



卫星状态融合 估计理论与方法

Fusion Theory And Methods
For Satellite State Estimation

周海银 王炯琦 著
潘晓刚 矫媛媛



科学出版社

卫星状态融合估计理论与方法

周海银 王炯琦 潘晓刚 矫媛媛 著

国防科学技术大学学术专著出版基金资助

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书结合作者多年从事相关科研工作的体会,从状态融合估计理论、卫星轨道确定中的状态融合估计、卫星姿态确定中的状态融合估计三个方面,系统地研究卫星状态融合估计的理论、模型、方法和应用。本书以系统科学理论与应用数学技术为指导,针对卫星轨道和姿态确定中所涉及的工程问题,用数学建模和信息融合的思想统揽全局,将卫星状态估计问题转化为参数设计、测量、关联、优化和估计的问题,在各种优化准则下研究卫星多源轨道确定信息和姿态确定信息的最优化融合处理,以提高卫星状态估计性能。

本书可供应用数学、信号与信息处理、导航工程、控制工程、系统工程、系统分析等专业的本科生、研究生阅读,同时对其他领域从事信息处理与优化的技术或管理人员,以及卫星/导弹测控及相关试验系统的工程技术人员具有一定的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

卫星状态融合估计理论与方法/周海银等著. —北京:科学出版社, 2013
ISBN 978-7-03-038327-3

I. ①卫… II. ①周… III. ①卫星姿态—研究 IV. ①V412.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 189423 号

责任编辑:张 濮 陈 静 赵鹏利 / 责任校对:郑金红

责任印制:张 倩 / 封面设计:陈 敬

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>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013 年 9 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2013 年 9 月第一次印刷 印张: 23 1/4 插页: 4

字数: 465 000

定价: 98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

作者简介



周海银，1965 年生，博士（后），教授，博士生导师。现任湖南省计算数学与应用软件学会常务理事、秘书长，中国兵工学会应用数学专业委员会委员，国防科学技术大学系统科学专业学术带头人，宇航动力学国家重点实验室兼职研究员，北京控制工程研究所兼职研究员。近年来，发表学术论文 80 余篇，其中 50 余篇/次被 SCI、EI 或 ISTP 等国际三大检索收录；主持国家 973 专题、国防预研、军队型号项目等 20 余项；获军队优秀专业技术人才岗位津贴（一类）1 次、军队科技进步一等奖 1 项、部委级科技进步一等奖 1 项，中国人民解放军图书奖 1 项，申请国家发明专利 5 项，出版专著 2 部。主要研究方向：战场感知信息的分析与处理、信息融合的理论与应用。



王炯琦，1979 年生，博士。2008 年于国防科学技术大学概率论与数理统计专业获理学博士学位。近年来，发表学术论文 40 余篇，其中 30 余篇/次被 SCI、EI 或 ISTP 等国际三大检索收录；主持国家自然科学基金、航天支撑技术基金、国家重点实验室开放基金、国防科学技术大学校预研项目、军队型号项目等 5 项，申请国家发明专利 4 项，出版专著 1 部。主要研究方向：多源信息融合、现代统计分析。



潘晓刚，1979 年生，博士。2009 年于国防科学技术大学应用数学专业获理学博士学位。近年来，发表学术论文 30 余篇，其中 20 余篇/次被 SCI、EI 或 ISTP 等国际三大检索收录；主持国家自然科学基金、航天支撑技术基金、国家重点实验室开放基金、军队型号项目等 6 项，申请国家发明专利 3 项，出版专著 1 部。主要研究方向：战场感知信息处理、空间作战指挥与技术。



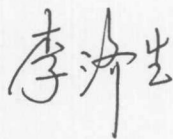
矫媛媛，1982 年生，博士。2012 年于国防科学技术大学应用数学专业获理学博士学位。近年来，发表学术论文 20 余篇，其中 10 余篇/次被 SCI、EI 或 ISTP 等国际三大检索收录，申请国家发明专利 2 项。主要研究方向：信息处理与空间作战指挥。

