



地球观测与导航技术丛书

异构星座精密轨道确定 与自主定轨的理论和方法

周建华 徐波 著



科学出版社



地球观测与导航技术丛书

异构星座精密轨道确定 与自主定轨的理论和方法



周建华 徐波 著

科学出版社
北京

内 容 简 介

卫星精密定轨是导航与对地观测领域,尤其是卫星导航系统重要的核心技术之一,卫星轨道的测定精度直接决定了导航定位的性能。北斗导航卫星星座首次采取了异构的 GEO+IGSO+MEO 混合星座方案,由于星座设计的独特性,必要的理论研究和工程实践相对缺乏,对这种异构的三种轨道混合的星座用于卫星导航技术还存在大量的理论、方法,以及工程应用问题等有待进一步研究。

本书系统地介绍了高精度导航星座和测地卫星精密定轨、高精度轨道预报、自主定轨的基本理论与新方法,特别分析与给出了区域混合星座及局部布设跟踪站情况下,高精度测定轨的主要技术问题和精密与快速定轨方法,并且针对未来技术发展预测,系统地给出了基于传统与人工智能的混合轨道预报方法、基于绝对定向和地月限制性三体引力强不对称性下的自主定轨理论和方法。全书内容丰富、理论体系严谨,并且结合北斗混合星座实际在轨卫星观测数据和仿真数据进行了大量的计算验证,同时配以大量的实际应用方案,对重点、难点加以深入分析和解决方法论述。

本书可作为高等院校相关专业研究生和相关领域技术人员参考书。

图书在版编目(CIP)数据

异构星座精密轨道确定与自主定轨的理论和方法/周建华,徐波著. —北京:科学出版社,2015. 6

(地球观测与导航技术丛书)

ISBN 978-7-03-044143-0

I. ①异… II. ①周… ②徐… III. ①测地卫星-卫星定轨 IV. ①P123. 46

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 080353 号

责任编辑:苗李莉 唐保军 朱海燕 / 责任校对:张小霞

责任印制:张 倩 / 封面设计:王 浩

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 6 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2015 年 6 月第一次印刷 印张:24 3/4

字数:581 000

定价:139.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《地球观测与导航技术丛书》编委会

顾问专家

徐冠华 龚惠兴 童庆禧 刘经南 王家耀
李小文 叶嘉安

主 编

李德仁

副主编

郭华东 龚健雅 周成虎 周建华

编 委 (按姓氏汉语拼音排序)

鲍虎军	陈 戈	陈晓玲	程鹏飞	房建成
龚建华	顾行发	江碧涛	江 凯	景贵飞
景 宁	李传荣	李加洪	李 京	李 明
李增元	李志林	梁顺林	廖小罕	林 琿
林 鹏	刘耀林	卢乃锰	闫国年	孟 波
秦其明	单 杰	施 闯	史文中	吴一戎
徐祥德	许健民	尤 政	郁文贤	张继贤
张良培	周国清	周启鸣		

《地球观测与导航技术丛书》出版说明

地球空间信息科学与生物科学和纳米技术三者被认为是当今世界上最重要、发展最快的三大领域。地球观测与导航技术是获得地球空间信息的重要手段,而与之相关的理论与技术是地球空间信息科学的基础。

随着遥感、地理信息、导航定位等空间技术的快速发展和航天、通信和信息科学的有力支撑,地球观测与导航技术相关领域的研究在国家科研中的地位不断提高。我国科技发展中长期规划将高分辨率对地观测系统与新一代卫星导航定位系统列入国家重大专项;国家有关部门高度重视这一领域的发展,国家发展和改革委员会设立产业化专项支持卫星导航产业的发展;工业和信息化部、科学技术部也启动了多个项目支持技术标准化和产业示范;国家高技术研究发展计划(863 计划)将早期的信息获取与处理技术(308、103)主题,首次设立为“地球观测与导航技术”领域。

目前,“十一五”计划正在积极向前推进,“地球观测与导航技术领域”作为 863 计划领域的第一个五年计划也将进入科研成果的收获期。在这种情况下,把地球观测与导航技术领域相关的创新成果编著成书,集中发布,以整体面貌推出,当具有重要意义。它既能展示 973 计划和 863 计划主题的丰硕成果,又能促进领域内相关成果传播和交流,并指导未来学科的发展,同时也对地球观测与导航技术领域在我国科学界中地位的提升具有重要的促进作用。

为了适应中国地球观测与导航技术领域的发展,科学出版社依托有关的知名专家支持,凭借科学出版社在学术出版界的品牌启动了《地球观测与导航技术丛书》。

丛书中每一本书的选择标准要求作者具有深厚的科学研究功底、实践经验,主持或参加 863 计划地球观测与导航技术领域的项目、973 计划相关项目以及其他国家重大相关项目,或者所著图书为其在已有科研或教学成果的基础上高水平的原创性总结,或者是相关领域国外经典专著的翻译。

我们相信,通过丛书编委会和全国地球观测与导航技术领域专家、科学出版社的通力合作,将会有一大批反映我国地球观测与导航技术领域最新研究成果和实践水平的著作面世,成为我国地球空间信息科学中的一个亮点,以推动我国地球空间信息科学的健康和快速发展!

