

安徽基层水利技术人才队伍培训工程
安徽乡镇水利员培训专用配套教材

简明水利工程测量

主 编 朱 林 刘军号
主 审 李兴旺 王 强



安徽基层水利技术人才队伍培训工程
安徽乡镇水利员培训专用配套教材

简明水利工程测量

主 编 朱 林 刘军号
副主编 李 欣 张 尧
主 审 李兴旺 王 强

黄河水利出版社
· 郑 州 ·

内 容 提 要

本书是针对基层乡镇水利员学习农村水利业务知识和实用技术而编写的培训教材。本书从我国水利水电工程建设与管理的实际出发,以水利工程测量“测”“算”“绘”的全过程为主线,系统地介绍了水准测量、角度测量、距离测量、全站仪及其应用、大比例尺数字化测图及其在工程中的应用等现代测量学的方法与应用。本书内容简明、实用,可操作性强。

本书为基层水利职工队伍建设的培训教材,可供水利水电工程技术人员和大专院校有关师生参考,也可供从事水利水电工程规划、设计、施工、监理等相关工作的工程技术人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

简明水利工程测量/朱林,刘军号主编. —郑州:黄河水利出版社,2014.5

ISBN 978 - 7 - 5509 - 0798 - 0

I. ①简… II. ①朱… ②刘… III. ①水利工程测量 - 岗位培训 - 教材 IV. ①TV221

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 096510 号

组稿编辑:王路平 电话:0371-66022212 E-mail:hhsllwp@163.com

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371-66026940,66020550,66028024,66022620(传真)

E-mail:hhslebs@126.com

承印单位:河南地质彩色印刷厂

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:9

字数:210 千字

印数:1—4 000

版次:2014 年 5 月第 1 版

印次:2014 年 5 月第 1 次印刷

定价:26.00 元

前 言

为深入贯彻落实 2011 年中央和安徽省委两个 1 号文件及中央、全省水利工作会议精神,着力提高乡镇水利员水利专业技术水平,全面提升基层水利服务能力,安徽省对全省所有乡镇水利员进行农村水利业务知识和实用技术的培训。

工程测量的实践能力主要体现在“测”“算”“绘”三个方面,为让乡镇水利员具有实际工作的基本技能和初步能力,本书在这三个方面均有创新:“测”方面重点讲述了电子经纬仪、全站仪等工程上的应用;“算”方面在传统手算的基础上增加了 Excel 电子表格和 AutoCAD 在测绘数据处理上的应用;“绘”方面可借助测绘软件进行联机成图,赋予了传统测量学中“测”“算”“绘”崭新的诠释。

现在诸如 Excel 电子表格软件、AutoCAD 绘图软件等许多工具软件的普及,就像 20 世纪 80 年代的电子计算器兴起一样,已经成为当代获取知识的重要基本工具。因此,测量学教材必须应用这些基础课教学改革成果。

本书在编写过程中力求概念清晰、深入浅出、联系实际、突出实用,本着基础知识“必学、够用”的原则,着重介绍现代测绘学中新技术、新方法的应用,充分体现高职高专职业技术教育的特色。

本书共分 6 章,编写分工如下:朱林、刘军号共同编写第 1 章、第 5 章、第 6 章及全书的 Excel 及 AutoCAD 的计算和撰写并绘制了所有插图;刘军号编写第 2 章;李欣编写第 3 章;张尧编写第 4 章。本书由朱林、刘军号担任主编,朱林负责全书统稿;由李欣、张尧担任副主编。

本书由安徽水利水电职业技术学院院长李兴旺和安徽水利职工干部学校副校长王强担任主审。主审人对书稿进行了认真细致的审查,从编写大纲、初稿到统稿都提出了许多建设性的修改意见。

由于编者水平所限,书中难免存在不足之处,恳请广大读者批评指正。

编 者
2014 年 3 月

目 录

前 言

第1章 绪 论	(1)
1.1 测绘学与测量学	(1)
1.2 测绘学的发展与现状	(2)
1.3 测绘学的应用及其在土木工程中的作用	(5)
1.4 学习测量学的目的与要求	(6)
1.5 地球的形状和大小	(7)
1.6 测量坐标系与地面点位的确定	(8)
1.7 地面点位的确定原理	(12)
1.8 用水平面代替水准面的限度	(13)
思考题与练习题	(15)
第2章 水准测量	(16)
2.1 水准测量原理	(16)
2.2 水准仪、水准尺及尺垫	(18)
2.3 水准测量的一般方法	(21)
2.4 三、四等水准测量	(29)
2.5 微倾式水准仪的检验与校正	(31)
2.6 水准测量的误差及消减方法	(34)
2.7 自动安平水准仪	(37)
2.8 精密水准仪与精密水准尺	(38)
2.9 数字水准仪与条码水准尺	(40)
2.10 高程测设的方法	(42)
思考题与练习题	(43)
第3章 角度测量	(45)
3.1 角度测量原理	(45)
3.2 光学经纬仪	(46)
3.3 水平角测量(方向经纬仪)	(51)
3.4 天顶距的测量	(55)
3.5 经纬仪的检验与校正	(58)
3.6 角度测量的误差来源及消减方法	(62)
3.7 DJD5-GE 电子经纬仪的使用	(64)
3.8 水平角的测设	(68)
思考题与练习题	(68)

