

导弹与航天丛书

卫星工程系列

# 航天器轨道动力学与控制

(下)

宇航出版社

# 航天器轨道动力学与控制

## (下)

主 编 杨嘉墀

副主编 吕振铎

主编助理 孙承启 王存恩

作 者 吕振铎 李铁寿 刘良栋 李 果  
王旭东 潘科炎 胡 军 耿长福  
严 辉 王大铁

责任编辑 李明观

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,本书共十六章,分上、下两册,上册十章,下册六章。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

(下)

主 编:杨嘉墀  
副 主 编:吕振铎  
责任编辑:李明观

\*

宇航出版社出版发行

北京市和平里滨河路1号 邮政编码 100013

发行部地址:北京市阜成路8号(100830)

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:12 字数:316千字

2002年6月第1版第2次印刷 印数:1000册

ISBN 7-80144-417-5/V·045 定价:36.00元

道  
寸  
彈  
子  
航  
天  
丛  
書

張  
文  
華

《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  
徐福祥 侯深渊(常务副主任)

委 员 林华宝 李祖洪 马兴瑞 邹广瑞  
陈宜元 范本尧 朱毅麟 马世俊  
李旺奎 黄本诚 陆道中 高慎斌  
王金堂 魏钟铨

办 公 室 陆道中 杨树仁 宋惠兰 居自强  
樊 涛

## 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.

《导弹与航天丛书》

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《导航与航天丛书》卫星工程系列中的一本技术专著,由中国空间技术研究院多位专家共同编写。本书为《航天器轨道动力学与控制》(下册),共六章,内容包括:轨道控制系统;变轨控制和轨道机动;轨道保持与星座控制;空间交会对接;返回与着陆控制和地月及星际飞行的轨道控制。它涵盖了我国航天器在轨道控制技术方面所进行的工作和取得的成果;在编写中也涉及到国外轨道控制技术方面的最新进展。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,并力求做到概念清晰、叙述准确、结论正确。

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。

限于作者水平,书中难免有错误之处,敬请读者指正。

编 者

2000年12月于北京

# 目 录

<b>第十一章 轨道控制系统</b>	<b>吕振铎</b>
11.1 概述	(1)
11.2 火箭推进定律	(2)
11.3 轨道控制方法	(4)
11.3.1 非自主轨道控制	(4)
11.3.2 自主轨道控制	(11)
11.4 轨道测量系统	(14)
11.4.1 基本概念	(14)
11.4.2 测量系统的能观度和状态估计精度	(16)
11.4.3 冗余测量与能观度	(19)
11.4.4 测量硬件	(20)
11.5 控制器	(44)
11.5.1 非自主轨道控制的控制器	(44)
11.5.2 自主轨道控制的控制器	(46)
11.6 推进分系统	(49)
11.6.1 几种典型的推进分系统	(49)
11.6.2 中国研制的单组元肼推进系统	(53)
11.6.3 中国研制的双组元统一推进系统	(56)
<b>第十二章 变轨控制和轨道机动</b>	<b>李铁寿</b>
12.1 概述	(61)
12.1.1 变轨控制和轨道机动的涵义	(62)
12.1.2 轨道机动的分类	(63)

12.1.3	轨道机动的控制策略	(64)
12.1.4	变轨控制的工程实现	(65)
12.2	变轨的动力学问题——一般情形	(67)
12.2.1	推力模型	(67)
12.2.2	用位置和速度表达的运动方程	(69)
12.2.3	用轨道根数表达的运动方程	(70)
12.2.4	脉冲推力变轨	(71)
12.2.5	大推力变轨的脉冲近似	(73)
12.3	变轨的动力学问题——小特征速度情形	(76)
12.3.1	邻近卫星相对运动方程	(76)
12.3.2	近圆轨道的球坐标相对运动方程	(78)
12.3.3	近圆轨道的摄动方程	(81)
12.3.4	小推力脉冲对近圆轨道的控制作用	(83)
12.4	脉冲推力近圆轨道修正	(87)
12.4.1	控制策略的综合	(87)
12.4.2	定点捕获导引律设计思想	(91)
12.4.3	平面内最小燃耗导引律分析	(93)
12.4.4	定点捕获导引律的综合	(94)
12.4.5	定点捕获实例	(98)
12.5	最优轨道控制和均匀引力场情形	(100)
12.5.1	轨道机动的最优控制问题	(100)
12.5.2	最优推力和主矢量	(101)
12.5.3	共轭方程	(102)
12.5.4	边界条件	(103)
12.5.5	脉冲推力情形	(105)
12.5.6	均匀引力场中最优轨道机动	(107)
12.6	近圆轨道的最优修正	(111)
12.6.1	线性最优轨道控制	(111)
12.6.2	倾角修正	(114)
12.6.3	共面近圆轨道间的最优转移	(115)
12.6.4	共面近圆轨道间的最优交会	(121)

12.7	中心力场中的最优机动 .....	(123)
12.7.1	开普勒轨道上的主矢量 .....	(123)
12.7.2	最优脉冲的性质 .....	(125)
12.7.3	非共面圆轨道间的最优脉冲转移 .....	(126)
12.7.4	非共面圆轨道间的大推力转移 .....	(129)
12.7.5	小推力最优转移的迭代解 .....	(131)
12.7.6	非共面圆轨道间小推力最优转移 .....	(133)
12.8	轨道机动优化的非线性规划方法 .....	(135)
12.8.1	泛函优化和参数优化 .....	(135)
12.8.2	有限推力远地点机动的参数优化 .....	(137)
<b>第十三章 轨道保持与星座控制</b>		

