

测绘科技专著出版基金资助

大规模高精度GPS网平差 与分析理论及其应用

Daguimo Gaojingdu GPS
Wang Pingcha Yu Fenxi
Lilun Jiqi Yingyong

施闯 著

测绘出版社

测绘科技专著出版基金资助

大规模高精度GPS网平差与分析理论 及其应用

施闯 著

测 绘 出 版 社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书系统地讲述了大规模高精度 GPS 网的平差处理与数据分析中的理论和方法。其内容包括高精度 GPS 网数据分析中基准的建立和统一；系统误差的分析和消除；可靠性理论和粗差分析；GPS 网平差中随机模型的建立；大规模、高精度 GPS 数据处理中的有关算法；整体平差和数据分析软件的研究；以及 GPS 形变监测网的数据分析方法等。最后将这些理论和方法应用于国家高精度 GPS 网的整体平差和数据分析的实践当中。

本书可以作为测绘及相关专业的科技人员及研究生的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

大规模高精度 GPS 网平差与分析理论及其应用/

施闯著. —北京: 测绘出版社, 2002. 7

ISBN 7-5030-0977-2

I. 大... II. 施... III. 全球定位系统 (GPS) - 研究

IV. P228.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 74624 号

测绘出版社出版

社址: 北京宣武区白纸坊西街 3 号 邮编: 100054

E-mail: ccph@public.bta.net.cn

三河市艺苑印刷厂印刷·新华书店经销

2002 年 7 月第 1 版·2002 年 7 月第 1 次印刷

开本: 210×297 1/16·印张: 6.5

字数: 204 千字·印数: 0001—2000

定价: 19.00 元

前 言

本书是国家测绘“八五”重点科技攻关项目（C85—06：国家高精度 GPS 网的布测方案、施测技术和数据处理的研究）及国家自然科学基金项目（49234070，49674206）的部分研究成果。本书由博士学位论文改编而成，导师为刘经南院士，作者在此表示深深的感谢。

自 20 世纪 80 年代末 90 年代初开始，我国先后建立了一些覆盖全国范围的高精度 GPS 网，如国家高精度 GPS A、B 级网，全国 GPS 一、二级网，中国地壳运动监测网络等。这些大规模 GPS 网的建立，将对我国建立和维持新一代的四维空间坐标参考基准、地壳运动监测及地震地质灾害的预测、地球动力学研究、精化大地水准面等工作发挥重要的作用。

大规模 GPS 网的平差和数据分析，是一项综合了测量平差理论、可靠性理论、计算方法、数学分析及软件研究的系统工程。本书以解决国家高精度 GPS 网整体平差的和数据分析中所面临的实际问题为宗旨，理论研究可以应用于一般的测量数据分析系统。全书共分 9 章：第 1 章介绍了本书的研究背景和总体思路；第 2 章介绍了高精度 GPS 测量的基准和转换；第 3 章研究 GPS 网系统误差的分析和处理方法，以及含有多种系统误差的大规模 GPS 网的平差系统法方程的组建方法；第 4 章基于相关分析的可靠性理论和相关观测量、多粗差的分析理论和方法；第 5 章 GPS 网平差中和随机模型误差分析与处理；第 6 章 GPS 网数据处理中有关数学理论和算法的研究；第 7 章国家高精度 GPS 网整体的平差和数据分析；第 8 章高精度 GPS 形变监测网的数据分析；第 9 章大规模 GPS 网平差与分析软件系统。

由于作者水平有限，书中不妥乃至谬误之处，恳切希望读者批评指正。

作者

2001 年 6 月于武昌

目 录

第 1 章 绪 论	(1)
§ 1.1 大规模高精度 GPS 网的建立与现代大地坐标参考基准	(1)
§ 1.2 我国高精度 GPS 网的建立	(2)
§ 1.3 本书研究的主要内容	(3)
第 2 章 高精度 GPS 测量的坐标框架基准及其统一和转换	(7)
§ 2.1 大地测量基准的发展	(7)
§ 2.2 国际地球参考框架——ITRF	(8)
§ 2.3 GPS 精密星历的参考基准	(13)
§ 2.4 高精度 GPS 测量中框架基准的统一	(15)
§ 2.5 本章小结	(16)
第 3 章 高精度 GPS 网数据处理中的系统误差分析	(17)
§ 3.1 高精度 GPS 网系统性误差源	(17)
§ 3.2 高精度 GPS 网系统误差的分类和补偿方法	(19)
§ 3.3 整体平差中多类系统误差的处理方法	(21)
§ 3.4 附加系统尺度和旋转系统误差参数的多子网整体平差函数模型	(21)
§ 3.5 系统误差参数的统计检验	(25)
§ 3.6 本章小结	(25)
第 4 章 高精度 GPS 网数据处理中的可靠性理论	(27)
§ 4.1 高精度 GPS 网数据分析中可靠性研究的特点	(27)
§ 4.2 基于相关分析的可靠性理论	(28)
§ 4.3 基于相关理论的粗差分析	(33)
§ 4.4 测量平差系统的可靠性分析	(37)
§ 4.5 本章小结	(40)
第 5 章 高精度 GPS 网平差处理中随机模型误差的研究	(41)
§ 5.1 观测量随机模型的误差	(41)
§ 5.2 基线向量随机模型误差的产生及分析	(41)
§ 5.3 GPS 观测量随机模型误差的消除方法	(43)
§ 5.4 本章小结	(43)
第 6 章 GPS 网数据处理中若干理论和技术问题的研究	(45)
§ 6.1 高精度 GPS 网平差观测量的研究	(45)
§ 6.2 图论的研究与应用	(47)
§ 6.3 多维二次型 AXA^T 矩阵压缩存储的快速直观算法	(53)
§ 6.4 本章小结	(54)
第 7 章 国家高精度 GPS 网的整体平差与结果分析	(55)
§ 7.1 引 言	(55)

