



普通高等教育地矿、安全类“十一五”规划教材

大地测量学基础

主 编 王佩贤

副主编 张国卿 王宝山 王建敏

煤炭工业出版社



P22
W307

普通高等教育地矿、安全类“十一五”规划教材

大地测量学基础

主编 王佩贤
副主编 张国卿 王宝山 王建敏

煤炭工业出版社

· 北京 ·

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题，本社负责调换

图书在版编目 (CIP) 数据

大地测量学基础/王佩贤主编. —北京: 煤炭工业出版社, 2007. 11

普通高等教育地矿、安全类“十一五”规划教材
ISBN 978-7-5020-3195-4

I. 大… II. 王… 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 (2007) 第 153172 号

煤炭工业出版社 出版
(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)

网址: www.cciph.com.cn
煤炭工业出版社印刷厂 印刷
新华书店北京发行所 发行

*
开本 787mm × 960mm¹/₁₆ 印张 20¹/₄
字数 418 千字 印数 1—3,000
2007 年 11 月第 1 版 2007 年 11 月第 1 次印刷
社内编号 5996 定价 45.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 本社负责调换

内 容 提 要

本书全面系统地阐述了大地测量学的基本概念、基本理论和测量技术与方法。主要内容是研究地球形状的确定及地面点的精确定位。全书共分8章。第1章阐述大地测量学的定义、任务、作用、研究的基本内容、发展简史及对未来的展望。第2, 3, 4章侧重论述大地测量学的基本理论、技术与方法。其中包括大地测量的基准、大地坐标系的建立、高程系、传统与现代的大地测量技术与测量方法。第5, 6章介绍地球椭球的数学性质及其数学投影变换。其中包括椭球的大小及其定位、国家平面直角坐标系的建立、地图投影的概念与性质、由地面观测值到高斯平面上的投影计算等。第7章阐述坐标转换与坐标系的选择问题。介绍了几种常用坐标系之间的数据转换关系与适用工程坐标系的选择方法。第8章侧重叙述常用大地控制网数据处理原理与常见导线网、水准网平差的具体流程与实践算例。

本书既可作为测绘工程专业与相关专业的教学用书, 也可从事测绘及相关工作的科学技术人员提供参考。

贺鹏飞 编 主

陈敦王 山宝王 张国荣 编 主 编

前 言

大地测量学基础是高等工科院校测绘工程专业的一门主要专业课程。为了更好地适应现代教学工作的需要,在总结多年教学经验、分析以往所编教材使用的基础上,编写了这本《大地测量学基础》。

大地测量学是地球科学的重要分支,是测绘科学的基础科学,在测绘专业的课程设置中占有重要的地位和作用。它的主要内容是研究地球形状、大小和外部重力场以及地面点的精确定位。本教材着重阐述了大地测量学的基本概念、基本理论与具体方法。这次教材的编写对传统测量技术与方法进行部分删除、又增加了一些先进而又实用的测绘技术与方法。本教材的编写力求做到:①知识结构系统完整,信息量大,增强实用性;②内容精练,体现测绘技术发展的方向,体现教学内容的先进性;③层次结构严谨,文字通俗易懂,有利于自学。

本教材由王佩贤(辽宁工程技术大学)主编,张国卿(安徽理工大学)、王宝山(河南理工大学)、王建敏(辽宁工程技术大学)副主编,张恒景(辽宁工程技术大学)参编。另外,本教材的编写还得到许多老师的热情帮助,同时也得到煤炭工业出版社有关人员的大力协作,在此谨致以衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中可能存在的错误与不足之处,恳请读者予以指正。

编 者

2007年8月

目 次

1 绪论	1
1.1 大地测量学的定义	1
1.2 大地测量学的任务和作用	2
1.3 大地测量学研究的基本内容	5
1.4 大地测量学发展与展望	7
2 大地测量学的基本理论	13
2.1 大地测量的基准面和基准线	13
2.2 常用大地测量坐标系	18
2.3 大地测量时间基准	29
2.4 高程系统概述	32
2.5 关于确定地球形状的基本方法	44
2.6 空间大地测量简介	45
3 大地测量控制网的建立	48
3.1 大地测量控制网概述	48
3.2 国家平面大地控制网的建立	50
3.3 国家高程控制网的建立	57
3.4 国家 GPS 网的建立	61
3.5 国家重力网的建立	66
3.6 工程控制网的建立	68
3.7 变形观测控制网	84
4 大地测量的基本技术与基本方法	90
4.1 精密角度测量	90
4.2 精密高程测量	123
4.3 精密距离测量	135

