



普通高等教育“十二五”规划教材

测量学

(第二版)

赵建三 贺跃光 主 编
唐平英 谢树春 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

C13024506

P2-43

13-2



普通高等教育“十二五”规划教材

测量学

(第二版)

主 编	赵建三	贺跃光
副主编	唐平英	谢树春
编 写	范志勇	徐卓揆
	熊旭平	廖中平
主 审	高德慈	



P2-43
13-2



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



北航

C1631943

002550217

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十二五”规划教材,全书共十三章,主要内容有测量学的基本理论、基本知识;水准仪、经纬仪、全站仪等常用仪器的使用方法以及高程测量、角度测量、距离测量和坐标测量方法;测量误差的基本知识;小区域控制测量施测和计算方法;卫星定位测量;大比例尺地形图传统测绘方法及地形图的应用;数字化测图方法以及数字地面模型在道路工程中的应用;测设的基本工作;建筑和水利工程测量;道路工程测量;桥梁与隧道工程测量;测量新技术简介。

本书注重内容的系统性、实践性,兼顾不同行业背景的土建工程技术人员对测量学知识的要求,对教材内容、案例等资料进行了适当的取舍,力求使学生掌握基本理论的同时,提高分析问题和解决土建工程建设中实际问题的能力。

本书可作为高等院校土木工程(含道路工程、桥梁工程、建筑工程、隧道工程、岩土工程等)、港口航道工程,水利水电工程,交通工程等专业及相近专业的教材,也可作为土建工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

测量学/赵建三,贺跃光主编. —2版. —北京:中国电力出版社,2013.1

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5123-3922-4

I. ①测… II. ①赵…②贺… 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309070号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2008年6月第一版

2013年1月第二版 2013年1月北京第五次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 20.75印张 500千字

定价36.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前言

近年来,测绘科学技术迅速发展,电子水准仪、全站仪、GPS接收机等已成为常规测量仪器,而自动全站仪、三维激光扫描仪、无人机遥感(UAVRS)技术等也在工程建设中得到更多应用。为了使“测量学”课程的教学更适应测绘科学技术的发展和工程建设的实际需要,特对《测量学》进行修订,本次修订的主要内容有:

(1) 原第3章“角度测量”与第4章“距离测量与直线定向”合并为新第3章“角度测量、距离测量及坐标测量”。

(2) 原第5章改为第4章,第6章改为第5章。

(3) 第5章“小地区控制测量”删除了原§6.3“小三角测量”、原§6.7“全球定位系统(GPS)在控制测量中的应用”。

(4) 增加新的第6章“卫星定位测量”。

(5) 第13章增加§13.2“测绘新仪器”,介绍测量机器人、三维激光扫描仪、小型航摄无人机。原§13.2改为§13.3。

(6) 第1章“概述”、第2章“水准测量”、第3章“角度测量、距离测量及坐标测量”、第5章“小地区控制测量”、第7章“大比例尺地形图的测绘和应用”、第8章“大比例尺数字地形图的测绘与应用”、第9章“测设(放样)的基本工作”、第12章“桥隧工程测量”等内容作了修改和补充。

本教材编写工作由长沙理工大学完成,赵建三教授、贺跃光教授担任主编,唐平英副教授、谢树春副教授担任副主编。各章的编写分工如下:赵建三编写第1章、第2章,谢树春编写第3章,范志勇编写第4章、第5章,廖中平编写第6章,熊旭平编写第7章、第8章,徐卓揆、贺跃光共同编写第9章、第10章、第13章,唐平英编写第11章、第12章。全书由赵建三负责统稿工作。

恳请广大教师和读者对本教材提出宝贵意见。

编者

2012年12月



第一版前言

为贯彻落实教育部《关于进一步加强高等学校本科教学工作的若干意见》和《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》的精神,加强教材建设,确保教材质量,中国电力教育协会组织制订了普通高等教育“十一五”教材规划。该规划强调适应不同层次、不同类型院校,满足学科发展和人才培养的需求,坚持专业基础课教材与教学急需的专业教材并重、新编与修订相结合。本书为新编教材。

根据测量学教学大纲的要求,为适应课程建设、深化教学改革的需要,结合测绘新技术的广泛应用编写本教材,供高等学校土木工程各专业方向、交通工程、水利水电工程、港口航道工程等本科专业测量学(或工程测量)课程教学使用,也可供土建工程技术人员参考。

现代科学技术飞速发展,特别是电子学、信息学、电子计算机科学和空间科学等,在其自身发展的同时,给古老的测量科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。顺应时代潮流,反映测量科学的深刻变革,总结教学改革成果,为21世纪培养合格人才,是测绘教育工作者应承担的神圣职责。

