



国家大地坐标系建立的理论与实践

Theory and Practice for Establishment of
National Geodetic Coordinate System

程鹏飞 成英燕 秘金钟 文汉江 王华 徐彦田 著



测绘出版社



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

国家大地坐标系建立的理论与实践

Theory and Practice for Establishment of National Geodetic
Coordinate System

程鹏飞 成英燕 秘金钟 文汉江 王华 徐彦田 著

测绘出版社

· 北京 ·

© 程鹏飞 成英燕 秘金钟 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

本书系统地介绍了新中国成立以来历次建立的国家大地坐标系和坐标框架,重点介绍我国地心坐标系——2000 国家大地坐标系的建立与框架实现,包括 2000 国家 GPS 大地控制网平差方法、卫星导航定位连续运行基准站网纳入 2000 国家大地坐标系方法等。同时针对大地测量框架实现的多源技术手段,介绍了国际空间大地测量观测技术和实现方法、国际 ITRF 综合处理及实现方法。结合国际地球参考框架的发展趋势,提出了 2000 国家大地坐标系参考框架动态维持的理论方法和技术实现,包括 2000 国家大地坐标框架点稳定性分析方法、2000 国家大地坐标框架的线性动态维持和非线性动态维持方法。

为便于读者理解,本书引用了大量的天文大地网及 GNSS 大地测量数据计算、分析及方法比较实例,可作为测绘专业学生、科研人员及相关测绘工程技术人员的重要参考书。

图书在版编目(CIP)数据

国家大地坐标系建立的理论与实践 / 程鹏飞等

著. —北京:测绘出版社,2016.12

ISBN 978-7-5030-4023-8

I. ①国… II. ①程… III. ①大地坐标系—中国
IV. ①P226

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 320992 号

责任编辑	赵福生	封面设计	李 伟	责任校对	谢作涛	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)		
电子信箱	smp@sinomaps.com			网 址	www.chinasmp.com		
印 刷	北京新华印刷有限公司			经 销	新华书店		
成品规格	169mm×239mm						
印 张	16.75			字 数	322 千字		
版 次	2016 年 12 月第 1 版			印 次	2016 年 12 月第 1 次印刷		
印 数	0001—1000			定 价	98.00 元		

书 号 ISBN 978-7-5030-4023-8

审 图 号 GS(2016)3209 号

本书如有印装质量问题,请与我社门市部联系调换。

前 言

大地坐标系是描述地理信息和测制各种比例尺地形图的基础。新中国成立以来,我国基于当时的先进技术,先后建立了 1954 北京坐标系和 1980 西安坐标系,为我国经济建设、国防建设和社会发展做出了不可或缺贡献。步入 21 世纪,现代空间大地测量技术的迅猛发展,特别是全球卫星导航系统的广泛应用,使得地面点位坐标的获取等变得更加方便、快捷,各行各业对地心坐标系的需求非常迫切。因此,我国决定从 2008 年 7 月 1 日起正式启用 2000 国家大地坐标系(CGCS2000)作为国家法定的坐标系。

按照国务院要求,从 1980 西安坐标系过渡到 2000 国家大地坐标系的过渡期为 8~10 年。在此期间,所有参心系下的测绘成果都需转换到 2000 国家大地坐标系下。在 2000 国家大地坐标系推广应用过程中,非测绘的各行业部门,尤其是非坐标系应用人员在对 2000 国家大地坐标系的使用方面存在诸多认识、理解上的问题,迫切需要一本关于 2000 国家大地坐标系的专著进行理论和方法上的指导,以促进实际应用。国内目前介绍大地测量的著作以及论文集比较多,介绍坐标系和坐标转换的专著也有一些,但鲜有专门针对 2000 国家大地坐标系以及指导其实际应用的专著。结合社会对地心坐标系广泛的应用需求,国家测绘地理信息局的科研人员就 2000 国家大地坐标系推广应用中涉及转换的理论与应用实践问题开展了相关研究与探索,并将多年来的研究成果凝练总结著入本书。

为方便读者全面了解我国国家大地坐标系建立过程,本书介绍了已有测绘成果向 2000 国家大地坐标系转换的方法,系统、全面地介绍了我国第一代地心坐标系——2000 国家大地坐标系的定义、坐标系建立的理论与框架实现方法,以及 2000 国家大地坐标系及国际地球参考框架的动态维持方法等内容。