序

随着传感器技术的发展和卫星应用要求的提高,卫星轨道和姿态的测量向多种类、多平台发展。充分利用多源测量信息,将信息融合理论和卫星轨道、姿态确定理论相结合,实现卫星状态高精度、高可靠性融合估计是卫星测控领域研究和发展的方向。

在卫星轨道确定方面,天地基联合测定轨、卫星动力学模型误差补偿、多源异质观测数据的融合处理等均是卫星轨道高精度和高可靠性确定领域的关键问题。在卫星姿态确定方面,多传感器融合定姿、误差建模与补偿,以及性能优良的非线性滤波方法等是高精度姿态确定的重要研究内容。该书充分吸纳了作者多年来在卫星轨道确定和姿态确定领域取得的研究成果,全面、系统、深入地总结了卫星状态融合估计的基本概念和原理。以数据融合理论和非线性参数估计方法为基本框架,以动力学模型补偿、测量误差建模与补偿、数据深度加权、精度分析与反演等技术的创新与应用为重点,开展卫星高精度轨道和姿态确定问题的研究,并利用实际工程数据进行了验证。

该书结构清晰,创新明显,是一本融合理论研究和工程应用的学术专著,是从事相关研究的科技人员很好的参考书。该书的出版将对高精度卫星状态估计理论和应用技术的研究起到积极的推动作用。



2013年6月

前言

卫星高性能的轨道确定和姿态确定是卫星应用的重要基础和关键技术,引起了国内外的广泛关注。卫星轨道确定是利用海基、地基、天基等平台的光学、雷达、GPS、北斗二代等系统对卫星运动的测量信息和非精确的卫星运动方程,使用统计学理论对其轨道根数或者在轨位置、速度矢量进行估值的过程;而卫星姿态确定是指通过卫星姿态敏感器的测量,来确定卫星相对某个参考坐标系姿态参数的过程。

随着传感器技术的发展,现有对卫星的测量发生了变化,由单一的测量平台/系统向多源发展。因此,充分利用多源测量信息,将信息融合理论和卫星状态(轨道与姿态)估计理论相结合,实现卫星状态融合估计是卫星轨道确定和姿态确定的研究和发展方向。

此外,随着对卫星长寿命、高可靠性以及对卫星应用的高精度发展要求,对卫星轨道确定和姿态确定的精度、容错性和可靠性等要求也越来越高。传统的卫星定轨、定姿方法没有系统地考虑卫星在轨环境、星体抖动、振动等因素所引起的卫星动力学/运动学模型误差,也没有系统地考虑测量模型的不确定性、噪声统计特性不确定、乘性噪声等因素对定轨/定姿算法的影响,从而限制了卫星状态估计精度的提高。

近年来,作者在国家重点基础研究发展计划(973计划)项目、国家自然科学基金项目(NO.61304119, NO.61004081)、总装备部预先研究项目、宇航动力学国家重点实验室开放基金项目、国防科学技术大学科研计划项目的资助下,较为深入地开展了卫星状态融合估计理论与方法的研究,所取得的相关理论研究和应用成果构成了本书的主体内容。

本书以基于多源卫星状态测量信息的卫星轨道和卫星姿态融合估计作为研究背景,以系统科学理论与应用数学技术为指导,针对卫星轨道和姿态确定中所涉及的工程问题,用数学建模和信息融合思想统揽全局,将卫星状态估计问题转化为参数设计、测量、关联、优化和估计问题,在各种优化准则下研究卫星轨道和姿态确定中多源信息的最优化融合处理,提高卫星状态估计性能,其研究成果可以直接应用于航天器在轨系统分析和数据处理。

本书的读者对象主要是应用数学、信号与信息处理、导航工程、控制工程、系统工程、系统分析等专业的本科生和研究生,同时也适合其他相关领域从事信

第5章为卫星轨道确定基本原理与方法。介绍了卫星动力学模型,以及运动学定轨、动力学定轨、混合定轨等几种卫星轨道确定基本方法,并分析了实际卫星轨道确定中存在的若干工程问题。

第6章为基于模型补偿的卫星轨道确定方法。针对卫星动力学模型误差、观测模型误差的不同特点,结合第1章的半参数估计理论,从模型构建和估计算法上研究相应的模型误差补偿方法,实现卫星精密定轨。

