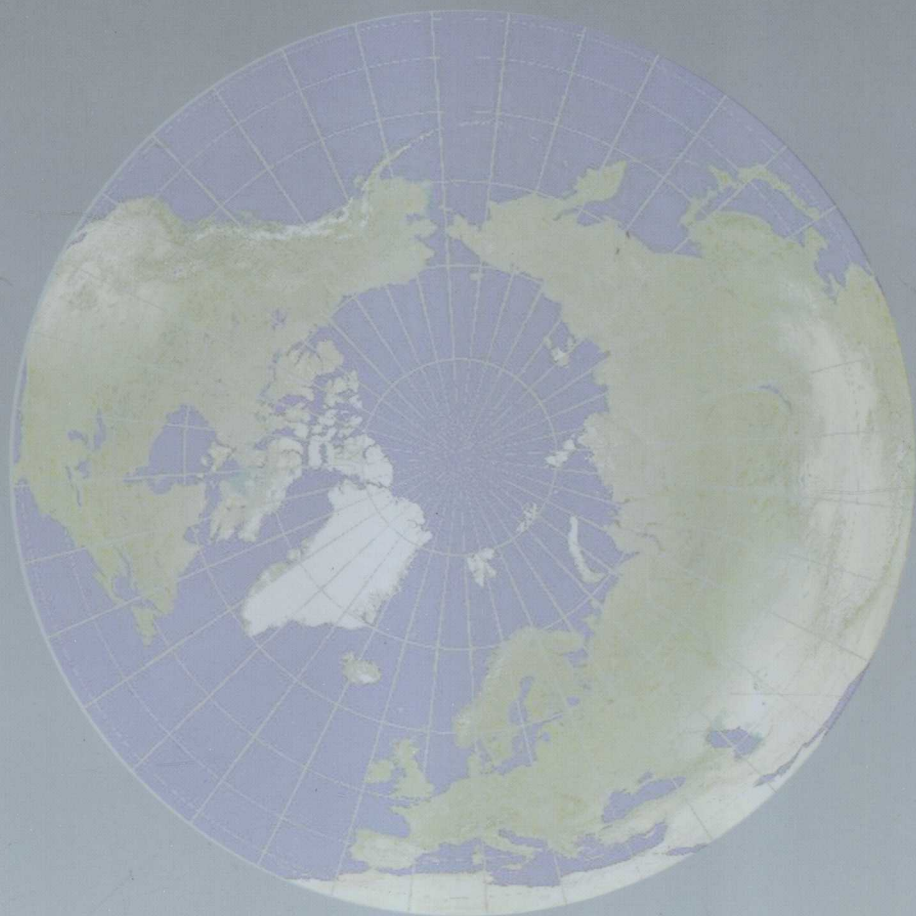


# 大地测量学基础

吕志平 张建军 乔书波 编著



解放军出版社

722  
6

# 大地测量学基础

吕志平 张建军 乔书波 编著

解放军出版社

图书在版编目(CIP)数据

大地测量学基础/吕志平等著. - 北京:解放军出版社,2005

ISBN 7-5065-4892-5

I.大... II.吕... III.大地测量学 IV.P22

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 028397 号

解放军出版社出版

(北京地安门西大街 40 号 邮政编码:100035)

一二〇一工厂印刷 解放军出版社发行

2005 年 6 月第 1 版 2005 年 6 月第 1 次印刷

开本:787 毫米×1092 毫米 1/16 印张:16.25

字数:402 千字 印数:3000 册

定价:40.00 元

## 内 容 简 介

本书系统而全面地讨论了大地水准面与高程系统、参考椭球面与大地坐标系、高斯投影与高斯平面坐标系、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和大地控制网的建立技术。

本书可作为高等院校测绘类各专业本科生的通用教材,对于军地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。

# 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、高程基准、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,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 年发布的《中华人民共和国测绘法》,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。

