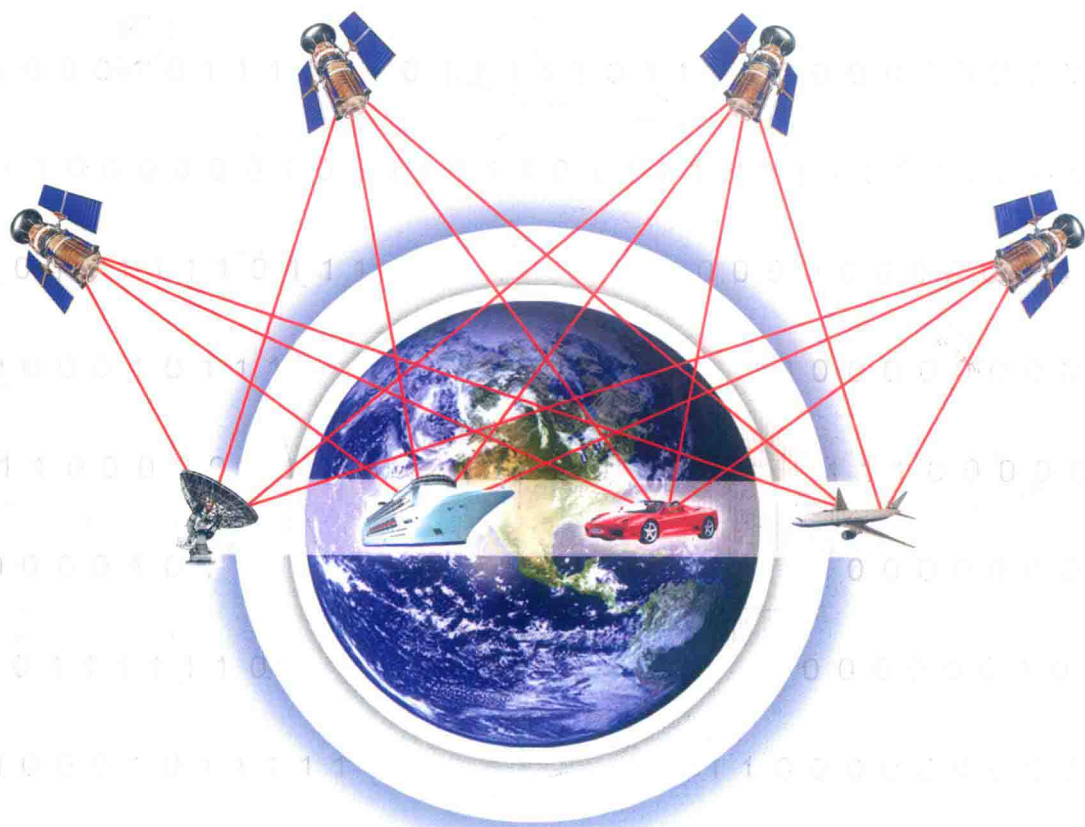


高等学校
测绘工程专业核心课程规划教材

数字地形测量学

(第二版)

