

航天器轨道动力学与控制

(上)

主 编 杨嘉墀

副 主 编 范剑峰

主编助理 余明生

作 者 杨嘉墀 范秦鸿 张云彤 杨维廉
陈淑卿 范剑峰 余明生 李颐黎
张 建 陆镇麟

责任编辑 尚秉民

宇航出版社

内 容 简 介

《航天器轨道动力学与控制》是卫星工程技术领域的一本专著。本书共十七章,分上、下两册,上册十章,下册七章。书中主要论述航天器自然轨道的基础理论、轨道设计和轨道确定以及受控运动时的理论和技术问题。

本书理论联系实际,有较强的工程实用性,适合从事航天器研究、设计、试验和应用的工程技术人员阅读,也可作为高等院校相关专业的教学参考书。

卫星工程系列

航天器轨道动力学与控制

(上)

主 编:杨嘉墀

副 主 编:范剑峰

责任编辑:尚秉民

*

宇航出版社出版发行

北京和平里滨河路1号 邮政编码 100013

宇航出版社激光照排室排版

各地新华书店经销

北京科技印刷厂印刷

*

开本:850×1168 1/32 印张:19.625 字数:527

1995年12月第1版第1次印刷 印数:1~1000册

ISBN 7-80034-865-2/V·218 定价:25.00元

道
彈
子
航
天
丛
書

张其成

《导弹与航天丛书》
编辑工作委员会

名誉主任 宋 健 鲍克明

主 任 刘纪原

副 主 任 任新民 孙家栋

委 员 屠守锷 黄纬禄 梁守槃 陈怀瑾
王 卫 权振世 谢昌年 赵厚君
曹中俄 张新侠 高本辉

办 公 室 宋兆武 史宗田 任长卿 孙淑艳

《卫星工程》 系列编辑委员会

主 任 孙家栋
副 主 任 戚发轫 杨嘉墀 屠善澄
侯深渊(常务副主任)
委 员 朴华宝 朱毅麟 潘维孝 范本尧
邹广瑞 曾邑铎 王金堂 魏钟铨
李旺奎 黄本诚 陆道中 杨廷相
朴鸿英 付继昌
办 公 室 陆道中 宋惠兰 杨树仁 王凤台

总 序

导弹与航天技术,是现代科学技术中发展最快的高技术之一。导弹武器的出现,使军事思想和作战方式发生了重大变革;航天技术,把人类活动的领域扩展到太空,使人类认识自然和利用外层空间的能力发生了质的飞跃。

导弹与航天技术是一项复杂的系统工程,它应用了现代科学技术众多领域的最新成就,是科学技术与国家基础工业紧密结合的产物,是一个国家科学技术水平和工业水平的重要标志。

中国人民经过30年的努力,依靠自己的力量,勇于开拓,坚韧不拔,在经济和科学技术比较落后的条件下,走出了自己发展导弹和航天技术的道路,造就了一支能打硬仗的技术队伍,建立了具有相当规模和水平的导弹和航天工业体系,形成了遍布全国的科研、生产协作网。这是党中央独立自主、自力更生方针的伟大胜利,是全国各地区、各部门大力协同,组织社会主义大协作的丰硕成果。

30年来,我国已有多种型号经历了研究、设计、生产、试验、装备、使用的全过程,装备了各种射程的战略和战术弹道导弹、各种类型的防空导弹和飞航导弹,用多种运载火箭发射了不同轨道和用途的人造卫星,这些都是我国导弹和航天工业的物质成果。这些重大成果对增强我国的国防实力,促进经济发展,带动科学进步,发挥了重要的作用。

我们不仅取得了丰硕的物质成果,而且积累了宝贵的实践经验。为了发展中国的导弹和航天事业,多少人投入毕生的精力,贡献了宝贵的智慧,付出了辛勤的劳动,备尝了失败的苦痛和成功的

欢欣,这些付出高昂代价取得的实际经验,难以只从书本上学来,也不能从外国买来,只能靠自己在实践中总结.为了加速我国导弹和航天事业的发展,需要全面、系统地归纳以往研制过程中建立和应用的设计理论,总结其工程经验,用以指导今后的研制实践,并传授给导弹和航天事业一代又一代新生力量,使他们能在较高的起点上开始工作.为此,我们组织多年来从事导弹、人造卫星和运载火箭研制工作的专家和工程技术人员,编著了这套《导弹与航天丛书》.它以工程应用为主,力求体现工程的系统性、完整性和实用性,是我国导弹和航天技术队伍30年心血凝聚的精神成果,是多种专业技术工作者通力合作的产物.