李德仁

2009 年 10 月

前言

卫星精密定轨是导航与对地观测领域,尤其是卫星导航系统重要的核心关键技术之一,卫星轨道的测定精度直接决定了导航定位的性能。北斗导航卫星星座首次采取了异构的 GEO+IGSO+MEO 混合星座方案,由于星座设计的独特性,必要的理论研究和工程实践相对缺乏,适应高精度定轨的精确的力学模型还未建立,且星座轨道机动多、平台控制模式建模困难等。因此,对这种异构的三种轨道混合的星座用于卫星导航技术所涉及的大量的理论、方法和工程应用等有待进一步研究,包括区域监测网如何实现全星座精密轨道确定、静止 GEO 卫星和单颗卫星快速轨道确定与预报方法、观测手段、测量模型、力学模型等,探索空天环境因素与导航卫星及其星座相互感应、感知的规律和机理等相关基础理论模型与方法。

技术发展对卫星导航等航天系统提出了自主运行的新要求,其核心问题是自主轨道确定。目前,在不依赖地面测控系统支持的情况下,要在较长的一段时间内自主确定自身的轨道,同时还能保证较高的定轨精度,满足用户定位的需要,国际上没有一个完全成熟的应用。因此,星座型的卫星系统精密轨道测定需解决的理论、模型、测量和方法等关键技术还很多,面临的问题也是科学前沿中的重大问题、基础性问题。开展相关的理论与方法的研究具有重要的理论意义和实用价值。这些问题的解决,将对卫星导航系统建设和应用,对国家科学技术发展、社会经济和国防建设产生巨大的推动作用。

针对以上情况,我们根据 10 多年从事卫星精密定轨的研究成果撰写此书,从理论到实践,全面深入地研究分析了中高轨卫星及组网星座精密定轨国内外现状、主要难点和急需解决的问题,提出和论述了统计定轨的基本算法、星座组网精密定轨、GEO 卫星精密轨道确定、快速精密定轨方法;另外,对于自主定轨及长期精密轨道预报的难点问题,提出了基于传统和人工智能结合的混合模型预报理论与误差控制方法,基于星间链路与绝对方向辅助的自主定轨方法,以及基于地月拉格朗日导航星联合异构星座自主定轨方法,并进行了大量的实际资料验证以及仿真验证。

本书的出版得到了国家 863 计划课题(分米级相位增强信号播发系统技术,2014AA123102;北斗性能提升关键技术的研究,2013AA122402;拉格朗日卫星导航系统技术,2012AA121602)的资助。

我们的研究团队在精密定轨方面联合开展了多项国家 863 计划等课题的研究,从而为此书的撰写奠定了坚实的基础。李晓杰博士参与了第 6~9 章的研究及文稿的部分素材的提供;高有涛博士参与了第 8、11 章的研究及文稿的部分素材的提供;上海天文台的同仁陈俊平研究员、郭睿高工提供了大量北斗精密定轨性能改进的实验数据,在这里我们对他们以及其他为此书的出版付出辛勤工作的学者和同事们表示深深的谢意!

目 录

《地球观测与导航技术丛书》出版说明

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 全球导航卫星精密定轨现状	1
1.2 区域卫星导航系统精密轨道测定	4
1.3 本书的结构安排	5
第 2 章 卫星运动方程及受力分析	7
2.1 人造地球卫星的运动方程	7
2.2 卫星受力分析	8
2.3 轨道数值积分方法	20
第 3 章 统计定轨方法	25
3.1 统计定轨的基本原理	25
3.2 批处理	28
3.3 序贯处理	34
3.4 改进的推广序贯算法	39
3.5 卡尔曼滤波算法	43
3.6 改进的扩展卡尔曼滤波	49
3.7 补偿最小二乘法	52
3.8 结论	53
第 4 章 力模型误差的统计分析	54
4.1 引言	54
4.2 长短弧定轨结果的比较	54
4.3 Vondark 平滑与滤波	57
4.4 随机序列的谱分析	59
4.5 长弧定轨误差演变的统计分析	61
第 5 章 力学模型误差补偿的轨道改进	63
5.1 力模型误差分析	63
5.2 长弧定轨批处理补偿算法	63
5.3 卡尔曼滤波模型误差补偿	66
5.4 结论	73
第 6 章 导航星座精密轨道确定	74
6.1 测量模型	74
6.2 多星定轨基本方法	77
6.3 精度分析	83