本书共分 12 章。第 1 章绪论,主要介绍不同时期我国国家大地坐标系建立的技术和方法,包括传统技术方法、现代空间大地测量技术与方法、国家大地坐标系建立的历程;第 2 章详细描述了目前广泛使用的国际地球参考框架,重点介绍了坐标系之间、框架之间的转换方法和模型;第 3 章主要介绍 1954 北京坐标系与 1980 西安坐标系的建立方法和实现手段;第 4 章介绍了 2000 国家大地坐标系的定义与框架实现,比较了 2000 国家大地坐标系与 WGS-84 坐标系的差异,并介绍了与国际地球参考框架的转换方法;第 5 章介绍了将卫星导航定位连续运行基准站网纳入 2000 国家大地坐标系的方法;第 6 章介绍了 2000 国家 GPS 大地控制网的平差方法;第 7 章介绍了现代空间大地测量观测技术和实现方法;第 8 章介绍了国际上

广泛使用的 ITRF 综合处理方法;第 9 章介绍了目前地球参考框架的线性动态维持方法;第 10 章介绍了 2000 国家大地坐标框架的非线性动态维持方法;第 11 章描述了 2000 国家大地坐标框架点稳定性分析方法和实例;第 12 章为 2000 国家大地坐标系发展展望。

程鹏飞负责本书内容的策划、统稿及编写第 1 章。成英燕负责编写第 2、3、9、10 章及第 4 章部分。秘金钟负责编写第 5、6、12 章及第 7 章部分和第 11 章部分。文汉江负责编写第 4 章部分和第 11 章部分。王华负责编写第 8 章。徐彦田负责编写第 7 章部分。

本书作者是国家测绘地理信息局 2000 国家大地坐标系的科研团队,长期从事有关坐标系的科学研究和应用研究。该书的撰写凝集了作者多年的心血,书中大多方法来自作者在推广 2000 国家大地坐标系科研与生产成果、实际应用中的方法总结,因此具有较强的实用性和针对性。

本书力图较全面地阐述 2000 国家大地坐标系实施进程中常见的理论与实践方法,但因时间关系及作者水平有限,书中不当之处,恳请读者批评指正。本书中的科研与生产成果得益于国家测绘地理信息局多个大地坐标系项目及国家“863”计划课题“全球动态地心坐标参考框架维持关键技术(2013AA122501)”、国家自然科学基金“基于奇异谱分析的我国 CGCS2000 非线性速度场方法研究(41374014)”的资助,得益于国家测绘地理信息局国土测绘司领导的大力支持。在本书编写过程中,中国测绘科学研究院王虎、许长辉、田慧、陈醒、曹炳强、万军、余新平参与国家级、全国省级 CGCS2000 框架点数据处理与分析,王晓明、邱荣海参与非线性框架处理与分析,柳根参与本书校对和插图的整编工作,在此一并表示感谢!

目 录

第 1 章 绪 论	1
第 2 章 坐标系和坐标框架	6
§ 2.1 天球参考系和地球参考系	7
§ 2.2 参心坐标系和坐标框架	7
§ 2.3 地心坐标系和坐标框架	9
§ 2.4 地球参考框架	13
§ 2.5 地心坐标框架转换	25
§ 2.6 坐标变换	28
第 3 章 我国参心坐标系建立与框架实现	36
§ 3.1 1954 北京坐标系的建立与框架实现	36
§ 3.2 1980 西安坐标系的建立与框架实现	40
第 4 章 2000 国家大地坐标系与框架实现	45
§ 4.1 2000 国家大地坐标系定义	45
§ 4.2 2000 国家大地坐标系椭球参数	46
§ 4.3 2000 国家大地坐标框架	51
§ 4.4 2000 国家大地坐标系与 WGS-84 的比较	57
§ 4.5 国际参考框架与 2000 国家大地坐标框架的转换方法	60
第 5 章 卫星导航定位基准站网纳入 2000 国家大地坐标系方法	68
§ 5.1 卫星导航定位基准站网概述	68
§ 5.2 卫星导航定位基准站网数据处理	73
§ 5.3 卫星导航定位基准站纳入 2000 国家大地坐标系方法	86
第 6 章 2000 国家 GPS 大地控制网平差	93
§ 6.1 概 述	93
§ 6.2 平差基准与方法	94
§ 6.3 基线处理与网平差	98