第 4 章 距离测量	(71)
4.1 视距测量	(71)
4.2 钢尺量距	(74)
4.3 电磁波测距	(78)
4.4 已知水平距离的测设	(82)
4.5 直线定向	(83)
思考题与练习题	(86)
第 5 章 全站仪及其使用	(87)
5.1 全站仪概述	(87)
5.2 T-600 系列全站仪的基本操作	(88)
5.3 主菜单 (MENU) 模式	(95)
5.4 高端全站仪简介	(104)
思考题与练习题	(108)
第 6 章 大比例尺数字化测图及其在工程中的应用	(109)
6.1 数字化测图的组成	(109)
6.2 数字化测图的特点	(110)
6.3 控制测量	(111)
6.4 地面数字测图	(111)
6.5 数字地形图应用基础	(123)
6.6 数字地形图与 GIS 的数据交换	(129)
6.7 信息化测绘体系的定位与框架	(131)
思考题与练习题	(136)

第1章 绪论

本章提要

本章主要介绍测绘学的研究对象和内容。重点讲述现代测绘学的发展现状和地球空间信息学与现代测绘学的任务。简要概述地球形状和大小的概念及研究方法。介绍测量常用坐标系统,地球表面位置的确定方法及测量原理。分析用水平面代替水准面的限度。介绍现代测绘学在国民经济建设和工程中的作用。简要介绍了学习目的和要求。

1.1 测绘学与测量学

测量学与制图学统称为测绘学。测绘学研究的对象是地球整体及其表面和外层空间中的各种自然物体和人造物体的有关信息。它研究的内容是对这些与地理空间有关的信息进行采集、处理、管理、更新和利用。它既要研究测定地面点的几何位置、地球形状、地球重力场以及地球表面自然形态和人工设施的几何形态,又要结合社会和自然信息的地理分布,研究绘制全球和局部地区各种比例尺的地形图和专题图的理论和技术。由此可见,测量学是测绘学科的重要组成部分。

1.1.1 测绘学研究的对象

人类生活的地球表面极不规则,有高山、丘陵、平原、盆地、湖泊、河流和海洋等自然形成的物体,还有房屋建筑、工厂、公路、铁路、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。

地物是指地面上天然或人工形成的物体,它包括湖泊、河流、海洋、房屋、道路、桥梁等。地貌是指地表高低起伏的形态,它包括山地、丘陵和平原等。

地物和地貌总称为地形。测量学是研究地球的形状和大小,确定地球表面各种物体的形状、大小和空间位置的学科。其主要任务是测定和测设。

测定是使用测量仪器和工具,通过测量和计算将地物和地貌的位置按一定比例尺,用规定的符号缩小绘制成地形图,供科学研究和工程建设规划设计使用。

测设是将在图纸上设计出的建筑物和构筑物的位置在实地标定出来,作为施工的依据。

传统的测量学研究的对象是地球及其表面,但随着现代科学技术的发展,它已扩展到地球的外层空间,并且已由静态对象发展到动态对象;同时,所获得的量既有宏量,也有微量。使用的手段和设备也已转向自动化、遥测、遥控和数字化。

1.1.2 测绘学的分科

伴随着社会的进步,科学技术的发展,各方面对测量的要求不断变化和提高,测量学

的分科也越来越细,测绘学包括以下学科。

1.1.2.1 大地测量学

大地测量学是研究和测定地球的形状、大小和地球重力场,以及测定特定地面上点的空间位置的学科。

大地测量学分几何大地测量学、物理大地测量学和卫星大地测量学(或空间大地测量学)三个分支学科。几何大地测量学是以一个与地球外形最为接近的几何体(旋转椭球)代表地球形状,用天文方法测定该椭球的形状和大小。物理大地测量学是研究用物理方法测定地球形状及其外部重力场的学科。卫星大地测量学是利用人造地球卫星进行地面点定位及测定地球形状、大小和地球重力场的理论、方法的学科。

现代大地测量学是综合利用几何、物理、空间大地测量的理论和方法,解决大地测量学中各种问题的学科。摄影测量与遥感学是研究用摄影和遥感的手段,获取被测物体的信息,进行分析、处理,以确定物体的形状、大小和空间位置,并判定其属性的科学。摄影测量与遥感学分为地面摄影测量学、航空摄影测量学和航天遥感测量学。