6.4	观测弧长对定轨精度的影响分析	90
6.5	光压模型性能分析	95
6.6	混合星座约化动力学定轨	104
6.7	动力学约束快速定轨	108
6.8	结论	109
第7章	单星快速精密轨道确定	111
7.1	短弧定轨面临的主要问题	111
7.2	削弱系统差的策略与方法	112
7.3	时间同步支持下精密定轨及应用	122
7.4	基于多星组网观测的单星定轨方法及应用	124
7.5	结论	136
第8章	基于神经网络模型的高精度轨道预报	137
8.1	神经网络相关理论	138
8.2	基于神经网络的改进	143
8.3	长期精密轨道预报指标法	146
8.4	预报轨道特征分析	147
8.5	中圆轨道卫星轨道预报	159
8.6	高轨 GEO/IGSO 卫星轨道预报	195
第9章	基于轨道预报特性的神经网络模型优化及控制	202
9.1	神经网络模型改进性能评估	202
9.2	预报轨道与预报误差对应关系的深入分析	209
9.3	不同因素对神经网络模型补偿精度的影响探讨	211
9.4	神经网络模型的优化设计	215
9.5	基于反向重叠弧段比较法的轨道预报误差控制方法	220
9.6	两种模型下的 URE 精度分析	223
9.7	结论	226
第10章	基于星间链路及方向约束的星座自主定轨	228
10.1	概述	228
10.2	星间测距	231
10.3	绝对定向观测	232
10.4	星间测距及定向观测自主定轨数学模型	238
10.5	自主轨道确定仿真与分析	253
10.6	基于星间测向辅助的自主定轨技术	274
10.7	星间无线电/定向测量的星座长期自主定轨	290
10.8	结论	309
第11章	基于拉格朗日导航星座的自主轨道确定	311
11.1	概述	311
11.2	圆型限制性三体问题	311
11.3	拉格朗日轨道航天器星间测距自主定轨的可行性	317

11.4	拉格朗日点轨道自主定轨基本原理.....	327
11.5	拉格朗日卫星导航系统星间测距自主定轨.....	331
11.6	拉格朗日导航星与近地导航卫星联合自主定轨.....	345
11.7	椭圆型限制性三体问题模型下平动点拟周期轨道自主定轨.....	362
11.8	结论.....	376
参考文献.....		378
索引.....		382

第 1 章 绪 论

卫星导航系统以其全天候、高精度的独特优势为整个地球空间提供导航定位和授时服务,是极其重要的空间信息基础设施。世界各大国都在大力发展自己的卫星导航系统,中国北斗卫星导航系统(BD)与全球定位系统(GPS)、全球卫星导航系统(GLONASS)、伽利略(GALILEO)等国外其他系统一并成为国际上发展最为迅速的导航系统。北斗卫星导航系统作为国家的重大基础设施,是国家产业转型的重要推动力。导航卫星精确定轨是卫星导航系统的核心业务,利用卫星导航系统实现载体导航的基础条件是导航卫星的空间位置已知,因此导航卫星精确定轨是卫星导航系统运行服务的前提,其性能直接影响用户导航定位的精度。

北斗导航卫星星座首次采取了异构的 GEO+IGSO+MEO 混合星座方案,这种技术方案有利于实现先区域、后全球服务的发展思路。星座设计的独特性带来了一些新问题,如必要的理论研究和工程实践相对缺乏,相应高精度定轨的精确的力学模型还未建立,且星座轨道机动多、平台控制模式建模困难等。因此,要实现这种异构导航星座的应用,还需要在理论、方法和工程应用等方面做进一步研究,包括:

- (1) 区域监测网如何实现全星座精密轨道的确定;
- (2) 静止 GEO 卫星和单颗卫星快速轨道的确定及其预报方法;
- (3) 观测手段的改进、测量模型和力学模型精度的提高;
- (4) 空天环境因素与导航卫星及其星座相互感应、感知的规律和机理;
- (5) 星座自主运行等相关基础理论模型与方法。

作者根据 10 多年从事卫星精密定轨的研究成果撰写此书,主要内容:国内外导航卫星精密定轨现状、中国导航系统中精密定轨面临的一些问题、多星精密定轨、GEO 卫星精密轨道确定、快速精密定轨、自主定轨及长期精密轨道预报。

1.1 全球导航卫星精密定轨现状

1. GPS 卫星导航系统

GPS 是国际上发展最为成熟的卫星导航系统。截至 2014 年 12 月,GPS 在轨星座共有 31 颗,其中工作卫星 30 颗,正常运行的 Block IIA 有 10 颗,Block IIR 有 12 颗;Block IIR-M 有 7 颗,Block IIF 有 1 颗。

