



# 卫星机动轨道确定

## *Orbit Determination for Maneuvering Satellite*

李恒年 著



国防工业出版社  
National Defense Industry Press

013063098

V412.4  
28

国家科学技术学术著作出版基金 资助出版

# 卫星机动轨道确定

Orbit Determination for Maneuvering Satellite

李恒年 著



V412.4  
28

国防工业出版社

·北京·



北航

C1670276

013063028

国防工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

卫星机动轨道确定 / 李恒年著. —北京:国防工业出版社, 2013. 6

ISBN 978 - 7 - 118 - 08642 - 3

I. ①卫... II. ①李... III. ①机动卫星 - 卫星轨道  
IV. ①V412. 4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 087130 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)

北京嘉恒彩色印刷责任有限公司

新华书店经售

\*

开本 710 × 1000 1/16 印张 13½ 字数 240 千字

2013 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 56.00 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

此书同时获得

**总装备部国防科技图书出版基金资助**

## 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。

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  
第六届评审委员会组成人员

主任委员	王 峰			
副主任委员	宋家树	蔡 镛	杨崇新	
秘 书 长	杨崇新			
副 秘 书 长	邢海鹰	贺 明		
委 员	于景元	才鸿年	马伟明	王小谟
(按姓氏笔画排序)	甘茂治	甘晓华	卢秉恒	邬江兴
	刘世参	芮筱亭	李言荣	李德仁
	李德毅	杨 伟	肖志力	吴有生
	吴宏鑫	何新贵	张信威	陈良惠
	陈冀胜	周一宇	赵万生	赵风起
	崔尔杰	韩祖南	傅惠民	魏炳波

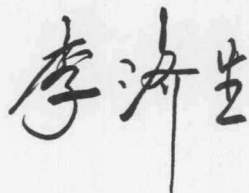
## 序

卫星机动轨道确定是指利用观测信息估计受控卫星运动参数,进而准确定位和精确预测卫星受控运动状态,达到制导、控制和导航的目的,是近年来卫星动力学与控制领域研究的一个热点。

卫星机动轨道确定与卫星非机动精密轨道确定问题不同,卫星非机动轨道精密确定问题,除卫星宏表面力等与卫星本体结构有关的受力模型存在误差外,系统动力学模型为相对精确的确定性模型。而对卫星机动轨道确定问题,因为系统动力学模型的不确定性,在系统模型的建立中就遇到无法统一建模的问题,而且推力加速度的量级远远高于其他摄动加速度的误差量级,观测信息主要反映卫星机动过程中的动力学模型误差,因此,卫星机动轨道确定问题研究方法与传统卫星精密轨道确定问题研究方法有不同之处。

卫星机动轨道确定本质上是机动目标跟踪问题,关于机动目标跟踪的模型、算法以及相应结论,对解决卫星机动轨道确定问题提供了很好的基础和参考,但是,卫星机动有其特殊的运动规律,作为一般性的解决方案,是卫星机动轨道确定的适用理论和算法,不能成为有效的解决方案。

本书重点讨论受控卫星机动轨道确定问题,以及相关动力学模型、参数估计、状态滤波相关理论、算法和应用问题。针对机动卫星运动的特点,讨论了卫星机动轨道确定算法及相关理论基础。讨论的问题具有明确的工程背景,直接来源于工程需求,方法和算法均直接应用于实际工程,通过构建、分析、应用或仿真过程检验等步骤,具有较强的参考和应用价值,展现了许多成效显著的创新成果,具有创新性和新颖性,对卫星跟踪、测量、导航等学科研究和具有一定的学术价值。



2011年9月于北京



## 前 言

卫星精密轨道确定是一门古老而经典的学科,是航天测量与控制领域的核心学科,这里积淀着一代代专家学者的辛勤劳动和辉煌成果,本书仅是为这颗参天大树增添一片绿叶。

早在 10 年前,我的领导和同事希望我把工作期间为工程任务撰写的一些计算方案和算法整理成稿,一则可以追溯相关软件的算法来源;二则作为知识载体以便在此基础上再创新和再发展。因此,本书的初稿已经在西安卫星测控中心流传 10 年,期间也有动过集册成书的念头,但总觉得欠点成熟度。直到 2011 年 9 月,李济生院士看过初稿后,力荐我修改成书,并推荐申请国家相关科技出版基金,同年获得国家科学技术学术著作出版基金和国防科技图书出版基金资助出版。

卫星机动轨道确定仅仅是卫星轨道确定领域研究的一个小分支,主要针对受控制卫星的轨道跟踪和确定问题,讨论相关动力学模型、参数估计与优化、非线性状态滤波等相关理论及应用技术和方法。由于编写初稿时的动机原因,因此,本书可能难免过于工程化,讨论的问题具有明确的工程背景,约束和条件来源于工程需求,采用的叙述方式适应工程应用软件编码等特点,部分内容可能只适应工程应用需求的技巧和方法。