1.1.2.2 工程测量学

工程测量学是研究工程建设和资源开发中,在规划、设计、施工和运营管理各个阶段进行的控制测量、地形测绘、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,工程测量学又分为建筑工程测量学、水利工程测量学、矿山测量学、公路测量学、铁路测量学以及海洋工程测量学等;由于不同工程,精度要求不同,又有精密工程测量学等。

1.1.2.3 地图制图学(地图学)

地图制图学是研究地图的编制和应用的学科。它研究用地图图形信息反映自然界和人类社会各种现象的空间分布、相互联系及其动态变化。

1.1.2.4 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、方法的学科。

1.1.2.5 普通测量学

普通测量学是研究对地球表面局部地区进行测绘工作的基本理论、工作方法、技术和应用的学科。其内容包括图根控制网的建立、地形图测绘及一般工程的测设。

也有人称地形测量学为普通测量学。但这种测量学只是为测量地球局部的形状和绘制地形图服务,不包括其他内容。

普通测量学是研究地球局部地区,不考虑地球曲率的影响,使用常规测量仪器设备,进行测定和测设所涉及的测量理论和技术的学科。

1.2 测绘学的发展与现状

1.2.1 测绘学的发展简史

学科的产生和发展是由生产决定的。测绘科学也不例外,它是人类长期以来,在生活

和生产方面与自然斗争的结晶。早在几千年前,由于当时社会生产发展的需要,中国、埃及、希腊等国家的人民就开始创造与运用测量工具进行测量。在远古时代我国就发明了指南针,以后又发明了浑天仪等测量仪器,并绘制了相当精确的全国地图。指南针于中世纪由阿拉伯人传到欧洲,以后在全世界得到了广泛的应用,直到今天,它仍然是利用地磁定方位的简便测量工具。

测绘科学的发展很大部分是从测绘仪器的发展开始的,测绘仪器的发展使测绘技术发生了重大的变革。20世纪60年代激光器作为光源用于电磁波测距,使长期以来艰苦的手工业生产方式的测距工作,发生了根本性的变革,彻底改变了大地测量工作中以测角换算距离的方法,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60 km以上,精度达到 $\pm(5\text{ mm} + 5 \times 10^{-6}D)$,其中 D 为测量距离。固体激光器的应用使测程大大加大,因此测月、测卫工作得以实现。20世纪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 $\pm(0.2\text{ mm} + 0.1 \times 10^{-6}D)$ 的标称精度。

测角仪器的发展也十分迅速,它和其他仪器一样,随着科学技术的进步而发展,从金属度盘发展为光学度盘。近20年来,伴随着电子技术、微处理机技术的广泛应用,经纬仪已使用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已经问世,并得到应用。同时,电子经纬仪、测距仪、存储器和微处理器结合,形成了电子速测仪。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。最近又推出了智能全站仪,连瞄准目标也可自动化,从此将结束测角、测距手工业生产方式的漫长历史。

20世纪90年代,全球定位系统(Global Positioning System,简称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、全天候、快速、高精度和无须建立觇标等优点,被广泛用在大地测量、工程测量、地形测量及军事的导航、定位上。目前,除美国研制的GPS定位系统外,还有苏联研制的GLONASS定位系统、欧洲空间局的“伽利略”全球卫星导航系统(NAVSAT)、我国的“北斗星”定位系统。

20世纪90年代,除用飞机进行航空摄影测量测绘地(形)图外,还通过人造地球卫星、航天飞机拍摄地球照片,监测自然现象的变化,并且利用这些卫星图片测绘地图,如2005年8月美国的“发现”号航天飞机就对地球北纬 75° 到南纬 75° 的区域进行了航天摄影测量,其精度逐步提高。近年来,已改变了过去摄影测量的方式,用数字摄影测量技术进行测量工作,使摄影测量的成果稳定、可靠,并且自动化程度高,还可与计算机组成一个系统,易于完成地图的生产、使用、修改和换代。

由于测绘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。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,精度可靠。

综上所述,20世纪60年代后,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,在自身发展的同时,给测绘科学的发展开拓了广阔的空

间,创造了发展的条件,推动着测绘技术和仪器的变革和进步。随着社会经济的发展,世界科技进入高速发展时期,同时也促进了测绘科学技术的发展。光电技术和微型电子计算机被引入测绘仪器制造领域后,产生了将电磁波测距与电子测角融为一体的全站仪,它自动计算测点三维坐标,自动保存观测数据,将观测数据传输到计算机,从而实现数字化测绘地形图。随着航天遥感技术的不断完善,利用航天遥感相片及扫描信息测绘地形图,不仅覆盖面积大,而且不受地理及气候条件的限制,能全天候作业,极大地提高了测绘工作效率。1993年后,迅速发展和普及的利用卫星测定地面控制点坐标的新技术——全球定位系统(GPS)彻底改变了传统的通过测角量边计算地面点位坐标的方法。测量人员只需将GPS接收机安置在测点上,通过接收卫星信号,使用专门的数据处理软件就可以快速计算出测点的三维坐标。1992年开始研究的地理信息系统(Geographic Information System,简称GIS)是一定格式的数字地图与地面有关资源信息的集成并实现有关空间数据管理、空间信息分析及其传播的计算机系统,是传统学科(测量学、地理学和地图学等)与现代科学技术(遥感技术、计算机科学等)相结合的产物,经过多年的发展历程已经取得了巨大的成就,被广泛应用于土地利用、资源管理、环境监测、交通运输、城市规划、经济建设以及政府各职能部门。

