

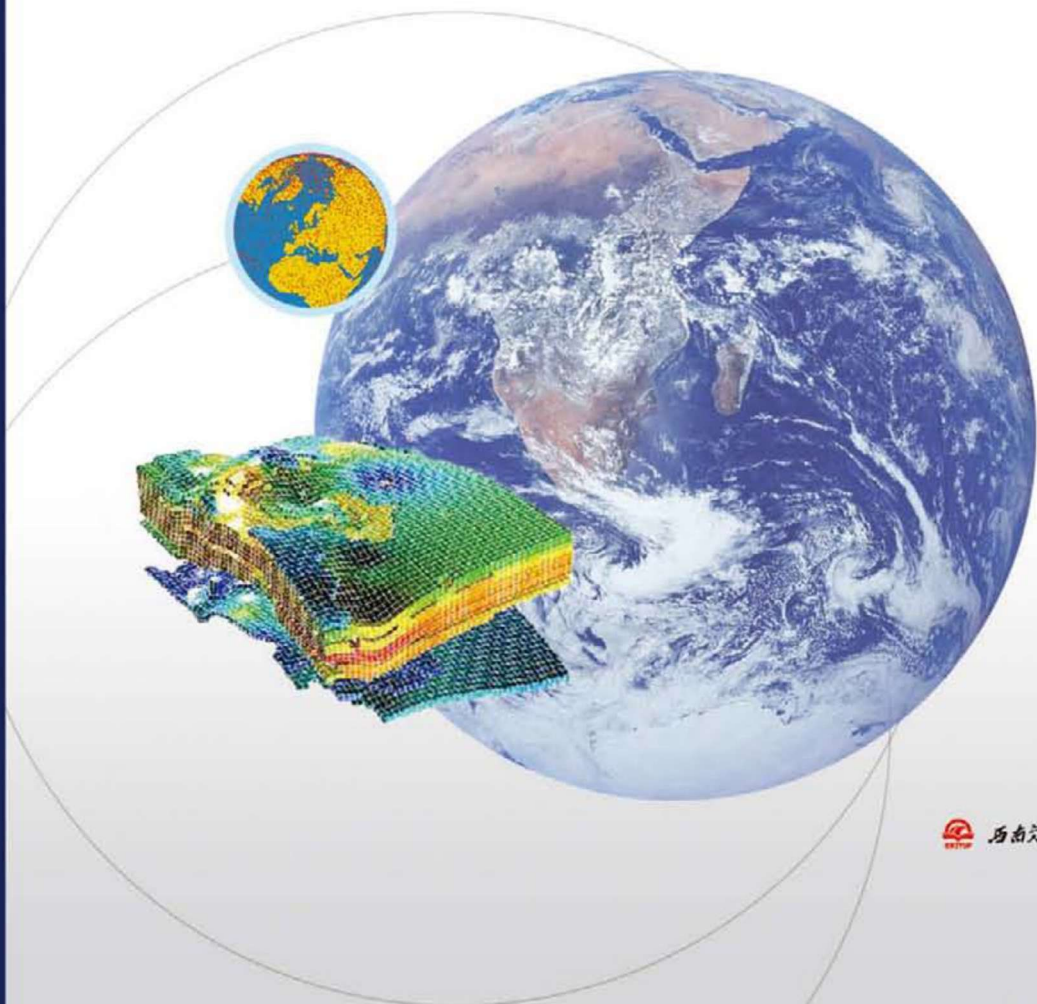
普通高等院校测绘课程系列规划教材


PUTONG GAODENG YUANXIAO CEHUI KECHENG XILIE GUIHUA JIAOCAI

DADI CELIANGXUE JICHU

# 大地测量学基础

主 编 \ 马玉晓



 西安交通大学出版社

普通高等院校测绘课程系列规划教材

# 大地测量学基础

主 编 马玉晓

副主编 张 杰

参 编 黄 鹤 安义兵 杨传宽 刘小强

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

## 内 容 提 介

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和地面点的精确定位。全书共分 7 章，内容包括：大地测量学的概念、任务、分类及发展史，现代大地测量数据获取技术（如地面边角测量技术、空间测量技术、高程测量技术、重力测量技术等），测绘基准和国家测绘控制网，大地水准面与高程系统，参考椭球数学性质及椭球投影变换，高斯投影和高斯平面直角坐标系以及大地坐标系的建立。

