



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

大地测量学基础

Fundamentals of Geodesy

(第二版)

吕志平 乔书波 编著



测绘出版社

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材
普通高等教育“十一五”国家级规划教材

大地测量学基础

Fundamentals of Geodesy

(第二版)

吕志平 乔书波 编著



测绘出版社

• 北京 •

© 吕志平 2010—2016

所有权利(含信息网络传播权)保留,未经许可,不得以任何方式使用。

内容简介

本书系统而全面地讨论了测绘基准与大地控制网,大地水准面与高程系统,参考椭球面与大地坐标系,高斯投影、通用横墨卡托投影与平面坐标系,大地坐标系的建立等测绘学的基本问题,介绍了与之相关的各类大地测量数据采集技术。

本书可作为高等院校测绘类各专业本科生的通用教材,对于从事与测绘工程有关的技术人员也是一本值得推荐的基础性参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大地测量学基础 / 吕志平, 乔书波编著. — 2 版. — 北京: 测绘出版社, 2016. 7

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

ISBN 978-7-5030-3889-1

I. ①大… II. ①吕… ②乔… 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(2016)第 099980 号

责任编辑	雷秀丽	封面设计	李 伟	责任校对	董玉珍	责任印制	陈 超
出版发行	测绘出版社			电 话	010—83543956(发行部)		
地 址	北京市西城区三里河路 50 号				010—68531609(门市部)		
邮政编码	100045				010—68531363(编辑部)		
电子邮箱	smp@sinomaps.com			网 址	www.chinasmp.com		
印 刷	三河市博文印刷有限公司			经 销	新华书店		
成品规格	184mm×260mm						
印 张	16			字 数	385 千字		
版 次	2010 年 3 月第 1 版 2016 年 7 月第 2 版			印 次	2016 年 7 月第 3 次印刷		
印 数	6801—8800			定 价	38.00 元		

书 号 ISBN 978-7-5030-3889-1

审 图 号 GS(2016)437 号

本书如有印装质量问题,请与我社门市部联系调换。

前 言

测绘基准和测绘系统是测绘学科的基础性问题,在测绘工程中具有十分重要的地位和作用。测绘基准是指进行测绘工作的各类起算面、起算点及其相关的参数,包括大地基准(即坐标基准)、高程基准、深度基准、重力基准等,它们是国家测绘工作的起算依据,是建立各个测绘系统的基础。测绘系统是指通过布设全国范围的各类大地控制网而实现的各类基准的延伸,包括大地坐标系统、平面坐标系统、高程系统、地心坐标系统和重力测量系统等,它们是各类测绘成果的依据。

测绘基准和测绘系统的设立、使用是否科学、完善,直接关系到国家测绘成果的精确度和实用性,我国 1959 年发布的《中华人民共和国大地测量法式》和 1992 年首次发布的《中华人民共和国测绘法》及其以后的更新版,都明确规定了我国统一的测绘基准和测绘系统的法律地位和技术原则。

作为测绘科学与技术各专业的专业基础课程,本教材以测绘基准和测绘系统为主线,以后续专业课程的需要和工程实际应用为主导,结合大地测量学科当前进展,在我校几代人的教学实践和编著者多年教学经验的基础上编写完成。

本书共七章,其中,第一、四~七章由吕志平编写,第二、三章由乔书波编写,书中插图、算例由乔书波组织绘制、计算,张建军教授、隋立芬教授审阅了全书。第一章介绍了大地测量学的任务、作用、学科分类、发展简史和趋势。第二章概括介绍了地面边角测量、高程测量、空间大地测量、物理大地测量等大地测量数据采集技术的方法、原理等。第三章讨论了大地测量基准的概念及水平控制网、高程控制网、卫星大地控制网、重力控制网的建立方法和布网方案等。第四章介绍了地球重力场理论的基本概念,讨论了高程系统的定义并建立了各高程系统间的转换关系。第五章讨论了参考椭球的概念及有关椭球的数学性质,研究了地面边角元素与参考椭球面上边角元素的关系,建立了大地坐标系与大地极坐标系、大地空间直角坐标系的相互转换模型。第六章研究了高斯投影和通用横墨卡托投影的方法、模型,以及椭球面上大地坐标与投影平面坐标的关系和坐标换算方法;研究了把椭球面上的大地网投影到平面上,进而在投影平面坐标系中进行大地网计算的方法。第七章阐述了经典大地坐标系和现代大地坐标系的建立原理,构建了不同大地坐标系间的转换模型,并介绍了国际上的大地坐标系和中国的大地坐标系。

