

航天器精确定轨

Orbit Precision Determination



自校准技术

& Self-Calibration Technique of Spacecraft

刘利生 吴斌 杨萍 著



国防工业出版社

<http://www.ndip.cn>

航天器精确定轨与 自校准技术

Orbit Precision Determination & Self-Calibration
Technique of Spacecraft

刘利生 吴斌 杨萍 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

航天器精确定轨与自校准技术 / 刘利生等著. —北京:
国防工业出版社, 2005.1

ISBN 7-118-03555-6

I. 航... II. 刘... III. ①航天器轨道—测量②航
天器轨道—校正 IV. V556.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 079819 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 12% 314 千字

2005 年 1 月第 1 版 2005 年 1 月北京第 1 次印刷

印数: 1—2500 册 定价: 39.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

IV

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

**国防科技图书出版基金
评审委员会**

国防科技图书出版基金

第四届评审委员会组成人员

名誉主任委员	陈达植			
顾问	黄宁			
主任委员	刘成海			
副主任委员	王峰	张涵信	张又栋	
秘书长	张又栋			
副秘书长	彭华良	蔡镛		
委员	于景元	王小谟	甘茂治	冯允成
(按姓名笔画排序)	刘世参	杨星豪	李德毅	吴有生
	何新贵	佟玉民	宋家树	张立同
	张鸿元	陈火旺	侯正明	常显奇
	崔尔杰	韩祖南	舒长胜	

序

航天器的轨道测量与确定是航天系统工程的重要组成部分,也是保障航天器按预先设计的状态飞行、工作,完成规定航天任务的重要支柱。几十年来,我国的航天事业得到了飞速发展,同时航天测控系统也经历了巨大的变化和发展,我国已经建成了满足各类卫星和载人飞船等航天飞行任务要求的航天测控网;同样地,航天器轨道测量数据处理与定轨技术也在不断地提高和进步。

随着我国国民经济、科学试验和军事技术的发展,各类应用卫星应运而生,它们对航天器轨道测量与数据处理技术提出了更高、更多和更新的测量任务及要求。例如,提高了定轨精度的要求;增加了航天器运行轨道结果参数的多样性;有些航天任务还提出了实时精确定轨的要求,甚至要求在较短观测弧段内精确确定航天器运行轨道等等。

为了适应这些新的要求,必须不断地提高我国的轨道测量及数据处理的技术水平。为此,除增加测轨的覆盖率、改进测量体制和研制高性能测量系统外,改进和提高轨道测量数据处理和定轨技术也是非常重要的技术途径。本书根据航天器轨道运行的特点,基于“EMBET”自校准技术的原理,充分结合数理统计、时间序列分析、数字滤波、函数逼近等思想和技术,来改进和提高轨道测量数据处理的技术,以提高航天器轨道测量与确定的精度。本书能够将数学模型与物理模型相结合,而突出数学建模和参数估计方法的重点,颇有新意,使人耳目一新。

本书内容丰富,紧密结合我国航天测控工程实践,是作者多年科研经验的结晶,具有较高的学术水平和应用价值,对于提高和改进航天器测量数据处理的技术水平有着积极的推动作用。期望该

书的出版,能够为从事航天工程、航天测控以及相关领域的科技人员提供有价值的参考,并在科学研究和工程应用中起到很好的借鉴和促进作用。

李济生

前 言

航天器轨道数据处理是对测控系统获取的卫星、飞船等航天器轨道参数进行加工、计算,并得到其运行轨道的过程,它是航天测控系统的一项基本任务。经数据处理确定的航天器实际运行轨道是控制航天器按设计轨道运行并完成规定航天任务的主要依据。航天器轨道测量数据的处理结果,为航天器研制部门和应用部门提供了改进航天器和各测量系统的重要设计依据;也可为测控系统总体设计单位、设备研制单位和操作使用单位提供反馈信息,以改进和提高测控设备的性能和测量精度。

随着航天技术的发展,各种民用和军用航天器应运而生,同时由于各种应用任务的需要,对航天测控系统的轨道测量和定轨精度的要求越来越高。这就要求航天测控系统不断提高轨道测量系统的测量精度和改进轨道测量的数据处理技术。但是在目前条件下,要大幅度提高轨道测量系统(设备)的测量精度是非常困难的。因此,在现有航天测控网的基础上,如何通过改进轨道测量数据处理技术和定轨方法,从而提高航天器的定轨精度,已成为国内外航天测控领域十分关注的问题。

