



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 现代测量学

Morden Surveying

翟翊 赵夫来 郝向阳 杨玉海 编著

测绘出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 现代测量学

Morden Surveying

翟翊 赵夫来 郝向阳 杨玉海 编著

测绘出版社

·北京·

## 内容提要

全书共 16 章,按内容分为五个单元。第一单元为测量学基础,内容包括绪论、测量的基本知识、测量误差的基础知识。第二单元为角度测量和距离测量,重点介绍了全站仪、电子经纬仪、电磁波测距仪的测量原理、使用和成果处理,包括角度测量、距离测量及其误差分析。第三单元为控制测量,包括控制测量的点位布设、测量实施及计算原理,GPS 定位原理、测量及其成果处理。第四单元为数字测图,重点介绍野外数字测图的内容,包括数字地图信息的野外获取、数字地图的编辑成图、地图数字化和地形图的应用等。第五单元是建筑工程测量,主要介绍工程测量的基本原理和方法、建筑施工测量和建筑物的变形监测。

本书可作为高等院校的测绘工程专业、非测绘工程及其相关专业的教材,也可供从事测绘专业的技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

现代测量学/翟翊等编著. —北京:测绘出版社,  
2008. 12

普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
ISBN 978-7-5030-1877-0

I. 现… II. 翟… III. 测量学—高等学校—教材 IV. P2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 167456 号

责任编辑 徐建春

封面设计 李伟

出版发行 **测绘出版社**

社 址 北京西城区复外三里河路 50 号

电 话 010-68512386 68531558

印 刷 北京市通州次渠印刷厂

成品规格 184mm×260mm

字 数 470 千字

版 次 2008 年 12 月第 1 版

印 数 0001—3000

邮政编码 100045

网 址 [www.sinomaps.com](http://www.sinomaps.com)

经 销 新华书店

印 张 19

印 次 2008 年 12 月第 1 次印刷

定 价 35.00 元

书 号 ISBN 978-7-5030-1877-0

如有印装质量问题,请与我社发行部联系

## 序

“测量学”是测绘学科不可缺少的公共技术基础课。通过该课程的教学,为学生在校学习掌握后续专业课程和今后从事测绘工作打好专业技术基础。近些年来,随着现代科学技术的飞速发展,在测绘学科中出现了以3S(GPS、RS、GIS)技术为代表的许多新测绘技术。测绘仪器电子化,数据处理自动化,测绘生产数字化,成果服务网络化,不仅是现代测绘技术的发展趋势,而且正在全面实现当中。因此测绘学的理论基础、工程体系、应用领域和科学目标均发生巨大变化,测绘学已发展成为研究地球和其他实体的与时空分布有关的地理信息的采集、量测、处理、显示、管理和利用的科学与技术。因此“测量学”的教学内容也应有相应的改革和变化。

解放军信息工程大学翟翊等四位教授合编的《现代测量学》,是在原同名教材基础上修编完成的。原教材曾获得第五届全国优秀测绘教材二等奖。教材具有先进的科学思想和理论水平,及时反映了测绘学科理论和技术的发展。本次修编,作者较好地处理了传统“测量学”与现代测绘新技术的关系,删除了“测量学”中过时的传统测绘内容,充实了现代测绘新技术。全书以数字测图为主线,以测绘新概念、新技术为重点,介绍了地形控制测量的理论和方法、野外数字测图的内容,包括数字地图信息的野外采集、数据处理和存贮,以及数字地图的编辑成图等。为了满足其他相关非测绘学科专业对“测量学”教学的要求,该教材还增加了建筑工程测量、建筑施工测量、建筑物变形观测等内容。

教材内容充实,结构严谨,叙述循序渐进,深入浅出,编写文笔流畅,通俗易懂,是一本具有改革气息的教材。

教材符合测绘学科专业本科培养计划和课程标准,不仅可作为测绘工程和其他相关专业“测量学”课程的教材,还可作为测绘和其他相关专业技术人员的技术参考书。

教育部高等学校测绘学科教学指导委员会主任  
中国测绘学会教育工作委员会主任、中国工程院院士

宁津生

2008年7月

## 前 言

本书是按照普通高等教育“十一五”规划教材的要求,根据测绘专业本科培养计划和课程标准编写的,不仅可作为测绘工程和其他相关专业“测量学”课程的教材,还可作为测绘和其他相关专业科技人员的技术参考书。

近年来,测绘科学和技术的飞速发展,新的测量仪器设备不断涌现,测绘技术从形式到内容都发生了巨大变化,测量自动化和测量成果的数字化已成为现代测量的发展方向。为了适应测量理论、技术、方法和仪器的最新发展,便于读者理解和掌握测量的基本原理和方法,本书力求以点位的确定为中心,以数字测图为主线,以测绘新概念、新技术为重点,不仅充实了现代测量的新技术,如 GPS 技术、数字测图的原理和方法等新内容,还对全站仪、电子经纬仪、电磁波测距仪、数字水准仪等做了较详细的介绍,同时,考虑到本书内容的通用性,还增加了地图数字化、地形图的应用、建筑施工测量和建筑物变形观测等内容。