4.4	全站仪简介	150
4.5	GPS 定位测量	154
4.6	天文测量	167
4.7	甚长基线干涉测量	173
4.8	惯性测量系统	182
5	地球椭球与测量计算	185
5.1	地球椭球及其定位	185
5.2	椭球面上法截线曲率半径	192
5.3	椭球面上弧长计算	199
5.4	地面观测值归算至椭球面	201
5.5	椭球面上大地问题解算	212
6	高斯投影及其计算	220
6.1	地图投影的概念和正形投影性质	220
6.2	高斯投影与国家平面直角坐标系	227
6.3	高斯投影坐标计算	232
6.4	椭球面上的方向和长度归算至高斯投影平面	242
6.5	高斯投影坐标换带计算	249
6.6	通用横轴墨卡托投影和兰勃脱投影简介	250
7	坐标转换与坐标系的选择	259
7.1	大地坐标系之间换算	259
7.2	空间直角坐标系之间换算	261
7.3	大地坐标与空间三维直角坐标的关系及其转换	263
7.4	我国的坐标系统与平面坐标系统之间的转换	266
7.5	工程控制网实用的坐标系统选择	273
8	常用大地控制网数据处理	278
8.1	概述	278
8.2	平面控制网平差	283
8.3	高程控制网平差	305
8.4	GPS 控制网平差软件概述	313
	参考文献	315

1 绪 论

大地测量学在测绘科学和测绘技术中有着重要的地位和作用，大地测量学是高等院校测绘工程专业教育中一门重要的专业课程。

学习大地测量学首先应对它的定义、性质、任务、作用与内容以及发展状况有一个概括的了解。

1.1 大地测量学的定义

大地测量学又叫测地学，是地球科学的一个分支学科，它着重研究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。为此，可以给出大地测量学如下的定义：

大地测量学是研究精确测定和描绘地面控制点空间位置、研究地球形状、大小和地球重力场的理论、技术与方法及其变化的学科。

测量学（又称普通测量学或测量学基础）是研究地球表面较小区域内测绘工作的基本理论、技术、方法和应用的学科。其基本目的是：以测绘工作为手段，确定地面点的空间位置，并把它表示成数据形式或描绘在图面上，供经济建设和工程设计施工所应用。大地测量学也为上述目的服务。

大地测量学与普通测量学的区别在于：

(1) 大地测量学测量的精度等级更高。测量工作必须按照从整体到局部、由高级到低级的原则进行，大范围高等级的大地控制测量对局部的测量工作起到控制作用。因此，大地测量学要研究更加精密的测量仪器、测量方法与数据处理方法。

(2) 大地测量学测量的范围更广。大地测量学测量的范围常常是数百千米乃至数千千米，甚至整个地球，此时就不能将地球表面作为平面来研究，地球形状接近于旋转椭球，其表面是一个不可展平的曲面，必须研究地球曲率等多种因素对测量成果的影响。大地控制测量既要保证高的测量精度，又要提供局部测图所需控制成果，故必须妥善解决地面观测成果到椭球面、再到平面上的转化问题，即投影的方法和投影的计算问题。

(3) 侧重研究的对象不同。普通测量学侧重于研究如何测绘地形图以及进行工程施工测量的理论和方法。大地测量学侧重于研究如何建立大地坐标系、建立科学化、规范化的大地控制网并精确测定控制网点坐标的理论和方法。

如果按测量范围由整体到局部、由高级到低级，大地测量学与普通测量学可以依次表

示为：大地测量学→普通测量学。

经典大地测量学是把地球视为刚体不变，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。但由于这些理论、方法受时代影响，具有局限性，还不够完全和完善。

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。其积累和突变必然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，经典大地测量技术已经不适应监测地球这种动态变化的要求。

直到近几十年来，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。

1.2 大地测量学的任务和作用

1.2.1 任务

在广大的区域范围内设置一系列能够长期保存、便于应用的固定点位，称为大地控制点。这些点位按不同的测量方式彼此连接构成统一的整体网形，称为大地控制网。通过实地观测和数据处理，精密地确定出控制点在全区统一坐标系中的空间位置和重力场参数，并且监测这些控制网点随时间的变化量。为完成这项任务，大地测量学还要研究有关的理论和方法。总之，大地测量学的基本任务可以概括为：