§ 7.2	国家高精度 GPS 网的特点及分析	(55)
§ 7.3	整体平差观测量的选取和子网的划分	(57)
§ 7.4	子网无约束平差	(59)
§ 7.5	相邻子网的无约束平差和粗差分析	(68)
§ 7.6	全国网的整体无约束平差	(69)
§ 7.7	全国网的整体约束平差	(72)
§ 7.8	本章小结	(77)
第 8 章	高精度 GPS 形变监测网分析方法研究	(79)
§ 8.1	高精度 GPS 监测网形变分析的基准	(79)
§ 8.2	高精度 GPS 地壳运动监测网分析中实现基准的统一的方法	(81)
§ 8.3	高精度 GPS 网形变分析的形变量	(83)
§ 8.4	形变量的显著性检验	(84)
§ 8.5	本章小结	(85)
第 9 章	高精度 GPS 网平差与分析软件	(86)
§ 9.1	应用软件研制现状	(86)
§ 9.2	软件的主要功能	(86)
§ 9.3	主要模块和数据文件	(87)
§ 9.4	PowerAdj 软件的技术特色	(89)
§ 9.5	PowerAdj 与国外高精度 GPS 网分析软件计算结果的比较	(90)
§ 9.6	本章小结	(91)
参考文献		(92)

第 1 章 绪 论

随着空间技术的发展,传统的大地测量定位手段正在逐步地被卫星定位系统所取代。在大地测量、地形测量以及定位与导航等领域内,全球定位系统(GPS)得到了越来越广泛的应用。大规模高精度的 GPS 网,在建立和维持全球和地区的地心坐标框架、地震预报、精密形变监测、地球动力学研究及精化大地水准面等方面,都发挥着重要的作用。

§ 1.1 大规模高精度 GPS 网的建立与现代大地坐标参考基准

大地测量的重要任务之一就是建立和维持一个地面的坐标参考基准,为各种不同的测绘工作提供坐标参考基准。

地面坐标参考基准的建立包括两个方面的内容(陈俊勇,1991):一是从理论上确定地面参考系统的定义或模式,明确定义地面参考系统的地球进动、章动和极移理论,以及这一理论所涉及的地球模型;二是建立符合这一地面参考系统的坐标参考框架,坐标参考框架由一些具体的地面框架点组成,通过框架点在地面参考系统中的明确坐标值和速度场,来实现和维持所定义的地面坐标参考系统。有了坐标参考框架才能真正从实践上将地球上任意点的位置及其变化在地面参考系统中加以定量的描述。

传统大地测量参考基准,是由 18 世纪末至 20 世纪中期所建立的天文大地网来维持的大地坐标框架。它是一种近似的三维参考系统,由二维的水平坐标系和通过正高加大地水准面差距(或正常高加高程异常)得到大地高的垂直坐标系组合而成。它也是非地心的、区域性的、静态的参考系统。同时,由于测量技术和数据处理手段的制约,这些由天文大地网所建立的坐标参考框架存在着比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等方面的需要。

自 20 世纪 50 年代以来,随着空间定位技术的发展,特别是全球定位系统技术的出现,使建立和维持一个基于空间定位技术的、长期稳定和具有较高密度的、动态的全球性或区域性坐标参考框架,成为一种可能。

ITRF(International Terrestrial Reference Frame)就是基于 VLBI、LLR、SLR、GPS 和 DORIS 等空间技术所建立起来的现代全球地面参考框架,它提供了一个全球统一的、地心的、三维的和动态的高精度地面坐标参考基准。ITRF 在全球范围的精密定位、地壳形变监测、地球动力学研究,以及建立精密数字地球等领域,得到了广泛的应用。

由于 ITRF 是一个全球的坐标参考框架,其框架点的分布密度还不能够满足区域大地测量应用的要求。因此,自 20 世纪 80 年代后期以来,一些国家和地区通过大尺度的高精度 GPS 会战网建立区域性的、与 ITRF 相一致的三维大地坐标参考基准。

在欧洲,ITRF 在欧洲的测站被称为 ETRF(European Terrestrial Reference Frame),它是 ITRF 全球框架的一部分,但其密度远远不能满足欧洲大地坐标基准的需要。1989 年,欧洲通过一次大规模的 GPS 会战(近 100 个测站),并采用 ETRF89(ETRF 框架,1989.0 历元)的站坐标作为固定基准站,将包括 ETRF 站在内的 EUREF89 会战网进行联合处理(Gurtner *et al*, 1992),建立了欧洲 89 参考框架 EUREF89(European Reference Frame 1989),EUREF89 是与 ITRF89 相一致的区域地面参考

框架基准。

1992 年英国为了满足本国的需要,建立了包含 700 个站的国家 GPS 网 SciNet92 (Christie, 1992)。SciNet92 网数据处理时,采用了 6 个欧洲参考站在 ITRF91 框架、1992.77 历元的站坐标,作为固定基准点进行基线处理和网解,再通过四参数 Helmert 转换化算至 ETRF89 基准下 (Denys, 1993),从而建立了覆盖英国本土、并与 EUREF89 基准统一的英国三维地心坐标参考框架。

澳大利亚利用高精度 GPS 测量,建立了 1994 澳大利亚地心坐标基准 GDA94 (Geocentric Datum of Australia 1994)。它包括了澳大利亚的基准网 AFN (Australian Fiducial Network) 和国家网 ANN (Australian National Network),该基准与 ITRF92 框架、1994.0 历元的基准一致 (Peter Morgan, 1994)。在澳大利亚“空间数据基础设施”ASDI (Australian Spatial Data Infrastructure) 的计划中,GDA94 已作为其地理信息的坐标参考基准 (Alister Nairn and Bob Irwin, 1997)。

