

21世纪普通高等院校规划教材

测绘专业

DADI CELIANGXUE
GAILUN

大地测量学 概论

郭群长 李仲勤 李 辉 编著



西南交通大学出版社
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

21 世纪普通高等院校规划教材——测绘专业

大地测量学概论

郭群长 李仲勤 李辉 编著

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

内 容 简 介

本书全面系统地阐述了大地测量学的基础理论,重点介绍了大地测量应用的技术和方法。

全书共有9章:第1章绪论,介绍了大地测量学的任务、内容及其历史与发展趋势;第2章介绍了大地测量中涉及的坐标基准、高程基准、时间基准和重力基准;第3章介绍了用几何大地测量建立水平控制网、高程控制网和工程测量控制网的方法;第4章介绍了椭球大地测量学有关内容,重点介绍了地面观测元素的归算;第5章介绍了建立大地坐标系的方法及常用大地坐标系;第6章简要介绍了物理大地测量学的基本理论;第7章介绍了空间大地测量学的理论、技术和方法;第8章介绍了误差理论及测量平差的基本方法;第9章结合地质和土木工程专业工作需要,介绍了几种常用的大地测量作业技术。

本书是高校地质和土木工程专业本科生的教学用书或参考书,也可供测量工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

大地测量学概论 / 郭群长, 李仲勤, 李辉编著. — 成都: 西南交通大学出版社, 2009.4

21 世纪普通高等院校规划教材. 测绘专业
ISBN 978-7-5643-0235-1

I. 大… II. ①郭…②李…③李… 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 (2009) 第 042744 号

21 世纪普通高等院校规划教材——测绘专业

大 地 测 量 学 概 论

郭群长 李仲勤 李辉 编著

*

责任编辑 王 旻

封面设计 翼虎书装

西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段 111 号 邮政编码: 610031 发行部电话: 028-87600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

成都蓉军广告印务有限责任公司印刷

*

成品尺寸: 185 mm×260 mm 印张: 18.625

字数: 464 千字 印数: 1—3 000 册

2009 年 4 月第 1 版 2009 年 4 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5643-0235-1

定价: 35.00 元

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

前 言

大地测量学既是测绘科学的基础,也是地球科学的基础,它与人类社会的发展息息相关,是随着人类对地球认识的逐步深化、人类社会的进步以及科学技术的发展而形成和发展的。大地测量学由几何大地测量学、椭球大地测量学、物理大地测量学、空间大地测量学、测量平差等分支学科组成。本书将对大地测量学基础理论进行系统性介绍,旨在为高等院校地学专业和土木工程专业师生提供大地测量教学用书或参考书,也可供从事测绘工作的工程技术人员参考。

本书依据大地测量学的发展现状,结合大地测量工作实践编写而成。编写过程中,力求做到理论联系实际,通俗易懂,既兼顾大地测量学的发展趋势,以体现整个大地测量学的基本概念、基本理论,又能反映出大地测量学研究的最新成果。在前8章介绍大地测量基础理论的基础上,第9章介绍了常用大地测量作业技术,使理论与实践相结合,以便读者在学习基础理论的同时,掌握工作中常用的大地测量作业技术。附录提供了大地测量和工程测量作业技术标准、常用大地测量术语和常用缩写词,以便在学习和工作中查阅参考。

全书共9章,其中第1、2、4、6章由郭群长编写,第3、5、9章由李仲勤编写,第7、8章及附录由李辉编写,书中插图由李辉绘制,全书由郭群长策划并统稿。本书初稿完成后,先在兰州交通大学相关专业教学中进行了试用,在此基础上又作了进一步修改。

本书编写过程中,参考和引用了有关学者的文献和大地测量相关技术标准,在此表示衷心的感谢!对书中存在的不足,恳请读者批评指正。

编 者

2008年11月

目 录

第1章 绪 论	1
1.1 导 言	1
1.2 大地测量学的任务及其研究内容	1
1.3 大地测量学的简要历史	4
1.4 新中国大地测量建设成就	6
1.5 大地测量学的发展趋势	11
第2章 大地测量基准	13
2.1 大地水准面和参考椭球	13
2.2 坐标系	15
2.3 高程基准与深度基准	23
2.4 时间基准	26
2.5 重力基准	28
第3章 几何大地测量学	31
3.1 天文测量	31
3.2 国家水平控制网的建立	35
3.3 国家高程控制网的建立	40
3.4 工程测量控制网的建立	45
第4章 椭球大地测量学	49
4.1 椭球的数学性质	49
4.2 地面观测元素归算至椭球面	58
4.3 地图投影	62
4.4 椭球面元素归算至高斯平面	80
第5章 大地坐标系的建立	90
5.1 参考椭球的定位和定向	90
5.2 我国的参心大地坐标系	92
5.3 地心坐标系的建立	95
5.4 几种地心坐标系	97
第6章 物理大地测量学	102
6.1 地球重力场	102

