



# 航天器相对运动轨迹 规划与控制

杨乐平 朱彦伟 黄涣 著

国防工业出版社

· 北京 ·

## 内 容 简 介

本书是关于航天器相对运动轨迹规划与控制的一本专著。全书共8章,主要内容包括航天器相对运动理论基础、自然周期相对运动轨迹设计、近距离相对运动轨迹规划、近距离相对运动控制策略、近距离观测任务轨迹设计与控制、空间机器人抓捕任务逼近轨迹设计与控制、飞行任务仿真平台设计与开发等。本书视角新颖、内容详实,全面系统地阐述了航天器相对运动轨迹规划与控制的理论方法、分析模型、求解算法和仿真软件等内容,具有较强的前沿性和实用性。

本书可供从事航天系统分析与任务设计的研究人员和工程技术人员参考,也可作为高等院校飞行器设计、自动控制等相关专业高年级本科生及研究生的参考教材。

### 图书在版编目(CIP)数据

航天器相对运动轨迹规划与控制 / 杨乐平, 朱彦伟,  
黄涣著. —北京: 国防工业出版社, 2010. 8  
ISBN 978 - 7 - 118 - 06857 - 3

I. ①航... II. ①杨...②朱...③黄... III. ①航  
天器 - 飞行控制 IV. ①V448. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 133439 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)

北京四季青印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 880 × 1230 1/32 印张 10% 字数 320 千字  
2010 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 40.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422  
发行传真:(010)68411535

发行邮购:(010)68414474  
发行业务:(010)68472764

# 前 言

航天器相对运动是空间技术及其应用发展到一定阶段后出现的一类新的空间任务模式,一般是指在同一引力场作用下,一个或一组航天器相对于目标航天器或虚拟航天器的运动。由于任务背景和要求不同,航天器相对运动有多种不同的类型或形式,典型的航天器相对运动包括人们已经熟知的航天器交会对接、编队飞行和目前新出现的航天器近距离观测、空间机器人抓捕等。从理论和应用特点分析,航天器经典轨道运动(绝对运动)主要采用二体模型或受摄二体模型研究航天器轨道设计、保持与机动等问题;航天器相对运动则主要研究两个或一组航天器之间相对位置或方位的确定、变化与保持等问题,代表了航天器动力学与控制研究的发展方向与前沿。

一般而言,与航天器绝对运动比较,航天器相对运动的影响因素和约束条件更多,参数或策略选择与优化的范围更大,因而轨迹规划与控制研究的重要性更加突出。轨迹规划与控制研究已成为当前航天器相对运动研究的一个重要方向。从总体上看,目前人们对航天器交会对接和编队飞行的轨迹规划与控制问题进行了大量研究,理论上和工程上都取得了一系列成果。近来随着空间安全与在轨服务技术的快速发展,人们对航天器近距离观测和空间机器人抓捕任务的轨迹规划与控制问题又产生了广泛的兴趣。仅就轨迹规划与控制研究而言,航天器近距离观测和空间机器人抓捕任务需要研究的问题更为复杂,主要表现在:航天器交会对接和编队飞行任务主要面向合作目标,而航天器近距离观测和空间机器人抓捕任务还包括非合作目标;航天器交会对接和编队飞行的轨迹规划空间有限,且多为事前规划,而航天器近距离观

测和空间机器人抓捕任务的可选轨迹更多,且要满足自主运行和近距离操作的需求,强调快速性与安全性。这些都对航天器相对运动轨迹规划与控制研究提出了一些新问题、新挑战,需要在相关理论方法、模型、算法等方面开展系统分析和深入研究。