在本书的编写过程中,我们首先重视教材新体系的构筑,力求避免原有多门课程知识的简单拼凑,按照 21 世纪人才培养对大地测量学基础知识的要求,针对本科生的知识基础,明确教材主旨,合理选取教材内容,贯彻“少而精”的方针。因此,本书并不完全遵循已有的专业课程体系,也不受限于以往的课程设置范式。

大学专业基础教材与适当介绍学术热点、学术前沿之间似乎存在一定的矛盾,但恰好可以成为激励学生热情并融科学性、趣味性于一炉的画龙点睛之处。因此,本书在重视基础教材内容的经典性和完整性的同时,也酌情安排了一些关于学科新进展的窗口,以利于开拓学生的视野和思路,并作为大地测量专业后续专业课程的接口。

在本书完稿之际,要特别感谢我校朱华统教授、熊介教授、黄继文教授、徐正扬教授等前辈在课程建设方面长期不懈的努力,他们虽未直接参与本书的编写,但他们为我们留下的丰富教学成果和形成的我校富有特色的课程教学体系是本书得以顺利完成的前提。感谢原测量与导航工程系李广云主任和大地测量教研室张建军、柴洪洲两任主任对课程建设的领导和支持。感谢课程组其他成员的努力和协作,他们是刘长建、马高峰、赵冬青、李健、张西光、张勇、张金辉等,课程建设成果是集体智慧的结晶。

我校“大地测量学基础”课程的建设,自2003年至今分别列入军队院校“2110工程”(一期、二期和三期)课程建设项目。2008年,我校“大地测量学基础”课程被教育部评为“国家精品课程”,2013年获教育部首批“国家精品资源共享课”立项,教学资源已于2014年4月在“中国大学精品开放课程”(“爱课程”)网正式上线,网站地址为 <http://www.icourses.cn>,欢迎读者登录本课程浏览、学习、答疑并与课程组互动。

课程建设是一项长期的任务,编著者欢迎广大读者就本教材的体系和内容给予批评指正,以推进本课程建设的不断发展。

目 录

第一章 绪 论	1
§ 1-1 大地测量学的任务与学科分类	1
§ 1-2 大地测量的作用	2
§ 1-3 大地测量学的发展简史与趋势	7
第二章 大地测量数据采集技术概述	13
§ 2-1 地面边角测量	13
§ 2-2 高程测量	23
§ 2-3 空间大地测量	28
§ 2-4 重力测量	54
第三章 测绘基准与大地控制网	61
§ 3-1 水平坐标基准与水平控制网	61
§ 3-2 高程基准与高程控制网	70
§ 3-3 三维坐标基准与卫星大地控制网	75
§ 3-4 重力基准与重力控制网	97
第四章 大地水准面与高程系统	104
§ 4-1 地球重力位与大地水准面	104
§ 4-2 地球椭球与正常椭球	112
§ 4-3 高程系统	115
§ 4-4 不同高程系统间的关系及转换	119
第五章 参考椭球面与大地坐标系	123
§ 5-1 球面三角学的基本知识	123
§ 5-2 参考椭球	125
§ 5-3 大地坐标系与大地空间直角坐标系的关系	129
§ 5-4 法截线与大地线	132
§ 5-5 地面边角元素与椭球面边角元素的关系	149
§ 5-6 大地坐标系与大地极坐标系的关系	159
第六章 高斯投影、UTM 投影与平面直角坐标系	176
§ 6-1 投影概述	176
§ 6-2 正形投影的一般条件	178

§ 6-3	高斯投影的一般概念	181
§ 6-4	高斯平面坐标系与大地坐标系的关系	185
§ 6-5	椭球面边角元素与高斯平面边角元素的关系	196
§ 6-6	UTM 投影	210
第七章 大地坐标系的建立		212
§ 7-1	大地坐标系中的欧拉角	212
§ 7-2	不同大地坐标系的转换	215
§ 7-3	椭球定位的经典方法	220
§ 7-4	协议地球参考系	224
§ 7-5	中国的大地坐标系	234
参考文献		246

第一章 绪 论

大地测量学是测绘学和地球科学的分支学科,在国家经济建设、国防建设、地学研究和社会信息化进程中具有重要作用。现代科学技术的成就,使大地测量学经历了划时代的革命性转变,突破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。本章简要介绍大地测量学的学科任务、作用以及发展简史与趋势等。