6.2	重力测量	106
6.3	重力测量方法确定地球形状	112
第7章	空间大地测量学	115
7.1	空间大地测量的发展	115
7.2	卫星大地测量	129
7.3	GPS 控制网的建立	169
7.4	卫星大地测量的应用	177
第8章	误差理论与测量平差	184
8.1	概 述	184
8.2	误差理论与最小二乘原理	186
8.3	常用平差方法	204
8.4	近代平差概论	224
8.5	大地网优化设计	226
8.6	地面网与空间网联合平差简介	231
第9章	常用大地测量作业技术	233
9.1	大地测量作业流程	233
9.2	三角测量和导线测量	234
9.3	高程测量	256
9.4	GPS 测量	262
附录1	大地测量和工程测量作业技术标准	275
附录2	常用大地测量术语	279
附录3	常用缩写词	290
参考文献		291

第1章 绪论

1.1 导言

大地测量这一术语由来已久。古时候,人们为了进行狩猎和耕种活动,需要划分土地,分配给共同生活的成员,于是希腊语中出现了“地球我划分”这个词。该词是指划界和地籍测量这一类的工作,相当于现在的普通测量。后来,在英语和法语中,这一术语的含义有了扩充,用于指大地测量学。

德国的赫尔默特(F.R.Helmert)于1880年提出了大地测量学的经典定义:大地测量学是测绘地球表面的科学。直到现在,这一定义尚未失去它的准确性,它包括测定地球外部重力场和测绘海底表面,说明大地测量学属于地球科学。

空间大地测量及其他高新技术的出现,使传统大地测量受到了巨大的冲击。因此,经典大地测量学的定义已不适用,必须加以扩充。为此,20世纪70年代,费歇尔(I.Fisher)等人提出了所谓大地测量学问题,试图部分地扩充赫尔默特的定义:大地测量学问题是把地球和其他天体的形状和外部重力场作为时间函数来确定,并利用在地球表面上和在地球之外观测的参数来求定平均地球椭球。这一定义把地球和其他天体的形状和重力场看成是随时间变化的;大地测量的观测数据不只是在地球表面取得,也可从地球的外部空间取得;大地测量除了测地之外,还可测其他天体的形状和重力场。同经典大地测量学定义比较,它有了很大程度的改进,但还不够充分。目前还没有一个权威性的大地测量学定义。

由于地球形状和外部重力场的测定是全球性的工作,大地测量很早就有了国际协作组织。1886年成立了国际大地测量协会(IAIG),1919年又成立了国际大地测量学和地球物理学联合会(IUGG),IAIG成为该联合会所属的7个协会之一。IAIG和IUGG的学术活动一直延续至今,而且日益兴盛,凸显出了大地测量学在地球科学中的重要地位。

1.2 大地测量学的任务及其研究内容

1.2.1 大地测量学的任务

大地测量学的主要任务有以下三个方面:①在广大面积上建立一系列地面点构成的大地控制网,以精密确定地面点的位置及随时间的变化规律,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、导弹和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研究和测定地球形状、大小及其随时间的变化规律，为大地控制网、地球科学和空间科学提供基准面和基础数据；③研究和测定地球重力场及其变化规律，为大地控制网的归算、人造卫星精密定轨、远程武器的精确打击和地球物理反演、地震预报等提供必要的资料。

1.2.2 大地控制网的作用

建立大地控制网是大地测量的重要任务，大地控制网的作用可概括为以下四个方面：

1. 控制地形测图

地球的形状近似一个椭球，在小范围内测绘地形图可不考虑地球的曲率，而在全中国范围内测绘和编制各种比例尺地形图时，必须把地球看成一个曲面。但椭球面是一个不可展开的曲面，解决方法是在测图前进行大地测量。在全国范围内布设大地控制网，精确测定网中各大地点的平面坐标和高程，按一定的数学方法将这些点投影到平面上，构成一个完整的、精确的测图控制系统。根据这些点进行测图，就能使地球表面上的地貌、地形测绘到平面上，而且还可保证各地区同时开展测制的地图拼接时而不产生明显的变形和裂口，有效地控制测图时产生的误差累积，把误差限制在控制点之间，确保地图的精度。

2. 为经济建设和国防建设提供控制基础

在经济上，开发矿山资源、建设工业基地、建设铁路、建设高速公路、兴修水利工程、建设开发区和国土综合治理等各项经济建设，不仅需要各种比例尺地形图进行规划设计，还需要直接利用大地测量成果。