航天器相对运动轨迹规划与控制研究涉及轨道力学、控制科学和最优化理论等多门学科,需要解决两大核心问题:一是针对空间目标与任务特性,考虑能量、时间、安全性和推力模式等因素,建立任务航天器的轨迹规划模型与优化算法,给出不同条件下的最优任务轨迹;二是研究各种不同条件下任务航天器沿规划轨迹运行的控制方法与策略,满足控制精度与鲁棒性要求。本书以作者完成的相关 863 课题研究成果为基础撰写,系统总结了航天器相对运动领域理论研究与工程应用成果,重点以航天器近距离观测和空间机器人抓捕为背景开展相对运动轨迹规划与控制问题的研究。从航天器相对运动一般规律出发,系统阐述了航天器相对运动轨迹设计、规划与控制的问题建模、求解方法、优化理论、算法模型和仿真软件等。

全书共分 8 章:第 1 章介绍了航天器相对运动特点、类型和发展概况,阐述了航天器相对运动轨迹规划与控制的关键问题及研究进展;第 2 章系统总结了航天器相对运动的基本理论,包括代数法(动力学法)和几何法(运动学法)相对轨道运动模型,以及姿态描述与姿态运动模型;第 3 章针对不同情况,分别用代数法和几何法对自然周期相对运动轨迹设计问题进行了分析;第 4 章分别研究了脉冲推力、继电器推力和连续常值小推力作用下的相对状态转移轨迹规划问题,给出了四种不同情况和条件下的轨迹规划模型与算法;第 5 章在提出三种相对运动控制策略的基础上,深入研究了滑模变结构反馈控制和鲁棒约束模型预测控制的控制器设计问题;第 6 章深入研究了航天器近距离观测任务的轨迹设计与控制问题,提出设计了八种任务轨迹模式,解决了复杂的六自由度(6-DOF)耦合推力控制问题;第 7 章针对空间机器人抓捕目标卫星的机动逼近过程,分别研究了三轴稳定目标卫星和无控旋转

目标卫星的抓捕逼近策略;第8章研究了空间机器人飞行任务规划与功能行为建模问题,设计开发了基于模型—视图—控制器(Model-View-Controller, MVC)模式的飞行任务规划仿真平台。本书第1章由杨乐平、朱彦伟撰写,第8章由黄涣、朱彦伟撰写,其余章节由朱彦伟撰写。全书由杨乐平统稿和审校。

由于作者水平有限,书中错误和疏漏之处在所难免,敬请读者批评指正。

著者

2010年2月

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 航天器相对运动.....	2
1.1.1 航天器相对运动概念 .....	2
1.1.2 典型相对运动类型 .....	3
1.2 航天器相对运动应用发展现状.....	7
1.2.1 空间交会对接与在轨服务 .....	7
1.2.2 航天器编队飞行.....	15
1.2.3 天基空间目标监视.....	19
1.3 相对运动轨迹规划与控制研究综述 .....	25
1.3.1 相对运动建模.....	26
1.3.2 相对运动轨迹规划.....	28
1.3.3 相对运动控制.....	31
1.3.4 飞行任务规划与仿真.....	32
1.4 本书组织结构与主要内容 .....	37
<b>第 2 章 航天器相对运动理论基础</b> .....	41
2.1 概述 .....	41
2.1.1 坐标系.....	41
2.1.2 约定与假设.....	42
2.2 代数法相对运动模型 .....	42
2.2.1 T-H 方程 .....	44