作为测绘工程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,在几代人的教学实践和编者多年教学经验的基础上,经集体讨论分工编写完成。其中,第一章介绍了大地测量学的任务和作用;第二、三章概括介绍了各类大地测量技术和方法,为体现技术的完整性,适当增加了该部分内容的篇幅,教学过程中可根据教学要求灵活选择其中的内容;第四、五、六、七章是全书的主体,详细讨论了大地水准面与高程系统、参考椭球面与大地坐标系、高斯投影与高斯平面坐标系以及大地坐标系的建立等基本问题。本书是理解和掌握大地测量学与测量工程、摄影测量学与遥感工程、地图制图学与地理信息工程等专业基础知识的基础内容。

本课程的建设列入 2003 ~ 2004 年军队院校“2110”课程建设项目。在教材的编写过程中,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,针对大学本科生的知识基础,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,并作为测量工程后续专业

课程的接口。

本书第一、五、七章和 § 4.1 由吕志平编写,第二、三章和 § 4.2、§ 4.3 由张建军编写,第六章由乔书波编写。全书由吕志平统稿,书中插图由乔书波组织绘制。

本书的编写思路和提纲经系和教研室组织讨论,吴晓平教授、隋立芬教授审阅了全书。

在本书完稿之际,要特别感谢熊介、朱华统、徐正扬、黄继文等教授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富有特色的课程教学体系是本书得以顺利完成的前提。

课程建设是一项长期的任务,编者欢迎广大读者就本书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。

编 者

# 目 录

|                          |       |
|--------------------------|-------|
| 第一章 绪论                   | (1)   |
| § 1.1 大地测量学的任务和作用        | (1)   |
| § 1.2 大地测量学的学科分类         | (8)   |
| § 1.3 大地测量学的发展简史与趋势      | (9)   |
| 第二章 大地测量数据采集技术           | (14)  |
| § 2.1 角度测量               | (14)  |
| § 2.2 距离测量               | (22)  |
| § 2.3 高程测量               | (30)  |
| § 2.4 天文测量               | (37)  |
| § 2.5 GPS 测量             | (47)  |
| § 2.6 重力测量               | (55)  |
| § 2.7 人造卫星激光测距(SLR)      | (63)  |
| § 2.8 甚长基线干涉测量(VLBI)     | (68)  |
| 第三章 大地控制网的建立             | (73)  |
| § 3.1 三维控制网的建立           | (73)  |
| § 3.2 水平控制网的建立           | (83)  |
| § 3.3 高程控制网的建立           | (90)  |
| § 3.4 重力网的建立             | (93)  |
| 第四章 大地水准面与高程系统           | (99)  |
| § 4.1 地球重力场              | (99)  |
| § 4.2 高程系统               | (108) |
| § 4.3 不同高程系统之间的关系        | (113) |
| 第五章 参考椭球面与大地坐标系          | (121) |
| § 5.1 球面三角学的基本知识         | (121) |
| § 5.2 参考椭球               | (123) |
| § 5.3 大地坐标系与大地空间直角坐标系的关系 | (127) |
| § 5.4 法截线与大地线            | (131) |
| § 5.5 地面边角观测元素归算至椭球面     | (149) |
| § 5.6 大地坐标系与大地极坐标系的关系    | (159) |
| 第六章 高斯投影与高斯平面直角坐标系       | (176) |
| § 6.1 地图投影概述             | (176) |
| § 6.2 椭球面到平面的正形投影        | (182) |
| § 6.3 高斯—克吕格投影           | (186) |

|             |                        |              |
|-------------|------------------------|--------------|
| § 6.4       | 高斯平面坐标系与大地坐标系的关系 ..... | (191)        |
| § 6.5       | 椭球面元素归算至高斯平面 .....     | (203)        |
| <b>第七章</b>  | <b>大地坐标系的建立</b> .....  | <b>(219)</b> |
| § 7.1       | 大地坐标系中的欧勒角 .....       | (219)        |
| § 7.2       | 不同大地坐标系的转换 .....       | (222)        |
| § 7.3       | 椭球定位的经典方法 .....        | (227)        |
| § 7.4       | 协议地球参考系 .....          | (231)        |
| § 7.5       | 我国的大地坐标系 .....         | (239)        |
| <b>参考文献</b> | .....                  | <b>(251)</b> |