刘良栋 李 果 潘科炎等

13.1	静止轨道卫星的轨道保持 .....	(142)
13.1.1	静止轨道卫星的轨道摄动 .....	(142)
13.1.2	静止轨道卫星的定点位置保持 .....	(167)
13.2	太阳同步轨道卫星的轨道控制 .....	(188)
13.2.1	太阳同步轨道卫星的轨道摄动 .....	(189)
13.2.2	太阳同步轨道卫星的轨道保持 .....	(197)
13.3	静止轨道多星共位位置保持研究 .....	(206)
13.3.1	位置保持策略研究 .....	(207)
13.3.2	卫星轨道相对运动方程 .....	(208)
13.3.3	多颗共位卫星位置保持研究 .....	(210)
13.4	冻结轨道卫星星座的轨道保持控制 .....	(211)
13.4.1	轨道摄动 .....	(212)
13.4.2	位置保持策略 .....	(213)
13.5	星座轨道控制 .....	(216)
13.5.1	星座轨道控制任务 .....	(217)
13.5.2	星座轨道控制策略 .....	(217)
13.5.3	星座轨道控制的测控操作 .....	(220)

**第十四章 空间交会对接** 王旭东 潘科炎

14.1	空间交会对接飞行任务 .....	(228)
14.2	空间交会动力学和制导方程 .....	(229)

14.2.1	绝对坐标系和开普勒转移轨道 .....	(230)
14.3	交会相对运动 .....	(239)
14.3.1	交会寻的相对运动方程 .....	(239)
14.3.2	相对运动坐标系及相对运动方程 .....	(240)
14.4	最后逼近阶段自动寻的交会 .....	(251)
14.4.1	平行交会 .....	(251)
14.4.2	C-W 交会 .....	(258)
14.4.3	走廊式(水平)交会 .....	(259)
14.5	交会制导、导航和控制系统 .....	(261)
14.5.1	轨道坐标系交会控制系统 .....	(261)
14.5.2	视线坐标系交会控制系统 .....	(261)
14.6	空间交会对接的制导、导航和控制系统 .....	(263)
14.6.1	RVD GNC 系统功能 .....	(265)
14.6.2	RVD 系统的组成 .....	(268)
14.7	结束语 .....	(271)
<b>第十五章 返回与着陆控制</b>		<b>胡 军 耿长福</b>
15.1	概述 .....	(277)
15.1.1	返回运动控制 .....	(277)
15.1.2	返回过程 .....	(278)
15.2	弹道式再入航天器的返回控制技术 .....	(280)
15.2.1	返回式卫星姿态控制系统的组成和原理 .....	(280)
15.2.2	返回调姿控制律 .....	(282)
15.3	弹道-升力式返回航天器的返回控制 .....	(283)
15.3.1	制导、导航和控制所用的坐标系 .....	(284)
15.3.2	GNC 系统的组成和工作原理 .....	(286)
15.3.3	导航方程及实时求解 .....	(287)
15.3.4	制动发动机点火冲量控制 .....	(289)
15.3.5	配平攻角的建立 .....	(293)
15.3.6	再入大气层的姿态控制 .....	(293)
15.3.7	再入机动能力分析 .....	(294)

15.3.8	再入升力制导方法 .....	(296)
15.3.9	自旋再入控制 .....	(304)
15.4	升力式返回航天器的返回与着陆控制 ...	(305)
15.4.1	航天飞机轨道器再入段的升力控制 ...	(305)
15.4.2	轨道器末区能量管理(TEAM)和自动着陆 .....	(313)

## 第十六章 地月及行星际飞行的轨道控制

严 辉 王大轶 李铁寿

16.1	概述 .....	(320)
16.1.1	轨道控制策略 .....	(321)
16.1.2	最新进展 .....	(323)
16.2	地月及行星际轨道导航 .....	(324)
16.2.1	全球深空网 .....	(324)
16.2.2	自主导航 .....	(325)
16.2.3	组合导航 .....	(326)
16.3	行星际轨道预报误差分析 .....	(327)
16.3.1	行星际轨道误差 .....	(327)
16.3.2	误差传播 .....	(328)
16.4	逃逸轨道控制 .....	(328)
16.4.1	逃逸速度增量控制 .....	(328)
16.4.2	有限推力轨道控制 .....	(329)
16.5	日心过渡轨道控制 .....	(331)
16.5.1	B平面参数 .....	(331)
16.5.2	星际轨道制导方程 .....	(334)
16.5.3	轨道制导的协方差分析 .....	(335)
16.5.4	最优修正策略 .....	(335)
16.5.5	飞月轨道制导计算 .....	(336)
16.6	引力辅助变轨控制 .....	(338)
16.6.1	行星引力辅助变轨 .....	(339)
16.6.2	月球引力辅助变轨 .....	(340)
16.6.3	调整的方法 .....	(344)
16.7	进入段轨道控制 .....	(345)



16.7.1	一般进入段制导控制 .....	(345)
16.7.2	软着陆分析 .....	(348)
16.7.3	软着陆过程中的自主导航 .....	(349)
16.7.4	软着陆制导控制方案 .....	(350)
16.7.5	软着陆制导控制中的关键问题 .....	(355)
16.8	火星观察者号轨道控制 .....	(356)