潘正风 程效军 成枢 王腾军 翟翊 邹进贵 王崇倡 编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

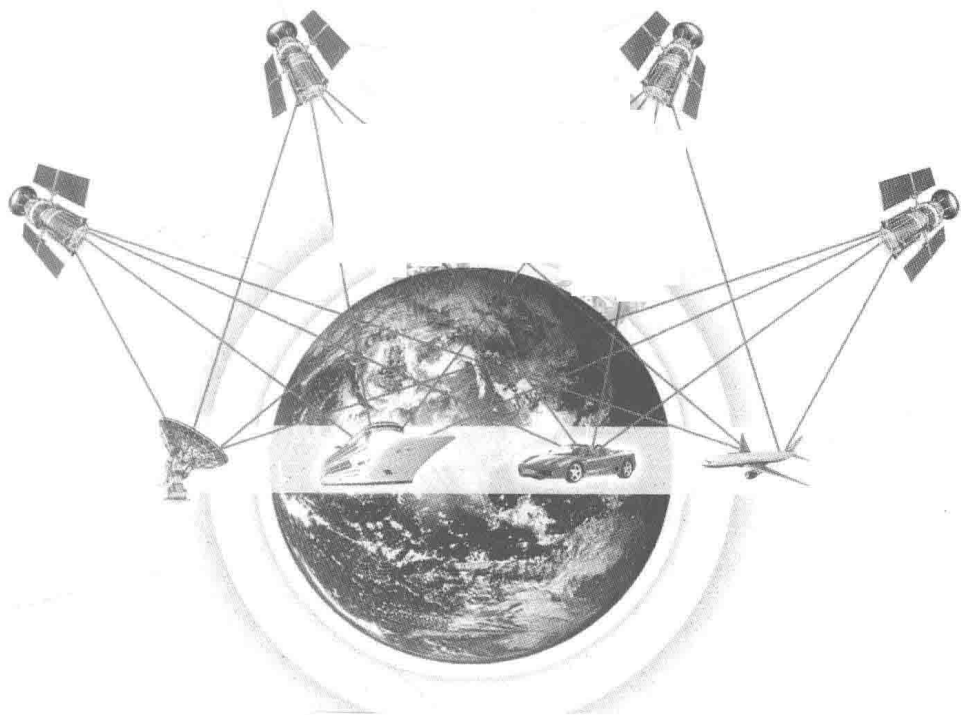
高等学校测绘工程专业核心课程规划教材

武汉大学规划核心教材

数字地形测量学

(第二版)

潘正风 程效军 成枢 王腾军 翟翊 邹进贵 王崇倡 编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

数字地形测量学/潘正风等编著. —2 版.—武汉:武汉大学出版社,
2019.8

高等学校测绘工程专业核心课程规划教材

ISBN 978-7-307-21009-7

I.数… II.潘… III. 数字技术—应用—地形测量学—高等学校
—教材 IV.P21-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 126207 号

本书中图 2-12《我国 1:100 万比例尺地形图的分幅编号示意图》的审
图号为 GS(2019)4312 号;图 5-10《国家一等水准网布设示意图》的审图号
为 GS(2019)4312 号。

责任编辑:鲍 玲

责任校对:李孟潇

版式设计:马 佳

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮箱:cbs22@whu.edu.cn 网址:www.wdp.com.cn)

印刷:湖北民政印刷厂

开本:787×1092 1/16 印张:22.25 字数:541 千字 插页:1

版次:2015 年 7 月第 1 版 2019 年 8 月第 2 版

2019 年 8 月第 2 版第 1 次印刷

ISBN 978-7-307-21009-7 定价:46.00 元

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

高等学校测绘工程专业核心课程规划教材
编审委员会

主任委员

武汉大学

副主任委员

解放军信息工程大学

武汉大学

同济大学

委员

武汉大学

解放军信息工程大学

武汉大学

同济大学

中国矿业大学

海军大连舰艇学院

山东建筑大学

河海大学

辽宁工程技术大学

西南交通大学

长安大学

中南大学

合肥工业大学

北京建筑大学

河南理工大学

武汉大学出版社

序

根据《教育部财政部关于实施“高等学校本科教学质量与教学改革工程”的意见》中“专业结构调整与专业认证”项目的安排，教育部高教司委托有关科类教学指导委员会开展了各专业参考规范的研制工作。我们测绘学科教学指导委员会受委托研制测绘工程专业参考规范。

