

航天器轨道理论

Orbit Theory of Spacecraft

刘林 著



国防工业出版社

V412.4

1011



航天器轨道理论

Orbit Theory of Spacecraft

刘 林 著



200113323

国防工业出版社

·北京·

200113323

图书在版编目(CIP)数据

航天器轨道理论/刘林著. —北京:国防工业出版社,
2000.6

ISBN 7-118-02201-2

I. 航… II. 刘… III. 航天器轨道-理论
IV. V412.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 50690 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)

三河市腾飞胶印厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 20 $\frac{1}{2}$ 522 千字
2000 年 6 月第 1 版 2000 年 6 月北京第 1 次印刷
印数:1—1500 册 定价:35.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

020:11002

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,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. 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,对国防科技发展具有较大推动作用的专著;密切结合科技现代化和国防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,密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。

4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作,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

IV

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,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工业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 第三届评审委员会组成人员

名誉主任委员	怀国模			
主任委员	黄宁			
副主任委员	殷鹤龄	高景德	陈芳允	曾铎
秘书长	崔士义			
委员	于景元	王小谟	尤子平	冯允成
(以姓氏笔划为序)	刘仁	朱森元	朵英贤	宋家树
	杨星豪	吴有生	何庆芝	何国伟
	何新贵	张立同	张汝果	张均武
	张涵信	陈火旺	范学虹	柯有安
	侯正明	莫梧生	崔尔杰	

前 言

自从 1957 年 10 月 4 日第一颗人造地球卫星上天后,四十多年来,随着航天技术的迅速发展,航天器(特别是人造地球卫星)的应用越来越广泛。我国在自力更生方针的指引下,1970 年 4 月 24 日将中国第一颗人造地球卫星——“东方红一号”送上轨道,正常运行,从此跨入了空间大国的行列。

航天技术涉及到的是一项庞大的系统工程,轨道设计、轨道控制和轨道测定是其重要组成部分,其核心就是轨道问题。航天器实际上是一种人造小天体,它包括各种人造地球卫星、月球探测器(包括人造月球卫星)和行星探测器(包括行星轨道器)等。研究人造天体运动的科学称为航天动力学(Astrodynamics),或称宇航动力学。它的研究已超出了研究自然天体运动的天体力学的传统范围。其主要研究内容分为以下三个部分:轨道动力学(Orbital Dynamics),姿态动力学和火箭动力学。轨道动力学(以下简称轨道力学)是航天器的轨道设计、轨道控制和轨道测定的理论基础。

航天器的运动,通常包括发射段,运行轨道段(或称在轨段)和返回轨道段。但就在轨段(即进入预定轨道后的飞行段)而言,即使运行过程中还有变轨(这里是轨道调整和轨道转移的统称)阶段,但主要还是无动力飞行,相应的运动与自然小天体的运动基本类似。尽管如此,航天器运行过程中的受力状况更加复杂,研究的内容不尽相同,因此,航天器轨道力学这一研究领域,虽然仍以天体力学为其基础,但亦不同于天体力学,可以说是天体力学的一个新分支。关于变轨过程,将涉及到火箭推力、优化和控制等问题,但这一部分的研究仍然是建立在轨道与轨道变化基础上的。鉴于这些背景,本书就是从轨道及其变化这一角度来安排其内容,全面

而系统地阐明航天器轨道运动中的基本问题,并侧重于对解决各种轨道及其变化问题所涉及的力学概念和数学原理给以严密的论述,以便读者更好地利用书中提供的有关方法和结果去处理航天测控和轨道设计中所遇到的各种轨道力学问题,故本书定名为《航天器轨道理论》。

全书内容包含以下四个部分:

1. 天体力学基础知识。介绍无摄运动(对应二体问题)的基本规律,无摄运动与受摄运动之间的关系,以及受摄运动方程的基本解法(小参数幂级数解)。

2. 人造地球卫星的轨道理论及精密定轨。主要论述人造地球卫星在各种力学因素作用下的轨道变化规律,受摄星历的计算方法和多资料统计定轨(即精密定轨)。这部分是一完整的轨道摄动理论,而有关卫星运行轨道段的变轨问题将并入第3部分。

3. 行星际探测器的运动及变轨问题。主要介绍与行星际探测器轨道运动有关的限制性三体问题,月球卫星和金星轨道器的轨道理论,行星际探测器的轨道运动,以及与轨道调整和轨道转移有关的轨道力学问题。

