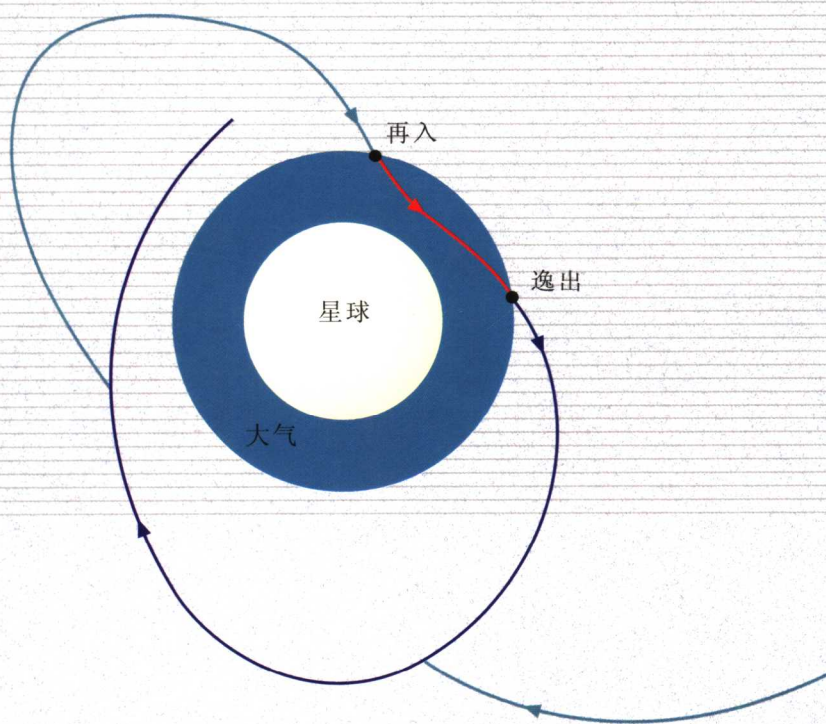


航天器气动力辅助变轨 动力学与最优控制

吴德隆 王小军 著



中国宇航出版社

航天器气动力辅助变轨 动力学与最优控制

吴德隆 王小军 著

 中国宇航出版社

· 北京 ·

Aeroassisted Orbit Transfer Dynamics and Optimal Control for Spacecraft

Wu Delong Wang Xiaojun

China Astronautics Publishing House

• Beijing •

版权所有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

航天器气动力辅助变轨动力学与最优控制/吴德隆,王小军著. —北京:中国宇航出版社, 2006.5

ISBN 7-80218-031-7

I. 航... II. ①吴...②王... III. 航天器—空气动力学 IV. V411

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 015555 号

责任编辑 张卉竹 装帧设计 03 工舍 责任校对 王妍

出版 中国宇航出版社
发行

社址 北京市阜成路 8 号 邮编 100830
(010)68768548

网址 www.caphbook.com/www.caphbook.com.cn

经销 新华书店

发行部 (010)68371900 (010)88530478(传真)
(010)68768541 (010)68767294(传真)

零售店 读者服务部 北京宇航文苑
(010)68371105 (010)62529336

承印 北京智力达印刷有限公司

版次 2006 年 5 月第 1 版
2006 年 5 月第 1 次印刷

规格 787 × 1092

开本 1/16

印张 19.25

字数 473 千字

书号 ISBN 7-80218-031-7

定价 58.00 元

本书如有印装质量问题,可与发行部调换

前 言

《航天器气动力辅助变轨动力学与最优控制》是在作者承担国家自然科学基金课题“航天器气动辅助变轨动力学与控制”研究总结的基础上撰写的一本专著。从课题研究“动力学与控制”到“动力学与最优控制”不仅内容上逐步深入,而且,在学科交融方面更加互补互促,构成宇航学科中一门学科交叉的新分支。这个新分支的主要内容:研究再入地球大气层飞行和从地球到其他星球及其返回的星际航行的轨道动力学,和其轨道参量的最优控制问题,以使担负给定飞行任务的飞行器获得最低成本飞行。最优控制源自数学,因而这个新的学科分支既可看作是数学力学理论的最新发展,又可看作是力学和控制理论在宇航工程中应用的最新成就。作者以近十多年指导飞行器设计专业研究生课题研究工作,特别是指导以国家自然科学基金课题为研究内容的博士生和博士后的研究工作,并结合自己长期从事航天工程设计与研究的经验,完成本书的写作。尽管气动力辅助变轨是20世纪60年代提出的,但是至今国内外尚无一本系统的理论分析与工程应用专著,本书的出版填补了这个空白。作者在这个领域的研究工作起自20世纪90年代初,至今已近十年,而这十多年国内外的科学家和工程师在这个领域的学术研究和工程应用都非常活跃。本书尽可能反映这些新进展,以推动这个新学科分支的发展。