美国国家大地测量局 NGS (National Geodetic Survey) 计划通过高精度的 GPS 测量,计算 ITRF 框架下的国内测站坐标。目前这类测站数已达到 2000 多个 (1997 年),这一数目最终将达到 7000 个 (Charlie Schwarz, 1997)。对于这些测站,NGS 还将给出它们在 ITRF 框架下的预报速度场,对于具有足够多期观测的测站则给出其实测的速度场。在 NGS 提供的测站坐标成果中,将同时提供该点在 1983 北美基准 NAD83 (North American Datum of 1983) 下的坐标以及 ITRF 坐标和速度场两套成果,并注明“该点的 ITRF 坐标和速度场可用”。1996 年 11 月以后,NGS 所发布的数据表光盘 (NGS CD-ROM) 中,已经包含了测站的 ITRF 坐标,并正式提供使用。

综上所述,现代大地坐标参考基准已被越来越多的国家认同和使用,利用大规模、高精度 GPS 网来建立和维持全球统一的现代大地坐标参考基准,已成为大地测量发展的重要任务之一。

§ 1.2 我国高精度 GPS 网的建立

自 20 世纪 80 年代末期开始,GPS 技术在我国得到了越来越广泛的应用,其中大规模高精度的 GPS 网包括:

1. 国家高精度 GPS A 级网

1992 年,我国首次进行了全国范围的大规模 GPS 会战,并建立了我国在 ITRF 坐标框架下的 1992 国家 GPS A 级网。1996 年,为了进一步提高 A 级网的精度,由国家测绘局组织对 A 级网进行了复测。国家 GPS A 级网包括 27 个测站点,均匀分布在全国,平均边长为 650km,其观测成果精度优于 2×10^{-8} (刘经南等, 1998)。

2. 国家高精度 GPS B 级网

1991~1997 年,由国家测绘局组织建立了覆盖全国范围的国家高精度 GPS 网 (简称 B 级网)。B 级网共计 818 个点,其中大部分重合了原天文大地网的天文点、三角点或重力点,并全部联测了精密水准。布测该网的目的除了建立我国新一代的基于空间技术的地心三维大地坐标框架外,一个重要的目的是为了改善我国似大地水准面的精度和分辨率,以满足基础测绘、资源勘探和环境变化监测,以及经济和国防建设的需要。考虑到我国幅原辽阔,经济发展不平衡,大体按我国今后十余年内各地区经济发展的规划,B 级网的布设采用了不同的精度和分辨率,其中西部地区平均点距为 150km,中部地区为 100km,东部地区为 50~70km (陈俊勇, 1993)。

3. 总参测绘局布测的全国高精度 GPS 网

总参测绘局为了满足军事测绘和国防建设的需要,自 1991 年起在全国范围内布测了高精度的 GPS 网,分为一级网、二级网,其规模和精度大体与国家 A、B 级网相同,分布密度比较均匀,其中一级点 44 个,二级点 534 个 (魏子卿, 1998)。

4. 中国地壳形变监测网

为了监测我国地壳运动的整体趋势,由国家地震局、国家测绘局、中国科学院等几家单位共同协作,布测了全国范围的高精度 GPS 形变监测网。全网设测站 24 个,并于 1992 年,1994 年和 1996 年进行了三期观测。

5. 区域性的地壳形变监测网和高精度 GPS 测量控制网

自 1992 年起,为了满足地球动力学研究、地震监测和预报的需要,我国先后建立了一些区域性的高精度 GPS 地壳形变监测网。其中包括青藏高原地球动力学监测网(1993 年、1995 年、1997 年)、华北地区地壳运动监测网(1995 年、1996 年)、新疆地区地壳运动监测网(1995 年、1996 年、1997 年、1998 年)等。这些 GPS 形变监测网的精度一般达到了 $10^{-7} \sim 10^{-9}$ 量级。

为了满足地区经济建设和发展的需要,一些我国城市和地区先后建立了高精度的 GPS 控制网,并与 IGS 站进行了联测,达到了相当高的测量精度。如深圳市 GPS 框架网(1996 年)、塔里木盆地 GPS 网(1994 年)、西安市 GPS 框架网(1998 年)等。

6. GPS 连续运行跟踪站

自 1991 年开始我国先后建立了上海、武汉、拉萨、乌鲁木齐、北京和西安等永久性 GPS 跟踪站,进行全年全天候的 GPS 连续观测。这些跟踪站成为 IGS(国际 GPS 动力学服务)全球站的一部分,参加 IGS 全球网的综合数据处理。

除此之外,为了满足高精度形变监测、广域和区域差分定位、气象预报、时间校对,以及航空、交通和航运管制等需要,我国还由不同部门的建立了大量的 GPS 连续运行跟踪站。

7. 中国地壳运动观测网络

中国地壳运动观测网络由 25 个测站的基准网、56 个测站的基本网及 1000 个站的区域监测网组成,这些测站覆盖了我国各主要的地学块体,这一观测网络将对我国的地壳运动进行长期、高精度的监测。1998 年,由国家地震局、总参测绘局和国家测绘局共同完成了基准站和基本站的首期 GPS 观测,其精度达到了 10^{-9} 量级。

这些高精度 GPS 网的建立,对大规模、高精度 GPS 数据处理、平差和分析理论的研究,以及高精度 GPS 网分析软件的研制,提出了迫切的要求。

§ 1.3 本书研究的主要内容

高精度的 GPS 网数据处理和分析是一项包括了统计学理论、计算数学、测绘学和地球动力学等多种学科的系统工程。

本书研究的主要内容是大规模、高精度 GPS 网的后期平差处理和分析理论。高精度 GPS 网数据分析的参数包括:

