

现代大地测量基准

Modern Geodetic Datum

党亚民 章传银 陈俊勇 张鹏 薛树强 著



测绘出版社

测绘理论与技术文库

现代大地测量基准

Modern Geodetic Datum

党亚民 章传银 陈俊勇 张 鹏 薛树强 著

测绘出版社

· 北京 ·

© 党亚民 2015

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

本书全面系统地介绍了现代大地测量基准理论及其构建技术与方法。全书主要包括现代大地测量基准理论、基准建立与维持两部分内容,分别对现代大地测量基准的特点及内容、地球参考系统与参考框架理论、地球重力场及高程基准与深度基准理论、大地测量基准地球动力学影响、垂直参考系统与参考框架理论,以及地球参考框架建立与维持、垂直参考框架建立方法等进行了全面的介绍。本书体系完整,科学严密,内容充实,叙述力求深入浅出,紧密结合全球和区域大地测量基准最新进展,以期读者对现代大地测量基准理论和建立方法有一个全面深入的了解。

本书可作为高等院校测绘类高年级本科生和研究生教材,也可作为大地测量、卫星导航定位、遥感、地震及地球科学等生产和科研单位技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

现代大地测量基准/党亚民等著. —北京:测绘出版社, 2015.12
(现代测绘理论与技术文库)
ISBN 978-7-5030-3638-5

I. ①现… II. ①党… III. ①大地测量—研究
IV. ①P22
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 038613 号

责任编辑	巩岩	封面设计	李伟	责任校对	董玉珍	责任印制	喻迅
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	北京京华虎彩印刷有限公司			经 销	新华书店		
成品规格	169mm×239mm						
印 张	21.75			字 数	427 千字		
版 次	2015 年 12 月第 1 版			印 次	2015 年 12 月第 1 次印刷		
印 数	001—800			定 价	78.00 元		

书 号 ISBN 978-7-5030-3638-5/P·792

本书如有印装质量问题,请与我社门市部联系调换。

前 言

大地测量基准是为描述地球及其空间点位坐标、高程、深度和重力而建立的一种度量体系和标准。大地测量基准是大地测量学的重要内容,也是精确测绘地理信息及其变化、监测地球资源环境及全球变化的重要基础。

传统大地测量基准不考虑板块运动和地球形变等地球动力学效应对地面点坐标、高程和重力值的时变影响,难以满足实时、高精度应用需求。随着全球导航卫星系统(GNSS)、卫星重力与卫星测高、卫星激光测距(SLR)及甚长基线干涉测量(VLBI)等空间大地测量技术的广泛应用,给大地测量基准理论和技术方法带来了一系列变革,国际组织和世界各国相继建立了基于空间大地测量技术的现代大地测量基准。自1988年起,国际地球自转与参考系统服务组织(IERS)负责构建和维持国际地球参考框架(ITRF)、国际天球参考框架(ICRF)及两者转换所需的地球定向参数。2003年,国际大地测量协会(IAG)启动全球大地测量观测系统(GGOS)项目,旨在融合几何大地测量、物理大地测量和地球定向等大地测量观测信息,形成面向动态地球监测服务和应用的现代大地测量基准和服务产品。

国际地球参考框架综合了多种空间大地测量观测信息,是当前应用最广泛的高精度全球参考框架。国际大地测量协会所属国际GNSS服务中心(IGS)适时向全球发布IGS全球参考框架产品,在建立区域地心坐标参考框架等方面发挥重要作用。世界各国也相继建立了国家和区域地心坐标系统,2008年,我国也建立并启用了2000国家大地坐标系统(CGCS2000)。卫星重力测量、卫星测高和航空重力测量技术的广泛应用,促进了传统高程基准向全球统一的垂直基准方向发展。