在军事上，常规火炮和远程导弹的发射和精确打击，要保证命中几十公里、几百公里，甚至上万公里以外的打击目标，首先必须知道发射点和打击点的精确坐标、距离和方位；其次要标定火炮在某一坐标系下方位标的方位和天文坐标系，这是大地测量所要完成的一项重要任务。GPS 导航定位技术，是现代精确制导武器重要的制导手段。在国防建设中，如军事基地、机场、军港、地下设施、边疆和海疆的标定，都需要大地测量保障。试验洲际导弹的命中精度时，要在导弹飞行的沿线地面设立许多跟踪站（海上飞行时由大型测量船跟踪），以观测导弹飞行轨道，并要测量发射场周围的重力异常，以计算轨道的重力修正。这些跟踪站间距离上千公里，站间位置的相对精度要高于 0.5×10^{-6} ，都是通过大地控制测量和重力测量来保证。

3. 为确定更精确的大地基准、大地坐标系和研究地球形状提供资料

大地测量中所测定的地球大小是指测定地球椭球的参数，研究地球的形状是指研究大地水准面的形状。椭球的形状可以用长半径和短半径来表示，也可以用长半径和扁率来表示，要精确测定椭球参数长半径、短半径（或扁率），就必须综合利用大地控制测量、天文测量、重力测量和卫星大地测量资料。

大地测量是在地球表面上进行的，为了正确处理大地测量成果，就必须知道表示地球椭球的长半径和扁率。大地测量为确定地球形状提供资料，而所确定的地球椭球面又反过来作为大地测量成果计算的基准面，这是相辅相成、逐步趋近的过程。由于大地测量手段、方法和精度的不断改进和提高，特别是卫星大地测量手段的出现，目前对地球椭球参数的确定已

达到相当高的精度。

具有确定几何参数的地球椭球辅之于定位、定向参数和物理参数则构成相应的大地基准,以该大地基准为基础形成的坐标系,即为大地坐标系。

4. 为地球物理学、地球动力学、地震学和海洋学等基础科学研究提供数据

地球和其他物质一样,是在不断运动和变化的,如地壳的水平移动和垂直升降、大陆漂移、海洋面高度变化、地球两极的周期性运动等,这些运动都影响着大地测量的结果,反过来通过长期重复测量、综合比较分析新旧大地测量资料,就可以发现该地区地壳变化情况,板块运动使大西洋以平均每年 2.5 cm 的速度扩大,地球表面温度的升高使海平面以每年 2.1 mm 的速度上升,这些都是通过比较重复大地测量资料所获得的结论。地球重力场变化更是地球内部密度和结构变化的直接反映,高精度的重力场数据结合地震波数据可以反演地球的内部结构和地球内部动力学机制,结合卫星测高数据,可以反映海面地形和海洋环流,极大地丰富人类对地球内部的了解。

1.2.3 大地测量学研究的内容

大地测量学是研究确定地球及其他天体的形状、大小、重力场、表面位置、本体运动和空间运动等问题的学科。在长期的发展过程中,大地测量研究的内容已经具有一定特色,并形成若干分支的学科。

1. 大地控制测量学

传统的大地测量是研究布设大地网的理论和方法的,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。研究控制网的设计与布设,测量仪器的原理、检验和使用,测量方法的探讨以及成果的检核等内容的学科,称为应用大地测量学或大地控制测量学。

2. 椭球大地测量学

由于地球表面是不规则的,计算大地网中各控制点位置时,必须选用一个基准面。地球近似于一个旋转椭球,显然使用与地球接近的椭球面,可以解决测量数据的计算问题。长期以来,地形图是以平面形式表示的,控制点还要按一定的方法从椭球面投影到平面上,如我国使用的是高斯投影面。有关研究椭球大小、椭球定位、椭球面数学理论、椭球面与平面或其他曲面关系的理论和投影的学科,称为椭球大地测量学。

3. 大地天文学

在大地网的某些点需要观测天体的位置来确定其天文经纬度和至某一方向天文方位角,从而为大地网归算提供资料,提高网的精度;遥感卫星需要用 CCD 摄像机拍摄以恒星为背景的图像,以确定卫星的有关姿态信息;军事上,潜艇使用的星光仪,也是通过观测恒星来确定潜艇的位置。研究天文测量的基础理论、仪器使用、测量方法及测量成果计算处理等内容的学科,称为大地天文学。

4. 物理大地测量学

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,当重力资料足够多时,可以推算地球椭球的扁率 and 大地水准面。现代空间技术的发展,使人们可以用卫星摄动分析、卫星测高、卫星跟踪卫星和卫星重力梯度测量等手段,以较高的分辨率和较好的覆盖性测量地球表面及近地空间的重力场。研究地球形状的基础理论、重力测量的原理和方法、重力测量数据的处理算法以及重点在大地测量、空间技术和地球科学等其他领域应用等内容的学科,称为大地重力学或物理大地测量学。

