



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

现代大地 控制测量 (第二版)

Contemporary Geodetic Control Survey

施一民 编著

测绘出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

现代大地控制测量

Contemporary Geodetic Control Survey

(第二版)

施一民 编著

测绘出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材。与 2003 年出版的《现代大地控制测量》(第一版)相比,在内容和文字上都有较大的变动,其一是反映了我国和国际上大地控制测量领域的最新进展,其二是更如实地反映现代测绘技术的新面貌,更紧密地结合当前的测绘生产实际。本书不再是以成为历史的二维国家大地网的建立为主旨,而是按照现代测绘科学技术的发展和教学内容现代化的要求来安排组织教学内容,从空间定位及点位的几何表述方面来为 GPS、GIS、RS 技术打基础,力图使之成为 3S 技术的理论基础课。

本书内容新颖,学术性强。在努力反映测绘技术国内外最新发展的同时,还包括了编著者四十多年来从事大地控制测量及卫星大地测量的教学、科研和生产的科研成果、实践经验。在内容的取舍和叙述的详略上又注意了实用性,还列举有大量的测绘工程实例,兼顾了测绘界科技人员知识更新的迫切需要。

本书可作为测绘类专业本科、研究生规划教材,也可用于高等院校相关专业的教学。同时本书较深入地论述了大地控制测量领域新旧技术的交替,全面系统地介绍了应用甚广的城市及工程控制网从测设到数据处理的整个过程。因此读者对象除了高校师生外还可包括测绘界及有关部门的科技工作者。

图书在版编目(CIP)数据

现代大地控制测量/施一民编著. —2 版. —北京:测绘出版社,2008.8

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-5030-1870-1

I. 现… II. 施… III. 大地测量—控制测量—高等学校—教材 IV. P221

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 110674 号

责任编辑 田 力

封面设计 李 伟

出版发行 **测 绘 出 版 社**

社 址 北京西城区复外三里河路 50 号

邮政编码 100045

电 话 010-68512386 68531558

网 址 www.sinomaps.com

印 刷 北京市通州次渠印刷厂

经 销 新华书店

成品规格 184mm×260mm

印 张 18.5

字 数 500 千字

版 次 2003 年 6 月第 1 版 2008 年 8 月第 2 版

印 次 2008 年 8 月第 2 次印刷

印 数 3001—6000

定 价 32.00 元

书 号 ISBN 978-7-5030-1870-1/P·489

如有印装质量问题,请与我社发行部联系

第二版前言

自 2003 年《现代大地控制测量》(第一版)出版以来,作者在随后的教研中不断发现书中存在的不足和疏漏之处,亟须进行全面彻底的修改,尤其是我国的大地控制测量技术近年来进展神速,面貌殊变,作为教材而言,在内容上自当与时俱进。新编之意既萌,又有幸获准列入国家级“十一五”规划教材,故虽临退休之年,仍不惮绵薄,欣然完篇,以奉献于莘莘学子和广大读者。

新编教材试图反映当今测绘技术的现代化进程。在《现代大地控制测量》中虽列有“全国三维地心坐标系统的建立”这一节,但因当时还没有真正建立起统一的、法定的国家三维地心坐标系统,作者只是依据国内外测绘技术的发展趋势及有关学者、专家论文中的展望和建议写成的。而今我国已成功地建立了 2000 国家 GPS 控制网,并实现了与全国天文大地网联合平差,从而实现了所定义的我国新一代地心坐标系统,亦即作为全国现代大地基准之重要组成部分的 2000 国家大地坐标系(CGCS 2000),这对我国测绘科学技术将产生直接而又深远的影响。为更好地适应这一新的技术形势,在新编教材中增加了现代大地基准的建立,国家和地区似大地水准面的精化以及国家和区域性导航卫星连续运行参考站和综合服务系统的建立等新内容,有关章节的内容也作了相应的改动。

在此还需说明的是,作者并未亲身参加过这些国家大地测量的重大科学工程项目,书中的文字介绍主要是基于有关学者、专家的论文写成的,而为便于教学,免不了要加上一些分析和演绎,但这仅是作者个人的学习体会,若有画蛇添足、理解有误之处,敬请有关学者、专家不吝指正。

随着测绘技术的发展,本书中修正了原书中一些已不合时宜的陈述。例如原书中将首级控制网必是独立网作为城市及工程控制网测设特点之一,这是鉴于长期以来二维国家控制点实际精度较低,不足以控制城市及工程控制网。而今随着 2000 国家 GPS 控制网和一些省份的 GPS C 级网的建立,完全可以通过附合网平差定位来获得城市及工程控制网首级网点的三维地心坐标。因此独立网已不再是城市及工程控制网首级控制的唯一形式,而随着空间技术的发展和需求的提高,城市及工程网点也应当兼有三维地心坐标,这正是实现城市控制网进一步现代化的重要内容,从而更好地满足现代经济和社会发展的各方面需求。

原书中有关“测地坐标系”的陈述现已完全被新编教材中的 § 2-7 所代替,所提出的一种新型的大地坐标系是作者近年来的研究成果,新型大地坐标系不仅克服了“测地坐标系”在理论上的不足之处,在应用上也有其一定的优点。但作为理论上的一个探索,因尚未及推广应用,亦可不安排在课堂教学,供有兴趣和有余力的学生参考,作者寄望于有志者日后能发扬光大,进一步发掘出其应用潜力。

随着卫星定位技术的迅速发展,近年来大地测量学科和技术发生了根本性的变化。现今以 GPS 卫星定位技术为代表的空间大地测量技术,已经成为建立大地控制网的主要手段。大地测量的应用已日趋广泛地深入到各行各业,已从专业化扩展为大众化的应用技术。这就对大地控制测量的课程内容提出了现代化的要求,作者虽有心于此久矣,亦身体力行,但因力有未逮,实难尽如人意,愿以本书为引玉之砖,希冀获得各方面的批评和指教。