§ 1-1 大地测量学的任务与学科分类

一、大地测量学的任务与学科性质

根据德国大地测量学家赫尔默特(F. R. Helmert)1880 年对大地测量学的经典定义,大地测量学是“测量和描绘地球表面的科学”。这一定义也包括了确定地球外部重力场,因为从大范围看地球形状是由地球重力确定的,大多数大地测量观测量与地球重力场有关。按此定义,可将大地测量学的学科任务表述为,一是精确确定地面点位及其变化,二是研究地球重力场、地球形状和大小、地球动力学现象。通常把前者称为大地测量学的技术任务,把后者称为大地测量学的科学任务,二者密切相关。

从学科性质看,大地测量学既是一门基础性学科,又是一门应用性学科。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,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形图的“第一道工序”。另一方面,大地测量学作为一门基础性学科,在中国的学科目录中将其列为地球物理学的一个分支学科。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、动态和定量的空间几何和物理信息,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。

二、大地测量学的学科分类

大地测量学按其所研究的地球空间的范围大小,可分为椭球大地测量学(高等测量学或理论大地测量学)、大地控制测量学、海洋大地测量学和工程大地测量学。椭球大地测量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,建立大地测量参考坐标系。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。

椭球大地测量学、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地球表面的几何和物理量度信息。工程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。

大地测量学按其所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、动力大地测量学和整体大地测量学。几何大地测量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。动力大地测量是通过精确测定地面点的位置和地球重力场随时间的变化,研究地球的整体和局部运动,并给出物理解释。整体大地测量是将几何与物理空间统一起来,在时间空间参考系中,将大地测量学的一切几何观测量和物理观测量放在一个统一的数学模型中处理。

大地测量学按实现其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,应用卫星重力测量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。

随着现代科学技术的发展,大地测量学的内涵也随之有新的扩展。以空间大地测量为主体的现代大地测量技术体系已经形成,这一新的技术体系能比经典大地测量技术体系提供更精密且更为丰富的大地测量信息,这不仅扩大了大地测量在经济和社会发展中的应用领域,提高了效能,也大大加强了它的科学性,提高了作为地球科学中基础性学科的地位。

§ 1-2 大地测量的作用

一、大地测量在地形图测绘、工程建设和交通运输方面的作用

在地形图测绘工作中,大地控制网的重要作用主要体现在以下方面:

(1)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,从而保证了成图的精度。

(2)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。

(3)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化算为投影平面上的位置,根据这些平面点位就能控制在平面上测绘地图了。

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,随着中国经济的高速发展,社会各界对各类中、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,全球定位系统实时动态测量能以 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;卫星大地测量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问题。

在工程建设中,大地测量的重要作用主要体现在以下方面:

(1)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。设计人员是在大比例尺地形图上进行建筑物设计或区域规划的,大地测量的任务是布设作为图根控制依据的测图控制网。

(2)在工程施工阶段建立施工控制网。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,并使各建筑物按照设计的位置修建。对于不同的工程,施工测量的具体任务是不同的。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)在工程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。此外,建筑物本身及其基础,也会由于地基的变化而产生变形。这种变形如果超过了某一限度,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。在一些大城市(如上海、天津),由于地下水的过量开采,会引起市区大范围的地面沉降,从而造成危害。因此,在竣工后的运营阶段,需对这种有怀疑的建筑物或市区进行变形监测。为此需布设高精度的变形观测控制网。

在交通运输方面,大地测量与导航定位技术为提高交通效率提供了重要保障。

在古代,指南针的发明、天文测量方法的建立开创了人类航运史,导致了美洲新大陆的发现;丝绸之路带来了唐代欧亚贸易,促进了经济繁荣。古老的大地测量技术推动着人类社会文明的发展。

交通运输对定位信息的需求量、种类、质量和实时性要求的程度取决于社会生产、经济和科技发展的水平。古代交通工具的导航定位水平是几千米到几十千米,而今天的海运和空运导航定位水平是几米到几十米。现在全球定位系统(global positioning system, GPS)导航装置能提供分米级甚至厘米级精度的实时导航,这对起降频繁的大型机场来说十分重要。目前中国公路汽车流量猛增,据统计近年中国公路交通事故的原因大都是与驾驶员不能实时确定车位和车距以及缺乏超过障碍的快速反应能力有关。目前导航仪已经普及,有效地提高了汽车行驶效率。内河航运在狭窄的航道和港区避免撞船事故也需要这类装置。高效高精度的卫星导航和定位能力,为减少交通事故、提高交通运输效率提供了重要保障。