GPS 采用全球布设监测站,实现卫星轨道与钟差的一体化解算。采用用户伪距误差(user ranging error,URE)作为指标来衡量 GPS 卫星轨道误差和钟差误差对用户定位的综合影响。GPS 卫星的星历和钟差参数每天由地面监控系统进行更新,一般每天上传一次,如果 URE 超限,则增加上传次数。其系统设计的 URE 指标为 6.0m,但 1994 年系统

实际的指标已经达到 3.0m, 优于设计要求。随着各种模型和技术的不断改进, 实际的 URE 值不断降低。

2004 年, 增加美国国家大地测量局的 6 个跟踪站作为系统运控的地面监测站后, URE 更是降到 1.1m 以下。并且地面跟踪站的增加可以实现对 GPS 卫星 100% 弧段可见, 增强了 GPS 系统完备性和监测能力。2006 年又增加了国家大地测量局的其余 5 个站作为 GPS 系统运控地面监测站。目前, GPS 星历精度优于 5m。

随着 GPS 现代化的不断推进, 部分 GPS 卫星开始安装了激光反射镜, 可以通过 SLR (satellite laser ranging) 技术测定卫星轨道, 但通常是作为一种高精度的轨道检核与验证手段, 而并未作为导航系统实时在线的测轨手段。GPS BLOCK IIR 型卫星采用新型的铷原子钟, 其频率稳定性能提高一个量级。

增加了自主定轨功能后, GPS 的 BLOCK IIR、BLOCK IIF 卫星生存能力明显加强。目前 GPS 共有三种运行模式: 一是在有地面站支持的条件下, 定轨全部在地面完成, 广播星历每天由注入站注入一次, 广播星历再由卫星转发给用户; 二是在有地面站支持的条件下, 由地面站计算广播星历, 预报 210 天, 广播星历每月由注入站注入一次, 卫星通过星间测距和通信, 对地面预报的轨道和卫星钟差进行改进, 并将改进的广播星历发给用户; 三是地面站负责在地面将轨道预报 210 天, 并每月上传给导航卫星一次, 这样, 即使失去地面站支持, 每颗导航卫星上仍至少有 180 天的预报星历, 以这些预报星历为先验信息, 结合星间双向测距获得的卫星间钟差和距离信息, 采用适当的星上轨道算法, 在卫星上完成轨道确定任务, 并将改进的广播星历发给用户。

在没有地面站支持的条件下, 要维持系统精度, BLOCK IIR 卫星新增了三项功能: 一是每颗卫星都增加了星上计算能力; 二是增加了 UHF 波段的星间通信能力; 三是增加了 UHF 波段的星间测距能力。星上信息处理大致可以分成三步: 一是对所有可视 GPS 卫星进行伪距测量; 二是对可视卫星接收和发播数据信息; 三是处理测量值, 得到新的广播星历估计值。

2. GLONASS 卫星导航系统

GLONASS 地面跟踪控制网包括系统控制中心和布设在俄罗斯整个国土上的跟踪控制站网, 其中地面控制中心位于莫斯科的戈利岑诺, 地面控制中心同时维持 GLONASS 的时间基准, 遥测和跟踪站位于圣彼得堡、Ternopol、Eniseisk 和共青城。地面跟踪控制网负责采集、处理 GLONASS 卫星的轨道和信号信息, 并向每颗卫星发射控制指令和导航信息。

虽然 GLONASS 的地面跟踪站没有全球布设, 但俄罗斯国土面积东西跨度很大, 跟踪站的分布也相当广, 而且卫星上装有 SLR 反射器, 可以利用高精度的 SLR 对其进行跟踪。因此, GLONASS 导航卫星可以实现较高精度的轨道和钟差确定, GLONASS 广播星历精度为 10~25m。GLONASS 地面控制系统通过数据综合解算和相位控制两种方法保证星上时间和系统时间之间的同步。

数据综合解算是指在卫星精密轨道已知的前提下, 利用监测站的站-星距离观测资料, 计算出星上时间相对于系统时间之差。然后将其上行注入给卫星, 通过卫星导航电文转发给用户, 用户在导航定位过程中进行卫星钟差的修正。卫星钟差改正数的计算采用

星上时间相对于系统时间偏差的线性拟合算法,使用每一圈 30~60min 时间段内的观测资料,每天两次向卫星上行注入。

相位控制方法是在 GLONASS 导航电文格式中,用 10bit 表示每颗卫星星上时间相对于 GLONASS 时间的改正数,其容量为 1.9ms。当星上时间偏差大于 1ms 时,数据综合解算方法将由相位控制方法来补充,以保证星上时间与中央同步器时间之差不超过 1ms。也就是讲,相位控制方法就是由地面控制系统通过星上相位微调器(其精度在 10^{-17} 量级)对卫星钟进行微调校准。在地面系统进行卫星钟校准期间,通过导航电文发送“禁止使用该星进行导航”的标志。