本书主要由两部分构成,第一部分介绍现代大地测量基准的基础理论(第2~8章),第二部分介绍现代大地测量基准建立和维持的主要技术方法(第9~12章)。第1章,简要介绍大地测量基准的内容、作用、特点和进展;第2章,介绍大地测量基准基本概念和构成;第3章,介绍天球参考系统与参考框架、地球参考系统与参考框架、参心大地坐标系统和地心大地坐标系统,以及常用坐标系统变换;第4章,介绍时间系统及其变换;第5章,介绍地球重力场基本概念和重力场边值问题,阐述地球重力场观测和逼近的基本原理与方法;第6章,介绍高程基准与深度基准的基本概念、理论及方法,重点阐述高精度重力(似)大地水准面精化方法;第7章,介绍大地测量基准的地球动力学影响,讨论了潮汐、地球极移与地心运动、板块运动与冰后回弹及其对大地测量基准的影响;第8章,介绍垂直参考系统与参考框架基本理论;第9章,介绍地球参考框架观测技术、协议地球参考框架及实现

方法;第10章,介绍了地心坐标系实现方法与区域地心坐标参考框架建立;第11章,介绍了地球参考框架基础设施运行与维护、地球板块运动模型构建等;第12章,介绍高程基准和重力基准建立方法,讨论高精度垂直参考框架构建原理和一般方法。

本书紧密结合现代大地测量基准最新进展,突出现代大地测量基准动态、地心、高精度等特点,有关概念力求科学严密。本书第1章、第3章由党亚民编写,第2章由党亚民、章传银、薛树强编写,第5章、第6章由章传银、晁定波编写,第4章、第9章、第11章由党亚民、薛树强编写,第7章、第8章由章传银、党亚民编写,第10章由张鹏、薛树强编写,第12章由章传银编写。陈俊勇院士对本书的编写给出了许多具体指导意见,并审阅了全书;杨元喜院士对本书的编写提出了许多宝贵建议;武汉大学姜卫平教授、王正涛副教授,国家测绘地理信息局大地测量数据处理中心郭春喜主任、王斌总工,对书中具体内容提出了许多修改意见;海军大连舰艇学院许军博士,国家基础地理信息中心王凡博士,中国测绘科学研究院柯宝贵博士、王伟博士、蒋涛博士参与了书稿的整理与校对;中国地震局顾国华研究员百忙中抽时间审阅了全书。在此一并对这些专家和学者表示感谢。同时,对中国地图出版集团测绘书刊出版基金资助也表示感谢。

由于作者水平有限,书中错误与不当之处在所难免,诚恳读者批评指正。

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 大地测量基准的主要内容	1
1.2 大地测量基准的作用	2
1.3 现代大地测量基准的特点	5
1.4 大地测量基准进展	6

第一部分 现代大地测量基准理论

第 2 章 大地测量基准概论	25
2.1 大地测量基准概念	25
2.2 坐标基准	28
2.3 垂直基准	32
第 3 章 坐标参考系统与参考框架	34
3.1 天球参考系统与参考框架	34
3.2 地球参考系统	43
3.3 协议地球参考框架	64
3.4 坐标变换与坐标转换	74
第 4 章 时间系统	88
4.1 时间系统的发展	88
4.2 时间系统	90
4.3 时间系统转换	95
4.4 高精度时间传递与统一技术	99
第 5 章 地球重力场基本理论	101
5.1 重力场基本概念	101
5.2 地球椭球与正常重力场	110
5.3 扰动重力场	117
5.4 重力场边值问题	127
5.5 地球重力场观测	137
5.6 局部重力场逼近	147
第 6 章 高程基准与深度基准	152
6.1 基本概念	152

6.2	高程系统	153
6.3	高程基准	159
6.4	海潮与深度基准	161
6.5	重力(似)大地水准面精化	175
第7章	大地测量基准地球动力学影响	195
7.1	固体潮与负荷潮	195
7.2	地球自转与极移	212
7.3	地球质心变化	226
7.4	板块运动与冰后回弹	233
第8章	垂直参考系统与参考框架	239
8.1	垂直参考系统	239
8.2	垂直参考框架	245

第二部分 现代大地测量基准建立与维护

第9章	全球坐标参考框架	251
9.1	国际地球参考系统协议模型与约定	251
9.2	单一技术建立地球参考框架	259
9.3	多技术组合建立地球参考框架	267
第10章	区域地心坐标参考框架	274
10.1	概述	274
10.2	区域地心坐标参考框架	275
10.3	区域地心坐标参考框架数据处理	278
10.4	中国地心坐标参考框架	283
第11章	地球参考框架维持	288
11.1	地球参考框架运维与观测	288
11.2	板块运动模型与速度场	290
11.3	地球自转与地心运动监测	299
11.4	地球参考框架稳定性分析	302
第12章	垂直参考框架实现	305
12.1	高程控制网与大地水准面	305
12.2	重力基本网	311
12.3	垂直参考框架构建技术	316
12.4	垂直参考框架产品及应用	327
参考文献		331