本书分上下两篇,上篇13章,详细讨论最优气动力辅助变轨。第1章,概述了气动力辅助变轨与最优控制的研究进展;第2章从近代数学优化理论角度讨论最优控制的基本理论和求解方法;第3章讨论飞行器运动方程;第4章从飞行器设计角度来讨论优化变轨性能指标和各种参数对变轨的影响;第5章到第8章分别讨论气动力辅助平面变轨、异面变轨以及热流限制和过载限制下变轨问题;第9章讨论气动力和推力协同作用下的优化变轨问题,特别讨论了奇异最优控制问题及其在协同变轨中的应用;第10章讨论基于时间最小、能耗最小以及脱靶量最小等性能指标的气动力辅助空间拦截和交会,不仅涉及到军事应用,还涉及空间救生和交会的机动变轨飞行问题;第11章是基于气动力辅助变轨的最优控制要求,把气动外形参数或与之关联的气动性能参数,如升阻比作为控制变量,提出变气动外形飞行器新概念研究,以解决不同轨道任务特别是上升和再入对气动性能参数要求不一致的优化设计问题;第12章针对星际航行任务讨论气动力辅助变轨和气动力辅助引力转弯在轨道设计中的应用,并从气动力辅助引力转弯轨道设计角度讨论一类降低阻力损失和减少飞行时间的波载飞行器概念,这是一类在超声速和高超声速下获得高升阻比的升力式飞行器;第13章讨论了气动力辅助变轨的制导与控制问题。从第9章到第13章包含了近年来作者和国内外学者的一些最新研究成果。下篇包含了大气层外最优变轨的两个专题研究。王小军博士主写第5、第6、第14、第15章,以及第1至第3章部分小节;张海联博士主写第7、第8章并完成第10、第12、第13章部分小节的整理。其余各章和全书的统稿、修改和补充均由吴德隆研究员完成,

余梦伦院士曾参与该项自然科学基金课题的研究工作和博士生的教学与指导工作。由于工作繁忙，本书从约稿到定稿历时约3年。在此期间，彭伟斌、李海阳两位博士后和王江博士为书稿的整理做了大量的工作；同时，作者还将书中一些新的进展和研究提炼成文发表，以广泛征集同行专家、学者的意见。

对余梦伦和朱森元两位院士的推荐和审稿，以及陈士橹院士，任萱、肖业伦、杨涤三位教授的指教和审稿深表感谢。同样，感谢国家自然科学基金委和国家高技术发展计划863—702专题的大力支持与帮助。

本书的出版得到北京宇航系统工程研究所及其人力资源处领导、工作人员的关怀和支持；以及中国宇航出版社领导、编辑人员的大力支持，特别是责任编辑的辛勤工作和热情帮助，在此一并表示衷心感谢。

本书内容较新，限于笔者学术水平有限，错误在所难免，恳请读者批评指正。

作者

2002年9月初稿

2003年12月修改

2005年7月定稿

Preface

Based on the research and summation of the project on *Aeroassisted Orbit Transfer Dynamics and Optimal Control for Spacecraft* funded by National Natural Science Foundation of China (NNSF), the book *Aeroassisted Orbit Transfer Dynamics and Optimal Control for Spacecraft* has been written, which obviously not only deepens the study from dynamics and control to dynamics and optimal control, but also formulates a new interdisciplinary branch in astronautic science. The new branch covers orbital dynamics and optimal control of orbital parameters for the reentry of atmospheric flight and interplanetary flight between earth and other planets in order to significantly reduce propellant consumption, that means to achieve low cost of space transportation. Optimal control stems from mathematics. Therefore the new branch can be considered as not only the further development of mathematics, mechanics theory, but also new achievements of application of dynamics and control theory in field of astronautic engineering. The authors have devoted great efforts into the book. They take the advantages of scientific research for decade in instructing postgraduates majored in spacecraft design, especially those doctors and post-doctors engaged in the project funded by NNSF and rich experiences in space engineering design and research. Aeroassisted orbit transfer was proposed in the 1960s. However, there is still no related book in China with systematic theory analysis and engineering application. The publication of the book will fill the gap. The authors have engaged in the study since early 1990s. During the decade, scientists and engineers at home and board are very active in fields of academic research and engineering application. The book tries to include all the new developments to promote the advance of the new branch.