- 地面站的三维坐标;
- 卫星轨道参数;
- 相位观测值整周模糊度;
- 钟差参数,包括接收机钟差和卫星钟差;
- 对流层天顶延迟;
- 地球自转参数。

在高精度 GPS 网的平差处理中,只要有足够的多余观测,这些参数都可以作为已知观测量或未知量参加平差和分析。因此高精度 GPS 的平差,比常规大地网的平差处理具有更加丰富的内涵。根据未知参数选取的不同,它可以完成坐标参数的平差、卫星轨道参数的平差、地球自转参数的平差,以及钟

差参数的平差和气象参数的平差等处理。本文的研究主要是针对与测站坐标有关的信息进行平差分析，而忽略其它的参数。主要内容包括以下九方面。

1.3.1 高精度 GPS 网参考基准的研究

测量数据处理和分析的任何理论和实践都应建立于一个明确的参考基准之上。

ITRF 框架是一个三维的、地心的、动态的全球坐标参考框架，是高精度 GPS 测量和数据分析的坐标基准。本文仔细地分析了 ITRF 框架的定义模式，它的建立和维持方法，以及不同框架之间的转换关系；研究了高精度 GPS 数据分析中地面站基准、卫星星历基准，与 ITRF 框架的内在关系；研究了 ITRF 框架与 WGS—84 系统的关系。最后给出了高精度 GPS 数据分析中框架基准的正确使用、转换和统一的方法。

1.3.2 高精度 GPS 网平差观测量误差分析理论的研究

测量平差的观测量本身包含两部分内涵，即反映观测量数值大小的函数特性和反映观测量误差大小及相关关系的随机特性（或称随机模型）。其中，观测值 l_i 反映了观测量的函数特性；观测量的方差—协方差或方差—协方差矩阵 Σ ，反映了观测量的先验随机模型。

在高精度 GPS 网的平差中，其观测量值的误差同时包含了系统误差、粗差和偶然误差。即

$$\Delta = \Delta_s + \Delta_G + \Delta_N \quad (1.3.1)$$

其中系统误差和粗差是影响高精度 GPS 网平差和分析精度的主要因素。

系统误差包含了位置基准的系统误差、方向基准的系统误差、尺度基准的系统误差，同时 GPS 网所在地区随时间的演变而呈均匀变化的形变量，也可以认为是一种系统性的误差来处理。即

$$\Delta_s = \Delta_{s_b} + \Delta_{s_r} + \Delta_{s_s} + \Delta_{s_M} \quad (1.3.2)$$

与常规网平差不同，高精度 GPS 网粗差处理的主要特点是：粗差含量大；观测量之间存在较强的相关性。

除了观测量函数值的误差，在高精度 GPS 网平差处理中，观测量随机模型的误差也是不容忽视的。观测量随机模型的误差可以由观测量先验方差所包含的误差来表示，它也可以划分为系统误差、粗差和偶然误差影响三个部分。

本书在第 3 章对高精度 GPS 平差与分析中，对观测量函数特性的系统误差进行了分析和研究；在第 4 章研究了基于相关观测的可靠性理论和高精度 GPS 网的粗差处理和分析理论；第 5 章研究了高精度 GPS 平差中观测量随机模型的误差分析和处理。

1.3.3 高精度 GPS 网平差中的系统误差分析

系统误差分析，是指对观测量中可能存在的系统误差进行研究和分类，估计各种系统误差对平差结果的影响，研究有效的处理方法，消除其影响。

系统误差的消除方法，是在平差的函数模型中附加系统误差参数。但是系统误差能否正确地加以消除，还取决于系统误差参数的选取。参数选取不当，如过度的参数化和参数之间的相关性，都可能导致平差结果的错误估计。因此观测量中系统误差的分类、参数的选取、附加系统误差参数的平差函数模型，以及参数的统计检验等，是本书在高精度 GPS 网平差中系统误差分析的主要研究内容。

1.3.4 基于相关观测的可靠性理论与粗差分析

对于观测量中的粗差问题，有两种基本的处理方法：

一是将粗差归入函数模型，即称为平均漂移模型的识别法，如巴尔达（W. Baarda）的数据探测

(Data-Snooping) 法。这种方法的基本思想是：首先通过粗差探测和定位，发现粗差，然后剔除粗差观测测量，再对只包含偶然误差的观测测量进行最小二乘平差。

二是将粗差归入随机模型，即称为方差膨胀模型的调节法，如稳健估计法。这种方法的基本思想是：在平差中对粗差观测测量赋予合理的权函数。

1968 年，巴尔达在他的名著《大地网的检验方法》中，首先用数理统计的方法阐述了测量系统的“数据探测”法 (Data-Snooping) 和可靠性理论，建立了平差系统粗差探测方法的理论基础。巴尔达的可靠性研究和粗差探测理论所依靠的信息主要是观测量的多余观测分量 r_i 和观测量的残差 V_i ，但是对于相关观测测量和多个粗差，这种方法就不能很好地进行粗差探测。

粗差处理的稳健估计法，主要基于 Huber (1964) 提出的 M 估计，它包括选权迭代法和 P-范数最小法。我国学者李德仁 (1983)、周江文 (1989)、黄幼才 (1990)、杨元喜 (1990)、王新洲 (1994)、孙海燕 (1995) 等对这种方法进行了大量的深入研究。稳健估计的核心问题是如何选择合理的权函数，权函数的确定以最小二乘估计求出的残差为信息。由于粗差观测测量本身是未知的，特别是观测测量相关，且含有多个粗差的情况下，可能导致权函数的错误确定。