编者在教材内容的组织上遵循“保、删、增、减”原则,保留了部分经典测量仪器和方法的介绍,保持教材体系的完整性和科学性;删除了市场上已基本淘汰的仪器介绍,如老式经纬仪、测距仪、平板仪等;增加了测绘新技术应用的篇幅,如数字测图技术、3S测量技术及其在工程上应用等;精简了传统测绘技术方面的内容,如钢尺量距、传统地形图测绘方法等。注重教材的系统性、实践性,兼顾不同行业背景的土建学科工程技术人员对测量学知识的要求,进行教材内容、案例等资料的选取。介绍测量学的基本理论、基本知识、基本技能,并通过介绍工矿企业、道路、桥梁、隧道、水利枢纽工程勘测设计阶段和施工过程及安全监控的测量工作,以及工程运营管理阶段的测量工作,力求使学生掌握基本理论的同时,提高分析问题和解决土建工程建设中实际问题的能力。

本书由长沙理工大学赵建三教授、中南林业科技大学王唤良教授担任主编,长沙理工大学贺跃光教授、唐平英副教授担任副主编。各章的编写分工如下:赵建三编写第1章,王唤良编写第2章,谢树春编写第3章、第4章,范志勇编写第5章、第6章,熊旭平编写第7章、第8章,贺跃光、徐卓揆共同编写第9章、第10章、第13章,唐平英编写第11章、第12章,全书由赵建三负责统稿。北京工业大学高德慈教授审阅了全书。

在编写本教材过程中,参考了许多文献,谨在此向所参考的文献所有者表示诚挚的谢意。研究生卢冠群、周林、颜奇同学为本书进行了绘制图表、校正等工作,在此一并表示感谢。由于编者水平所限,不当与疏漏之处在所难免,恳请读者批评指正。

编者

2008年3月



目 录

前言

第一版前言

1 概述	1
1.1 测量学的任务与应用	1
1.2 测量学发展概况	4
1.3 地球的形状和大小	6
1.4 地面点位的确定	7
1.5 水平面代替水准面的限度	11
1.6 测量工作的程序及基本内容	13
思考题与习题	15
2 水准测量	16
2.1 水准测量原理	16
2.2 水准测量的仪器、工具及操作使用	17
2.3 水准测量的方法及成果整理	21
2.4 三、四等水准测量	27
2.5 精密水准仪、自动安平水准仪、电子水准仪	30
2.6 水准仪的检验与校正	34
2.7 水准测量误差分析及注意事项	37
思考题与习题	38
3 角度测量、距离测量及坐标测量	40
3.1 角度测量原理及经纬仪	40
3.2 水平角与竖直角测量	48
3.3 水平角测量误差分析	55
3.4 经纬仪的检验与校正	58
3.5 距离测量	62
3.6 全站仪及其使用	74
3.7 直线定向及坐标测量原理	79
思考题与习题	88
4 测量误差的基础知识	91
4.1 测量误差概述	91
4.2 精度及衡量精度的指标	95
4.3 误差传播定律及其应用	97
4.4 直接观测平差	101
思考题与习题	107

5 小地区控制测量	109
5.1 控制测量概述	109
5.2 导线测量	112
5.3 交会定点	120
5.4 三角高程测量	124
5.5 全站仪三维导线测量	127
思考题与习题	129
6 卫星定位测量	131
6.1 卫星定位测量概述	131
6.2 卫星定位测量原理	138
6.3 全球导航卫星系统 (GNSS) 静态相对定位	142
6.4 全球导航卫星系统 (GNSS) 动态相对定位	149
思考题与习题	154
7 大比例尺地形图的测绘和应用	155
7.1 地形图的基本知识	155
7.2 地形图的分幅与编号	163
7.3 大比例尺地形图传统测绘方法	168
7.4 大比例尺地形图的应用	174
思考题与习题	183
8 大比例尺数字地形图的测绘与应用	184
8.1 大比例尺数字地形图野外测绘方法	184
8.2 数字地形图的编辑和输出	193
8.3 数字地面模型及其在路线工程中的应用	198
思考题与习题	202
9 测设(放样)的基本工作	203
9.1 施工测量概述	203
9.2 测设的基本工作	203
9.3 平面点位的测设	207
9.4 直线坡度的测设	210
思考题与习题	210
10 建筑工程测量	212
10.1 建筑工程测量概述	212
10.2 建筑场地施工控制测量	213
10.3 民用建筑施工测量	215
10.4 工业厂房施工测量	221
10.5 高层建筑施工测量	225
10.6 水利建筑施工测量简介	228
10.7 工程建筑物的变形观测	233
思考题与习题	237

