



Modern Surveying

主 编：王腾军 田永瑞

副主编：王 利 姜 刚 贺炳彦

现代测量学

普通高等学校规划教材



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.



普通高等学校规划教材

现代测量学

主 编 王腾军 田永瑞
副主编 王 利 姜 刚 贺炳彦



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

全书共分十八章,主要内容为测量学基础知识,包括测量坐标系、地形图基本知识、误差理论基本知识、地理信息系统(GIS);测量基本工作,包括角度测量、距离测量、高程测量、GPS 测量;基本测量作业,包括控制测量、大比例尺地形图测绘及应用、摄影测量与遥感(RS)、施工测量以及工程建筑物变形监测、地籍与房产测绘、海洋测绘等。

本书可作为高等院校非测绘专业基础课“测量学(或工程测量)”教材,主要适用于土木工程类、交通工程类、地质矿产类、环境工程类等专业的本科生教材,也可作为其他专业和有关工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

现代测量学 / 王腾军, 田永瑞主编. — 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2017. 8

ISBN 978-7-114-13525-5

I. ①现… II. ①王… ②田… 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(2017)第 161364 号

普通高等学校规划教材

书 名: 现代测量学

著 者: 王腾军 田永瑞

责任编辑: 李 瑞 李 娜

出版发行: 人民交通出版社股份有限公司

地 址: (100011) 北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010) 59757973

总 经 销: 人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京市密东印刷有限公司

开 本: 787 × 1092 1/16

印 张: 28.25

字 数: 656 千

版 次: 2017 年 8 月 第 1 版

印 次: 2017 年 8 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-13525-5

定 价: 55.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

前 言

测量学(或工程测量)是土木工程、地质工程、交通工程、城乡规划、资源及环境工程等专业的基础课程之一,它担负着奠定专业基础知识、培养专业技能的重要任务。《现代测量学》是笔者在多年教学和科研实践的基础上,参阅并吸收国内外同类教材及测绘科学的最新研究成果,结合我国当前高等教育改革和课程设置的实际情况编写而成的。

本教材以现代测量学的基本理论、基本方法以及测量作业过程为体系,以数字化测量为主线,以测绘新概念、新技术、新仪器为重点组织教学内容,突出基础理论和基本概念,加强理论联系实际,力求把握好测绘科学技术发展与教学需求的关系,使所编教材具有先进性和实用性。教材内容精炼、新颖,专业覆盖面广,能满足培养宽口径、复合型人才的需求。

本教材是依据高等学校土木工程、地质工程、交通工程、城乡规划、资源及环境工程等专业的“测量学(或工程测量)”教学大纲的要求组织编写的。本书可作为上述各专业本科“测量学(或工程测量)”课程的通用教材,也可供上述专业工程技术人员参考。

参与本教材编写工作的有:长安大学王腾军、田永瑞、王利、姜刚、贺炳彦、杨耘,内蒙古农业大学刘全明,河南省地质矿产勘查开发局测绘地理信息院李建武,小浪底水利水电工程有限公司蒋金虎。全书共分为十八章,其中,第一章、第七章由王腾军编写,第二章、第四章由贺炳彦编写,第三章、第五章、第六章由王利编写,第八章由杨耘编写,第九章由姜刚、李建武编写,第十章由刘全明编写,第十一章、第十八章由田永瑞编写,第十二章、第十七章由李建武编写,第十三章、第十四章由姜刚编写,第十五章由蒋金虎编写,第十六章由王利、蒋金虎编写。王腾军、田永瑞负责全书的组织、统稿和校对工作。

在本教材编写过程中,得到了长安大学张勤教授、杨志强教授、张永志教授、

隋立春教授、韩玲教授、赵超英教授、张菊清教授的关心和支持,张菊清教授还应邀审阅了部分章节,在此谨致衷心的感谢!感谢长安大学教务处、长安大学地质工程与测绘学院及其他参编单位的大力支持,感谢人民交通出版社股份有限公司为本教材出版所做的辛勤工作。