本书是作者根据近几年来工程任务需要,为提高轨道确定精度而开展新方法研究的成果总结,特别是作者紧密联系实际,系统地论述了应用“EMBET”自校准技术确定轨道的理论和方法。由于测轨数据中含有较大的系统误差,从而影响了定轨精度的提高,将轨道约束的“EMBET”技术用于自校准轨道测量数据的系统误差,可以有效地提高测量数据和定轨的精度。本书将数理统计、时间序列分析、函数逼近和数字滤波等理论的新方法与自校准原理定轨方法紧密结合,并阐述以它们为主体的改进轨道确定技术和

方法,这与常规的论述以动力学模型为重点的定轨方法的专著有着明显的区别,显得格外新颖。

全书共分 10 章。第 1 章为绪论;第 2 章为时间与坐标系;第 3 章为轨道测量数据预处理;第 4 章为航天器轨道确定方法;第 5 章为轨道测量与预处理技术改进;第 6 章为“EMBET”自校准技术和定轨方法;第 7 章为受摄运动轨道约束自校准技术;第 8 章为自回归模型的轨道约束自校准定轨技术;第 9 章为参数估计新方法在自校准技术中的应用;第 10 章为轨道约束自校准技术的一些应用。其中第 1 章由吴斌研究员撰写;第 5 章由刘利生研究员和吴斌研究员撰写;第 4、第 6、第 7 章由刘利生研究员和杨萍工程师撰写;第 2、第 3、第 8 至第 10 章由刘利生研究员撰写;全书由刘利生研究员统稿。

本书的编写得到所在单位“北京跟踪与通信技术研究所”的全力支持,于志坚研究员、贺瑞法研究员和刘蕴才高级工程师对本书的编写和出版给予极大的关注和支持。李国强、黄学祥、孙刚、胡东华等同志为本书编写、打印、外文翻译等做了大量有益的工作,北京理工大学沙定国教授和邹桃庚博士给书稿提出了许多宝贵的建议;国防工业出版社刘萍编辑为本书的修改和编辑付出大量辛勤的劳动;特别是航天测控专家李济生院士在百忙之中对本书进行了细致和认真的审阅,提出了许多宝贵的意见和建议,在此,一并表示衷心的感谢。此外,本书的出版得到国防科技图书出版基金的赞助,为本书顺利的出版创造了有利条件,谨向国防科技图书出版基金评审委员会和国防工业出版社表示诚挚的感谢。

作者本着专著的特点和要求,对于一些人们熟悉的知识仅作一般的或简单的描述,而突出思想新颖、具有创见的知识和内容。本书可供从事本专业的技术人员学习和参考,也可以供相关专业的高等院校师生阅读和参考。由于作者的理论和学术水平有限,难免有不足或错误之处,恳请读者批评和指正。

编者
2004 年 3 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 航天器轨道测量和数据处理与航天系统的关系	1
1.2 轨道测量精度提高的技术途径	5
第 2 章 时间与坐标系统	10
2.1 时间系统及转换	10
2.1.1 时间系统	10
2.1.2 时间系统转换	15
2.2 坐标系统及转换	17
2.2.1 地球坐标系	17
2.2.2 天球坐标系	22
2.2.3 坐标系转换	24
第 3 章 轨道测量数据预处理	34
3.1 测量数据预处理流程	34
3.1.1 预处理目的和任务	34
3.1.2 测量误差分类	35
3.1.3 预处理流程	37
3.2 测量数据预处理方法	38
3.2.1 物理量纲复原	38
3.2.2 合理性检验	41
3.2.3 系统误差修正	44
3.2.4 时间误差修正	45
3.2.5 电波折射修正	51
第 4 章 航天器轨道确定方法	55
4.1 开普勒定律与轨道根数	55
4.1.1 开普勒定律和二体运动	55

