最大变形有所减小, 长度变形为 0.04%, 面积变形为 0.14%。每带的中央子午线经度可按下式计算

$$L_3 = 3^\circ n' \quad (1-4)$$

式中 n' —— 3° 带的带号。

我国南起北纬 4° 、北至北纬 54° , 西由东经 74° 起、东至东经 135° , 东西横跨 11 个 6° 带, 21 个 3° 带。北京位于 6° 带的第 20 带, 中央子午线经度为 117° 。由于我国位于北半球, 在高斯平面直角坐标系内, x 坐标均为正值, 而 y 坐标值有正有负。为避免 y 坐标出现负值, 规定将 x 坐标轴向西平移 500km (半个投影带的最大宽度不超过 500km) 如图 1-11 所示, 此外为了便于区别某点位于哪一个投影带内, 还应在 y 坐标值前冠以投影带的带号, 这种坐标称为国家统一坐标。如图 1-11 中的 A 点位于第 18 投影带, 其自然坐标为 $x = 3395451\text{m}$, $y = -82261\text{m}$, 它在第 18 投影带中的高斯通用坐标则为 $X = 3395451\text{m}$, $Y = 18\ 417739\text{m}$ 。

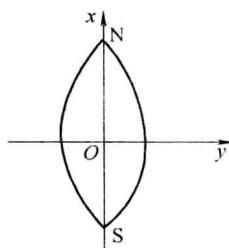


图 1-9 高斯平面直角坐标系