4. 航天器运动方程的数值解法。随着测量技术的迅速发展,测量精度的不断提高,对人造地球卫星定轨精度的要求也越来越高,在这一前提下,加之相应力学模型的精化所带来的复杂性,仍采用纯分析方法求解运动方程已无法满足要求,而数值方法便成为解决问题的主要工具。对行星际探测器的运动,同样由于相应力学系统的复杂性,无法给出分析解,数值方法也就成为主要研究手段。为此,本书专门安排了这一内容,但鉴于本书的特点,绝不是将现有常微分方程的数值解法作一简单的罗列,而是充分考虑了如何将航天器运动方程的特征以及相应轨道变化的规律“注入”到有关方法中,作一些有益的改进,从而提高原数值方法的应用效率。

书中公式和符号较多,同一符号在不同公式中可能有不同含义;另外,为了语言表达上的需要,同一量(或方法)在不同之处可

能有不同名称。然而,对那些常用量(如轨道根数等),将尽可能保持用同一符号来表示,而且采用本学科领域中习惯采用的符号。

本书是根据作者近 40 年来在教学与科研工作中的积累而写成,书中内容取自作者(和合作者)公开发表的 100 多篇学术论文和有关技术报告以及七本著作与教材。尽管这些论著与教材在国内已被普遍采(引)用,有些内容也受到国外同行的重视或引用,但这些著作与教材均有不足之处,并在一定程度上与实际需要存在一定距离。这就促使作者决定撰写此书,在原有著作和教材的基础上作了必要的修改与充实,并补充了作者未曾公开发表过的但已证实实用之有效的研究成果,使其成为一本有关航天器轨道理论的较全面而系统的著作,以适应我国航天事业进一步发展对轨道力学的需要。

本书的初稿完成于 1997 年 2 月,几经修改,特别是 1997 年 10 月参加在意大利都灵召开的第 48 届国际宇航会议后,又根据国际宇航界在轨道动力学方面的研究状况,作了相应的修改与补充。

最后,对我在教学和科研工作中的各位合作者表示衷心的感谢,这本书的问世与他(她)们的辛勤工作也是分不开的。

作者

目 录

第一章 绪论	1
§ 1.1 力学模型	1
§ 1.2 有关时间和坐标系统的一些天文概念	5
§ 1.3 时间系统	10
§ 1.4 空间坐标系	17
§ 1.5 测量数据的类型及其归算	27
§ 1.6 计算单位的选择	31

第一部分 天体力学基础知识

第二章 二体问题	33
§ 2.1 二体问题的六个积分	33
§ 2.2 椭圆运动的基本关系式	39
§ 2.3 椭圆运动中的一些导数关系	43
§ 2.4 椭圆运动的展开式	47
§ 2.5 开普勒方程的解法	53
§ 2.6 抛物线轨道与双曲线轨道	56
第三章 轨道计算	60
§ 3.1 由位置矢量和速度矢量计算轨道根数	61
§ 3.2 由两个时刻的位置矢量计算轨道根数	62
§ 3.3 拉普拉斯方法	66
§ 3.4 高斯方法	70
§ 3.5 关于人造地球卫星初轨计算问题	72
第四章 摄动运动方程及其基本解法	75
§ 4.1 摄动运动方程的建立	75

§ 4.2	摄动运动方程的各种形式	80
§ 4.3	摄动运动方程的奇点与处理方法	85
§ 4.4	摄动运动方程的基本解法——摄动法	90
§ 4.5	周期项和长期项	96

第二部分 人造地球卫星轨道理论及精密定轨

第五章	地球非球形引力摄动与平均根数法	99
§ 5.1	地球引力场的位函数	99
§ 5.2	勒让德多项式及其算法	107
§ 5.3	平均根数法	114
§ 5.4	主要带谐项(J_2, J_3, J_4 项)的摄动解	120
§ 5.5	田谐项摄动解的基本特征	139
§ 5.6	非球形引力摄动解的统一形式	144
§ 5.7	地心坐标误差对卫星轨道的影响	148
第六章	小分母问题与拟平均根数法	154
§ 6.1	小分母问题的出现与通约奇点	154
§ 6.2	通约奇点的力学机制及其对应的运动特征	155
§ 6.3	消除通约奇点的拟平均根数法	160
§ 6.4	同时消除 $e=0$ 和通约奇点的摄动方法	165
§ 6.5	同时消除 $e=0, i=0$ 和通约奇点的摄动方法	184
第七章	几类特殊卫星的轨道特征	189
§ 7.1	交点周期、近点周期与恒星周期之间的转换 关系	189
§ 7.2	太阳同步卫星与极轨道卫星	197
§ 7.3	拱线静止轨道及其稳定性	203
§ 7.4	地球同步卫星的运动特征及其漂移	211
§ 7.5	地球同步卫星的双星系统	217
第八章	地球形变摄动	222
§ 8.1	潮汐形变摄动的基本特征	223
§ 8.2	固体潮和海潮形变位	228