本书是在国家自然科学基金项目(49971067,40471114)资助下撰写完篇的,书中的不少内容正是作者所主持完成的基金项目的部分研究成果。

十分感谢测绘出版社对本书申报国家级“十一五”规划教材的支持和评审专家对本书的厚爱和建议,并承蒙测绘科技专著出版基金会对本书的出版给予了资助。

同济大学大地测量教研室同仁们和金国雄老师对作者的编著工作给予了多方面的帮助和支持,在此深表谢意。

大地控制测量既是测绘新技术 GPS、GIS 和 RS 的基础理论,又是实践性很强的实用技术,而对实践中的有关问题提炼到理论上予以分析、探究和解决,亦有助于理论上的创新。多年来,承蒙许多单位为本人提供了宝贵的实践机会,尤其是宁波市测绘设计研究院和市规划局测管处热情地与本人保持了长期科研、生产合作关系,更是受益匪浅。

对于本书的新增内容,博士研究生冯琰、王丽华,硕士研究生王勇红、张虎、罗彦、陈月梅、陈伟,本科生李俊明、范业明、孙伟伟等同学都先后参加过研究工作,广东省国土资源厅测绘院工程师朱紫阳离校后仍保持与作者的密切合作,参加了不少研究工作,硕士研究生陈伟承担了本书的校订排版、插图的修改加工,对他们所付出的辛勤劳动在此一并致谢。爱女佳莉为书中的大部分插图制作亦花费了心血。

作 者

2007 年冬于上海同济大学

第一版前言

以往在工程测量和大地测量专业中分别开设有《控制测量》和《大地测量》，作为一门专业主干课程，其主要内容是围绕着用常规测量技术在设定的国家参考椭球面上建立二维的国家大地网以及平面控制网平差。但前者已成为今后不再重演的历史，且在建网方面国家大地网又不同于应用广泛的工程控制网，须有所区分；鉴于测绘科学技术的发展和教学现代化的要求，就应超出经典大地测量的范畴，对该课程历经数十年而形成的教学体系和教学内容进行较彻底的改革。

现代大地测量主要是以空间大地测量技术(如 GPS)为手段来进行三维地心坐标的定位，从而对地球进行测量和描述。就大地测量学科的内涵而言，除了研究地球的形状大小、进行空间点的定位外，还需要开展对地球重力场及其变化的研究。空间大地测量学和物理大地测量学正是大地测量学科的两大学科支柱，其有关课程在测绘工程专业中均已单独开设，因此再将该课程笼统地称之为《大地测量》，似有名实不符之嫌。鉴于大地控制网今后主要采用 GPS 定位技术，二维控制网将发展为三维控制网，国家坐标系将与国际接轨，数字地球、数字中国、数字城市已成为测绘技术发展的必然趋势，再从测绘工程专业的培养目标出发，该课程应是通过对大地控制网建立原理和方法的论述，着重从空间定位及点位的几何表述方面来为 3S 技术打基础，因此将课程定名为《现代大地控制测量》似较为确切。

以往用常规测量技术来进行工程控制测量，实际上也用不上多少大地测量知识，而如今为了掌握和应用 GPS 技术就需有扎实的大地测量功底，作为 GIS 的空间数学基础已是大地测量学科新的历史使命，RS 技术则亦离不开各类地球坐标系的表述及其转换关系。从课程性质而言，《现代大地控制测量》就应当成为测绘新技术 GPS、GIS 和 RS 的理论基础课。

为此，本书进一步加强了对大地测量基础理论的阐述。引进了微分几何中曲面论、曲线论的有关知识来分析地球椭球面上点、线、面的数学性质，突出了各类地球坐标系的意义和作用，将地球坐标系和地球椭球放在一起论述。并从工程控制网本身特点出发，从理论上分析其坐标系的性质及其所对应的区域性椭球，阐述了应用甚广的城市及工程控制网从测设到数据处理的整个过程，分析了 GPS 网平差转换的原理和方法。

本书不再述及有关大地测量仪器的原理和使用，以往将 J2 级与 J6 级经纬仪、普通水准仪与精密水准仪、短程测距仪与中程测距仪分开在《测量学》与《控制测量》两门课程中介绍，现在看来未必合理。同济大学测量系经过教学改革后，已将有关大地测量仪器(精密光学经纬仪、测距仪、全站仪、精密水准仪)的结构、工作原理、操作方法、检验校正及归心改正等内容合并到《测量学》课程中介绍。实际操作技能则在《测量实验》及集中三周时间的《大地控制测量实习》中予以加强。

本着教学现代化的宗旨，本书对原有的教学内容作了较大的精简和改动。修正了已不合时宜的一些概念和提法；增加了许多有关现代大地测量的新内容；仍然保留了椭球面上的解算等经典内容，这一方面是为了使学生对虽是以往建立但今后还有利用价值的国家大地控制网有所了解，同时考虑到这些经典知识还会有新的用途。例如站心坐标系原本是用来导出垂线偏差公式及拉普拉斯方程，如今对于 GPS 技术也是有用的工具。由于 GPS 基线向量(三维坐

标差)可看做以基线一端点为站心、另一端点在与 WGS 84 相应的站心赤道坐标系中的坐标,据此即可通过相应的站心地平坐标系中的坐标,进行方位角的计算以至 GPS 网的旋转变换。而已被纳入本书内容的作者的研究成果,椭球面另一类测地坐标系的建立和转换以及区域性椭球面的最优确定就运用了大地坐标微分公式、大地线、椭球面上三角形解算、大地主题正反解及参考椭球定位等经典知识。