作为一项系统工程,要求参加导弹和航天工程研制工作的各类技术人员,不仅精通自己的专业,而且充分理解相关专业的要求和特点,在统一的总体目标下,相互协调、密切配合地进行工作.因此,本《丛书》也是导弹和航天技术队伍各专业间以及和其他有关人员间进行技术交流的读物.

本《丛书》按液体弹道导弹与运载火箭(I)、固体弹道导弹(II)、防空导弹(III)、飞航导弹(IV)、卫星工程(V)等5个系列编排.各系列共用的固体推进技术(VI)和空气动力学(VII)两种专业编为专著,其他共用专业则纳入一个系列,并供其他系列选用.

本《丛书》的各级编委会、各卷册的主编、副主编及各章节的作者是一个庞大的科学技术人员群体,为了编写好这部大型丛书,编著人员在组织和技术上都付出了巨大劳动.期望这套《丛书》能帮助人们加深对于导弹和航天技术的了解,能促进中国的导弹和航天事业向更高的目标迈进.

《导弹与航天丛书》

编辑工作委员会

1987年8月

《导弹与航天丛书》

卫星工程系列

序 言

卫星工程系列丛书是《导弹与航天丛书》的一个系列。

我国坚持自力更生、艰苦奋斗的方针,在人造卫星的研制工作中取得了举世瞩目的成就。1970年4月24日,中国第一颗人造地球卫星——“东方红一号”发射成功,卫星运行正常,跨入了空间大国的行列。至今,我国成功地研制和发射了30颗不同类型的人造卫星,其中包括当代最重要的三类应用卫星:高轨道的静止通信卫星、低轨道的返回式卫星和中轨道的遥感卫星。这些卫星应用于国民经济、国防建设、文化教育和科学研究的很多部门,取得了显著的社会和经济效益。

我国在研制人造卫星的工作中,开展了创造性的科研活动,积累了丰富的实践经验,形成了学科门类齐全的卫星工程知识体系。我们组织众多的工程技术专家编写本系列丛书的目的,在于将这些实践经验和理论知识进一步系统化和理论化,并适当地吸收国外先进的科学技术成果,使其形成一套航天技术专著,用于指导今后的卫星研制工作。本系列丛书共有19种技术专著,包括卫星工程概论、卫星分系统技术和专业技术,以及探空火箭设计,共计29分册。

本系列丛书的内容以人造卫星的研制技术为主,着重论述卫星工程技术方面的问题,并简要论及了许多相关学科的问题,使其具有完整性、系统性。某些分册涉及到载人飞船、空间站等其他类

航天器的工程技术问题,其中论述内容较多的两册,书名冠以航天器.本系列各种分册在内容上具有相对的独立性和系统性.

编纂卫星工程系列丛书尚无经验可循,我们的工作首次尝试,由于编著人员的知识水平和实践经验有限,书中不当之处在所难免,欢迎广大读者批评指正.

本系列丛书的编纂工作,得到很多单位领导、广大科技人员和宇航出版社很多同志的大力支持,在此致以衷心的感谢.

《卫星工程》
系列编辑委员会

前 言

《航天器轨道动力学与控制》是《导弹与航天丛书》卫星工程系列中的一本技术专著。本书是由中国空间技术研究院多位专家共同编写的。书中论述了航天器自然轨道的基础理论、轨道设计和轨道确定以及受控运动时的理论和技术问题。本书的特点是注意结合航天任务的要求，强调原理与设计相结合，以增强工程实用性，并力求作到概念清晰、叙述准确、结论正确。

本书共有十七章，分上、下两册，上册包括十章，下册包括七章。

本书适用于从事航天器研究、设计、试验和应用的工程技术人员阅读，也可作为高等院校有关专业的教学参考书。

目 录

第一章 概 论	杨嘉辉
1.1 作用和意义	(1)
1.2 研究范畴	(3)
1.3 轨道动力学应用	(6)
1.4 航天器轨道控制及应用	(7)
1.5 发展前景	(10)
第二章 太阳系、坐标系和时间系统	范秦鸿
2.1 太阳系	(12)
2.2 近地空间环境	(16)
2.3 地球形状和引力场位函数	(24)
2.4 地球自转和岁差章动	(30)
2.5 月球	(32)
2.6 坐标系	(35)
2.7 时间系统	(44)
第三章 二体问题和多体问题	张云彤
3.1 二体问题的解析解和轨道根数	(48)
3.2 二体问题的应用	(51)
3.3 多体问题的运动方程及十个积分	(66)
3.4 圆型限制性三体问题	(70)
3.5 作用范围及应用	(75)
第四章 卫星轨道摄动	杨维廉