本书既可作为测绘工程专业本科教材，也可作为相关专业师生及从事测绘生产及科研技术人员的参考用书。

---

图书在版编目（C I P）数据

大地测量学基础 / 马玉晓主编. —成都：西南交通大学出版社，2018.11  
普通高等院校测绘课程系列规划教材  
ISBN 978-7-5643-6515-8

I. ①大... II. ①马... III. ①大地测量学 - 高等学校 - 教材 IV. ①P22

---

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2018）第 242238 号

普通高等院校测绘课程系列规划教材

大地测量学基础

主 编 / 马玉晓

责任编辑 / 穆 丰

封面设计 / 何东琳设计工作室

西南交通大学出版社出版发行

（四川省成都市二环路北一段 111 号西南交通大学创新大厦 21 楼 610031）

发行部电话：028-87600564 028-87600533

网址：<http://www.xnjdcbs.com>

印刷：四川森林印务有限责任公司

成品尺寸 185 mm× 260 mm

印张 1 9.75 字数 490 千

版次 2 018 年 11 月第 1 版 印次 2 018 年 11 月第 1 次

书号 IS BN 978-7-5643-6515-8

定价 49.00 元

审图号：GS（2018）5012 号

课件咨询电话：028-87600533

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话：028-87600562

# 普通高等院校测绘课程系列规划教材 编审委员会名单

编审委员会主任：黄丁发

编审委员会副主任：郑加柱 方渊明

编委会成员：(以姓氏笔画为序)

马飞虎	马玉晓	王卫红	王化光	王增武
左小清	石信喜	史玉峰	吉长东	刘国栋
刘绍堂	刘贵明	刘福臻	杨久东	杨明强
李长春	李保平	何立恒	余代俊	汪金花
沙从术	张 飞	张文君	张国辉	张明华
张燕茹	陈绍杰	青 盛	林友军	胡圣武
聂启祥	徐 兮	高德政	蒋端波	程海琴
鲁小平	满 旺	潘国兵	潘建平	潘炳玉



# 前 言

半个多世纪以来，大地测量学经历了一场划时代的变革，克服了传统经典大地测量学的时空局限，进入了以空间大地测量为主的现代大地测量学的发展新阶段。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；“大地测量学基础”是高等院校测绘工程专业教育中一门重要的专业课程。本书是根据测绘工程专业人才培养的需求，结合工程应用的特点，专门为测绘工程专业本科学生编写的教材，也可作为相关专业师生及从事测绘生产和科研的技术人员参考用书。

“大地测量学”是地球科学的重要分支，是测绘科学的基础学科，在测绘专业的课程设置在占有重要的基础地位和作用。本教材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和地面点的精确定位。全书共分7章。第1章侧重于大地测量学的概念、任务、分类及发展史。第2章阐述现代大地测量数据获取技术，如地面边角测量技术、空间测量技术、高程测量技术、重力测量技术等。第3章、第4章重点介绍了测绘基准和国家测绘控制网，大地水准面和高程系统。第5章、第6章、第7章详细讲述了参考椭球数学性质及椭球投影变换，高斯投影和高斯平面直角坐标系以及大地坐标系的建立。