# 第一章 绪 论

大地测量学是测绘学和地球科学的分支学科。现代科学技术的成就,导致大地测量学经历了跨时代的革命性转变,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 大地测量学的任务和作用

### 一、大地测量学的任务

大地测量学的任务,一是精确确定地面点位及其变化,二是研究地球重力场、地球形状和地球动力现象。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准确的几何位置,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,大地测量学又是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、形态、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、动态和定量的空间信息,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现象的重要手段之一。因此,大地测量学既是一门基础性学科,又是一门应用性学科。

### 二、大地测量的作用

大地测量在国家经济建设、国防建设、地学研究和社会主义信息化进程中有重要的作用,以下简述之。

#### (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:

一是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,使地貌、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,从而保证成图的精度。

二是统一坐标系统。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。

三是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 GPS 定位能以 5~10 分钟的时间(传统方法需要几小时到几天)和厘米级精度测定一个点位;GPS 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(如我国的上海、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,大地定位技术为提高交通效率、减少交通事故提供了重要保障。

在古代,中国发明的指南针以及古代天文学家创造的天文导航方法开创了人类航运史,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。古老的大地定位技术推动着人类社会文明的发展。

交通运输对大地定位信息的需求量、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(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;目前我国公路上汽车流量猛增,据统计近年我国公路交通发生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 GPS 汽车自动定位显示和反应系统已可望普及,这一导航设备将可有效地控制汽车交通事故;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,为大幅度减少交通事故,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应用和国防建设中的作用

空间技术、空间科学的发展水平是当今评估一个国家综合科技水平和综合国力的重要指标,也是评估一个国家国防能力的重要标志。

卫星、导弹、航天飞机和行星际宇宙探测器的发射、制导、跟踪、遥控以至返回都需要两类基本的大地测量保障:一是有一个精密的地球参考框架以及地面点(如发射点和跟踪站)在该框架中的精确点位;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)。参考框架所属坐标系统包括惯性参考系,如国际协议惯性参考系(CIS),以及地球参考坐标系(通常指地心地固参考系),如国际协议地面参考系(CTS)。CIS可用于描述卫星和宇宙飞行体在惯性坐标系的运动,它由分布于整个天球的稳定射电源和恒星的已知天球坐标(赤经、赤纬)实现;CTS用于描述卫星和导弹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,CTS的建立包括确定其坐标轴的定向和一个由4个基本参数( $a$ 、 $J_2$ 、 $\omega$ 、 $GM$ )定义的正常地球椭球。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 GEM-T3 可保证低轨卫星(如 TOPEX 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,研究宇宙飞船上的试验物的微重力效应,高精度的地球重力场模型为这一研究提供了主要依据。

洲际导弹是当今主要战略武器,射程在 7000km 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 1~2km 落点偏差,对 3000~5000km 的中远程导弹可产生 200~500m 的落点偏差。发射点垂线偏差在这一射程上也可产生 1km 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)都必需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 200m 落点偏差,因此需要精确的方位角来减小这一误差。