4.1	概述	(79)
4.2	摄动方程	(81)
4.3	正则方程和正则变换	(85)
4.4	基于李级数的摄动方法	(90)
4.5	地球引力场非中心力项的摄动	(98)
4.6	大气阻力摄动	(122)
4.7	太阳光压摄动	(131)
4.8	日、月引力摄动	(138)
4.9	数值积分法	(144)
4.10	半分析方法	(148)
第五章 卫星轨道设计		陈淑卿 张云彤
5.1	概述	(154)
5.2	近地轨道主要摄动及轨道寿命	(170)
5.3	太阳同步轨道	(185)
5.4	回归轨道	(196)
5.5	发射窗口	(198)
5.6	卫星星食	(210)
5.7	静止轨道	(215)
5.8	静止轨道的主要摄动	(221)
5.9	转移轨道设计	(240)
5.10	远地点发动机变轨	(250)
第六章 特殊轨道和卫星星座		范剑峰
6.1	概述	(266)
6.2	冻结轨道	(266)
6.3	逗留轨道	(272)
6.4	伴随轨道	(285)
6.5	伴随轨道拟合法	(295)
6.6	系绳卫星轨道	(303)
6.7	卫星星座	(310)
第七章 轨道转移		余明生
7.1	共面圆轨道用两次冲量的最优转移	(326)
7.2	共面圆轨道的三冲量转移	(333)

7.3	共面椭圆轨道两次冲量的最优转移	(337)
7.4	共面椭圆轨道上两固定点之间的最优转移	(340)
7.5	非共面圆轨道的最小能量转移	(346)
7.6	冲量对转移轨道根数的影响	(352)
7.7	随转移时间变化的燃料消耗量	(355)
7.8	转移轨道对位置和速度误差的敏感性	(358)
7.9	航天器进入转移轨道的误差分析	(362)
7.10	有心力场中的轨道转移	(373)
7.11	两个或多个引力场中的轨道转移	(377)
7.12	非共面非共轴椭圆轨道转移和时间控制	(384)
7.13	小推力轨道转移	(401)
第八章 返回轨道设计		李頔黎 张 建
8.1	概述	(404)
8.2	人造地球卫星返回轨道设计	(405)
8.3	载人飞船返回轨道设计	(452)
8.4	航天飞机返回轨道设计	(462)
第九章 卫星轨道确定和预报		陆镇麟
9.1	初始轨道的确定	(485)
9.2	轨道改进	(502)
9.3	观测数据的预处理和精度分析	(514)
9.4	卫星的观测预报	(530)
第十章 地月飞行和星际航行		范剑峰
10.1	概述	(544)
10.2	地月关系	(544)
10.3	地月飞行类型	(545)
10.4	地月飞行轨道的计算方法	(546)
10.5	引力作用球	(557)
10.6	双曲线超速	(560)
10.7	日心过渡轨道	(561)
10.8	逃逸轨道	(579)

10.9	遭遇和俘获轨道	(584)
10.10	行星际环旅轨道	(588)
10.11	恒星际飞行	(595)
附录	符号表	(610)

第 一 章

概 论

杨嘉墀

航天器的轨道动力学与控制理论及技术是航天工程的重要组成部分. 轨道动力学主要是研究航天器在重力场和其它外力作用下的质点动力学问题; 而航天器的轨道控制则研究对航天器的质心主动施加外力, 使之按需要改变运动轨道的理论和技術. 轨道动力学与控制是一门理论结合实际交叉学科, 内容既涉及航天科学技术的一些理论基础知识(如天体力学、控制理论等), 也涉及有关轨道设计、轨道确定、轨道机动、交会对接、返回轨道控制等工程技术问题. 本书上册将主要论述轨道动力学, 也就是航天器无控运动的自然轨道有关的问题, 包括空间环境、二体问题和多体问题、轨道摄动等基础理论和卫星轨道设计、特殊轨道和卫星星座、返回轨道、轨道测量和确定等内容. 下册论述航天器的受控运动, 包括变轨、交会、返回等控制的理论和技術.