1.2.2 地球空间信息学(Geomatics)与现代测绘学的任务

随着科学技术的发展,高新技术不断涌现,如计算机科学、信息科学、空间技术、卫星技术、微电子技术、传感器技术等,在现代都得到了高速发展和应用。在此基础上,测绘学科发展十分迅速。同时,测绘学的相邻学科如地球物理学、地球动力学、海洋学、地质学、天体力学的交叉发展,以及全球定位系统(GPS)、遥感(RS)、地理信息系统(GIS)、专家系统(ES)、数字摄影测量系统(DPS)的出现,使传统的测绘学从地面到空间,从静态到动态,从宏量到微量,从手工业生产方式到自动化、信息化,有了一个根本性的变革。因此,测绘学的手段、方法、理论,甚至测量的观念和内涵有了较大的改变,传统的“测”和“绘”的科学概念已经不能概括现代测绘学的研究对象和任务,更不能覆盖高新技术对测绘科学的渗透和冲击而产生的新内容。因此,如何界定测绘学含义,使形式和内容统一,已引起了世界各国测绘工作者的关注。1975年,法国大地测量与摄影测量学者 Bernard Dubuisson 博士首先提出以 Geomatics 反映测绘学的学科实质,得到了各国测绘科学家的认可,并一致认为 Geomatics 能准确地反映现代测绘学的内容实质。

Geomatics 的含义是比“测绘”更广泛、更深远、更现代化的一个学科名词,如果说它与测绘紧密相连,只能说测绘是其内容的一个组成部分。国际标准组织对它的定义是:“Geomatics 是一个活动性的学科领域,它以系统的方法将所有用于空间数据的采集和管理的手段进行综合。这类空间数据是在空间信息产生和管理过程中所涉及的科学的、行政的、法律的以及技术的工作所需要的。上述活动包括地图学、控制测量、数字测图、大地测量、地理信息系统、水道测量、土地信息管理、土地测量、矿山测量、摄影测量和遥感等,但并不限于此。”

结合我国测绘科学的具体情况,我国的测绘专家们了解和分析了国外对 Geomatics 的含义之后,对 Geomatics 提出了如下定义:“对所研究的物体,包括地球的整体及其表面和

外层空间的各种自然和人造实体,利用接触式与非接触式测量仪器、传感器及其组合系统,对这些实体进行信息的采集、量测、存储、管理、更新、分析、显示、分发和利用的一门科学和技术。”

由上述内容可见,现代测绘学的任务是研究人类对赖以生存的地球环境信息的采集、量测、描述和利用。其内容如下:研究空间定位、地球形状和重力场;获取地球及其外层空间宇宙星体的自然形态、人为设施以及与其属性有关的信息;制成各种地形图、专题图和建立地理信息系统,为研究地球上的自然现象和有关的社会现象,为社会可持续发展提供基础信息。

1.3 测绘学的应用及其在土木工程中的作用

1.3.1 测绘学在国民经济建设、国防建设和科学领域中的作用

由前面讨论可知,现代测绘学的内容广泛,任务涉及面大,是现代高新技术互相渗透的结果。现代普通测量学是现代测绘学的一个重要的组成部分,担负着现代测量学的历史任务。其内涵也与传统的测量学有所不同,它不仅手段先进,方法新颖,而且其研究和服务的对象、范围越来越广泛,重要性越来越显著。因此,现代测量学是一门科学性、技术性很强的学科,对于国民经济建设、国防建设以及科学研究等领域,是一门重要的基础科学。

在工程建设方面,工程的勘测、规划、设计、施工、竣工及运营后的监测、维护都需要测量工作。在军事上,首先由测绘工作提供地形信息,在战略的部署、战役的指挥中,除必需的军用地图(包括电子地图、数字地图)外,还需要进行目标的观测定位,以便进行打击。至于远程导弹、空间武器、人造卫星以及航天器的发射等,都要随时观测、校正飞行轨道,保证它精确入轨飞行。为了使飞行器到达预定目标,除测算出发射点和目标点的精确坐标、方位、距离外,还必须掌握地球形状、大小、重力场的精确数据。航天器发射后,还要跟踪观测飞行轨道是否正确。总之,现代战争与现代测绘技术紧密结合在一起,是军事上决策的重要依据之一。