精确定位定向、准确判识地形要素和确定地球重力场参数是现代战争所要求的基本大地测量保障,也是常规武器战争发展到高技术武器战争对军事测绘保障的基本要求。高技术战争的核心是“快”和“准”,因此保证首战取胜,提高武器系统自生存能力成为现代战争的重要军事原则,从而对军事测绘保障提出了新的更高的要求。军事行动所要求的地形信息保障不再像常规战争那样只需要提供局部战区的静态(纸质)军用地图和沙盘模型,现代高技术战争的展开更需要动态实时提供军事目标地区的地形信息;需要数字地图或数字地形信息库,以及能描述打击目标区场景特性的数字影像地图;另一个重要发展是,地形信息产品不仅是指挥员指挥军事行动的工具,而且成为运载型武器系统甚至弹头本身的一个组成部分,用以识别运动路线和目标区的地形要素。这就构成了现代高技术战争条件下所要求的高技术军事测绘保障,包括快速卫星定位导航技术、卫星重力技术、航天测绘遥感遥测技术、数字摄影测量和影像匹配技术等。

现代军事测绘保障大致可分为超前储备保障和动态实时保障两类。卫星技术在这两类保障中都起着重要的作用,据统计,到 20 世纪 90 年代全世界共发射的近 4000 颗卫星中,70% 以上是用于军事目的,包括侦察卫星、导航定位卫星、测地卫星、通讯卫星和气象卫星等,前三种

卫星直接服务于军事测绘保障,侦察卫星可实现对战区全纵深全天候的全时侦察和实时预警,及时提供敌方军事设施、要害部门和经济命脉的准确地理位置,实时监控军力的集结和运动,发现导弹的发射和测算飞行弹道,及时发出预警。导航定位卫星是主要的大地测量保障系统,如美国的全球定位系统(GPS),可提供兵器的快速准确定位,实现运动兵器的精密导航,保障超远程战略打击的实施,自动跟踪战场己方部队。测地卫星主要用于测绘超前储备保障,对战区和敌方大本营进行大面积摄影覆盖,拍摄军事目标和地形图像用于制作军用数字地形图,测算打击目标的精确三维坐标,存储待用。

动态实时测绘保障还用于提高战役、战术制导武器的命中精度,这些武器称为精确制导武器,如巡航导弹、激光炸弹、拦截导弹等。为实现首战取胜和确保武器使用后的自生存,这类武器要求有 1m 左右的命中精度,主要采用卫星定位、地形高程匹配和数字影像匹配技术。以美军在海湾战争中大量使用的“战斧”巡航导弹和“爱国者”拦截导弹为例,“战斧”巡航导弹采用了惯性制导(或 GPS 制导)加数字地形影像匹配制导技术,根据预先存储的导弹航行路线及目标的地形信息数据,军事测绘部门按每枚导弹的飞行路线及攻击目标,分别做出数字地图和数字影像地图装入导弹,导弹按地形高程匹配系统隐蔽飞行,不断修正飞行路线,当距目标 15km 时,视觉系统启动工作,这个系统是由一种可见光近红外传感器以及“数字影像相关匹配系统”组合而成,视觉系统现场获取目标区影像,经处理转换作为样本存储在该系统中,导弹接近目标上空时,根据该系统与计算机中所存储的目标地形及影像数据进行影像匹配对照,直至击中目标。“爱国者”拦截导弹能以 80% 以上的概率击中超音速飞行的“飞毛腿”导弹,重要原因之一也是因为有良好的定位、高程数字地图(DEM)等良好的测绘保障。首先由预警飞机(或侦察卫星)发现“飞毛腿”发射飞行,利用快速定位技术测算导弹飞行轨道和落点并进行预报,“爱国者”导弹地面控制中心接到预警预报后,利用定位、数字地图、相控体雷达精确跟踪测定“飞毛腿”导弹的弹道,并控制导弹发射架,安置和修正发射诸元(数据),一般在 7 分钟可实施拦截。

军事测绘在高技术战争中直接参与指挥和决策,在指挥、控制、通信和情报系统(C<sup>3</sup>I 系统)中,军事测绘高技术成果,如单点定位系统、数字地图、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这些军事测绘产品为依托,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,在保障最高指挥部与各参战部队之间指挥与控制信息畅通中发挥重要作用。