专业规范是国家教学质量标准的一种表现形式，也是国家对本科教学质量的最低要求，它规定了本科学生应该学习的基本理论、基本知识、基本技能。为此，测绘学科教学指导委员会从2007年开始，组织12所有测绘工程专业的高校建立了专门的课题组开展“测绘工程专业规范及基础课程教学基本要求”的研制工作。课题组首先根据教育部开展专业规范研制工作的基本要求和当代测绘学科正向信息化测绘与地理空间信息学跨越式发展的趋势以及经济社会的需求，综合各高校测绘工程专业的办学特点，确定了专业规范的基本内容，并落实由武汉大学测绘学院组织教师对专业规范进行细化，形成初稿。然后多次提交给教指委全体委员会、各高校测绘学院院长论坛以及相关行业代表广泛征求意见，最后定稿。测绘工程专业规范对专业的培养目标和规格、专业教育内容和课程体系设置、专业的教学条件进行了详细的论述，并提出了基本要求。与此同时，测绘学科教学指导委员会以专业规范研制工作作为推动教学内容和课程体系改革的切入点，在测绘工程专业规范定稿的基础上，对测绘工程专业9门核心专业基础课程和8门专业课程的教材进行规划，并确定为“教育部高等学校测绘学科教学指导委员会规划教材”。目的是科学统一规划，整合优秀教学资源，避免重复建设。

2009年，教指委成立“测绘学科专业规范核心课程规划教材编审委员会”，制订《测绘学科专业规范核心课程规划教材建设实施办法》，组织遴选“高等学校测绘工程专业核心课程规划教材”主编单位和人员，审定规划教材的编写大纲和编写计划。教材的编写过程实行主编负责制。对主编要求至少讲授该课程5年以上，并具备一定的科研能力和教材编写经验，原则上要具有教授职称。教材的内容除要求符合“测绘工程专业规范”对人才培养的基本要求外，还要充分体现测绘学科的新发展、新技术、新要求，要考虑学科之间的交叉与融合，减少陈旧的内容。根据课程的教学需要，适当增加实践教学内容。经过一年的认真研讨和交流，最终确定了这17本教材的基本教学内容和编写大纲。

为保证教材的顺利出版和出版质量，测绘学科教学指导委员会委托武汉大学出版社全权负责本次规划教材的出版和发行，使用统一的丛书名、封面和版式设计。武汉大学出版社对教材编写与评审工作提供了必要的经费资助，对本次规划教材实行选题优先的原则，并根据教学需要在出版周期及出版质量上予以保证。广州中海达卫星导航技术股份有限公司对教材的出版给予了一定的支持。

目前，“高等学校测绘工程专业核心课程规划教材”编写工作已经陆续完成，经审查

合格将由武汉大学出版社相继出版。相信这批教材的出版应用必将提升我国测绘工程专业的整体教学质量，极大地满足测绘本科专业人才培养的实际要求，为各高校培养测绘领域创新性基础理论研究和专业化工程技术人才奠定坚实的基础。

宁伟生

二〇一二年五月十八日

前 言

本书是根据教育部高等学校测绘类专业教学指导委员会关于测绘工程专业系列基础教材计划，为测绘工程专业本科生编写的教材。

“数字地形测量学”是测绘工程专业的专业基础课，也是专业核心课程之一。本书是按照我国测绘工作的实际情况，对原《测量学》的内容进行提炼精化，并结合“大比例尺数字测图”和“控制测量学”的部分内容编写而成的。本书内容着重于基本概念、基本理论、基本知识和基本技能。

当前，数字地形测量技术迅速发展，广泛应用于测绘生产中，地形测量已从模拟测图转变为数字测图。本书的内容不仅反映了现代测绘科学技术向数字化、自动化、智能化、信息化方向发展的趋势，也满足了当前测绘工程专业教学改革的需要。全书以大比例尺数字地形测量为主线，在阐述地形测量基本原理和理论以及测量方法的基础上，不仅对数字地形测量的原理与方法作了全面介绍，还介绍了地籍图和房产图、地下管线图测绘等内容。

本书是在《数字地形测量学》(第一版，武汉大学出版社)的基础上进行编写的，在内容和章节方面作了修改。参加本教材修订的有：武汉大学潘正风、邹进贵(绪论、第6章)，同济大学程效军(第3章、第8章)，山东科技大学成枢(第4章)，长安大学王腾军(第5章)，中国人民解放军战略支援部队信息工程大学翟翊(第1章、第2章)，辽宁工程技术大学王崇倡(第7章)。全书由潘正风负责统稿工作。