全书共分五个单元。第一单元介绍测量学的基本概念、测量坐标系的建立、地形图和测量误差的基本知识;第二单元介绍角度测量、距离测量以及电子经纬仪、电磁波测距仪和全站仪的测量原理等内容;第三单元介绍导线测量、水准测量和三角高程测量的原理和方法,同时对数字水准仪的测量原理, GPS 测量的理论、方法和成果处理进行了阐述;第四单元重点介绍野外数字测图的内容,包括数字地图信息的野外获取、数据结构、数据处理以及数字地图的编辑成图,地图数字化和地形图的应用等;第五单元介绍工程测量的基础、建筑工程测量的基本方法和建筑物的变形监测等内容。

本书由翟翊、赵夫来、郝向阳和杨玉海编写。其中郝向阳编写第一、二、十二章,翟翊编写第三、七、八、九、十四章,赵夫来编写第四、十、十一、十三章,杨玉海编写第五、六、十五、十六章,全书由翟翊任主编并统稿。

解放军信息工程大学测绘学院现代测量技术教研室全体同志和国内有关专家同行对本书的编写提出了许多宝贵意见和建议,在此深表谢意。

合肥工业大学王依教授和解放军信息工程大学的西勤教授对本书进行了全面审查,提出了许多宝贵的意见和建议,在此表示衷心的感谢。

最后,感谢解放军信息工程大学测绘学院训练部对本书编写出版的大力支持,感谢测绘出版社为本书出版所给予的指导和帮助。

书中不当之处,欢迎广大读者批评指正,以便再版时修订。

编著者

2008年4月于郑州

# 目 录

## 第一单元 现代测量学基础

第一章 绪论	1
§ 1-1 测量学的基本概念	1
§ 1-2 测量学的学科分支	1
§ 1-3 测量学的发展历史	2
§ 1-4 测量学的地位与作用	4
第二章 测量的基本知识	6
§ 2-1 地球的形状、大小及其基准面	6
§ 2-2 测量坐标系和高程	8
§ 2-3 高斯投影	11
§ 2-4 方位角及其相互关系	16
§ 2-5 地形图概述	18
§ 2-6 地形图分幅与编号	20
第三章 测量误差的基本知识	26
§ 3-1 测量误差概述	26
§ 3-2 精度估计的标准	31
§ 3-3 观测值的算术平均值及其中误差	33
§ 3-4 误差传播	35
§ 3-5 非等精度观测值的最或然值及其中误差	37

## 第二单元 角度与距离测量

第四章 角度测量	44
§ 4-1 角度测量的概念	44
§ 4-2 J6 级光学经纬仪	45
§ 4-3 水平角和垂直角的观测与记录	51
§ 4-4 经纬仪检验校正	57
§ 4-5 仪器误差对水平角的影响	62
§ 4-6 水平角观测值的归算	66
第五章 距离测量	71
§ 5-1 钢尺量距	71
§ 5-2 视距测量	73
§ 5-3 电磁波测距	75
第六章 全站式测量	84
§ 6-1 全站式测量概述	84
§ 6-2 电子测角原理	84
§ 6-3 全站仪的基本功能	89

§ 6-4 全站仪的数据通讯 .....	91
----------------------	----

### 第三单元 控制测量

<b>第七章 平面控制测量</b> .....	96
§ 7-1 平面控制测量概述 .....	96
§ 7-2 导线的布设和野外测量 .....	99
§ 7-3 坐标计算的基本公式 .....	102
§ 7-4 单导线的近似平差计算 .....	103
§ 7-5 单导线的严密平差计算 .....	111
§ 7-6 测角交会原理 .....	115
§ 7-7 测边交会与边角后方交会 .....	120
<b>第八章 高程控制测量</b> .....	123
§ 8-1 高程控制测量概述 .....	123
§ 8-2 水准测量的基本原理 .....	124
§ 8-3 水准仪及水准标尺 .....	125
§ 8-4 水准仪与水准标尺的检校 .....	129
§ 8-5 四等水准测量 .....	132
§ 8-6 水准测量的误差分析 .....	136
§ 8-7 数字水准仪 .....	141
§ 8-8 三角高程测量 .....	145
§ 8-9 测距高程导线和独立交会高程点 .....	148
§ 8-10 三角高程测量的误差分析 .....	150
<b>第九章 GPS 控制测量</b> .....	152
§ 9-1 GPS 概述 .....	152
§ 9-2 GPS 绝对定位的基本原理 .....	154
§ 9-3 GPS 相对定位方法 .....	157
§ 9-4 GPS 测量的作业模式 .....	160
§ 9-5 GPS 控制网的技术设计 .....	161
§ 9-6 GPS 控制测量的实施 .....	163
§ 9-7 GPS 观测数据的预处理 .....	164
§ 9-8 GPS 控制网平差计算 .....	166