由于编者的水平有限,对于书中的不足和错误之处,敬请读者不吝批评指正。

编著者

2017年3月于长安大学

目 录

第一章 测量学基本知识	1
第一节 测绘学概述	1
第二节 测量坐标系	6
第三节 直线方向的确定	14
第四节 地球曲率对观测成果的影响	17
第五节 测量工作概述	18
思考题与习题	20
第二章 地形图基本知识	21
第一节 地图的基本概念	21
第二节 地图投影基本知识	25
第三节 地形图的分幅与编号	26
第四节 地形图上地物与地貌表示	32
第五节 地形图整饰要素	38
思考题与习题	41
第三章 测量误差理论及其处理基础	42
第一节 测量误差概述	42
第二节 偶然误差的特性	45
第三节 衡量精度的指标	48
第四节 误差传播定律	51
第五节 等精度直接观测平差	55
第六节 不等精度直接观测平差	59
第七节 间接平差的基本原理	63
思考题与习题	68
第四章 角度与距离测量	70
第一节 角度测量原理	70
第二节 角度测量仪器	71
第三节 角度观测方法	77

第四节 距离测量	84
第五节 全站仪	92
第六节 三维激光扫描仪	97
思考题与习题	100
第五章 高程测量	102
第一节 水准测量原理	102
第二节 水准仪及其使用	103
第三节 水准测量的实施	111
第四节 水准测量的误差分析	116
第五节 三角高程测量	118
思考题与习题	121
第六章 GPS 卫星定位测量	122
第一节 GPS 卫星定位系统概述	122
第二节 GPS 卫星定位的基本原理	130
第三节 GPS 静态相对定位测量的实施	136
第四节 GPS RTK 测量方法	139
第五节 网络 RTK 和 CORS 技术	147
第六节 精密单点定位测量方法	150
思考题与习题	153
第七章 控制测量	154
第一节 控制测量概述	154
第二节 导线测量	158
第三节 交会测量	166
第四节 三角测量	169
第五节 高程控制测量	170
第六节 GPS 控制测量	173
思考题与习题	179
第八章 摄影测量与遥感	181
第一节 摄影测量与遥感概述	181
第二节 摄影测量技术基础	183
第三节 遥感技术基础	195
第四节 遥感技术的应用	205
思考题与习题	208
第九章 大比例尺地形图测绘与应用	209
第一节 大比例尺地形图测绘概述	209
第二节 大比例尺地形图传统测绘	210

第三节 大比例尺地面数字地形图测绘	212
第四节 数字摄影地形测量	215
第五节 三维激光扫描仪地形测量	216
第六节 数字地形图的应用	219
思考题与习题	230
第十章 地理信息系统(GIS)	232
第一节 地理信息系统基本概念	232
第二节 地理信息系统的构成及功能	235
第三节 地理信息系统的应用	240
思考题与习题	244
第十一章 测设的基本工作	245
第一节 概述	245
第二节 角度、距离与高程的测设	246
第三节 地面点平面位置的测设	251
第四节 直线的测设	255
思考题与习题	257
第十二章 地质勘探工程测量	258
第一节 勘探工程测量	258
第二节 地质剖面测量	262
第三节 地质填图测量	264
思考题与习题	265
第十三章 建筑施工测量	266
第一节 建筑施工测量概述	266
第二节 建筑施工控制测量	267
第三节 建筑施工测量	270
第四节 建筑竣工测量	277
思考题与习题	278
第十四章 线路测量	279
第一节 线路测量概述	279
第二节 线路中线测量	282
第三节 线路曲线测设	286
第四节 线路纵横断面测量	295
第五节 线路施工测量	298
第六节 线路竣工测量	301
第七节 高速铁路施工测量	302
思考题与习题	308

