

高等学校测绘类本科教材

大地测量学

鲍建宽 李秀海 朱继文 黑志坚 编著



哈尔滨地图出版社

高等学校测绘类本科教材

大地测量学

DADI CELIANGXUE

鲍建宽 李秀海 朱继文 黑志坚 编著

曲建光 主审

哈尔滨地图出版社

• 哈尔滨 •

图书在版编目(CIP)数据

大地测量学/鲍建宽等编著. —哈尔滨: 哈尔滨地图出版社, 2008.12

ISBN 978-7-80717-973-3

I. 大… II. 鲍… III. 大地测量学—高等学校—教材
IV.P22

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 201240 号

哈尔滨地图出版社出版发行

(地址: 哈尔滨市南岗区测绘路 2 号 邮编: 150086)

哈尔滨翰翔印务有限公司印刷

开本: 787 mm×1 092 mm 1/16 印张: 23.75 字数: 576 千字

ISBN 978-7-80717-973-3

2008 年 12 月第 1 版 2008 年 12 月第 1 次印刷

印数: 1~1 000 定价: 35.80 元

前 言

按照黑龙江工程学院重点课程建设规划的要求,根据黑龙江工程学院测绘工程专业现行教学大纲和教学计划,结合我国大地测量理论和实践的发展状况以及大地测量学课程的特点,专门为测绘工程专业本科学生编写本教材,也可作为相关专业本科教学用书。由于本教材删减了各章节有关公式繁琐的数学推演过程,注重基本原理、基本理论与基本方法的阐述与应用,因此,也可以作为测绘工程专业专科教材之用,以及从事测绘和相关专业的科技人员参考使用。

全书共分十七章,五个部分:第一部分为大地控制网的布设,主要介绍平面控制网和高程控制网的布设原理与方法;第二部分为大地测量的外业观测,结合大地测量仪器(精密经纬仪、精密水准仪、精密电磁波测距仪、全站仪、GPS 接收机),介绍仪器的构造原理、使用方法、外业观测的技术要求;第三部分为大地测量的基础理论,内容包括地球椭球及椭球面上的测量计算、高斯投影与高斯平面直角坐标系、各类坐标系统之间的坐标转换、大地坐标系建立的方法和高程系统的建立方法等;第四部分为大地测量的数据处理,内容为控制网的概算与平差;第五部分为大地测量的新技术及展望,主要介绍了现今测绘前沿技术的研究和应用情况。

本书的第1章、第8章和第17章由朱继文执笔;第2章、第3章、第4章、第5章、第14章和第15章由李秀海执笔;第6章、第7章、第9章、第10章、第12章、第13章由鲍建宽执笔;第11章和第16章由黑志坚执笔。全书由鲍建宽统筹定稿。

本书由曲建光教授主审。

对书中可能存在的错误和不足之处,恳请读者予以指正。

编 者

2008年11月

目 录

第1章 绪论.....	1
1.1 概述.....	1
1.2 地球形体及大地测量的基准面和基准线	4
1.3 大地测量学的发展简史	7
第2章 平面大地控制网的布设	10
2.1 平面控制网的布设原理与布设方法	10
2.2 国家平面控制网的布设原则及方案	12
2.3 工程平面控制网的布设原则和方案	19
2.4 平面控制网的技术设计	21
2.5 平面控制网精度估算	24
2.6 工程平面控制网优化设计概述	32
2.7 控制网的选点、造标与埋石	37
第3章 高程控制网的布设	43
3.1 国家高程基准	43
3.2 国家高程控制网的布设	44
3.3 工程高程控制网的布设	46
第4章 精密经纬仪与角度观测	49
4.1 经纬仪的基本结构	49
4.2 精密光学经纬仪的构造特点	50
4.3 经纬仪三轴误差和机械传动误差	59
4.4 精密光学经纬仪检验	65
4.5 精密电子经纬仪的测角原理	72
4.6 精密测角的误差来源与一般规定	77
4.7 精密测角的施测方法	82
4.8 水平角的偏心观测与归心改正	84
4.9 垂直角的观测方法	89
第5章 精密电磁波测距仪与距离施测	93
5.1 电磁波测距仪的基本原理与分类	93
5.2 脉冲式测距仪的基本原理	94
5.3 相位式测距仪测距的基本原理	96
5.4 电磁波测距成果的改正计算	102
5.5 电磁波测距误差来源及精度估计	107
5.6 电磁波测距仪的检验	108
第6章 精密水准仪与水准测量	115