全书共 8 章,第 1 章概述;第 2 章卫星运动与时空系统,简要介绍与本书讨论问题精度相匹配的时间和空间系统;第 3 章卫星轨道确定基础,直接从工程师角度讨论基于微分修正和最小二乘等方法的非线性动力学估计问题;第 4 章动力学系统估计理论与方法,直接从应用基础的角度叙述算法的构建和展开过程,以及适应卫星动力学系统的估计方法;第 5 章卫星轨道机动运动动力学模型,介绍动力学模型和相关变分运动模型及计算方法;第 6 章初始轨道确定,介绍几种初始轨道确定原理和方法;第 7 章卫星机动轨道跟踪与机动检测,介绍推进器工作参数的实时监测和机动轨道跟踪技术和方法;第 8 章动力学补偿机动轨道确定,介绍机动推力估计和动力学模型补偿技术和方法。

希望本书能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,同时希望能够为卫星跟踪、测量、导航学科研究和发

本书撰写过程中,总装备部科技委李济生院士、西安测绘研究所魏子卿院士和西安交通大学韩崇昭教授给予我许多具体指导建议,同时得益于本人所在单位领导的大力支持,亲人的默默奉献以及同事的无私帮助,特别是研究团队的钱山和孙守明两位博士;并得到国家科学技术学术著作出版基金和国防科技图书出版基金、总装备部创新团队基金和西安卫星测控中心宇航动力学国家重点实验室开放基金的资助,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,虽然在成书过程中,对每个公式进行了逐一推导,并进行了相应的数值计算,仍难免有疏漏,恳请读者批评指正。

李恒年

2012年10月于西安

# 目 录

<b>第1章 概述</b> .....	1
1.1 卫星机动轨道确定 .....	1
1.2 卫星精密轨道确定 .....	1
1.3 机动目标跟踪 .....	2
1.4 本书的主要内容和结构 .....	4
<b>第2章 卫星运动与时空系统</b> .....	5
2.1 地球运动 .....	5
2.1.1 地球自转轴极移运动 .....	5
2.1.2 地球自转轴进动运动 .....	6
2.1.3 地球自转轴章动运动 .....	8
2.2 时间系统 .....	13
2.2.1 春分点和子午面 .....	13
2.2.2 平太阳日和平恒星日 .....	14
2.2.3 葛略历与儒略日 .....	17
2.2.4 太阳时和恒星时 .....	18
2.2.5 世界时和协调世界时 .....	22
2.2.6 原子时和历书时 .....	22
2.2.7 时间系统相互关系 .....	23
2.3 空间坐标系统 .....	24
2.3.1 地心坐标系 .....	24
2.3.2 地平坐标系 .....	31
2.3.3 卫星质心坐标系 .....	34
2.3.4 卫星本体坐标系 .....	36
2.4 卫星运动基础 .....	41
2.4.1 开普勒轨道 .....	41
2.4.2 椭圆轨道开普勒方程 .....	44

2.4.3	双曲线和抛物线轨道开普勒方程 .....	44
<b>第3章</b>	<b>卫星轨道确定基础 .....</b>	<b>47</b>
3.1	观测方程及线性化 .....	50
3.2	状态方程及线性化 .....	51
3.3	系统状态转移矩阵变分方程 .....	51
3.4	系统状态转移矩阵求解 .....	53
3.4.1	数值积分法 .....	53
3.4.2	矩阵指数函数 .....	54
3.4.3	幂级数近似法 .....	54
3.4.4	数值差分法 .....	54
3.4.5	差分积分混合法 .....	55
3.5	微分修正条件方程 .....	57
3.6	最小二乘解 .....	59
3.6.1	超定方程正规化 .....	60
3.6.2	超定方程顺序法化 .....	60
3.6.3	超定方程奇异值分解 .....	61
3.7	加权最小二乘解 .....	62
<b>第4章</b>	<b>动力学系统估计理论与方法 .....</b>	<b>71</b>
4.1	贯序估计理论 .....	71
4.2	线性递推卡尔曼滤波 .....	74
4.3	扩展卡尔曼滤波 .....	75
4.3.1	卡尔曼滤波算法的缺陷 .....	77
4.3.2	卡尔曼滤波算法核心的再认识 .....	80
4.3.3	模型噪声和观测噪声 .....	81
4.3.4	算法应用与要点 .....	82
4.4	无味卡尔曼滤波 .....	83
4.4.1	随机变量均值和方差传播 .....	84
4.4.2	随机过程无味变换 .....	88
4.4.3	基于无味变换的卡尔曼滤波 .....	93
4.5	精度与实时性 .....	99
<b>第5章</b>	<b>卫星轨道机动运动动力学模型 .....</b>	<b>101</b>
5.1	中心天体引力 .....	102