第 7 章 空间大地测量观测技术和实现方法	106
§ 7.1 GNSS 观测技术和实现方法	106
§ 7.2 VLBI 观测和实现方法	110
§ 7.3 SLR 观测和实现方法	112
§ 7.4 空间大地测量组织	117
第 8 章 ITRF 综合处理方法	123
§ 8.1 空间大地测量解集	123
§ 8.2 数据处理综合模型	126
§ 8.3 ITRF 处理实例	135
第 9 章 参考框架的线性动态维持	139
§ 9.1 ITRF 框架维持	139
§ 9.2 2000 国家大地坐标框架的维持	146
§ 9.3 2000 国家大地坐标框架更新影响分析	168
第 10 章 2000 国家大地坐标框架的非线性动态维持	171
§ 10.1 非线性框架维持方法	171
§ 10.2 2000 国家大地坐标框架点非线性分析	172
§ 10.3 CGCS2000 非线性预测模型建立方法	180
§ 10.4 CGCS2000 框架站的非线性动态特性分析及建模应用	180
第 11 章 2000 国家大地坐标框架点稳定性分析	189
§ 11.1 影响框架点稳定性的因素分析	189
§ 11.2 框架点坐标时间序列分析方法	192
§ 11.3 基准点坐标时间序列分析实例	202
第 12 章 展 望	223
参考文献	226
缩略语	236
附 录	238

Contents

Chapter 1	Introduction	1
Chapter 2	Coordinate Systems and Frames	6
§ 2.1	Celestial Reference System and Terrestrial Reference System	7
§ 2.2	Ellipsoid-centered Coordinate Systems and Frames	7
§ 2.3	Geocentric Coordinate Systems and Frames	9
§ 2.4	Terrestrial Reference Frame	13
§ 2.5	Geocentric Coordinate Frame Conversions	25
§ 2.6	Coordinate Transformations	28
Chapter 3	Establishment of National Ellipsoid-centered Coordinate Systems and Frames	36
§ 3.1	Beijing Geodetic Coordinate System 1954 and Its Frame	36
§ 3.2	Xi'an Geodetic Coordinate System 1980 and Its Frame	40
Chapter 4	Chinese Geodetic Coordinate System 2000(CGCS2000) and Its Frame	45
§ 4.1	Definition of CGCS2000	45
§ 4.2	Ellipsoid Parameters of CGCS2000	46
§ 4.3	CGCS2000 Frame	51
§ 4.4	Comparison between CGCS2000 and WGS-84	57
§ 4.5	Transformation Method between International Reference Frame and CGCS2000 Reference Frame	60
Chapter 5	Incorporating GNSS Continuously Operating Reference Station (CORS) Network into CGCS2000	68
§ 5.1	Overview	68
§ 5.2	Data Processing of CORS Network	73
§ 5.3	Incorporating CORS Network into CGCS2000	86
Chapter 6	Adjustment of National GPS Geodetic Control Network 2000	93
§ 6.1	Introduction	93
§ 6.2	Adjustment Datum and Method	94

§ 6.3	Baseline Processing and Network Adjustment	98
Chapter 7	Space Geodetic Technologies	106
§ 7.1	GNSS	106
§ 7.2	VLBI	110
§ 7.3	SLR	112
§ 7.4	Organizations	117
Chapter 8	ITRF Processing	123
§ 8.1	Space Geodesy Solution	123
§ 8.2	Data Processing Model	126
§ 8.3	ITRF Case Study	135
Chapter 9	Linear Dynamic Maintenance of Reference Frame	139
§ 9.1	Maintenance of ITRF	139
§ 9.2	Maintenance of CGCS2000 Reference Frame	146
§ 9.3	Analysis of Updating CGCS2000 Reference Frame	168
Chapter 10	Nonlinear Dynamic Maintenance of CGCS2000 Reference Frame	171
§ 10.1	Methods of Nonlinear Frame Maintenance	171
§ 10.2	Nonlinear Analysis of CGCS2000 Reference Frame Stations ...	172
§ 10.3	Methods of Establishing Nonlinear Prediction Model for CGCS2000	180
§ 10.4	Applications of Nonlinear Modeling of CGCS2000 Reference Frame Stations	180
Chapter 11	Stability Analysis of CGCS2000 Reference Frame Stations	189
§ 11.1	Influencing Factors	189
§ 11.2	Coordinate Time Series Analysis	192
§ 11.3	Example of Coordinate Time Series Analysis of Reference Frame Station	202
Chapter 12	Prospect	223
References		226
Abbreviations		236
Appendix		238