5. 误差理论与测量平差

测量必然有误差,为了保证大地控制网的质量,需要增加剩余观测。为提高大地网的精度和可靠性,需要依据数理统计原理进行网的平差,以获得点位坐标和高程比较可靠的估计值。运用有关概率统计理论进行观测误差的分析和观测数据的处理的学科,称为误差理论与测量平差。

6. 卫星大地测量学

传统的大地测量仅限于在陆地范围内进行,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坐标系,但不能解决全球性的计算问题。1957年,世界上第一颗人造卫星发射后,可以以卫星为观测目标实现洲际联测,以分析卫星的摄动运动来确定地球重力场的低阶数。空间技术的出现,使传统的大地测量带来了革命性的变化,如卫星测高、卫星跟踪卫星、卫星重力梯度测量等,但影响最为广泛的还是全球卫星定位系统,即GPS。研究卫星轨道分析理论、卫星精密轨道测量技术、卫星测高技术、GPS大地网布设理论等内容的学科,称为卫星大地测量学或空间大地测量学。

7. 惯性大地测量学

在惯性导航基础上发展起来的惯性大地测量,它可实时地提供测量数据,且机动灵活不受天候限制,并在工程测量、矿山测量和海洋测量中得到应用。研究惯性测量的原理和方法、数学模型、误差分析和数据处理等内容的学科,称为惯性大地测量学。

此外,大地控制测量学和大地天文学是用几何方法,亦即天文大地方法测定地球形状、大小和地面点的几何位置的,所以统称为几何大地测量学或天文大地测量学。

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、空间大地测量学、惯性大地测量学等分支学科组成。与其他学科的联系越来越紧密,内容也日益丰富,分支也逐渐增多。本书紧密结合普通高校地学专业教学的需要,将综合介绍几何大地测量学、椭球大地测量学、物理大地测量学、空间大地测量学、测量平差等分支学科的内容。

1.3 大地测量学的简要历史

地球科学的发展与人类社会的发展息息相关。作为地学基础的大地测量学也是如此,它是随着人类对地球认识的逐渐深化和人类社会的发展而形成和发展的。

为了认识世界,人类首先想的是了解他们赖以生息和繁衍的地球的形状和大小。公元前6世纪后半叶,希腊学者毕达哥拉斯(Pythagoras)提出了地为球状的说法,称为地圆说。大约两个世纪之后,亚里士多德(Aristotle)用物理方法作了论证,支持这一学说。

为了测量地球大小,公元前3世纪亚历山大学者埃拉托斯特尼(Eratosthenes)首创子午圈弧度测量法,以推算地球半径。埃拉托斯特尼观察到尼罗河上游色尼(今阿斯旺)在夏至正午时,日光正好直射井底,但在同一时刻北面的亚历山大地方日光向南偏出一个角度,与垂直方向构成约 7° 的圆周角。根据骆驼商队行走的时间估计两地相距5 000 stadia(古希腊长度单位,1 stadia 约为185 m),并认为两地在同一子午线上(实际经度相差约 2°),估算了地球半径约为40 000 stadia。尽管1 stadia 等于多少米的看法不一致,但这是人类应用弧度测量概念对地球大小的第一次估算。

实地子午圈弧度测量,是公元8世纪20年代在中国中原大地上进行的。公元724年我国唐代的南宫说等人在高僧一行(俗名张遂)的指导下,在今河南省滑县至上蔡实测了一条约300 km的子午弧长,并在滑州、开封、扶沟、上蔡等四个地方,测量了同一时刻的日影长和北极星高度,日影长之差或北极星高度之差实际上代表了纬度差。所以,这是世界上第一次弧度测量的实践。

1615年荷兰的斯涅耳(W.Snell)创立了三角测量法。这一方法的出现,克服了地形引起的障碍,从而结束了过去粗略估计或直接在地面上丈量几百公里距离的历史,有力地促进了大地测量的发展。

1665—1666年,牛顿提出了万有引力定律。为了定量地证实这一伟大的科学发现,要求知道地球的精确大小。1687年,牛顿基于万有引力定律,又提出了地球是一个两极扁平的旋转椭球的说法,称为地扁说。

物理学的发展促进了大地测量学的发展。这时大地测量学科已初步形成,法国的皮卡(J.Picard)于1669—1670年第一次用三角测量方法进行了高精度弧度测量,得出了作为球状的地球大小,从几何学的观点定量地证实了牛顿万有引力定律。为了得到关于地球形状的正确答案,法国科学院于1735—1744年,在秘鲁和北欧的拉普兰进行了弧度测量。将秘鲁、拉普兰和法国巴黎的弧度测量作了比较分析之后,又从几何学观点证实了地扁说。