Contents

Chapter 1	Introduction	1
1.1	Contents of geodetic datum	1
1.2	Roles of geodetic datum	2
1.3	Characteristics of modern geodetic datum	5
1.4	Progress in geodetic datum	6
Section 1 Theory and foundation of modern geodetic datum		
Chapter 2	Introduction of geodetic datum	25
2.1	Concepts of geodetic datum	25
2.2	Coordinate datum	28
2.3	Vertical datum	32
Chapter 3	Coordinate reference system and reference frame	34
3.1	Celestial reference system and reference frame	34
3.2	Terrestrial reference system	43
3.3	Conventional terrestrial reference frame	64
3.4	Coordinate transformation and coordinate conversion	74
Chapter 4	Time system	88
4.1	Evolution of time system	88
4.2	Time systems	90
4.3	Conversion among time systems	95
4.4	Time transfer and unification	99
Chapter 5	Fundamental theory of the Earth gravity field	101
5.1	Basic concepts of the gravity field	101
5.2	Earth's ellipsoid and normal gravity field	110
5.3	Disturbing gravity field	117
5.4	Boundary problem of gravity field	127
5.5	Earth's gravity measurements	137
5.6	Local gravity field approximation	147
Chapter 6	Height datum and sounding datum	152
6.1	Basic concepts	152
6.2	Height system	153
6.3	Height datum	159
6.4	Ocean tide and sounding datum	161
6.5	Gravimetric (quasi) geoid refinement	175

Chapter 7 Earth dynamic impact of geodetic datum	195
7.1 Solid Earth tides and load tides	195
7.2 Earth rotation and polar motion	212
7.3 Geocenter variations	226
7.4 Plate movement and post glacial rebound	233
Chapter 8 Vertical reference system and reference frame	239
8.1 Vertical reference system	239
8.2 Vertical reference frame	245
 Section 2 Establishment and maintenance of modern geodetic datum	
Chapter 9 Global coordinate reference frame	251
9.1 Conventional models and conventions of international terrestrial reference system	251
9.2 Terrestrial reference frame established by single technique	259
9.3 Multi-technique combination for establishing terrestrial reference frame	267
Chapter 10 Regional geocentric coordinate reference frame	274
10.1 Introduction	274
10.2 Regional geocentric coordinate reference frame	275
10.3 Data processing of regional geocentric coordinate reference frame	278
10.4 Chinese geocentric coordinate reference frame	283
Chapter 11 Terrestrial reference frame maintenance	288
11.1 Operation, maintenance and observation of terrestrial reference frame	288
11.2 Plate motion model and velocity field	290
11.3 Earth rotation and geocenter motion monitoring	299
11.4 Stability of terrestrial reference frame	302
Chapter 12 Realization of vertical reference frame	305
12.1 Height control network and geoid	305
12.2 Basic gravity network	311
12.3 Establishment technique of vertical reference frame	316
12.4 Vertical reference frame products and their applications	327
References	331

第1章 绪 论

人类在地球上的一切活动都在特定地理空间进行,大地测量学是一门量测和描绘地球表面的科学,主要研究和测定地球形状、大小和地球重力场,测定地面点几何位置。建立和维护大地测量基准是大地测量学的主要任务,也是开展其他测绘地理信息实践活动的基础。现代大地测量基准具有高精度、动态、陆海覆盖、综合服务特征,可为人类社会发展、经济建设、国防建设、地球科学研究和灾害监测提供准确的位置信息与参考基准。

随着空间大地测量技术的迅猛发展,大地测量基准建立和维护方法也在悄然改变,其内涵和外延都在不断拓展。尤其随着全球大地测量观测系统(global geodetic observing system, GGOS)的发展,大地测量基准的服务功能也日益突出。现代大地测量基准除了综合利用空间大地测量技术建立基准参考框架外,其产品的社会化服务也成为其不可或缺的功能之一。

