

载人飞船轨道确定 和返回控制

Orbit Determination and Reentry Control
for Manned Spacecraft

汤锡生 陈贻迎 朱民才 著



国防工业出版社

V476
1005

V476
1005-1

载人飞船轨道确定和返回控制

Orbit Determination and Reentry

Control for Manned Spacecraft

汤锡生 陈贻迎 朱民才 著



200301943

国防工业出版社

·北京·

200301943

图书在版编目(CIP)数据

载人飞船轨道确定和返回控制/汤锡生等著. —北京:
国防工业出版社, 2002.9

ISBN 7-118-02875-4

I. 载... II. 汤... III. ①载人航天器—航天器轨道—轨道计算②载人航天器—航天器回收—控制系统
IV. V476.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 039707 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)

北京奥隆印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 19% 502 千字

2002 年 9 月第 1 版 2002 年 9 月北京第 1 次印刷

印数:1—2500 册 定价:37.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

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 殷鹤龄

副主任委员 王 峰 张涵信 张又栋

秘 书 长 张又栋

副 秘 书 长 崔士义 蔡 镭

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 彭华良 韩祖南 舒长胜

序

载人航天是我国航天技术发展的必然结果,也是我国航天史上的崭新篇章。载人航天工程是庞大的高技术系统工程,它由航天员、空间应用、载人飞船、运载火箭、发射场、测控通信和返回着陆场组成。其中由陆海基测控网组成的测控通信系统是保持天地之间牢固联系的不可或缺的重要系统。载人飞船的轨道确定、飞行与返回控制应用软件系统是地面测控网指挥控制中心的基本建设,是载人航天活动中地面保障的中心内容。

应载人航天工程需要建设的北京航天指挥控制中心,汇集了我国航天测控领域的众多专家和技术骨干力量。《载人飞船轨道确定和返回控制》一书的作者,既是制定载人航天测控技术方案的骨干成员,也是我国第一、二艘无人试验飞船测量和控制的参加者。本书反映了他们在长期航天测控活动中许多创新的技术理论和工作成果。在载人飞船的测控中,定轨精度达到百米量级,是我国测控领域实时定轨技术的一个重大突破,基于我国的局部测控网,取得这样的成绩,在世界航天史上也是罕见的。在返回控制领域,首次进行升力—弹道式返回模式的测控,使我国航天器返回控制技术上了一个新台阶。

这部书的出版,是我国载人航天工程的一项重要成果。该书内容丰富、理论结合实际,具有很强的实用性和较高的学术水平。在工程技术理论方面,它是一部有创见的应用科学著作。该书为载人航天工程和航天测控领域的科技人员和管理人员提供了很有

价值的参考资料,对航天测控领域的科学研究和工程应用有很好的借鉴和促进作用。

目 录

王永志

2001年6月

前 言

我国的航天测控工作者为航天事业的发展作出了重大贡献。但长期以来,还缺少全面地反映我国航天测控软件工作的理论总结。本书出版的初衷就是在航天测控中心的轨道确定与控制计算专业理论方面填补这一空缺。

本书以我国载人航天工程为背景,系统地叙述了航天测控中心的轨道确定与控制计算的专业理论与具体实现方法。全书共分19章。其中第一章为绪论;第二至第十章叙述轨道确定的理论与方法,包括了很多近年来为提高轨道确定的精度所采取的有效措施与成功经验;第十一章论述测控中心常用的各种轨道预报的计算方法;第十二至第十五章为测控中心控制计算的专业理论;从第十六至第十九章按上升段、运行段、返回段分别叙述测控中心对于航天器的控制计算的具体内容与计算方法。本书第一章至第十章以及附录部分,由汤锡生研究员撰写;第十一章和第十八章,由朱民才研究员撰写;第十二章至第十七章以及第十九章,由卫星测控资深专家陈贻迎撰写。

我们特别感谢作者所在单位——北京航天指挥控制中心的全力支持;感谢本单位轨道研究室唐歌实、胡松杰、陈力、李亚晶、第五亚洲、曹雪勇、李革非、孙晶明等诸多同事的支持,本书从他们的出色工作总结和优秀论文汲取了许多宝贵营养。正是他们为载人航天事业所开发的大量的应用软件的技术实践,丰富了本书的全部内容。也由于该集体的杰出奉献,确保了载人航天工程的轨道保障软件系统的建立,这是本书作为载人航天工程专著的真实背景。另外,需要说明的是本书第七章的内容是汤锡生研究员早年在美国做高级访问学者时完成的研究课题,因此感谢 CSR/UT,B.