1708—1718年,我国清朝康熙年间,为编制《皇舆全图》进行了大规模天文大地测量,发现高纬度东北地区每度子午线弧比低纬度河北地区的要长,这个发现比法国科学院要早,当时还规定一度子午弧长为200市里来确定长度计量单位。这是世界上第一次把长度单位与地球子午线长度联系起来。

1792—1798年,由法国人德兰布尔(Delambre)领导的测量队进行了从法国到西班牙的弧度测量,综合法国和秘鲁的测量结果,第一次在近代地球形状理论上导出了地球椭球模型。并取子午圈一象限弧长的 $1/4$ 作为长度单位,命名为1 m,这是世界上通用米制的起源。

18世纪至20世纪初,大地测量的理论方法和仪器又有了巨大的进展。在理论方面主要有:

1743年,法国人克莱劳(Clairaut)发表《地球形状理论》,提出了用重力精确求定地球扁率的方法。

1806年法国人勒让德(Legendre)和1794年德国人高斯(Gauss)提出最小二乘法并用于天文大地测量成果处理,产生了平差理论,至今仍广泛应用于大地测量和其他学科中。

1822年,高斯发表了椭球面投影到平面的保角映射理论,稍后德国测量学家克吕格(Kruger)加以发展形成了今天仍广泛使用的高斯-克吕格投影,简称高斯投影。

1849年,英国人斯托克斯(Stokes)提出将地面重力测量值归算至大地水准面这一特殊的等位面上确定大地水准面的理论,开创了大地测量特别是物理大地测量的新纪元,这一理

论至今仍在广泛应用。但是,地壳密度假设是斯托克斯理论的缺陷。

1945年,苏联地球物理学家莫洛金斯基(Molodensky)放弃地球密度假设,提出一种不需任何归算,直接利用地球表面重力测量数据确定地球形状的理论,称为Molodensky理论,这个理论已被许多国家采用。我国采用的正常高和高程异常系统,就属于Molodensky理论体系。

20世纪60年代以来,空间大地测量的出现使大地测量发生了巨大变革。有人把变革前的大地测量称为传统大地测量学,变革后的大地测量称为现代大地测量学。传统大地测量学包括几何大地测量学和物理大地测量学;现代大地测量学除了传统大地测量学分支外,还增加了卫星大地测量学、动力大地测量学和海洋大地测量学等新的分支学科。相继出现的理论和技术主要有:

1957年,苏联第一颗人造卫星发射后,许多大地测量学家致力于卫星轨道摄动分析求解地球位系数,其中具有代表性的是美国学者考拉(Kaula)。1966年考拉在其著名的《卫星大地测量学理论》中,全面总结了卫星大地测量轨道摄动理论。20世纪70年代出现的卫星测高技术,解决了长期未能解决的占地球70%左右海洋地区重力空白区问题,并初步确定了海面地形,直到现在对卫星测高的研究仍未停止,其影响还在继续。

20世纪80年代发展起来的全球卫星定位系统GPS,使大地测量又一次发生了具有深远影响的革命性变革,使定位变得极其方便和快捷,其意义和作用世人皆知。

2000年前后发射的CHAMP卫星和GRACE卫星利用卫星跟踪卫星技术,能以较高的分辨率和精度在近地空间确定地球重力场。

1.4 新中国大地测量建设成就

我国自18世纪初为编制《皇舆全图》而进行大地测量工作后,很长一段时间几乎没有开展大地测量工作,直至清末1895年才设立测绘学堂。1930年开始正规的大地测量,直到1949年布设了约 2×10^3 km的一等大地控制网,精度较低。中国大地测量工作的全面展开,是军委测绘局和国家测绘总局成立之后,颁发了大地测量法式和相应的技术细则规范,布设了全国天文大地网、高程控制网、重力基本网等。20世纪80年代末期以来,GPS技术在我国得到更加广泛的应用,传统的大地控制网已难以满足国家各项建设和科学研究的需要,国家测绘局、总参测绘局和国家地震局在20世纪90年代先后建成了国家高精度GPS A、B级网,全国GPS一、二级网和全国GPS地壳运动监测网络等三个全国性GPS网,这三个网构成了2000国家GPS大地网。全国三级GPS网正在建设中,将构成我国新一代大地控制网。我国是目前世界上第三个拥有自主卫星导航定位系统的国家,已建成的“北斗一号”区域性卫星导航定位系统于2003年12月正式开通服务,可为军队和地方用户提供区域性快速定位、简短数字报文通信和授时服务。第二代卫星导航定位系统正在建设中。

1.4.1 国家天文大地网

国家天文大地网是按统一的规划于1951年开始布设的。首先从北京出发向东部沿海地区推进,然后转向中部、东北、西南和西北,历时25年,于1975年完成。期间,当连续的三角锁(网)于1959年延伸到青藏高原时,限于自然条件,改为布设电磁波测距导线,于1962年完成。

