

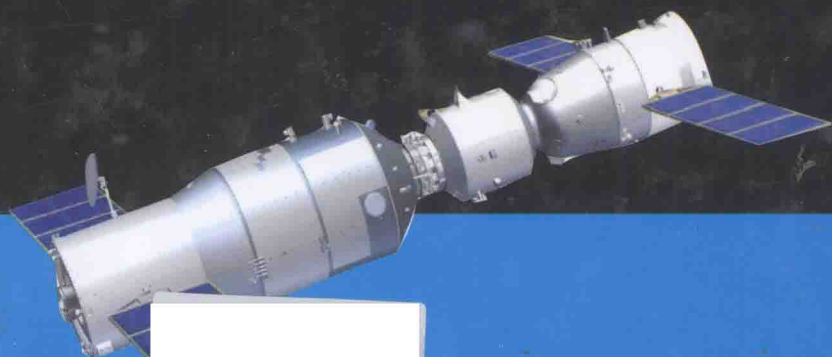


航天飞行动力学技术丛书

载人航天轨道确定技术 及在交会对接中的应用

ORBIT DETERMINATION TECHNOLOGY
OF MANNED SPACECRAFT AND
APPLICATION IN RENDEZVOUS AND DOCKING

唐歌实 李 颢 著

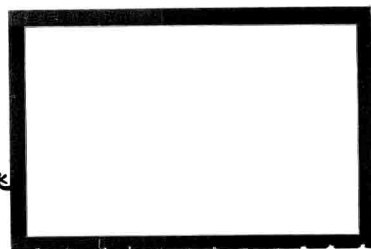


国防工业出版社
National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

航天飞



载人航天轨道确定技术 及在交会对接中的应用

Orbit Determination Technology of Manned Spacecraft and
Application in Rendezvous and Docking

唐歌实 李 颢 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

载人航天轨道确定技术及在交会对接中的应用 / 唐
歌实, 李颢著. —北京: 国防工业出版社, 2013. 1

(航天飞行动力学技术丛书)

ISBN 978 - 7 - 118 - 08572 - 3

I. ①载... II. ①唐...②李... III. ①载人航天器 -
航天器轨道 - 测量 - 研究 IV. ①V556.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 016094 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 710×960 1/16 印张 14¼ 字数 222 千字

2013 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 66.00 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

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 第七届评审委员会组成人员

主任委员 王 峰

副主任委员 吴有生 蔡 镭 杨崇新

秘 书 长 杨崇新

副 秘 书 长 邢海鹰 贺 明

委 员 才鸿年 马伟明 王小谟 王群书
(按姓氏笔画排序)

甘茂治 甘晓华 卢秉恒 巩水利

刘泽金 孙秀冬 陆 军 芮筱亭

李言荣 李德仁 李德毅 杨 伟

肖志力 吴宏鑫 张文栋 张信威

陈良惠 房建成 赵万生 赵凤起

郭云飞 唐志共 陶西平 韩祖南

傅惠民 魏炳波

序

1961 年，苏联的尤里·加加林少校乘坐“东方”一号飞船完成了绕地球 108 分钟的飞行，首次在太空留下了人类的足迹，这是人类历史上第一次成功的载人航天活动。载人航天集中体现了现代科学技术多个领域的成就，同时也促进了科学技术的整体进步。发展载人航天不仅能体现一个国家的综合国力，同时也能增强民族自豪感和凝聚力。

在载人航天飞行控制任务过程中，航天器的轨道确定和预报是最重要的核心技术之一。飞行控制人员需要通过轨道确定和预报来决定如何对飞船进行轨道控制，如何安排飞船、航天员以及测控网的协同工作计划，甚至还要安排飞船及时有效地规避空间碎片的碰撞风险。而载人飞船往往运行在近地轨道上（约 300km ~ 400km 高度），受不断变化的高层大气的影响，再加上较为复杂的结构和飞行姿态，使得轨道确定和预报又是飞行控制过程中的一项难点技术。