《数字测图原理与方法》第一版的编写人员有：潘正风、杨正尧、程效军、成枢、王腾军等；第二版的编写人员有：潘正风、程效军、成枢、王腾军、宋伟东、邹进贵等。《数字地形测量学》第一版的编写人员有：潘正风、程效军、成枢、王腾军、翟翊、邹进贵、王崇倡等。

最后，感谢教育部高等学校测绘类专业教学指导委员会的组织与指导；感谢武汉大学、同济大学、山东科技大学、长安大学、辽宁工程技术大学和中国人民解放军战略支援部队信息工程大学的大力支持；感谢武汉大学出版社所做的辛勤工作。本书的编写得到武汉大学教材建设专项基金资助。

由于水平有限，书中不妥和不足之处，恳请读者批评指正。

编 者

2019年2月于武汉

目 录

绪论	1
0.1 地形测量学的内容	1
0.2 地形测量的发展概况	2
第1章 测量坐标系和高程以及定位方法	4
1.1 地球椭球体和测量坐标系	4
1.2 地图投影和高斯平面直角坐标系	11
1.3 高程系统和高程基准	18
1.4 方位角	21
1.5 用水平面代替水准面的限度	23
1.6 点的定位方法	24
第2章 地形图基本知识	29
2.1 地形图的内容	29
2.2 地物符号	35
2.3 地貌与等高线	38
2.4 地形图的分幅与编号	40
第3章 测量误差基本知识	48
3.1 观测误差的分类和衡量观测精度的指标	48
3.2 算术平均值及观测值的中误差	54
3.3 误差传播定律	57
3.4 加权平均值及其精度评定	61
3.5 间接平差原理	64
第4章 测量基本方法和使用的仪器	70
4.1 水准测量方法与水准仪	70
4.2 水准测量的误差分析和水准仪的检验校正	88
4.3 角度测量方法和经纬仪	95
4.4 距离测量方法和光电测距仪	110
4.5 水平角测量误差和光电测距误差	122
4.6 全站仪测量和全站仪的检验	132

4.7 三角高程测量	142
4.8 卫星定位系统	148
第5章 控制测量	166
5.1 概述	166
5.2 导线测量及精度分析	175
5.3 三角形网与交会法平面控制测量	189
5.4 卫星定位平面控制测量	199
5.5 水准高程控制测量	204
5.6 电磁波测距高程导线和卫星定位高程测量	217
5.7 跨河高程测量	221
第6章 大比例尺数字地形图成图基础及其测绘	229
6.1 大比例尺地形图测量方法	229
6.2 图形的计算机显示	232
6.3 地物符号和等高线的自动绘制	236
6.4 栅格数据和数字图像概念	247
6.5 地形图的野外测量	251
6.6 地形图的内业成图和检查验收	266
6.7 数字航空摄影地形图测绘	271
6.8 无人机倾斜摄影测量技术	279
6.9 三维激光扫描测绘技术	282
第7章 大比例尺地形图的应用	290
7.1 地形图的基本量算和工程应用	290
7.2 数字高程模型的建立与应用	300
7.3 数字高程模型的可视化	306
7.4 城市基础地理信息系统	310
第8章 大比例尺专题图测绘	315
8.1 概述	315
8.2 地籍图测绘	317
8.3 房产图测绘	328
8.4 地下管线图测绘	339
参考文献	348

绪 论

0.1 地形测量学的内容

测绘学是研究测定和推算地面点的几何位置、地球形状及地球重力场,据此测量地球表面自然形态和人工设施的几何分布,并结合某些社会信息和自然信息的分布状况,编制全球和局部地区各种比例尺的地图和专题地图的理论和技术的学科。从测绘学的定义可知,地形测量学是测绘学研究的重要内容。

地形测量学是测绘工程专业的专业基础课。地形测量学讲述如何将地球表面局部地区的地物、地貌测绘成地形图(包括平面图)的理论、技术和方法。地形测量,是对地球表面的地物、地貌在水平面上的投影位置和高程进行测定,并按一定比例缩小,用符号和注记绘制成地形图的工作。地形测量学在教科书名称中有的称为测量学或普通测量学。