3. GALILEO 卫星导航系统

与 GPS 和 GLONASS 相比,欧洲 GALILEO 卫星导航系统还处于系统建设阶段,因此,其各项指标还存在不确定性。据相关资料介绍,GALILEO 系统的精密定轨与时间同步和 GPS 一样,计划采用单程测距,由分布在全球的 12 个轨道测定和时间同步站接收卫星发射给用户的双频伪码测距信号和记录多普勒信号,每站配置铯原子钟,并与系统的主钟进行精确同步。卫星钟与地面钟之间的偏差通过测量的伪距值和由精密定轨得到的站星距求差得到。地面控制中心接收来自监测站的观测数据和通过共视法获得的 UTC (K)/TA(K)数据,经过预处理、定轨与时间同步处理模块处理、滤波产生钟差改正数和平均频率,钟差改正数通过上行注入站上传至卫星,平均频率作用于 GALILEO 系统主钟产生系统时间基准。GALILEO 系统每 30min 对星载钟更新一次校准数据,以满足时钟与轨道误差的综合误差不超过 0.65m。GALILEO 系统校准时间间隔较小的主要目的是要减小卫星钟周跳的影响。

2005 年 12 月欧空局发射了第一颗试验卫星 GIOVE-A,并于 2008 年 4 月发射了第二颗在轨验证试验卫星 GIOVE-B,轨道确定与时间同步(ODTS)试验结果表明:所有测量类型的残差都比较理想,且 GIOVE-A 和 GPS 的平滑伪距及相位残差水平一致。卫星激光测距的残差为几个厘米,解算的 GPS 轨道与 IGS 精密轨道之差为分米级。GIOVE-A 重叠弧段轨道径向差异均方根(RMS)小于 10cm,沿迹方向差异 RMS 为 50cm 量级,钟差差异 RMS 为 0.15ns。

4. IGS 精密轨道

国际 GNSS 服务组织下设的各分析中心,利用全球布设的 IGS 跟踪网提供的丰富且地理分布均匀的跟踪数据,采用高精度 GNSS 数据处理软件计算 GPS 卫星的精密轨道和钟差,最后由分析中心协调机构综合各分析中心的结果,形成 IGS 对外发布的轨道和钟差产品,以服务于全球科研、教育和其他行业。

从 1994 年(IGS 正式成立)至今,随着跟踪站数量的不断增加,以及各种轨道力学模型和测量模型的持续改进,IGS 提供的 GPS 事后最终轨道精度从 0.3m 提高到 3~5cm,事后最终钟差产品的精度小于 0.1ns。此外,IGS 还提供快速和超快速轨道和钟差产品。但是,IGS 提供的全部是事后处理的精密轨道和精密钟差,与导航系统在线实时运行并预报提供给用户的导航电文存在很大差别。表 1.1.1 给出了各导航系统轨道确定精度统计。

表 1.1.1 各导航系统轨道确定情况

导航系统	星历类型	精度
GPS	广播星历	5 m
	IGS 星历	<5 cm
GLONASS	广播星历	10~25 m
	IGS 星历	15 cm
GALILEO	广播星历	—
	GIOVE-A 定轨	>50 cm

1.2 区域卫星导航系统精密轨道测定

一般而言,区域卫星导航星座通常会采用 GEO 和 IGSO 类型的轨道卫星,可以最少数量的卫星实现对需要地区的覆盖。这类轨道卫星对地相对运动小,轨道解算的可测性差,反映在定轨解算的方程上表现为定轨几何差,因此使得高精度定轨变得比常用的中圆轨道卫星困难很多。特别是 GEO 卫星,由于它相对地面站的观测几乎静止不动,观测方程不随时间变化,因而在定轨解算过程中轨道参数和其他误差参数交联,难于分离求解。比如,卫星轨道的径向误差和卫星及接收机钟差为强相关,甚至线性相关,而全球运动卫星这两类的误差是可分离的,载波相位测量的模糊度参数也是类似的情况。

区域卫星导航系统还有一个问题是受国土跟踪监测范围限制。一般来讲,区域系统都是在全球的局部地区设立卫星跟踪观测站,由此带来了卫星的观测几何差、跟踪弧段短,不能做到全弧段的观测,由此导致精密定轨性能提高难度很大。中国的北斗卫星导航系统选择的星座就是由 GEO、IGSO、MEO 三种卫星构成的,其中 GEO 卫星、IGSO 卫星是导航应用的主用卫星;除此之外,由于 GEO 静止和 IGSO 运动慢的特性,无线电传输与接收方面存在顽固的多径效应,表现为卫星信号处理中无法去除或有效减小多径误差,特别是 GEO 卫星的伪距观测值存在严重的多径误差,其数据精度较 MEO 卫星的伪距观测精度降低约 1 个数量级之多,由于观测精度的降低也将极大影响轨道测定的精度。