20 余年来,作者在同济大学测量系始终从事着有关卫星大地测量及大地控制测量的课程教学和科研工作。为了利于学生掌握测绘高新技术,使能学以致用,理论联系实际,历时 3 载,经多次修改完善,终于实现了著述新教材的夙愿,并已在同济大学先后用于测绘工程、土地管理、地球物理专业 4 个学期的本科生及历年的研究生教学。

本书是在国家自然科学基金项目(49971067)资助下撰写完篇的,书中的某些内容正是作者所主持的基金项目的部分研究成果。

承蒙中科院上海天文台朱文耀研究员、上海交通大学寇新建教授、同济大学王解先教授在百忙之中对本书作了初审,并提出了宝贵的意见。作者的老师金国雄教授及大地测量教研室同仁们也对作者的工作给予了多方面的帮助和支持,在此深表谢意。

博士生冯琰,硕士生张文卿、周拥军、张立强、李健及 98 级本科生朱紫阳等都为本书的出版参加过工作,同济大学土管 98 级、测绘 99 级部分学生也曾帮助绘制部分插图、打印部分文稿。对他们所付出的辛勤劳动在此一并致谢。

《现代大地控制测量》2002 年已由教育部审定为“十五”国家级规划教材。衷心感谢评审专家对本书的肯定,尤其感谢评审专家组组长宁津生院士的垂青和支持。

十分感谢测绘科技专著出版基金对本书出版所给予的资助以及本书的责任编辑李建明老师精心的编辑审校,使原稿生色不少。

作者虽志在改革,殚精竭虑,但限于水平,终究难以如意,管窥之见,亦未必妥善。冀请前辈、同仁及读者不吝指教。

作 者

2002 年冬于上海同济大学

目 录

第一章 绪 论	1
§ 1-1 大地测量学的定义、分类和任务	1
§ 1-2 空间大地测量技术概述	2
§ 1-3 地球形状表述的数学模型和物理模型	7
第二章 地球坐标系和地球椭球	12
§ 2-1 概 述	12
§ 2-2 地球椭球面的数学性质和有关计算	13
§ 2-3 椭球面上大地坐标的计算	36
§ 2-4 空间大地直角坐标系及其转换模型	46
§ 2-5 参心坐标系和参考椭球	64
§ 2-6 协议地球参考系和平均地球椭球	74
§ 2-7 一种新型的大地坐标系的确定及其应用	76
第三章 高斯投影及高斯平面直角坐标	100
§ 3-1 地图投影概述	100
§ 3-2 正形投影与高斯-克吕格投影	109
§ 3-3 高斯投影坐标正算和反算公式	111
§ 3-4 平面子午线收敛角和长度比	115
§ 3-5 高斯投影距离与方向改化以及坐标方位角	118
§ 3-6 通用横轴墨卡托投影	122
§ 3-7 局部区域中的高斯投影及相应的区域性椭球	124
第四章 国家坐标系的建立与国家控制网的平差	126
§ 4-1 国家现有二维大地坐标系的建立及天文大地网整体平差	126
§ 4-2 协议天球和地球参考框架的建立	135
§ 4-3 我国新一代地心坐标系统 2000 国家大地坐标系的定义、建立和维持	137
§ 4-4 2000 国家 GPS 大地控制网的整体平差	139
§ 4-5 2000 国家 GPS 控制网与全国天文大地网的联合平差	141
第五章 城市及工程平面控制网的测设与数据处理	147
§ 5-1 工程平面控制网的测设特点与布设形式	147
§ 5-2 平面坐标系的选择与确定	154
§ 5-3 工程控制网的技术设计、选点与埋石	160

§ 5-4	平差前各类观测值的归算改化与质量检验	166
§ 5-5	观测权之确定和赫尔默特方差分量估计	178
§ 5-6	按条件平差解算单导线和导线网	184
§ 5-7	边角网的按坐标参数平差	193
§ 5-8	GPS 工程控制网的平差与转换	208
§ 5-9	城市及工程控制网平面点位精度的合理评定	228
§ 5-10	现代技术条件下的区域性控制网	250
第六章	高程控制网的建立	257
§ 6-1	我国的高程系统	257
§ 6-2	国家高程基准	263
§ 6-3	国家与工程精密水准网的布设与解算	264
§ 6-4	电磁波测距三角高程测量	269
§ 6-5	国家和地区似大地水准面的精化	275
§ 6-6	用 GPS 水准几何方法测定正常高	278
参考文献		280

第一章 绪 论

§ 1-1 大地测量学的定义、分类和任务

大地测量学是地球科学的一个分支学科,即为人类的活动提供地球空间信息的科学。它着重于研究地球形状大小的几何特征及其最基本的物理特征——地球重力场,这是它作为一门地学基础性学科的内涵。同时它又是一门应用地学学科,作为其主要应用,大地控制测量的基本任务是建立一个协议地球参考坐标系并将国家三维地心坐标系纳入到这个坐标框架;建立国家测量控制网乃至不同形式的城市及工程控制网,精确地测定控制网点之间相对的空间位置,据此就能为经济建设、科学技术和国防提供丰富的空间信息。按照研究对象的不同,大地测量学可分为几何大地测量学和物理大地测量学两个学科分支,几何大地测量学是以地球形状大小的几何特征为研究对象,物理大地测量学则是致力于地球重力场及其变化的研究。