1.1 大地测量基准的主要内容

大地测量基准由大地测量参考系统和大地测量参考框架组成,大地测量参考系统实现的是大地测量基准的定义、建立和维护的理论体系,大地测量参考框架是大地测量参考系统的具体实现。大地测量基准主要包括坐标基准、高程基准、重力基准和深度基准等。

坐标基准也称为平面基准,是确定地球表面几何位置的基本参考。随着空间大地测量技术的发展,坐标基准也由传统的平面二维坐标系统发展为以地心为原点的三维坐标系统,为地球及其外层空间几何位置的确定提供参考。平面基准一般由国家平面控制网实现,例如,中国天文大地网由国家一、二等大地网组成,全网约有5万个大地点,此网1952年起布测,1978年完成,历时26年。全国天文大地网整体平差工作于1982年完成,建成了中国1980西安坐标系。2008年7月,中国正式启用2000国家大地坐标系(China geodetic coordinate system 2000, CGCS2000),该坐标系属于地心大地坐标系,其参考框架由2000国家大地控制网实现。该控制网整合了国家GPS A、B级网和总参测绘导航局布测的GPS一、二级网,以及中国地壳运动观测网的成果,共2609个点,通过联合处理将其归入一个坐标参考框架下,建立起国家新一代地心坐标系统。

高程基准是推算高程控制网水准高程的起算依据。布测国家统一的高程控制

网,首先必须规定或建立一个统一的高程基准面,所有水准测量测定的高程都以这个面为零起算。高程基准包括一个水准基面和一个永久性水准原点。水准基面理论上采用大地水准面,它是一个延伸到全球的静止海面,也是一个地球重力等位面。水准基面实际上是取验潮站长期观测结果的平均海面。我国以青岛港验潮站的长期观测资料推算出的黄海平均海面作为水准基面,即零高程面。我国水准原点建立在青岛验潮站附近,并构成原点网。用精密水准测量测定水准原点相对于黄海平均海面的高差,即水准原点的高程,该高程定为我国国家高程控制网的起算高程。国家高程基准通过国家高程控制网实现。我国目前采用 1985 国家高程基准,采用的国家高程控制网共有 291 条水准线路,总长 93 341 km,是全国统一确定地表任一位置海拔高程的基本参考。

重力基准是在地球及其外部空间开展重力测量的起算基准,是绝对重力值已知的重力点。世界公认的起始重力点称为国际重力基准。国际通用的重力基准有 1909 波茨坦重力系统和 1971 国际重力基准网(International Gravity Standardization Net 1971,IGSN1971)。我国于 1956 年至 1957 年建立了全国范围内的第一个国家重力基准,称为 1957 国家重力基本网,该网由 21 个基本点和 82 个一等点组成。1999 年,建立了新的 2000 国家重力基本网,包括 21 个重力基准点和 126 个重力基本点。

深度基准是海图及各种水深资料的深度起算面。水深测量通常在随时升降的水面上进行,因此不同时刻测量同一点的水深是不相同的,这个差数随各地的潮差大小而不同。为了修正测得水深中的潮高,必须确定一个起算面,把不同时刻测得的某点水深归算到这个面上,这个面就是深度基准面。世界各国根据本地的潮汐特征采用不同算法的深度基准面。我国在 1956 年以后采用理论深度基准面,即理论最低潮面。

1.2 大地测量基准的作用

任何与位置有关的空间属性的确定,都需要一个参照系统。大地测量基准无论作为传统地图测绘的基本控制,或作为现代地理空间信息的参考框架,对空间位置确定和空间关系一致性都发挥着控制作用。随着空间大地测量技术的迅猛发展,除了作为测绘地理信息测图控制,大地测量基准在国民经济社会发展、国防建设、防灾减灾、全球变化监测等方面也发挥着越来越重要的作用。