4.1.2	轨道要素的确定	57
4.1.3	无摄运动的运动方程和轨道根数	61
4.1.4	二体问题航天器轨迹计算	70
4.2	初始轨道确定方法	74
4.2.1	状态向量计算轨道根数的方法	74
4.2.2	测元 R 、 A 、 E 计算初轨的方法	76
4.2.3	测元 R 、 A 、 E 、 $\dot{R}$ 计算初轨的方法	78
4.2.4	近似圆轨道的初轨计算方法	80
4.3	轨道精确确定方法	85
4.3.1	二体运动的轨道运动方程	85
4.3.2	非递推处理精轨计算方法	91
4.3.3	递推处理精轨计算方法	94
4.4	轨道受摄运动方程和摄动修正	95
4.4.1	受摄运动方程	96
4.4.2	轨道根数摄动表达式	100
4.4.3	轨道摄动模型	108
第 5 章	轨道测量与预处理技术改进	112
5.1	航天测控网测量体制的改进	112
5.1.1	测量体制的改进	113
5.1.2	测量设备的联测	119
5.1.3	测速数据获取技术的改进	121
5.2	数据预处理方法的改进	122
5.2.1	伪距的解算方法	122
5.2.2	微分平滑求速方法	124
5.2.3	测速数据时间误差修正方法	132
5.2.4	电波折射误差修正方法	134
第 6 章	“EMBET”自校准技术和定轨方法	137
6.1	“EMBET”自校准技术	138
6.1.1	“EMBET”自校准技术的数学原理	138
6.1.2	轨道约束自校准技术的原理	146

6.1.3	测元 R 、 A 、 E 自校准公式	153
6.1.4	测元 R 、 A 、 E 、 $\dot{R}$ 自校准公式	158
6.1.5	轨道约束“EMBET”技术递推方法	172
6.1.6	多台交汇测量轨道约束自校准方法	181
6.2	直接解算轨道根数的轨道约束自校准技术	182
6.2.1	开普勒根数的轨道约束自校准方法	183
6.2.2	第2类无奇点根数的轨道约束自校准方法	191
6.2.3	开普勒根数的自校准技术递推方法	194
6.2.4	第2类无奇点根数的自校准递推方法	196
6.3	系统误差模型及辨识	200
6.3.1	系统误差模型	200
6.3.2	线性模型假设检验	203
6.3.3	系统误差模型辨识	206
第7章	受摄运动轨道约束自校准技术	211
7.1	受摄运动非递推的自校准技术	211
7.1.1	含摄动模型的观测方程	211
7.1.2	非递推受摄运动的自校准方法	218
7.1.3	非线性最小二乘估计	227
7.2	受摄运动的递推自校准技术	227
7.2.1	解算轨道状态参数的递推自校准方法	227
7.2.2	解算轨道根数的递推自校准方法	230
7.2.3	有序递推滤波修正法	232
7.3	两种改进的递推滤波自校准方法	241
7.3.1	衰减记忆滤波	241
7.3.2	自适应滤波	246
第8章	自回归模型的轨道约束自校准定轨技术	252
8.1	随机序列和自回归模型	252
8.1.1	自回归模型常用的有关概念	253
8.1.2	自回归模型对低频噪声的拟合	265
8.2	自回归系统误差模型的自校准技术	271

8.2.1	自回归系统误差模型的非递推自校准方法	271
8.2.2	自回归系统误差模型的递推自校准方法	280
8.3	自回归摄动模型的轨道约束自校准技术	286
8.3.1	多项式摄动模型的轨道约束自校准 递推方法	286
8.3.2	自回归摄动模型的轨道约束自校准 递推方法	290
8.3.3	自回归摄动与系统误差模型的自校 准递推方法	294
第9章	参数估计新方法在自校准技术中的应用	297
9.1	非递推自校准技术的改进方法	297
9.1.1	主成分估计	298
9.1.2	贝叶斯估计	309
9.2	卡尔曼平滑的自校准技术	316
9.2.1	平滑滤波和预测	316
9.2.2	卡尔曼平滑技术及自校准方法	317
第10章	轨道约束自校准技术的一些应用	338
10.1	外测系统测量精度的自鉴定	338
10.1.1	外测系统测量精度鉴定的原理	338
10.1.2	轨道约束“EMBET”的自鉴定原理	340
10.1.3	自鉴定方法的精度计算公式	341
10.2	测站站址误差的估计和修正	344
10.2.1	测站站址误差的估计方法	345
10.2.2	大地测量参数误差的估计方法	353
10.2.3	测站站址误差递推修正方法	356
10.3	多测速元素自定位定轨方法	361
10.3.1	测速增量观测方程	362
10.3.2	非递推自定位定轨方法	363
10.3.3	递推的自定位定轨方法	367
	参考文献	370