第1章 绪 论

大地坐标系是确定地理空间信息的几何形态和时空分布的基础,是在数学空间里表示地理要素在真实世界的空间位置的参考基准。大地坐标系的建立,首先需要选择代表地球形状的旋转椭球,并求定旋转椭球的参数,即椭球的大小;其次确定椭球各轴的指向;最后确定椭球在代表地球的大地体内的位置。

在谈及地球椭球之前,需要先简单介绍地球形状的概念。我们知道,大地测量问题就是确定地球的形状及其外部重力场,同时还包括根据地球表面或外部观测到的参数确定平均地球椭球(Torge,1991)。平均地球椭球是为了更好地描述地球的形状及其外部重力场。地球形状是指地球的物理形状和数学形状。地球的物理表面是指地球(固体或流体质量)与大气之间的边界,这个不规则的地球表面(陆地和海底)不可能用简单的数学公式来描述,因此通常采用点位的坐标来描述。另一方面,海洋面占地球表面的71%,其形状简单,在一定的假设条件下可以作为水准面(即地球重力场的等位面)的一部分。因此,假想将这个等位的水准面延伸到地球的陆地表面下,则得到大地水准面,且可以将大地水准面作为地球的数学形状(Torge,1991)。

地球表面可由一个旋转椭球来很好地描述。该旋转椭球在两极处略扁,且与大地水准面的差异小于100 m,由几何上定义的椭球通常取代空间直角坐标系来描述点位坐标。旋转椭球是由子午椭圆绕其短半轴旋转得到,因此只需要两个几何参数就可定义旋转椭球。例如,可以通过椭球的长半轴 a 和短半轴 b 来定义椭球的形状,而更常用的做法是利用一个数值更小的参数来代替短半轴 b ,这样有利于级数展开式的计算。通常用来代替短半轴的有扁率 f 、线性偏心率 ϵ 、第一偏心率 e 和第二偏心率 e' 等。

为了描述地球的外部重力场,通常采用正常重力场作为地球重力场的参考场。对于给定了两个几何参数的旋转椭球,再定义椭球的两个物理参数——地球的总质量 M 和旋转角速度 ω ,则由于地球质量的引力及其旋转,就确定了地球重力场。严格说,地球不是椭球,但由于椭球的形状较为简单,椭球的重力场也更便于数学处理,并且椭球的正常重力场与地球的实际重力场之间的差异很小,通常将地球的重力场分为由正常椭球产生的正常重力场和扰动场。由于扰动场较小,因此更方便处理。如果椭球面又是正常重力场的等位面,则根据斯托克斯(Stokes)定理,在这个椭球面外部空间的重力场也就确定了,这样的椭球体有时又称为水准椭球(level ellipsoid)或等位椭球(equipotential ellipsoid)。如果椭球的参数与真实地

球相联系,则所得到的椭球在形状上可以认为是大地水准面的最佳近似,同时椭球的正常重力场也是地球重力场的最佳近似,这样定义的地球椭球称为平均地球椭球(mean earth ellipsoid)。

旋转水准椭球及其重力场可完全由 4 个常数确定,即两个几何参数确定椭球的大小,两个物理参数确定椭球的正常重力场。对于椭球的物理参数,椭球的质量 M 、重力位 U_0 、动力形状因子 J_2 及自转角速度 ω 等,根据地球的相应数值来定义,其中重力位 U_0 按大地水准面上的重力位 W_0 给定,而实际上只需定义两个物理参数即可。