2.2.2	C-W 方程 .....	46
2.3	几何法相对运动模型 .....	47
2.3.1	相对运动学方程 .....	48
2.3.2	相对轨道根数与相对坐标的转换 .....	51
2.4	模型误差分析与精度对比仿真 .....	53
2.4.1	线性化误差 .....	54
2.4.2	小偏心率误差 .....	61
2.4.3	摄动误差 .....	65
2.4.4	模型误差 .....	70
2.4.5	模型适用度准则 .....	71
2.5	姿态运动 .....	72
2.5.1	姿态描述 .....	72
2.5.2	姿态运动学方程 .....	79
2.5.3	姿态动力学方程 .....	81
2.6	小结 .....	81
<b>第 3 章</b>	<b>航天器自然周期相对运动轨迹设计 .....</b>	<b>83</b>
3.1	概述 .....	83
3.2	代数法 .....	84
3.2.1	近圆参考轨道 .....	84
3.2.2	椭圆参考轨道 .....	88
3.3	几何法 .....	95
3.3.1	经典轨道根数差值的影响分析 .....	96
3.3.2	典型周期轨迹设计 .....	101
3.3.3	几何法与代数法设计参数的关系 .....	102
3.4	$J_2$ 项不变周期相对轨迹设计 .....	104
3.4.1	平根数与瞬根数 .....	104
3.4.2	平根数空间下的相对运动方程 .....	105
3.4.3	相对轨迹设计 .....	107



3.4.4	仿真算例 .....	108
3.5	小结 .....	109
<b>第4章</b>	<b>航天器近距离相对运动轨迹规划 .....</b>	<b>110</b>
4.1	概述 .....	110
4.2	基于脉冲推力的相对运动轨迹规划 .....	111
4.2.1	二脉冲机动模型 .....	111
4.2.2	基于导航点的多脉冲轨迹规划 .....	114
4.2.3	基于随机优化的多脉冲轨迹规划 .....	119
4.3	基于继电型推力的相对运动轨迹规划 .....	124
4.3.1	离散化动力学模型 .....	125
4.3.2	约束表示 .....	127
4.3.3	规划模型 .....	131
4.3.4	仿真算例 .....	132
4.4	基于连续常值小推力的相对运动轨迹规划 .....	134
4.4.1	最优控制原理 .....	134
4.4.2	近圆参考轨道情形 .....	136
4.4.3	椭圆参考轨道情形 .....	144
4.5	小结 .....	153
<b>第5章</b>	<b>航天器近距离相对运动控制策略 .....</b>	<b>155</b>
5.1	概述 .....	155
5.2	控制问题框架 .....	156
5.2.1	问题描述 .....	156
5.2.2	控制策略 .....	158
5.3	滑模变结构控制 .....	160
5.3.1	基本原理 .....	160
5.3.2	控制器设计 .....	162
5.3.3	仿真算例 .....	164

5.4	鲁棒约束模型预测控制	166
5.4.1	基本原理	167
5.4.2	控制器设计	171
5.4.3	仿真算例	175
5.5	小结	178
<b>第6章</b>	<b>航天器近距离观测任务轨迹设计与控制</b>	<b>180</b>
6.1	概述	180
6.2	基本相对运动类型	181
6.2.1	椭圆型	181
6.2.2	振荡型	182
6.2.3	跳跃型	183
6.2.4	飞越型	184
6.3	绕飞观测任务轨迹	185
6.3.1	自然椭圆绕飞观测	185
6.3.2	自然螺旋绕飞观测	187
6.3.3	单脉冲受限“水滴”形绕飞观测	188
6.3.4	多脉冲受限圆形绕飞观测	189
6.3.5	多脉冲受限“田径场”形绕飞观测	191
6.4	局部观测任务轨迹	193
6.4.1	单脉冲受限 $R\text{-bar}$ 方位观测	193
6.4.2	自然椭圆 $V\text{-bar}$ 方位观测	194
6.4.3	多脉冲受限任意方位观测	195
6.5	观测任务期望姿态计算	198
6.5.1	观测模式	199
6.5.2	充电模式	200
6.6	观测任务的 6-DOF 耦合推力控制	201
6.6.1	6-DOF 相对动力学模型	201
6.6.2	期望状态	203

