



航天测控最优估计 方法与应用

HANGTIAN CEKONG ZUIYOU GUJI FANGFA YU YINGYONG



李恒年 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

总装部队军事训练“十一五”统编教..

航天测控最优估计 方法与应用

李恒年 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

航天测控最优估计方法与应用 / 李恒年著. —北京:
国防工业出版社, 2015. 1

总装部队军事训练“十一五”统编教材

ISBN 978 - 7 - 118 - 09424 - 4

I. ①航... II. ①李... III. ①航天测控 - 估计 - 最
佳化 - 教材 IV. ①V556

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 293250 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 100048)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 880 × 1230 1/32 印张 9 $\frac{7}{8}$ 字数 280 千字

2015 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 35.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777

发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755

发行业务: (010) 88540717

总装备部军事训练统编教材 编审委员会

(2009)

主任委员 夏长法

副主任委员 乐嘉陵 赵洪利

委 员 于俊民 李 钢 黄水潮

安敏建 陈长贵 姚志军

杨开忠 白凤凯 裴承新

姜世忠 张 渊 陈正兴

秘 书 石根柱 余敬春

序

航天工程中,确定航天器轨道和姿态是一项基础工作,随着航天事业的发展,迫切需提高轨道姿态确定的精度和实时性。除了需要精确的动力学模型,提高测量数据的精度外,最优估计理论和算法的研究也是关键技术。

本书作者在该领域耕耘 20 年,是该领域研究者的杰出代表,在机动轨道确定、卫星姿态确定、再入目标和非合作目标跟踪等方面取得过许多成效显著的创新成果。

本书是有关航天动力学系统最优估计理论及应用方面的科技专著,理论部分叙述严谨,系统性强,针对非线性动力学系统参数估计问题,阐述了经典估计理论及其推广应用算法,如以卡尔曼滤波算法的核心出发,推导了卡尔曼滤波的不同推广算法。应用部分面向具体工程问题,内容具体且针对性强,阐述了航天动力学系统估计算法的构建、分析、应用过程。尤其在卫星轨道机动、再入和非合作目标轨道跟踪、动力学补偿连续推力轨道精确确定等方面,展现了许多成效显著的创新成果,填补了国内在这些领域的研究和应用空白,达到国内先进水平。本书对航天器跟踪、测量、导航等学科研究和发展具有一定的学术价值,是一本在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

李济生

2014 年 5 月北京

前 言

最优估计理论应用研究是航天器飞行控制技术研究的重要领域之一,是从属于现代控制理论与工程领域的重要研究方向,因此,非线性动力学系统最优参数估计理论在航天测量与控制中具有重要地位。关于非线性动力学系统辨识与估计理论,由高斯最小二乘法到卡尔曼滤波,再到 Julier 的无味卡尔曼滤波,虽然我们仍然只是站在“巨人”的肩膀上,但在具体工程应用中,不仅取得了惊人的成效,而且也得到了许多有益的推广。在我国航天测量与控制领域几十年发展过程中,针对航天器轨道姿态动力学系统参数估计方面,也取得了非凡的进步。

为了把工作期间为工程任务撰写的一些最优估计方案和算法整理成稿的目的,10 年前编写了这本书的初稿,初稿在作者单位也流传了 10 年,大多数算法在工程中也应用了 10 年以上。为什么我断断续续写了 10 年,原因主要有两点:一是编写理念上摇摆不定,是像相关动力学系统估计问题的类似专著一样,阐述理论基础和方法原理,还是弱化理论基础,以如何解决工程问题为线索还原工程应用的算法为主线;二是工程应用中的方法和算法也在不断改进和发展之中,我自己就曾对一个问题的解决方案,进行过历时 15 年的改进过程,因此,总是感觉尚欠成书成著的成熟性。但最近几年单位里的不少年轻科技人员对我说:“参考你的书,对照书中的算法写程序,终于学会了最小二乘法和卡尔曼滤波方法。”我才找到了我努力完成该书的 3 个主要理由:一是将工程中应用 10 多年的算法如实反映出来,力求还原工程应用的算法现状,以便于追溯相关软件的算法来源和在此基础上创新发展;二是搭起一座从理论到实践应用的便桥,以便于年轻科技人员深入理解和应用基础理论,因此,对书中涉及的有些问题,我不但阐述了对这些问题