(1) 在地球表面的陆地上建立高精度的大地测量控制网，并监测其数据随时间的变化；为测制地图、经济建设、国防建设和地球动力学等科研工作提供控制基础，也为人造卫星、导弹及各类航天器控制与通信提供精确的轨道坐标和地面控制站坐标。

(2) 确定地球重力场及其随时间的变化，测定和描述地球动力学现象；为大地控制网、地球科学及空间科学提供基准面和基本数据。

(3) 根据地球表面和外部空间的观测资料确定地球形状和大小。为大地控制网的归算、卫星的精密定轨、远程武器的精确打击和地球物理反演、地震预报等提供资料。

可以说，建立作为各种测量工作的基础的大地测量控制网是大地测量学的技术任务；研究地球重力场和地球形状与大小是大地测量的科学任务。两项任务密切相关，大地测量控制网的观测结果为研究地球形状和大小提供了主要资料；研究地球形状和大小又为大地测量控制网的计算提供了最适宜的根据面。

1.2.2 作用

大地测量学是地学领域中的基础性学科，即为人类的活动提供地球空间信息的学科。社会经济的迅速发展，人口的增长，人类可利用的地球空间受到严峻的约束。获取地球空间信息，合理利用空间资源，已成为当前社会经济发展战略的重要环节。大地测量学还与地球科学多个分支互相交叉渗透，还将为探索地球深层结构、动力学过程和力学机制服务。大地测量学的作用可概括为下列几个方面：

(1) 为地形测图和大型工程测量提供基本控制。大地控制网从以下三个方面体现控制地形测图：

第一，控制测图误差，保证地形测图的精度。测图中每描绘一条方向线，测量一段距离，都会产生误差。这种误差在大面积测图时，将逐渐传递积累，使地形、地物在图上的位置产生大的误差，并使相邻图幅不能接合。如果以大地控制点控制测图，可以把误差限制在各大地点和图根点之间。这就保证了地形、地物在地图上的位置足够精确，即保证了地图的精度，并且相邻图幅自然可以接合。

第二，把地球表面（球面）上的地形、地物测绘成平面图，并控制由此产生的误差。地球接近于旋转椭球体，其表面是不可展曲面，若硬性展平就会出现变形和裂口等现象，即用一般方法不能把球面上的地形测绘在平面图上。但是，大地控制点在一定的旋转椭球面上的位置（坐标）是可以精密确定的，并且可以按一定的数学方法把它化算为投影平面上的点位，而后就可以把地球表面地形测绘在平面图上并控制测图误差，使地图能够拼接而不产生明显的变形和裂口。

第三，使各地的测图工作可以同时开展，并保证所测各图幅可以互相拼接。由于大地控制点的坐标系统是全国统一的，这样，不管在任何地区同时或先后开展测图工作，都不会出现相互重叠或不能拼接的现象。

(2) 为人类活动提供地球空间信息。为国民经济建设和国防建设服务，并不断扩大在各个领域中的作用，用于交通工具的自动导航，大型精密工程的规划和建设，海洋资源的开发等。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局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。地球形体接近于旋转椭球，因此，研究地球的形状、大小，就是要确定旋转椭球的长半径 a 和短半径 b ，或长半径 a 与扁率 f 。要确定 a, f ，必须综合利用大地测量，天文测量和重力测量的资料才能实现。因此可以说，大地测量学是一切测绘科学技术的基础，在国民经济建设和社会发展中发挥着决定性的基础保证作用。

(3) 在防灾减灾和救援活动中发挥日益增强的作用。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，且具有周期性，是地球板块运动中能量积累和释放的有机过程。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 (VLBI)，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信技术，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。为地震的预测提供监测信息，监测预报滑坡和泥石流，为预报厄尔尼诺现象提供信息。利用 GPS 定位技术结合卫星通信建立灾难事件救援系统。

(4) 在环境监测和保护等领域中发挥重要作用。科学界正密切关注海平面上升，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，为监测森林面积缩小、草原蜕化、沙漠扩大、耕地面积减小等环境破坏，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。