### 第四单元 数字测图

<b>第十章 野外数据采集</b> .....	170
§ 10-1 数字测图概述 .....	170
§ 10-2 碎部点的测定方法 .....	173
§ 10-3 图式符号及信息编码 .....	177
§ 10-4 地物点的测定 .....	183
§ 10-5 地貌点的测定 .....	187
§ 10-6 野外采样信息的数据结构 .....	192
§ 10-7 常用野外数据采集模式 .....	197

<b>第十一章</b>	<b>数字成图的原理与方法</b> .....	201
§ 11-1	坐标变换 .....	201
§ 11-2	地物符号库的设计 .....	203
§ 11-3	等高线的自动绘制 .....	209
§ 11-4	图形裁剪 .....	216
§ 11-5	规则图形的正形化处理 .....	219
§ 11-6	图幅接边处理 .....	222
§ 11-7	图廓整饰与绘图输出 .....	224
<b>第十二章</b>	<b>地形图数字化的原理与方法</b> .....	226
§ 12-1	手扶跟踪数字化地图定向 .....	226
§ 12-2	手扶跟踪地图数字化方法 .....	228
§ 12-3	地图扫描图像预处理 .....	232
§ 12-4	线划自动跟踪 .....	236
§ 12-5	地图信息识别与提取 .....	239
§ 12-6	两种地图数字化方法的比较 .....	243
<b>第十三章</b>	<b>地形图的应用</b> .....	245
§ 13-1	概述 .....	245
§ 13-2	地形图的基本量算 .....	245
§ 13-3	地形图的基本应用 .....	247
§ 13-4	数字高程模型的建立 .....	251
§ 13-5	数字高程模型的应用 .....	256

## 第五单元 建筑工程测量

<b>第十四章</b>	<b>施工测量的基本原理与方法</b> .....	262
§ 14-1	施工测量概述 .....	262
§ 14-2	测设的基本原理 .....	263
§ 14-3	点的平面位置测设 .....	267
§ 14-4	铅垂线与水平面测设 .....	269
<b>第十五章</b>	<b>建筑施工测量</b> .....	271
§ 15-1	建筑施工控制测量 .....	271
§ 15-2	建筑施工测量 .....	273
§ 15-3	竣工总平面图的测绘 .....	279
<b>第十六章</b>	<b>建筑工程的变形监测</b> .....	281
§ 16-1	变形观测概述 .....	281
§ 16-2	建筑物的沉降观测 .....	283
§ 16-3	建筑物的水平位移观测 .....	288
§ 16-4	建筑物倾斜观测 .....	292
<b>参考文献</b> .....		296



# 第一单元 现代测量学基础

现代测量学是测绘科学的基础,主要研究基本测量理论、地面点空间位置的测量方法和地形图测绘的理论和方法。本单元主要介绍现代测量学的基本概念、测量坐标系的建立、地形图和测量误差的基本知识。

## 第一章 绪 论

### § 1-1 测量学的基本概念

测量学是研究确定地球形状、大小和地球重力场,测定地面点的平面位置和高程,将地球表面的自然形态和人工设施测绘成地图的理论和技术的学科,是地球科学的重要组成部分。

在测量学形成和发展的过程中,其概念的内涵也存在一个演变的过程。目前,测量学的概念分为两种,即广义的测量学和狭义的测量学。从广义的角度来说,测量学涵盖了测绘学科的概念,包含了测绘科学的所有分支学科。随着测量学的发展和深入研究,逐步形成了大地测量学、摄影测量学、地图制图学、工程测量学、海洋测绘学等分支学科,分别对测量学中的一些理论和技术问题进行专门研究。狭义的测量学是指研究基础测量理论、基本测量方法和基本地形测图技术的学科,其研究对象为地球表面的局部区域,在满足测量精度要求前提下,一般将地球的局部表面当作平面来处理,传统上也称为普通测量学、地形测量学、测量学等。目前的测量学在测绘科学体系中一般是指狭义的测量学的概念。尽管测量学的各分支学科已基本从测量学的研究对象中分离而相对独立地进行发展,但测量学中涉及的有关基本概念、基本理论和基本方法仍是其各分支学科的基础。

近些年来,科学技术飞速发展,以计算机技术、电子通信与传输技术、卫星定位技术和地理信息系统为代表的先进技术被测量领域吸纳和利用,GPS接收机、全站式电子经纬仪、便携式计算机、数字扫描仪和数控绘图仪等一大批现代测量仪器和设备得到了应用,并逐步替代传统的测量仪器。测量方法、测量手段和测量成果的形式都发生了根本性的变革,相应的测量概念、理论与技术也随之发生了变革。在这样的形势下,尽管测量学的研究对象和基本任务没有改变,但测量学的研究内容却发生了广泛而深刻的变化,现代测量学的概念也应运而生。

现代测量学是研究基本测量理论,利用现代测量仪器和测量方法测定地面点的空间位置,将地球表面的自然形态和人工设施测绘成数字地图的理论和技术的学科。由于现代测量的主要成果是数字地图,因此现代测量学有时又被称为数字测图原理与方法。