6.1	光学精密水准仪与水准尺	115
6.2	自动安平精密水准仪	122
6.3	电子精密水准仪	128
6.4	光学精密水准仪与水准尺的检验	134
6.5	精密水准测量的误差来源及其影响	141
6.6	精密水准测量的实施	146
6.7	三角高程测量	150
6.8	GPS 测量测定正常高简介	156
第 7 章	精密全站仪与导线测量	164
7.1	全站仪的构造特点	164
7.2	全站仪的功能与使用	167
7.3	精密导线测量	174
第 8 章	GPS 与定位测量	184
8.1	卫星导航系统的基本概念	184
8.2	卫星导航定位系统介绍	185
8.3	GPS 信号结构和 GPS 接收机	191
8.4	GPS 定位原理	194
第 9 章	地球椭球与椭球面上的测量计算	209
9.1	地球椭球几何参数定义及其互相关系	209
9.2	大地测量坐标系及其相互关系	211
9.3	椭球面上的各种曲率半径	216
9.4	椭球面上的弧长计算	220
9.5	相对法截线与大地线	224
9.6	将地面上的观测值归化至椭球面上的计算	227
9.7	椭球面上三角形的解算	231
9.8	大地测量主题解算的方法概述	233
第 10 章	高斯投影与高斯平面坐标系	236
10.1	地图数学投影概述	236
10.2	高斯投影与高斯平面坐标系概述	241
10.3	正形投影的一般条件	245
10.4	高斯投影坐标正反算的方法	248
10.5	将椭球面上的观测值归化至高斯平面上的计算	257
10.6	高斯投影的邻带坐标换算	265
10.7	工程测量投影面与投影带的选择	269
10.8	通用横轴墨卡托投影 (UTM) 和高斯投影族的概念	271
第 11 章	坐标转换	275
11.1	天文坐标与大地坐标之间的换算	275
11.2	站心坐标与地心直角坐标之间的转换	277

11.3	不同空间直角坐标系坐标转换	279
11.4	不同大地坐标系的坐标换算	287
11.5	不同平面直角坐标系之间的转换	290
第12章	大地坐标系的建立	294
12.1	概述	294
12.2	椭球定位的基本原理	295
12.3	椭球定位的数学模型	299
12.4	我国大地坐标系简介	301
第13章	高程系统	309
13.1	水准面的不平行性	309
13.2	正高高程系统	310
13.3	正常高高程系统	314
13.4	力高高程系统	317
13.5	大地高	318
13.6	地球位数	318
第14章	平面控制网的概算	320
14.1	概述	320
14.2	导线网概算的内容与计算方法	320
第15章	高程控制网的概算	327
15.1	概算的内容与计算方法	327
15.2	概算举例	330
第16章	控制网平差计算	333
16.1	控制网平差的数学模型及其解算公式	333
16.2	高程控制网平差	335
16.3	平面控制网平差	336
16.4	GPS网平差	337
第17章	大地测量的新技术概况	351
17.1	概述	351
17.2	卫星测高技术	354
17.3	卫星重力测量技术	361
17.4	GPS无线电掩星技术	366
参考文献		371

第 1 章 绪 论

1.1 概述

1.1.1 大地测量学的定义

大地测量学是一门古老而年轻的科学。它属于地球科学中的一个分支，是伴随着相关学科的发展而发展的，而且是发展得最活跃，最具有重要地位的一个分支。它的主要任务是测量和描绘地球并监测其变化，为人类活动提供关于地球的空间信息。因此，从本质上讲，它是一门地球信息学科，既是基础学科，又是应用学科。

经典大地测量学是把地球假设为刚体不变，均匀旋转的球体或椭球体，并在一定范围内测绘地球和研究其形状、大小及外部重力场。在这方面，经典大地测量学在理论和技术上均取得了巨大的成就，奠定了几何大地测量及物理大地测量的理论基础和实用方法，为人类社会经济发展作出了重大贡献。但从辩证唯物论的观点来看，这些都还有受时代影响的局限性，还不够完全和完善。因为无论是地球表面及外部空间，还是地球内部构造及演化，都在每时每刻地运动着和发展变化着。这种运动和变化不仅在地区和局域性范围内发生着，而且还在洲际乃至全球范围内进行着。其积累和突变将给人类赖以生存的环境空间带来巨大的影响，甚至直接涉及社会和人类生存的安危。显然，经典大地测量技术很不适应监测地球这种动态变化的要求。直到近 30 年来，以人造地球卫星及其他空间探测器为代表的先进的空间测绘技术的发展及应用，才把传统的大地测量学推进到以空间大地测量为主要标志的现代大地测量学的新时期。现代大地测量学在许多方面发挥着重大作用。

1.1.2 大地测量学的分类

很久以来，人们把测量学划分为两个分支：测量学和大地测量学。测量学研究范围是不大的地球表面，以至于在这个范围内把地球表面认为是平面且不损害测量精度，计算时也认为在该范围内的铅垂线彼此是平行的。大地测量学是研究全球或相当大范围内的地球表面，在该范围内，铅垂线被认为彼此不平行，同时必须顾及地球的形状及重力场。之所以顾及地球重力场是因为地球重力对研究地球形状，对高精度测量及其数据处理都起到不可忽略的重要作用。

常规大地测量学经过不断发展和完善，已形成了完整的体系。主要包括：以研究建立国家大地测量控制网为中心内容的应用大地测量学；以研究坐标系建立、地球椭球性质以及投影数学变换为主要内容的椭球大地测量学；以研究测量天文经度、纬度及天文方位角为中心内容的大地天文测量学；以研究重力场及重力测量方法为中心内容的大地重力测量学；以研究大地测量控制网平差计算为主要内容的测量平差等。