本书提出了以观测测量 i 对应的可靠性矩阵 $Q_{vv}P_u$ 的列向量 F_i 和改正数向量 V (式 1.3.3)，来取代过去的对角线元素 r_u 和改正数 V_i ，作为可靠性研究和粗差分析的基本信息，通过对 F_i 与 V 的相关分析方法进行粗差探测的理论。并在此基础上研究了粗差的可测性指标 F_i 和可区分性指标 ρ_{F_i, F_j} ，以及适用于相关观测测量，多粗差的分析 and 处理方法。

$$\epsilon_1 F_1 + \epsilon_2 F_2 + \cdots + \epsilon_n F_n = -V \quad (1.3.3)$$

本书处理粗差问题的基本思想是，针对相关观测测量，研究更加科学的“识别法”，通过粗差分析发现粗差；再采用“调节法”，对粗差观测测量的协方差进行调整，消除粗差的影响。

1.3.5 观测测量随机模型误差的研究

与观测测量函数值的误差一样，观测测量的先验方差同样可能存在着误差。对于观测测量 l_i 有

$$l_i \sim N(E(l), \sigma_u^2) \quad (1.3.4)$$

其中 σ_u^2 为观测测量的先验方差，假设 l_i 的真实子样方差为 $\tilde{\sigma}_u^2$ ，如果将 σ_u^2 的误差表示为：

$$k_i^2 = \frac{\sigma_u^2}{\tilde{\sigma}_u^2} \quad (1.3.5)$$

一般情况下 $k_i^2 \neq 1$ ， σ_u^2 除了偶然误差以外，当 $k_i^2 < 1$ 或 $k_i^2 > 1$ 时，说明观测测量 i 的先验方差 σ_u^2 存在粗差；当 $k_i^2 = k_j^2 \neq 1$ 时 ($j \neq i$)，说明这些观测测量的先验方差存在系统性误差。

在传统的平差理论中，常常采用稳健估计和方差分量估计的方法来处理观测测量先验方差的误差。

本文主要研究了高精度 GPS 网平差中，观测测量先验方差的系统误差对平差结果的影响，及其消除方法。

1.3.6 高精度 GPS 网处理中若干理论和技术的研究

在高精度 GPS 网的平差分析中，常常会遇到一些平差理论、数学和计算方法的问题。

本书研究了高精度 GPS 网平差中，观测测量的选取，以及观测测量线性替换对平差结果和平差系统可靠性的影响。

图论为观测网的数据处理提供了科学的数学算法，本书研究了图论在 GPS 网数据处理中的应用和不足，并提出了新的概念和算法加以解决。

处理大规模的 GPS 网时，其数据量非常庞大，对于计算机的运算速度和内存容量要求较高。对此本书研究了 GPS 网数据处理中，矩阵的压缩存储方法和多维二次型的快速算法。

1.3.7 国家高精度 GPS 网的整体平差与分析

国家高精度 GPS 网（包括 A 级网和 B 级网）的外业观测自 1991 年开始至 1997 年结束，历经了 7 年时间。这期间 GPS 卫星的状况、使用的仪器类型、观测方案和网形结构，以及基线的边长特性等都有较大的变化；同时由于我国地域广阔，自然和气候条件差异较大；加之 7 年来地壳运动影响等因素所造成的不同测区、不同时期的 GPS 网的种种系统性误差，以及观测量中存在的粗差，在全国网的整体平差中是不容忽视的。

本书中在理论和方法的研究基础上，对国家高精度 GPS 网的观测数据进行了分析，研究了全国网的整体平差方案和策略，并进行了全网的系统误差分析、粗差分析，完成了全国网的整体平差。

1.3.8 高精度 GPS 形变监测网分析方法研究

多期高精度 GPS 形变监测网的结果分析，在数据处理阶段取决于两个关键因素：一是基线解算所采用的策略；二是系统误差的消除和基准的统一。

本书主要研究了多期高精度 GPS 网形变分析时，消除系统误差、统一框架基准的几种方法，并采用这些方法对 1994、1996 中国地壳形变监测网及 1995、1996、1997、1998 新疆地壳形变监测网的观测成果进行了分析试算。

1.3.9 高精度 GPS 网平差与分析软件的研制

目前国际上著名的高精度 GPS 分析软件有：瑞士 Bernese 大学的 Bernese 软件，美国 MIT 的 GAMIT/GLOBK 软件，德国 GFZ 的 EPOS. P. V3，美国 JPL 的 GIPSY 软件等。这些软件对高精度 GPS 的数据处理分为两个主要方面：一是对 GPS 原始数据进行处理获得同步观测网的基线解；二是对各同步网解进行整体平差和分析，获得 GPS 网的整体解。

在 GPS 网的平差分析方面，Bernese、EPOS 和 GIPSY 软件主要是采用法方程叠加的方法，即：首先将各同步观测网自由基准的法方程矩阵进行叠加，然后再对平差系统给予确定的基准，获得最终的平差结果。GLOBK 软件则是采用卡尔曼滤波的模型，对 GAMIT 的同步网解进行整体处理。

这些软件数据处理的重点都在于同步网的基线处理，而在网平差分析方面，特别是多个子网的系统误差分析、粗差分析及随机误差处理等方面，大都没有好的处理方法。

国内著名的 GPS 网平差软件有：原武汉测绘科技大学研制的 GPSADJ 系列平差处理软件及同济大学研制的 TGPPS 静态定位后处理软件，这些软件主要用于完成商用 GPS 基线处理软件结果的三维和二维平差。

综上所述，对于我国国家高精度 GPS 网这种数据量大、系统误差复杂的 GPS 网的整体平差与分析，这些软件都不能很好地完成。因此本文在理论研究的基础上，研制了适用于大规模高精度 GPS 网的整体平差和分析软件系统。