D. Tapley 教授和现在美国 U. Ohio State, C. K. Shum 教授的协作和支持。还要感谢林秀权编审为本书的统稿工作所付出的辛勤劳动。

本书内容紧密结合工程技术专业,因此省却了众多基本知识的铺陈,但是对于专业知识都有独到的深入和详细的推导。本书面向有关专业人士的技术交流,也可以供相关专业的高等院校在读研究生阅读和参考。由于作者技术理论和学术水平所限,不足之处难免,希望同行不吝示教。

2002 年 2 月 北京

著 者

目 录

第一章 绪论	1
第二章 时间和坐标系统	8
2.1 时间系统	8
2.2 时间系统的转换	11
2.3 坐标系统	14
2.4 时间系统的转换精度分析	24
第三章 摄动模型和变分方程	32
3.1 总的摄动加速度和变分方程	32
3.2 地球引力场摄动	34
3.3 日月摄动	45
3.4 大气阻尼摄动	47
3.5 光压摄动	53
3.6 潮汐摄动	57
第四章 量测方程和轨道估计	59
4.1 量测方程	59
4.2 轨道估计理论	68
4.3 加权最小二乘法	71
4.4 微分轨道改进	73
4.5 成批估计算法	75
4.6 状态协方差矩阵的时间传播	77
第五章 数值法改进算法	80
5.1 考威尔特别摄动法	80
5.2 Adams—Cowell 多步法公式	81
5.3 KSG 积分公式	92

5.4	载人飞船轨道积分器精度分析	106
5.5	轨道改进中积分算法	110
5.6	数值法轨道改进计算速度提高的途径	118
第六章	解析法轨道改进	122
6.1	问题的提出	122
6.2	实用坐标系和时间系统	124
6.3	星历表计算	126
6.4	摄动计算	130
6.5	轨道确定	176
6.6	误差方程及偏导数	183
第七章	大气模式和大气阻尼	192
7.1	J77 大气模式的修订和应用	192
7.2	MSIS 大气模式的应用	207
7.3	大气模式误差的补偿方法	215
7.4	C_D 吸收 K_p 误差的探讨	224
7.5	大气阻尼自由分子流学说	233
第八章	数据处理	237
8.1	数据处理的目的	237
8.2	USB 测量系统的测量原理	240
8.3	数据处理的基本方法	244
8.4	误差处理的次序问题	273
第九章	初始轨道确定和入轨判断	279
9.1	初始轨道	279
9.2	简易初轨计算	282
9.3	冗余信息初轨	289
9.4	轨道根数选优方法	302
9.5	飞船入轨判断	308
第十章	轨道确定精度的检验	309
10.1	轨道确定精度的定义	309
10.2	精度检验的方法	311

10.3	卫星摄影定位和反算	313
10.4	不同方法在精度上的统计检验	316
10.5	飞船入轨周期鉴定方法	323
10.6	轨道周期变率的计算	329
第十一章	轨道预报	333
11.1	星历预报	333
11.2	特征点时刻预报	336
11.3	阴影预报	338
11.4	测站观测预报	348
11.5	可返回圈预报	360
11.6	寿命预报	363
11.7	轨道预报计算过程	365
第十二章	矢阵及坐标系转换计算	367
12.1	矢阵的定义及其运算	367
12.2	矢阵在坐标系转换计算中的应用	371
12.3	位置参数的转换	376
12.4	速度参数的转换	380
12.5	加速度参数的转换	384
第十三章	航天器姿态及其确定方法	387
13.1	描述航天器姿态的几个坐标系的定义	387
13.2	航天器姿态角的定义及姿态矩阵	389
13.3	自旋稳定卫星姿态的确定	392
13.4	三轴稳定航天器姿态的确定	395
13.5	确定航天器姿态的特征矢量法	397
第十四章	姿态运动方程与动力学方程	401
14.1	姿态运动方程	401
14.2	坐标系旋转的轴角表示	405
14.3	用欧拉参数表示坐标系的旋转	407
14.4	用欧拉角表示坐标系的旋转	409
14.5	旋转角速度与姿态矩阵	411