根据平均地球椭球的定义,可以根据大地水准面差距 N 的平方和最小、垂线偏差 ξ 和 η 的平方和最小、重力异常平方和最小等条件来推算椭球的几何参数,这三种定义之间在理论上大同小异。

$$\iint_{\sigma} N^2 d\sigma = \text{最小}$$

式中, N 为大地水准面差距,积分为全球积分; $d\sigma$ 为面积分单元。

$$\iint_{\sigma} (\xi^2 + \eta^2) d\sigma = \text{最小}$$

采用垂线偏差数据仅适用于局部地区,所推算的地球椭球只是最适合局部地区的椭球,而不是平均地球椭球。路德斯基(Rudzki)所给出的类似定义,采用重力异常平方和最小作为限制条件(Heiskanen et al, 1967)。

$$\iint_{\sigma} (\Delta g)^2 d\sigma = \text{最小}$$

上述 N 、 ξ 、 η 、 Δg 等均可表示为椭球参数的函数(Heiskanen et al, 1967)。

定义地球椭球的 4 个参数时,有不同的选择方式。例如,海福德椭球所采用的 4 个参数为:长半轴 a 、扁率 f 、赤道上的正常重力 γ_e 、地球自转角速度 ω 。其中,长半轴和扁率是海福德在 1909 年利用美国的均衡归算后的天文大地观测数据推算的,赤道重力值是根据均衡重力值推算的(Heiskanen et al, 1967)。

随着科技的发展以及观测手段的不断提高,4 个椭球参数的定义方式和数值精度也在不断变化。例如,国际大地测量协会(International Association of Geodesy, IAG)曾经采用的大地测量参考系 1967、大地测量参考系 1980 等,所采用的 4 个椭球参数为:长半轴 a 、地心引力常数 GM 、动力形状因子 J_2 、地球自转角速度 ω 。在定义与地球质量有关的参数时,通常不直接定义地球的质量,而是定义地球质量与万有引力常数乘积的值,即地心引力常数。因为地球的质量难以直接确定,而根据开普勒第三定律,由卫星观测数据、空间探测器数据、激光测月数据等,则可以推算地心引力常数 GM 。

椭球大小确定后还需要进行椭球定位和定向,并将地面或空间观测量按一定的规则、数学模型、方法进行处理,得到各点在所定义椭球面上的坐标。国家大地

坐标系由国家大地控制网得以体现和应用。

我国国家大地坐标系的建立经历了两个阶段:以传统大地测量技术实现的参心坐标系和以现代大地测量手段实现的地心坐标系。

传统大地测量技术的实现是以我国天文大地网为代表。我国国家天文大地网是在全国领土范围内,由相互联系的大地测量点(简称大地点)构成,大地点的水平位置按国家统一的大地测量规范测定,并设有固定标志,以便长期保存。国家天文大地网中一些网点还要用天文观测方法测定天文经度、纬度和方位角,所以又称为天文大地网。

新中国成立后,我国就开展建立国家大地坐标系的工作。在国家大地控制网建设初期,采用了原苏联 1942 普尔科沃坐标系原点和克拉索夫斯基椭球作为 1954 北京坐标系的基础,通过我国测绘工作者艰辛努力,在全国范围内布测了数以万计的天文大地网点,建立了 1954 北京坐标系。20 世纪 80 年代初,对国家天文大地网进行了椭球定位和整体平差,由此建立了 1980 西安坐标系。该坐标系采用国际大地测量学和地球物理学联合会第 16 届大会推荐的椭球参数。椭球在地球体中的定位是在椭球面与中国大地水准面最佳拟合的条件下确定的,大地原点设在陕西省西安市泾阳县永乐镇。

在用三角测量为主要手段建立的国家大地控制网中,主要误差来源是角度观测误差。三角测量推进越远,误差积累越甚,边长和方位的精度随着推进的距离而逐渐降低。因此,除起始点的大地坐标、起始边长度和方位角外,必须每隔适当的间隔测设新的起始边和方位角,以控制误差累积。例如,国家天文大地网采用纵横锁系布网时,通常是在纵横三角锁段的交叉处布设起始边,测量其长度,并在其两端点上用天文观测方法测定天文经度、纬度和方位角;此外,在每一锁段中央的一个大地点上,也要测定天文经度和纬度。观测的天文方位角是以测站垂线方向为参考的,必须加入垂线偏差改正。通过拉普拉斯方程转换为大地方位角,用于大地网的方位控制。每一锁段中央测定的天文经度和纬度用于计算垂线偏差。