第7章为基于抗差估计的卫星轨道确定方法。根据卫星轨道确定的实际工程,针对轨道观测数据中存在的 uncertainty 系统误差、观测粗差和轨道动力学模型的 uncertainty 误差,结合第1章的抗差估计理论,通过引入数据深度加权概念,研究了卫星轨道的抗差估计方法。

第8章为基于天地基信息融合的联合定轨技术。综合利用天基测控网和地基测控网的信息对天基卫星和地基卫星综合定轨,对天基卫星的约束不仅是局部的地基观测,还有天基观测的数据,得到拟合精度更高的天基卫星轨道和空间目标轨道。

第9章为卫星姿态确定基本原理与方法。介绍了卫星姿态的描述方式与姿态确定系统模型,给出了卫星姿态确定方法,重点介绍了状态估计法在姿态确定中的应用,并分析了实际卫星姿态确定中存在的若干工程问题。

第10章为卫星姿态确定系统模型分析。针对星敏感器与陀螺组合配置的卫星姿态确定系统,给出了姿态确定系统模型,并对其线性化误差、测量随机误差、系统误差及其影响进行分析。

第11章为卫星姿态确定的非线性滤波方法。在对卫星姿态确定系统模型分析的基础上,结合第2章的动态系统状态滤波理论,研究适于处理模型非线性、不确定性的高精度姿态滤波方法。

第12章为多姿态传感器测量融合定姿方法。针对多传感器卫星定姿信息融合技术中存在的问题,包括异步传感器时间同步配准、多传感器测量数据优化处理、多传感器测量信息的冗余利用、融合结构优化设计等,开展多姿态传感器测量融合定姿方法的研究。

本书引用了许多学者的工作(见每章参考文献),在此特别对相关作者和出版单位表示衷心感谢。为使本书内容完整,书中引用了作者在有关刊物上发表的一些文章,特别对这些刊物及其出版单位表示诚挚的谢意。

本书的出版得到了国防科学技术大学六十周年华诞系列专著专项基金、国防科学技术大学学术专著出版基金等资助。在本书的撰写出版过程中,得到了航天领域专家李济生院士、吴宏鑫院士的推荐和帮助。本书的许多研究结果与下列专家、学者的交流与讨论密不可分,包括:中国空间技术研究院杨孟飞研究员,北京控制工程研究所王大珩研究员、何英姿研究员、魏春岭研究员、武云丽高工、

息处理与优化的技术或管理人员,以及卫星/导弹测控及相关试验系统的研制单位、鉴定部门、应用单位的工程技术人员参考。要求读者具有线性代数、概率统计、数值分析、回归分析、最优化方法的基本知识。

全书共分为3部分,共12章,由周海银统稿和定稿。

第1部分为状态融合估计理论,共分4章。着重介绍静态系统参数估计理论、动态系统状态滤波理论、标准多传感器系统状态融合估计、非标准多传感器系统状态融合估计,为全书奠定了知识和体系结构基础,以方便读者学习,并深入阅读本书第2部分和第3部分。第1部分由王炯琦牵头,第1章由王炯琦、周海银共同执笔,第2章由王炯琦、矫媛媛共同执笔,第3章由王炯琦、周海银共同执笔,第4章由王炯琦执笔。

第2部分为卫星轨道确定中的状态融合估计,共分4章。针对信息融合技术在卫星轨道确定中的具体应用,系统地研究卫星轨道确定基本原理与方法、基于模型补偿的卫星轨道确定方法、基于抗差估计的卫星轨道确定方法和基于天地基信息融合的联合定轨技术。第2部分由潘晓刚牵头,第5章由潘晓刚、王炯琦共同执笔,第6、7章由潘晓刚执笔,第8章由潘晓刚、王炯琦共同执笔。

第3部分为卫星姿态确定中的状态融合估计,共分4章。针对信息融合技术在卫星姿态确定中的具体应用,系统地研究卫星姿态确定基本原理与方法、卫星姿态确定系统模型分析、卫星姿态确定的非线性滤波方法和多姿态敏感器测量融合定姿方法。第3部分由矫媛媛牵头,第9章由矫媛媛、王炯琦共同执笔,第10、11章由矫媛媛执笔,第12章由王炯琦执笔。