地形测量特别是大比例尺地形测量只是在地球表面一个小区内进行测绘工作,在确定平面位置时可以把这块地球表面看作平面而不顾及地球曲率的影响。

地形测量包括控制测量和碎部测量。地形测量学的主要内容有:根据国家大地控制网,建立测图控制网,测定一定数量的平面和高程控制点,计算控制点的平面坐标和高程,供碎部测量使用;在控制测量的基础上,利用各种测量方法测定各种地物、地貌特征点的平面位置和高程,确定地形要素的名称、数量和质量特征,用地形符号绘制各种比例尺地形图;利用地形图进行量算和空间分析,为工程建设规划设计提供资料;应用测量误差理论分析测量误差来源和积累,建立测量质量检查和验收体系;掌握地形测量所使用的测量仪器(目前有水准仪、全站仪、全球导航卫星系统接收机等)的原理、操作和维护。

碎部测量有两种基本方法:地面测绘地形图方法和航空摄影测量测绘地形图方法。20世纪80年代前,地面测绘地形图方法有平板仪测图法、经纬仪测图法等。航空摄影测量测绘地形图采用模拟法和解析法摄影测量。随着科学技术的发展,数字化测图方法取代了原来的图解测图方法。目前,主要采用地面数字测图方法和数字摄影测量方法测绘地形图。本教材主要介绍大比例尺数字地形测量地面测绘的理论、方法、技术和应用。

地形测量对国民经济的发展和国防建设有重要作用,因此被认为是经济建设和国防建设的基础工程,地形图是基本的空间地理信息。在国民经济和社会发展规划中地形测量信息是重要的基础信息,各种规划及地籍管理首先要有地形图和地籍图。在国防建设中,地形图是战略部署的重要资料之一,是现代大规模诸兵种协同作战的重要保障。

地形测量学是测绘工程专业中重要的课程之一,在专业课程设置里占据着重要地位,在测绘工程专业教学中起着基础作用,同时也为测绘工程专业的深入学习和研究起到了奠基的作用。

0.2 地形测量的发展概况

传统的地形测量是利用测量仪器对地球表面局部区域内的各种地物、地貌特征点的空间位置进行测定,以一定的比例尺并按图示符号绘制在图纸上,即通常所称的白纸测图。这种测图方法的实质是图解法测图,在测图过程中,点位的精度由于刺点、绘图、图纸伸缩变形等因素的影响会大大降低,而且工序多、劳动强度大、质量管理难。在当今的信息时代,纸质地形图已呈现出承载图形信息有限,更新极不方便等缺点,难以满足信息时代经济建设的需要。

随着科学技术的进步和计算机技术的迅猛发展及其向各个领域的渗透,以及电子全站仪、GPS RTK 技术等先进测量仪器和技术的广泛应用,地形测量逐渐向自动化和数字化方向发展,数字化测图技术应运而生。与图解法测图相比,数字测图以其特有的自动化、全数字化、高精度的显著优势而具有无限广阔的发展前景。

数字测图实质上是一种全解析机助测图方法,在地形测量发展过程中这是一种根本性的技术变革。这种变革主要表现在:图解法测图的最终成果是地形图,图纸是地形信息的唯一载体;数字测图地形信息的载体是计算机的存储介质(磁盘或光盘),其提交的成果是可供计算机处理、远距离传输、多方共享的数字地形图数据文件,通过数控绘图仪可输出地形图。另外,利用数字地形图可生成电子地图和数字地面模型(DTM)。更具深远意义的是,数字地形信息作为地理空间数据的基本信息之一,已成为地理信息系统(GIS)的重要组成部分。

广义的数字测图包括:利用全站仪或其他测量仪器进行野外数字化测图;利用数字化仪对纸质地形图的数字化;以及利用航摄、遥感像片进行数字化测图等方法。利用上述方法将采集到的地形数据传输到计算机,由数字成图软件进行数据处理,经过编辑、图形处理,生成数字地形图。