经典大地测量的技术手段是使用光电仪器进行地面几何测量(边、角测量,水准测量)、天文测量和地面重力测量,分别以间接的方式确定地面控制点的二维坐标及高程、求解局部重力场参数。由于地面几何测量是以两点间可通视为实施条件,这就限制了边角测量的最大边长一般不超过 40 km。相对定位测量的平均精度只能达到 10^{-5} ,作业效率低下,定位的分离性、相对性、局部性正是经典大地测量本身固有的局限性,这不仅限制了它深入到地球科学领域作出其应有的贡献,而且在工程应用中也殊属不易,完成一个地区的大地控制测量常需要花费数年甚至数十年的时间。

20 世纪下半叶,随着现代科学技术的迅速发展,尤其是 1957 年第一颗人造地球卫星上天以来,产生了以卫星大地测量为主的各种空间大地测量技术,导致大地测量出现了革命性的突破:空间大地测量的精度比经典大地测量提高了 1~3 个数量级,从根本上突破了经典大地测量的时空局限性。以空间大地测量为标志的现代大地测量将扩大其直接服务于社会经济活动的应用面,远远超出了传统的测量领域;并且向地球科学的纵深层次发展,加大了与地学其他学科的交叉渗透,将成为推动地球学科发展的一个前沿学科,在地学研究上,它能承担以下的基本任务:

(1) 建立和维持高精度的协议惯性坐标系(CIS)和协议地球坐标系(CTS),建立和维持区域性和全球的三维大地网,长期监测网点随时间的变化,为大地测量定位和研究地球动力学现象提供一个高精度的地球参考框架和地面基准站网。

(2) 监测和分析各种地球动力学现象,诸如极移和地球自转速率的变化以及板块运动和区域地壳形变,地球潮汐,海面地形和海平面变化。

(3) 测定地球形状和地球外部重力场精细结构及其随时间的变化,使全球重力场模型获得更精密、更高阶次的系数,通过局部重力场模型的研究使大地水准面的确定达到分米乃至厘米级精度,并且具有更高的分辨率。

§ 1-2 空间大地测量技术概述

空间大地测量技术的观测对象是各种人造地球卫星信号或河外射电源信号。如图 1-1 所示,在 O -XYZ 地心惯性坐标系中,卫星 S 及地面观测站 P 在某一观测瞬时 t 的位置向量分别为 $r(t)$ 及 $r_p(t)$,于是由测站至卫星的卫地距向量为

$$\rho(t) = r(t) - r_p(t) \quad (1-2-1)$$

各种卫星大地测量技术所获得的观测值均与卫地距向量有关,可进行方向观测、距离测量、距离差测量和距离变率测量,所对应的观测量分别为: e_ρ (测站至卫星的单位向量)、 ρ (卫地距)、 $\Delta\rho$ (两相邻时刻的卫地距之差)、 $\dot{\rho}$ (卫地距变化率 $d\rho/dt$),它们与卫地距向量之间的关系可表示为

$$\begin{aligned} \rho(t) &= [\rho^T(t) \cdot \rho(t)]^{\frac{1}{2}}, & e_\rho(t) &= \frac{\dot{\rho}(t)}{\rho(t)} \\ \Delta\rho(t_1, t_2) &= \rho(t_2) - \rho(t_1), & \dot{\rho}(t) &= \frac{\rho^T(t) \dot{\rho}(t)}{\rho(t)} \end{aligned} \quad (1-2-2)$$

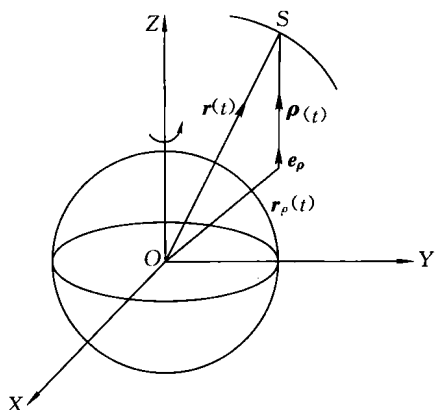


图 1-1

测站在地心惯性系中的位置向量 $r_p(t)$ 与其在协议地球坐标系中的位置向量 $r_{p_0}(t)$ 存在着已知的转换关系

$$r_p(t) = (PR)^T (NR)^T B_1^T B_2^T r_{p_0}(t) \quad (1-2-3)$$

式中, PR 、 NR 、 B_1 、 B_2 分别为岁差、章动、地球自转及极移矩阵,其意义可参阅有关卫星大地测量的著作。

在精密测定卫星轨道后,也可利用式(1-2-3)的逆转换式,将卫星在任一瞬间的位置向量由地心惯性系转换为地心地固坐标系。

卫星大地测量方法有几何法和动力法之分,在几何法中是把卫星当作高空的观测对象,并不去顾及人造地球卫星复杂的轨道运动。而动力法则须研究卫星轨道随时间变化的规律,为此须建立卫星运动模型,设定力

模型;在观测方程中同时包含地面点坐标、卫星轨道初始状态改正数及精化摄动力模型参数等待定参数。

最典型的几何法是卫星摄影法,在两个地面测站 P_1 、 P_2 上以恒星星空为背景对卫星至少同步观测两次,经过对底片的量测和归算以及一系列的计算,即可获得两测站连线 P_1P_2 方向在地固坐标系中的单位向量。利用卫星摄影法可建立三角网,每个三角形各边的弦方向均由同步摄影来测定,由三角形的三个弦方向共面的条件来进行卫星三角网的整体平差,此时还须给定一个地面测站的已知坐标及至少一条已知边的边长。

卫星摄影法是 20 世纪 60 年代主要采用的一种卫星大地测量方法,曾被美国用于建立全球三角网,它由分布在全球的 45 个站所构成,受观测精度及观测条件的限制,目前已很少使用。但作为一种测定方向的方法,通过它可以测定相对于星表系统的空间方向,在确定经度零点上还有一定的意义。