我国自 1999 年成功发射“神舟”一号载人飞船开始，至今已经进行了 9 次太空旅行，先后搭载 8 名航天员进入太空，取得了举世瞩目的成就，载人飞船轨道确定技术也随之取得了长足发展。2011 年底发射的“神舟”八号飞船实现了与“天宫”一号目标飞行器的交会对接。该任务同时关注两个航天器的轨道运动，且两航天器的轨道还相互约束，同时太阳活动又开始处于活跃的时期。因此该任务面临诸多新的技术特点，比如在空间天气剧烈变化情况下的中长期轨道预报、不同飞行姿态和不同外形结构情况下的大气阻尼力计算、频繁实施轨道控制情况下只能利用短弧段测轨数据定轨等。这些新特点给轨道确定及预报技术提出了更高的要求，也带来了新的挑战。

本书的作者是北京航天飞行控制中心科技工作者，他们组织和参加了载

人航天飞行控制中心的轨道计算系统研制及历次载人航天任务，在载人航天轨道确定技术方面有较深的理论功底和丰富的实践经验。作者从航天器轨道确定技术的理论体系出发，同时紧密结合我国载人航天工程实践，对载人飞船的轨道确定技术及其在交会对接任务中的具体应用进行了深入细致的分析和阐述，并提出了一些新方法新思路，本书具有较高的学术价值和工程指导意义。

A handwritten signature in black ink, consisting of three characters: '李' (Li), '济' (Ji), and '生' (Sheng), written in a cursive style.

2012 年 10 月 16 日

前 言

载人航天轨道确定技术是载人航天工程的一项关键技术，航天器轨道的计算精度直接影响着任务执行的进程；特别是在交会对接任务中，定轨及预报的精度直接关系到任务的实施进程与效果，甚至决定任务的成败，是保障交会对接任务成功实施的关键技术之一，因而受到业内学者的广泛关注。我国的载人航天二期工程已经拉开序幕，首次交会对接任务取得圆满成功，载人交会对接、载人航天空间站建设将逐步实施，迫切需要一本详细介绍载人航天轨道确定背景知识、理论技术与工程应用的读物，既全面阐述载人航天轨道确定技术的基本理论，又深入分析载人航天轨道确定的主要技术瓶颈及解决方法，同时系统研究相关技术在交会对接任务中的应用，并且总结探讨相关技术在后续载人航天工程中的发展趋势，以满足广大初学者与专业技术人员对载人航天轨道确定知识的需求。

本书的撰写出版，旨在对载人航天测定轨领域进行有益探索与尝试。全书针对载人航天的轨道特点，从理论和实践上对载人航天的轨道确定技术问题及其在交会对接任务中的具体应用问题进行了细致的研究与探讨，提出了一些适合在交会对接任务中应用的新方法，将给后续载人航天任务提供技术支持，是一本在航天测控领域具有重要参考价值的技术专著。

本书前2章分别介绍和阐述了载人航天轨道确定技术的研究背景及基本理论，包括时空参考框架、动力学模型和估值技术。并提出了航天器轨道测定技术体系的概念，就轨道确定技术进行了展望。第3章~第7章为本书的核心内容，涉及轨道测量数据误差分析与修正、数值积分、实测大气密度在航天器定轨中的应用研究、载人飞船碰撞预警与规避等轨道确定技术的主要方面，以及相关技术在交会对接任务中的应用，通过系统分析提高轨道预报精度的方法，深入研究适用于交会对接任务的技术和方法。

本书由著者带领的团队共同完成，团队成员均来自航天飞行动力学技术重点实验室，其中周率、李翠兰、王健、张宇参与了部分内容的撰写。在著作分析研究中，有关工程实践的工作都是由北京航天飞行控制中心航天飞行动力学技术重点实验室的同事们共同完成的。在本书撰写的过程中，胡松杰、陈明、曹建峰、刘舒蔚和段建锋曾多次参加讨论，并提供了部分资料。同时，业内同行在数据、方法、技术等方面对本著作相关的课题研究、方案设计以及系统开发给予了无私的帮助。在北京航天飞行控制中心的大力支持下整个著作的撰写与出版才得以完成，在此一并表示诚挚的谢意。