1.2.1 大地测量基准是大地测量学的核心内容

大地测量基准贯穿大地测量学的学科体系,无论是传统的大地控制测量,还是现代大地测量综合服务,都需要在一个统一的大地基准框架下完成。传统大地测

量实践活动都在地球表面进行,为了获得准确的大地测量成果,需要一个一致的地球参考面,即需获得精确的地球椭球参数(椭球长半轴和扁率)。换言之,有了精确的地球椭球参数,就可以为高精度的大地测量成果提供精确的基准面。

大地测量学中测定地球的大小指测定地球椭球的大小,测定地球椭球大小的过程实际也是大地测量基准的实现过程。大地测量学研究的地球形状指研究大地水准面的形状,大地水准面是实现高程基准的重要参考面。大地测量学测定地面点的几何位置指测定以地球椭球面为参考的地面点的位置,统一参考框架下精确地面点坐标的确定更是坐标参考框架的具体实现。

不难看出,无论是坐标基准、高程基准,还是重力基准和深度基准,都是通过基准参考系统定义,并通过基准参考框架点来实现,建立和维持大地测量基准一直都是大地测量的重要任务,也是大地测量学的核心内容。

1.2.2 大地测量基准为测绘地理信息提供统一基准

在大范围内进行地形控制测量和地形图测绘,会出现测量误差传递和积累的情况,使地形控制网形状、地物位置产生较大偏差。解决这个问题的基本方法是在地形控制测量和测图前,在全国范围内建立统一的大地坐标系统,精确测定大地控制网中大地点的坐标和高程。此外,地球形状近似为一个椭球,在全国或大区域范围内进行控制测量和编制各种比例尺地形图时,必须考虑地球曲率的影响。由于参考椭球面无法直接展开为平面,在地图投影中需通过数学方法建立参考椭球面上的点与投影平面上点的映射关系。因此,参考椭球是地图投影的重要基准,这就需要精确确定大地水准面,建立与测图区域最吻合的地球参考椭球,从而满足地图制图需求。

全球经济一体化、信息技术和互联网技术的迅速发展,有力推动了地理信息产业的发展,智慧生活的概念应运而生。建立全球、国家和省市地理信息空间框架成为构建智慧地球、智慧中国和智慧城市的基础性测绘地理信息工作,构建地理信息空间框架现代大地测量基准亦成为推动国家经济建设的基础性和前沿性工作。

1.2.3 大地测量基准是监测动态地球变化的重要手段

大地测量学是地球科学的分支学科,是为人类活动提供地球空间信息的科学。大地测量基准作为大地测量学的核心内容,为动态全球监测提供了一致稳定的参考基准,获取的丰富的大地测量观测数据为动态地球监测提供了直接的资料信息。

地球是一个动力系统,地球内部的动力过程及其相关的物质迁移导致了板块构造运动,如火山活动和地震。大气和海洋的动力过程引发大气、陆地、水圈、海洋的运动,以及与天气、气候和全球变化相关的低温层物质运动。为了维护大地测量基准,必须对地球动力现象和外部空间环境进行监测,如地球自转变化、地球重力

场变化、板块运动、地球形变监测、海面变化、潮汐、大气运动等。利用空间大地测量手段可以获得三种大地测量观测量及其时间变化,这些数据主要结合空间和航天传感器及地面观测网获得。其中,几何、运动学参数主要由全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)、卫星测高(satellite altimetry, SA)、合成孔径雷达干涉测量(interferometry synthetic aperture radar, InSAR)、遥感、水准测量、验潮站等获得,地球重力场参数由卫星重力、航空和船测重力、地面重力等获得;地球自转参数由甚长基线干涉测量(very long baseline interferometry, VLBI)、卫星激光测距(satellite laser ranging, SLR)、激光测月(lunar laser ranging, LLR)、多里斯系统(Doppler Orbitograph and Radio Positioning Intergrated by Satellite, DORIS)和 GNSS 得到。这三类大地测量观测量,除了用于建立全球精确统一的大地测量基准,同时也被用于连续监测地球系统的物质运动及其地球动力学过程,其作用主要表现在四个方面:其一,观测并提供地球表面局部和全球的几何形状(固体地球、冰面和海洋)及其时变特征,这种变化包括水平和垂直方向上的变化,在时间尺度上有瞬时特征,也有长期变化;其二,监测地球旋转变化的;其三,探求地球重力场,包括静态地球重力场和由地球系统物质交换(固体地球、液核、大气、海洋等)引起的随时间变化的重力场;其四,利用空间大地测量遥感技术监测大气、海洋和低温层变化(党亚民等,2006)。现代空间(卫星)技术和信息技术的飞跃发展,使我们可获得多种学科领域长期以来很难取得的高精度时序资料,可解决其他相关科学问题,如全球板块运动的测定、冰原和冰川的流动、洋流和海面的变化等(Blewitt et al,2010)。