在科学试验方面,如地震预测预报、灾情监测、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以及其他科学研究,无一不需要测绘工作紧密配合和提供空间信息。

此外,对建立各种地理信息系统(GIS)、数字城市、数字中国,都需要现代测绘科学提供基础数据信息。

1.3.2 测绘学在土木工程中的作用

测绘学在土木建筑类各专业的作品中,不但应用广泛,而且与各专业结合得越来越紧密。但在不同的领域中,测量工作的内容和步骤也是不相同的。

在城市规划、给水排水、煤气管道、工业厂房和高层建筑建设中的测量工作如下:在设

计阶段,要测绘各种比例尺的地形图,供工程规划、选址、设计使用;在施工阶段,要将设计好的建筑物或构筑物的平面位置和高程在实地标定出来,作为施工的依据;工程完工后,要测绘竣工图,供日后扩建、改建、维修和城市管理应用;对某些重要的建筑物或构筑物,在建设中和建成以后都需要进行变形观测,以保证建筑物的安全。

在铁路、公路建设中的测量工作如下:为了确定一条最经济合理的路线,应预先测绘路线附近的地形图,在地形图上进行路线设计,然后将设计路线的位置标定在地面上,以指导施工;当路线跨越河流时,应建造桥梁,在建桥之前,要测绘河流两岸的地形图,测定河流的水位、流速、流量和河床地形图以及桥梁轴线长度等,为桥梁设计提供必要的资料,最后将设计桥台、桥墩的位置标定到实地;当路线穿过山岭需要开挖隧道时,开挖之前,应在地形图上确定隧道的位置,根据测量数据计算隧道的长度和方向;隧道施工通常是从隧道两端相向开挖,这就需要根据测量成果确定开挖方向,保证其正确贯通。

1.4 学习测量学的目的与要求

本课程是工程类各专业的技术基础课。工程类专业的学生,学习该课程之后,要求掌握测量学的基本知识和基本理论;具有使用常规测量仪器的操作技能,了解先进测绘仪器的原理、使用方法;基本掌握大比例尺地形图测图的原理、方法;对数字测图的过程有所了解;在工程规划、设计和施工中能正确地使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。

通过本课程的学习,要掌握下列有关测定和测设的基本内容。

(1) 地形图测绘。

运用各种测量仪器和工具,通过实地测量和计算,把小范围内地面上的地物、地貌按一定的比例尺测绘成图。

(2) 地形图应用。

在工程设计中,从地形图上获取设计所需要的资料,例如点的坐标和高程、两点间的水平距离、地块的面积、土方量、地面的坡度、地形的断面和地形分析等。

(3) 施工放样。

将图上设计好的建筑物或构筑物的位置标定在实地上,作为施工的依据。

(4) 变形观测。

监测建筑物或构筑物的水平位移、垂直沉降、倾斜观测和裂缝观测,以便采取措施,保证建筑物的安全。

(5) 竣工测量。

在工程建设竣工后,应编绘竣工总平面图。它包括外业实测和内业资料编绘两方面内容。

生活在科学技术尤其是新技术飞速发展年代的大学生,既要熟练掌握传统的测绘理论与方法,也要努力学习和掌握成熟的测绘新技术,例如全站仪和 GPS 测量、数字测图及计算机数据处理(测、绘、算)等,并能将它们应用到建筑工程建设的生产实践中,只有这

样,才能使自己在激烈的市场竞争中立于不败之地。

1.5 地球的形状和大小

地球是一个南北极稍扁、赤道稍长、平均半径为 6 371 km 的椭球体。测量工作是在地球表面上进行的,而地球的表面有高山、丘陵、平原、盆地、湖泊、河流和海洋等高低起伏的形态,其中海洋面积约占 71%,陆地面积约占 29%。下面介绍重力、铅垂线、水准面、大地水准面、参考椭球面和法线的概念及关系。

如图 1-1(a)所示,由于地球的自转,其表面的质点 P 除受万有引力的作用外,还受到离心力的影响。 P 点所受的万有引力与离心力的合力称为重力,重力的方向称为铅垂线方向。