大地测量学的发展还与一系列相关学科的发展有着密切的关系。特别是电子学和空间科学的发展，电子计算机、人造地球卫星以及声纳等先进科学技术的出现，使得大地测量

学同其他学科相结合出现了许多新的研究方向和分支,极大地发展和丰富了常规大地测量的内容和体系。比如,大地测量学同无线电电子学相结合产生了电磁波测距大地测量学;与天体力学及天文学结合产生了宇宙大地测量学,其中包括月球及行星大地测量学;与海洋地质学及海洋导航学结合形成了海洋大地测量学;与地球物理、海洋地质学及地质学相结合形成了地球动力学;与人造地球卫星学及天体力学相结合形成了卫星大地测量学;以惯性原理为基础,利用加速度计测量运动物体某方向加速度,通过计算机积分计算而得到运动物体空间位置的惯性大地测量学;与线性代数、矩阵、概率统计及优化设计、数值计算方法等相结合形成现代大地测量数据处理学等。以上这些新的方向和分支充分地说明了大地测量学已从传统的大地测量学进入到现代大地测量学的新时期。

综上所述,可把大地测量学划分为三类:几何大地测量学、物理大地测量学及空间大地测量学。

几何大地测量学亦即天文大地测量学。它的基本任务是确定地球的形状和大小及确定地面点的几何位置。主要内容是关于国家大地测量控制网(包括平面控制网和高程控制网)建立的基本原理和方法,精密角度测量,距离测量,水准测量;地球椭球数学性质,椭球面上测量计算,椭球数学投影变换以及地球椭球几何参数的数学模型等。

物理大地测量学也被称为理论大地测量学。它的基本任务是用物理方法(重力测量)确定地球形状及其外部重力场。主要内容包括位理论,地球重力场,重力测量及其归算,推求地球形状及外部重力场的理论与方法等。

空间大地测量学主要研究以人造地球卫星及其他空间探测器为代表的空间大地测量的理论、技术与方法。

现代大地测量学同传统大地测量学之间没有严格界限。但现代大地测量学确实具有许多新的特征。首先,现代大地测量学的测量范围大,它可在国家、国际、洲际、海洋及陆上、全球,乃至月球及太阳行星系等广大宇宙空间进行。第二,已从静态测量发展到动态测量,已从地球表面测绘发展到深入地球内部构造及动力过程的研究,即研究的对象和范围不断地深入、全面和精细。第三,观测的精度高,长距离相对定位精度达 $10^{-8} \sim 10^{-9}$,绝对精度达毫米级,有的达亚毫米级;角度测量精度在零点几秒,高程测量精度是亚毫米,重力测量精度是微伽级等,高质量的观测资料必将对本学科的发展和其他相关学科的发展带来深刻的影响。最后,现代大地测量的测量周期短也是区别传统大地测量学的重要标志。

1.1.3 大地测量学的任务

1. 大地测量学为国民经济各项建设提供先行性的基础资料

国民经济蓬勃发展的各项事业,比如交通运输事业(铁路、公路、航海、航空等),资源开发事业(石油、天然气、钢铁、煤炭、矿藏等),水利水电工程事业(大坝、水库、电站、堤防等),工业企业建设事业(工厂、矿山等),农业生产规划和土地管理,城市建设发展及社会信息管理等,都需要地形图作为规划、设计和发展的依据。可以说,地形图是一切经济建设规划和发展必需的基础性资料。为测制地形图首先要布设全国范围内及区域性的大地测量控制网,为取得大地点的精确坐标,必须要建立合理的大地测量坐标系以及确定地球的形状、大小及重力场参数。因此可以说,大地测量学是一切测绘科学技术的基

础, 为国民经济建设和社会发展提供基础性的基础资料。

2. 大地测量学为在防灾、减灾、救灾及环境监测、评价与保护中提供数据支持

地震、洪水和强热带风暴等自然灾害给人类社会带来巨大灾难和损失。地震大多数发生在板块消减带及板块内活动断裂带, 地震具有周期性, 是地球板块运动中能量积累和释放的有机过程。在我国以及日本、美国等国家都在地震带区域内建立了密集的大地测量形变监测系统, 利用 GPS 和固定及流动的甚长基线干涉测量 (VLBI) 站、激光测卫 (SLR) 站等现代大地测量手段进行自动连续监测。随着监测数据的积累和完善, 地震预报理论及技术可望有新的突破, 为人类预防地震造福。大地测量还可在山体滑坡、泥石流及雪崩等灾害监测中发挥作用。世界每年都发生各种灾难事件, 如空难、海难、陆上交通事故、恶劣环境的围困等, 国际组织已建立了救援系统, 其关键是利用 GPS 快速准确定位及卫星通讯技术, 将难事的地点及情况通告救援组织以便及时采取救援行动。