6.6.3	控制策略 .....	204
6.6.4	仿真算例 .....	207
6.7	小结 .....	209
<b>第7章</b>	<b>空间机器人抓捕任务逼近轨迹设计与控制 .....</b>	<b>210</b>
7.1	概述 .....	210
7.2	三轴稳定卫星的抓捕逼近 .....	211
7.2.1	直线逼近模型 .....	212
7.2.2	相对静止保持 .....	213
7.2.3	基于组合机动的 V-bar 逼近 .....	214
7.3	无控旋转卫星的抓捕逼近 .....	219
7.3.1	目标运动模型 .....	219
7.3.2	飞越逼近策略 .....	221
7.3.3	同步控制逼近策略 .....	227
7.4	小结 .....	237
<b>第8章</b>	<b>空间机器人飞行任务仿真平台设计与开发 .....</b>	<b>238</b>
8.1	概述 .....	238
8.2	飞行任务过程分析 .....	239
8.2.1	接近伴飞任务 .....	239
8.2.2	交会抓捕任务 .....	242
8.2.3	飞行任务规划 .....	244
8.3	空间机器人系统功能行为模型 .....	249
8.3.1	功能行为模型概念 .....	250
8.3.2	空间机器人功能行为分析 .....	251
8.3.3	空间机器人功能行为建模 .....	257
8.4	设计模式与体系架构 .....	282
8.4.1	MVC 设计模式与实现 .....	282
8.4.2	自主运行体系架构 .....	290

8.5	仿真平台设计与实现	291
8.5.1	功能需求	291
8.5.2	体系结构	292
8.5.3	关键技术	293
8.5.4	仿真平台实现	304
8.6	小结	316
	参考文献	318

# 第1章 绪 论

自 1957 年 10 月 4 日人类第一颗人造地球卫星发射升空以来,空间技术的发展与应用几乎给人类活动的各个领域都带来了巨大变革,对全世界的科学探索、技术创新和产业发展产生了广泛而深入的影响。各种航天器是人类空间活动的主要载体,至今世界各国已经发射了各类航天器 8000 多颗,目前在轨运行的各种航天器超过 2000 颗,这些航天器在世界政治、经济、外交、军事和科技等领域都曾经或正在发挥着十分重要的作用。航天器技术发展集中体现了人类探索和利用空间的需求与能力,标志着世界空间技术的发展方向与重点。

纵观 50 多年来人类航天发展历程,依据不同时期航天器发展的重点与应用特点不同,可以将航天器技术发展大致分为应用卫星、载人航天和多星系统三个阶段。在应用卫星阶段,主要解决了各种应用卫星的设计、制造和运行控制问题,不断增强和提高单星系统的功能与性能,逐步建立起卫星应用的载体平台;在载人航天阶段,主要突破了载人飞船、交会对接和空间站技术,实现了航天员出舱、有人参与的空间装配与维修等在轨活动,为深空探测、空间科学实验和空间制造等奠定了坚实的技术基础;在多星系统阶段,主要解决了多星协同管理、卫星星座、编队飞行等技术,逐步构建起天基信息获取、传输、分发的一体化集成系统,为信息时代的来临创造了有利条件。今后,为了满足大规模空间应用需求,进一步提高空间系统效益,航天器技术将面向在轨加注、检测、维修、营救和组装等服务需求,逐步进入天基基础设施建设的发展阶段。

从航天器动力学与控制研究的角度来分析:在应用卫星阶段,主要应用基本的二体模型或受摄二体模型来解决航天器的轨道设计和导航、制导与控制(Guidance, Navigation and Control, GN&C)问题,满足了各种卫星应用任务对卫星轨道及 GN&C 系统设计提出的需求;在载人

航天阶段,重点解决了交会对接、再入返回的动力学与控制问题,使得有人参与的交会对接和再入返回成为常态;在多星系统阶段,主要解决了卫星星座和编队飞行的动力学与控制问题,使得多个卫星之间的协同控制与管理成为可能,卫星系统应用效能得到显著提高。在下一步开展的天基基础设施建设阶段,为了发展自主、安全、可靠的各种在轨服务应用,提高在轨服务效益,必须首先解决航天器自主交会对接和各种近距离操作的动力学与控制问题。从上述技术发展路线可以看出,航天器动力学与控制研究从最初面向简单二体问题的绝对运动逐步发展到面向多个二体问题复合的相对运动,相对运动又从最初的交会对接、星座与编队飞行进一步发展到自主交会对接和复杂的近距离操作。因此从一定意义上说,对航天器相对运动的研究也从一个侧面反映了航天器技术的发展方向与趋势。