下面是各章的内容简介。

第1章为静态系统参数估计理论。介绍了几种常用的最优估计方法,并针对卫星状态观测模型中存在模型误差或观测数据中存在粗差的情况,着重介绍了半参数估计理论与抗差估计理论。

第2章为动态系统状态滤波理论。主要介绍在卫星状态估计中广泛应用的Kalman滤波及其扩展形式、无迹滤波(Unscented Filter, UF, 又称为UKF),非线性预测滤波和鲁棒滤波等。

第3章为标准多传感器系统状态融合估计。分析了线性最优加权与卫星状态融合估计,介绍了不同融合结构下的融合估计方法,给出了统一的线性融合模型,并研究了最优状态融合估计性能。

第4章为非标准多传感器系统状态融合估计。针对实际系统的非线性、不确定性、时变性和相关性等因素,分别研究了基于模型曲率的融合加权思想、基于小波分析时序建模与半参数建模思想、基于多模型融合思想和基于自适应估计思想等四类解决方案,给出了相应的系统建模和状态融合估计方法。

熊凯高工、汤亮高工，西安卫星测控中心王家松研究员、何雨帆高工、朱俊工程师，国防科学技术大学王正明教授、吴翊教授、易东云教授、朱炬波教授、杨俊才教授、杨建坤教授、谭吉春教授、段晓君教授、谢美华副教授、李修建副教授、贾辉讲师、刘海波讲师。李济生院士、王家松研究员、王大珩研究员、吴翊教授、王正明教授等仔细审阅全稿，并提出相应的修改意见与建议。此外，课题组的研究生何章鸣、李书兴、刘洋、郭雪姣、葛益明、陈国敏、张舒阳等为本书提供了许多有价值的素材，认真阅读了书稿，并参加了本书的部分文字录入、校对和修改工作。在此，一并向他们表示衷心的感谢。

由于作者理论水平有限和研究工作的局限性，疏漏与不当之处在所难免，恳请读者批评指正。

作者

2013年4月于长沙

目 录

序

前言

第 1 章 静态系统参数估计理论	1
1.1 经典最优估计理论	1
1.1.1 估计、估计准则和最优估计	1
1.1.2 最小(加权)均方误差估计	2
1.1.3 极大似然估计	3
1.1.4 极大后验估计	4
1.1.5 线性最小方差无偏估计	5
1.1.6 最小二乘估计	7
1.2 半参数估计理论	9
1.2.1 一般概念	9
1.2.2 基于正则矩阵的补偿最小二乘估计	10
1.2.3 参数化逼近的半参数模型估计	14
1.2.4 算例分析	15
1.3 抗差估计理论	16
1.3.1 一般概念	17
1.3.2 M 估计与影响函数	18
1.3.3 抗差最小二乘估计	19
1.3.4 算例分析	25
参考文献	25
第 2 章 动态系统状态滤波理论	27
2.1 Kalman 滤波及其扩展	27
2.1.1 离散系统的 Kalman 滤波基本方程	28
2.1.2 扩展 Kalman 滤波方程	30
2.1.3 滤波基本方程分析	31
2.1.4 算例分析	32
2.1.5 Kalman 滤波应用注意的问题	34
2.2 无迹滤波	35
2.2.1 UT 变换	36