Contents

Chapter1	Overview	1
1.1	The Relation Between Spacecraft Orbit Measurement, Data Processing and Space System	1
1.2	Technical Method for Improving Orbit Measurement Accuracy	5
Chapter 2	Time and Coordinate System	10
2.1	Time System and Its Conversion	10
2.1.1	Time System	10
2.1.2	Conversion of Time System	15
2.2	Coordinate System and Conversion	17
2.2.1	Earth Coordinate System	17
2.2.2	Celestial Sphere Coordinate System	22
2.2.3	Conversion of Coordinate Systems	24
Chapter 3	Orbit Measurement Data Pre-Procession	34
3.1	Pre-Procession Flow of Measurement Data	34
3.1.1	Purpose and Tasks of Pre-Procession	34
3.1.2	Classification of Measurement Error	35
3.1.3	Pre-Procession Flow	37
3.2	Pre-Procession Method of Measurement Data	38
3.2.1	Restoration of Physical Dimensions	38
3.2.2	Justification Test	41
3.2.3	Correction of Systematic Error	44
3.2.4	Correction of Time Error	45
3.2.5	Correction of Radio Wave Refraction	51

Chapter 4 The Orbit Determination Method of

Spacecraft	55
4.1 Kepler's Laws and Orbit Elements	55
4.1.1 Kepler's Laws and Two-Body Movement ...	55
4.1.2 Determination of Orbit Elements	57
4.1.3 The motion equations and Orbit Elements without perturbation	61
4.1.4 Spacecraft Orbit Calculation of Two-Body Problem	70
4.2 Determination Method of Initial Orbit	74
4.2.1 The State Vectors Method of Calculating Orbit Elements	74
4.2.2 The Initial Orbit Calculation Method with Measurement Elements R, A, E	76
4.2.3 The Initial Orbit Calculation Method with Measurement Elements $R, A, E, \dot{R}$	78
4.2.4 Initial Orbit Calculation Method of Approximate Circle Orbit	80
4.3 Orbit Precision Determination Method	85
4.3.1 Orbit Motion Equation of Two-Body Movement	85
4.3.2 Non-Recursive Calculation Method of Precision Orbit	91
4.3.3 Recursive Calculation Method of Precision Orbit	94
4.4 Orbit Perturbed Motion Equation and Perturbed Correction	95
4.4.1 Perturbed Motion Equation	96
4.4.2 Perturbed Expression of Orbit Elements ...	100
4.4.3 Orbit Perturbed Model	108

Chapter 5 Improvement of Orbit Measurement and Pre-Processon Technique	112
5.1 Measurement System Improvement on Space Tracking, Telemetry and Command System	112
5.1.1 Improvement of Measurement System	113
5.1.2 Associated Test of Measurement Equipment	119
5.1.3 Improvement of Velocity Data Acquisition	121
5.2 Improvement of Data Pre-Processon Method	122
5.2.1 Pseudo range Calculation Method	122
5.2.2 Velocity Calculation Method of Differential Smoothing	124
5.2.3 Time Error Correction Method of Velocity Data	132
5.2.4 Radio Wave Refraction Error Correction Method	134
Chapter 6 “EM BET” Self-Calibration Technique and Orbit Determination Method	137
6.1 “EM BET” Self-Calibration Technique	138
6.1.1 Mathematic Principle of “EM BET” Self-Calibration Technique	138
6.1.2 Principle of Orbit Restraint Self-Calibration Technique	146
6.1.3 Self-Calibration Formula with Measurement Elements R, A, E	153
6.1.4 Self-Calibration Formula with Measurement Elements $R, A, E, \dot{R}$	158
6.1.5 Recursive Orbit Restraint Method of “EM BET” Technique	172
6.1.6 Orbit Restraint Self-Calibration Method with Multiple Equipment Intersected	