(5) 探索地球物理现象的力学机制，获取表征地球运动和形变的参数。如板块运动的速率、固体潮的洛夫数、地壳形变的速度和加速度等。利用卫星测高和重力测量数据结合地球物理资料，更精确地查清了许多海底板块边界分布情况，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、海大规模的重力测量提供更准确的重力场模型；VLBI 及 SLR 能以 1mm/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。

(6) 为空间技术和国防现代化建设提供重要保障。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。大地测量可以提供精确的点位坐标、点间距离与方位、地球重力场资料或确定基本控制点相对于地球质量中心的空间坐标。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、返回等都必须在大地测量保障下才能得以实现。

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
与军事结有不解之缘，是现代战争赢得首战必胜的重要技术保障。如地球重力场模型和精密地心参考框架等。

此外，大地测量学是测绘学科的各分支学科（其中包括大地测量、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）的基础科学，大地测量学的基础理论、手段和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。

1.3 大地测量学研究的基本内容

1.3.1 大地测量学与其他学科的关系

近几十年来，随着科学技术的发展，大地测量学的研究内容日益丰富。先后形成了实用大地测量学、椭球大地测量学、物理大地测量学、卫星大地测量学、测量平差、空间大地测量学、海洋大地测量学等不同分支。随着大地测量技术的发展和实际应用，大地测量学成为上述各分支学科之间的一个实用性很强的交叉学科。

大地测量研究布设大地网的理论和方法，其主要工作是设计和布设较合理的国家大地控制网，并对网中控制点间的角度、距离、高差等进行精密测量，经过严密的成果处理，以尽可能高的精度得到大地点的三维坐标。控制网的设计和布设，测量仪器的原理、检验和使用，测量方法的探讨以及成果质量的检核等，称为应用大地测量学或大地控制测量学。

计算大地网中各控制点位置时，必须选用一个计算基准面。地球近似一个旋转椭球，显然采用与地球接近的椭球面作为基准面，可以使点位有较高的精度。地形图是以平面表示的，控制点位还要按一定方法从椭球面投影到所选用的平面上；有关椭球面上计算、椭球面与其他曲面关系的理论探讨和公式推导，称为椭球大地测量学。

在大地网的某些点上需要观测天体的位置来确定其天文经纬度和至某一方向的天文方位角，从而提供大地网归算资料和提高网的精度。而研究天文测量的基础理论、使用仪器、测量方法以及成果计算处理等内容，称为大地天文学。

在地面上布设重力控制网为研究地球重力场提供直接观测资料，这也是研究地球形状的传统方法。综合天文测量结果，可为大地网的归算提供精确数据。当重力资料足够多时，可以推算地球椭球的扁率和大地球水准面相对于地球椭球的起伏。讨论地球形状的理论基础，重力测量的原理和方法，以及致力于大地测量中的应用等问题称为大地重力学，也叫物理大地测量学。

测量必然有误差，为保证大地控制网的质量，增加了剩余观测，以检核大地网的质量，控制测量误差的积累。为消除剩余观测而引起的矛盾，需要根据最小二乘法原理，进

行网的平差,以获得点位坐标和高程的数学期望值。运用上述原理进行观测误差的分析和观测数据的处理,称为测量平差法。

大地控制测量只限于在大陆范围内开展,无法跨越海洋,各洲之间不能联系。每个国家只能采用与本国领土比较接近的椭球面来计算大地网,从而产生了许多独立的大地坐标系,但无法推求与地球最吻合的总地球椭球。重力测量在海洋、高山和丘陵地区也仅有少量资料,推算地球形状和地球重力场都得不到满意的结果。1957年第一颗人造地球卫星发射成功后,逐步形成了卫星大地测量学,继而发展成利用其他天体或河外射电源进行测量的空间大地测量。

20世纪70年代中期,在惯性导航基础上发展起来的惯性测量,可以同时测量控制点的几何参数和物理参数。惯性测量能实时提供测量数据,机动灵活,不需要外部信号,不受气候限制,在军事上首先得到应用。继而其在大地测量、工程测量、矿山测量、隧道测量和海洋测量中的应用也日益广阔,是大地测量学的一个新分支。研究惯性测量的原理和方法、数学模型、误差分析和成果处理等内容称为惯性大地测量学。

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呐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,大地测量学与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。