的比较理想的解决方案,而且也叙述了对这些问题的解决过程;三是我一直有一种读书和做科研工作的基本思路,碰到复杂问题,纠缠不清的时候,总是先从简单的例子开始,搞清基本规律,摸清外围文献,然后逐步深入,那么就以本书作为有关专业科技人员深入研究的例子吧。

理由找到了,编写理念也就确定了,那就是:弱化理论基础,以如何解决工程问题为线索还原工程应用的算法方案为主线。因此,有别于单纯讨论随机过程最优估计理论和数据处理方法方面的理论专著,本书的编著理念有如下特点:一是基础理论部分力求叙述严谨和简单,部分采用“拿来主义”,不对滤波理论作详细的阐述和过程推导,事实上也没有必要,因为有成千上万的优秀专著对此有非常精辟的讨论;二是针对非线性动力学系统参数估计问题,阐述经典估计理论及其推广应用算法,分析算法深度适当,叙述连贯且系统;三是应用部分以具体跟踪与测量任务为实例,从问题的数学模型抽象开始,叙述了系统状态与观测动力学模型建立、最优估计算法的展开、非线性方程的线性化过程,以及仿真算法的稳定性与收敛性分析。通过以上努力,期望引导读者深刻理解最优估计理论和方法,达到融会贯通地解决具体航天测控工程问题的目的。

本书最直接的读者是从事航天测控跟踪、数据处理、轨道确定、姿态确定等专业的工程技术人员,希望本书能够为科研院所相关专业研究生和科研人员提供一点参考,也能为信号处理等专业研究生和高年级学生提供工程应用案例。希望能够为卫星跟踪、测量、导航学科研究和发展提供一点学术价值。

本书撰写过程中,总装备部科技委委员李济生院士和西安测绘研究所魏子卿院士给作者以具体指导。本书的写作还得益于作者所在单位领导的大力支持和团队成员的鼎力相助,特别是钱山博士参与了大部分章节的校订工作,孙守明博士参与了第9章部分章节的撰写工作,谢鑫工程师参与了第5章部分章节的撰写工作,黄普工程师参与了第7章部分章节的撰写工作,在此一并表示感谢。

由于本书涉及较多的数学模型及算法,且引入符号较多,虽然作者

在著书过程中,对每个公式进行了逐一推导,并进行了相应的数值计算,但仍难免有疏漏和错误之处,恳请读者批评和指正。

作 者

2014 年 3 月,西安

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 航天测控中的估计问题	1
1.2 最优估计理论及发展	3
1.3 航天测控最优估计应用现状	4
1.4 本书导读	5
第 2 章 最小二乘法及改进算法	7
2.1 最小二乘估计原理	7
2.2 线性化系统观测方程	11
2.3 线性化系统状态方程	12
2.4 系统状态转移矩阵	13
2.5 系统状态矩阵求解	15
2.5.1 数值积分法	16
2.5.2 矩阵指数函数	17
2.5.3 幂级数近似法	17
2.5.4 数值差分法	18
2.5.5 差分积分混合法	19
2.6 最小二乘求解方法	22
2.6.1 超定方程正规化	24
2.6.2 超定方程奇异值分解	25
2.6.3 最小二乘批处理估计算法	27
2.7 最小二乘改进算法	30
2.7.1 最小二乘加权改进算法	30
2.7.2 最小二乘贯序估计算法	33
2.8 算法仿真	36