1.2.4 大地测量基准为社会经济发展提供服务

随着空间信息技术的发展,基础地理空间信息在经济建设和社会发展方面的作用越来越大,可为政府决策、工程建设、经济社会可持续发展等提供基础地理信息保障。大地测量基准为构建数字地球、数字中国和数字区域等提供了一个地理空间框架,它可将各种空间信息统一起来,重构这些信息源之间的几何和物理关联,是组织、管理、融合和分析地球海量时空信息的重要基础。通过实现区域或全球一致的大地测量基准,促进国家宏观经济规划建设、陆海连接工程建设、部门或地方政府建设工程的协调发展,以及大规模、大范围的地球空间信息的规划、探测及海量信息融合与信息服务,为标定国界和领海线、维护国家主权提供一致的信息和技术支持,促进跨地区、跨国工程建设的发展。

以地心坐标为参考的各种卫星导航及基于位置的服务,具有高精度、全天候、高效率、多功能、操作简便及应用广泛等优点,已用于海空导航、车辆引导、工程测量、城市及工程控制网建立、动态观测、设备安装、时间传递、速度测量等方面。基于位置的服务是由移动通信网络和卫星定位系统结合而提供的一种增值业务,实

现各种与位置相关的服务,其实质是一种概念较为宽泛的与空间位置有关的新型服务业务,其底层支撑都以地球参考框架服务网络和精密卫星轨道信息为基础。

大地测量参考框架在防灾、减灾、救灾及环境监测、评价与保护中发挥着重要作用。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。在我国及日本、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 GNSS、甚长基线干涉测量和卫星激光测距等现代大地测量手段进行自动连续监测。

航天器的发射、制导、跟踪、遥控以至返回都需要两类基本的大地测量保障:一是精密的大地坐标系及地面点(如发射点和跟踪站)在该坐标系统中的精确点位,二是精密的全球重力场模型和地面点的准确重力场参数。卫星、导弹、航天飞机及其他宇宙空间探测器的发射、制导、跟踪及返回等都必须在高精度的时空基准保障下才能得以实现。这种保障主要体现在:要有一个精确的地球参考框架及一个精密的全球重力场模型。

1.3 现代大地测量基准的特点

与以地面观测为主的传统大地测量基准不同,现代大地测量基准基于空间大地测量技术,综合利用了多源大地测量和其他地学观测资料,力求获得高精度、高稳定性、空间统一的动态参考基准。

1.3.1 高精度

传统大地测量技术由于受测量仪器所限,观测范围小,误差累积大,很难提高大地测量控制点的测量精度。现代空间大地测量技术可提供远高于传统测绘手段的精度和覆盖度,利用 GNSS 等空间大地测量技术手段,可明显提高大地测量控制点的测量精度。

1.3.2 动态

传统大地测量基准测量精度较低、观测周期长,使大地控制点的坐标位置变化特征难以测定,因此,一般将大地控制点坐标位置看成是静止不变的。现代大地测量基准广泛采用空间大地测量观测技术,坐标位置都是相对于某一时刻(历元)的坐标值,这为实现动态大地测量基准提供了技术保障。为了保持大地测量基准的精确性,必须顾及大地测量控制点坐标位置的变化特征。

1.3.3 陆海覆盖

受观测手段和技术条件的制约,过去大地测量基准的确定和服务主要局限于陆地或近海范围。GNSS、卫星激光测距、卫星测高、卫星重力等空间大地测量技术的广泛利用,使陆海覆盖、全球一致的现代大地测量基准的实现成为可能。目