我国的国家天文大地网规模之大、网形之佳和质量之优,在世界居于前列,布设速度之快也是空前的,这是我国测绘界几代人艰苦奋斗、辛勤工作的结果。

近代空间大地测量技术发展迅猛,并很快应用于大地坐标系的建立与维持。建立和维持全球统一的地球参考框架已成为大地测量的主要任务之一。目前,在大地测量和地球动力学等领域,被广泛使用、精度最高、全球性的地球参考框架是国际地球参考框架(international terrestrial reference frame, ITRF)。该框架是由国际地球自转与参考系统服务组织(International Earth Rotation and Reference System Service, IERS)利用甚长基线干涉测量(very long baseline interferometry, VLBI)、卫星激光测距(satellite laser ranging, SLR)、全球导航卫星

系统(global navigation satellite system, GNSS)、星载多普勒定位和定轨系统(Doppler orbitograph and radio positioning integrated by satellite, DORIS)等空间大地测量资料以及并置站上的联测资料,经统一处理后来建立和维持的。随着观测精度的提高、观测资料的累积及数据处理方法的改进,ITRF 也在不断改善和精化。ITRF2005 框架之前,是通过组成该框架的各测站的三维坐标以及它们的年变化率的形式来具体实现的。但从 ITRF2005 开始,框架则是通过 VLBI、SLR、GNSS、DORIS 等空间大地测量技术所给出的测站坐标及地球定向参数的时间序列,经统一处理后予以实现。

1. 甚长基线干涉测量

两台配备了高精度原子钟、相距遥远的射电望远镜 A 和 B,同时对来自某一射电源的信号进行观测,利用干涉测量的方法对两台分别记录的信号进行相关处理,以求得信号到达 A、B 两站的时延 τ 以及时延的变率 $\frac{d\tau}{dt}$,进而精确确定基线向量 $\overrightarrow{AB}$,以及从射电望远镜至射电源的方向的一整套理论、方法和技术,称为甚长基线干涉测量。

2. 卫星激光测距

利用安置在地面测站上的激光测距仪对配有后向反射棱镜的卫星进行距离测量,根据激光脉冲测距信号往返传播的时间测定从地面测站至卫星的距离的方法和技术称为卫星激光测距。此外,美国在“阿波罗”登月计划中先后 3 次由宇航员在不同地点安放了 3 个后向反射棱镜阵列,原苏联则通过无人飞船在另两处安置了 2 个反射棱镜阵列。通过大功率的激光测距仪,对这些棱镜进行激光测距的工作则称为激光测月(lunar laser ranging, LLR)。新一代激光测距仪的测距精度已达厘米级甚至毫米级,每秒钟能进行 100 次距离测量,实现了单光子接收技术,有的测距仪在白天也可进行观测。

3. 全球卫星导航系统

GPS 是美国建设的一种全球性的卫星导航定位系统,与之相类似的还有俄罗斯的 GLONASS、欧洲的 Galileo 以及我国北斗导航卫星系统(BeiDou navigation satellite system, BDS)。这些全球性卫星导航定位系统统称为 GNSS。采用载波相位测量以及相应的数据处理技术,精度至厘米级后,即可精确测定从卫星至测站的距离,地面点的定位精度可达毫米级至厘米级。

4. 星载多普勒定位和定轨系统

DORIS 是法国研制的采用多普勒测量的方法来进行卫星定轨和定位的综合系统。与子午卫星系统相反,在地面跟踪站上安装信号发射机,而卫星上则安装信号接收机。目前,DORIS 系统在全球较均匀地布设了 70 多个地面站。该系统的主要功能是为低轨卫星提供了一种独立的高精度定轨方法。

基于精确 ITRF 框架,采用 GNSS 相对定位技术,在某一地区进行 GNSS 同步观测,经过数据处理便可以获得该地区的高精度的基于 GNSS 技术的地心参考框架。若这些观测点已不仅仅局限于该地区,而是全球分布的,则所建立的坐标系即为全球参考系。类似的坐标系有欧洲参考框架 EUREF 和南美洲 SIRGAS 计划建立的参考框架等。我国 2000 国家大地坐标系的实现是基于 ITRF97 框架建立的区域地心坐标框架。