从古代战争到现代战争,都需要相应的军事测绘保障,未来的战争是高技术战争,军事测绘保障作为综合战斗力的重要组成部分,在高技术条件下,其作用将更显得突出,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的几何(空间)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导致了地球科学的革命性进展,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的获取地球活

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、地壳形变量化模型有了新的手段。

甚长基线干涉测量(VLBI)、卫星激光测距(SLR)和GPS能以大致1mm/年的速度测定精度测定板块相对运动速度,由测定数据直接计算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,以期最后将板块内部形变的概念统一起来。

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、地幔地核的弹性和粘弹性假定等),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IAU1980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(张德勒摆动)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,潮汐磨擦耗散,气候季节性变化引起的旋转角动量变化,核幔粘弹结构,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。现在大地测量已制定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,这些大地测量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。也可以说,大地测量对地球科学的贡献,可以归结为下列两个最基本的方面:



- (1) 提供地球对于已知力的响应的度量;
- (2) 提供求解作用于地球的力的约束。

#### (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细的重力资料是必不可少的基础资料。例如,20世纪80年代初在我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;应用海面无线电定位,特别是GPS海洋定位,联合声纳海底定位可建立海洋三维大地测量控制网,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。

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。像我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。地球温室效应是喜是忧,现在在科学上还没有定论,一些科学家论证地球有温度“自我调节”功能,不必杞人忧天;农林学家声称温室效应有助于农作物增产和某些树种的发育生长;气象学家则认为温室效应将造成大气海洋环流异常使未来灾害天气频发;生物学家担忧地球平均气温增高将加速某些物种灭绝。尽管众说纷纭,但对温室效应的影响已引起各国科学家的普遍重视,这一问题被列为1992年世界环境与发展问题大会重要议题就是一个例证。温室效应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0.5~1.5mm的上升速度,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,以便在精确的地心地球参考框架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可监测到极地冰融产生的重力变化,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。

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(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。就我国而论,国家有关部门估计单地质灾害年损失为 274 亿元,在灾害频发的年代,各种自然灾害造成的损失高达国民生产总值的 1/6。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,大地震成功预防率只有 20%,反映了科学对地球的认识还很肤浅。提高人类预防和避免自然灾害的能力还要作长期的努力。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,特别是空间大地测量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。今后,随着监测数据的积累和完善,地震预报理论和实践可望有新的突破。

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,致使地球一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受到人们的重视,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,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 快速定位和卫星通讯技术,使国际救援组织能迅速判明出事地点及时组织救援行动。

## § 1.2 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来分,可分为理论大地测量学、大地控制测量学、海洋大地测量学和工程大地测量学。理论大地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。

理论大地测量学、大地控制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。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。

大地测量学按其所研究的地球的时空属性来分,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。动力大地测量学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,并作出物理解释。整体大地测量学是将几何和物理空间统一起来,在时间空间参考系中,将大地测量学的一切几何观测和物理观测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来分,可分为地面大地测量学(常规大地测量学,或称天文大地测量学)、空间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 50km)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。

当前,大地测量学正处在技术革命的历史转变过程之中,学科的内涵也随之有新的扩展。以空间大地测量为主体的新的大地测量技术体系正在完善,这一新的技术体系能比旧的体系提供更为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的基础性学科的地位。



## § 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,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  $\gamma$  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 年法国的克莱洛(A. C. Clairaut)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。

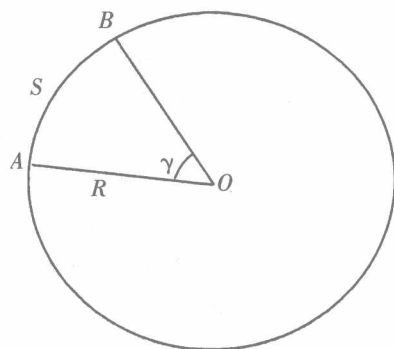


图 1.1 子午圈弧长

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, 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,以至得出了负的扁率值,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。