本教材是依据大地测量学的基本体系和内容，参考了现有的多本科学著作和教材，并吸取了最新的科学成就编写而成的，力争实现深入浅出，使读者便于理解应用。

本书由马玉晓任主编并对全书进行统稿，张杰任副主编，具体分工如下：第1章和第4章由河南城建学院马玉晓编写，第2章和第7章由北京建筑大学黄鹤编写，第3章由河南城建学院张杰编写，第5章5.1小节至5.4小节由河南工程学院刘小强编写，第6章由黄河水利职业技术学院杨传宽编写，第5章5.5、5.6小节及附录由宝鸡文理学院安义兵编写。

本教材在编写过程中，借鉴了相关的参考书和教材，在此对其作者深表感谢！由于编者水平有限，书中难免存在疏漏之处，恳请读者批评指正。

编 者  
2018年3月

# 目 录

第 1 章 绪 论 .....	1
1.1 大地测量学的定义、任务与作用 .....	1
1.2 大地测量的学科体系与研究内容 .....	5
1.3 大地测量学的发展与展望 .....	7
【本章小结】 .....	14
【思考与练习题】 .....	14
第 2 章 大地测量的数据获取技术 .....	15
2.1 边角测量技术 .....	15
2.2 空间大地测量技术 .....	36
2.3 高程测量技术 .....	62
2.4 重力测量技术 .....	70
【本章小结】 .....	79
【思考与练习题】 .....	80
第 3 章 测绘基准和测绘控制网 .....	81
3.1 大地基准与传统大地控制网 .....	82
3.2 地心基准与空间大地控制网 .....	99
3.3 高程基准与高程控制网 .....	116
3.4 重力基准与重力控制网 .....	132
【本章小结】 .....	140
【思考与练习题】 .....	141
第 4 章 大地水准面与高程系统 .....	142
4.1 地球重力场的基本理论 .....	142
4.2 大地水准面与地球椭球 .....	154
4.3 高程系统 .....	158
4.4 确定大地水准面的基本方法 .....	165
【本章小结】 .....	170
【思考与练习题】 .....	172
第 5 章 参考椭球面与大地坐标系 .....	173
5.1 椭球几何参数的定义及其相互关系 .....	173
5.2 大地坐标系与空间直角坐标系 .....	175

5.3 椭球面上曲率半径和弧长计算	179
5.4 相对法截线与大地线	187
5.5 地面观测元素归算至椭球面	190
5.6 白塞尔大地主题解算	195
【本章小结】	212
【思考与练习题】	213
<b>第 6 章 高斯投影及常用坐标系</b>	<b>215</b>
6.1 高斯投影的概述	215
6.2 高斯坐标正反算	224
6.3 高斯投影相邻带的坐标换算	235
6.4 工程测量投影面与投影带的选择	237
6.5 平面坐标系四参数坐标转换	244
【本章小结】	247
【思考与练习题】	247
<b>第 7 章 大地坐标系的建立</b>	<b>249</b>
7.1 椭球定位与定向	249
7.2 参心坐标系	254
7.3 地心坐标系	260
7.4 不同大地坐标系的转换	265
【本章小结】	270
【思考与练习题】	271
附录 1 球面三角基本公式	272
附录 2 大地测量学基础实验与实习	280
参考文献	307



# 第1章 绪论

**【本章要点】** 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，是高等院校测绘工程专业教育中一门重要的专业课程。本章简要介绍大地测量学的定义、性质、研究的基本内容、任务、作用以及发展趋势。