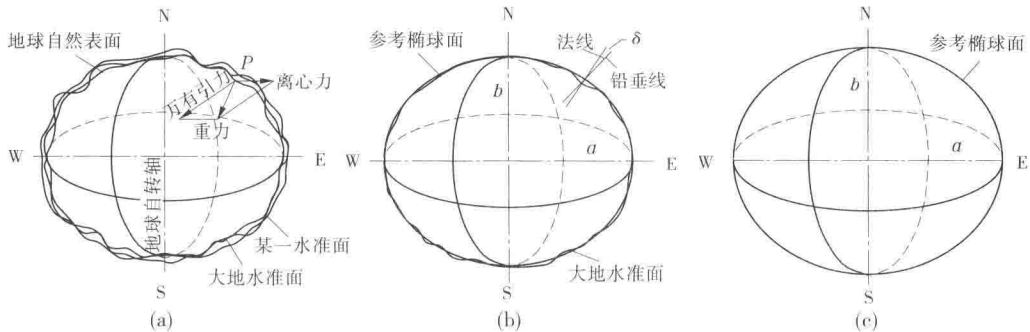


图 1-1 地球自然表面、水准面、大地水准面、参考椭球面、铅垂线、法线间的关系

假想静止不动的水面延伸穿过陆地,包围整个地球,形成一个封闭曲面,这个封闭曲面称为水准面。水准面是受地球重力影响形成的,是重力等位面,其特点是曲面上任意一点的铅垂线垂直于该点的曲面。根据这个特点,水准面也可以定义为:处处与铅垂线垂直的连续封闭曲面。由于水准面的高度可变,符合该定义的水准面有无数个,其中与平均海水面相吻合的水准面称为大地水准面。大地水准面是唯一的。

由于地球内部的物质密度分布不均匀造成地球各处万有引力的大小不同,致使重力方向产生变化,所以大地水准面实际上是有微小起伏的、不规则的、很难用数学方程表示的复杂曲面。如果将地球表面上的物体投影到这个复杂的曲面上,计算起来将非常困难。为了解决投影计算问题,通常是选择一个与大地水准面非常接近的、能用数学方程表示的椭球面作为投影的基准面,这个椭球面是由长半轴为 a 、短半轴为 b 的椭圆 NESW 绕其短轴 NS 旋转而成的旋转椭球面。旋转椭球又称为参考椭球,其表面称为参考椭球面,如图 1-1(c)所示。

由地表任一点向参考椭球面所作的垂线称为法线,地表点的铅垂线和法线一般不重合,其夹角 δ 称为垂线偏差,如图 1-1(b)所示。

我国采用过的有两个参考椭球元素值以及 GPS 测量使用的参考椭球元素值列于表 1-1。

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

6 371 km的圆球。

表 1-1 参考椭球元素值

序	坐标系名称	a (m)	f (扁率)	e^2 (第一偏心率)	e'^2 (第二偏心率)
1	1954 年北京坐标系	6 378 245	1:298.3	0.006 693 421 622 966	0.006 738 525 414 683
2	1980 西安坐标系	6 378 140	1:298.257	0.006 694 384 999 59	0.006 739 501 819 47
3	WGS-84 国际坐标系 (GPS 用)	6 378 137	1:298.257 223 563	0.006 694 379 990 13	0.006 739 496 742 23

1.6 测量坐标系与地面点位的确定

测量学的主要任务是测定和测设,无论测定还是测设,都需要通过确定地面点的空间位置来实现。空间是三维的,所以表示地面点在某个空间坐标系中的位置需要三个参数,确定地面点位的实质就是确定其在某个空间坐标系中的三维坐标。测量中,将空间坐标系分为地心坐标系和参心坐标系。GPS 使用的 WGS-84 属于地心坐标系,如图 1-2 所示。工程测量通常使用参心坐标系,如图 1-3 所示。

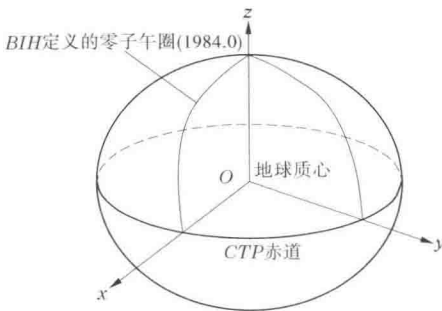


图 1-2 地心坐标系

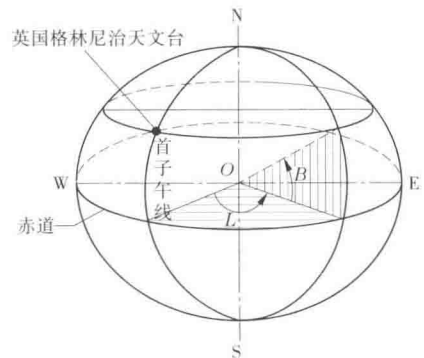


图 1-3 参心坐标系

1.6.1 确定点的球面位置的坐标系

由于地表高低起伏不平,所以一般是用地面某点投影到参考曲面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。为此,测量上将空间坐标系分解为确定点的球面位置的坐标系(二维)和高程系(一维)。

确定点的球面位置的坐标系有地理坐标系和平面直角坐标系两类。

1.6.1.1 地理坐标系

地理坐标系是用经纬度表示点在地球表面的位置。1884 年,在美国华盛顿召开的国际经度会议上,正式将经过格林尼治天文台的经线确定为 0° ,分别向东西推算,纬度以赤道为 0° ,分别向南北半球推算。按坐标系所依据的基准线和基准面的不同以及求坐标方