本书内容涉及多门学科前沿知识，由于笔者时间、水平和实践经验所限，难免存在不妥和错误，恳请广大同行、读者批评指正。最后感谢在本书的撰写、评审和出版过程中所有给予关心、支持和帮助的人们！

作者

2012年10月16日

目 录

第1章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 轨道确定技术发展现状	2
1.2.1 精密定轨技术	2
1.2.2 精密定轨策略	3
1.2.3 动力学模型精化技术	5
1.2.4 姿轨控推力的处理问题	6
1.2.5 航天器轨道确定技术在航天测控中的应用现状	6
1.2.6 我国在相关技术领域的差距	6
1.3 轨道确定技术展望	8
1.3.1 航天器轨道测定技术体系	8
1.3.2 航天器轨道测定技术发展建议	9
参考文献	10
第2章 轨道确定基本理论	13
2.1 时空参考框架	13
2.1.1 时间尺度	13
2.1.2 参考框架	17
2.2 动力学模型	34
2.2.1 引言	34
2.2.2 摄动量级分析	35
2.2.3 动力学模型	37
2.3 估值技术	54
2.3.1 最小二乘估计	54

2.3.2 批处理算法	58
2.3.3 滤波算法	60
参考文献	63
第3章 轨道测量数据误差分析与修正	64
3.1 跟踪测量系统	64
3.1.1 统一S波段测控系统	64
3.1.2 跟踪与数据中继卫星系统	72
3.2 测量数据误差分析	74
3.2.1 随机误差	74
3.2.2 系统误差	75
参考文献	81
第4章 航天器轨道数值积分	82
4.1 基本概念	83
4.1.1 常微分方程初值问题	83
4.1.2 初值问题数值解的基本概念	83
4.1.3 一个最简单初值问题的求解方法	84
4.2 常用单步法	86
4.2.1 龙格-库塔方法	86
4.2.2 单步法变步长及误差控制	90
4.3 线性多步法	91
4.3.1 阿达姆斯-考威尔方法	91
4.3.2 高斯-杰克逊方法	101
4.3.3 Krogh-Shampine-Gordon 方法	106
4.3.4 时间正则化方法	108
4.4 航天器运动方程数值解法	110
4.4.1 航天器运动方程及变分方程的求解	110
4.4.2 数值试验	113
参考文献	120

第5章 实测大气密度定轨预报应用分析	121
5.1 大气密度模式精度分析	121
5.1.1 大气密度模式	121
5.1.2 模式精度分析	126
5.1.3 模式误差的时空分布特性	130
5.2 基于实测大气密度的定轨预报精度分析	133
5.2.1 载人飞船定轨预报精度分析	134
5.2.2 其他卫星定轨预报精度分析	136
5.3 基于实测大气密度的模式修正方法及应用	137
5.3.1 大气密度模式误差修正方法	137
5.3.2 大气密度修正模式在定轨预报中的应用	143
参考文献	151
第6章 载人飞船碰撞预警与规避	152
6.1 空间目标轨道数据	152
6.2 轨道预报精度分析	154
6.2.1 TLE 初值精度	155
6.2.2 TLE 轨道预报精度	156
6.2.3 轨道预报误差模型	158
6.3 碰撞预警	160
6.3.1 初步筛选	160
6.3.2 BOX 方法	164
6.3.3 碰撞概率计算	165
6.4 碰撞规避策略	169
6.4.1 碰撞规避策略计算方法	169
6.4.2 算例分析	170
6.5 碰撞规避实施方案	171
6.5.1 自主飞行期间的碰撞规避实施方案	171
6.5.2 变轨期间的碰撞规避实施方案	172
参考文献	174

第 7 章 交会对接定轨预报特点分析	176
7.1 航天器空间交会对接	176
7.1.1 交会对接概念	176
7.1.2 我国首次自动交会对接	176
7.2 航天器中长期轨道预报	177
7.2.1 中长期轨道预报中空间环境参数应用方式	178
7.2.2 偏航姿态飞行模式对中长期轨道预报的影响	185
7.3 频繁轨控条件下的轨道确定	188
7.3.1 空间环境参数辨识	188
7.3.2 考虑轨控过程的轨道确定	191
7.3.3 基于轨道确定的轨控效果标定	192
7.4 基于轨道衰减的大气密度模式响应分析	193
参考文献	197
附录 A IAU2009 天文常数系统	198
附录 B 关于章动模型的讨论	200
附录 C 勒让德多项式递推算法	203