第十五章 桥隧施工测量	310
第一节 桥隧施工测量概述	310
第二节 桥梁施工控制测量	315
第三节 桥墩、桥台的施工放样测量	322
第四节 隧道施工控制测量	325
第五节 隧道施工测量与竣工测量	332
思考题与习题	336
第十六章 变形监测	337
第一节 变形监测概述	337
第二节 工业与民用建筑变形监测	345
第三节 桥梁变形监测	352
第四节 滑坡变形监测	359
第五节 地面沉降变形监测	368
思考题与习题	377
第十七章 地籍与房产测量	379
第一节 地籍与房产测量概述	379
第二节 地籍测量	380
第三节 房产测量	388
思考题与习题	397
第十八章 海洋测绘	398
第一节 海洋测绘概述	398
第二节 海洋定位测量	406
第三节 水深测量	415
第四节 海底地形测量	423
第五节 海洋工程测量	429
思考题与习题	439
参考文献	440

第一章 测量学基本知识

第一节 测绘学概述

一、测绘学的内容和任务

测绘学是研究地球整体及其表面和外层空间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的获取、处理、管理、更新和利用的科学与技术,是地球科学的重要组成部分。其主要研究内容包括测定和描述地球的形状、大小、重力场、地表形态及它们的各种变化,确定自然和人造物体、人工设施的空间位置及其属性,并制成各种地图和建立有关信息系统。

测绘学按照研究范围、研究对象及采用技术手段的不同,分为以下几个分支学科:大地测量学、摄影测量与遥感学、地图学、工程测量学、海洋测绘学。

1. 大地测量学

大地测量学是研究和确定地球的形状、大小、重力场、整体与局部运动和地球表面点的几何位置以及变化的理论和技术的学科。大地测量学是测绘学各分支学科的理论基础,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三维位置,为地形测图提供控制基础,为各类工程施工测量提供依据,为研究地球形状、大小、重力场及其变化、地壳形变及地震预报提供信息。现代大地测量学包含三个基本分支:几何大地测量学、物理大地测量学和空间大地测量学。

2. 摄影测量与遥感学

摄影测量与遥感学是研究利用电磁波传感器获取目标物的影像数据,从中提取语义和非语义信息,用以测定目标物的形状、大小和空间位置,并判定其性质及相互关系,并用图形、图像和数字形式予以表达的理论和技术的学科。包括摄影测量学和遥感学。它的主要研究内容有:目标物的影像获取、处理,将所测得的成果用图形、图像或数字表示。包括航空摄影测量、航天摄影测量、航空航天摄影测量、地面摄影测量等。

3. 地图学

地图学主要研究地图制作的基础理论、地图设计、地图编制和制印的技术方法及其应用。其主要内容包括:

(1) 地图投影,主要研究依据一定的数学法则将地球椭球面(不可展曲面)的经纬网描绘在平面(可展曲面)上的图形所产生各种变形的特性及大小以及地图投影的方法等。

(2) 地图编制,主要研究地图制作的理论和技术,如制图资料的分析 and 处理,地图原图的编绘以及图例、表示方法、色彩、图形和制印方案等的设计。

(3) 地图设计,它是通过研究、实验,制定新编地图的内容、表现形式及其生产工艺、程序的工作。

(4) 地图制印,是研究复制和印刷地图过程中各种工艺的理论和技术方法。

(5) 地图应用,是研究地图分析、评价、阅读、量算和图上作业等。

4. 工程测量学

工程测量学是研究工程建设和自然资源开发中的规划、勘测设计、施工建造和运营管理各个阶段进行的控制测量、地形测绘、施工测量、竣工测量、变形监测及分析与预报以及建立相应的信息系统等的理论和技术的学科。

工程测量学是一门应用学科,按其服务的工程种类分为:建筑工程测量、水利工程测量、线路工程测量(如铁路工程测量、公路工程测量、输电线路与输油管道测量)、矿山测量、桥梁工程测量、隧道工程测量、港口工程测量、军事工程测量、城市建设测量以及三维工业测量等。

5. 海洋测绘学

海洋测绘学是以海洋水体和海底为对象,研究海洋定位,测定海洋大地水准面和平均海面、海底和海面地形、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,及为编制各种海图提供理论和技术的学科。内容包括海洋大地测量、海道测量、海底地形测量和海图编制。