第3章 卡尔曼滤波及扩展算法	43
3.1 非线性系统滤波	43
3.2 状态噪声和观测噪声	49
3.3 滤波发散抑制方法	50
3.4 滤波缺陷分析	53
3.5 对滤波算法核心再认识	54
3.6 非线性函数均值和方差传播特点	56
3.7 无味卡尔曼滤波	62
3.7.1 无味变换均值和方差传播	62
3.7.2 基于无味变换的卡尔曼滤波	69
3.8 增广无味卡尔曼滤波	76
3.9 最小二乘法与卡尔曼滤波	83
第4章 空间坐标系及卫星运动基础	85
4.1 转移矩阵的一般形式	85
4.1.1 正交基底投影法	85
4.1.2 欧拉角转动法	85
4.1.3 矢阵运算法	86
4.2 空间坐标系统	88
4.2.1 地心坐标系	88
4.2.2 月心坐标系	99
4.2.3 地平坐标系	102
4.2.4 卫星质心坐标系	106
4.2.5 卫星本体坐标系	111
4.3 卫星运动基础	122
4.3.1 开普勒轨道	122
4.3.2 椭圆轨道开普勒方程	126
4.3.3 双曲线和抛物线轨道开普勒方程	127
4.3.4 卫星通过纬度圈的时刻和经度	128
4.3.5 测量天线原点的运动	130
4.3.6 卫星相对测量天线的观测量	131
第5章 火箭飞行弹道融合滤波估计	133

5.1	火箭弹道融合处理问题	133
5.2	解耦最小二乘法	134
5.2.1	状态模型	134
5.2.2	弹道处理算法	135
5.2.3	应用实例	137
5.3	解耦扩展卡尔曼滤波	140
5.3.1	状态模型	140
5.3.2	应用实例	141
5.4	“当前”统计模型弹道融合算法	144
5.4.1	修正的瑞利分布函数	145
5.4.2	非零均值时间相关模型	146
5.4.3	滤波算法	148
5.4.4	应用实例	149
第6章	初轨确定与轨道运动监视	152
6.1	多项式拟合算法	152
6.2	最小二乘法	155
6.2.1	系统状态模型	155
6.2.2	系统观测模型	156
6.2.3	系统观测矩阵	158
6.2.4	状态传递矩阵	158
6.2.5	残差统计与方差控制	160
6.2.6	算法实现步骤和过程	162
6.3	改进拉普拉斯型方法	163
6.3.1	地面雷达观测方程	164
6.3.2	GPS 测量观测方程	167
6.3.3	观测方程最小二乘解	170
6.4	扩展卡尔曼滤波	171
6.4.1	马尔可夫过程矢量增广系统动力学模型	171
6.4.2	卡尔曼滤波算法	174
6.4.3	两种测量体制下的融合滤波算法	176
6.4.4	初始状态与协方差矩阵	178

6.4.5	状态矩阵和观测矩阵	179
6.4.6	应用实例	182
第7章	机动轨道跟踪与确定	187
7.1	机动轨道跟踪与确定问题	187
7.2	轨道机动控制动力学模型	188
7.2.1	高斯-马尔可夫随机过程加速度模型	188
7.2.2	再入轨道跟踪摄动力模型	189
7.2.3	轨道机动推力加速度模型	191
7.2.4	轨道机动速度增量模型	193
7.2.5	轨道机动推力 α - β 模型	195
7.2.6	加速度补偿模型	197
7.2.7	轨道机动推力加速度方向	198
7.3	加速度估计与动力学补偿方法	202
7.3.1	动力学和观测模型	202
7.3.2	扩展卡尔曼滤波算法	204
7.3.3	推力方向矢量在东南固连坐标系度量	208
7.3.4	推力方向矢量在瞬时轨道坐标系度量	211
7.3.5	应用实例	213
7.4	增广加速度动力学补偿方法	216
7.4.1	动力学和观测模型	216
7.4.2	扩展卡尔曼滤波算法	218
7.4.3	系统状态矩阵	219
7.4.4	应用实例	224
7.5	增广 α - β 动力学补偿方法	227
7.5.1	动力学模型	227
7.5.2	系统观测模型	228
7.5.3	无味卡尔曼滤波算法	228
7.5.4	应用实例	231
第8章	自旋稳定卫星姿态确定	235
8.1	双矢量几何法	235
8.2	姿态精确测定模型	237