1964 年起,美国海军导航卫星系统(NNSS)正式运转,它是利用多普勒频移效应在接收机

中获得两个卫星时标之间接收到的卫星信号频率与接收机发射的信号频率之间差频的周数(多普勒计数),从而可获得作为观测值的卫地距之差 $\Delta\rho$ (积分多普勒观测)或卫地距变化率 $\dot{\rho}$ (微分多普勒观测,当其对应的积分间隔足够短时),再由接收到的广播星历所推算出来的卫星在地固坐标系中的坐标,即可按最小二乘法解算观测方程而确定站坐标。无论是由单独一个测站观测子午仪卫星多次通过的单点定位方法还是为减弱某些系统误差影响在两个测站同步观测卫星而确定两站之间相对位置的联测定位方法都应当看做几何法。应用者并不需要考虑卫星在轨道上的复杂运动,借助于广播星历或事后公布的精密星历就能获得所需瞬间的卫星坐标。其实,卫星多普勒定位的几何原理就是双曲面定位。

卫星多普勒测量的另一种定位方法是短弧法或半短弧法定位,即将卫星的轨道参数连同多个联测站的站坐标一起作为待定参数,在定位的同时进行轨道改进。由于采用的卫星轨道弧段较短,推算轨道可采用简单的力模型,对摄动力只取 6×6 阶次的地球形状摄动位系数,观测方程中只包含 6 个或 3 个轨道参数、站坐标及偏差参数,求解时须固定一个站的位置以消除秩亏。

卫星多普勒测量从 20 世纪 70 年代至 80 年代初在解决大地测量地球动力学问题方面曾有重大贡献。例如国际上地球自转监测和观测比较计划(MERIT)的 1980 年的首次联测中,由多普勒观测结果得出的地极坐标的测定中误差达到 $\pm 0.04''$ 左右。70 年代美国曾在其领土上建立了由 140 个点构成的多普勒网。1980 年我国曾建立了由 37 个测站组成的卫星多普勒大地网,点间距离为 300~1300 km,平均边长 700 km,经短弧法平差后点位的内符合精度约为 ± 1 m,外符合精度约为 ± 2 m。

美国所建立的世界大地坐标系 WGS 72 就采用了大量的多普勒数据。随后取得广泛应用的全球定位系统 GPS 就是在海军导航卫星系统(NNSS)基础上加以改进而发展起来的,法国的 DORIS 也是一种卫星多普勒定位技术,1994 年后其观测数据也在建立国际地球参考框架中被采纳。

目前,最精确有效、贡献最大的空间测量技术主要有:

一、卫星激光测距

由测距仪激光器产生并射出的激光脉冲抵达配备有后向反射棱镜的测距卫星又反射返回接收,即可精确测定往返传播的时间,而求得卫地距,这就是卫星激光测距(SLR)。有关激光测卫的具体工作原理和对实测距离所施加的一系列改正,可参阅有关的专著。这一技术始于 20 世纪 60 年代中期,当时测距精度为米级,目前最好精度已达约 1 cm。

SLR 是目前精度最高的绝对(地心)定位技术,在定义全球地心参考系中起着决定性作用,也可精确测定地球自转参数;又是卫星重力技术确定全球重力场低阶($n<50$)模型的主要工具;是建立大地测量参考框架(CIS 和 CTS)以及研究地球动力学问题的基本技术手段。

可利用全球分布的多个激光测卫固定台站,对专用的装有激光反射器的卫星(如 Lageos, Geos-1,2,3)作较长弧段的观测。作为动力学解算要用数值法求解卫星运动方程以计算参考轨道,并求解含有各类参数的观测方程,经过长期的反复趋近解算,得以获得待定参数的精确值。

我国已有 5 个 SLR 固定站,上海、武汉和长春已拥有第三代卫星激光测距仪,测距精度优于厘米级。

此外,与 SLR 相类似的还有可用于测定地球自转参数及其变化的激光测月技术(LLR),目前全世界仅有 5 个激光测月观测台站开展这方面的工作,它可作为与其他技术相比较的一种手段。1994 年以后在 ITRF(国际地球参考框架)建立中已不再采纳 LLR 站的数据。

二、甚长基线干涉测量

甚长基线干涉测量(VLBI)的观测对象(射电源)是位于银河系以外的类星体,至今已发现的类星体约有 3 000 个,其直径只有一光年左右,但与地球却相距数万光年以上,因此地球至类星体的方向可视为固定不变,并完全可以认为同一类星体到地球上两地的射电源信号的方向互相平行。在两个 VLBI 台站上的射电望远镜,由各自采用的独立本振信号和记录磁带同时对某一射电源进行观测,按照射电干涉的原理经过对两测站接收信号的互相关处理,可得出射电信号到两接收天线的时间延迟和条纹率的实测值,经过一系列改正后得出几何时间延迟和几何条纹率,为了求定基线向量,至少要向不同的射电源测量三个时间延迟值。VLBI 数据处理的结果可解出基线向量在地心坐标系中的三个分量。如果在时延观测方程中将射电源在天球赤道坐标系中的位置(赤经、赤纬)也作为待定参数,则也可求定射电源的位置。

利用长期积累的 VLBI 观测数据,可编算出精确的河外射电源位置表,由此而定义协议惯性参考系 CIS(Conventional Inertial System),可称之为射电源 CIS。其原点可选在地球质心、太阳系质心或其他地方,视应用上的方便而定。目前国际上由 VLBI 对单个河外射电源测量而实现的定位精度已达 $0.25'' \times 10^{-3}$ 量级,而框架网的定位精度更达到了 $0.030'' \times 10^{-3}$ 量级。