另外,这两类轨道卫星作为导航主用卫星还是首次,因此,对其轨道特性、力学模型的认知还在初级阶段。力学模型精度不高,也成为精密轨道确定的一个问题。以 GEO 卫星为代表的高精度轨道预报问题,其预报精度衰减过快的主要原因是以光压模型为主的力学模型不够准确,其中目前单星定轨主要采用简单的球模型,而多星定轨主要采用的是 GPS T20 经验模型。同时,不同类型的卫星,其卫星姿态与太阳面板均存在差异,因此需要根据卫星实际情况,建立相应的太阳光压模型。使用长时间跟踪策略,通过精密定轨及其误差分析等方法实现对太阳辐射压模型的精化也有待进一步深入研究。

此外,由于卫星导航系统用户接收处理用的卫星轨道是预报轨道,而轨道预报的精度取决于定轨精度和预报模型的精度,如前所述,对于区域异构的混合导航星座这两个方面都面临挑战,即轨道确定误差大、力学模型误差大,这些均将影响轨道预报精度,进而影响导航服务的性能。目前的轨道预报特别是高精度轨道预报方法大都基于力学模型。对于轨道高度在 10000km 以上的卫星而言,如美国 GPS 卫星与俄罗斯的 GLONASS 导航卫

星的定轨精度要求是厘米量级,1天预报的要求精度优于米级。力学模型轨道预报误差随时间发散过于严重,因此无法获得较高精度的长期预报星历。仅就预报而言,改进轨道预报精度有两种方法:一种方法是通过分析产生的物理原理,建立更加精准的动力学模型;另一种方法可以从轨道预报误差的规律中寻找突破,通过对历史时刻预报误差的学习及训练,掌握其变化规律,再用于补偿和改进当前时刻的预报轨道,以达到提高预报精度的目的。

导航系统的安全性和可靠性是其生存和发展所面临的一个重大问题,自主运行是重要的解决途径,其核心问题是自主轨道确定。具体概念是指导航星座在不依赖地面测控系统支持的情况下,仅依靠星上的观测设备、处理设备及事先存储的先验信息在较长的一段时间内自主确定自身的轨道,同时还能保证较高的定轨精度,满足用户定位的需要。它能够减轻地面测控负担、降低卫星运行费用和提高卫星的生存能力。目前,导航卫星的自主定轨一般都是利用星间距离观测值来进行的,这种工作方式与卫星导航系统的原工作方式一致,卫星上需增加的设备相对较少,更易实现全自动化的星上数据处理,精度高,但问题是较强地依赖星间链路性能,并且在原理上还需要地面一定程度的支持。目前,国际上还没有一个成熟的应用。自主定轨技术可分为两大类:“个体自主定轨”和“星座自主定轨”。个体自主定轨是指航天器上装配所有必要的硬件,可以自行测量并估算自身的轨道状态;星座自主定轨是指多个航天器之间利用星间测量结果同时确定星座内所有星体的轨道状态。相关的理论和方法需要进行深入的研究。

总之,对于区域异构导航星座精密轨道测定,需解决的理论、模型、测量和方法等关键技术多且难度大,面临的问题也是科学前沿中的重大的、基础性问题。开展相关的理论与方法的研究具有重要的理论意义和实用价值。这些问题的解决,将对卫星导航系统建设和应用,以及国家科学技术发展、社会经济和国防建设产生巨大的推动作用。

1.3 本书的结构安排

如前所述,本书重点针对中国北斗卫星导航系统的特点,围绕异构导航星座精密定轨与自主运行理论和方法,结合作者多年的研究成果,全面系统地给出了异构混合星座精密定轨的基础理论、方法及相关模型误差分析与处理、精密轨道预报、自主运行等原理、算法以及实践应用。

第1章重点论述全球卫星导航系统精密定轨的现状和发展趋势,针对中国卫星导航系统的特点,分析和提出区域异构导航星座精密轨道确定与应用方面所面临的主要技术问题,根据这些问题的逻辑关系,规划本书的结构和章节安排。

第2章给出卫星运动方程、卫星轨道动力学模型,描述卫星受力分析的方法,给出异构导航星座力学模型的选取原则。针对精密轨道计算的需要,重点给出常用的精密的轨道数值计算方法,并且分析各种方法的应用效果,包括性能和计算效率的分析。