11 道路工程测量	238
11.1 道路工程测量概述.....	238
11.2 道路中线测量.....	239
11.3 道路曲线测设.....	243
11.4 全站仪测设道路中线.....	257
11.5 道路纵、横断面测量	261
11.6 道路施工测量.....	268
思考题与习题.....	272
12 桥隧工程测量	274
12.1 桥梁工程测量概述.....	274
12.2 桥梁施工控制测量.....	275
12.3 桥梁墩台中心定位与轴线测设.....	278
12.4 桥梁基础、涵洞及其他构造物的施工放样.....	283
12.5 桥梁的竣工测量和施工监控.....	287
12.6 隧道工程测量概述.....	290
12.7 隧道控制测量.....	291
12.8 隧道施工测量.....	300
思考题与习题.....	306
13 测量新技术简介	307
13.1 3S 技术及其在工程建设中的应用	307
13.2 测绘新仪器.....	311
13.3 工程测量学发展展望.....	315
思考题与习题.....	317
参考文献	318

1 概 述

1.1 测量学的任务与应用

测量学是研究地球的形状、大小以及确定地面(包括空中、地下和海底等)点位的科学。测量学的主要任务包括测绘和测设。测绘是指使用各种测量仪器和工具,通过观测、计算,得到一系列测量数据,利用这些数据将地球表面地物、地貌缩绘成地形图供人们使用。测设是指将图纸上规划设计好的建(构)筑物或特定位置经过测量工作在地面上标定出来,作为施工的依据,它是测绘的逆过程。

本书中的测量学指的是普通测量学,即测绘科学各分支学科中通用的基础内容。测绘科学(Surveying and Mapping)是指以研究实体(包括地球整体、表面以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的信息采集、处理、管理、更新和利用的科学与技术,简而言之,测绘科学主要研究地球的地理空间信息,同地球科学的研究有着密切的关系,现正在由计算机技术的支持朝着地理空间信息科学(Geo-Spatial Information Science,简称 Geomatics)方向发展和融合。测绘学科(包括测量学)服务的对象非常广泛,包括科学研究、国防建设、经济建设及社会发展规划等各个方面,测绘信息是一个国家最重要的基础设施之一。

1.1.1 测绘学科的分支

测绘学科按照研究范围和对象的不同,可分为以下几个分支学科。

(一) 大地测量学

研究和确定地球的形状、大小、重力场、整体和局部运动与地表面点的几何位置,以及它们变化的理论和技术的学科。凡研究对象为地表上一个较大的区域甚至整个地球时,就必须考虑地球的曲率影响。这种以研究广大地区为对象的测量科学是大地测量学的范畴。大地测量学可分为卫星大地测量、空间大地测量、几何大地测量(空间大地测量与几何大地测量又称为天文大地测量)、重力大地测量、海洋大地测量等。

大地测量为地球动态变化状态以及动力学机制理论研究提供依据;为研究海平面变化,保护人类生存环境,地震中长期预报提供依据和信息;为经济建设提供数据控制;为科学研究、航空、航天、航海提供定轨、定位;为国防建设服务,提高武器的命中精度和提供制导手段等。

(二) 普通测量学

研究地球表面小范围测绘的基本理论、技术和方法,不考虑地球曲率的影响,将地球局部表面当作平面看待,是测量学的基础。内容主要包括图根控制网的建立、地形图测绘及一般工程的测设。

(三) 摄影测量与遥感学

摄影测量与遥感是指利用对研究对象进行摄影或者辐射感应所得到的图片(模拟的和数字的)进行测量工作的科学。摄影测量与遥感可分为航天摄影测量、航空摄影测量、地面立

体摄影测量、遥感测量等。

摄影测量可以快速获取地球表面上地貌、地物的影像。在当代通信技术、计算机技术的支持下,可以实时地获取各种模拟的和数字的地图。利用遥感技术(电磁波、光波、热辐射等)可以快速获取地球表面、地球内部、环境景象、天体等传感目标的信息特征信号,应用于农业调查、土壤性质分析,以及自然灾害预测、植被分布、地下资源、气象、环境污染调查等。

(四) 海洋测绘学

海洋测绘学是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,主要包括海道测量、海洋大地测量、海底地形测量、海洋专题测量,以及航海图、海底地形图、各种海洋专题图和海洋图集等的编制。海道测量是以保证航行安全为目的,对地球表面水域及毗邻陆地进行的水深和岸线测量,以及地质、障碍物的探测等工作。海洋大地测量是测定海面地形、海底地形、海洋重力及其变化所进行的大地测量工作。海底地形测量是测定海底地形和地物的测量工作。海洋专题测量是以海洋区域的地理专题要素为对象的测量工作。海图制图是设计、编绘、整饰和印刷海图的工作,同陆地地图编制基本一致。