大地测量学包括物理大地测量学、几何大地测量学、卫星大地测量学和空间大地测量学。几何大地测量学和物理大地测量学,构成了现代大地测量的基本体系,它的基本任务是研究全球,建立与时相依的地球参考坐标框架,研究地球形状及其外部重力场的理论与方法,研究描述极移、固体潮及地壳运动等,地球动力学问题,研究高精度定位理论与方法。

1.3.2 大地测量学研究的基本内容

按照研究对象的不同,现代大地测量学包括几何大地测量学、物理大地测量学和卫星大地测量学三个主要部分。

几何大地测量学是用一个同地球外形最为接近的几何体(即旋转椭球,称为参考椭球)代表地球形状,用天文大地测量方法测定这个椭球的形状和大小,并以它的表面为

基础推算地面点的几何位置。

物理大地测量学是从物理学观点出发研究地球形状的理论。用一个同全球平均海水面位能相等的重力等位面（大地水准面）代表地球的实际形状，用地面重力测量数据研究大地水准面相对于地球椭球面的起伏。

卫星大地测量学是利用卫星在地球引力场中的轨道运动，从尽可能均匀分布在地球表面上的十几个至几十个跟踪站，观测至卫星瞬间位置的方向、距离或距离差。积累对不同高度和不同倾角的卫星的长期（数年）观测资料，可以综合解算地球的几何参数和物理参数，以及地面跟踪站相对于地球质心的几何位置。

现代大地测量学综合利用几何法、物理法和卫星法，以求得大地测量学各种问题的最佳解决。除此以外，还发展了海洋大地测量和动态大地测量，使人类对地球的认识更趋于全面。

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、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) 研究月球和太阳系行星的形状及其重力场。

(3) 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。

(4) 研究为获得高精度测量成果的仪器和方法等。

(5) 建立和维持具有高科技水平的国家和地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。

(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理论和方法，测量数据库建立及应用等。

以上概述了一般意义上现代大地测量学的各个领域和方面。本书的内容是依据其基本内容，系统地介绍现代大地测量的基本理论、技术和方法，为后续课程的学习和今后从事测绘科技工作打下坚实的基础。

综上所述，大地测量学由大地控制测量学、椭球大地测量学、大地天文学、物理大地测量学、测量平差、卫星大地测量学和惯性大地测量学等组成。它与其他学科的联系越来越广，其内容也日益丰富，分支也逐渐增加。本教材主要论述大地控制测量部分。

1.4 大地测量学发展与展望

1.4.1 大地测量学的发展

1.4.1.1 萌芽阶段

在17世纪以前，为了兴修水利和研究地球形状大小，大地测量就已处于萌芽状态。我国在夏禹治水时就使用了测量高低和距离的器械准绳和规则。公元前3世纪，埃及亚

历山大的埃拉托斯特尼 (Eratosthenes) 首先应用几何学中圆周上一段弧 AB 的长度 S 、对应的中心角 r 同圆半径 R 的关系, 估计了地球的半径长度。由于圆弧的两端 A 和 B 大致位于同一子午圈上, 以后在此基础上发展为子午弧度测量。公元 724 年, 中国唐代的南宫说等人在张遂 (一行) 的指导下, 首次在今河南省境内实测了一条长约 300km 的子午弧。其他国家也相继进行过类似的工作, 然而由于当时测量工具简陋, 技术粗糙, 所得结果精度不高, 只能看做是人类试图测定地球大小的初步尝试。

1.4.1.2 大地测量学科的形成阶段

人类对于地球形状的认识在 17 世纪有了较大的突破。继牛顿 (I. Newton) 于 1687 年发表万有引力定律之后, 荷兰的惠更斯 (C. Huygens) 于 1690 年在其著作《论重力起因》中, 根据地球表面的重力值从赤道向两极增加的规律, 得出地球外形为两极略扁的扁球体的论断。1743 年法国的 A. C. 克莱洛发表了《地球形状理论》, 提出了克莱洛定律。惠更斯和克莱洛的研究为由物理学观点研究地球形状奠定了理论基础。

此外, 17 世纪初荷兰的斯涅耳 (W. Snell) 首创了三角测量。这种方法可以测算地面上相距几百千米, 甚至更远的两点间的距离, 克服了在地面上直接测量弧长的困难。随后又有望远镜、测微器、水准器等发明, 使测量仪器精度大幅度提高, 为大地测量学的发展奠定了技术基础。因此可以说, 大地测量学是在 17 世纪末叶形成的。