数字化成图是从制图自动化发展而来的。20 世纪 50 年代美国国防制图局开始研究制图自动化问题,这一研究同时推动了制图自动化配套设备的研制与开发。20 世纪 70 年代初,制图自动化已形成规模生产,在美国、加拿大及欧洲各国相关重要部门都建立了自动制图系统。当时的自动制图主要包括:数字化仪、扫描仪、计算机及显示系统四个部分。其成图过程是:将地形图数字化,再由绘图仪在透明塑料片上回放出地形图,并与原始地形图叠置以修正错误。

20 世纪 80 年代,摄影测量在经历了模拟法、解析法之后发展为数字摄影测量。数字摄影测量是把摄影所获得的影像进行数字化或直接获得数字化影像,由计算机进行数字处理,从而生成数字地形图或专题图、数字地面模型等各种数字化产品。

大比例尺地面数字测图是在 20 世纪 70 年代电子速测仪问世后发展起来的,80 年代初全站型电子速测仪的迅猛发展加速了数字测图的研究和应用。我国从 1983 年开始开展数字测图的研究工作。目前,数字测图技术已取代了传统的图解法测图成为主要的成图方法。全站仪地面数字测图是利用全站仪配合便携式计算机、掌上电脑,或直接利用全站仪内存进行外业数据采集,内业将数据输入计算机经人机交互编辑,最终生成数字地形图,由绘图仪绘制地形图或将数字地形图保存于地图数据库之中。

20 世纪 90 年代出现的载波相位差分技术, 又称实时动态定位技术 (Real Time Kinematic, RTK), 这种测量模式是位于基准站(已知的基准点)的 GPS 接收机通过数据链将其观测值及站坐标信息一起发给流动站的 GPS 接收机, 流动站不仅接收来自参考站的数据, 还直接接收 GPS 卫星发射的观测数据组成相位差分观测值, 进行实时处理, 能够实时提供测点在指定坐标系的三维坐标成果, 在 20 km 测程内可达到厘米级的测量精度。实时差分观测时间短, 并能实时给出定位坐标。随着 RTK 技术的不断完善和更轻小型、价格更低廉的 RTK 模式 GPS 接收机的出现, GPS 数字测图系统将在开阔地区成为地面数字测图的主要方法。

三维激光扫描技术的发展, 突破了传统的单点测量方法, 具有高效率、高精度的独特优势。三维激光扫描仪可以快速扫描被测物体, 不需反射棱镜即可直接获得高精度的扫描点云数据, 因此可以用于获取高精度高分辨率的数字地形模型。三维激光扫描技术在测绘行业方面的应用主要包括地形测绘、建筑测绘、道路测绘、矿山测绘、文物数字化保护、数字城市地形可视化等领域。

近几年以来发展起来的无人机倾斜摄影测量技术, 改变了只能从垂直方向进行拍摄的限制, 倾斜摄影测量技术利用多台传感器从不同的角度进行数据采集, 高效快速地获取海量的数据信息, 真实可靠地反映地面的客观情况, 满足了人们对三维信息的需要。倾斜摄影测量技术已经逐渐应用到生产实践过程中, 主要在三维建模和多样的工程测量中得到广泛使用。

第 1 章 测量坐标系和高程以及定位方法

1.1 地球椭球体和测量坐标系

一、地球椭球体

地球的自然表面是不规则的，有高山、丘陵和平原，有江河、湖泊和海洋。通过长期的科学调查和测绘实践，人们发现地球表面海洋面积约占 71%，陆地面积约占 29%。地球表面最高点是海拔为 8 844.43m 的珠穆朗玛峰，最低点是位于海拔 -11 022m 的马里亚纳海沟。但这样的高低起伏相对于地球庞大的体积来说仍然是微不足道的，就其总体形状而言，地球是一个接近于两极扁平、沿赤道略为隆起的“椭球体”。

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被海水包围的球体，即把地球看作处于静止状态的海水向陆地内部延伸形成的封闭曲面。地球表面任一质点都同时受到两个作用力：一是地球自转产生的惯性离心力；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（如图 1-1）。重力的作用线又称为铅垂线。用细绳悬挂的垂球，其静止时所指的方向即为铅垂线方向。