第3章重点研究和给出统计定轨的基本方法,常用的批处理、序贯滤波算法,分析这些算法的特点、一致性和主要问题。针对力学模型误差、测量噪声等引起的定轨计算发散问题,提出批处理方法的补偿方法;针对模型线性化导致的发散和计算效率问题,给出改进的序贯算法;针对力学模型导致的滤波发散问题,给出改进的扩展卡尔曼滤波方法,并

给出各种方法的仿真和实际应用效果,得出了一些结论。

第4章采用长短弧比较的方法和统计分析方法,研究目前采用的力学模型的性能,分析其误差特征,通过对Lagoes卫星的实测数据处理,验证方法的有效性,分析和处理结果为后续的模型精化、算法优化提供支持。

第5章针对力学模型存在误差的情况,利用精化模型和算法补偿两种技术途径改进轨道确定精度,构建批处理方法的补偿算法,并给出具体分析计算结果。

第6章重点针对北斗导航星座的精密定轨,给出导航系统常用的测定轨的测量模型、多星定轨基本方法和定轨性能评估方法,重点分析不同弧长以及光压模型对定轨精度的影响,提出了改进的光压模型和混合星座约化动力学定轨方法,最后针对北斗单颗卫星出现频繁离网的问题、需要快速定轨及快速入网的需求,给出基于动力学约束的快速定轨方法。

第7章重点针对北斗导航星座机动多、需要单星快速精密定轨的需求,首先分析单颗卫星短弧定轨的主要问题,在此基础上给出削弱设备及相关系统差影响的策略和方法,基于距离观测的快速定轨以及多星多站的两种快速定轨方法,同时给出具体的试验和应用结果。

第8章研究了神经网络建模技术下的高精度轨道预报技术。简要介绍神经网络的基本理论;详细分析动力学轨道预报轨道及其预报的误差特征;分析不同因素对神经网络模型预报精度的影响;最后根据轨道预报特征制定短期和中长期预报方案,利用实测数据给出高轨和中圆轨道卫星神经网络模型的改进效果。

第9章神经网络模型的优化技术和轨道预报误差控制方法。针对北斗中高轨轨道模型误差较大的问题,给出不同初始时刻下神经网络模型对预报轨道精度的改进效果;深入分析预报轨道及其预报误差之间的关系;分析影响神经网络模型的最优化选择问题,在此基础上提出适用于短、中、长期轨道预报的神经网络最优化模型;针对神经网络模型在改进预报轨道精度时会出现失败的现象提出轨道预报误差控制方法,利用实测数据给出了该方法下的轨道预报精度改进效果。

第10章重点研究基于星间测距及方向观测约束的自主卫星定轨的理论与方法。首先概述自主定轨的基本问题,提出基于星间测距与方向观测的技术途径,重点针对性地提出增加方向约束以有效解决惯性空间的方向基准确定的方法,给出仅用星间测距的轨道估计方法。针对星上处理能力不足的特点,研究改进平方根扩展卡尔曼滤波算法。分析卫星间进行方向观测的能力、基本要求和性能,给出基本实现方法。在此基础上,针对单纯星间测距无法克服星座整体旋转问题,提出采用方向观测约束实现自主定轨的方法。给出不同的算法和自主定轨方案的仿真试验结果。

第11章针对利用拉格朗日轨道导航星座为中高轨卫星定轨的概念,重点研究基于拉格朗日导航星的天地一体化导航系统的自主定轨方法。概述拉格朗日导航星的基本概念;分析拉格朗日航天器定轨的基本数学特性,给出基本的定轨方案;在此基础上,研究了拉格朗日导航星的自主定轨问题,给出仿真试验结果;研究拉格朗日导航星与近地导航星联合的自主定轨方法,给出仿真试验结果。最后,研究限制性三体问题下平动点拟周期轨道的自主定轨动力学模型、算法,并进行仿真分析。研究结果表明,提出的基于拉格朗日导航星的天地一体的卫星导航系统,可以实现高性能的自主轨道确定。

第2章 卫星运动方程及受力分析

2.1 人造地球卫星的运动方程

人造地球卫星在围绕地球的运动过程中会受到多种作用力的影响。总体来讲,这些作用力可分为两大类:一类为保守力;另一类为耗散力。保守力包括地球引力,日、月、行星对卫星的引力及地球的潮汐现象导致的引力场变化等;耗散力包括大气阻力、地球红外辐射及卫星姿态控制的动力等。

在惯性坐标系中,应用牛顿第二定律可得到卫星的运动方程:

$$\ddot{\vec{r}} = \vec{F}_0 + \vec{F}_{NB} + \vec{F}_{NS} + \vec{F}_{TD} + \vec{F}_{SR} + \vec{F}_{AL} + \vec{F}_{RL} + \vec{F}_{DG} + \vec{F}_{TH} \quad (2.1.1)$$