射电源 CIS 的精度要高于恒星 CIS。1984 年起恒星 CIS 是由第五基本星表(FK 5)收录的按全天均匀分布的一定数量的恒星所给出的每颗星在某一固定历元的平赤经和平赤纬及其随时间的变化(岁差和自行)所确定的、基于某一固定历元的平赤道和平春分点的平天球坐标系,其原点在天文学中是选定在日心,从而使星表中提供的恒星位置不随地球公转而变化。按照 1997 年第 23 届国际天文学联合会(IAU)决议,从 1998 年起光学观测参考系 FK 5 被依巴谷星表系统所取代,依巴谷参考系已被列入到国际天球参考系。而通过 VLBI 观测得到的射电源 CIS,对于大地测量和地球动力学的应用来说,是最有用的协议惯性坐标系,但它的定向现在是通过与依巴谷星表的联系来确定的。

由河外射电源相对位置所定义的 CIS 可用作监测协议地球坐标系(CTS)运动的参考框架,例如,所谓地球自转速度变化,实质上就是指 CTS 旋转速度相对于 CIS 的变化。VLBI 测量现在仍是测定长基线及监测全球板块运动最精密可靠的技术,测定距离的精度可达 10^{-9} 。而其测定地球自转速度变化的精度为 0.05 ms,测定极移的精度为 $0.001''$,VLBI 技术现在是监测板块运动、建立和维持全球参考框架的主要手段,可提供确定地球自转轴方向的数据和地面 VLBI 测站点的位置、移动速度以及 VLBI 测站点之间的尺度。

VLBI 用于大地测量的全球性计划主要有:美国航空航天局(NASA)的地壳动力学计划以及国际地球自转服务(IERS),其观测资料主要来自国际射电干涉测量网(IRIS)。我国早在 1978 年建成的上海天文台 VLBI 站至今已多次参加国际联测和国际合作计划,1993 年乌鲁木齐也建成了口径为 25 m 的射电望远镜,1999 年在昆明已设置了流动型 VLBI,从而已形成了包括上海、乌鲁木齐、昆明的我国的 VLBI 站网,可用于天文研究、天体测量和测地学,也可用于深空探测卫星的事后精密定轨研究。

如在 2007 年 10 月 24 日我国探测月球的“嫦娥 1 号”卫星成功发射后,即由上海、北京、昆

明和乌鲁木齐四地 VLBI 观测站构成 VLBI 测轨网,配合 USB 技术,进行全程测控,以满足“嫦娥 1 号”月球探测器各飞行阶段的遥测、遥控、轨道测量和导航任务。

三、卫星重力和卫星测高技术

人造地球卫星可用来探测地球重力场信息,以弥补地面重力测量技术的缺陷。自 20 世纪 60 年代起就开始由地面跟踪卫星轨道来确定地球重力场的低阶位系数。为获得高精度、高分辨率的从静态到动态的全球重力场模型,近二十年来广泛采用卫星跟踪卫星,即 SST(Satellite to Satellite Tracking)和卫星重力梯度技术。

SST 技术是指两颗运行中的卫星之间的精密测距测速跟踪,由于有了 GPS 技术的支撑,遂演化成高低卫星之间的跟踪(High-Low Satellite to Satellite Tracking)和低低卫星之间的跟踪(Low-Low Satellite to Satellite Tracking)。在前一个观测模式中,专用的低轨卫星载有高精度的加速度仪,用以测定低轨卫星因非保守力引起的摄动加速度,并载有 GPS 接收机,用以接收来自多颗 GPS 卫星(作为高轨卫星)的信号,由此而精密确定每一历元低轨卫星的轨道。

在后一个观测模式中,相距 200 km 左右两颗低轨卫星都分别载有 GPS 接收机和加速度仪,各自与 GPS 卫星构成高低卫星之间的跟踪,与此同时两颗低轨卫星之间又互相以微米级的测距测速精度相互跟踪。得益于观测数据的增加,其恢复低阶重力场的精度约可提高两个数量级,而中波长的地球重力场测定精度约可提高一个数量级,由于是在较长时期内连续不断地观测,就可精确地测定中低阶地球重力场随时间的变化。

卫星重力梯度技术是指在低轨卫星上载有高精度的超导重力梯度计,用以测定卫星处的重力梯度张量,由于重力梯度值是地球重力位的二阶导数,因此有助于恢复地球重力场的高阶部分(达 180 阶以上),解算精度可提高一个数量级。

国际上已实施 SST 技术的卫星重力计划主要有 CHAMP 卫星计划和 GRACE 卫星计划。CHAMP 卫星已于 2000 年成功发射,采用的是高低卫星模式;GRACE 卫星已于 2002 年成功发射,采用的是低低卫星模式。

在卫星重力计划以前,国际上最具有代表性并获得广泛应用的地球重力场模型有 EGM 96 模型(360 阶)和 JGM 3 模型。随着 CHAMP 卫星和 GRACE 卫星的陆续发射,综合利用卫星重力数据研制成的新一代的地球重力场模型如 GFZ 的 EIGEN 系列、CSR 的 GGM 系列在模型精度和空间分辨率都较以往模型有了很大的提高。

卫星测高是利用安置在卫星上的雷达测高仪垂直向海面发射脉冲,这些脉冲被海面垂直反射至卫星,于是可根据脉冲往返行程的时间,推求卫星对瞬时海面的高度。用激光测卫或 GPS 测量等方法可对测高卫星精密定轨,从而可算出卫星在所选定的平均地球椭球面上的大地高。由此可测定海洋部分的大地水准面差距及海面地形。亦可反推海洋部分的重力异常,以弥补海洋地区重力测量资料的空白,这对于建立高精度、高分辨率的地球重力场和进行海洋学研究都具有重要作用。