1.4.1.3 大地测量学科的发展阶段

(1) 弧度测量的发展。1683 ~ 1718 年, 法国的卡西尼父子 (G. D. Cassini & J. Cassini) 在通过巴黎的子午圈上用三角测量法测量了弧幅达 $8^{\circ}20'$ 的弧长, 由其中的两段弧长和在每段弧两端点上测定的天文纬度, 推算出地球椭球的长半轴和扁率。由于天文纬度观测没有达到必要的精度, 加之两个弧段相近, 以致得出了负的扁率值, 即地球形状是两极伸长的椭球, 与惠更斯根据力学定律所作出的推断正好相反。为了解决这一疑问, 法国科学院于 1735 年派遣两个测量队分别赴高纬度地区拉普兰 (位于瑞典和芬兰的边界上) 和近赤道地区秘鲁进行子午弧度测量, 全部工作于 1744 年结束。两处的测量结果证实纬度愈高, 每度子午弧愈长, 即地球形状是两极略扁的椭球。至此, 关于地球形状的物理学论断得到了弧度测量结果的有力支持。

另一个著名的弧度测量是德朗布尔 (J. B. J. Delambre) 于 1792 ~ 1798 年间进行的弧幅达 $9^{\circ}40'$ 的法国新子午弧的测量。由这个新子午弧和 1735 ~ 1744 年间测量的秘鲁子午弧的数据, 推算了子午圈一象限的弧长, 取其千万分之一作为长度单位, 命名为一米。这是米制的起源。

从 18 世纪起, 为了满足精密测图的需要, 继法国之后, 一些欧洲国家也都先后开展了弧度测量工作, 并把布设方式由沿子午线方向发展为纵横交叉的三角锁或三角网。这种工作不再称为弧度测量, 而称为天文大地测量。

中国清代康熙年间 (1708 ~ 1718 年) 为编制《皇舆全图》, 曾实施了大规模的天文

大地测量。在这次测量中，也证实高纬度的每度子午弧比低纬度的每度子午弧长。另外，康熙还决定以每度子午弧长为 200 里来确定里的长度。

(2) 几何大地测量学的发展。19 世纪起，许多国家都开展了全国天文大地测量工作，其目的并不仅是为求定地球椭球的大小，更主要的是为测制全国地形图的工作提供大量地面点的精确几何位置。为达此目的，需要解决一系列理论和技术问题，这就推动了几何大地测量学的发展。首先，为了检校天文大地测量的大量观测数据，消除其间的矛盾，并由此求出最可靠的结果和评定观测精度，法国的勒让德 (A. M. Legendre) 于 1806 年首次发表了最小二乘法的理论。事实上，德国数学家和大地测量学家 C. F. 高斯早在 1794 年已经应用了这一理论推算小行星的轨道。此后他又用最小二乘法处理天文大地测量结果，把它发展到了相当完善的程度，产生了测量平差法，至今仍广泛应用于大地测量。其次，三角形的解算和大地坐标的推算都要在椭球面上进行。高斯于 1828 年在其著作《曲面通论》中，提出了椭球面三角形的解法。关于大地坐标的推算，许多学者提出了多种公式。高斯还于 1822 年发表了椭球面投影到平面上的正形投影法，这是大地坐标换算成平面坐标的最佳方法，至今仍在广泛应用。另外，为了利用天文大地测量成果推算地球椭球长半轴和扁率，德国的 F. R. 赫尔默特提出了在天文大地网中所有天文点的垂线偏差平方和为最小的条件下，解算与测区大地水准面最佳拟合的椭球参数及其在地球体中的定位的方法。以后这一方法被人称为面积法。

(3) 物理大地测量学的发展。自 1743 年克莱洛发表《地球形状理论》之后，物理大地测量学的最重要发展是 1849 年英国的 Sir G. G. 斯托克斯提出的斯托克斯定理。根据这一定理，可以利用地面重力测量结果研究大地水准面形状。但它要求首先将地面重力的测量结果归算到大地水准面上，这是难以严格办到的。尽管如此，斯托克斯定理还是推动了大地水准面形状的研究工作。大约 100 年后，前苏联的 M. C. 莫洛坚斯基于 1945 年提出了莫洛坚斯基定理，它不需任何归算，便可以直接利用地面重力测量数据严格地求定地面点到参考椭球面的距离（即大地高程）。这个定理的重要意义在于它避开了理论上无法严格求定的大地水准面，而直接严格地求定地面点的大地高程。利用这种高程，可把大地测量的地面观测值准确地归算到椭球面上，使天文大地测量的成果处理不致蒙受由于归算不准确而带来的误差。伴随着莫洛坚斯基定理产生的天文重力水准测量方法和正常高系统已被许多国家采用。