测量学研究地球表面局部地区内测绘工作的基本理论、技术、方法及应用。在地球表面一个小区内进行的测绘工作,可以把这块球面看作平面而不顾及地球曲率的影响。测量学又称为普通测量学或地形测量学,其主要内容包括角度测量、距离测量、水准测量、控制测量、地形图测绘及地形图的应用。

二、测绘学的发展历史与现状

测绘学历史悠久。同其他科学技术一样,测绘学是由于社会的需要而产生,随着社会的进步而发展;同时,测绘学的发展又必然会推动社会的进步。古代的测绘技术起源于农业和水利。上古时代,古代埃及尼罗河洪水泛滥后的农田边界整理中和中国的夏禹在治理黄河水患中都应用了一定的测量知识,并使用了简单的测量工具进行测绘工作。

测绘学研究的对象是地球,测绘学的发展一开始就同人类对地球形状认识的逐渐深化而紧密联系在一起。人类最早对地球形状的认识是天圆地方。直到公元前6世纪,古希腊的毕达哥拉斯(Pythagoras)才提出地球应是一个圆球,两个世纪后,亚里士多德(Aristotle)对此进行论证,形成地圆说。公元前3世纪,埃拉托色尼(Eratosthenes)根据实地测量数据,首次推算出地球子午圈的周长,以此证实了地球是圆形的。

17世纪末,英国的牛顿(J. Newton)和荷兰的惠更斯(C. Huygens)首次从力学的观点,即用物理的方法来探讨地球的形状,提出地球是两极略扁的椭球体,称为地扁说。1743年,法国的克莱洛(A. C. Clairaut)证明了重力值与地球扁率间的数学关系,奠定了物理大地测量的

基础,使人们对地球的认识又进了一步。

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,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。现在的研究结果证明地球总体上似一个梨形。1849年英国的斯托克斯(G. G. 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,利斯廷(J. B. Listing)首次提出“大地水准面”一词,并用它代替地球形状。1945年,前苏联的莫洛坚斯基(Molodensky)创立了用地面重力测量数据直接研究真实地球自然表面的理论。

在两千五、六百年的时间里,人类对地球形状的认识和测定,经过了圆形、椭圆形、大地水准面、真实地球自然表面的阶段。随着测定成果的愈益精确,精密计算地面点的平面坐标和标高才逐步有了科学依据,同时也不断丰富了测绘学的理论,改进了测量的技术和方法,促进了测绘技术的发展。

除了对地球的认识之外,人类的生产和军事活动也对地图有了需求。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。这些原始地图都是一些示意的模型地图,起着确定位置、辨别方向的作用。中国春秋战国时期的“兆域图”已有了比例尺和抽象符号的概念。公元前3世纪,亚历山大的埃拉托斯尼最先在地图上绘制经纬线。1973年在中国湖南长沙马王堆汉墓中发现的绘在帛上的地图,约为公元前168年作品,该地图已注意到了比例尺和方位,并讲求一定的精度。公元2世纪,古希腊的托勒密(Claudius Ptolemaeus)研制了地图编制方法,并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”之制图原则:分率、准望、道里、高下、方邪、迂直,即地图绘制时的比例尺、方位、距离等原则,使地图制图有了标准,提高了地图的可靠程度。16世纪,地图制图进入了一个新的发展时期。中国明代的罗洪先和荷兰的墨卡托(Gerhardus Mercator)都以编制地图集的形式,分别总结了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,测绘精度大大提高,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》,是首次在广大的国土范围内进行地形图的测绘工作。

20世纪50年代开始,对计算机辅助地图制图(机助制图)进行了原理研究、设备研制、软件设计与开发,到70年代,机助制图已得到广泛应用。进入80年代,利用计算机对地理空间数据进行显示、分析、存储和管理,建立地图数据库,成为多功能的综合性地理信息系统。