第2章 高精度 GPS 测量的坐标框架基准及其统一和转换

高精度 GPS 测量不同于常规的 GPS 测量，主要区别之一就是采用了高精度的 GPS 精密星历进行基线解算，如 IGS 综合精密星历，它所依据的坐标参考基准，是由 IERS 所提供的 ITRF 国际地球参考框架。本章首先回顾了大地测量坐标基准的发展历史，接着介绍了 ITRF 坐标框架的建立、定义和不同框架之间的转换关系，最后讨论了 GPS 与 ITRF 的关系，以及高精度 GPS 测量中坐标框架基准的统一问题。

§ 2.1 大地测量基准的发展

2.1.1 传统大地测量基准

自 18 世纪末至 19 世纪初，随着社会经济和技术的发展，世界上大多数的国家和地区为了满足本地区发展的需要，利用大地测量手段建立了不同的大地测量坐标系统。一个世纪以来，世界上建立和使用的大地坐标系统有一百余种，这些大地坐标系统作为地面坐标的参考基准，在区域经济和发展中发挥了重要的作用。然而随着经济和科学技术的发展，特别是近十年来空间技术的进步，这些传统的大地坐标基准显示出了越来越多的局限性。

2.1.1.1 传统大地坐标系统是一种非地心的坐标基准

传统的大地坐标系统是采用一个与物理地球体最为接近的旋转椭球面，作为参考基准面，并通过椭球的定位与定向，使这一基准面与当地的大地水准面最为接近。它的建立是通过八个参数来确定的，即两个确定椭球的大小和扁率的参数，三个定位参数和三个定向参数。并通过在大地原点上测定天文经纬度，来确定大地水准面差距和重力异常值。

传统的大地坐标系，取决于参考椭球的大小、定位和定向参数，以及大地原点的起算数据。不同的定位和定向方式决定了不同的大地坐标系统，因此从这种意义上说经典的大地测量坐标参考基准是一个“非地心的”基准。

2.1.1.2 传统的大地坐标系统是一种近似的三维的坐标参考基准

传统的大地坐标参考系统是由二维的水平坐标系统和正高加大地水准面差距（或正常高加高程异常）所构成的垂直坐标系共同组成的，所以它是一种近似的三维参考系统。

2.1.1.3 传统的大地坐标系统是一种静态的坐标参考基准

传统的大地坐标系统，认为所有的基准站的坐标都是固定不变的，然而事实上，地球是处于不断的运动和变化之中的，地球表面不同的块体之间的运动量，每年可以达到几个厘米，加之局部地区的地震、火山爆发等剧烈的地质变化，都可能造成大地基准网的扭曲和形变。因此这种静态的坐标参考系统，随着时间的推移，其形变误差将越来越大。

2.1.1.4 传统的大地坐标系统大多是区域性的坐标基准

由于不同国家和地区大地坐标基准定义的不同,造成了不同坐标系统下坐标(包括平面和高程坐标)基准的不统一,使得地图拼接和使用非常不便。同时区域的坐标基准已经不能够满足全球性的定位、导航,以及地壳形变监测等应用和研究的需要。

2.1.1.5 传统大地坐标系统的精度较低

由于受到测量仪器、测量手段、计算工具和数据处理水平等因素的制约,传统大地坐标系统的精度一般只能达到 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 量级左右。这对于现代的高精度测量,已经不能起到“控制”和“基准”的作用。

2.1.1.6 传统大地坐标系统的基准点的测量标志遭破坏严重

传统大地坐标系统的建立和使用已有几十年的历史,长期以来由于人为和自然环境的破坏,大地坐标系统赖以维持的各等级三角点和水准点的标志损坏严重。

综上所述,传统的大地测量坐标系统在现代社会生活和科技发展中已经显示出越来越多的局限性,建立、维持和使用一个高精度的基于地心的、三维的和动态的全球大地坐标参考基准,成为一种必然趋势。

2.1.2 现代大地坐标基准

自 20 世纪 80 年代以来,随着空间技术(VLBI、SLR、LLR *et al*)的进步,特别是近年来全球定位系统(GPS)技术的迅速发展,建立和维持一个基于空间技术的现代大地坐标参考系统,成为一种可能。

近几十年来,一些国家和国际组织先后建立了不同的地心大地坐标参考系统,比较著名的有法国的 MEDOC 和 BTS (C. Boucher *et al*); 美国的 NNSS (PE) 及 WGS 系列等等,到目前为止精度最高、使用最为广泛的当属总部设在法国巴黎的国际地球自转服务(IERS)所建立的国际地球参考框架(ITRF)。

§ 2.2 国际地球参考框架——ITRF

2.2.1 国际地球自转服务——IERS

IERS 是 ITRF 的发布机构, IERS 于 1988 年由国际大地测量学与地球物理学联合会(IUGG)和国际天文学联合会(IAU)共同建立。用以取代国际时间局(BIH)的地球自转部分和原有的国际极移服务(IPMS)。IERS 同时也是天文与地球物理数据分析服务(FAGS)联盟和成员之一。

根据创建时的委托协议, IERS 的任务主要有以下几个方面 (IERS, 1991):

- 维持国际天球参考系统和框架, 即 ICRS 和 ICRF;
- 维持国际地球参考系统和框架, 即 ITRS 和 ITRF;
- 为当前应用和长期研究提供及时准确的地球自转参数, 即 EOP。

IERS 采用了多种技术手段进行观测和分析, 来完成对上叙参考框架和地球自转的监测。这些技术包括雷达干涉技术, 如甚长基线干涉 VLBI 和激光测月 LLR; 以及卫星大地测量技术, 如激光测卫 SLR、GPS (自 1991 年起)、卫星轨道跟踪和定位 DORIS (自 1994 年起)。