1.1 作用和意义

人类在认识世界和改造世界的过程中, 产生了各方面的技术, 同时也发展了各种学科的科学. 面对丰富多彩的自然现象, 科学总是不断地追寻其变化规律, 预见今后的发展动态; 工程实践既为探

索科学规律铺路,又在一定的条件下应用这些客观规律,为生产服务,以期提高人类的物质文化水平。

航天器轨道动力学发展史的研究必须追溯到天文学的历史。中国四千年前就有可供考据的文字星象记载。约在公元前四世纪,有一个名叫石申的人,编制了“石氏星表”,成为后世许多天体测量工作的基础。然而,以数学方法和力学方法建立天体力学的却是欧洲的一批科学家:在哥白尼日心运动的基础上,德国天文学家 J. 开普勒于 1609 年发表了关于行星运动的第一定律和第二定律,并于 1619 年发表了第三定律;1687 年 I. 牛顿系统地总结其物体运动三定律,并正式提出了万有引力定律,从而证明了开普勒定律,说明了月球绕地球的运动规律、潮汐的成因和地球两极较扁等自然现象。

应用力学规律来研究天体的运动和形状交叉学科称为天体力学(Celestial Mechanics),包括天体质心的轨道运动和绕质心的旋转运动。对日月和行星,它则是要确定它们的轨道、编制星历表、计算质量并根据它们的自转运动确定天体的形状,等等。天体力学的研究内容包括:二体问题、三体问题、多体问题、摄动理论、天体形状和自转理论,以及有关天体运动的定性理论和数值计算方法。19 世纪末,研究太阳系中大行星运动和月球运动的理论已臻完善。到 20 世纪初,计算月球和各大行星运动表的工作已完成,小行星运动理论和行星卫星理论也有了很大的发展。

到了 20 世纪的中叶,由于火箭技术的发展,使人类第一次实现了发射人造物体进入外层空间的幻想。研究人造天体运动的科学被称作航天动力学(Astrodynamics)。它虽也使用着天体力学的方法,但已超出了天体力学的传统范围。多数人造卫星是在近地轨道上运行的,比地球的天然卫星——月球的轨道要低得多,它们的运动所受到的摄动力受空间近地环境的影响较大。航天动力学的研究可以提供按任务要求的轨道设计方法,还可以提供专门测量轨道摄动因素的技术手段。

以数学、力学、控制理论为基础的航天动力学,又称星际航行动力学,其研究内容分为三部分:

- 1) 轨道动力学(Orbital Dynamics)——研究航天器的质心运动或轨道运动;
- 2) 姿态动力学(Attitude Dynamics)——研究相对于自身质心的运动和航天器各组成部分的相对运动或姿态运动;
- 3) 火箭动力学——研究航天器发射、轨道机动飞行、制动飞行等过程中带有工作的火箭发动机的运动。

由于燃料的消耗,航天器的质量和质心是不断变化的,每项航天器任务的设计和运行必须分段综合应用上述三个方面的基础理论。例如,返回式航天器的飞行过程一般分为三个阶段:

- 1) 发射段——航天器由运载火箭携带,由地面起飞达到预定的位置和速度。
- 2) 运行轨道段——航天器主要在万有引力等自然界外力作用下运动。为了保持预定的轨道,有时需要少量的速度增量;为了轨道机动,有时则需要较大的速度增量。
- 3) 返回轨道段——航天器为了安全返回地球,它将依靠火箭推力和气动力等的作用,离开运行轨道降落到地球表面。

在以上的三个阶段中,航天器的运动都包含了火箭运动、轨道运动和姿态运动三个部分。在自由飞行轨道段,一般可以将轨道运动和姿态运动分别求解;而在发射段和降落段,以及运行轨道的推力飞行段,轨道运动和姿态运动的关系密切,需要联立求解。对于更为复杂的飞行任务,可以分解为更多的飞行阶段,但本质上还是由一个或几个火箭飞行段、自由飞行段和进入飞行段等组成。

1.2 研究范畴

(1) 轨道摄动

轨道动力学是轨道设计、轨道控制和轨道测定的理论基础,而