测绘学的形成和发展在很大程度上依赖于数学和测绘方法、测绘仪器。17世纪之前,人们使用简单的工具(如中国的绳尺、步弓、矩尺和圭表等)进行测量,且以量测距离为主。17世纪初发明了望远镜。约于1730年,英国的西森(Sisson)制成第一架经纬仪,促进了三角测量的发展。从16世纪中叶开始,为了满足欧、美洲间的航海需要,许多国家相继研究在海洋上测定经纬度的方法,以确定船舰的位置。但直到18世纪时钟的发明,经纬度的测定,尤其经度的测定方法才得以实现,并从此开始了大地天文学的研究。随着测绘仪器的改进和技术方法的革新,测量数据的精确度也不断提高,精确度成为研究的主要方向,此时数学的发展开始对测绘学产生巨大影响。1794年,德国的高斯首创了最小二乘法原理,为计算测量平差奠定了基础,至今仍是测量平差计算的基本原理。19世纪50年代,法国的洛斯塔

(A. Laussedat)首创摄影测量方法。由于航空技术的发展,1915年,自动连续航空摄影机研制成功,可将航摄像片在立体量测仪上加工成地形图,由此形成了航空摄影测量方法。在此期间,先后研制了重力仪和摆仪等,使重力测量工作得到迅猛发展,为研究地球的形状与大小和地球重力场提供了丰富的实地重力测量资料。由此,测绘学的传统理论和方法发展趋于成熟。

从20世纪50年代开始,测绘技术又朝着电子化和自动化方向发展。1948年和1956年研制成功了第一代光电测距仪和微波测距仪,能够直接用来测定远达几十千米的距离,且使距离测量由繁难变为易于操作,因此使得大地测量可以方便地采用精密导线测量和三边测量。随着技术的不断进步,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。1968年已有用电子设备取代经纬仪度盘上按刻划读数的电子经纬仪。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,可直接在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做进一步的处理。20世纪90年代研制出用条码水准尺取代分划水准尺的数字水准仪,使得高差测量工作的精度和效率都有了很大的提高。随着电子计算机技术的发展及其在测绘学中的应用,不仅加快了测量计算速度,而且改变了测绘仪器和测绘方法,使测绘工作更为方便和精确。用计算机控制的摄影测量仪器的出现,促进了解析测图仪的发展,使得航测法成图完全自动化成为可能。20世纪60年代研制成功的由计算机控制的自动绘图仪,实现了地图制图的自动化。

1957年人造地球卫星上天,为测绘技术带来了巨大的变革。卫星定位技术和遥感技术在测绘领域得到广泛应用,形成航天测绘。测绘的对象也由地球扩展到月球及其他星体。随着计算机地图制图和地图数据库的迅猛发展,地图制图已发展到数字制图和动态制图时代,并成为地理信息系统的技术基础。现代工程测量的发展可概括为内外业一体化、自动化、智能化和数字化。其服务领域也远远超出了为工程建设服务的狭隘概念,正向广义工程测量学发展。在海洋测量中,广泛应用先进的激光探测技术、空间定位与导航技术、计算机技术、网络技术、通信技术、数据库管理技术以及图形图像处理技术,实现了海洋测绘的自动化和信息化。测绘学科的新发展使得测绘生产任务由传统纸上地图编制、生产和更新发展到对地理空间数据的采集、处理、组织、管理、分析和显示,传统的数据采集技术已由遥感卫星或数字摄影测量替代。测绘工作正在向着信息采集、数据处理和成果应用的自动化、数字化、网络化、实时化和可视化方向发展,使得测绘生产力得到很大提高。

随着空间科学、信息科学的飞速发展,全球卫星导航与定位系统(GNSS)、遥感(RS)、地理信息系统(GIS)技术及其集成技术(3S技术)已成为当前测绘工作的核心技术。测绘技术体系从模拟转向数字、从地面转向空间、从静态转向动态,并进一步向网络化和智能化方向发展;测绘成果已从三维发展到四维、从静态到动态。航空航天遥感技术的发展,加快了地理信息动态变化监测技术的进步,革新了地理信息获取和更新的手段。网络技术的发展,使得用户能够快速、高效地获取地理信息,推动测绘向普适化方向发展,测绘不再是专业技术人员才可触摸的领域,而是走入了寻常百姓家。