半个世纪以来，大地测量学经历了一场划时代的变革，克服了传统经典大地测量学的时空局限，进入了以空间大地测量为主的现代大地测量学的发展新阶段。

## 1.1 大地测量学的定义、任务与作用

### 1.1.1 大地测量学定义、任务

#### 1. 大地测量学的定义

大地测量学又叫测地学，是测绘学和地球科学的分支学科，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。

大地测量学与普通测量学既有联系又有区别。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。



## 2. 大地测量学的基本任务

(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。

### 1.1.2 大地测量学的作用

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. 大地测量在地形图测绘、工程建设和交通运输方面的作用

在地形图测绘和工程建设的工作中，大地测量的作用主要体现在以下三方面：① 统一坐标系统。国家基本地形图通常是不同部门在不同时期、不同地区分幅测绘的。由于大地控制网点的坐标系统是全国统一的，精度均匀，因此，不管在任何地区任何时间开展测图工作都不会出现漏测或重叠，从而保证了相邻图幅的良好拼接，形成统一整体。② 解决椭球面和平面的矛盾。地图是平面的，但地球接近于旋转椭球体，其表面是不可展平的曲面，如强制展平将会出现皱褶或破裂。也就是说，不能直接把球面上的地形测绘在平面图上。但是，大地控制点在椭球面上的位置通过一定的数学方法可以换算为投影平面上的位置，根据这些平面点位就能在平面上测绘地图了。③ 控制测图误差的积累。在测图工作中难免存在误差。例如，描绘一条方向线、量一段距离等都会存在误差，这些误差在小范围内是不明显的，但在大面积测图中将逐渐传递和积累起来，使地形、地物在图上或实地的位置产生较大偏差。如果以大地网作为测图控制基础，就能把误差限制在相邻控制点之间而不致积累传播，从而保证了测图和施工的精度。因此，测绘地形图首先要布设一定密度的大地控制点。传统大地测量作业效率低、周期长、劳动强度大、投资高，随着我国经济的高速发展，对各类中、大比例尺地图的需求迅速增长，要求有快速精密定位和快速测图技术的保障。现在全球定位系统(GNSS)能以5~10 min的时间(传统方法需要几小时到几天)和厘米级精度测定一个点位；GNSS用于航空摄影和地面自动测图系统，可以解决快速大比例尺成图的问题。

在工程建设中，大地测量的重要作用主要体现在以下几个方面：① 建立测图控制网。在



工程设计阶段建立用于测绘大比例尺地形图的测图控制网，为设计人员进行建筑物设计或区域规划提供大比例尺地形图。② 建立施工控制网。施工测量的主要任务是将图纸上设计的建筑物放样到实地，满足不同的工程测量的具体任务。例如，隧道施工测量的主要任务是保证对向开挖的隧道能按照规定的精度贯通。放样过程中，仪器所安置的方向、距离都是依据控制网计算出来的，因而在施工放样前，需建立具有必要精度的施工控制网。③ 建立变形观测专用控制网。在工程施工过程中和竣工后的运营阶段建立以监测建筑物变形为目的的变形观测专用控制网。由于在工程施工阶段改变了地面的原有状态，加之建筑物本身的重量将会引起地基及其周围地层的不均匀变化（变形）。这种变形如果超过某一限度，就会影响建筑物的正常使用，严重的还会危及建筑物的安全。为保证建筑物在施工、使用和运营过程中的安全，必须进行变形监测。

## 2. 大地测量在空间技术和国防建设中的作用

航天器（卫星、导弹、航天飞机和行星际宇宙探测器等）的发射、制导、跟踪、遥控以至返回都需要大地测量的保障：一是需要大地测量提供精密的大地坐标系以及地面点（如发射点和跟踪站）在该坐标系中的精确点位；二是需要大地测量提供精密的全球重力场模型和地面点的准确重力场参数（重力加速度、垂线偏差等）。

大地坐标系用于描述航天器相对于地球体的运动，由分布于地球表面一定数量的已知精确地心坐标的基准点实现，大地坐标系的建立包括确定其坐标轴的定向和一个由4个基本参数（ $\alpha$ ， $j_2$ ， $w$ ，GM）定义的正常地球椭球。在航天工程中，通过由测控站（含测控船）组成的航天测控网来确定航天器的运动状态（轨道、姿态）和工作状态，对航天器运动状态进行控制、校正并建立航天器的正常状态，对航天器在运行状态下进行长期管理等。测控站在大地坐标系中的精密位置由大地测量方法精确测定，实施测控作业时，通过测定测控站至航天器的径向距离、距离变化率、位置角等，由已知站坐标解算航天器的位置。