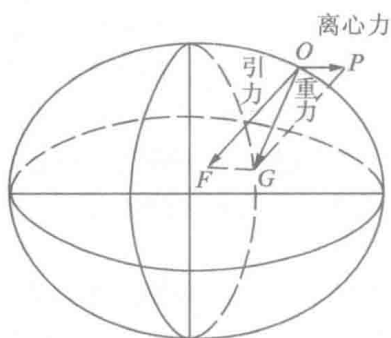


图 1-1 引力、离心力和重力

处于静止平衡状态的液体表面通常称为水准面，由静止的海水面延伸形成的封闭曲面也是一个水准面。由于海水有潮汐潮落，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。因此，处处与铅垂线方向正交的大地水准面是一个略有起伏的不规则曲面，如图 1-2 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。野外测量的仪器就是以水准面和铅垂线为基准来进行整置的。

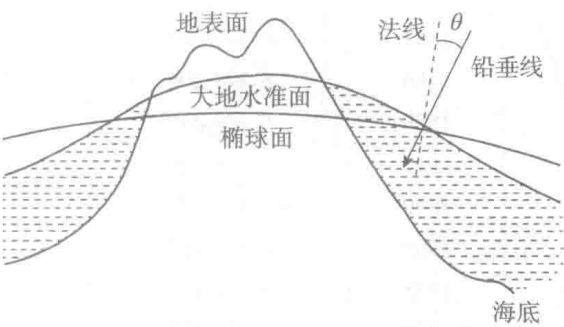


图 1-2 大地水准面

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处理将是十分困难的。为了解决大地水准面不能作为计算基准面的矛盾，人们要选择既能用数学公式表示、又非常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，人们把这个代表地球形状和大小的旋转椭球体，称为地球椭球体。如图 1-3 所示。

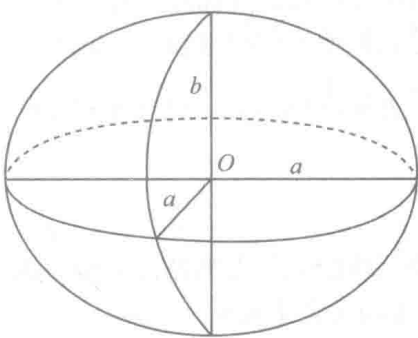


图 1-3 地球椭球体

地球椭球体的大小由长半径 a 、短半径 b 或扁率 f 来确定，称为地球椭球体元素：

$$f = \frac{a - b}{a}$$

地球椭球体元素值是通过大量的测量成果推算出来的。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 1-1 摘录了几种地球椭球元素的数值。

表 1-1

地球椭球元素值

参考椭球名称	年代	长半径 a (m)	扁率 f
白塞尔	1841	6 377 397	1/299. 15
克拉克	1866	6 378 206	1/295. 0
克拉克	1880	6 378 249	1/293. 46
海福特	1910	6 378 388	1/297. 0
克拉索夫斯基	1940	6 378 245	1/298. 3
凡氏	1965	6 378 169	1/298. 25
IUGG 十六届大会推荐值	1975	6 378 140	1/298. 257
IUGG 十七届大会推荐值	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，还需进一步确定地球椭球与大地体的相关位置，这样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，其方法是首先使参考椭球体的中心与大地体的中心重合，并在一个国家或地区范围内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。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。

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：

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

二、测量坐标系

地面点的空间位置可以用三维的空间直角坐标表示，也可以用一个二维坐标系(椭球面坐标或平面直角坐标)和高程的组合来表示。

1. 常用坐标系的定义
- (1) 大地坐标系
- 大地坐标系是椭球面坐标，它的基准面是参考椭球面，基准线是法线。
- 如图 1-4 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平均天文台的子午

面称为大地首子午面或起始大地子午面，它与参考椭球面的交线称为首子午线或起始子午线(1884 年国际经度会议决定，以通过英国伦敦格林尼治天文台艾黎仪器中心的经线为起始子午线，全球经度以它为零点。1953 年，格林尼治天文台迁移到东经 $0^{\circ}00'25''$ 的地方。目前，全球经度零点以由全球 48 个天文台共同确定的格林尼治平均天文台为准而确定)。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。