温室效应等又是人类关注的全球环境问题。对此, 科学界正密切关注海水面上升, 关注平均气温的变化, 关注对农、林业等带来的影响, 其中监测海水面变化的最有效的手段就是利用 GPS 技术将全球验潮站联测到 VLBI 及 SLR 站上, 以便根据长期监测结果, 分析海水面变化, 进而分析带来的影响。另外, 为监测沙漠、森林、洪水等, 主要的措施是发展遥感卫星, 建立动态地理信息系统 (GIS)。这也必须由大地测量来支持, 因为发射近地卫星需要精密的地球重力场模型, 发射站及跟踪站需要有准确的地心坐标, 发展地理信息系统也需要有足够的大地测量控制点作保证。

3. 大地测量为发展空间技术和国防建设的提供保障

空间科学技术发展水平是当今衡量一个国家综合科技水平和综合国力的重要指标, 同时也是评估一个国家国防能力的重要标志。卫星、导弹、航天飞机以及其他宇宙空间探测器的发射、制导、跟踪以及返回等都必须在大地测量保障下才能得以实现。这种保障主要体现在, 要有一个精确的地球参考框架 (指惯性坐标系及地心地固坐标系) 及一个精密的全球重力模型。前者用于描述空间飞行器在参考框架内的相对运动, 后者用于对地球表面及其外空间一切飞行体的分析及设计力学行为的先验重力场约束。地球参考框架主要是由一定量的已知精确坐标的基准点及由四个基本参数 (长半轴 a , 地球重力场二阶正常带谐系数 J_2 , 地球自转角速度 ω 及地球引力常数与其质量乘积 GM) 决定的正常地球椭球, 并实现它的定位和定向。

地球重力场模型位函数展开系数是卫星轨道动力学方程中的决定性参数。从古代战争到现代战争以及未来战争, 都需要相应的军事测绘作保障, 这主要表现在超前储备保障和动态实时保障。比如战争区域的电子地图、数字地图或数字地形信息库, 打击目标的精确三维坐标及区域场景的数字影像地图等, 都是现代战争必不可少的测绘文件。而这些测绘资料都是依赖于大地测量技术直接或间接参与而取得的, 是现代战争取得胜利的重要技术保障。

4. 大地测量为当代地球科学研究提供新的方法和数据

利用卫星测高和重力测量数据结合地球物理资料, 可以更精确地查清海底许多板块边界分布情况, 监测海平面变化和以更高的分辨率确定海面地形; 利用卫星重力测量及陆、

海的大规模的重力测量提供更准确的重力场模型;VLBI 及 SLR 能以 1 mm/a 的速度分辨率精确测定板块相对运动,能以前所未有的空间分辨率和时间分辨率测定全球、区域或局部的地壳运动,为解释板块内的断裂作用、地震活动以及其他构造过程提供依据等。总之,大地测量能以其本身的独特的理论体系和测量手段,提供有关地球动力过程中时空度量上的定量和定性信息,与其他地学学科一起,共同揭示地球的奥秘。

此外,大地测量学是测绘学科的各分支学科(其中包括工程测量、海洋测量、矿山测量、航空摄影测量与遥感、制图及地理信息等)的基础学科,大地测量学的基础理论和基本方法为测绘学科的发展奠定了坚实的基础,提供了先决条件。大地测量学的发展极大地影响和规定着测绘科学学科的发展。因此,凡从事测绘及相关工作的科技人员都应具备坚实的大地测量学基本知识。

1.1.4 大地测量学的基本内容

综上所述,可把现代大地测量学的基本科学技术内容归纳如下:

- (1) 确定地球形状及外部重力场及其随时间的变化,建立统一的大地测量坐标系,研究地壳形变(包括地壳垂直升降及水平位移,测定极移以及海洋水面地形及其变化等)。
- (2) 研究月球及太阳系行星的形状及重力场。
- (3) 建立和维持具有高科技水平的国家和全球的天文大地水平控制网和精密水准网以及海洋大地控制网,以满足国民经济和国防建设的需要。
- (4) 研究为获得高精度测量成果的仪器和方法等。
- (5) 研究地球表面向椭球面或平面的投影数学变换及有关的大地测量计算。
- (6) 研究大规模、高精度和多类别的地面网、空间网及其联合网的数学处理的理论和方法,测量数据库建立及应用等。

1.2 地球形体及大地测量的基准面和基准线

1.2.1 地球形体

地球的形状是怎样的呢?这是一个既有趣也很重要的问题。

古时候的人,由于活动的范围很小,只看到自己生活地区的一小块地方,因此单凭直觉,就产生了种种有关“天圆地方”的说法。例如,我国早在 2 000 多年前的周代,就有“天圆如张盖,地方如棋局(棋盘)”的盖天说。

随着生产技术的发展,人类活动范围的扩大和各种知识的积累,人们逐渐认识到,大地在大范围内不可能是平坦的,而应该是弯曲呈弧形的。因为在海边看离岸的船,先是船身隐没,然后才是桅帆。在陆地上旅行的人,如果向北走去,一些星星就会在南方的地平线上消失,另外一些星星却在北方的地平线上出现。如果向南去,情况就相反。这些现象,只有大地是弧形的才好解释。