重力场模型提供分析、描述和设计地球表面及其外空间一切运动物体力学行为的先验重力场约束。卫星的精密定轨依赖于在其定轨动力学方程中给定的扰动重力位展开系数的准确程度，低阶地球重力场模型可保证低轨卫星分米级的定轨精度。随着行星际探测技术的发展，产生了空间微重力学这门边缘学科，这将为研究宇宙飞船上试验物的微重力效应，高精度的地球重力场模型提供主要依据。

军事大地测量还为中近程导弹阵地、巡航导弹阵地、炮兵阵地、雷达阵地、机场、港口、边防、海防、重要城市等重点军事地区和军事设施的联测建立基础控制网点，并为这些应用场合提供地球重力场数字模型和坐标转换模型。

当前，军事测绘在高技术战争中已直接参与指挥和决策，在指挥、控制、通信和情报系统（C3I系统）中，军事大地测量与卫星定位技术系统和成果，如单兵定位系统、GPS制导系统、打击目标的精确三维坐标等起到了特殊作用，该系统的指挥、控制和决策功能必须以实时定位信息为依托。例如，指挥官要在电子地图上选定打击目标，分配空中火力，制定参战飞机攻击系列来指挥空战行动，从统帅部指挥控制系统的大屏幕上到各指挥中心的荧光屏上都显示着真实、准确、生动的电子地图与叠加各种军事情况标号的作战要图，在数字地形信息数据库的支撑下建立起陆海空天电一体战的链路网络，保障指挥部与各参战部队之间指挥与控制信息畅通等。



### 3. 大地测量在地球科学研究中的作用

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。随着人类社会经济的迅速发展，人类可利用的地球空间受到严峻的约束。现代大地测量学的进展，空间大地测量手段的引入，以及其对推动地球科学发展的巨大作用正是由于大地测量已能广泛地获取地球活动的信息，从而使大地测量能在更深层次上加强在地球科学中的基础性地位，现代大地测量技术已成为支持“活动论”研究方向的强有力的工具，能为当代地球科学研究提供更丰富、更准确的信息，主要贡献表现为以下几个方面：

(1) 提供更为精密的大地测量信息。甚长基线测量 (VLBI)、卫星激光测距 (SLR) 和 GPS 能以大约 1 毫米/年的速度测定精度测定板块相对运动速度，从而实测数据直接计算板块相对运动的欧拉向量。过去 20 年已由大地测量技术获得了板块运动的大量数据，检验了由地质数据导出的现代板块运动模型 NuVEL. 1 的正确性，并建立了实测模型。目前大地测量正以前所未有的空间和时间分辨率测定全球、区域和局部地壳运动，据此可建立板块内部应力和应变的模型，以检验刚性板块假说的真实程度，推算板块内部变量，并为解释板块内的断裂作用、地震活动及其他构造过程提供依据。目前，有些地质和构造事实还不能用板块学说解释，这一学说还要发展完善，大地测量将有可能对此做出贡献。

(2) 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。

(3) 通过一系列的卫星重力测量计划和陆地、海洋的更大规模重力测量，将提供更精确的地球重力场。这一大地测量成果也将对解决地球构造和动力学问题提供重要的分析资料。

(4) 应用空间大地测量技术 (特别是卫星海洋测高) 可以高精度监测海面变化并确定海面地形及其变化。这些信息可用于研究地球变暖问题、大气环流和海洋环流等气象学和海洋学问题。

地球作为一个动态系统，存在着极其复杂的各类动力学过程，大地测量学以其本身独特的理论体系和测量手段，提供了有关动力学过程各种时空尺度上定量和定性的信息，为地学的研究提供了可贵的资料。