5.2	摄动运动动力学模型 .....	102
5.2.1	地球非球形摄动 .....	102
5.2.2	三体引力摄动 .....	110
5.2.3	太阳光压摄动 .....	111
5.2.4	气动阻力摄动 .....	111
5.3	轨道机动控制动力学模型 .....	113
5.3.1	高斯马尔科夫随机过程加速度模型 .....	113
5.3.2	轨道机动推力加速度模型 .....	113
5.3.3	轨道机动速度增量模型 .....	115
5.3.4	轨道机动连续推力 $\alpha$ - $\beta$ 模型 .....	116
5.3.5	轨道机动推力加速度方向 .....	118
<b>第 6 章</b>	<b>初始轨道确定 .....</b>	<b>121</b>
6.1	卫星初轨多项式拟合算法 .....	121
6.2	初始轨道确定最小二乘法 .....	123
6.2.1	系统状态模型 .....	124
6.2.2	系统观测模型 .....	125
6.2.3	观测矩阵 .....	126
6.2.4	状态传递矩阵 .....	126
6.2.5	残差统计与方差控制 .....	128
6.2.6	动态权系数矩阵 .....	129
6.2.7	算法的实现步骤和过程 .....	130
6.3	初始轨道确定扩展卡尔曼滤波 .....	131
6.3.1	系统状态方程 .....	131
6.3.2	系统观测方程 .....	132
6.3.3	两种测量体制下的融合滤波算法 .....	133
6.4	初始轨道确定 Laplace 方法 .....	134
6.4.1	地面测量方程 .....	135
6.4.2	GPS 测量观测方程 .....	138
6.4.3	条件方程最小二乘算法 .....	140
<b>第 7 章</b>	<b>卫星机动轨道跟踪与机动检测 .....</b>	<b>142</b>
7.1	轨道机动推力参数辨识 .....	142
7.1.1	轨道机动推力模型辨识 .....	143



7.1.2	推力方向矢量在东南固连坐标系的度量 .....	146
7.1.3	推力方向矢量在瞬时轨道坐标系的度量 .....	149
7.1.4	仿真实例 .....	151
7.2	轨道机动过程加速度辨识 .....	153
7.2.1	加速度辨识动力学模型 .....	154
7.2.2	加速度辨识滤波算法 .....	155
7.2.3	加速度变分运动方程 .....	156
7.2.4	仿真实例 .....	157
<b>第 8 章 动力学补偿机动轨道确定 .....</b>		<b>160</b>
8.1	Markov 过程动力学补偿方法 .....	160
8.1.1	Markov 过程矢量增广系统动力学模型 .....	160
8.1.2	卡尔曼滤波实时轨道确定算法 .....	163
8.1.3	初始状态与协方差矩阵 .....	164
8.1.4	测站原点在地心惯性系的运动状态 .....	165
8.1.5	状态矩阵和观测矩阵 .....	166
8.1.6	应用实例 .....	171
8.2	推力加速度补偿动力学模型轨道确定 .....	175
8.2.1	系统状态动力学模型 .....	175
8.2.2	推力加速度和轨道参数的联合估计算法 .....	177
8.2.3	系统状态矩阵 .....	178
8.2.4	观测矩阵 .....	183
8.2.5	仿真实例 .....	183
<b>附录 A 向量微分与雅可比变换 .....</b>		<b>187</b>
<b>附录 B 随机变量及随机过程 .....</b>		<b>189</b>
<b>附录 C Cholesky 分解 .....</b>		<b>191</b>
<b>参考文献 .....</b>		<b>192</b>



# Contents

<b>Chapter 1 Introduction</b> .....	1
1.1 Maneuvering Satellite Orbit Determination .....	1
1.2 Satellite Precision Orbit Determination .....	1
1.3 Maneuvering Satellite Positioning .....	2
1.4 The Outline of The Book .....	4
<b>Chapter 2 Satellite's Motion and Time System</b> .....	5
2.1 The Earth's Motion .....	5
2.1.1 The Pole Motion of The Earth .....	5
2.1.2 The Precessional Motion of The Earth .....	6
2.1.3 The Nutation Motion of The Earth .....	8
2.2 Time System .....	13
2.2.1 Vernal Equinox and Meridian Plane .....	13
2.2.2 Mean Solar Day and Mean Sidereal Day .....	14
2.2.3 Calendar and Julian Days .....	17
2.2.4 Solar Time and Sidereal Time .....	18
2.2.5 Universal Time and Coordinated Universal Time .....	22
2.2.6 International Atomic Time and Ephemeris Time .....	22
2.2.7 Mutual Relations of Time System .....	23
2.3 Space Reference System .....	24
2.3.1 Earth Centered Reference Frame .....	24
2.3.2 Local Tangential Reference Frame .....	31
2.3.3 Satellite Fixed Reference Frame .....	34
2.3.4 Satellite Body Reference Frame .....	36
2.4 Satellite Motion Basis .....	41
2.4.1 Kepler Orbit .....	41
2.4.2 Kepler Equation Solution for Elliptical Orbit .....	44