4.1.1 问题的提出	83
4.1.2 模型结构描述与非线性程度度量	84
4.1.3 非线性模型的参数估计与精度分析	87
4.1.4 非线性最优模型融合权值确定	89
4.1.5 算例分析	90
4.2 不确定建模下的非标准多传感器系统状态融合估计	91
4.2.1 问题的提出	91
4.2.2 系统不确定性特征的小波提取	92
4.2.3 系统不确定性的时间序列建模	94
4.2.4 基于互迭代半参数回归的状态融合估计方法	96
4.2.5 融合算法精度分析	98
4.3 多模型融合下的非标准多传感器系统状态融合估计	99
4.3.1 问题的提出	99
4.3.2 多模型融合估计基本原理与结构	100
4.3.3 模型融合算法	103
4.4 基于信息融合的联合滤波融合估计	105
4.4.1 问题的提出	105
4.4.2 联合滤波的方差上界技术	106
4.4.3 联合滤波的结构与工作流程	109
4.4.4 联合滤波器的最优性能分析	112
4.4.5 信息分配因子的自适应确定	115
4.5 小结	116
参考文献	117
第5章 卫星轨道确定基本原理与方法	120
5.1 时间系统与坐标系统	120
5.1.1 时间系统概述	120
5.1.2 坐标系统概述	124
5.2 动力学模型描述与卫星的最优组合动力学模型	126
5.2.1 地球引力场摄动力与对不同高度轨道的摄动影响	127
5.2.2 日、月引力摄动力与对不同高度轨道的摄动影响	128
5.2.3 大气阻力摄动与对不同高度轨道的摄动影响	129
5.2.4 潮汐摄动和对不同高度轨道的摄动影响	130
5.2.5 太阳辐射压摄动和对不同高度轨道的摄动影响	130
5.2.6 动力学模型优化组合准则	131

2.2.2	UKF 采样策略	37
2.2.3	UKF 滤波方程	40
2.2.4	EKF 和 UKF 性能比对	41
2.2.5	算例分析	43
2.3	非线性预测滤波	45
2.3.1	NPF 滤波过程	45
2.3.2	协方差约束	47
2.3.3	最小模型误差与模型误差加权矩阵	47
2.3.4	预测滤波性能分析	49
2.4	鲁棒滤波	50
2.4.1	不确定性鲁棒滤波方法	50
2.4.2	增益矩阵设计与鲁棒滤波算法	53
2.4.3	算例分析	54
	参考文献	56
第 3 章	标准多传感器系统状态融合估计	58
3.1	线性最优权值与融合估计精度	58
3.1.1	线性融合模型与融合方法	59
3.1.2	各传感器测量精度计算	62
3.1.3	算例分析	63
3.2	状态融合估计问题的提出与融合估计方法	64
3.2.1	状态融合估计的提出	64
3.2.2	融合算法结构	66
3.2.3	集中式状态融合估计方法	68
3.2.4	分布式状态融合估计方法	69
3.2.5	多级式状态融合估计方法	72
3.3	标准多传感器系统状态融合估计的统一描述	74
3.3.1	信息类型的统一描述	74
3.3.2	融合系统结构的统一描述	75
3.3.3	整体融合算法	77
3.3.4	融合算法之间的关系	79
3.4	小结	80
	参考文献	81
第 4 章	非标准多传感器系统状态融合估计	83
4.1	多结构多参数非线性模型的状态融合估计	83

7.1.2	基于数据深度加权的 M 估计方法与性质	175
7.1.3	算例分析	177
7.2	自适应稳健 L_p 估计在轨道确定中的应用	182
7.2.1	基于正态分布的轨道确定模型构建	182
7.2.2	p 范分布与稳健性分析	183
7.2.3	基于数据深度加权的稳健 p 范估计	185
7.2.4	算例分析	187
7.3	基于稳健估计的方差分量估计	190
7.3.1	方差分量估计方法与性能分析	191
7.3.2	改进的方差分量估计方法	193
7.3.3	算例分析	195
7.4	基于数据深度加权的半参数模型估计方法	197
7.4.1	基于数据深度加权的半参数模型轨道估计方法	198
7.4.2	模型误差的深度加权核估计方法	199
7.4.3	算例分析	199
7.5	小结	202
	参考文献	203
第 8 章	基于天地基信息融合联合定轨技术	204
8.1	联合定轨原理和精度分析	205
8.1.1	仅利用天基数据进行联合定轨的亏秩特性分析	205
8.1.2	天地基联合定轨精度分析	207
8.2	基于天地基联合信息处理的同步轨道确定与应用	208
8.2.1	同步轨道空间目标的天地基联合定轨模型构建	209
8.2.2	同步轨道空间目标的天地基联合定轨方法	213
8.2.3	算例分析	214
8.3	基于天基测控系统的联合定轨技术	216
8.3.1	系统结构分析与观测模型构建	216
8.3.2	天基测控定轨算法与天地基联合定轨算法	217
8.4	小结	219
	参考文献	219
第 9 章	卫星姿态确定基本原理与方法	221
9.1	卫星姿态描述和姿态测量模型	222
9.1.1	参考坐标系的选择与坐标变换	222
9.1.2	姿态参数与姿态运动学/动力学方程	225