法的不同,地理坐标系又分为天文地理坐标系和大地地理坐标系两种。

1. 天文地理坐标系

天文地理坐标又称为天文坐标,表示地面点在大地水准面上的位置,其基准是铅垂线和大地水准面,它用天文经度 λ 和天文纬度 φ 两个参数来表示地面点在球面的位置。

2. 大地地理坐标系

大地地理坐标又称大地坐标,是表示地面点在参考椭球面上的位置,其基准是法线和参考椭球面,它用大地经度 L 和大地纬度 B 表示。大地经纬度是根据起始大地点(又称大地原点,该点的大地经纬度与天文经纬度一致)的大地坐标,按大地测量所得的数据推算而得到的。我国以陕西省泾阳县永乐镇大地原点为起算点,由此建立的大地坐标系,称为“1980 西安坐标系”。之前的“1954 年北京坐标系”其大地原点位于苏联列宁格勒天文台中央。

如合肥处在北纬 $31^{\circ}14'$,东经 $117^{\circ}52'$,用 $B=31:14\text{ N},L=117:52\text{ E}$ 表示。

1.6.1.2 平面直角坐标系

1. 高斯平面直角坐标系

地理坐标对局部测量工作来说是非常不方便的。例如,在赤道上,1"的经度差或纬度差对应的地面距离约为 30 m。测量计算最好在平面上进行,但地球是个不可展的曲面,应通过投影的方法将地球表面上点位化算到平面上。地图投影有多种方法,我国采用的是高斯-克吕格正形投影。正形投影的实质就是椭球面上微小区域的图形投影到平面上后仍然与原图形相似,即不改变原图形的形状。例如,椭球面上一三角形投影到平面上后,其三个内角保持不变,也即是等角投影。

高斯-克吕格正形投影简称高斯投影,如图 1-4 所示。使用高斯投影的国家还有德国和苏联。高斯投影是将地球按经线划分成若干分带投影,带宽用投影带两边缘子午线的经度差表示,常用带宽为 6° 和 3° ,分别简称为 6° 带投影和 3° 带投影。国际上对 6° 带投影和 3° 带投影的中央子午线经度有统一规定,满足这一规定的投影称为统一 6° 带投影和统一 3° 带投影。

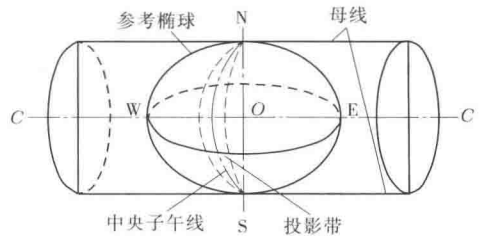


图 1-4 高斯直角坐标系的投影图

1) 统一 6° 带投影

从首子午线起,每隔经度 6° 划分为一带,如图 1-5 所示,自西向东将整个地球划分为 60 个投影带,带号从首子午线开始,用阿拉伯数字表示。第一个 6° 带的中央子午线的经度为 3° ,任意带的中央子午线经度 L_0 与投影带号 N 的关系为

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

反之,已知地面任一点的经度 L ,要计算该点所在的统一 6° 带编号的公式为

$$N = \text{Int}\left(\frac{L}{6} + 1\right) \quad (1-2)$$

投影后的中央子午线和赤道均为直线并保持相互垂直。以中央子午线为坐标纵轴(x 轴),向北为正;以赤道为坐标横轴(y 轴),向东为正,中央子午线与赤道的交点为坐标

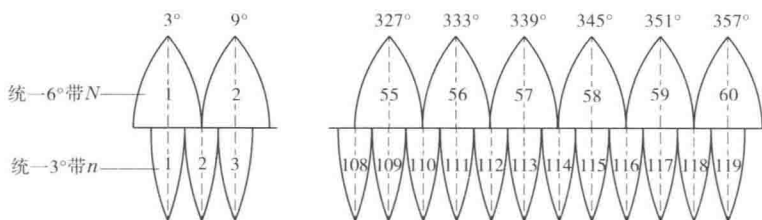


图 1-5 统一 6°带投影与统一 3°带投影高斯平面直角坐标系的关系

原点 O 。

与数学的笛卡儿坐标系比较,在高斯平面直角坐标系中,为了定向的方便,定义纵轴为 x 轴,横轴为 y 轴, x 轴与 y 轴互换了位置,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直角坐标系中直接应用。

我国位于北半球, x 坐标值恒为正, y 坐标值则有正有负,当测点位于中央子午线以东时为正,以西为负。如图 1-6(a) 所示的 P 点位于中央子午线以西,其 y 坐标值为负值。对于 6°带高斯平面直角坐标系,最大的 y 坐标负值约为 -365 km。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向西平移 500 km,也就是给每个点的 y 坐标值加上 500 km,使之恒为正值,见图 1-6(b)。