### 4. 大地测量在资源开发、环境监测与保护中的作用

资源开发，尤其是能源开发是当前经济高速发展的紧迫问题，无论是陆地还是海洋资源勘探，各种比例尺的地形图和精密的重力资料是必不可少的资料。例如，20 世纪 80 年代初在我国西北地区柴达木盆地建立的多普勒卫星网以及该地区进行的重力测量对这一大油田的勘探、开发提供了精密的大地测量数据。对海底大陆架油气田的勘探和开发，大地测量显得更加重要。由卫星雷达测高资料结合近海船舶重力测量，联合沿海验潮站之间的水准测量可以给出近海海域具有较高精度和分辨率的海洋大地水准面和海面地形以及重力异常图；应用海面无线电定位，特别是 GPS 海洋定位，联合声呐海地定位可建立海洋三维大地测量控制网，测制大比例海底地形图。海洋大地测量资料结合海洋磁测、钻探岩石采样标本等海洋地球物理探测资料可判明估测海底油气构造和储量；海洋大地测量资料还可以为准确确定钻井井位、海上和水下作业、钻井平台的定位 (或复位)、海底管道敷设、水下探测器的安置或回收等提供设计施工依据。卫星定位技术实时、快速、精确的特点可以为资源勘探与开采中的动态信息管理、生产指挥决策和安全可靠运行提供必要保障。大地测量贯穿资源开发从探





测到开采的全过程，先进的大地测量技术将为我国勘探开发矿产资源，特别是向海洋索取能源发挥重要作用。

科学界正密切关注海面上升，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。近期实施的卫星重力梯度计划监测到了极地冰融产生重力变化，同样预计实施的空基卫星激光测距系统有可能直接观测到极地冰盖厚度的变化。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. 大地测量在防灾、减灾和救灾中的作用

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。

随着遥感、无人机观测、SLR、GPS 等技术的发展，大地测量在预防和救灾过程中发挥着越来越重要的作用。大地测量可以监测震前、同震、震后应变积累和释放的全过程，结合钻孔应变仪、台站伸缩仪和蠕变仪等地球物理监测结果，将有可能建立发震前兆模式。1975 年海城短期地震预测的成功，就是利用了明显的短期地震前兆。1986 年用大地测量方法准确地预测了长江新滩附近的严重滑坡，防止居民的伤亡，减轻可能损失。2014 年 8 月在云南鲁甸地震中，国防科工局通过对国内外 18 颗遥感卫星实时传回的地震灾区的影像进行分析，及时高效的进行地震救援，从而减小地震造成的二次伤害。

## 1.2 大地测量的学科体系与研究内容

从学科性质看，大地测量学既是一门应用性学科，又是一门基础性学科。一方面，大地测量学作为一门应用性学科，是测绘学（又称地理空间信息学）的一个分支学科。测绘学的主要研究对象是地球及其表面的各种形态。为此，首先要研究和测定地球的形状、大小及其重力场，并在此基础上建立一个统一的坐标系统，用以表示地表任一点在地球上的准确几何位置，所以人们常把大地测量称为测制地图的“第一道工序”。另一方面，大地测量学作为一门基础性学科，又是地球物理学的一个分支。地球物理学的研究对象是地球的运动、状态、





组成、作用力和各种物理过程。对此，大地测量提供的高精度、高分辨率、适时、动态和大量的空间信息，是研究地球自转、地壳运动、海平面变化、地质灾害预测等地球动力学现象的重要手段之一。