5.3	测轨观测模型	132
5.4	卫星轨道确定方法及其改进	133
5.4.1	基于运动学的轨道确定方法	133
5.4.2	基于动力学的不同类型轨道确定方法	137
5.4.3	基于动力学和运动学的混合轨道确定方法	143
5.5	轨道确定误差分析	143
5.5.1	基于 UT 变换的轨道确定协方差分析	143
5.5.2	误差分析	146
	参考文献	147
第 6 章	基于模型补偿的卫星轨道确定方法	149
6.1	基于部分线性模型的不确定性模型误差补偿的轨道确定	149
6.1.1	不确定性动力学模型误差的定轨方程	149
6.1.2	不确定性观测模型误差的定轨方程	153
6.1.3	基于部分线性模型的定轨算法统一描述	153
6.2	基于简化动力学模型的定轨方法	154
6.2.1	基于经验加速度的轨道确定方法	154
6.2.2	基于动力学模型平滑的模型精度确定	155
6.2.3	基于经验加速度补偿的轨道确定方法的局限性	156
6.2.4	简化动力学模型轨道确定方法	157
6.3	扩展的简化动力学定轨方法	160
6.3.1	已知观测模型系统误差形式	160
6.3.2	已知观测模型系统误差频率分布	160
6.3.3	已知动力学模型系统误差频率分布	161
6.3.4	三类模型误差补偿算例分析	161
6.4	基于模型误差补偿的实时轨道确定方法	165
6.4.1	基于经验加速度补偿的模型补偿滤波	165
6.4.2	动力学模型补偿滤波	165
6.4.3	Sage 自适应滤波	167
6.4.4	自适应滤波在星载 GPS 接收机实时定轨中的应用算例	168
6.5	小结	171
	参考文献	171
第 7 章	基于抗差估计的卫星轨道确定方法	173
7.1	基于数据深度加权的 M 估计与性质	173
7.1.1	数据深度概念与数据深度权的应用	173

11.2.4 算例分析	308
11.3 卫星姿态确定的 REKF 估计	309
11.3.1 问题的提出	309
11.3.2 鲁棒定姿滤波算法	309
11.3.3 算例分析	315
参考文献	319
第 12 章 多姿态敏感器测量融合定姿方法	321
12.1 多敏感器测量信息融合的时间配准	321
12.1.1 多敏感器时间配准的常用算法	322
12.1.2 基于曲线拟合的多敏感器时间配准	324
12.1.3 算例分析	326
12.2 基于复合结构的卫星融合定姿方法	328
12.2.1 多敏感器测量数据实时优化处理	328
12.2.2 多敏感器融合定姿滤波器复合结构设计	330
12.2.3 基于敏感器置信度的融合规则优选	332
12.2.4 算例分析	334
12.3 甚高精度卫星姿态确定方法	337
12.3.1 卫星扰动误差建模	337
12.3.2 敏感器低频误差特性分析	340
12.3.3 敏感器低频误差参数辨识	344
12.3.4 甚高精度姿态确定算法流程	346
12.3.5 算例分析	347
12.4 小结	350
参考文献	351
彩图	355