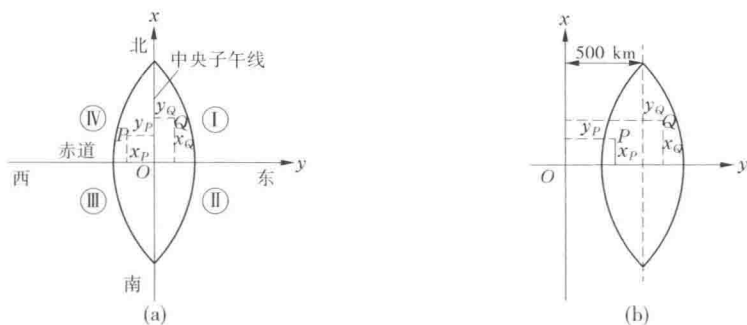


图 1-6 高斯平面直角坐标系

为了能够根据横坐标值确定某点位于哪一个 6°带内,还应在 y 坐标值前冠以带号。将经过加 500 km 和冠以带号处理后的横坐标用 Y 表示。例如,图中 1-6 的 P 点位于第 20 带内,其横坐标为 $y_p = 58\ 269.593$ m,则有 $Y_p = \boxed{20} 441\ 731.407$ m。

高斯投影属于正形投影的一种,它保证了球面图形的角度与投影后的平面图形的角度不变,但球面上任意两点间的距离经投影后会产生变形,其规律是:除中央子午线没有距离变形外,其余位置的距离均存在变形。

2) 统一 3°带投影

统一 3°带的中央子午线经度 L'_0 与投影带号 n 的关系为

$$L'_0 = 3n \tag{1-3}$$

反之,已知地面任一点的经度 L ,要计算该点所在的统一 3°带编号的公式为

$$n = \text{Int}\left(\frac{L}{3} + 0.5\right) \quad (1-4)$$

3) 任意带投影

任意带投影通常用于建立城市独立坐标系。例如,可以选择过城市中心某点的子午线为中央子午线进行投影,这样,可以使整个城市范围内的距离投影的变形比较小。

2. 假定平面直角坐标系

在面积小于 320 km^2 的区域,可不经投影采用假定平面直角坐标系在平面上直接进行计算。

1.6.2 确定点的高程系统

地面点的高程是指地面点沿基准线方向至基准面的距离。由于高程基准面选择的不同,有不同的高程系统。测量上常用的高程基准面有参考椭球体面和大地水准面。其相应的高程为大地高和海拔。

大地高是以参考椭球体面为高程基准面。大地高是地面点沿法线到椭球体面的距离,用 H^k 表示,见图 1-7。

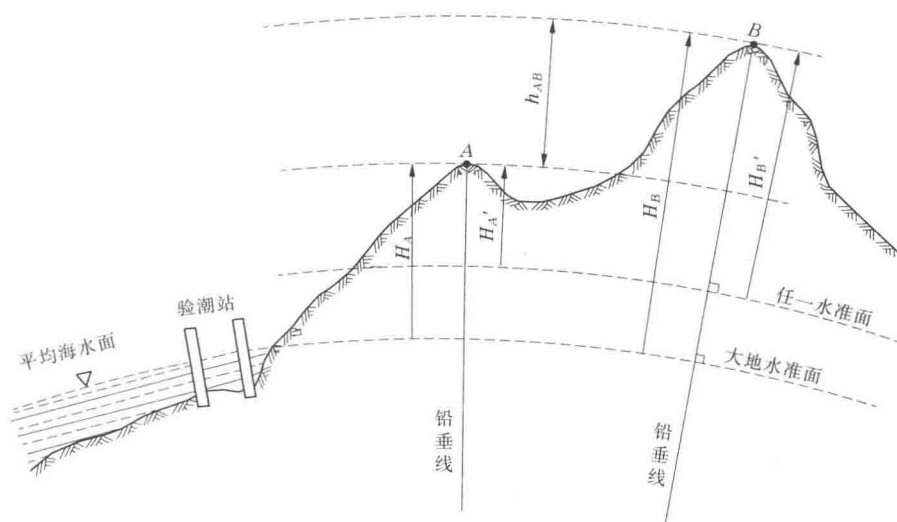


图 1-7 高程与高差的定义及其相互关系

海拔高是以大地水准面为高程基准面,即地面点沿铅垂线到大地水准面的距离,也称为绝对高程,用 $H^{\text{海}}$ 表示。

海水面由于受潮汐、风浪的影响,是个动态曲面。所谓静止海水面是不存在的,常用平均海水面代替,即在海边设立验潮站,进行长期潮汐观测,取海水面平均高度作为高程零点。新中国成立后,我国采用青岛验潮站长期观测资料求得黄海平均海水面作为我国高程基准面,称为“1956 年黄海高程系”。在青岛市观象山建立水准原点,其高程为 72.289 m 。后又将 1953 ~ 1979 年验潮资料进行归算,推算青岛国家水准原点高程为 72.260 m ,称为“1985 年国家高程基准”。1987 年我国开始启用这个基准。