8.2.1	无奇点度量模型	237
8.2.2	系统状态模型	239
8.2.3	系统观测模型	240
8.2.4	观测矩阵模型	243
8.3	加权最小二乘法	247
8.4	扩展卡尔曼滤波	251
8.5	无味卡尔曼滤波	254
8.6	应用实例	258
第9章	三轴稳定卫星姿态确定	260
9.1	矢阵代数姿态确定算法	260
9.1.1	矢阵姿态矩阵	260
9.1.2	欧拉角姿态矩阵	261
9.1.3	姿态测量参考方向	263
9.2	四元数姿态矢量确定方法	265
9.2.1	姿态观测模型	265
9.2.2	Quest 姿态确定算法	265
9.2.3	Request 姿态确定算法	266
9.2.4	最优 Request 姿态确定算法	268
9.2.5	自适应最优 Request 姿态确定算法	269
9.2.6	仿真分析	270
9.3	多信源融合确定方法	274
9.3.1	联合滤波器	274
9.3.2	星敏感器测量模型	276
9.3.3	GPS 姿态测量模型	276
9.3.4	红外地平仪测量模型	277
9.3.5	太阳敏感器测量模型	277
9.3.6	联合滤波模型	278
9.3.7	联合滤波算法及流程	281
9.3.8	仿真分析	282
附录		287
附录 A	向量函数微分运算	287

附录 B 球面三角常用公式	291
附录 C 随机变量及随机过程	293
附录 D Cholesky 分解	296
参考文献	298
后记	301

第 1 章 概 论

1.1 航天测控中的估计问题

航天测控系统作为航天工程一个重要组成部分,是对航天器发射及运行过程进行跟踪测量、运行控制的专用功能系统,由地域分布的测量设备(测控站)和数据处理中心(测控中心)组成。因此,狭义理解“航天测控”就是“测”和“控”两个字的内涵和外延,“测”是指测量航天器的空间轨迹和空间指向,“控”是指控制航天器的空间轨迹和空间指向^[1,2]。那么航天测控中为什么存在看似非确定性的“估计问题”呢?一是“测”仅能测量一个系统的外部表现,而“控”必须掌握一个系统的内部状态,例如:测量设备通过无线电跟踪航天器,仅能测量航天器相对测量设备基准的观测几何关系和相对运动参数,而不是航天器相对惯性空间的运动的完整状态;二是“测”是一个非确定性随机过程,由于测量设备和方法的局限性,测量本身就是含有误差的近似信息。那么由测量信息确定系统状态的问题,就是数学上的“估计”问题,这也是航天测控中存在看似非确定性的“估计”问题的原因。

航天测控中经常碰到这样的“估计”问题,例如:从火箭起飞到卫星定点、从卫星初始轨道确定到卫星精密轨道确定、从中间停泊轨道到目标轨道转移过程跟踪、从任务使命轨道到返回地球的弹道跟踪等航天器测控过程中,要从带有随机误差的测量观测中,“确定”出航天器当前的位置、速度和加速度等运动状态参数,以便预测航天器未来的运动状态和评估航天器状态控制的效果;从含有测量噪声的姿态敏感器测量数据中“确定”出航天器当前的姿态等空间指向

参数,以便控制航天器精确指向和评估航天器空间指向精度。航天测量控制与其他工业过程控制的最优估计具有相同的数学背景,是控制科学与工程专业领域研究的主要内容,是现代控制理论、计算机技术、概率论、数学统计学、动力学系统等学科的结合。它包括:控制主体的动力学和运动学特点及系统模型,系统动力学过程的传播特点及模型,系统可观测性及观测模型,系统状态能控性和能观性理论,系统状态辨识与估计理论,系统稳定性与控制率设计等理论。航天测量控制又具有与其他工业过程控制不同的特点,主要表现为:描述控制主体航天器动力学系统的时空关系复杂,系统在天体非球形引力、三体引力和太阳光压等摄动影响下,传播过程复杂球精确预测十分困难,系统观测受地球运动、地表曲率和空间环境等因素的影响,获取观测的时间不连续和观测精度受限。对航天系统动力学过程的辨识与估计理论,已经独立发展出卫星精密轨道确定理论,但随着人类航天活动的不断深入,对航天动力过程的估计算法研究,仍然是航天测量控制的重要研究领域。