前,世界各国基于空间大地测量技术建立了各自的新一代地心坐标系统,并综合利用 GNSS、水准、重力等观测手段,实现了全球统一的垂直参考基准。

1.3.4 综合服务

传统大地测量基准的主要功能是提供各类测图控制,为地球形状测定和地形图测量提供基本控制。现代大地测量基准整合了各类大地测量观测,除了为全球和各国提供高精度、一致的大地测量基准产品外,还为气象、灾害预报、地球科学研究、经济社会发展等领域提供观测数据、位置服务、水汽、电离层等各类应用产品的综合服务。

1.4 大地测量基准进展

1.4.1 国际大地测量基准

20 世纪上半叶,水准椭球被国际大地测量协会(International Association of Geodesy, IAG)采用,实现了几何大地测量和物理大地测量在概念上的统一,启用了 1924/1930 国际大地测量参考系统,其椭球长半轴为 6 378 249.1 m、短半轴为 6 356 911.9 m。

1967 年,在卢塞恩市举行的第 14 届国际大地测量学与地球物理学联合会(International Union of Geodesy and Geophysics, IUGG)大会上,决定采用 1967 大地测量参考系统(geodetic reference system 1967, GRS67)。其中,椭球基本参数如下:

- (1)地球赤道半径: $a = 6\,378\,160\text{ m}$ 。
- (2)地心引力常数: $GM = 398\,603 \times 10^9\text{ m}^3/\text{s}^2$ 。
- (3)地球动力学形状因子: $J_2 = 0.001\,082\,7$ 。
- (4)地球自转角速度: $\omega = 7.292\,115\,146\,7 \times 10^{-5}\text{ rad/s}$ 。

国际大地测量协会用这些参数计算标准椭球的相应参数,并保留到 12 位有效数字,以便使参考椭球面上的计算达到 0.1 mm 的精度。

1979 年,国际大地测量学与地球物理学联合会在堪培拉举行了第 17 届大会,决定启用 1980 大地测量参考系统(geodetic reference system 1980, GRS80),包括参考椭球和全球重力场模型。GRS80 的地球椭球基本常数如下:

- (1)长半轴: $a = 6\,378\,137\text{ m}$ 。
- (2)地心引力常数: $GM = 3\,986\,005 \times 10^8\text{ m}^3/\text{s}^2$ 。
- (3)地球动力学形状因子: $J_2 = 108\,263 \times 10^{-8}$ 。
- (4)地球自转角速度: $\omega = 7.292\,115 \times 10^{-5}\text{ rad/s}$ 。

1988 年起,国际地球自转与参考系统服务组织(International Earth Rotation and Reference System Service, IERS)正式运行,承担定义、建立和维持国际地球参

考系统(international terrestrial reference system, ITRS)。国际地球参考框架(international terrestrial reference frame, ITRF)、地球定向参数(earth orientation parameter, EOP)和国际天球参考框架(international celestial reference frame, ICRF)是国际地球自转与参考系统服务组织的三种主要产品。

国际地球参考框架基于全球分布的地面观测台站,采用甚长基线干涉测量、卫星激光测距、GNSS、激光测月和多里斯系统等空间大地测量技术,经观测数据综合处理分析,得到地面测站的站坐标和速度场(Angermann et al, 2005)。

ITRF的最早版本可追溯到1984年,第一个ITRF综合解称为BTS84(ITRF0),它由甚长基线干涉测量、激光测月、卫星激光测距和Doppler/TRANSIT系统观测建立。截至目前,ITRF先后发布了ITRF88、ITRF89、ITRF90、ITRF91、ITRF92、ITRF93、ITRF94、ITRF96、ITRF97、ITRF2000、ITRF2005、ITRF2008。

国际地球自转与参考系统服务组织于2003年开始着手研发国际地球参考框架、地球定向参数和国际天球参考框架三者一致的产品。联合平差研究中心的主要任务是建立完全一致的国际地球自转与参考系统服务组织产品,实现各空间大地测量框架产品的严密组合。2004年,联合平差项目促成国际地球自转与参考系统服务组织建立了ITRF2005。自ITRF2005建立以后,国际地球自转与参考系统服务组织对通过空间大地测量技术得到的测站坐标和地球定向参数的时间序列进行组合。