早在公元前五百多年,毕达哥拉斯从哲学观点出发,认为球形是最完美的形状,因而提出地球为球状的臆测。公元前 300 年,亚里士多德看到月食时地球投到月亮上的影子是

弧形等现象，提出了地球为球状的科学证据。我国早在战国时期哲学家惠施就提出地球是球形的看法。但这一见解当时却很少有人接受。直到公元 1522 年麦哲伦及其伙伴完成绕地球航行一周之后，人们才确立了地球为球体的概念。

17 世纪中叶以前，人们一直把地球看做是正球形体，通过科学实践，对这一看法才获得进一步的修订、提高。1672 年，天文学家里奇比从巴黎（49°N）带了一只钟到南美洲的圭亚那（5°N），发现这只钟每天慢了 2 分 28 秒，带回巴黎后又恢复正常。以后在其他地方作类似的观察，也有类似的结果。这表明从极地向赤道移动，钟摆的摆动速度变慢，或者说是摆的振动周期变长了。经过物理学的推测，地球不是一个正圆球体，而是两极略扁、赤道凸出的旋转球体。

此后，又发现地球的南北两半球不对称，南极较北极离地心要近一些，在北极凸出 18.9 米，在南极凹进 25.8 米；又在北纬 45° 地区凹陷，在南纬 45° 隆起。这一形状和参考椭球体对比，地球又有点像梨子的样子，于是测量学中又出现“梨形地球”这一名称。

总之，地球的形状很不规则，不能用简单的几何形状来表示。更确切地说，地球具有独特的地球形体。从宇宙空间观看地球，它既不像梨，也不像橘子或鸡蛋，倒像一个滚圆的球。人们利用宇宙飞船和同步卫星在 36 000 千米高空的实际观测，已把地球的真面貌拍摄下来了。可以看到，在这个小行星上，辽阔的海洋呈蔚蓝色，突出在水体上呈褐色的是陆地，青葱翠绿的是地面上的植被，还有萦绕在上空不断变化着的白云。

从上面可以看出，人类对地球形状的认识是随着科学技术的发展而逐步提高的。正圆球体、旋转椭球体、三轴椭球体以及地球形体等，对于地球的真实形状而言，可以说都是近似的。反过来，人们在生产斗争和科学实践中，也需要对地球的形状加以不同程度的简化。例如，在制造地球仪或绘制全球性地图时，就必须把地球当做正圆球体来看待；当测绘大比例尺地形图时，又必须把地球作为有规则的参考椭球体来处理；而在发射人造天体及其轨道计算时，则需要把赤道的扁率以及各地对参考椭球体的偏离更精确地计算进去。

1.2.2 铅垂线与大地水准面

地球上的任意一点，都同时受到两个力的作用：地球自转的离心力和地心引力，它们的合力称为重力，重力的方向即为铅垂线方向（见图 1-1）。

处于静止状态的水面，例如平静的湖泊水面，即表示一个水准面。水准面必然处处与重力方向（即铅垂线方向）垂直，否则水就要流动，处于运动状态。在地球引力起作用的空间范围内，通过任何高度的点都有一个水准面。

观测水平角时，置平经纬仪就是使仪器的纵轴位于铅垂线方向，从而使水平度盘位于通过度盘中心的水准面的切平面上。因此，所测的水平角实际上就是视准线在水准面上的投影线之间的夹角。此外，用水准测量所求出的两点间的高差，就是过这两点的水准面间的垂直距离。对于边长的观测值，也存在着化算到哪个高程水准面上的问题。

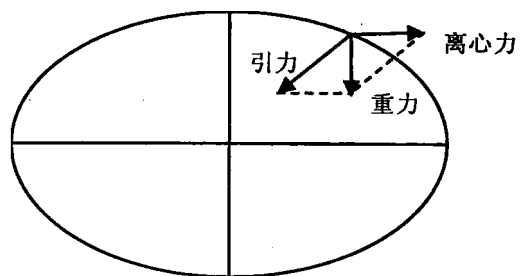


图 1-1 地球任意点受力示意图

上述 3 类地面观测值,除水平角外,都同水准面的选取有关,特别是水准测量的结果,更是直接取决于水准面的选择。于是,为了使不同测量部门所得出的观测结果能够互相比较、互相统一、互相利用,有必要选择一个最有代表性的水准面作为外业成果的统一基准。

我们知道,海洋面积约占地球总面积的 71%,从总体上说,海水面是地球上最广大的天然水准面。设想把平均海水面扩展,延伸到大陆下面,形成一个包围整个地球的曲面,其形体接近于地球自然表面的形状和大小,并且它的位置是比较稳定的,因此,我们选取大地水准面作为测量外业的基准面,而与其相垂直的铅垂线则是外业的基准线。