“估计”(Estimation)就是从系统的外在表现(观测)“提炼”(Refine)出系统的内在本质(状态),状态是决定系统动力学行为的状态空间的元素,系统状态决定系统的外在表现。航天测量控制是指把空间航天器作为控制实体,以反馈控制为主要控制方法,来实现空间航天器发射任务的控制过程。它的最显著特点是:天一地大闭环状态反馈控制系统。空间航天器的(质点动力学行为)飞行轨迹(轨道)和(刚体动力学行为)空间指向(姿态)是决定航天器其他行为要素的基础,是决定航天器应用功能的两项首要因素,是天一地反馈控制系统的设计前提。因此,最优估计航天测量与控制是有关反馈控制系统的基本问题。

航天测控“估计”问题就是基于不十分精确的系统动力学模型,从带有随机误差的观测数据中估计出描述系统状态行为的某些参数,这种情况下,为了从测量中得到状态等有用信息,只能通过数学统计方法处理有噪声的测量信息,确定统计意义上最接近状态真值的估计值,就是统计意义上的估计问题,如果估计是限定在某种估计准则或性能指标意义上的最佳估计,则称为最优估计问题。

1.2 最优估计理论及发展

最优估计是指在某一确定的准则下,估计出来的系统状态尽量接近系统的实际本质行为,估计达到最优。衡量估计的准则可以是各种各样的。因此,最优是相对的,而且系统状态的最优估计值也不是唯一的,它随着衡量准则的不同而不同,随估计方法和处理数据的方法不同而不同。最优估计理论历史悠久,却仍然充满活力。

18 世纪末高斯 (Gauss) 提出的最小二乘参数估计方法,是以系统测量预测值与观测量的残差平方和最小作为衡量估计的准则,时值今日它仍然是经典的动力学系统估计理论的基础;20 世纪 60 年代美国人卡尔曼 (Kalman) 提出的以其名字命名的卡尔曼滤波参数估计方法,是以系统状态估计误差达到最小作为估计准则,布西 (Bucy) 推广到非线性系统,随后经过无数学者的努力,扩展卡尔曼滤波 (EKF) 成为各个领域非线性参数估计的“魔杖”,进入 20 世纪 90 年代,随着计算机技术的发展,基于随机过程采样的滤波算法不断出现,典型的有基于随机过程确定性采样的无味卡尔曼滤波 (UKF),但我们仍然站在“巨人”的肩膀上^[2]。

可以这样说,自 20 世纪 60 年代美国人卡尔曼 (Kalman) 和布西 (Bucy) 将现代控制理论中的状态空间思想引入最优滤波理论,直到今天,估计和滤波理论的发展只是围绕领域开展的应用研究,有点类似计算机技术的发展逐渐渗透进领域的应用研究一样。目前应用研究的主要方面是:选择描述系统状态行为的参数以及对状态参数的建模过程,称为系统建模。关于选择系统状态参数的一般原则:一是状态参数是实际反映系统行为和显著影响系统输出的物理量;二是状态参数在整个估计区间是稳定的或按某一动力学模型传播;三是尽量使选择的状态参数相互独立,也即分离状态向量的强相关性。选择系统输出并对系统输出建模的过程,称为观测建模。对观测建模的基本原则:一是观测模型必须与状态参数相适应,即对于选择的状态参数是否在观测模型中反映;二是避免观测模型过于简单或繁杂;三是观测模型尽可能是敏感器的直接输出,任何对直接输出的中间变换将损失敏感器