### § 1-2 测量学的学科分支

大地测量学是研究地球的形状、大小和重力场,测定地面点几何位置和地球整体与局部运

动的理论和技术的学科。其基本任务是建立地面控制网、重力网,精确测定控制点的空间位置,为地形测图和各种测量工作提供基础控制,为研究地球形状、大小、重力场及其变化提供基本数据。大地测量学又分为几何大地测量学、物理大地测量学和空间大地测量学。

摄影测量学是研究利用摄影或遥感手段获取被摄物体的影像数据,进行分析与处理,以确定被摄物体的形状、大小和空间位置,并判定其性质的学科。根据相机与被摄物体的距离的远近,摄影测量分为航空摄影测量、航天摄影测量、地面摄影测量、近景摄影测量等,根据摄影测量的用途又分为地形摄影测量和非地形摄影测量。

地图制图学是研究模拟和数字地图的基础理论、设计、编绘、复制的技术方法及其应用的学科。随着计算机技术的引入,出现了计算机地图制图技术。它是根据地图制图原理,利用计算机输入和输出设备,通过数据库技术和图文处理技术,实现地图数据的获取、处理、存储、显示与输出,生成数字地图。

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。工程测量的研究范围很广,包括控制测量、大比例尺地形图测绘、施工放样、大型设备安装、变形监测等。按照研究对象又可分为建筑工程测量、水利工程测量、矿山工程测量、铁路工程测量、公路工程测量、管线工程测量、桥梁工程测量、隧道工程测量、军事工程测量等。

海洋测绘学是以海洋水体和海底为研究对象,研究海洋定位、测定海洋大地水准面和平均海面、海底地形、海洋重力、海洋磁力、海洋环境等自然和社会信息的地理分布及编制各种海图的理论和技术的学科。内容主要包括海洋大地测量、海道测量、海底地形测量和海图编制。

### § 1-3 测量学的发展历史

测量学起源于人类社会的生产需求,随着人类社会经济活动发展而发展。在人类社会的发展过程中,必然要不断地认识、利用和改造自然环境。测量技术和测量工具是认识自然的有力武器,测量成果则直接应用于人类的社会经济活动。测量学具有悠久的发展历史。我国是世界上最早开展测量并利用测量成果的国家,相传公元前两千多年大禹治水时就进行了测量工作,司马迁在《史记·夏本记》中对其有“左准绳,右规矩”的记载,说明在上古时期就已经开始使用测量工具了。国外考古发现的证据表明,早在公元前 1400 年,古埃及人就对地产边界进行了测量。测量学的历史发展主要体现在测量理论、测量工具和测量成果与应用三个方面。

人类对地球的理解和认识经历了由定性到定量、由粗到精的过程。最早人们认为天圆地方,直到公元前 6 世纪,古希腊的毕达哥拉斯论证了地球为球形。3 个世纪后,古希腊的埃拉托斯尼用天文观测方法首次推算了地球的周长和半径,证实了地圆说。8 世纪早期,我国唐代天文学家张遂进行了世界上最早的实地弧度测量,通过测绳丈量的距离和日影长度推算出纬度差为 1 度所对应的子午线弧长。1276 年中国元朝天文学家郭守敬主持了大规模的天文测量,并用球面三角解算天文问题,首次以海洋面作为高程的基准面。17 世纪末期,英国物理学家牛顿和荷兰的惠更斯首次根据力学原理提出地球是两极略扁的椭球,即地扁说。18 世纪中叶,法国科学院在南美洲的秘鲁和北欧的拉普兰进行了弧度测量,证实了地扁说。1806 年和 1809 年,法国的勒让德和德国的高斯分别提出了最小二乘准则,为测量平差理论奠定了基础。1849 年,英国的斯托克司提出了根据重力测量数据确定地球形状的理论 and 计算方法。1873 年

德国的利斯廷提出了大地水准面的概念,并以此来表示地球的形状。19世纪,法国最先开始近代三角测量,并提出用天文方位角控制三角测量误差积累的概念。人类对地球形状的认识过程以及所进行的测量实践,促进了测量学理论与技术的发展。

地图是测量工作的主要成果,地图的表示方法和制作方法是测量学发展的重要标志。早在春秋时期(公元前770年—公元前221年)就测出了“版图”和“土地之图”,《管子·地图篇》中记载了地图的内容及其在军事上的应用,所谓“凡用兵者,必先审知地图”。1986年在甘肃天水放马滩秦墓出土了7幅成图于秦始皇八年(公元前239年)的地图,这是目前我国发现的最早的地图。公元前3世纪,古希腊的埃拉托斯尼最先在地图上绘制了经纬线。1973年在湖南长沙马王堆出土的3幅帛地图,绘于汉文帝十二年(公元前168年)以前,地图品种有“地形图”、“驻军图”和“城邑图”,其中的“地形图”幅面是边长为96cm的正方形,图幅所示方位为上南下北,比例尺约为1:18万,图上大小30多条河流绘制清晰,与当今的地图所显示的河流骨架基本一致,从其表示内容、符号设计、制图精度与工艺水准看,已具相当高的水平。公元2世纪,古希腊的托勒密在他的巨著《地理学指南》中汇集了当时已明确的地球知识,描述了编制地图的方法,并提出了将地球曲面用平面表示的地图投影问题。公元265年,西晋时期的裴秀提出了“制图六体”的原则,正确地解决了地图比例尺、方位、距离及其化算问题,并编绘出“地形方丈图”。16世纪,荷兰墨卡托的《世界地图集》和中国罗洪先的《广舆图》代表了当时地图制作的最高水平。之后,随着测量仪器的不断发明和应用,使得根据实地测量结果绘制国家规模的地形图成为可能。清康熙年间在全国范围内进行了大规模的地形图测绘,形成了《皇舆全览图》,为我国近代的测量学发展奠定了基础。社会的发展,迫切希望能在图纸上真实、形象地显示地貌起伏形态,由此出现了晕渲法、晕瀚法和晕点法,直到1729年等高线法的出现,才圆满地解决了平面图纸上显示三维地貌的难题,能够在图上进行精确的距离、方向、高程、面积和土方计算。与此同时,地图分幅、图式符号设计、比例尺系列的确定等方面也逐步趋于科学化和规范化。