1.2.3 参考椭球与总地球椭球

如上所述,虽然大地水准面最适合于作为测量外业的基准面,但是大地测量的最终目的是精确确定控制点在地球表面上的位置,为此必须确知所依据的基准面的形状。也就是说,基准面的形状要能用数学公式准确地表达出来。据研究表明,大地水准面是略有起伏的不规则的表面,无法用数学公式把它精确地表达出来,因而也就不确知其形状。这是由于地表起伏以及地层内部密度的变化造成质量分布不均匀的缘故。例如图 1-2 中,高山的右侧是一片水域,山体下部有重金属矿体,因而造成左、右两侧局部质量分布的较大差异,以致左侧引力增加,铅垂线向左偏斜,大地水准面稍微隆起,呈现出不规则的变化。所以,大地水准面不能作为大地测量内业计算的基准面。

随着科学技术的发展,人类逐渐认识到地球的形状极近于一个两极略扁的旋转椭球(一个椭圆绕其短轴旋转而成的形体)。对于这个椭球的表面,可用简单的数学公式将它准确地表达出来,因而世界各国通常都采用旋转椭球代表地球。它的形状和大小与椭球的长半径 a 、短半径 b 有关,也可用和这两个量有关的其他量来表示。

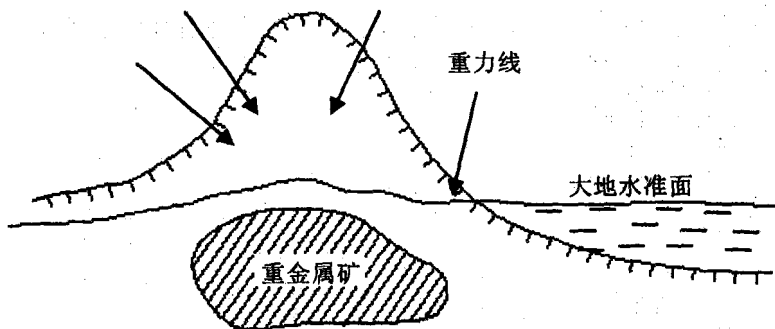


图 1-2 大地水准面示意图

选好一定形状和大小的椭球后,还不能直接在它上面计算点位坐标,这是因为我们的测量成果不是以这个表面为根据的,而应该首先将以大地水准面为基准的外业观测成果换算到这个表面上。要做到这一点只选定椭球面的形状和大小是不够的,还必须将它与大地水准面在位置上的关系确定下来,这个工作称为椭球定位。

综上所述,我们把形状和大小与大地体相近并且两者之间的相对位置确定的旋转椭球称为参考椭球。参考椭球面是测量计算的基准面。世界各国都根据本国的地面测量成果选择一种适合本国要求的参考椭球,因而参考椭球有许多个。这样确定的参考椭球在一般情

况下和各国区域内的局部大地水准面最为接近,对该国的常规测绘工作较为方便。然而当我们将各国的测量成果联系起来进行国际合作时,则参考椭球的不同又带来了不便,因此,从全球着眼,必须寻求一个和整个大地体最为接近的参考椭球,称为总地球椭球。

总地球椭球的确定,必须以全球范围的大地测量和重力测量资料为根据才有可能。然而由于地球上海洋面积约占地球总面积的 71%,因而过去只根据占少数的陆地测量成果推算总地球椭球是不可能的。近年来,由于人造卫星大地测量技术的发展,已根据人造卫星和陆地大地测量的成果求出一些总地球椭球的近似数据供使用。人们最终将使用总地球椭球。

1.2.4 垂线偏差和大地水准面差距

如上所述,无论是参考椭球还是总地球椭球,其表面都不可能与大地水准面处处重合,因而在同一点上所作的这两个面的法线,即大地水准面的铅垂线与椭球面的法线也必然不会重合(见图 1-3),两者之间的夹角 u 称为垂线偏差。 u 在子午线和卯酉线上的投影通常分别以 ξ 和 η 表示,分别称为垂线偏差的子午分量和卯酉分量。大地水准面与椭球面在某一点上的高差称为大地水准面差距,用 N 来表示。当前者高于后者时, $N > 0$; 反之, $N < 0$ 。

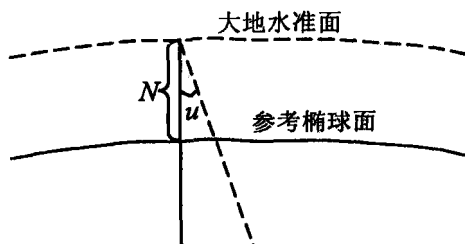


图 1-3 垂线偏差和大地水准面差距

1.3 大地测量学的发展简史

人们对自身赖以生存的地球形状和大小的认识过程,可以说是科学发展的历程,就是大地测量学产生、形成和发展的科学史。回顾这一科学发展历程,大致可划分为四个阶段:

1.3.1 地球圆球阶段

在远古时代,我国劳动人民就提出“天圆地方”的说法。公元前 6 世纪后半叶,毕达哥拉斯(Pythagoras)提出了地球是圆球的说法。公元前 3 世纪,亚历山大学者埃拉托色尼(Eratosthenes, 公元前 276~195 年)首次用子午圈弧长测量法来估算地球半径,他的方法是测定一段子午弧长 ΔG 及其所对应的圆心角 $\Delta\varphi$,即可求出圆球的半径 R ($\Delta G/\Delta\varphi$),人们习惯称这种研究地球形状和大小的方