式中, $\vec{r}$ 为卫星在惯性坐标系中的位置矢量。

方程(2.1.1)右端为作用在卫星单位质量上的力。其定义为:

$\vec{F}_0$: 二体问题作用力。即地心对卫星的吸引力;

$\vec{F}_{NB}$: N 体摄动力,包括日、月及其他行星对卫星的吸引力;

$\vec{F}_{NS}$: 地球非球形部分对卫星的吸引力;

$\vec{F}_{TD}$: 地球形变摄动力,包括固体潮、海潮、大气潮汐使地球对卫星引力的变化部分;

$\vec{F}_{SR}$: 太阳辐射对卫星造成的压力;

$\vec{F}_{AL}$: 地球红外辐射和地球反射太阳光对卫星产生的压力;

$\vec{F}_{RL}$: 相对论效应对卫星运动的影响;

$\vec{F}_{DG}$: 地球大气对卫星的阻力;

$\vec{F}_{TH}$: 作用在卫星上的其他作用力,如卫星姿态控制的动力等。

以上各主要力的数学模型下面将论述。

如果能得到各摄动力的精确模型,则只要知道卫星在某初始时刻 t_0 的运动状态 $\vec{r}_0$ 、 $\dot{\vec{r}}_0$, 就可以得到任意 $t \geq t_0$ 时刻的卫星的运动状态 $\vec{r}$ 和 $\dot{\vec{r}}$ 。但事实上各作用力的表达式都很复杂,而且除二体问题之外,目前还不能得到各摄动力的严格解析解。常用数值法得出式(2.1.1)的解,其初始条件为

$$\vec{r}(t_0) = \vec{r}_0$$

$$\dot{\vec{r}}(t_0) = \dot{\vec{r}}_0$$

一般情况下卫星的初始状态 $\vec{r}_0$ 、 $\dot{\vec{r}}_0$ 是无法预先精确知道的,只能得到它们的参考值 $\vec{r}_0^*$ 和 $\dot{\vec{r}}_0^*$ 。这就需要通过通过对卫星的不断观测来精化 $\vec{r}_0^*$ 和 $\dot{\vec{r}}_0^*$ 以取得高精度的卫星初始

状态 $\vec{r}_0, \dot{\vec{r}}_0$ ，这正是精密定轨的任务。令 $\vec{f}$ 代表式(2.1.1)中右端所有作用力的总和， $\vec{r}$ 表示卫星在惯性坐标系中的位置矢量。事实上，在 $\vec{f}$ 的数学模型中很多参数的值也是无法预先精确知道的，如光压系数 C_d ，这些参数的误差无疑也将影响 $\vec{r}(t)$ 和 $\dot{\vec{r}}(t)$ 的精度。此外，观测站坐标误差、测量设备的系统误差也都影响轨道计算的精度。所有上述参数都需不断精化。所以轨道确定中需要求解的量往往不限于 $\vec{r}_0$ 和 $\dot{\vec{r}}_0$ 。

设其他需求解的常数参数为 $\vec{p}$ ，因 $\vec{p}$ 为常数，有 $\vec{p}' = 0$ 。

令

$$\vec{X} = \begin{bmatrix} \vec{r} \\ \dot{\vec{r}} \\ \vec{p} \end{bmatrix}, \quad \vec{F} = \begin{bmatrix} \dot{\vec{r}} \\ \vec{f} \\ 0 \end{bmatrix}$$

则卫星运动方程写为

$$\dot{\vec{X}} = \frac{\vec{F}}{m} \tag{2.1.2}$$

初始条件为

$$\vec{X}(t_0) = \vec{X}_0 \tag{2.1.3}$$

可以看出式(2.1.2)、式(2.1.3)代表了一个由 n 个非线性一阶常微分方程组成的系统。

2.2 卫星受力分析

2.2.1 动力学模型

卫星运行过程所受到的各种作用力中，地球对卫星的二体引力是起支配作用的力。其他作用力均为摄动力，为此，将式(2.1.1)写成如下形式：

$$\ddot{\vec{r}} = \frac{\vec{F}_0}{m} + \frac{\vec{F}_\epsilon}{m} \tag{2.2.1}$$

式中， $\vec{F}_0$ 为二体问题引力， $\vec{F}_\epsilon$ 为各种力学因素对应的摄动力，其大小量级关系为

$$\frac{F_\epsilon}{F_0} = O(\epsilon) \tag{2.2.2}$$

$O(\epsilon)$ 为摄动量级，各主要摄动力模型及特点如下所述。

1. 地球形状摄动

地球形状摄动又称地球非球形引力摄动。众所周知，地球是一个密度分布不均匀的非球形天体，设卫星的经纬度为 λ, φ 。则地球对其引力位展开式为

$$V = V_0 + V'$$