9.1.3 姿态测量敏感器与测量模型	228
9.2 卫星姿态确定基本方法	234
9.2.1 确定性方法	234
9.2.2 状态估计法	236
9.2.3 状态估计法在卫星姿态确定中的应用	241
9.3 卫星姿态确定中的若干问题	244
9.3.1 姿态确定系统的非线性程度	244
9.3.2 姿态确定系统的误差形式	244
9.3.3 多姿态测量敏感器的融合定姿策略	245
9.3.4 姿态确定方法的实时性要求与计算量问题	246
参考文献	246
第 10 章 卫星姿态确定系统模型分析	251
10.1 姿态确定系统模型线性化误差影响分析	252
10.1.1 系统方程线性化误差模型及其度量	252
10.1.2 系统模型线性化误差影响分析	257
10.1.3 算例分析	258
10.2 姿态确定系统的测量随机误差分析	264
10.2.1 光轴测量锥面误差模型及其特性	264
10.2.2 基于星敏感器光轴测量锥面误差模型的姿态确定模型	267
10.2.3 算例分析	269
10.3 姿态确定系统的测量系统误差分析	270
10.3.1 测量系统误差的产生与分类	270
10.3.2 基于相关性检验技术的测量系统误差影响分析	276
10.3.3 算例分析	279
参考文献	283
第 11 章 卫星姿态确定的非线性滤波方法	285
11.1 卫星姿态确定的 EKF 估计	285
11.1.1 EKF 姿态确定方法影响因素分析	285
11.1.2 扩维的 EKF 姿态确定方法	289
11.1.3 算例分析	293
11.2 卫星姿态确定的 NPF 估计	296
11.2.1 问题的提出	296
11.2.2 非线性预测滤波算法	296
11.2.3 NPF 姿态确定稳健性分析	303

第 1 章 静态系统参数估计理论

估计理论大体上分为参数估计和状态估计两个分支。一般地，参数估计属于静态估计，状态估计属于动态估计。但在许多情况下，参数可作为系统状态变量的一部分(或某个虚设系统的状态)嵌入到适当的状态估计之中；同样，状态也可以视为特殊的参数，用参数估计方法来处理。

本章介绍静态系统参数估计的理论和方法，其中，1.1 节介绍估计、估计准则和最优估计等基本概念和常见的几种最优估计方法；1.2 节介绍卫星状态观测模型中存在模型误差时的半参数估计基本理论和常见的几种半参数估计方法；1.3 节介绍卫星状态观测数据中存在粗差时的抗差估计理论和相应的抗差估计方法。

1.1 经典最优估计理论

1.1.1 估计、估计准则和最优估计

1. 估计

本书介绍卫星状态的估计问题，包括卫星的位置、速度、姿态等矢量的过程状态估计，因此估计问题可叙述为：假设卫星被估计状态量 $\mathbf{x}(t) \in \mathbf{R}^{n \times 1}$ ， $\mathbf{z}(t) \in \mathbf{R}^{m \times 1}$ 是测轨/测姿传感器的观测量，则观测量与被估计量之间的关系为^[1]

$$\mathbf{z}(t) = \mathbf{h}[\mathbf{x}(t), \boldsymbol{\varepsilon}(t), t] \quad (1.1)$$

式中， $\mathbf{h} \in \mathbf{R}^{m \times 1}$ 是已知的函数，它是由测量传感器的观测原理所决定的； $\boldsymbol{\varepsilon}(t)$ 是观测噪声，通常是一个随机过程。所谓估计问题，就是在时间区间 $[t_0, t]$ 内对卫星状态 $\mathbf{x}(t)$ 进行观测，得到观测数据 $\mathbf{z} = \{\mathbf{z}(\tau), t_0 \leq \tau \leq t\}$ ，构造一个观测数据 $\mathbf{z}$ 的函数 $\hat{\mathbf{x}}(\mathbf{z})$ 来作为 $\mathbf{x}(t)$ 的估计，并称 $\hat{\mathbf{x}}(\mathbf{z})$ 是 $\mathbf{x}(t)$ 的一个估计量，或称 $\mathbf{x}(t)$ 的估计为 $\hat{\mathbf{x}}(\mathbf{z})$ 。

2. 估计准则

如前面所述，所谓估计问题，就是要构造一个观测数据 $\mathbf{z} = \{\mathbf{z}(\tau), t_0 \leq \tau \leq t\}$ 的函数 $\hat{\mathbf{x}}(\mathbf{z})$ 来作为被估计量 $\mathbf{x}(t)$ 的一个估计。在应用时，人们总希望估计出来的状态变量越接近实际值越好。因此，为了衡量估计的好坏，必须要有一个衡量的标准，这个衡量标准就是估计准则。估计常常是以“使估计的性能指标达到极值”为标准的。估计准则可以是多种多样的，常用的估计准则有最小（加权）均方误差估计、极大似然估计、极大后验估计、线性最小方差无偏估计、最小二乘估计等。