二、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两类基本的大地测量保障:一是有一个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,二是有一个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(a 、 J_2 、 ω 、 GM)定义的正常地球椭球。在航天工程中,通过由测控站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,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将提供主要依据。

洲际导弹是当今主要战略武器,射程在7 000 km以上,要求命中精度为几十米,影响落点精度的主要因素是扰动重力场,包括扰动重力和垂线偏差。扰动引力对1~1.5万千米射程可产生1~2 km落点偏差,对3 000~5 000 km的中远程导弹可产生200~500 m的落点偏差。发射点垂线偏差在这一射程上也可产生1 km左右的落点偏差。不论在导弹的主动段(火箭推动段)和被动段(弹头离箭段)都必须给制导系统输入扰动重力场参数以校正对预定弹道的偏离,这需要依靠制导计算机中存入的重力场模型来实现。确定发射方位角也很重要,5"的方位偏差对1万千米射程可产生约200 m落点偏差,故需要精确的方位角来限制这一误差。

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与决策,在指挥、控制、通信、计算机和情报系统(C⁴I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要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,等等。

从古代战争到现代战争,都需要相应的军事大地测量保障,在高技术条件下,军事大地测量与卫星定位的作用将更显得突出。大地测量从来就同军事结有不解之缘,由此也形成了大地测量信息的保密体制。

三、大地测量在地球科学研究中的作用

地球科学的众多分支都是从各自不同的侧面,应用不同的手段去观测揭示地球系统的组成、运动和发展。大地测量着重于研究地球空间的几何特征和最基本的物理特征——重力场,

并描述其变化。20 世纪 60 年代后期提出的板块构造学说使地球科学有了革命性的进展,其重大意义在于地球科学从此确立了“活动论”的科学观。现代大地测量学的进展,空间大地测量手段的引入,对推动地球科学发展的重要意义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的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”研究方向的强有力工具,能为当代地球科学研究提供更丰富、更准确的信息。现代大地测量的贡献主要有以下几个方面:

(1)为研究板块运动、地壳形变提供精密的大地测量信息,使建立精确的板块运动、地壳形变定量化模型有了新的手段。甚长基线干涉测量(very long baseline interferometry, VLBI)、卫星激光测距(satellite laser ranging, SLR)和 GPS 能以大致每年 1 mm 的速度精度测定板块相对运动速度,从而由实测数据直接计算板块相对运动的欧拉向量。过去 30 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,推算板块内部形变量,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新贡献。

(2)极移和地球自转速率的变化包含了地球构造和多种地球动力学过程的信息,空间大地测量测定地球自转参数的精密性已成为提取分辨这些信息最有效的工具。根据一定的地球构造模型(圈层结构假定、地幔地核的弹性和黏弹性假定等),可以建立相应的自转运动方程,由此可研究地球三轴(自转轴、形状轴和动量矩轴)的岁差、章动和极移,将观测值和理论推算值进行比较可以检验和修正地球构造模型,VLBI 观测资料对 IAU 1980 章动系列提出的改正推动了重新研究地球模型就是一例。极移包括由地球弹性决定的 410~440 天周期的自由摆动(钱德勒摆动)和叠加其上的一年周期的受迫摆动,还有近一日的微小摆动(包括自由摆动和受迫摆动两项),还观测到 25~30 年的长周期低幅摆动。这些不同周期摆动的激发因素是近代地球物理学着重研究的课题,涉及固体地球、大气、海洋和地核之间的角动量转换,潮汐摩擦耗散,气候季节性变化引起的旋转角动量变化,核幔黏弹结构,外液核磁流体动力学(地磁发电机)和核幔电磁耦合等一系列重大问题。日长变化的激励因素被认为与极移摆动大致一致。上述这些问题在地球物理学中还有不少不清楚的方面和争论。大地测量已实施了多个分布全球的地球自转监测计划,积累了大量的观测资料,结合更多的地球物理、气象和海洋学等资料,通过精密分析,可望获得上述地球结构和动力学问题的新认识,并可能有新的突破。

(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,将提供更精细的地球重力场,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,联合其他有关地学学科,共同提示其本质。