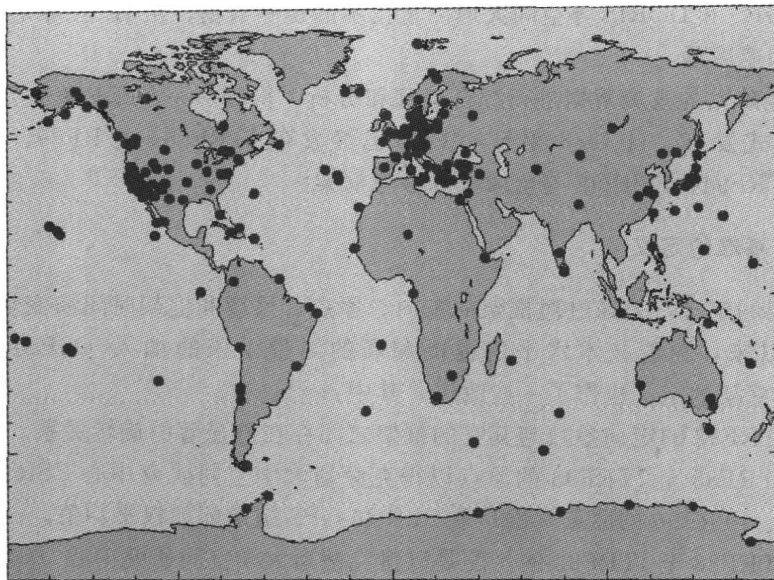


图 2.2.1 IERS 全球观测站

IERS 通过分布在全球各地的 IERS 观测网 (图 2.2.1) 获取各种技术的观测数据, 这些观测数据首先由不同技术各自的分析中心进行处理, 如 VLBI 的分析中心有戈达德空间飞行中心 (GSFC)、波恩大学大地测量学院 (GIUB)、美国海洋和大气局 (NOAA)、喷气推进实验室 (JPL) 等, SLR 的分析中心有空间研究中心 (CSR)、戈达德空间飞行中心 (GSFC) 等, GPS 的分析中心有加拿大天然能源 (NRCan, 前 EMR)、德国地球科学研究所 (GFZ)、欧洲轨道测定中心 (CODE)、欧洲空间局 (ESA)、美国国家大地测量局 (NGS)、美国喷气推进实验室 (JPL)、美国斯克里普斯海洋研究所 (SIO) 等, DORIS 的分析中心有法国空间大地测研究 (GRGS)、美国克萨斯大学空间研究中心 (CSR)、法国国家地理研究所 (IGN) 等。最后由 IERS 中心局 (IERS CB) 根据各分析中心的处理结果进行综合分析, 得出 ICRF、ITRF 和 EOP 的最终结果, 并由 IERS 年度报告 (IERS Annual Report) 和技术备忘录 (Technical Notes) 向世界发布, 提供各方面的使用。

2.2.2 国际地球参考系统——ITRS

ITRS (International Terrestrial Reference System) 是一种协议地球参考系统, 它的定义为 (IERS Conventions, 1996):

- ITRS 所定义的地心为包括海洋和大气的整个地球的质量中心;
- ITRS 的长度为米 (SI), 是在广义相对论框架下的定义;
- ITRS 坐标轴的定向与国际时间局 BIH 1984.0 历元的定义一致;
- ITRS 系统的时间演变基准是使用满足无整体旋转 NNR (No-Net Rotation) 条件的板块运动模型, 来描述地球各块体随时间的变化。

ITRS 的建立和维持是由 IERS 全球观测网, 以及观测数据经综合分析后得到的站坐标和速度场来具体实现的, 即国际地球参考框架 ITRF。

2.2.3 国际地球参考框架——ITRF

ITRF (International Terrestrial Reference Frame) 是 ITRS 的具体实现, ITRF 的构成是基于

VLBI、LLR、SLR、GPS 和 DORIS 等空间大地测量技术的观测数据，由 IERS 中心局 IERS CB 分析得到的一组全球站坐标和速度场。

IERS CB 每年将全球站的观测数据进行综合处理和分析，得到一个 ITRF 框架，并以 IERS 年报和 IERS 技术备忘录的形式发布。自 1988 年起，IERS 已经发布 ITRF88, ITRF89, ITRF90, ITRF91, ITRF92, ITRF93, ITRF94, ITRF96 等全球坐标参考框架。

2.2.4 ITRF 坐标框架基准的定义

一个地球参考框架的定义，是通过对框架的定向、原点、尺度和框架时间演变基准的明确定义来实现的。自 ITRF 建立以来，随着技术水平的提高和新的测量手段的加入（GPS: 1991 年；DORIS: 1994 年），不同 ITRF 框架的定义也作了一些改进。其中：

(1) 定向基准：ITRF93 的定向参数与其它的框架之间存在着显著的旋转关系。

(2) 原点基准：ITRF88 至 ITRF93 的原点以得克萨斯大学空间研究中心 CSR 的 SLR 分析结果作为固定基准；ITRF94、ITRF96 的原点基准是取 SLR 和 GPS 结果的加权平均值。

(3) 尺度基准：ITRF88 至 ITRF93 的尺度是以得克萨斯大学空间研究中心（CSR）的 SLR 分析结果作为固定基准；ITRF94、ITRF96 的尺度基准采用了 VLBI、SLR 和 GPS 结果的加权平均值。

(4) 时间演变基准：ITRF88 至 ITRF90 采用 AMO-2 绝对板块运动模型；ITRF91 至 ITRF92 采用 NNR-NUVEL1 板块运动模型；ITRF93 加入了 IERS 的地球自转参数约束条件，它求出的全球站速度场模型与 NNR-NUVEL1A 模型存在一个小的旋转角；ITRF94 和 ITRF96 仍然采用 NNR-NUVEL1A 模型。