测量数据的获取离不开测量仪器,测量学的形成和发展在很大程度上依赖于测量仪器的革新与发展,测量仪器的进步甚至会引出测量理论变化,导致测量技术、测量成果的进步和发展以及测量应用领域的拓展。17世纪之前,测量使用的工具比较简单,测量精度也比较低,以测距为主,如绳尺、步弓和矩尺等。1608年荷兰工匠利普塞尔发明了望远镜;次年意大利物理学家伽利略,在利普塞尔发明的基础上,研制了高倍望远镜;1640年英国的加斯科因在望远镜上增加了十字丝,用于精确照准,成为光学测量仪器的开端。1730年英国的西森制成用于角度测量的经纬仪,促进了三角测量的发展。随后,相继出现了小平板仪、大平板仪和水准仪等光学测量仪器,用于野外直接测绘地形图。19世纪中叶,法国的洛斯塔首创摄影测量方法,20世纪初出现了地面立体摄影测量技术,随着飞机的发明,摄影与航空技术开始用于测量,使测制地形图的方法产生了重大变革。利用航空像片测制地形图,虽然仍需作一定的野外工作,但已大大减轻了野外工作量,提高了测图精度,加快了成图速度。可以说,从17世纪到20世纪中叶,光学测量仪器体系逐步形成并得到了较快发展,同时带动了传统测量理论与方法的发展并趋于成熟。到20世纪中叶以后,随着电子技术的发展,测量仪器开始向电子化的方向发展。1948年电磁波测距仪的发明,克服了量距的困难,使导线测量、三边测量方法得到重视和发展。与此同时,计算机的发明和发展,促进了基于计算机的测量仪器设备的进一步发展,出现了用于航空摄影测量的解析测图仪和数控绘图仪,使得地形图测绘更加简便、快速和精确。

近二三十年来,卫星定位、航空航天遥感、地理信息系统、计算机技术和数据通信等现代信息技术的发展与相互集成使测量学的理论、方法和手段发生了划时代的变革。常规大地测量被卫星大地测量所代替,航空摄影测量拓展为航空航天摄影测量,且利用遥感技术可以多波段、多类别地对地形进行探测,已进入了数字摄影测量阶段。地图制图实现了自动绘制,测量成果已不仅仅是一纸地图,而是以数字地图和数字地面模型为主的数字地理信息,可用于各种类型的地理信息系统。工程测量实现了测量和数据处理的一体化。海洋测量的仪器和方法实现了自动化和信息化。传统的地形测量方法已经发生根本的变化,以光学经纬仪、水准仪和平板仪为主要代表的传统测量仪器正在被 GPS 接收机、全站型经纬仪所取代。就地形测图而言,利用全站仪和动态 GPS 接收机结合掌上电脑所构成的数字测图系统已完全改变了传统的测图模式,并可直接测得数字地图。数字地图不仅改变了地图产品的存贮、生产模式,同时有利于地图产品的传输和更新,为建立地图数据库和地理信息系统提供了数据保障。

从测量学的发展历史可以看出,测量学的发展除了自身理论和方法的进步之外,在很大程度上取决于其他先进技术和仪器设备的发展,测量仪器和数据处理设备的每一次突破都相应带来测量理论和技术的一次飞跃。可以预见,随着超站仪、测量机器人和激光雷达等最新技术和仪器设备的引入,测量学的理论和技术又将迎来新一轮的快速发展。

## § 1-4 测量学的地位与作用

测量学是一门应用学科,主要处理和解决物体的空间定位与空间表达问题。可以说,在所有人类活动需要准确测定所关心事物空间位置的场合,都离不开测量学。因而,测量学在科学研究、国民经济建设和国防建设等社会经济发展的诸多方面都发挥着重要作用并占有重要地位。