(五) 工程测量学

工程测量学是研究在工程建设和自然资源开发各个阶段,进行测量工作的理论和技术的学科,它是测绘学在国民经济和国防建设中的直接应用。对工程项目而言,工程测量可划分为:规划设计阶段的测量、施工兴建阶段的测量和运营管理阶段的测量。每个阶段测量工作的重点和要求各不相同:规划设计阶段的测量,主要是提供地形资料和配合地质勘探、水文测验所进行的测量工作;施工兴建阶段的测量,主要是按照设计要求,在实地准确地标定出工程结构各部分的平面位置和高程,作为施工和安装的依据;运营管理阶段的测量,是指工程竣工后,为监视工程的状况和保证安全所进行的周期性重复测量,即变形观测。

(六) 地图学与地理信息系统

地图学是研究模拟地图和数字地图的基础理论、地图设计、地图编绘和制印的技术方法及其应用的学科。传统地图制图学的研究内容包括:地图投影,即研究如何将地球椭球面上的内容描绘在地图平面上;地图编绘及设计,即对制图资料的分析和处理,也就是如何将数据以地图的方式进行表达及制订新编地图的内容、表现形式及其生产工艺程序;地图制印,即研究复制和印刷地图过程中的各种工艺;地图应用,即研究地图分析、地图评价、地图阅读、地图量算和图上作业等。

地理信息系统(Geographical Information System,简称GIS)是在计算机软件和硬件支持下,将各种地理信息按照空间分布及属性以一定格式输入、存储、检索、更新、显示、制图和综合分析应用的技术系统。计算机地图制图是地图学与地理信息系统学科的基础之一,是获取电子地图或数字地图的基础。

本书主要介绍普通测量学和部分工程测量学的内容。

1.1.2 测量学在土建工程中的应用

土木工程建设一般分为勘测设计、施工建设和运营管理三个阶段,测量工作贯穿工程建设的全过程。

一、勘测设计阶段

工程建设项目的规划、勘测、设计阶段中的测量工作，主要是测绘各种比例尺的地形图，另外还要为工程、水文地质勘探以及水文测验等进行测量。对于重要工程（如某些大型特种工程）或地质条件不良地区（如膨胀土地区）的工程建设，则还要对地层的稳定性进行观测。

以长江三峡水利枢纽工程为例进行说明。该工程规模之大、技术之复杂、综合效益之显著、历时之久都堪称世界之最：大坝总长 2309.47m，最大坝高 181m，总混凝土工程量约 1600 万 m^3 ，库容 393 亿 m^3 ，装机 26 台，总功率 1820 万 kW；永久船闸是目前世界上规模最大、水头最高的双线连续 5 级船闸，年单向通过能力为 5000 万 t，船闸人工边坡的最大坡高达 170m，茅坪溪防护坝顶长 1062m，最大坝高 104m。

对于像三峡水利枢纽工程这样的超级大型建设工程，规划设计阶段的测量历时数年或更长，除了大坝选址需要作许多测量工作，以供方案比选外，还要作几千公里的水库淹没调查与测量，计算不同设计坝高下的库容、淹没面积、搬迁人口等，并要进行河道比降、纵断面、横断面测量，流速、流量、水深等水文测量，区域和局部的地质测量。对大坝选址的比选区和库区的不良地质区段，还要作地表变形监测。所测绘的各种比例尺的地形图、地质图、水文图以及其他调查与测量资料，是工程各类设计的基础。

二、施工建设阶段

建设工程项目进入施工阶段后，有大量测量工作。首先要根据工地的地形、地质情况，工程性质及施工组织计划等，建立施工测量控制网；然后，再进行施工放样，即按照施工的要求采用不同的方法，将图纸上所设计的抽象几何实体在现场标定出来，使之成为具体的几何实体。施工放样的工作量很大，是施工建设阶段最主要的测量工作。施工期间还要进行施工质量和进度控制，例如高耸建筑物的竖直度、曲线、曲面型建筑的形态、隧道工程的断面监测、土石方量测量等，以及变形测量与设备的安装测量等工作。施工中的各种测量是施工管理的耳目，工程质量、工程加固措施的制定，乃至施工设计的部分改变都需要由测量工作提供实时、可靠的数据。在工程进行的中后期，需要作竣工测量，并绘制竣工图。

三峡水利枢纽工程从大坝建设及坝区交通布设，导流围堰施工，大坝基础开挖，厂房、溢洪闸、船闸、副坝施工，至后勤管理及生活区建设，无不需频繁而复杂的施工测量工作。起重机、闸门、水轮机发电机组，以及升船机等大型机器设备的安装、调校，均需要精密工程测量来保障；每天的挖填土石方、浇筑混凝土都需要准确地测量计算；在施工建设阶段，为全面、准确地掌握工程各建筑物（含基础与边坡岩体）及近坝区岸坡在施工、蓄水过程中的形状变化和安全状态，要建立三峡工程安全监测系统，并包含高边坡、建筑物及基础两大部分的各种变形监测，以及近坝区地壳形变监测与滑坡监测。外部要布设变形监测网，在重要部位布置变形监测目标点，进行周期性的观测。内部布设纵横交错的多层观测廊道，安置包括测量水平位移、垂直位移、坝体挠度、坝基倾斜、接缝和裂缝开合度的各种仪器和传感器。