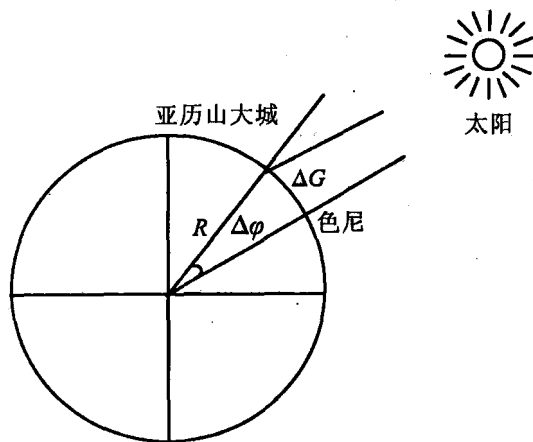


图 1-4

法为弧度测量（见图 1-4）。

埃拉托色尼发现：位于同一子午线上的亚历山大城（Alexandria）和色尼（Syene）城（现埃及的阿斯旺），在夏至（6 月 21 日）这一天正午，日光正直射色尼城的井底，而同日正午在亚历山大城，日光与垂线方向的夹角是 $7^{\circ}12'$ （即太阳高度为 $82^{\circ}48'$ ），又认为这两束阳光彼此平行，故可认为两城的纬度差为 $\Delta\varphi=7^{\circ}12'$ 。两城的距离根据骆驼行走的时间，估计为 5 000 古埃及尺（Stadia，古希腊长度单位，等于 185 m），利用这些数据估算出地球半径为 7 360 km，与现代数据比较，误差大约为 16%。自此以后，许多学者都进行了地球形状和大小的测定工作。例如，我国在唐朝开元期间（713~741 年）由高僧一行（683~727 年，俗名张遂）指派太史监南宫说在河南平原上进行的弧度测量；阿拉伯回教主阿尔曼孟（AL Mamun）于公元 827 在伊拉克巴格达西北进行的弧度测量等，都测算出了各自的地球参数。

大约从公元 6 世纪开始，欧洲在宗教桎梏下，科学技术处于极度低迷状态。直到 15~16 世纪文艺复兴浪潮席卷欧洲的时候，以哥白尼、伽利略及牛顿等为代表的一批科学家摆脱宗教枷锁之后，才在自然科学方面获得一系列的惊人发明和创造。在这种大环境之下，也促进了大地测量学的萌芽和形成。

1.3.2 地球椭球阶段

在 17 世纪初，1615 年荷兰人斯涅耳（W. Snell）首创三角测量法进行弧度测量，这不但结束了粗略艰难的实地距离丈量的历史，而且在方法上，大大推进了大地测量的发展。此后，望远镜、游标尺、十字丝、测微器等相继出现，在测量工具方面也促进了大地测量的发展。

天文学和物理学在地球形状、重力场及其空间位置等方面也都提出了崭新的观念。而研究地球形状和大小的新时期是由伟大的英国物理学家牛顿（L. Newton, 1642~1727 年）开创的，他在建立万有引力学说的基础上研究了地球的形状，推断地球是一个两极略扁的扁球体而不是一个圆球。荷兰的惠更斯（C. Huygens）于 1673 年提出用摆进行重力测量的原理，并推导了数学摆公式。从而人类进入了认识地球为旋转椭球的新阶段，几何大地测量学得到形成和发展，物理大地测量学开始奠定基础。

我国清朝康熙年间（1708~1716 年），为测制“皇舆全览图”，进行了大量的天文大地测量工作。其中最有意义的是，在 1710 年当法国神父雷考思（Pere Regis）和杜德美（Pere Jarteux）自齐齐哈尔南归时，曾在纬度 $41^{\circ}\sim 47^{\circ}$ 之间，用测绳实地丈量了每度的子午线弧长，发现这些子午线弧长值随着纬度不同而变化，由南向北增加，在这 6° 之间共差 258 尺（1 尺 = 0.308 5 m），这为地球非圆球而近于椭球之说提供了资料。而最后证明这一学说的乃是由法国科学院组织的两个测量队，于 1735 年分赴北欧的拉普兰和秘鲁的两次用三角测量法所进行的弧度测量结果。其中北欧队的观测结果是，拉普兰（北纬 66° ）的子午圈 1° 弧长是 111.92 km，比波卡于 1669~1670 年间在法国巴黎（北纬约 49° ）测得子午圈上的弧长 111.21 km 大了很多。秘鲁队在戈丁的弧度测量中，得出赤道附近 1° 弧长是 110.60 km。以上这些天文大地测量工作的结果，直接有力地证明了地球是椭球的学说是正确的。