作为天文大地网骨干的一等三角测量,由沿着经线和纬线布设的、互相交叉的纵横三角锁系构成。相邻纵横锁系的间隔,即每个锁段的长度,一般为200~250 km。一等三角锁一般由接近等边的三角形组成,平均边长25~30 km。一等三角锁段两端测设起始边,作为天文大地网的尺度控制。起始边由基线网传算而得,或直接丈量而得。在起始边或一条三角边的两端测定天文经、纬度和方位角,由天文经度和方位角求定双向拉普拉斯方位角,作为天文大地网的方位控制。在每一锁段中央附近的一个三角点上,也要测定天文经、纬度,以求定垂线偏差之用。

沿一等三角锁系50 km宽的地带,布设天文重力水准路线。

二等三角锁有两种布网方式,一种布网方式是1958年前,用两条二等三角锁将一等锁环划分为4个或6个大致相等的区域,每一区域内布设连续的二等补充网;另一种布网方式是1958年后,改用二等全面网,即在一等锁环内直接布满二等网。

青藏高原的一、二等电磁波测距导线布设成周长一般为1000~2000 km的环状。沿线每隔100~150 km的一条边的两端上测定天文经、纬度和方位角,以提供方位控制精度。导线边长为10~30 km。

从1951—1975年共25年时间建立起来的中国天文大地网包括:

一等三角锁系:共有5206个三角点,构成326个锁段,这些锁段形成120个锁环,全长7.5万 km;

二等三角点:33478点;

青藏高原导线:一等导线22条,全长约1.24万 km,426点;二等导线48条,全长约6800 km,400点;

一、二等起始边:467条;

拉普拉斯方位角:458个;

用于推算垂线偏差的天文点:2218个;

天文水准和天文重力水准路线:全长 6.4×1 万 km。

该网的观测精度列于表1.1中。

表 1.1 天文大地网的精度统计

等 级	精 度
一等三角锁	按三角形闭合差计算的测角中误差: $\pm 0.55''$ (规定小于 $\pm 0.7''$); 起始边相对中误差小于 1:35 万
一等天文观测	天文经度中误差: $\pm (0.01'' \sim 0.02'')$; 天文纬度中误差: $\pm 0.2''$; 天文方位角中误差: $\pm 0.5''$
第一种二等三角锁网	按三角形闭合差计算的测角中误差: 二等基本锁小于 $\pm 1.2''$; 二等补充网小于 $\pm 2.5''$
第二种二等三角全面网	按三角形闭合差计算的测角中误差: $\pm 1.0''$
电磁波测距导线	测角中误差: $\pm 1.0''$; 光电测距相对中误差: 1:50 万; 微波测距相对中误差: 1:20 万

1.4.2 国家水准网

国家水准网是按国家统一规范测定高程的水准点所构成的网,以适应经济建设、国防建

设和科技发展的需要。中国国家水准网中水准点的高程,由4个等级的水准测量来测定。一等水准测量路线沿地质构造稳定和坡度平缓的交通路线布满全国,构成网状,全长约93 360 km,构成100个闭合环,其周长一般在800~1 500 km;青藏高原和沙漠戈壁地区比较稀疏,个别环周长达2 000~3 000 km。一等水准环内布设二等水准网,是国家高程控制的全面基础。二等水准路线总长13.7万 km,将一等水准环划分为较小的环,其周长一般在300~700 km。三、四等水准测量直接提供各种工程建设所必需的高程控制点。

我国的一、二等水准测量统称为精密水准测量,要求采用精密的仪器施测,而且实施往测和返测;一、二等水准测量由往、返测之差计算的每千米高差平均值的中误差分别不大于 ± 0.5 mm和 ± 1 mm。

我国的一、二等水准路线都需要定期进行重复测量,以测定现代地壳垂直运动;也需要实施重力测量,以供计算重力异常改正。

国家各等水准点的高程,都以设在青岛观象山上的水准原点的高程推算。由黄海平均海水面起算的高程称为绝对高程或海拔高程。我国的一等水准网是1985年完成的,其基本情况如下:

(1) 采用1985国家高程基准,海南岛的一等水准测量采用同步验潮结果传递方法被纳入这一基准中。

(2) 参加平差的共有大陆上99个闭合环,海南岛第47号闭合环,未构成环的6条水准路线和42个验潮站上的水准点高程。

(3) 平差用观测高差进行,采用不等权条件平差法。水准网按环线闭合差计算的每千米水准测量高差全中误差为 ± 1.0 mm,平差后每公里中误差为 ± 1.15 mm。

1.4.3 国家重力基本网

重力基准网是重力测量的基准,而重力加密测量则是全面的重力测量。新中国成立前旧中国没有建设重力基准。新中国成立后,曾先后建立了“1957重力系统”、“1985重力系统”和“国家2000重力基准网”,关于这三个系统的详细情况将在第二章进行介绍。