### 一、测量学在科学研究中的作用

地球是人类赖以生存和发展的基础和载体。随着古往今来人类的长期活动和自然形态与环境的变迁,也随着人类对自身生存环境的愈加关注,人类发现诸如地壳运动、地球潮汐、海平面变化和重力场变化等一系列具有区域性和全球性的重大课题需要深入认识和解决。测量学可以提供地球构造运动和地球动力学方面的观测数据和精确的几何信息,在探索地球的奥秘、深入认识和研究与地球有关的各种问题的发展变化规律方面发挥着重要作用。同时,利用测量学方法在研究地球相关问题的知识,也可以在对月球、火星等其他星体的研究中得以应用。

### 二、测量学在国民经济建设中的作用

测量学与国民经济建设的许多领域具有密不可分的关系,在国民经济建设中发挥着巨大而广泛的作用。在城乡建设规划、土地与海洋资源的调查与利用、农林牧渔的发展、生态环境保护以及各种工程建设中,都必须进行相应的测量工作,以获取各种必要空间位置信息,测制各种比例尺的地图和建立各种地理信息系统,为规划、设计、施工、管理和决策提供信息保障。例如在城市建设、地质勘探、矿山开发、水利、交通设施的建设中,首先要有准确的、现势性好的地形资料,才能进行科学的规划、设计、施工和管理。在一些大型隧道、桥梁和大坝等工程建设的全过程中,都需要依靠测量工作来保证工程的顺利实施。

### 三、测量学在国防建设中的作用

自古以来,测量技术以及通过测量所提供的地形数据和地图产品都在军事上具有不可或缺的重要作用。在军事上,地形图是战场地形的客观反映,作战计划的制定、兵力的配备与部署和作战指挥,都以准确的地形图为基础依据。军事地形图也是部队实施机动的向导,精确的地形信息是炮兵确定射击诸元的基础。在现代化战争中,武器装备和打击目标的定位、导弹的发射和制导也都离不开高精度的空间位置信息。以地理空间信息为基础的军事指挥系统和战场态势分析评估都需要以数字化的测量数据和基础地理信息作保障,数字地理信息已成为现代战争中战场信息必不可少的组成部分。

#### 思考题与习题

1. 什么是现代测量学? 现代测量学与传统的测量学相比有何特点?
2. 结合自己的经历和所掌握的知识,说明测量学的地位和作用。

## 第二章 测量的基本知识

### § 2-1 地球的形状、大小及其基准面

测量学的研究对象是地球表面,测量工作也是在地球表面上进行的。因此,首先要对地球的形状、大小等自然形态作必要的了解,然后才能为确定地面点的空间位置而选定参考面和参考线,作为描述地面点空间位置的基准。

#### 一、地球的自然表面

地球的自然表面是不规则的,它有高山、丘陵和平原,有江河、湖泊和海洋。在地球表面上陆地面积约占 29%,海洋面积约占 71%。地球表面最高点是海拔 8 844.43m 的珠穆朗玛峰,最低点是位于海平面以下 11 022m 的马里亚纳海沟。由此可见,地球表面是起伏不平的,最大起伏高差约为 20 000m。然而,这样的高低起伏相对于半径约为 6 371 000m 的地球来说仍然是微不足道的,就总体形状而言,地球是一个接近于两极扁平、沿赤道略为隆起的“椭球体”。

#### 二、大地水准面

既然地球表面绝大部分是海洋,人们很自然地把地球总体形状看作是被海水包围的球体,即把地球看作是处于静止状态的海水面向陆地内部延伸形成的封闭曲面。处于静止平衡状态的液体表面通常称为水准面,这个由静止的海水面延伸形成的封闭曲面也是一个水准面。由于海水有潮涨潮落,海水面时高时低,这样的水准面就有无数个,从中选择一个最接近于地球表面的水准面来代替地球表面,这就是通过平均海水面的水准面。人们把这个处于静止平衡状态的平均海水面向陆地内部延伸所形成的封闭曲面称为大地水准面。大地水准面包围的形体称为大地体。

当液体表面处于静止状态时,液面必然与重力方向正交,即液面与铅垂线方向垂直。由于大地水准面也是一个水准面,因而大地水准面同样具有处处与铅垂线方向垂直的性质。我们知道,铅垂线的方向取决于地球内部的吸引力,而地球引力的大小与地球内部物质有关。由于地球内部物质分布是不均匀的,因而地面上各点的铅垂线方向也是不规则的。实际上,处处与铅垂线方向正交的大地水准面是一个有微小起伏的不规则曲面,如图 2-1 所示。水准面和铅垂线是客观存在的,可以作为野外测量的基准面和基准线。实际上,野外测量的仪器就是以水准面和铅垂线为基准进行整置的。

但是,由于大地水准面是具有微小起伏的不规则曲面,不能用数学公式表示,因此,在这个曲面上进行测量数据的处理将是十分困难的。

#### 三、参考椭球面

为了解决大地水准面不能作为计算基准面的矛盾,人们选择既能用数学公式表示、又十分接近于大地水准面的规则曲面作为计算的基准面。

经过几个世纪的实践,人们认识到,虽然大地水准面是略有起伏的不规则曲面,但从整体上看,大地体却是十分接近于一个规则的旋转椭球体,即一个椭圆绕它的短轴旋转而成的旋转椭球体,称为地球椭球体,如图 2-2 所示。地球椭球的大小由长半径  $a$ 、短半径  $b$  或扁率  $\alpha$  来确定,称为地球椭球体元素,其值是通过大量的测量成果推算出来的。