四、大地测量在资源开发、环境监测与保护中的作用

资源开发,特别是能源开发是当前经济高速发展的紧迫问题。不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基础资料。例如,20世纪80年代初在中国西北地区柴达木盆地建立的多普勒卫星网以及在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,大地测量显得更为重要。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GPS海洋定位联合声呐海底定位可建立海洋三维大地测量控制网,用于水下导航和测制大比例尺海底地形图。海洋大地测量资料结合海洋磁测,钻探岩层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)、海底管道铺设、水下探测器的安置或回收等提供设计施工依据。卫星定位技术的实时、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勘探开发矿产资源,特别是向海洋索取能源发挥重要作用。

地球温室效应以及海洋和大气污染是当今世人关注的全球性环境问题。像中国这样的发展中国家还存在地区性环境恶化问题,如森林覆盖面积缩小、草原退化等生态失衡引起的水土流失、沙漠化等;能源结构中煤炭比重过高引起的工业城市大气含尘量高,酸雨频繁出现;由工业废弃物排放失控引起的大范围水体污染等。环境恶化不仅危及人类生存条件和生活质量,也是经济发展的严重制约因素。地球温室效应的影响已引起各国科学家的普遍重视,它将引起极地冰盖厚度变薄和全球海水密度减低、海平面上升,按现在的估测值每年3.1 mm上升速度,几十年后造成的海岸回退、陆地减少和海水侵入使土地碱化等环境变化将严重危及海岸地区居民的生存条件,太平洋一些岛屿将被海水淹没。认真对待的战略就是精密监测这一过程,控制这一过程的人为因素(如降低二氧化碳排放量,禁止滥伐森林等)。监测这一全球变化的最有效手段是空间大地测量,主要方法是利用GPS将全球验潮站联测到VLBI和SLR站上,以便在精确的大地坐标系中根据长期监测结果分析海面变化。近期实施的卫星重力梯度计划(GOCE)可监测到极地冰融产生的重力变化;CryoSat-2卫星所携带的全天候微波雷达测高仪的垂直测量精度能达到1~3 cm,可以随时掌握两极冰盖厚度的变化情况。这些信息将有助于预测极地冰的融化会对海洋环流模式、海平面以及全球气候造成多大影响。

当今世界各国都认识到在发展经济的同时必须同时采取保护环境的对策。环境问题是一个全球性问题,巴西亚马孙河流域热带雨林和东南亚地区热带雨林的日益萎缩,非洲原始森林的破坏,一些地区沙漠化的蔓延都将严重影响全球气候,造成大的水旱灾害。为此必须建立一个全球性的环境监测系统,各个国家也应有一个完善的监测系统,主要措施是发展遥感卫星,建立动态地理信息系统(geographic information system, GIS),对环境变化定期做出准确的定量评估。发展这种监测系统也需要大地测量的支持,发射近地卫星需要精密的地球重力场模型,发射站和跟踪站需要有准确的地心坐标,建立地理信息系统也需要有点位和控制信息,尽管大地测量在这个系统中的作用是间接的,但却是重要和不可缺少的。

五、大地测量在防灾、减灾和救灾中的作用

各种自然灾害,特别是地震、洪水和强热带风暴常给人类带来巨大的破坏和损失,因此,世界各国都十分注意防灾、抗灾问题。目前除了热带风暴基本上能准确预报外,大地震成功预防率很少,反映了科学对地球的认识还很肤浅。提高人类预防和减少自然灾害影响的能力还要

做长期的努力。防灾、抗灾、减灾是包括大地测量学在内的地球科学的重要任务。

现代大地测量技术将在地震灾害的监测和预报研究中发挥越来越重要的作用。地震大多数分布在板块消减带及板内活动断裂带,根据地震的历史记载统计,一个地震带的地震活动有一定的统计学上的周期性。现在已经辨认出西北太平洋板块消减带史前大地震的地质证据,地壳应变的大地测量结果与两次地震间的弹性应变积累一致,支持了地震有重复周期的观点,重复周期的物理学根据是弹性回跳理论,这也是用大地测量方法长期监测地震带地壳应变活动能为地震的中短期预报提供信息的理论根据。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,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。地震与全球板块运动有关,当相对运动速率明显偏离了长期运动平均速率,表明板块边界带应变积累超常,有孕震的可能。现在一些国家,如美国和日本都在地震带建立了密集的大地测量形变监测系统,包括GPS、VLBI和SLR站,美国在圣安德烈斯断层带部署了GPS自动监测网。当然,地震预测是极其复杂的,至今人类几乎从未有过精确的地震预报。我们可能大致知道某区域会发生地震,但估计在100年内还不可能预测地震发生的日期、震中位置、震源深度等其他重要信息。