框架之间的定义上的不同，造成了框架之间的系统性差异。

2.2.5 不同 ITRF 框架之间的转换

由于不同时期 ITRF 框架之间 4 个基准分量定义的不同，使得 ITRF 框架之间存在小的系统性差异，这些系统性差异可以用 7 个参数来表示，表 2.2.1 给出了不同的 ITRF 框架之间的转换参数及参数的变化率（IGS, 1998）。其中 ITRF94 与 ITRF96 之间的系统参数，一些资料认为是不显著的，可以忽略。

两个框架之间的转换公式为

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}' = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D & -R_3 & R_2 \\ R_3 & D & -R_1 \\ -R_2 & R_1 & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (2.2.1)$$

其中：\$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}'\$ 和 \$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}\$ 分别为转换框架和原始框架的坐标；\$T_1, T_2, T_3, D, R_1, R_2, R_3\$ 为原始框架到目标框架的 7 个转换参数，这些参数由表 2.2.1 给出的基准历元的参数 \$P(t_0)\$，加上基准历元 \$t_0\$ 到转换历元 \$t\$ 的变化量得到，即

$$P(t) = P(t_0) + \dot{P} \times (t - t_0) \quad (2.2.2)$$

这样由式 (2.2.1) 和式 (2.2.2) 就可以完成不同的参考框架在指定历元 \$t\$ 的坐标转换。

表 2.2.1 不同 ITRF 框架之间的转换参数

转换框架	T_1	T_2	T_3	D	R_1	R_2	R_3	基准历元
	/cm $\dot{T}_1$ cm/y	/cm $\dot{T}_2$ cm/y	/cm $\dot{T}_3$ cm/y	$/10^{-6}$ $\dot{D}$ $10^{-6}/y$	/mas $\dot{R}_1$ mas/y	/mas $\dot{R}_2$ mas/y	/mas $\dot{R}_3$ mas/y	
ITRF94→ITRF96	0.0 0.02	-0.1 -0.09	0.1 0.02	-0.4 -0.07	-0.21 -0.02	-0.01 0.01	-0.22 0.01	1998.16
ITRF93→ITRF94	2.1 0.27	0.1 0.0	-0.1 -0.20	0.2 0.09	1.27 0.13	0.87 0.20	0.54 -0.04	1996.5
ITRF92→ITRF93	-2.0 -0.23	-0.8 -0.04	-0.3 0.08	0.1 -0.11	-1.66 -0.12	-0.68 -0.15	-0.55 0.04	1995.0
ITRF91→ITRF92	-1.2 0.00	-1.4 0.00	0.6 0.00	-1.4 0.00	0.00 0.00	0.00 0.00	0.00 0.00	1988.0
ITRF90→ITRF91	0.2 0.00	0.4 0.00	1.6 0.00	-0.3 0.00	0.00 0.00	0.00 0.00	0.00 0.00	1988.0
ITRF89→ITRF90	-0.5 0.00	-2.4 0.00	3.8 0.00	-3.4 0.00	0.00 0.00	0.00 0.00	0.00 0.00	1988.0
ITRF88→ITRF89	0.5 0.00	3.6 0.00	2.4 0.00	-3.1 0.00	-0.10 0.00	0.00 0.00	0.00 0.00	1988.0

2.2.6 地球板块运动模型

地球表面由若干相对独立的块体组成，它们处于不断的运动和变化之中。为了描述块体的运动模型，地质学家根据最近百万年的地质学和地球物理学的资料，在假设地壳由地震带、海沟、造山带等为边沿，划分为若干刚性块体的前提下，推导出板块运动的平均速度模型。如 AMO-2 (Minster and Jordan, 1978), NUVEL-1 (DeMets, *et al.*, 1990), NNR-NUVEL1 (Argus and Gordon, 1991), NNR-NUVEL1A (DeMets, *et al.*, 1994) 等，这些模型不断地加以改进，目前国际上推荐使用的是 NNR-NUVEL1A 模型。

图 2.2.2 是全球地壳的块体划分；表 2.2.2 给出了 NNR-NUVEL1A 模型的各块体运动角速度。

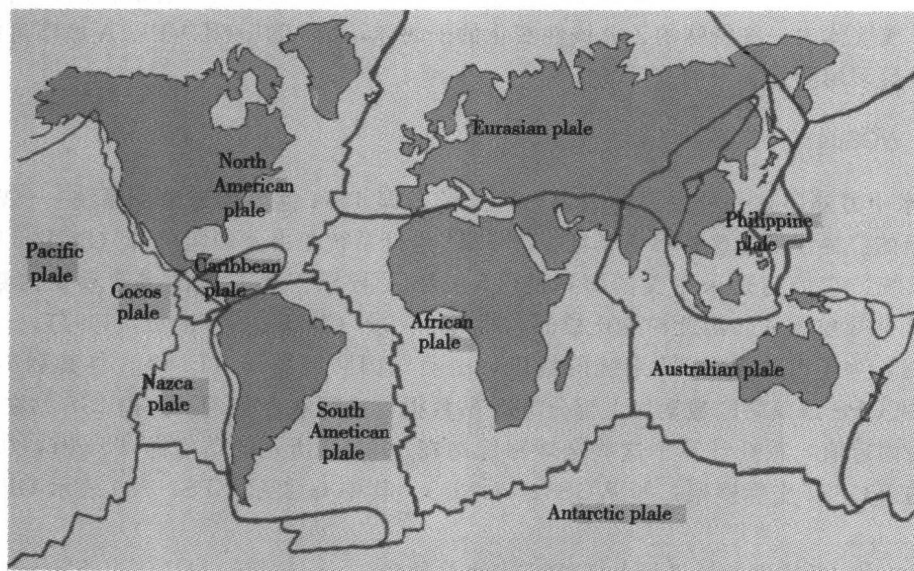


图 2.2.2 全球地球动力学块体的划分