随着新的理论、方法、仪器和技术手段不断涌现及国际测绘学术交流合作日益密切,我

国的测绘事业发展迅速,且必将取得更多、更大的成就。

三、测绘科学技术的地位和作用

测绘科学技术的应用范围非常广阔,它在科学研究、国民经济建设、国防建设以及社会发展等领域,都占有重要的地位,对国家可持续发展发挥着越来越重要的作用。测绘工作常被人们称为建设的尖兵,不论是国民经济建设还是国防建设,其勘测、设计、施工、竣工及运营等阶段都需要测绘工作,而且都要求测绘工作“先行”。

1. 在科学研究中的作用

在科学研究方面,诸如航天技术、地壳形变、地震预报、气象预报、滑坡监测、灾害预测和防治、环境保护、资源调查以及其他科学研究中,都要应用测绘科学技术,需要测绘工作的配合。地理信息科学、智慧城市、数字中国、数字地球的建设,都需要现代测绘科学技术提供基础数据信息。

2. 在国民经济建设中的作用

在国民经济建设方面,测绘信息是国民经济和社会发展规划中最重要的基础信息之一。测绘工作为国土资源开发利用,工程设计和施工,城市建设、工业、农业、交通、水利、林业、通信、地矿等部门的规划和管理提供地形图和测绘资料。土地利用和土壤改良、地籍管理、环境保护、旅游开发等都需要测绘工作,应用测绘工作成果。

3. 在国防建设中的作用

在国防建设方面,测绘工作为打赢现代化战争提供测绘保障。各种国防工程的规划、设计和施工都需要测绘工作,战略部署、战役指挥离不开地形图,现代测绘科学技术对保障远程导弹、人造卫星或航天器的发射及精确入轨起着非常重要的作用,现代军事科学技术与现代测绘科学技术已经紧密结合在一起。

4. 在社会发展中的作用

在国民经济和社会发展的进程中,政府或职能机构不但要了解地理要素的分布特征与资源环境条件,还要进行空间规划布局、掌握空间发展状态和政策的空间效应。但由于现代经济和社会的快速发展与自然关系的复杂性,使人类解决现代经济和社会问题的难度增加。因此,为实现政府管理和决策的科学化、民主化,实现科学发展观,要求提供广泛而通用的地理空间信息平台,测绘数据是这一平台的基础。在此基础上,将大量经济和社会信息加载到这个平台上,形成符合真实世界的空间分布形式,建立科学的空间决策系统,进行空间分析和决策,以及实施电子政务。

当今人类正面临环境日趋恶化、自然灾害频繁、不可再生能源和矿产资源匮乏以及人口膨胀等社会问题。社会、经济迅速发展和自然环境间产生了巨大的矛盾。要解决这些矛盾,维持社会的可持续发展,则必须了解地球的各种现象及其变化和相互关系,采取必要措施约束和规范人类自身的活动,减少或防范全球变化向不利于人类社会方面演变,指导人类合理利用和开发资源,有效地保护和改善环境,积极防治和抵御各种自然灾害,不断改善人类生存和生活环境质量。而在防灾减灾、资源开发和利用、生态建设和环境保护等方面,各种测绘和地理信息可用于规划、方案的制订,灾害、环境监测系统的建立,风险的分析,资源、环境调查与评估、可视化显示以及决策指挥等。

第二节 测量坐标系

一、地球的形状和大小

测量工作的最基本任务是确定地面点的点位坐标(称为测定),或根据点的坐标确定其实地位置(称为测设)。但是,由于地球的形状以及地球的自然表面极其不规则,因此,不能作为测量工作的基准面,而只能作为测量工作的依托面。我们要研究地球的形状和大小,确定测量工作的基准面,并为测量坐标系的建立奠定基础。

1. 大地水准面

地球自然表面上有高山、丘陵、平原、河流、湖泊和海洋。由此看来,地球的自然表面是一个高低起伏、极不规则的曲面。但相对于地球整体而言,这种高低起伏又是可以忽略不计的。地球形状是极其复杂的,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%,因此,测量中把地球形状看作是由静止的海水面向陆地延伸并围绕整个地球所形成的某种形状。