大地测量在预防其他地质灾害中同样发挥着重要作用,例如监测滑坡和泥石流等。1986年用大地测量监测方法准确地预测了长江新滩附近的严重滑坡,防止了居民的伤亡,减轻了损失。

厄尔尼诺现象是另一种影响大、持续时间长的灾变,它是由于海水温度分布和大洋环流的异常,通过海洋和大气的相互作用造成大气圈质量分布的异常变化,致使地球部分地区发生雨涝和洪水,另一部分地区则出现干旱。由于角动量交换,大气质量分布的变化使地球角动量变化,影响地球自转速度。1982~1983年厄尔尼诺现象开始时,地球自转速度急剧放慢,现在应用VLBI和SLR技术可精确测定地球转速的变化,使提前几年(如3年)预测这一灾害现象成为可能。

世界上每年都会发生各种灾难事件,空难、沉船、陆上交通事故、人员在恶劣环境下被困失踪等。如何及时进行有效救援历来引起人们的重视,过去是用无线电SOS信号呼救,但往往因为不能准确判断出事地点位置,影响了救援时效,现在国际上已建立了卫星救援系统,关键是利用GPS快速定位和卫星通信技术,使国际救援组织能迅速判明出事地点及时组织救援行动。

§ 1-3 大地测量学的发展简史与趋势

一、大地测量学的发展简史

大地测量学是伴随人类认识地球的不断深化而逐渐形成和发展起来的。

(一) 萌芽阶段

在17世纪以前,大地测量只是处于萌芽状态。公元前3世纪,希腊的埃拉托色尼(Eratosthenes,也译为“厄拉多塞”)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 γ 同圆半径 R 的关系,估计了地球的半径长度(见图1-1)。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

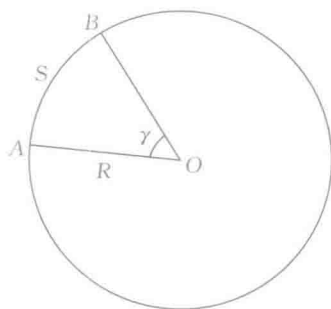


图 1-1 子午圈弧长

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,只能看作是人类试图测定地球大小的初步尝试。

(二)大地测量学科的形成

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,得出地球的外形为两极略扁的扁球体的论断。1743 年法国的克莱罗(A. C. Clairaut)发表了《地球形状理论》,提出了用重力测量方法求定地球形状的克莱罗定律。惠更斯和克莱罗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,测量仪器精度大幅度的提高,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。

(三)弧度测量的发展

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了子午弧度测量,全部工作于 1744 年结束。两处的测量结果证实纬度越高,每度子午弧越长,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。

(四)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提供大量地面点的精确几何位置。为此目的,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高斯(C. F. Gauss)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,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方法。以后这一方法被人称为面积法。

(五)物理大地测量学的发展

自从1743年克莱罗发表了《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. S. Molodensky)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。

(六)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。但是,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了一个崭新的阶段。

人造卫星出现后的不长时间,人们用卫星法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全球大地坐标系。现在的GPS定位技术,根据精密测定的卫星轨道根数,能够高精度地测定任一地面点在全球大地坐标系中的地心坐标;利用卫星雷达测高技术测定海洋大地水准面,利用卫星重力测量技术确定全球重力场等也已取得了很好的成效。

(七)动力大地测量学的发展

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惯性坐标系中的3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 3 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。结合卫星激光测距技术和固体潮观测,便形成了动力大地测量学,给予地球动力学以有力的支持。20 世纪 90 年代以后,随着 GPS 技术的成熟,GPS 测量已成为动力大地测量的主要手段。

二、大地测量学的发展趋势

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了可观的成就,当前大地测量学主要在以下方面呈现新的发展趋势。

(一)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、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,产生了以人造卫星(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。随着超导重力仪和量子重力仪的发展,地面重力测量已达到微伽级甚至更高的精度。空间大地测量所包括的卫星重力技术,可以获取包括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。这一转变的主要体现是:

(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)测量精度提高了 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大地测量学。

(二)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测其演变过程,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的发展,又与相关地球科学的发展密