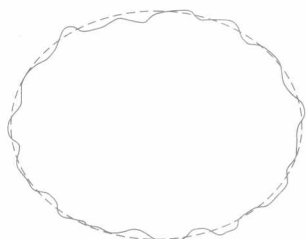


图 2-1 大地水准面

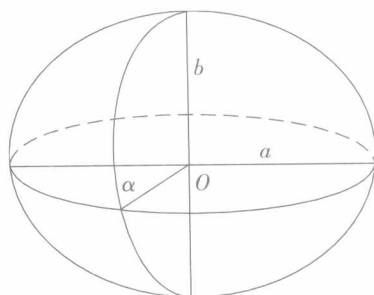


图 2-2 参考椭球面

17 世纪以来,许多测量工作者根据不同地区、不同年代的测量资料,按不同的处理方法推算出不同的地球椭球元素,表 2-1 摘录了几种地球椭球元素的数值。

表 2-1 地球椭球元素值

参考椭球名称	年代	长半径 $a$	扁率 $\alpha$
埃强莱斯特	1830	6 377 276	1 : 300.80
白塞尔	1841	6 377 397	1 : 299.15
克拉克	1866	6 378 206	1 : 295.00
克拉克	1880	6 378 249	1 : 293.46
海福特	1910	6 378 388	1 : 297.00
克拉索夫斯基	1940	6 378 245	1 : 298.30
凡氏	1965	6 378 169	1 : 298.25
IUGG16 届大会推荐值	1975	6 378 140	1 : 298.257
IUGG17 届大会推荐值	1979	6 378 137	1 : 298.257
WGS-84 系统	1984	6 378 137	1 : 298.257 223 563

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

地球椭球的形状大小确定之后,还应进一步确定地球椭球与大地体的相关位置,才能作为测量计算的基准面,这个过程称为椭球定位。人们把形状、大小和定位都已确定了地球椭球体称为参考椭球体。参考椭球体的表面称为参考椭球面。参考椭球定位的原则是在一个国家或地区范围内使参考椭球面与大地水准面最为吻合,并使短轴与地轴平行。适当选定一个地面点,使得该点处参考椭球面与大地水准面重合且法线与铅垂线重合,以此作为推算大地坐标的起算点。这个用于参考椭球定位的点,称为大地原点。参考椭球面是测量计算的基准面,其法线是测量计算的基准线。

1949 年新中国成立以来,我国采用了两种不同的大地坐标系,即 1954 年北京坐标系和 1980 西安坐标系。由于历史的原因,我国的 1954 年北京坐标系是前苏联 1942 年坐标系的延伸,参考椭球体采用的是克拉索夫斯基椭球元素,其大地原点位于前苏联的普尔科沃。由于 1954 年北京坐标系所采用的参考椭球面在我国范围内与大地水准面并不能达到最佳吻合,为了适应我国经济建设和国防建设的需要,于 1982 年建立了新的大地基准,相应的坐标系称为

1980 西安坐标系,参考椭球元素采用 1975 年 IUGG 第 16 届大会推荐的数值,大地原点位于陕西省西安市以北 60 km 的泾阳县永乐镇。

由于参考椭球体的扁率较小,因此在测量的计算中,在满足精度要求的前提下,为了计算方便起见,通常把地球近似地当作圆球看待,其半径为

$$R = \frac{1}{3}(a + a + b) = 6\,371 \text{ km}$$

## § 2-2 测量坐标系和高程

地面点的空间位置必须用 3 个量确定,其中两个量是地面点在基准面上的坐标,称为点的地理坐标,第三个量则是地面点沿着投影线到基准面的距离,称为点的高程。

### 一、大地坐标系

大地坐标系以参考椭球面和法线作为基准面和基准线。

如图 2-3 所示,包含参考椭球体短轴  $PP_1$  的平面称为大地子午面,大地子午面与参考椭球面的交线称为大地子午线或大地经线。世界各国把过英国格林尼治天文台的子午面称为首大地子午面或起始大地子午面,它与参考椭球面的交线称为首大地子午线或起始大地子午线。垂直于参考椭球体短轴的任一平面与参考椭球面的交线称为纬线或纬圈。显然,纬圈平面互相平行,故纬圈又称平行圈。过短轴中心且垂直于短轴的平面称为大地赤道面。大地赤道面与参考椭球面的交线称为赤道。

在大地坐标系中,地面上  $M$  点的大地坐标分量定义如下:

大地经度  $L$ ,就是过  $M$  点的大地子午面与首大地子午面之间的夹角。由首大地子午面向东量称为东经,向西量称为西经,其取值范围各为  $0^\circ$  至  $180^\circ$ 。

大地纬度  $B$ ,就是过  $M$  点的法线(与参考椭球面正交的直线)和大地赤道面的夹角。纬度由大地赤道面向北量称为北纬,向南量称为南纬,其取值范围各为  $0^\circ$  至  $90^\circ$ 。