Contents

Character 1	Introduction	1
1.1	Summary	1
1.2	Status of the Orbit Determination	2
1.2.1	Precision Orbit Determination Technique	2
1.2.2	Strategy of Precise Orbit Determination	3
1.2.3	Precision Modeling Technique	5
1.2.4	Attitude and Orbit Maneuver Problem	6
1.2.5	Applying Status of Orbit Determination Technique in TT&C	6
1.2.6	Technique Actuality of Related Fields in China	6
1.3	Technical Prospect of Orbit Determination	8
1.3.1	Technical System of Spacecraft's Orbit Tracking and Determination	8
1.3.2	Developing Advice of Spacecraft's Orbit Tracking and Determination	9
	References	10
Character 2	Basic Theory of Orbit Determination	13
2.1	Time and Coordinates System	13
2.1.1	Time Scales	13
2.1.2	Reference Frame	17
2.2	Force Models	34
2.2.1	Introduction	34

2. 2. 2	Perterbation Analysis	35
2. 2. 3	Dynamical Force Models	37
2. 3	Estimation techniques	54
2. 3. 1	Least Squares Estimation	54
2. 3. 2	Batch Estimation Algorithm	58
2. 3. 3	Filtering Algorithm	60
References		63
Character 3	Analysis and Corrections of Tracking Data	64
3. 1	Tracking System	64
3. 1. 1	USB Tracking System	64
3. 1. 2	TDRSS Tracking System	72
3. 2	Error Analysis of Tracking Data	74
3. 2. 1	Random Error	74
3. 2. 2	Systematic Error	75
References		81
Character 4	Numerical Orbit Integration	82
4. 1	Fundamental Concepts	83
4. 1. 1	Initial Value Problem of Ordinary Differential Equation	83
4. 1. 2	Basic Concepts of Numerical Solution of Initial Value Problem	83
4. 1. 3	A Simple Method of Initial Value Problem	84
4. 2	Single Step Methods	86
4. 2. 1	Runge-Kutta Methods	86
4. 2. 2	Variable Stepsize and Error Control	90
4. 3	Lineral MultiStep Methods	91
4. 3. 1	Adams-Cowell Methods	91
4. 3. 2	Gauss-Jackson Methods	101
4. 3. 3	KSG Methods	106

4. 3. 4	Time Normalization Methods	108
4. 4	Numerical Solution Method of Spacecraft's Motion Equation	110
4. 4. 1	Numerical Solution of Motion Equations and Variational Equations	110
4. 4. 2	Nmuerical Examples	113
References		120
 Character 5 Application of Observed Atmospheric Density in Orbit		
	Determination and Prediction	121
5. 1	Accuracy of Atmospheric Density Models	121
5. 1. 1	Atmospheric Density Models	121
5. 1. 2	Accuracy Analysis of Atmospheric Density Models	126
5. 1. 3	The Temporal-Space Distribution of Models' Error	130
5. 2	Orbit Determination and Prediction Accuracy Based on Observed Density	133
5. 2. 1	Accuracy Ananlysis of Manned Spacecraft	134
5. 2. 2	Accuracy Ananlysis of Other Satellite	136
5. 3	Methods and Applications of Models' Correction Based on Observed Density	137
5. 3. 1	Methods of Atmospheric Density Models Error Correction	137
5. 3. 2	Application of Revised Atmospheric Density Model	143
References		151
 Character 6 Collistion Warning and Avoidance of Manned Spacecraft		
		152
6. 1	Orbit Data of Space Objects	152
6. 2	Precision Analysis of Orbit Prediction	154
6. 2. 1	Initial Value Precision of TLE	155
6. 2. 2	TLE Orbit Prediction Precision	156
6. 2. 3	Error Models of Orbit Prediction	158