三、运营管理阶段

在工程建筑物运营期间，为了监视工程的安全和稳定情况，了解设计是否合理，验证设计理论是否正确，需要定期对工程的动态变形，如水平位移、沉陷、倾斜、裂缝以及震动、

摆动等进行监测,即通常所说的变形观测。为了保证大型机器设备的安全运行,要进行经常性检测和调校。为了对工程进行有效的维护和管理,要建立变形监测系统和工程管理信息系统。

对于土建工程技术人员,测量是一门必须掌握的基本技能。学习完本课程之后,要求掌握测量学的基本理论和知识;能正确使用测绘仪器,完成一般工程测量工作;掌握大比例地形图的测绘方法;掌握地形图的应用知识;了解土木建筑工程项目各过程中测量工作的内容,并具备运用工程测量知识管理土建工程的建设与运营过程的初步能力;同时对现代测绘与广义工程测量学有一定的了解。

1.2 测量学发展概况

一、测量学的发展简史

测量学的发展与社会生产及其他科学的发展紧密相关。测量工作在远古时代的人类社会中就被应用于实际。早在公元前 21 世纪夏禹治水时,已使用了“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。

在天文测量方面,远在颛顼高阳氏(公元前 2513~公元前 2434 年)便开始观测日、月、五星,将一年的长短定为 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》中将一年定为 365.2425 天,与现代值相比,只有 26s 的误差,可见天文测量在古代已有很大发展。

在研究地球形状和大小方面,早在公元前就已有有人提出丈量子午线的弧长,以判断地球的大小和形状。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做出了贡献。1849 年,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,从而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前景,使测量方法、测量仪器有了重大改变。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作用。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,就是其中的重要例证,一直使用至今。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,最早于公元前 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九鼎上,这是地图的雏形。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,但是测绘工作仍沿用手工业生产方式。20 世纪初,随着飞机的发明和摄影测量理论的发展,产生了航空摄影测量,测绘地形图实现了由手工业生产方式向自动化方式转化,为测绘科学带来巨大变革。

二、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、电子计算机科学和空间科学等,在其自身发展的同时,给测量科学的发展开拓了广阔道路,创造了发展条件,推动着测量技术和仪器的变革和进步。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换算距离的面貌,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,使测距工作向着自

动化方向发展。氦氖激光源的应用使测程达到 60km 以上,精度达到 $\pm(5\text{mm}+5\times 10^{-6}D)$ 。1980 年开始,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,向着小型化迈进了一大步。

测角仪器的发展也十分迅速,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由此问世,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前景。

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。之后,激光水准仪、激光扫平仪又进一步发展,为提高水准测量的精度和用途创造了条件。近年来,数字水准仪的诞生,也使水准测量中的自动记录、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,又一次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等优点,被广泛用在大地测量、工程测量、地形测量、军事的导航定位上。除了美国研制的 GPS 定位系统外,俄罗斯正恢复建设 GLONASS 定位系统,欧盟正研发“伽利略”导航与定位系统等。北斗卫星导航系统[BeiDou (COMPASS) Navigation Satellite System]是中国正在实施的自主研发、独立运行的全球卫星导航系统。该系统已成功应用于测绘、电信、水利、渔业、交通运输、森林防火、减灾救灾和公共安全等诸多领域,产生了显著的经济效益和社会效益。截至 2012 年 10 月,在轨卫星 16 颗,已经初步具备区域导航、定位、授时及短报文通信服务能力。北斗卫星导航系统在 2020 年将建成由 30 余颗卫星组成的全球卫星导航系统,提供覆盖全球的高精度、高可靠的定位、导航和授时服务。

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图,其成果是可供计算机处理、远距离传输、多方共享的以数字形式储存在计算机存储介质上的数字地形图。数字测图具有自动化程度高、精度高、不受图幅限制、便于使用管理等特点,所获得的数字地形信息作为地理空间数据的基本信息之一,成为地理信息系统(GIS)的重要组成部分。