$M$  点法线至参考椭球面的距离称为大地高  $H_{\text{天}}$ ,图 2-3 中  $M$  点的大地高为 0。

地面点的大地坐标确定了该点在参考椭球面上的位置,称为该点的大地位置。大地坐标再加上大地高就确定了点在空间的位置。但大地坐标和大地高只能推算,而不能直接测量。

### 二、天文坐标系

天文坐标系以大地水准面和铅垂线为基准面和基准线。

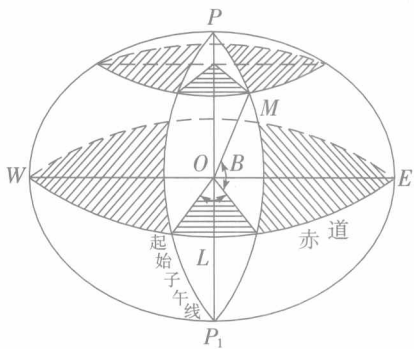


图 2-3 大地坐标

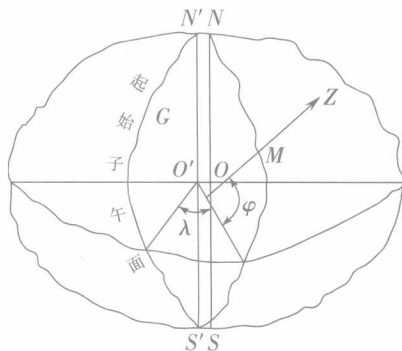


图 2-4 天文坐标系



如图 2-4 所示,包含地面某点铅垂线且与地球短轴平行的平面称为天文子午面,过英国格林尼治天文台的天文子午面称为起始天文子午面。通过地球质心且垂直于地轴的平面称为天文赤道面。

在天文坐标系中,地面上  $M$  点的坐标分量定义如下:

天文经度  $\lambda$ ,就是过  $M$  点的天文子午面与起始天文子午面之间的夹角。

天文纬度  $\varphi$ ,就是过  $M$  点的铅垂线与天文赤道面的夹角。天文经、纬度的度量方法同大地经、纬度。

$M$  点沿铅垂线至大地水准面的距离称为正高  $H_{正}$ 。

天文坐标可确定地面点在大地水准面的位置,称为该点的天文位置。但由于大地水准面是有微小起伏的不规则曲面,因此天文坐标只能用天文测量的方法测量,而不能相互推算。

通过地面点的铅垂线和通过该点的法线一般不重合,二者之间有一个夹角,称为垂线偏差。由于垂线偏差的值非常小,因此,在一般的地形测量中可以不考虑其影响。

### 三、空间直角坐标系

地球坐标系中,任一点的位置可用地心空间直角坐标系描述。如图 2-5 所示。

地心空间直角坐标系的定义是:原点  $O$  与地球质心重合, $Z$  轴指向地球北极, $X$  轴指向格林尼治子午面与地球赤道的交点  $E$ , $Y$  轴垂直于  $XOZ$  平面构成右手坐标系。

由于地球的自转轴相对于地球体的位置并不是固定的,因而地极点在地球表面上的位置是随时间而变化的,从而使地球坐标系坐标轴的指向发生变化。因此,国际天文学联合会和国际大地测量学协会建议,采用国际有关部门确定的平均地极位置作基准点。相应于这个基准点的地球自转轴的平均位置,称为国际协议

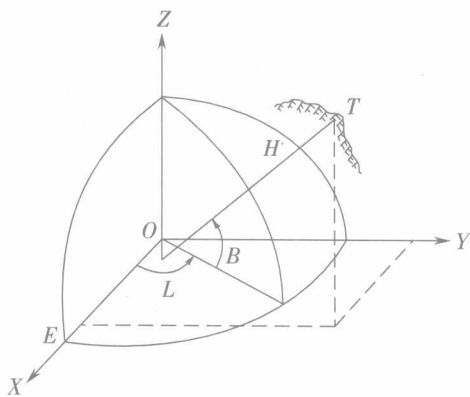


图 2-5 地心空间直角坐标系和地心大地坐标系

原点。采用协议地极为基准点的地球坐标系,称为协议地球坐标系(Conventional Terrestrial System, CTS)。GPS 定位采用的 WGS-84(World Geodetic System 1984)坐标系就属于协议地球坐标系。

### 四、平面直角坐标系

在测量工作中,仅采用大地坐标表示地面点的位置是不方便的,而采用平面直角坐标系对于测量计算则十分方便。

由于测量工作中的角度按顺时针测量,直线的方向也是以纵坐标轴北方向顺时针方向度量的,若将纵轴作为  $X$  轴,横轴作为  $Y$  轴,并将 I, II, III, IV 象限的顺序也按顺时针排列,这样就可完全不变地使用三角函数,而又与测量中规定的直线方向及测角习惯相一致。因此,测量工作中所用的平面直角坐标系以  $X$  轴为纵轴,表示南北方向,以  $Y$  轴为横轴,表示东西方向,如图 2-6 所示。