§ 8.3	固体潮和海潮摄动解	232
§ 8.4	大气潮摄动问题	237
§ 8.5	地球自转形变摄动	238
§ 8.6	卫星径向位置误差的计算方法	239
第九章	第三体引力摄动	252
§ 9.1	力学模型和日、月位置的近似计算	253
§ 9.2	日月摄动函数	258
§ 9.3	日月摄动解	263
§ 9.4	地球扁率间接摄动	270
第十章	太阳光压摄动	273
§ 10.1	光压力的计算	273
§ 10.2	光压摄动的数学模型	276
§ 10.3	光压摄动解	279
§ 10.4	地影问题及其处理方法	285
§ 10.5	地球反照辐射压摄动	289
第十一章	大气阻力摄动	293
§ 11.1	大气阻力摄动加速度及其有关问题	293
§ 11.2	大气模式	296
§ 11.3	大气阻力摄动效应的基本特征	299
§ 11.4	用轨道根数表达的大气密度模式	305
§ 11.5	大气阻力摄动解	308
第十二章	后牛顿效应对卫星轨道的影响	326
§ 12.1	问题的提出与后牛顿加速度	326
§ 12.2	考虑后牛顿效应的二体问题	330
§ 12.3	考虑后牛顿效应的摄动运动方程	336
§ 12.4	后牛顿效应的摄动解	341
第十三章	坐标系附加摄动	350
§ 13.1	坐标系附加摄动问题的提出	350
§ 13.2	几种地心赤道坐标系中卫星轨道根数 之间的关系	351

§ 13.3	历元地心赤道坐标系中的附加摄动	355
§ 13.4	轨道坐标系中的附加摄动	359
§ 13.5	极移引起的附加摄动	366
第十四章	变换方法及其应用	371
§ 14.1	正则共轭变量与正则运动方程	371
§ 14.2	正则交换与生成函数	377
§ 14.3	Von-Zeipel 方法	383
§ 14.4	一般变换方法	403
第十五章	人造地球卫星精密定轨	414
§ 15.1	问题的提法	414
§ 15.2	最小二乘估计	419
§ 15.3	非线性系统的处理——人造地球卫星 精密定轨	425
§ 15.4	观测值的计算值与相应的几组偏导数	431
§ 15.5	精密定轨计算中的几个问题	446

第三部分 行星际探测器的运动及变轨问题

第十六章	限制性三体问题	452
§ 16.1	圆型限制性三体问题	452
§ 16.2	圆型限制性三体问题的特解——平衡点	462
§ 16.3	零速度面与运动可能区域	467
§ 16.4	椭圆型限制性三体问题	470
第十七章	月球卫星与金星轨道器的运动	475
§ 17.1	月球和金星的自转及引力场的特征	475
§ 17.2	月球卫星运动的受力分析	479
§ 17.3	近月卫星运动对应的数学模型	480
§ 17.4	摄动函数的根数形式及其分解	484
§ 17.5	近月卫星轨道变化的分析解	492
§ 17.6	月球卫星的测轨问题	506
第十八章	行星际探测器的轨道运动	509

§ 18.1	行星际探测器轨道运动的数学模型·····	509
§ 18.2	月球探测器的发射条件及其运动状况·····	513
§ 18.3	轨道调整与轨道转移·····	518
§ 18.4	变轨过程中的轨道变化规律·····	526