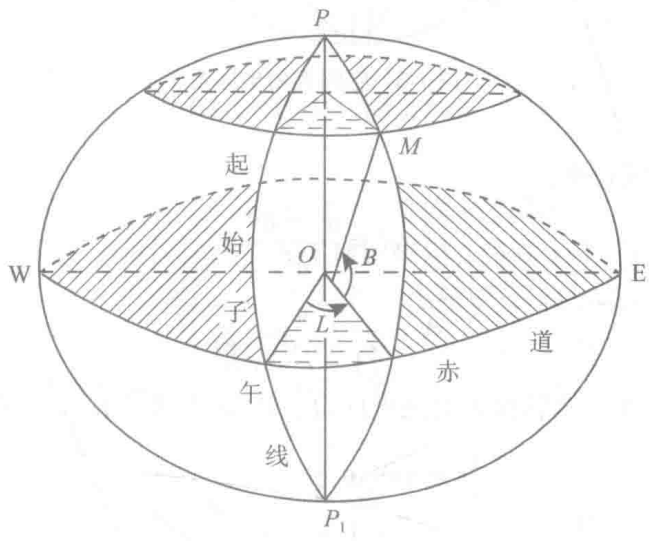


图 1-4 大地坐标

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 点的大地子午面与大地起始子午面之间的夹角。由大地起始子午面向东量称为东经，向西量称为西经，其取值范围各为 $0^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 。

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° 至 90° 。

M 点沿法线至参考椭球面的距离称为大地高 H ，图 1-4 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。

(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，构成右手直角坐标系 $O-XYZ$ ，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，如图 1-5 所示。

地面上同一点的大地坐标 $(L、B)$ 及大地高 H 和空间直角坐标 $(X、Y、Z)$ 之间可以进行坐标转换：

$$\begin{cases} X = (N + H) \cos B \cos L \\ Y = (N + H) \cos B \sin L \\ Z = [N(1 - e^2) + H] \sin B \end{cases} \quad (1-1)$$

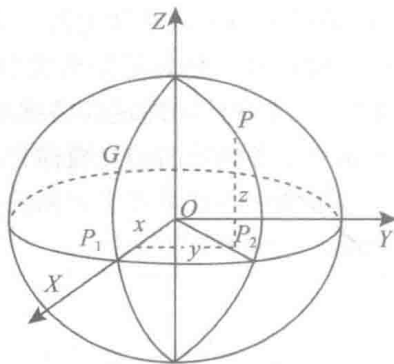


图 1-5 空间直角坐标系

式中： e 为第一偏心率，

$$e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2}$$

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}}$$

由空间直角坐标 (X, Y, Z) 转换为大地坐标 (L, B) 和大地高 H ，可采用下式：

$$\begin{cases} L = \arctan \frac{Y}{X} \\ B = \arctan \frac{Z + Ne^2 \sin B}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \\ H = \frac{\sqrt{X^2 + Y^2}}{\cos B} - N \end{cases} \quad (1-2)$$

用式(1-2)计算大地纬度 B 时，通常采用迭代法。

迭代方法是：首先取 $\tan B_1 = \frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}}$ ，用 B 的初值 B_1 按式(1-2)计算 N 的初值，令其为 N_1 ，然后将 N_1 和 B_1 代入式(1-2)计算 B_2 ，再利用求得的 B_2 按(1-2)计算 N_2 ，如此迭代，直至最后两次 B 值之差小于允许值为止。

(3) 平面直角坐标系

在测量工作中，仅采用大地坐标和空间直角坐标表示地面点的位置在有些情况下不是很方便，例如，工程建设规划、设计是在平面上进行的，需要将点的位置和地面图形表示在平面上，而采用平面直角坐标系对于测量计算则十分方便。

测量中采用的平面直角坐标系有：高斯平面直角坐标系、独立平面直角坐标系以及建筑施工坐标系。

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计算公式，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与解析几何中所用的平面直角坐