14.6	用轴角参数表示的姿态运动方程	411
14.7	用欧拉参数表示的姿态运动方程	412
14.8	用欧拉角表示的姿态运动方程	414
14.9	张量的矢阵表示方法	417
14.10	刚体姿态动力学方程	419
第十五章	四元数及其应用	422
15.1	四元数的定义及其运算	422
15.2	四元数与坐标系转换的关系	426
15.3	四元数与欧拉角的关系	431
15.4	用四元数表示的姿态运动方程	433
15.5	扩展矢阵与四元数	437
第十六章	航天器上升段运动及监视计算	442
16.1	上升段的运动方程	442
16.2	航天器在上升段的导航计算	449
16.3	内测弹道计算及内测定初轨	452
16.4	外测弹道监视	455
16.5	入轨姿态计算	459
第十七章	航天器运行段运动及监控计算	461
17.1	运行段的轨道方程	461
17.2	运行段姿态运动方程	466
17.3	航天器在运行段的导航计算	469
17.4	运行段星下点监视计算	472
17.5	运行段姿态监视计算	474
17.6	载人飞船的卡尔曼滤波定姿	479
第十八章	轨道控制	484
18.1	基本原则和约束条件	484
18.2	飞船轨道控制策略	487
18.3	轨道舱轨道控制策略	497
18.4	轨控动力学方程	501
18.5	轨道控制参数计算	504

18.6	轨道控制结果标定	508
第十九章	航天器返回段运动及监控计算	513
19.1	返回段的质心运动方程	513
19.2	返回段的姿态运动方程	520
19.3	载人飞船按配平攻角飞行的运动方程	524
19.4	载人飞船在返回段的捷联导航计算	528
19.5	载人飞船在再入段的制导计算	533
19.6	载人飞船在回收着陆段的弹道计算	537
19.7	载人飞船在返回段的弹道监视计算	540
19.8	返回式航天器的落点预报	544
19.9	载人飞船返回控制参数的计算	547
附录 A	A.1 二体问题坐标量和偏导数的通用封闭解	554
	A.2 偏导数转换矩阵的基本公式	561
附录 B	JPL 行星星历表	568
附录 C	国际地球自转服务和地球方位参数	579
附录 D	USAF/NOAA 太阳和地磁活动报告	582
附录 E	地磁指数 K_p 和 A_p 的转换关系	584
附录 F	地球引力场系数	585
参考文献		594

Contents

Chapter 1	Introduction	1
Chapter 2	Time and Coordinate System	8
2.1	Time System	8
2.2	Conversion of Time	11
2.3	System of Coordinates	14
2.4	Accuracy Analysis of Conversion of Time	24
Chapter 3	Perturbation Model and Variation Equations	32
3.1	Perturbation Forces and Variation Equations	32
3.2	Geopotential Field	34
3.3	Lunisolar Perturbation	45
3.4	Atmospheric Drag	47
3.5	Solar Radiation Pressure	53
3.6	Tides	57
Chapter 4	Measurement Equation and Batch Estimation	59
4.1	Measurement Equation	59
4.2	Theory of Batch Estimation	68
4.3	Weighted Least-Squares Method	71
4.4	Orbital Differential Correction	73
4.5	Batch Estimation Algorithm	75
4.6	Propagation of State Covariance Matrix	77
Chapter 5	Numerical Orbit Improvement	80
5.1	Cowell Special Perturbation Method	80
5.2	Adams-Cowell Multi-step Integral Method	81
5.3	KSG Integral Formula	92

5.4	Accuracy Analysis of Integrator for Manned Spacecraft Orbit	106
5.5	Algorithm of Integral in Orbit Improvement	110
5.6	Way of Reducing Computing Time in Numerical Orbit Improvement	118
Chapter 6	Analytic Orbit Improvement	122
6.1	Introduction to Analytic Orbit Improvement	122
6.2	Practical Coordinate and Time System	124
6.3	Ephemeris Generation	126
6.4	Perturbation Calculation	130
6.5	Orbit Determination	176
6.6	Variation Equation and Partial Derivative	183
Chapter 7	Atmospheric Model and Drag	192
7.1	The Revision of J77 Atmospheric Model	192
7.2	Application of MSISE Atmospheric Model	207
7.3	Discussion of C_D Absorbing K_p Error	215
7.4	Theory on Free Molecular Flow of Drag	224
7.5	Theory of free Molecular Flow for Atmospheric Drag	233
Chapter 8	Data Processing	237
8.1	The Purpose of Data Processing	237
8.2	The Measurement Principle of USB System	240
8.3	The Basic Method of Data Processing	244
8.4	The Problem of Error's Sequence on Data Processing	273
Chapter 9	Initial Orbit Determination and Injection Judge	279
9.1	General for Early Orbit Determination	279
9.2	Initial Orbit Determination for Manned Spacecraft	282