三、我国测绘事业的发展

我国测绘科学的发展从中华人民共和国成立后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关怀和重视。

在测绘工作方面,建立和统一了全国坐标系统和高程系统,建立了全国的大地控制网、国家水准网、基本重力网和卫星多普勒网,完成了国家大地网和水准网的整体平差;完成了国家基本地形图的测绘工作;进行了珠穆朗玛峰和南极长城站的地理位置和高程的测量;同时各种工程建设的测绘工作也取得显著成绩,如南京长江大桥、葛洲坝水电站、宝山钢铁厂、北京正负电子对撞机和同步辐射加速器、核电站、三峡水利枢纽等大型和特殊工程的测绘工作。出版发行了地图 1600 多种,发行量超过 11 亿册。在测绘仪器制造方面从无到有,发展迅速,已产生了多种不同等级、不同型号的电磁波测距仪、卫星激光仪和解析测图仪等

先进仪器。我国全站仪已经批量生产, 国产 GPS 接收机已广泛应用, 传统的测绘仪器产品已经配套下线。已建成全国 GPS 大地控制网。地理信息系统 (GIS) 的建立和应用发展迅速, 地理信息产业蓬勃发展, 势头迅猛。2011 年, 国家测绘局更名为国家测绘地理信息局, 我国的测绘地理信息技术已全面进入到数字化、信息化阶段, 地理信息服务已经渗透到国民经济和社会生活的方方面面。地理信息产业已成为最具发展潜力的战略性新兴产业之一, 是建设数字地球、物联网和智慧地球的重要支撑。我国高分辨测绘卫星发射成功并交付使用, 自主研发的互联网地图服务网站“天地图”上线, 机载干涉雷达测图系统、地理信息公共平台软件等一大批科技成果得到推广应用, 我国的测绘科技水平正在迅速赶上并在某些方面开始领先于国际测绘科技水平。

1.3 地球的形状和大小

测量工作的主要研究对象是地球的自然表面, 地球表面形状十分复杂。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达 11022m。尽管有这样大的高低起伏, 但相对于地球半径 (约 6371km) 来说仍可忽略不计。因此, 测量中将地球总体形状看作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, 这两个力的合力称为重力, 重力的作用线称为铅垂线, 见图 1-1 (a)。铅垂线是测量工作的基准线。

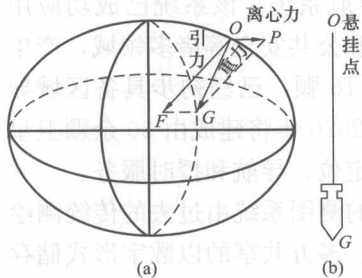


图 1-1 重力方向线

用细绳悬挂一个垂球 G, 其静止时所指示的方向即为悬挂点 O 的重力方向, 也称为铅垂线方向, 见图 1-1 (b)。自由、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, 是一个处处与重力方向垂直的连续曲面, 并且是一个重力场的等位面。与水准面相切的平面称为水平面。水准面可高可低, 因此符合以上特点的水准面有无数多个, 其中与平均海水面吻合并向大陆、岛屿延伸而形成的闭合曲面, 称为大地水准面。

大地水准面是测量工作的基准面。由大地水准面包围的地球形体, 称为大地体。

大地水准面和铅垂线是测量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, 引起铅垂线的方向产生不规则变化, 致使大地水准面是一个复杂的曲面, 如图 1-2 (a) 所示, 而无法在这曲面上进行测量数据处理。为了方便, 通常用一个非常接近于大地水准面, 并可用数学式表达的几何形体 (即地球椭球) 的外表面来代替地球的形状, 如图 1-2 (b) 所示, 作为测量计算工作的基准面。地球椭球是一个椭圆绕其短轴旋转而成的形体, 故地球椭球又称为旋转椭球, 见图 1-3。旋转椭球体的形状和大小是由其基本元素决定的。椭球的基本元素是: 长半轴 a 、短半轴 b 和扁率 $\alpha \left(\alpha = \frac{a-b}{a} \right)$ 。测量中, 取一个与大地体最为接近的旋转椭球作为地球的参考形状和大小, 即确定一个参考椭球近似代替大地体。我国 1980 年国家大地坐标系采用了 1975 年国际椭球, 该参考椭球的基本元素是: $a=6378140\text{m}$, $b=6356755.3\text{m}$, $\alpha=1/298.257$ 。