大地测量学科体系可有多种分类方法，而且相互交叉。大地测量学按所研究的地球空间的范围大小，可分为高等测量学（理论大地测量学）、大地控制测量学、海洋大地测量学和工程大地测量学。高等测量学是以整个地球形体为研究对象，整体地确定地球形状及其外部重力场，建立大地测量参考系。大地控制测量是在一个或几个国家范围内，在适当选定的参考坐标系中，测定一批足够数量的地面点的坐标和高程，建立国家统一的大地控制网，以满足地形图测绘和工程建设的需要。海洋大地测量是在海洋范围内布设大地控制网，实现海面和水下定位，测定海洋重力场、海面地形和海洋大地水准面等。工程大地测量是在一个局部小范围内测定地球表面的细部，通常以水平面作为参考面。高等测量学、大地控制测量学、海洋大地测量学和工程大地测量学之间存在着密切的联系。国家大地控制测量和海洋大地测量需要全球大地测量所确定的大地测量常数和参考基准，以便对观测结果进行顾及地球曲率和重力场影响的归算。而国家大地控制测量和海洋大地测量的结果又为理论大地测量学提供了地球表面的几何和物理量度信息。平面测量必须与国家大地控制网相连接，以使其成果纳入国家统一的坐标系中。

大地测量学按其研究的地球的时空属性，可分为几何大地测量学、物理大地测量学、空间大地测量学。几何大地测量学是用几何方法研究地球的形状和大小，将地面大地控制网投影到规则的参考椭球面上，并以此为基础推算地面点的几何位置。物理大地测量学是研究全球或局部范围内的地球外部重力场。用物理方法建立地球形状理论，并用重力测量数据研究大地水准面相对于地球椭球的起伏。空间大地测量学主要是采用空间手段研究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，最精确有效、贡献最大的空间测量技术主要有卫星激光测距、甚长基线干涉测量、卫星重力和卫星测高技术、全球卫星导航定位系统技术。

大地测量学按实现基本任务的技术手段，可分为地面大地测量学（常规大地测量学，又称天文大地测量学）、空间大地测量学（卫星大地测量学）和惯性大地测量学。地面大地测量是应用光电仪器进行短距离（一般小于 50 km）地面几何测量（边角测量、水准测量、大地天文测量）和地面重力测量，以间接的方式确定地面点的水平位置和高程，并求解局部重力场参数。空间大地测量是通过观测地外目标（人造地球卫星、类星体射电源等）来实现地面点的定位，包括相对定位和相对地心的绝对定位，应用卫星重力技术获取全球覆盖的重力场信息。惯性大地测量是利用运动物体的惯性力学原理进行地面点的相对定位，并测定重力场参数。

综上所述，可把现代大地测量学的基本研究内容归纳如下：

(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，测定和研究全球及区域性地球动力现象，包括地球自转与极移、地球潮汐、板块运动与地壳形变（包括地壳垂直升降及水平位移），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大地测量理论和方法。研究月球或行星探测器定位、定轨和导航技术；构建月球或行星坐标参考系统和框架；探测月球和行星重力场。

(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) 研究能够获得高精度数据成果的新型大地测量仪器和方法。



(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。

## 1.3 大地测量学的发展与展望

### 1.3.1 大地测量学的发展

大地测量学是伴随人类对地球认识的不断深化而逐渐形成和发展起来的。

#### 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  $L$ 、对应的中心角  $\theta$  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 300 km 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, 只能看作人类试图测定地球大小的初步尝试。

#### 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 世纪末形成的。

#### 3. 大地测量学科的发展阶段

##### 1) 弧度测量

1683—1718 年, 法国的卡西尼父子 (G. D. Cassini 和 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做出的推断正好相反。为了解决一疑问，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 1 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

自 19 世纪起，许多国家都开展了天文大地测量工作，其目的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提供大量地面点的精确几何位置。为此，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成果，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。1828 年高斯在其著作《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，德国的赫尔墨特（F. R. Helmert）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地球体中的定位方法，以后这一方法称为面积法。

### 3) 物理大地测量学的发展

自从 1743 年克莱洛发表了《地球形状理论》之后，物理大地测量学的最重要发展是 1849 年英国的斯托克斯（G. G. Stokes）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，苏联的莫洛坚斯基（M. C. Molodensky）于 1945 年提出莫洛坚斯基定理，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正确而带来的误差。伴随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(空间)大地测量学的发展