## 1.1 航天器相对运动

### 1.1.1 航天器相对运动概念

航天器相对运动是指在同一引力场作用下,一个或一组航天器相对于目标航天器或虚拟航天器的运动。与航天器绝对运动(经典轨道运动)相比,航天器相对运动研究的问题变化形式更多、影响因素更复杂。以近地轨道空间为例,经典轨道运动主要研究航天器在地心引力、摄动力和控制力作用下绕地球的运动轨迹与规律,主要解决面向地面应用的轨道设计、保持与变轨机动问题;航天器相对运动则主要研究任务航天器在地心引力、摄动力和控制力作用下相对目标航天器的运动轨迹与规律,主要解决以目标航天器为参考系的轨道构形、转移轨迹和控制策略等问题。比较而言,虽然不同类型的航天器相对运动研究问题各有侧重,但都涉及到航天器之间的相对位置或方位的确定、变化与保持,都提出了高精度相对导航、避免碰撞和节省能量的技术要求。因此,相对导航策略、安全轨迹设计、鲁棒性控制等就成为航天器各种相对运动都具有的普遍性问题,体现了航天器相对运动研究的特点与共性。

从最基本的运动规律分析,航天器经典轨道运动是由地球引力决定的;而航天器相对运动不是由航天器之间产生的引力,而是由地球对不同航天器作用引力的差来决定的。

### 1.1.2 典型相对运动类型

按照应用模式不同,航天器相对运动可划分为空间交会、编队飞行、近距离观测和空间机器人抓捕等类型。

#### 1.1.2.1 空间交会

空间交会是指一个航天器(追踪航天器)通过执行一系列轨道机动,与另一个在稳定轨道上运行的航天器(目标航天器)在空间预定位置和时间相会,如图 1.1 所示。一般而言,空间交会应用可分为两类:一类面向空间对接,交会后两个航天器在结构上连成一个整体,交会时相对速度应尽可能小;另一类面向空间拦截,交会后两个航天器发生碰撞,对交会时相对速度无需约束。第一类应用是最常见的情景,因此,空间交会往往与对接联系在一起,实际上空间交会对接已经成为航天专用术语,描述两个航天器逐渐接近进而连成一个整体的任务过程<sup>[1]</sup>。

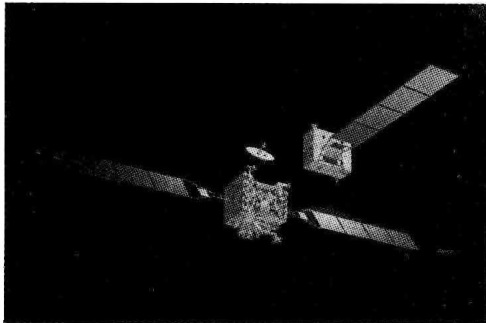


图 1.1 空间交会示意图

空间交会飞行过程一般分为远程导引段、近程导引段和最后逼近段三个阶段。远程导引段(也称调相段)是指追踪航天器在地面控制下,通过若干次轨道机动,从入轨点到星上传感器捕获到目标航天器为