1.4.4 国家高精度GPS控制网

我国已建成的高精度GPS网主要有:全国GPS一、二级网,国家GPS A、B级网和中国地壳运动观测网络。

1. 全国GPS一、二级网

全国GPS一、二级网于1991—1997年由总参测绘局布设,全网共有534点,在全国陆地(除我国台湾)、海域均匀分布,包括南海重要岛屿。

一级网有44个点,平均边长约800 km,于1991年5月至1992年4月观测。施测期间,由于一天内卫星可见时间短,接收机数目远少于网点数,采用滚动推进方式施测。全网使用MINI MAC-2816接收机观测,每天观测2~3个时段,每时段为3 h,总时段数不少于10个。

二级网是在一级网的基础上布设的,平均边长约200 km。分为6个测区,即南海岛屿,东北、华北测区,西北测区,华东测区,东南测区和青藏云贵川测区,于1992—1997年施测。前期(1992—1994年)使用MINI MAC-2816接收机观测,时段数大于4。后期由于卫星分

布健全, 1995—1997 年使用 Ashtech Z-12 接收机观测, 采用一天时段, 时段数大于 4。因此, 二级网的精度有明显的提高。一、二级网点均进行了水准联测。全国 GPS 一、二级网施测情况及精度如表 1.2 所示。

表 1.2 全国 GPS 一、二级网施测情况及精度

施测年代	等级	地区	使用仪器	相对精度
1991	一级网	全国	MINI MAC-2816	3×10^{-8}
1992	二级网	南海	MINI MAC-2816	$1 \times 10^{-7} \sim 2 \times 10^{-7}$
1993	二级网	华东	MINI MAC-2816	$1 \times 10^{-7} \sim 2 \times 10^{-7}$
1994	二级网	西北	MINI MAC-2816	1×10^{-7}
1995	二级网	东南	MINI MAC-2816	1×10^{-7}
1996	二级网	东北、华北	Ashtech Z-12	1×10^{-7}
1997	二级网	青藏、云、贵、川	Ashtech Z-12	1×10^{-7}

2. 国家 GPS A、B 级网

国家 GPS A 级网第一次于 1992 年结合国际 IGS92 会战, 由国家测绘局、中国地震局等单位布测, 全网共有 27 个点, 平均边长 650 km。1996 年国家测绘局进行了 A 级网的复测, 参加复测的仪器为 Ashtech MD12、Trimble 4000SSE、Leica200 等双频接收机, 全网整体平差后在 ITRF1993 参考架中地心坐标精度优于 0.1 m, 点间水平方向的相对精度优于 2×10^{-8} , 垂直方向的相对精度优于 7×10^{-8} 。

B 级网由国家测绘局于 1991—1995 年布测, 包括 A 级点共 818 个点, 平均边长 150 km。B 级网的结构在东部地区为连续网, 点位较密集; 中部地区为连续网与闭合环结合, 点位密度适中; 西部地区闭合环与导线结合, 点位密度较稀。B 级网 60% 的点与我国一、二等水准点重合, 其余进行了水准联测。B 级网点间重复精度水平方向优于 4×10^{-7} , 垂直方向优于 8×10^{-7} 。

国家 GPS A、B 级网的建成, 标志着我国空间大地网的建设已经进入了一个新的阶段。它不仅在精度上比以往的全国性大地控制网提高了两个量级, 而且其三维坐标体系是建立在有严格动态定义的先进的国际公认的 ITRF 框架之内。它标志着我国具有分米级绝对精度的三维大地控制坐标系统已基本建立, 它将为我国空间技术和空间基础数据、动态实时定位等技术提供一个精确可靠的参考系。

此外, 国家 GPS A、B 级网中的大部分点位, 均进行了水准联测, 确定了它们的正常高。同时, 不少网点也和原有的经典方法测定的大地点和沿海验潮站等进行了联测。所有这些都将为我国地壳运动监测、中国局部大地水准面的求定、新老大地网的拼接和转换, 以及全球变化中海平面上升的监测提供基础数据, 为 21 世纪前期的中国经济和社会持续发展作出贡献。

国家高精度 GPS 网包括 GPS 永久性跟踪站和 A、B 级高精度 GPS 网, 其中已建立永久性跟踪站 8 个; A 级网点 33 个, 并于 1996 年进行复测; B 级网点 818 个。国家高精度 GPS 网的布设建立了我国新一代的基于空间技术的地心三维大地控制框架, 改善了我国似大地水准面的精度和分辨率, 为基础测绘、资源勘探、环境变化监测、国防工程及多种经济的需要提供了新的大地控制基础。