地球表面任一质点,都同时受到两个作用力,其一是地球自转产生的惯性离心力;其二是整个地球质量产生的引力。这两种力的合力称为重力。引力方向指向地球质心。如果地球自转角速度是常数,惯性离心力的方向垂直于地球自转轴向外,重力方向则是两者合力的方向(图 1-1)。重力的作用线又称为铅垂线,用细绳悬挂一个垂球,其静止时所指示的方向即为铅垂线方向。

处于静止状态的水面称为水准面。由物理学知道,这个面是一个重力等位面,水准面与重力方向(铅垂线方向)垂直。在地球表面重力的作用空间,通过任何高度的点都有一个水准面,因而水准面有无数个。其中,把一个假想的、与静止的平均海水面向陆地延伸所形成的封闭曲面称为大地水准面,它所包围的形体称为大地体。

由于地球引力的大小与地球内部的质量有关,而地球内部的质量分布又不均匀,致使地面上各点的铅垂线方向产生不规则的变化,因而大地水准面实际上是一个略有起伏的不规则曲面(图 1-2),人们无法在这个不规则曲面上直接进行测绘和数据处理。

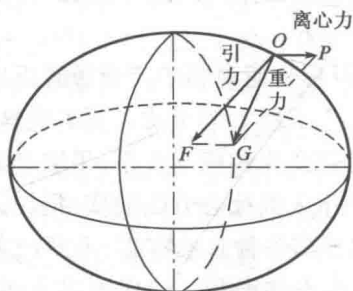


图 1-1 引力、离心力和重力

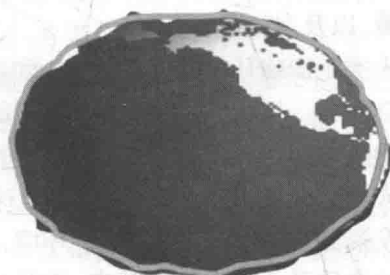


图 1-2 大地水准面

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。

2. 地球椭球体

从力学角度看,地球是一个旋转的均质流体,其平衡状态是一个两极稍扁的旋转椭球体。旋转椭球面是一个规则曲面,可以用数学公式准确地表达。因此,在测量工作中将地球椭球面和与之正交的法线作为测量计算的基准面和基准线。

代表地球形状和大小旋转椭球,称为地球椭球。与大地水准面最接近的地球椭球称为总地球椭球;与某个区域如一个国家大地水准面最为密合的椭球称为参考椭球,其椭球面称为参考椭球面。由此可见,参考椭球有许多个,而总地球椭球只有一个。

地球椭球的形状和大小通常用长半轴 a 和扁率 f 来表示(图 1-3)。扁率的计算公式为:

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

式中: b ——地球椭球的短半轴。

几个世纪以来,许多学者曾分别测算出参考椭球体的参数值,表 1-1 为几次有代表性的测算成果。

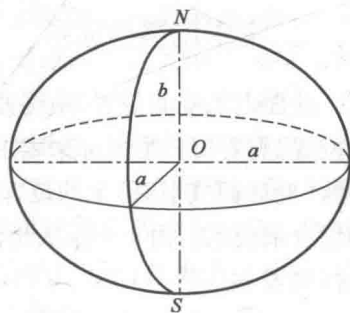


图 1-3 旋转椭球体

地球椭球几何参数

表 1-1

椭球名称	年代	长半轴 a (m)	扁率 f	附注
德兰布尔	1800	6375653	1:334.0	法国
白塞尔	1841	6377397.155	1:299.1528128	德国
克拉克	1880	6378249	1:293.459	英国
海福特	1909	6378388	1:297.0	美国
克拉索夫斯基	1940	6378245	1:298.3	苏联
1975 大地测量参考系统	1975	6378140	1:298.257	IUGG 第 16 届大会推荐值
1980 大地测量参考系统	1979	6378137	1:298.257	IUGG 第 17 届大会推荐值
WGS-84	1984	6378137	1:298.257223563	美国国防部制图局(DMA)