四、全球卫星导航定位系统技术

目前主要的卫星导航定位系统是美国的全球定位系统 GPS(Global Positioning System)和俄罗斯的 GLONASS(Global Navigation Satellite System),此外还有由法国建立的卫星多

普勒定轨和无线电定位单向双频地基系统 DORIS(Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite)及德国建立的与 DORIS 类似的双向双频的地基系统 PRARE(Precise Range And Range-Rate Equipment)。

当前一些国家和地区也在积极建立和发展全球性或区域性的卫星导航定位系统,主要有欧洲的伽利略(GALILEO)卫星导航定位系统,我国的北斗卫星导航定位系统。

GPS 是美国国防部继 NNSS 之后主持发展起来的新一代全球卫星导航定位系统,1989 年开始发射正式工作卫星,1993 年全部 24 颗 GPS 卫星部署完毕,整个系统全面建成,投入运用。虽然 GPS 系统一开始是为导航这一军事用途而建立的,但以后的发展却远远超出了设计者的本意,尤其是利用载波相位测量能实现高精度的相对定位,使测量定位技术出现了重大的突破。GPS 能在全球范围内为众多用户提供高精度、全天候、连续实时的三维定位、三维测速和时间基准,加之其方便灵活、易于普及推广的特点,能满足各方面用户的需要,因此 GPS 技术已是一种全能型的大地测量空间技术。

目前 GPS 已应用于地球自转的监测,用于各种形式的地壳运动和地壳形变的连续监测,取得了令人瞩目的成果,其监测的精度完全可与 VLBI 和 SLR 等技术相媲美。GPS 后处理基线测量的精度已达 $10^{-8} \sim 10^{-9}$,对于小于 100 km 的距离,点间的定位精度已达厘米或毫米级。

国际大地测量和地球物理学联合会(IUGG)在 1991 年 1 月 22 日至 2 月 13 日,组织了全球 120 个站进行了为期 3 周的名为 GIG'91 的全球 GPS 地球自转参数测定和地球动力学实验,其中 80 个站与 VLBI、SLR、DORIS 及 PRARE 并址观测。那次 GPS 全球联测取得了极大的成功,给出了令人满意的结果。IGS 于 1992 年 6~9 月又组织了一次国际 GPS 联测(IGS'92)。在此期间的 7 月 26 日至 8 月 8 日全球共有多达 600 余个站参加,取名为 EPOCH'92,用于研究 GPS 系统的定位、定轨、地球自转参数测定等地球动力学应用等各个方面。从所公布的结果看,用 GPS 测定地球自转参数的精度为 1 ms 左右,可与 SLR、VLBI 的精度相当(王解先等,1994)。我国在参加这两期国际联测的同时,在国内也组织了两次会战。尤其是在 1992 年 7 月 25 日至 8 月 5 日,测设了共有 27 个点的国家 A 级 GPS 网。平差后基线水平方向相对精度达到 10^{-8} 量级,A 级网点在 ITRF 参考框架中的地心坐标精度优于 0.2 m,它为建立国家高精度卫星大地网的骨架并为地壳运动及地球动力学的研究奠定了基础。以国家地震局为首的 4 个单位也联合布设了以监测地壳运动为主要目的全国性 GPS 网,其中包括了新建和原有的 25 个 GPS、SLR 和 VLBI 等永久性固定跟踪站。

1993 年,由国际大地测量协会建立了国际 GPS 地球动力学服务局(IGS),该组织已在世界各地建立了数百个常年观测的台站及多个数据存储和处理中心,从而建立并维持了全球的参考框架,并开展 GPS 卫星轨道、地球自转参数和测站坐标等服务,这就为 GPS 在全球范围内开展地球动态变化的监测开辟了最广泛的应用前景。

GPS 定位已成为加密和新建大地与工程控制网的主要方法,无论是从精度、效率、经济哪一方面来看,都是常规大地测量技术所不能相比的,而且由 GPS 动态测量到网络差分更是扩大了其应用面。所谓网络差分技术,其实就是利用基准站网的数据尽可能准确地模拟或消除用户站处的定位误差,从而提高用户的实时定位精度。由于网络差分技术使用户不必为作业而独立设置参考站即可实时获得厘米级定位结果,因而该技术迅速在我国得到广泛的推广。北京、上海、广州等城市已建立起网络差分服务系统,而浙江、江苏、广东等省的类似系统也正

在建设之中。这将为在现代化城市中建立 GPS 定位和导航系统提供坚强有力的技术支撑;有利于 GPS 技术在大城市中环境保护、交通、航运、通信、公安等各行业的深入运用,也有利于 GPS 与 GIS 技术的紧密结合,以构成动态时空数据的数据库。

继 Topocon 公司之后,一些 GPS 接收机厂商也都已推出具有 GPS 和 GLONASS 双星定位功能的接收机,从而能接收到更多颗卫星的信号,提高了定位的可靠性和精度。

卫星导航定位技术的应用将大大地超出了传统的测量领域,现已扩大到诸多领域和各行各业,如道路、线路勘测和施工放样,交通管理,汽车自动导航,气象预报,形变监测,应急报警等,GPS、GIS、RS 技术的集成更是极大地提高了测绘高新技术的应用水平和能力。