(4) 卫星大地测量学的发展。到了 20 世纪中叶，几何大地测量学和物理大地测量学都已发展到了相当完善的程度。由于天文大地测量工作只能在陆地上实施，无法跨越海洋；重力测量在海洋、高山和荒漠地区也仅有少量资料。因此，地球形状和地球重力场的测定都未得到满意的结果。直到 1957 年第一颗人造地球卫星发射成功之后，产生了卫星大地测量学，才使大地测量学发展到一个崭新的阶段。

人造卫星出现后的不长时间，卫星法就精密地测定了地球椭球的扁率。此后经过了

10 多年时间,地球椭球长半轴的测定精度达到 $\pm 5\text{m}$,地球重力场球谐展开式的系数可靠地推算到 36 阶,而且还由卫星跟踪站建立了一个全球大地坐标系。现在的导航卫星多普勒定位技术,根据精密测定的卫星轨道根数,能够以 $\pm 1\text{m}$ 或更高的精度测定任一地面点在全球大地坐标系中的地心坐标;正在发展中的全球定位系统将达到更高的精度。新发展的卫星射电干涉测量技术可以测定地面上相距几十千米的两点间的基线向量在全球坐标系三轴方向上的基线分量,即两点间的三个坐标差。经过初步试验,精度至少是 $1/200\ 000$,目前正朝向高精度和长测程发展。这一技术将给地面点几何位置测定带来巨大变革。利用卫星雷达测高技术测定海洋大地水准面的起伏也取得了很好的成果。除此之外,利用发射至月球和行星的航天器,还成功地测定了月球和行星的简单几何参数和物理参数。卫星大地测量学仍在发展中,并具有很大的潜力。

(5) 动态大地测量学的发展。地壳不是固定不动的,由于日、月引力和构造运动等原因,它经历着微小而缓慢的运动。如果没有精密的测量手段,这样的运动是无法准确测出的。1967 年甚长基线干涉测量技术问世。在长达几千千米的基线两端建立的射电接收天线,同步接收来自河外类星体射电源的信号,利用干涉测量技术,能够以厘米级的精度求得这条基线向量在一个惯性坐标系中的三个分量。类星体射电源距离地球极为遥远,它们相对于地球可以看做没有角运动。因此,由已知的一些类星体射电源的位置,可以建立一个极为稳定的,从而可以认为是惯性的空间参考坐标系。由长时期所作的许多短间隔的重复观测,可以求出基线向量三个分量的变化,并由此分解出极移、地球自转速度变化、板块运动和地壳垂直运动。因此,甚长基线干涉测量技术是研究地球动态的有效手段。结合卫星射电干涉测量技术,卫星激光测距技术和固体潮观测,便形成了动态大地测量学,给予地球动力学以有力的支持。

1.4.2 大地测量学的展望

大地测量学从形成到现在已有 300 多年的历史,虽然在研究地球形状、地球重力场和测定地面点几何位置各方面都已取得了可观的成就,但从整体来看,仍存在着若干不足之处,有着广阔的发展前途。

(1) 卫星大地测量已经全面地和均匀地求出了地球重力场(包括大地水准面)的总貌,但还不能求得其精细结构。这是由于卫星运行的轨道至少在地面上方 $20\ 200\text{km}$ 以上,对地球重力场效应的分辨能力也只能达到这一数量级。目前地面重力测量在全球的分布极不均匀,有待继续扩展。在海洋上空利用卫星雷达测高技术测定海洋大地水准面的起伏已取得了较好的结果。由天文大地测量求得的垂线偏差和由天文重力水准所得的大地水准面起伏,也都是地球重力场的信息。所以要研究地球重力场全面而精细的结构,必须综合利用卫星、物理和几何大地测量的各种信息,进行统一的处理,有人称之为整体大地测量。这是研究地球重力场的发展趋势。

(2) 18 世纪以来进行的天文大地测量,各国大都采用不同的参考椭球,建立独立的