3. 中国地壳运动观测网络

中国地壳运动观测网络 (Crustal Movement Observation of China, CMONOC) 是我国“九

五”期间国家投资建设的一项重大科学工程。由中国地震局、总参测绘局、国家测绘局、中国科学院等单位于1998年开始布测。中国地壳运动观测网络最初的目的主要是用来监测我国的地壳运动,研究中国大陆地壳运动规律和图像,为预测预报和研究地震提供重要的基础和定量的数据依据。

中国地壳运动观测网络工程是以GPS观测技术为主,加之已有的VLBI和SLR技术,结合绝对重力、相对重力和精密水准测量构成我国范围高精度、高时空分辨率的地壳运动观测网络。观测网络由基准网、基本网、区域网和数据传输与分析系统四大部分构成。

1) 基准网

基准网由25个永久的、固定的GPS连续观测站、3个永久的VLBI站、4个固定的SLR站和2个流动的SLR站组成,其中VLBI,SLR,GPS并置的站有中国科学院上海天文台、云南天文台和乌鲁木齐人造卫星观测站;GPS,SLR,超导重力和绝对重力并置的观测站为中国科学院测量与地球物理研究所九峰观测站(武汉);GPS,SLR并置的观测站还有长春、北京和拉萨等站。25个基准站已正式运行。基准站GPS必须连续观测,且每个基准站配备有自动气象观测仪,用于记录气压、气温、湿度等气象参数,而且具有实时数据传输功能,即装备有线或卫星数据传输设备。基准网中点间距1000 km左右,GPS边长年变化率测定精度为1~3 mm,VLBI站间基线年变化率测定精度为1~2 mm,SLR固定站的坐标测定精度为1~3 cm,流动SLR观测站的坐标测定精度为3~5 cm。每个基准站都要进行一等水准联测和绝对重力联测,绝对重力测定精度为 $3 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 。

2) 基本网

基本网由50个GPS定期重复测量站组成,点间间距约500 km,连同基准站一同分布在我国各个主要构造板块上。50个基本站每1~2年重复观测一次,基本站间GPS基线每次连续观测7天,每天24 h,并同时观测记录气象、气压、湿度等参数,每次测定水平分量精度为3~5 mm,垂直分量精度为10~15 mm。通过基本站的定期观测与基准站的连续观测,可定期得到我国大陆内主要构造板块体间及其边界带相对运动和运动图像。

3) 区域网

GPS区域网主要沿活动构造带、地震带和地震重点监测区布设,由1000多个观测点构成,在构造活动较少的较稳定地区测站间距离为250~350 km,而在地震重点监测区测点较密,一般测点间距离为20~50 km。每个测点连续观测4天,每天24 h,并同时记录气象参数。观测精度要求水平分量达到3~5 mm,垂直分量达到10~15 mm。

地壳运动观测网络基本情况见表1.3。

表 1.3 地壳运动观测网络基本情况

类 别	基准网	基本网	区域网
点 数	25	56	1 000
分 布	国内板块	国内板块	地壳运动活跃地区
观 测	连续观测	定期复测	不定期复测
水平精度		2.5 mm	1.8 mm
垂直精度		4.8 mm	4.9 mm
基线年变化率精度	1.3 mm		
定轨精度	0.5 m		

4) 数据传输与分析处理系统

数据传输与分析处理系统由一个数据传输和数据处理中心、3个数据传输和数据处理中心(子系统)构成。中心和分中心都包括数据传输系统、数据档案库和数据处理分析系统三部分。数据传输系统建立的是专用的通信网系统,用于中国地壳网络的GPS、VLBI、SLR、绝对和相对重力、水准包括气象参数的数据信息传输、通信和计算机互联网。保证基准站连续的GPS数据及时无误地传输到中心和分中心。同时也为观测网络工程中的基本站定期复测的观测数据和区域站不定期复测的数据提供有效的传输通道,把GPS等数据及时地传送到数据中心和分中心,这对于GPS等数据和地壳运动信息的共享和充分利用以及进行国际间的交流和合作是十分有利的。

全国三级GPS网正在建设中,一些省(区)也正在建设国家GPS C级网。

1.5 大地测量学的发展趋势

大地测量学从形成到发展已有300多年的历史。就当前而言,大地测量学主要呈现以下几个方面的发展趋势。

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

现代科学技术的发展,特别是激光技术、微电子技术、人造地球卫星技术、河外射电源干涉测量技术、电子计算机技术、高精度原子计时频标技术的飞跃发展,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。

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出的发展潜力,表明可以在任意时空尺度上以足够的精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中。

3. 空间大地测量主导着学科未来的发展

空间大地测量在大地测量学科发展中的主导地位已经为它本身所显示的广泛应用前景和巨大潜力所确定。就常规制图和一般工程控制目的来说,GPS定位技术基本取代了以经纬