地球是一个十分复杂的动态系统,包括几何信息和物理信息两方面的动态变化。全球大地测量观测系统提出利用空间大地测量原始观测值并使用统一的模型进行全球组合,保持大地测量不同基准产品之间的一致性。

1.4.2 参心大地坐标系统

1. 世界参心大地坐标系统

19世纪以来,世界各国建立和使用的参心大地坐标系统有100余种,在社会和经济发展中发挥了重要的作用。参心大地坐标系统建立在地球参考椭球定位定向的基础上。参考椭球是传统地面大地测量计算、大地坐标转换、地图投影变换的基本参考面。表1.1给出了该时期世界范围内使用的地球参考椭球几何参数。

表 1.1 地球参考椭球几何参数

名称	年代	长轴/m	短轴/m	备注
艾里(Airy)椭球	1830	6 377 563.4	6 356 256.9	英国
贝塞尔(Bessel)椭球	1841	6 377 397.2	6 356 079.0	欧洲、智利、印度、美国
克拉克(Cl Clarke)椭球	1866	6 378 206.4	6 356 583.8	美国、菲律宾
克拉克(Cl Clarke)椭球	1880	6 378 388.0	6 356 514.9	非洲、法国

续表

名称	年代	长轴/m	短轴/m	备注
1924 国际椭球	1924	6 378 249.1	6 356 911.9	世界多国
克拉索夫斯基(Krasovsky)椭球	1940	6 378 245	6 356 863	俄罗斯、中国
澳大利亚椭球	1965	6 378 160.0	6 356 774.7	澳大利亚
WGS-72 椭球	1972	6 378 135.0	6 356 750.5	美国
1975 国际椭球	1975	6 378 140	6 356 755	世界多国
GRS80 椭球	1980	6 378 137.0	6 356 752.3	世界多国

印度在 1880 年完成了其天文大地网平差。该网一等三角锁总长超过 20 000 km, 平均边长约 45 km, 基线间距 700~1 200 km。

美国在 1911 年至 1935 年施测了其天文大地网, 全网一等三角锁总长 70 000 km, 基线平均间距达 400 km, 天文点间平均间距 150 km, 拉普拉斯(Laplace)点平均间距 250 km。

原苏联在 1924 年至 1950 年施测了其天文大地网, 全网一等三角锁总长 75 000 km, 在一等锁交叉处测量了起始边及天文经度、纬度和方位角。

中国天文大地网于 1951 年开始布设, 1961 年基本完成, 1975 年修、补测工作全部结束, 全网约有 5 万个大地点。中国的一等三角锁包括 400 多个锁段, 全长约 80 000 km。

2. 中国参心大地坐标系

中国参心大地坐标系经历了两个阶段: 第一阶段, 采用了原苏联 1942 普尔科沃(Pulkovo)原点作为中国的大地原点; 第二阶段, 通过中国天文大地网整体平差建立了 1980 西安坐标系。

1) 中国天文大地控制网

中国一、二等网合称为中国天文大地网。中国一等三角锁沿经线和纬线布设成纵横交叉的一等三角锁系, 锁长 200~250 km, 构成许多锁环。一等三角锁内由近似等边三角形组成, 边长为 20~30 km。角度观测中误差为 $\pm 0.7''$, 起始边长度的测距相对中误差不大于 $1/350\,000$, 天文经度、纬度及方位角的测定误差不大于 $0.30''$ 、 $0.30''$ 和 $0.50''$ 。

二等三角锁中三角形的平均边长为 20~25 km, 二等网的平均边长为 13 km, 角度观测中误差为 $\pm (1.0'' \sim 1.5'')$; 二等填充网中三角形的平均边长为 13 km, 角度观测中误差为 $\pm (2'' \sim 2.5'')$; 二等全面网的角度观测中误差为 $\pm 1.0''$; 三等大地网中三角形平均边长为 8 km, 角度观测中误差不大于 $1.5''$ 。一等锁的两端和二等网的中间, 测定了起算边长、天文经纬度和方位角。

中国天文大地网规模之大、网形之佳、质量之优, 在全世界居于前列, 布设速度之快也是空前的, 这是中国几代测绘人艰苦奋斗的结晶。