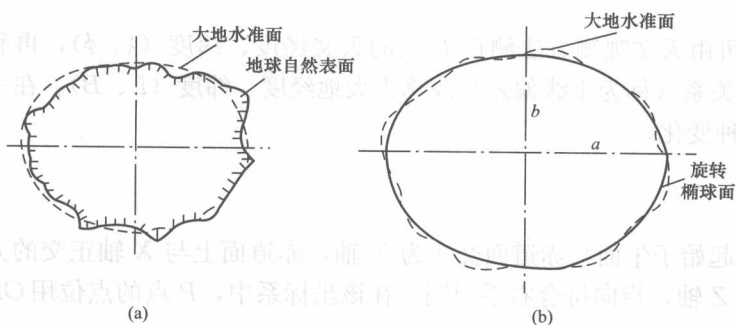


图 1-2 大地水准面

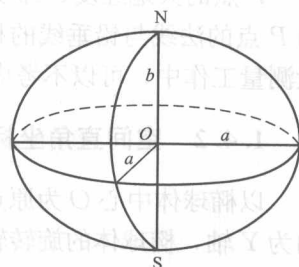


图 1-3 旋转椭球体

根据一定的条件确定参考椭球与大地体之间的相对位置关系,使得参考椭球面与大地水准面之间拟合最好,也就是两个曲面之间的差距尽量最小,这样的工作称为参考椭球体的定位。在椭球定位的工作中,要确定大地原点,以大地原点为基础建立用来确定地面点位置的空间坐标系。我国的大地原点位于陕西泾阳县永乐镇,以此建立的坐标系称为“1980 年国家大地坐标系”。

由于参考椭球体的扁率很小,当测区不大时,可将地球当作圆球看待,其半径近似值为 6371km。

1.4 地面点位的确定

测量工作的基本任务是在测绘和测设工作中确定地面点的位置,为此,需要建立测量坐标系。一个点在现实三维空间中的位置,需要三个量来表示。

在一般测量工作中,使用一个二维坐标系(球面坐标系)与一个一维坐标系的组合来表示这个点位在三维空间中的位置,例如,常将地面点的空间位置用经、纬度和高程表示,它们分别从属于地理坐标系和指定的高程系统。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 大地坐标系

在大地坐标系中,为了确定地面上一点 P 在地球表面上的二维空间位置,可用大地经度 L 和大地纬度 B 来表示。大地坐标系是以参考椭球面作为基准面,以法线为基准线,以起始子午面(即通过格林威治天文台的子午面)和赤道面作为在椭球面上确定某一点投影位置的两个参考面。

过地面某点的子午面与起始子午面之间的夹角,称为该点的大地经度,用 L 表示(见图 1-4)。规定从起始子午面起算,向东为正,由 $0^\circ \sim 180^\circ$ 称为东经;向西为负,由 $0^\circ \sim 180^\circ$ 称为西经。

过地面某点的椭球面法线 P 与赤道面的交角,称为该点的大地纬度,用 B 表示。规定从赤道面起算,由赤道面向北为正,由 $0^\circ \sim 90^\circ$ 称为北纬;由赤道面向南为负,

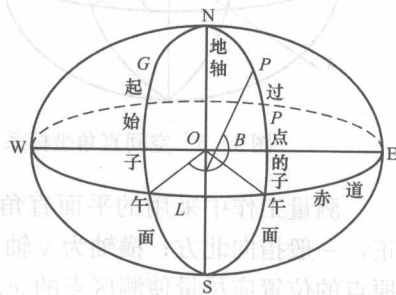


图 1-4 大地坐标

由 $0^\circ \sim 90^\circ$ 称为南纬。

P 点的大地经度、纬度,可由天文观测方法测得 P 点的天文经度、纬度 (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)改算为大地经度、纬度 (L 、 B)。在一般测量工作中,可以不考虑这种变化。

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(见图 1-5)。

随着社会的进步,国民经济建设、国防建设和社会发展、科学研究等对国家大地坐标系提出了新的要求,迫切需要采用原点位于地球质量中心的坐标系统作为国家大地坐标系。我国最新的 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; Z 轴由原点指向历元 2000.0 的地球参考极的方向, X 轴由原点指向格林威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。

采用质心坐标系,有利于采用现代空间技术对坐标系进行维护和快速更新,测定高精度大地控制点三维坐标,并提高测图工作的效率。

1.4.3 独立平面直角坐标系

大地水准面虽是曲面,但当测量区域较小时(如半径不大于 10km 的范围),常将球面投影面看作水平面,这样地面点在投影面上的位置就可用平面直角坐标来确定。

如图 1-6 所示,将测区中心点 C 沿铅垂线投影到大地水准面上得到 c 点,用过 c 点的切平面代替大地水准面,在切平面上建立的测区平面直角坐标系称为“独立平面直角坐标系”。坐标系的原点一般选在测区西南角以使测区内点的坐标均为正值,以过测区中心的子午线为 x 轴方向。