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

鉴于参考椭球体的扁率很小,因此在满足精度要求的前提下,为了便于计算,通常把地球近似地看作圆球体,其曲率半径为 6371km。

3. 参考椭球定位

地球椭球的形状大小确定后,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。确定参考椭球面与大地水准面的相关位置,使参考椭球面在一个国家或地区范围内与大地水准面最佳拟合,称为参考椭球定位。如图 1-4 所示,在地面上选择一个合适的点 P ,过此点的铅垂线与大地水准面交于点 P' 。将椭球面设置

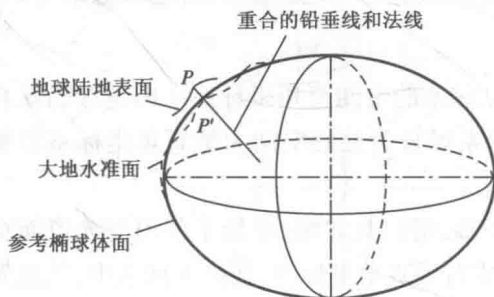


图 1-4 参考椭球定位

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铅垂线重合。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,则椭球面与大地水准面之间能达到最佳拟合,此时的 P 点则称为大地原点。该点是全国各地计算大地坐标的起算点,并非坐标系的原点。

二、常用测量坐标系

地面点的空间位置,最终要借助于点位坐标来描述,因此需要建立坐标系。一个空间点的位置,需要用三维坐标来表示。但在一般测量工作中,通常将地面点的空间位置用其在投影面(椭球面或平面)上的位置和高度表示,即用一个二维坐标系和一个一维坐标系(高程)的组合来表示。由于卫星大地测量的迅速发展,地面点的空间位置也采用三维的空间直角坐标来表示。

1. 大地地理坐标系

大地地理坐标系是以地球椭球的大地起始子午面、大地赤道面和地球椭球面作为基准面建立起来的三维坐标系(图 1-5)。由于地球椭球有总地球椭球和参考椭球之分,所以大地地理坐标系分为地心大地坐标系和参心大地地理坐标系。

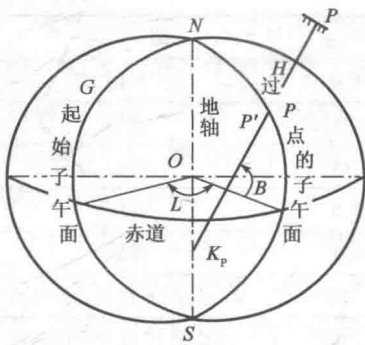


图 1-5 大地坐标系

地面点的空间位置,可用大地地理坐标表示。过某地面点的子午面与起始子午面之间的二面角,称为该点的大地经度,用 L 表示。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。

过该点的椭球面法线与赤道面的夹角,称为该点的纬度,用 B 表示。规定从赤道面起算,由赤道面向北为正,从 $0^\circ \sim 90^\circ$ 称为北纬;由赤道面向南为负,由 $0^\circ \sim 90^\circ$ 称为南纬。

该点沿椭球面法线到椭球面的距离,称为大地高,用 H 表示,从椭球面起算,向外为正,向内为负。

计算某点的大地经度、大地纬度,可用天文观测方法测得 P 点的天文经度、天文纬度,再利用该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 L 、大地纬度 B 。

2. 空间大地直角坐标系

空间大地直角坐标系是以地球椭球为基础建立起来的三维直角坐标系。因地球椭球有总地球椭球和参考椭球之分,故空间大地直角坐标系可分为地心空间大地直角坐标系和参心空间大地直角坐标系。

以椭球体中心 O 为原点,椭球体的旋转轴为 Z 轴,指向其北端,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,构成右手直角坐标系,在该坐标系中,某地面点的位置可用 (x, y, z) 来表示(图 1-6)。地面上同一点的大地地理坐标和空间大地直角坐标之间可以进行坐标转换。