坐标参考框架通常采用线性方法进行动态维持,主要是分析框架点坐标的线性变化,一般以板块运动模型和线性速度场模型来体现。毫米级坐标参考框架的维持需要顾及框架点非线性运动特征,建立框架点非线性运动模型,并进行框架点非线性变化的预报。

第2章 坐标系和坐标框架

大地测量的任务就是选择用于代表地球形体的旋转椭球,采用一定的理论和数学方法,对观测数据进行处理并在椭球上确定各点的位置。

我们把形状和大小与大地体相近且两者之间的相对位置确定的旋转椭球称为参考椭球。参考椭球面是测量计算的基准面。世界各国都根据本国的地面测量成果选择一种适合本国要求的参考椭球,因而参考椭球有许多个。这样确定的参考椭球在一般情况下与各国领域内的局部大地水准面最为接近,对该国的常规测绘工作较为方便。然而当我们将各国的测量成果联系起来进行国际合作时,则参考椭球的不同又带来了不便。因此,从全球着眼,必须寻求一个与整个大地体最为接近的参考椭球,称为总地球椭球。总地球椭球是指全球范围内与全球大地水准面最为接近的地球椭球。但因确定总椭球用到的全球数据有限,根据人造卫星和陆地大地测量的成果求出近似总地球椭球以供使用。

以参考椭球为基准的坐标系,叫作参心坐标系;以总地球椭球为基准的坐标系,叫作地心坐标系。无论是参心坐标系还是地心坐标系,均可分为空间直角坐标系和大地坐标系两种,它们都与地球体固连在一起,与地球同步运动,因而又称为地固坐标系。以地心为原点的地固坐标系则称为地心地固(Earth-centered Earth-fixed, ECEF)坐标系,主要用于描述地面点的相对位置;另一类是空间固定的坐标系,与地球自转无关,称为惯性坐标系或天球坐标系,主要用于描述卫星和地球的运行位置和状态。

大地测量参考框架(geodetic reference frame)是大地测量参考系统的具体实现,是通过大地测量手段确定的固定在地面上的控制网(点)所构建的,分为坐标参考框架、高程参考框架、重力参考框架。大地坐标参考框架是一组用于定义和实现特定大地坐标系统的参考点及其点位信息的集合。当考虑框架点位的时变信息时,时间尺度将成为该参考框架的组成部分。对于动力学参考框架,该集合由定义该框架的大地测量卫星、行星以及其他天体星历构成。该参考框架下任意点的点位坐标可以通过对这些框架点施加一定数量的观测来确定。

国家大地网建立时采用的坐标基准包括:参考椭球的长半轴和扁率,大地原点在大地坐标系中的大地经度、大地纬度、大地高程及大地原点至一相邻点的方向上的方位角,这些数据是推算国家大地网中各点大地坐标的依据。

§ 2.1 天球参考系和地球参考系

人们在研究宇宙天体运动之初,将恒星作为参考点。随着观测精度的提高,目前协议的准惯性参考系除了可用恒星来实现外,还可利用太阳系天体和河外射电源来实现。具有点源特征的一类星体与其他河外致密射电源是定义惯性参考系的理想天体,射电天体测量学的发展为天球参考系的建立提供了新的手段。

光学天球参考系是基于地球在空间运动的动力学模式,即采用动力学方法定义其春分点和赤道面,而国际天球参考系统(international celestial reference system, ICRS)是通过一套河外射电源的位置实现的,它基于运动学的概念。