第四部分 航天器运动方程的数值解法

第十九章	常微分方程数值解的两类基本方法·····	535
§ 19.1	有关数值解法的基本知识·····	535
§ 19.2	常用的单步法——Runge-Kutta 方法 ·····	538
§ 19.3	线性多步法——Adams 方法、Cowell 方法和 KSG 积分器 ·····	544
第二十章	航天器运动方程数值求解的几个问题 及相应方法的改进·····	556
§ 20.1	基本变量的选择与相应的运动方程·····	556
§ 20.2	大偏心率轨道积分步长的均匀化·····	560
§ 20.3	沿迹误差快速增长问题的分析·····	565
§ 20.4	改进的恩克方法·····	567
§ 20.5	能量补偿方法·····	573
§ 20.6	关于积分过程中右函数的间断问题·····	583
附录	·····	586
I.	基本常数 ·····	586
II.	常用公式 ·····	587
III.	几种地球引力场模型 ·····	598

CONTENTS

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Dynamical Models	1
1.2 Some Astronomical Conceptions On the Space - time Reference Ststem	5
1.3 Time System	10
1.4 Coordinate System	17
1.5 Type of Measurement Data and Its Theoretical Calculation	27
1.6 Selection of Computation Units	31

Part I Elementary Knowledge On the Celestial Mechanics

Chapter 2 The Two - body Problem	33
2.1 Six Integrals of Two - body Problem	33
2.2 Basic Relations of Elliptic Motion	39
2.3 Some Partial Derivatives in Elliptic Motion	43
2.4 Expansions in Elliptic Motion	47
2.5 Solution of Kepler's Equation	53
2.6 Parabolic Orbit and Hyperbolic Orbit	56
Chapter 3 Initial Orbit Determination	60
3.1 Calculation of the Elements from the Position and Velocity Vector at a Given Time	61
3.2 Calculation of the Elements from the Position Vector at two Given Times	62

3.3	Laplace's Method	66
3.4	Gauss's Method	70
3.5	On Initial Orbit Determination of Artificial Earth's Satellite	72
Chapter 4 Equation of Perturbed Motion and Its Basic		
	Solution	75
4.1	Derivation of Equation of Perturbed Motion	75
4.2	Several Types of Perturbation Equation	80
4.3	Singular Point in Perturbation Equation	85
4.4	Basic Solution of Perturbation Equation—Perturbation Method	90
4.5	Periodic Term and Secular Term	96

Part II Orbit Theory and Precision Orbit Determination of Artificial Earth's Satellite

Chapter 5 Perturbations Due to Nonspherical Gravitational		
	Potential and Mean Element Method	99
5.1	Earth Gravitational Potential	99
5.2	Legendre Polynomials and Its Algorithm	107
5.3	Mean Element Method	114
5.4	Perturbing Solution Due to Main Zonal Harmonic Terms(J_2, J_3 , and J_4)	120
5.5	Basic Feature of Perturbing Solution Due to Tesseral Harmonic Terms	139
5.6	Unity Form of Perturbing Solution Due to Nons- pherical Gravitational Potential	144
5.7	The Effect of Geocentric Position Error On a Satellite Orbit	148

Chapter 6 Problem of Small Divisor and Quasi - Mean

Element Method	154
6.1 Presentation of the Problem of Small Divisor and Commensurable Singular Point	154
6.2 Dynamical Mechanism of Commensurable Singular Point and the Corresponding Feature of Motion	155
6.3 The Quasi - Mean Element Method of Eleminating Singular Point	160
6.4 Perturbation Method of Eleminating Simultaneously $e=0$ and Commensurable Singular Points	165
6.5 Perturbation Method of Eleminating Simultaneously $e=0, i=0$ and Commensurable Singular Points	184
Chapter 7 Orbital Features of Several Kind of Special Satellites	189
7.1 The Transformation Relation Between Sidereal Period and Nodical Period, Anomalistic Period	189
7.2 Sun - synchronous Satellite and the Pole Orbit Satellite	197
7.3 The Orbit of Fixed Apisidal Line and Its Stability ..	203
7.4 The Feature of Motion of Geostationary Satellite and the Position Drift	211
7.5 The Binary Star System of Geostationary Satellite ..	217
Chapter 8 Perturbation Due to the Earth's Deformation ..	222
8.1 The Basic Feature of Perturbation Due to Tidal Deformation	223
8.2 The Deformation Potential of Solid Earth Tides and Ocean Tides	228
8.3 The Perturbing Solution Due to Solid Earth Tides and Ocean Tides	232
8.4 Perturbing Problem of the Atmospheric Tides	237
8.5 Perturbation Due to the Earth Rotation	238