§ 1-3 地球形状表述的数学模型和物理模型

一、大地水准面

地球的自然表面极不规则,然而其高低起伏相对于地球如此庞大的体积(半径约为 6 371 km)而言,毕竟尚属微小,而且地球自然表面的大部分是海洋面(71%)。在一定的假设下,若把平均海面看作为只受地球重力影响作用的自由运动的匀质流体达到平衡状态后的一个面,那么它就成为地球重力场中的一个等位面,设想将其扩展延伸至大陆下面,这样就形成了一个连续闭合的曲面,它具有水准面的全部特性,称之为大地水准面。大地水准面所包围的形体称为大地体,不难看出,大地体与真实地球在大小、形状方面是十分接近的,因此大地水准面可看做地球形状的一个近似表述。同时,大地水准面又是处处与其上的重力方向(即铅垂线方向)正交的一个实际存在的物理面,具有其客观性和稳定性,因此适宜作为地面点高程的起算面,是测定和研究地球自然表面形状的参考面。

从理论上说,大地水准面是相对全球而言的,应具有其唯一性,然而,不同国家和地区依据各自定义的平均海面所确定的大地水准面却不尽一致。严格地讲,平均海面也并不是重力等位面,存在着海面倾斜,而区域性大地水准面之间的差异可能达到米级。以分米级甚至厘米级的精度确定我国的区域性大地水准面,仍是今后大地测量学的一项重要而迫切的任务。

二、参考椭球面

作为重力等位面的大地水准面,它的形状并不规则,如果用数学式来描述,则要采用含有难以胜数的许多项的函数级数才能保证其足够的近似性,显然它不能作为国家大地测量计算的基准面。

其实,满足一定条件的旋转椭球面十分接近于大地水准面。因为大地水准面的曲面方程就是等于某一确定常数的重力位的表示式,若将地球引力位的展开式只取至零阶和二阶带谐项,并连同离心力位一起代入,若再忽略扁率的二阶带谐项,大地水准面的曲面方程可化算为旋转椭球面的标准形式(陆仲连 等,1996),其长半径 a 则为地球椭球的长半径,而其扁率则为

$$\alpha = \frac{1}{2} \left(3J_2 + \frac{\omega^2 a^3}{GM} \right) \quad (1-3-1)$$

式中, J_2 为地球的动力形状因子(二阶带谐系数); ω 为地球自转的角速度; M 为地球的总质量; G 为地球的引力常数。

由于引力位的展开式中,其他阶的系数值都只有二阶带谐系数的千分之一左右,它们不足以影响大地水准面与其相应的旋转椭球相接近的总态势,只是造成大地水准面与其相应的旋转椭球面之间局部形状上的差异。对于一般的水准面而言,同样也是重力等位面,只是不同的水准面,其重力位所相应的常数也不同,因此也都近似于其相应的旋转椭球面。

各个国家和地区采用各自的区域性大地水准面,最佳拟合于某一区域性大地水准面的旋转椭球面,一般称为参考椭球面。作为一种形状规则的数学曲面,它的形状和大小可以由其几何元素,即长半径 a 和偏心率 e (或扁率 α)完全确定下来。作为一种地球椭球,还必须确定它与所在地区的大地体的相对位置关系,须实现参考椭球的定位和定向,使参考椭球面能够代表该地区的大地水准面。国家参考椭球面作为以往国家大地测量计算的基准面,其椭球几何元素的选定以及椭球的定位和定向的确定是和国家二维大地坐标系的建立有着密切的关系(见§2-5),由此确定的参考椭球面只适用于所在的局部地区。由于在椭球中心位置的确定(定位)中并不要求与地球质心(地心)相一致,因此椭球中心与地心之间往往存在着较大的偏离。

由于常规测量技术不能精确地测定或推求大地高,因此国家参考椭球的作用主要体现在二维方面,即在国家参考椭球面上测定及推算国家大地控制点的大地经纬度。为此还须先将以垂线方向和水准面为依据的地面观测元素归算至参考椭球面上。于是,国家参考椭球面就成为国家大地测量计算的基准面。

为测制平面的地图并为简化实用上的测量计算,所需要的是平面点位坐标,因此还需要将椭球面上的点位按照一定的数学法则及测量上的要求投影到平面上,此时椭球面则作为地图投影的参考面。

随着卫星大地测量尤其是GPS定位技术的深入应用,一定程度上降低了参考椭球面作为大地测量计算基准面的作用。通过GPS测量可以直接获得在WGS 84系中的三维直角坐标差。GPS基线向量观测值亦可直接在三维坐标系中平差计算,不一定要以参考椭球面为计算的基准面。当然,为了由GPS定位技术获得通用的平面坐标,也还需要将满足一定条件的椭球面作为过渡(未必就是已有的国家参考椭球面)。在此,椭球面主要是起着投影参考面的作用。

常规测量中水平方向、水平角、水平距离、高差的测定,都要以某一水准面为实际测量所依据的基准面。观测水平角时,经纬仪的置平、对中就是使仪器的纵轴与通过标石中心的铅垂线相重合,从而使水平度盘位于通过度盘中心的水准面的切平面上,因此,所测得的水平角正是视准线在水准面上投影线之间的夹角。所谓水平距离也是指斜距投影在某一水准面上的距离,至于水准测量所得高差,就是过这两点的水准面间的垂直距离。但在GPS测量中,GPS基线向量观测值显然并不以水准面为其所依据的基准面。GPS基线向量观测值并不以测站上的垂线和水准面为依据,在测站上安置接收机时,固然亦须对中、整平并量测天线高,但这只是为了将所需要的基线两端的实测时的天线相位中心通过天线高归化到标石中心,由于天线的高度相对较小,在此是将铅垂线方向的天线高近似作为WGS 84椭球面法线方向相应值来计量。

三、平均地球椭球面

(一)正常椭球

由上所述,从几何形状上来比较,大地水准面十分接近于某一旋转椭球面。而从地球物理方面来看,地球重力场也十分接近于某一旋转椭球体所产生的重力场——正常重力场。由于要构成正常场,该旋转椭球仅有几何参数是不够的,还须具有确定的质量 M 和恒定的绕短轴