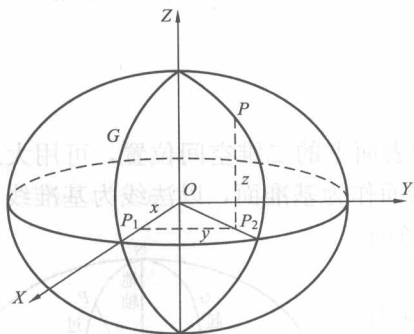


图 1-5 空间直角坐标系

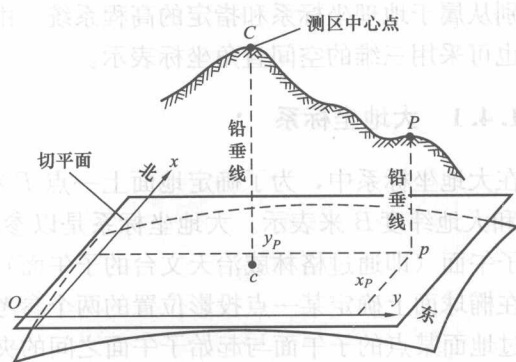


图 1-6 独立平面直角坐标系

测量工作中采用的平面直角坐标系如图 1-7 (a) 所示。规定:纵轴为 x 轴,向上为正,一般指向北方;横轴为 y 轴,向右为正,一般指向东方。坐标原点有时是假设的,假设原点的位置应尽量使测区点的 x 、 y 值为正。另外,在某些情况下,也可以使 x 轴不指向正北方向而指向特定方向。

测量平面直角坐标系与数学平面直角坐标系的比较见图 1-7, 两者的区别在于: ①坐标轴互换, 测量平面直角坐标系中的 x 、 y 坐标轴与数学平面直角坐标系中的 x 、 y 坐标轴位置互换; ②象限顺序相反, 测量平面直角坐标系中的象限顺序为顺时针方向, 而数学平面直角坐标系中象限顺序为逆时针方向。

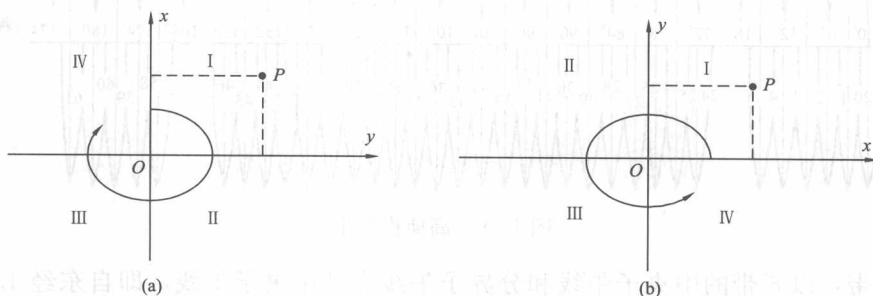


图 1-7 两种平面直角坐标系比较

(a) 测量平面直角坐标系; (b) 数学平面直角坐标系

在测量平面直角坐标系中, 角度的起始方向为指向北方的 x 轴正方向, 这是因为北方向容易确定。测量中的方位角以北方向为起始方向, 并且角度测量时一般为顺时针测量。但由于两种坐标系中坐标轴与象限顺序刚好都相反, 因此, 三角函数计算在两者中的应用完全相同。

1.4.4 高斯平面直角坐标系

一、高斯投影

高斯平面直角坐标系采用高斯投影方法建立。高斯投影是由德国测量学家高斯于 1825~1830 年首先提出的, 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。

如图 1-8 所示, 设想有一个椭圆柱面横套在地球椭球体外面, 使它与椭球上某一子午线 (该子午线称为中央子午线) 相切, 椭圆柱的中心轴通过椭球体中心, 然后用一定的投影方法, 将中央子午线两侧一定经差范围内的地区投影到椭圆柱面上, 再将此柱面展开即成为投影面。故高斯投影又称横轴椭圆柱投影。

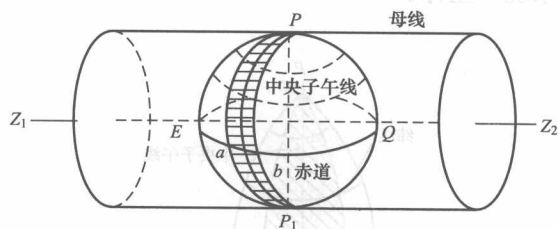


图 1-8 高斯投影

二、投影带

高斯投影中, 除中央子午线外, 各处均存在长度变形, 且距中央子午线越远, 长度变形越大。为了控制长度变形, 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。带宽一般分为经差 6° 、 3° , 分别称为 6° 带、 3° 带, 将投影后展开在高斯平面直角坐标系的 6° 带、 3° 带一个个拼接起来, 便得到图 1-9 所示的图形。

(1) 6° 带: 从 0° 子午线开始, 每隔经差 6° 自西向东分带, 依次编号 1, 2, 3, ..., 60, 各带相邻子午线称为分界子午线。带号 N 与相应的中央子午线经度 L_0 的关系为

$$L_0 = 6N - 3 \quad (1-1)$$