2.4.3	Kepler Equation Solution for Hyperbolic Orbit .....	44
<b>Chapter 3</b>	<b>The Foundations of Orbit Determination .....</b>	<b>47</b>
3.1	Dynamics System Measurements-Equations and Linearisation .....	50
3.2	Dynamics System States-Equations and Linearisation .....	51
3.3	Dynamics System State Transfer Matrix and Variational Equations .....	51
3.4	Solving System State Transfer Matrix .....	53
3.4.1	Numerical Integration .....	53
3.4.2	Matrix Exponential Form .....	54
3.4.3	Approximate Treatment with Power Series .....	54
3.4.4	Numerical Differencing Method .....	54
3.4.5	Hybrid Method .....	55
3.5	The Conditional Equations for Difference Correction .....	57
3.6	The Solution With The Least Squares Method (LSM) .....	59
3.6.1	Normalization Matrix .....	60
3.6.2	Sequential Normalization .....	60
3.6.3	Single Value Decomposition (SVD) .....	61
3.7	The Solution With The Weighted Least Squares Method (WLSM) .....	62
<b>Chapter 4</b>	<b>The Methods and Techniques for</b>	
	<b>Dynamics Estimation .....</b>	<b>71</b>
4.1	The Methods for Sequential Estimation .....	71
4.2	Linearised Sequential Kalman Filter .....	74
4.3	Extended Kalman Filter (EKF) .....	75
4.3.1	The Defect of Kalman Filter .....	77
4.3.2	Reinvestigation for Kalman Filter .....	80
4.3.3	Model Noise and Measurement Noise .....	81
4.3.4	Applications and Techniques .....	82
4.4	Unscented Kalman Filter (UKF) .....	83
4.4.1	Statistical Analysis for Random Variables .....	84
4.4.2	Unscented Transformation for Random Process .....	88
4.4.3	Unscented Transformation Based Filter .....	93
4.5	The Trade off of Accuracy and Real-Time .....	99
<b>Chapter 5</b>	<b>The Dynamics Model for Maneuvering Satellite .....</b>	<b>101</b>
5.1	The Celestial Centered Gravitation Force .....	102

5.2	The Perturbations Model .....	102
5.2.1	The None-Spherical Perturbation .....	102
5.2.2	The Third Body Perturbation .....	110
5.2.3	The Solar Radiation Perturbation .....	111
5.2.4	The Air Drag Perturbation .....	111
5.3	The Maneuvering Force Model .....	113
5.3.1	Markov Process Acceleration Model .....	113
5.3.2	Maneuvering Force Acceleration Model .....	113
5.3.3	Maneuvering Velocity Increments Model .....	115
5.3.4	Maneuvering Force $\alpha$ - $\beta$ Model .....	116
5.3.5	Maneuvering Force Direction Model .....	118
<b>Chapter 6</b>	<b>Primary Orbit Determination .....</b>	<b>121</b>
6.1	Polynomial Regression .....	121
6.2	The Least Square Method (LSM) for Primary Orbit Determination .....	123
6.2.1	System Dynamics State Model .....	124
6.2.2	System Measurement Model .....	125
6.2.3	Measurement Matrix .....	126
6.2.4	State Transfer Matrix .....	126
6.2.5	Residual Statistics and Variance Test .....	128
6.2.6	Dynamic Weight Matrix .....	129
6.2.7	Implementation Techniques and Process .....	130
6.3	The Extended Kalman Filter for Primary Orbit Determination .....	131
6.3.1	System Dynamics State Model .....	131
6.3.2	System Measurement Model .....	132
6.3.3	Fusion Filter Techniques .....	133
6.4	The Perturbation Laplace Methods for Primary Orbit Determination .....	134
6.4.1	Modified Laplace Measurement Equations .....	135
6.4.2	Modified Laplace Based GPS Measurement Equations .....	138
6.4.3	The Least Square Solution for Laplace Equations .....	140
<b>Chapter 7</b>	<b>Orbital Tracking and Maneuver Detection .....</b>	<b>142</b>
7.1	Maneuvering Thrust Identification Model .....	142
7.1.1	Identification Model for Maneuvering Satellite .....	143