随着生产力和科学技术的发展,到20世纪中叶以后,各个学科和不同领域都对大地测量学提出了新要求(如提出全球统一坐标系、更加精确的地心坐标、要求高精度高分辨率的地球重力场模型、精确的大地水准面差距),传统的大地测量具有明显的局限性,如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,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。

随着空间技术、计算机技术、电子技术和通信技术等现代科学技术的发展,卫星大地测量学的发展更加迅速。

#### 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作没有角运动。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。由长时期所做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。

### 1.3.2 大地测量学发展趋势

大地测量学从形成到现在已有300多年的历史,在研究地球形状、地球重力场和测定地面点位置等方面已取得可观的成就,当前大地测量学主要在以下方面呈现出新的发展趋势:



(1) 以空间大地测量为主要标志的现代大地测量学已经形成。

现代科学技术的成就,特别是激光技术、微电子技术、人造卫星技术、河外射电源干涉测量技术、调整计算机和高精度原子计时频标技术的飞跃发展,导致大地测量出现了重大突破,产生了人造卫星(信号)或河外射电源(信号)为观测对象的空间大地测量。这一突破,使距离和点位测定能在全球任意空间尺度上达到 $10^{-6} \sim 10^{-9}$ 的相对精度,并能以数分钟或数小时的高效率确定一个地面点的三维位置,从根本上突破了经典大地测量的时空局限性。地面重力测量仪也发展到微伽级甚至更高的精密度,特别是空间大地测量所包括的卫星重力技术,可以获取海洋在内的全球覆盖的重力场信息。技术的突破导致学科经历了一次跨时代的革命性转变,已进入了以空间大地测量为主要标志的现代大地测量学科发展的新阶段。这一转变的主要表现是:

① 从分离式一维(高程)和二维(水平)大地测量发展到三维和包括时间变量的四维大地测量。

② 从测定静态刚性地球假设下的地球表面几何和重力场元素发展到监测研究非刚性(弹性、流变性)地球的动态变化。

③ 局部参考坐标系中的地区性(相对)大地测量发展到统一地心坐标系中的全球性(绝对)大地测量。

④ 测量精度提高2~3个量级。

这些转变大大扩展了大地测量学科的研究领域,形成了区别于经典大地测量的现代测量学。

(2) 向地球科学基础性研究领域深入发展。

现代大地测量技术业已显示的发展潜力,表明可以在任意时空尺度上以足够的准确度更完善地监测地球运动状态及其形体和位场的变化。地球几何和物理状态的变化是其内力源和外力源作用下经历动力学过程的结果,大地测量学的任务不仅是监测和描述各种地球动力学现象的精细图像。更重要的是解释其发生的机制和预算其演变过程,这就是大地测量反演问题,包括地壳运动、地球自转变化、重力场变化的地球物理反演,即由大地测量时变观测数据反推到地球内部构造形态、力源和动力学过程参数,这一大地测量与相关地学学科交叉的研究领域已形成了动力大地测量学这个新的学科分支,这是大地测量学的一个最具活力的边缘性学科分支,其发展一方面依赖于空间大地测量和物理大地测量学的发展,又与相关地球科学的发展密切相关,有相对的独立性,其完整的理论体系和方法仍在建立之中。

现代大地测量的发展方向将主要面向和深入地球科学,其基本任务是:

① 建立和维持高精度的惯性和地球参考系。建立和维持地区性和全球的三维大地网,包括海底大地网,以一定的时间尺度长期监测这些问题随时间的变化,为大地测量定位和研究地球动力学现象提供一个高精度的地球参考框架和地面基准点网。

② 监测和解释各种地球动力学现象,包括地壳运动、地球自转运动的变化、地球潮汐、海面地形和海平面变化等。

③ 测定地球形状和地球外部重力场精细结构及其随时间的变化,对观测结果进行地球物理学解释。

这些任务将在现代科学技术的支持下,在与相关地球科学的交叉发展中得到实现,大地测量将成为推动地球科学发展的前沿学科之一。