1.3.3 大地水准面阶段

在地球椭球阶段,虽然大地测量学得到了很大发展,但将地球认为是椭球也暴露了许多矛盾,比如作为外业测量的参考基准线是铅垂线,而椭球面计算基准线则是法线;铅垂线方向是物理的重力方向,而法线方向则是几何的垂直方向。重力方向相对法线方向有偏差,即所谓垂线偏差,具有系统性质。地球表面每点的重力及其方向都不相同,因此给测量结果带来的影响也不同。另外,地球表面是极其复杂的自然地面,海底也不规则,因此地表不能用简单数学关系式来表达,只能用控制点坐标来逐点描绘。但海水面占全球表面大部分,且比较规则,在某种假设下,可认为海水面是重力等位面,并把它延伸到大陆下,得到一个遍及全球的等位面。德国的李斯廷(J. B. Listing)于1872年,把它命名为大地水准面。从而,人类认识地球形状又产生了一次飞跃,即将椭球面推进到大地水准面的新阶段。

此阶段,天文大地网的布设有了重大发展,并且出现了新型的精密测量仪器,例如因瓦基线尺、带平行玻璃板测微器的水准仪及因瓦水准尺等。当时全球有三个大规模天文大地网:1800~1900年间施测的印度天文大地网;1911~1935年间施测的美国天文大地网;1924~1950年间施测的前苏联天文大地网。这些天文大地控制网为完成本身的科学技术任务作出了重要贡献。

另外,对几何大地测量和物理大地测量有重大影响的测量数据处理和测量平差理论与实践方面也取得了重大进步。比如,在平差计算之前,首先应对测量数据进行归算,此时方向及方位角观测值都应加上垂线偏差及照准点高程改正,距离归化应加上大地水准面差距的影响等。其次,1912年马尔可夫(A. A. Markov)在高斯平差理论的基础上,提出了高斯—马尔可夫的平差模型,1946年荷兰学者田斯特拉(J. M. Tienstra)首先完成了关于相关平差的理论,这一理论把观测值的概念扩大了,不只限于随机变量的独立观测值,而且也适于随机相关的观测值及其函数。针对天文大地网的规模大、未知参数多的问题,提出了分阶段、分区以及分组平差的理论与实践。此外,矩阵及线性代数和数理统计等相关学科理论引入测量平差中也推进了测量平差发展的进程。

1.3.4 现代大地测量新时期

20世纪下半叶,以电磁波测距、人造地球卫星定位系统及甚长基线干涉测量、惯性测量系统等为代表的新的测量技术的出现,标志着现代大地测量的发展步入一个新的时期。新的测量技术给传统的大地测量带来了革命性的变革,使大地测量定位、确定地球参数及重力场、构筑数字地球等基本测绘任务都以崭新的理论和方法来进行。

第2章 平面大地控制网的布设

本章内容涉及平面控制网的布设原理，布设方法，布设原则，布设方案；平面控制网的技术设计，精度估算；平面控制网的选点，造标埋石等。鉴于高等级的平面控制已被卫星定位测量代替，三角网已基本不再布设，本章的实用平面控制网布设部分，主要讲述导线网的布设，导线网的观测、计算则在以后的章节中讲述。

2.1 平面控制网的布设原理与布设方法

平面控制测量是通过建立平面控制网，以确立地面点在地球椭球面上或某一投影面上的位置。平面控制测量方法可分为常规地面测量和卫星定位测量。

2.1.1 常规测量方法

1. 三角测量

(1) 三角测量原理

在地面上，按一定要求选定一系列的点，以三角形的形式把它们连接起来，构成地面上的三角网或三角锁。利用经纬仪精确地观测控制网中三角形的内角，并至少精确确定三角网或锁中一条边的长度和方位角，用一定的投影计算公式，将这些观测成果化算到某一投影面上，使地面上的三角网或锁转换为投影平面上的三角网或锁，如图 2-1 所示。三角网或锁中的观测角度按一定的平差方法求出角度的最或是值，利用平面三角形的正弦定理，依次解各三角形，算出所有的边长和各边的坐标方位角，利用下面的公式，求出三角网中各点的坐标。

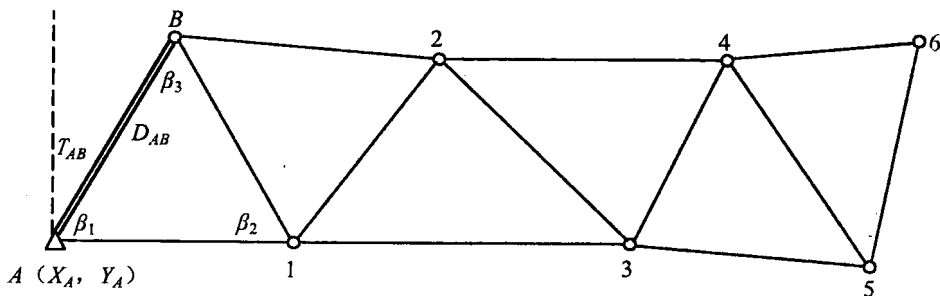


图 2-1 三角测量原理

利用公式

$$\begin{cases} \Delta x_{ij} = D_{ij} \cos T_{ij} \\ \Delta y_{ij} = D_{ij} \sin T_{ij} \end{cases} \quad (2-1)$$