止。近程导引段从星上传感器捕获到目标航天器起,到控制系统将追踪航天器引导到目标航天器附近某一点为止。根据控制目标及任务不同,近程导引段通常又可细分为寻的段和接近段:寻的段的主要任务是捕获目标轨道,减小轨迹散布,保证接近段初始点所需的位置与速度要求;接近段的任务是进一步减小两个航天器的相对距离,为最后逼近段提供合适的位置、速度、相对姿态和角速度条件。最后逼近段是指从追踪航天器进入接近走廊开始,到两个航天器对接机构开始接触为止,目标是使位置、速度、相对姿态和角速度满足对接条件。实际上接近段和最后逼近段并无明确界限。就航天器相对运动轨迹规划与控制而言,空间交会需要解决的关键问题就是在满足各种约束条件下寻找优化或可行的交会接近轨迹,并且提供安全、可靠的鲁棒性控制策略与算法。

#### 1.1.2.2 编队飞行

编队飞行<sup>[2-4]</sup>是20世纪90年代后期,随着现代小卫星技术的迅速发展而出现的一种新的航天器空间运行模式,由一群相距很近、分布在特定轨道构形上、物理上不相连的成员航天器组成,各航天器在围绕地球运行的同时,彼此之间形成特定的编队构形;在运行过程中,各航天器彼此联系密切,通过星间通信链路和信息耦合实现信息共享,统一规划各航天器的运动状态,维持特定的相对位置关系,协同完成特定的空间任务,如图1.2所示。

从航天器相对运动分析,编队飞行的本质特点就是按照任务要求,实现对多个航天器相对位置关系的优化选择与控制,涉及的关键技术主要包括星间相对导航、编队构形分析与设计、编队构形初始化与重构、编队构形保持等<sup>[3,4]</sup>。星间相对导航是指获得成员航天器之间精确的相对位置、速度与指向等状态信息,是实现编队飞行任务的前提。由于地面测控方式存在测量时间受限、实时性差、精度低等问题,因此星间相对导航必须采用高精度的实时自主相对导航方式。编队构形分析与设计主要根据编队任务要求或提高编队系统性能的需求出发,依据航天器相对运动规律进行分析,设计出满足要求的编队构形,并能有一定意义下进行优化,得到编队构形参数和各成员航天器的轨道根数。



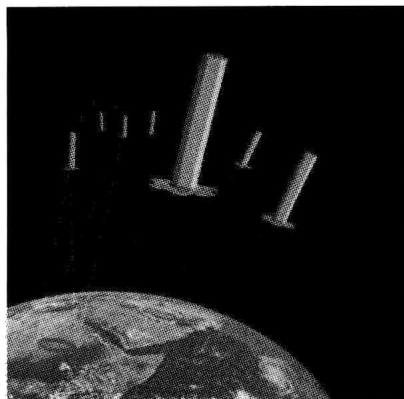


图 1.2 航天器编队飞行示意图

编队构形初始化是指从航天器发射入轨到建立起任务要求的编队构形这一控制过程；编队重构是指能够根据需求调整编队构形以实现不同的任务目标。比较而言，构形初始化控制比较简单，重构控制则要考虑碰撞避免、推力约束等复杂因素。编队构形保持是指通过控制来克服各种摄动因素对编队构形的影响，使编队构形变化维持在允许的范围内，其控制律的确定与星间相对导航信息、推力器工作特性以及有效载荷对控制的约束有关，必须根据任务的具体情况来选择合适的控制律。

### 1.1.2.3 近距离观测

随着在轨航天器数量和机动能力的提高，对航天器实施近距离观测，作为空间态势感知的一个有效途径而得到高度重视，成为一类日渐增多的空间任务。近距离观测是指一个航天器（观测航天器）在近距离范围内形成对另一个航天器（目标航天器）便于观测的相对运动轨迹，实现对目标航天器特征与状态有目的的、持续有序的观测与监视，从而了解和掌握目标航天器的外部形状、运动状态、机动意图、故障现象甚至信号特征等相关信息，为空间态势感知和在轨服务提供信息支持与保障，如图 1.3 所示。

从本质上讲，近距离观测就是根据任务特点进行观测轨迹规划与控制，能够完成从不同位置、不同方位、不同要求（重复观测、扫描观