天文参考框架是理论上定义的参考系的实现,通常用光学星表或河外射电源表来表示。从公元前150年至20世纪90年代,天文参考架都采用光学波段表达。

欧洲空间局(European Space Agency, ESA)在1989年8月8日成功地发射了依巴谷天体测量卫星,依巴谷星表和第谷星表是依巴谷卫星的主要观测结果,依巴谷星表测定了约12万颗恒星,构成了均匀的天球参考系,极限星等达到13 mag,其位置、自行与视差的精度分别为 $\pm 0.002''$ 、 $\pm 0.002''/a$ 、 $\pm 0.002''$ 。1991年国际天文学联合会(International Astronomical Union, IAU)决定使用河外射电源精确坐标来定义天球参考框架。1997年在日本京都召开的国际天文学联合会第23届大会给出了由212颗河外致密射电源构成的国际天球参考系统(ICRS),决定由依巴谷星表取代已沿用10多年的FK₅星表,成为ICRS在光学波段的实现,并将改进后的依巴谷框架称为依巴谷天球参考框架(Hipparcos celestial reference frame, HCRF)。1998年1月, IERS综合全球VLBI分析中心各射电源表,得到了国际天球参考框架(international celestial reference frame, ICRF),并取代了FK₅作为新的国际天文参考架。

IAU每次采用新的天文参考架,都需要把以往的观测资料换算至新的天文参考架,射电源的数目已由1988年的23个增加到1998年的608个。

§ 2.2 参心坐标系和坐标框架

2.2.1 参心坐标系

参心坐标系是以参考椭球的几何中心为基准的大地坐标系,通常分为参心空间直角坐标系(以 X 、 Y 、 Z 为其坐标元素)和参心大地坐标系(以 B 、 L 、 H 为其坐标元素)。

参心空间直角坐标系是在参考椭球内建立的 O - XYZ 坐标系,原点 O 为参考椭球的几何中心; X 轴与赤道面和首子午面的交线重合,向东为正; Z 轴与旋转椭球的短轴重合,向北为正; Y 轴与 Z 、 X 轴构成右手系。

“参心”意指参考椭球的中心。在测量中,为了处理观测成果和传算地面控制网的坐标,通常需选取一参考椭球面作为基本参考面,选一参考点作为大地测量的起算点(大地原点),利用大地原点的天文观测量来确定参考椭球在地球内部的位置和方向。参心大地坐标系的应用十分广泛,它是经典大地测量的一种通用坐标系。根据地图投影理论,参心大地坐标系可以通过高斯投影计算转换为平面直角坐标系,为地形测量和工程测量提供控制基础。由于不同时期采用的地球椭球不同,其定位与定向不同。

参心坐标系是我国基本测图和常规大地测量的基础。新中国成立后,我国就着手建立新的统一的国家大地坐标系统。由于当时技术与经济交通条件的限制,要在全中国建立统一的坐标系统,其工作量相当大,经过测绘工作者近4年的努力,我国扩展和延伸了原苏联1942普尔科沃坐标系,于1954年首次建立了我国统一的国家大地坐标系——1954北京坐标系。

经过天文大地网整体平差后,我国又建立了两种参心坐标系,即1980西安坐标系和1954北京坐标系(整体平差转换值)。这三种参心坐标系目前均在使用,在过渡期后将停止使用,见附录F。

自20世纪80年代以来,现代大地测量技术迅猛发展,传统大地坐标系统已经不能起到控制和基准的作用,其局限性表现(陈俊勇等,2007a)为:

(1)区域性:传统大地坐标系统属于区域性大地坐标系统,不能满足空间大地测量技术发展需求,不利于全球性科学问题研究。

(2)二维坐标系统:物体的三维坐标在传统大地坐标系中表现为平面的二维坐标信息,三维坐标信息依靠高程系统,其精度受限于高程系统。

(3)精度低:框架点间相对精度一般只能达到 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 量级,且精度分布不均匀。

(4)现势性和可维护性差:传统大地坐标系统一般是通过传统大地测量手段进行大面积布测天文大地控制网实现,观测周期长,其现势性和可维护性差,且对物体运动状态描述缺乏时间维信息。

2.2.2 参心坐标框架

参心坐标框架主要通过建立天文大地网来实现和维持,是参心坐标系统的具体实现。参心坐标系统是一种近似的三维参考系统,由二维的水平坐标系以及正高加大地水准面差距(或正常高加高程异常)所得大地高组合实现的垂直坐标系,是一种非地心、区域性、静态的参考系统。

参心坐标框架主要依赖于传统大地测量技术手段,受测量技术和数据处理手段的制约,由天文大地网所建立的坐标参考框架存在着较大的内部误差和局部畸变,难以满足现代高精度长距离定位、精密测绘、地震监测预报和地球动力学研究