The book is classified into Part I and Part II. Part I include 13 chapters, discussing aeroassisted orbit transfer in detail. The Introduction summarizes the research progress of aeroassisted orbit transfer and optimal control. Chapter 2 discusses the basic theory and solutions in terms of neoteric mathematical optimization theory. Chapter 3 addresses the motion equation of spacecraft. Chapter 4 describes the optimization of orbit transfer parameters and the influence of various parameters on orbit transfer. From Chapter 5 to Chapter 8, aeroassisted coplanar orbit transfer and noncoplanar orbit transfer and orbit transfer with heating rate and deceleration constraints are discussed. Chapter 9 addresses the optimization of orbit transfer with the combined action of aerodynamic force and thrust, especially singular optimal control and its application in synergic orbit transfer. Chapter 10 introduces aeroassisted orbital interception and rendezvous with minimum target-escape, fuel-consumption and flight time. It involves

both military application and maneuvering orbit transfer for space lifesaving and rendezvous. In Chapter 11, aerodynamic shape parameters and related aerodynamic parameters, such as lift-drag ratio, are considered as control variables, according to the requirements for optimal control of aeroassisted orbit transfer. New concept is proposed of spacecraft with variable aerodynamic shape to realize optimal design for different orbital missions, especially when the requirements between ascent and reentry phase are different for aerodynamic parameters. Chapter 12 discusses the application in orbit design of aeroassisted orbit transfer and aerogravity-assist in interplanetary flight. Furthermore, waveriders are introduced which reduce resistance loss and flight time. The waveriders are lift-body vehicles with high lift-drag ratio at supersonic and hypersonic speed. Chapter 13 describes the guidance and control for aeroassisted orbit transfer. New research achievements of the authors and researchers in the world are included in Chapter 9—13. Part II of the book covers two special research subjects of exoatmospheric optimal orbit transfer.

The Authors

First draft completed in September 2002

Revision completed in December 2003

Final text completed in July 2005

序

《航天器气动力辅助变轨动力学与最优控制》是一部全面、系统、深入的理论与应用专著，论述了气动共面、异面和推力协同变轨，气动拦截与交会，气动引力转弯，变气动外形飞行、着陆与返回，以及这些轨道转移在给定约束条件下，如燃料消耗、热流、过载、动压和飞行高度降等，最优轨道设计和其控制策略。作者在总结近年来国内外的研究新进展的基础上，结合自己长期从事航天工程设计的经验，和近十多年的科研与教学实践，撰写了这部专著，学术思想活跃、创新，富有开拓性，研究成果卓著。该书是数学力学与宇航科学相结合的一个学科新分支，其系统研究的内容在国内外甚少见到，填补了这个领域的空白。该专著对我国当前和未来的航天任务，如再入大气层飞行、星际航行和深空探测将会作出重要贡献，因而是一部理论和应用价值很突出的优秀著作。

王永志

2004年3月

Foreword

Aeroassisted Orbit Transfer Dynamics and Optimal Control for Spacecraft describes the aerodynamic coplanar, noncoplanar and synergetic orbit transfer with thrust programming, aeroassisted orbital interception and rendezvous, aerogravity-assist, flight with variable aerodynamic shape, landing and return, and optimal orbit design and orbit control strategy under such given constraint conditions as fuel consumption, peak heating rate, peak deceleration, peak dynamic pressure and peak altitude drop and so on.

The book highlights the research achievements on the frontier, combining mathematics, mechanics and astronautics. It is innovative and closed with present and future space missions. The authors has completed the high level academic work in great efforts on the basis of recent development achievements in the world, taking the advantages of rich experience in space engineering design and scientific research and teaching practices for decade. The book is comprehensive, systematic, probes deeply and integrates theory with practice, which shows the authors' solid theory foundation and active academic thoughts.

The book is not only of significant value for space flight development of China, but also a good reference book for related scientific researchers, teachers and students of college and university.

Prof. Wang Yongzhi

Member of Chinese Academy of Science

Member of International Academy of Astronautics

Dean of School of Aerospace, Tsinghua University

**General Designer of Engineering of Chinese Manned
Astronavigation**

March 2004

目 录

上篇 最优气动力辅助变轨

第1章 绪 论	(3)
1.1 航天技术发展与气动力辅助变轨飞行器	(3)
1.2 气动力辅助变轨及其研究进展	(7)
1.2.1 最优大气辅助变轨理论简述	(7)
1.2.2 最优大气辅助变轨研究的进展	(10)
1.3 有限推力变轨及其研究进展	(13)
1.4 轨道优化理论与最优控制的研究进展	(14)
1.4.1 从古典变分到现代最优控制理论	(14)
1.4.2 最优变轨的制导方法研究	(16)
1.5 本书的主要研究内容	(16)
第2章 最优化理论及其求解方法	(18)
2.1 最优问题的提法	(18)
2.1.1 最优控制问题的数学描述	(18)
2.1.2 拉格朗日、迈耶、博尔扎和切比雪夫问题	(19)
2.1.3 最优解的存在性	(20)
2.2 变分法和最优控制问题的间接求解方法	(21)
2.2.1 最优控制问题中的变分法	(21)
2.2.2 间接法中的D型拉格朗日函数	(22)
2.2.3 间接法中P型拉格朗日函数	(24)
2.2.4 庞特里亚金极大值原理和两点边值问题的数值解	(26)
2.3 极值弧	(28)
2.3.1 正常弧	(29)
2.3.2 奇异弧	(29)
2.3.3 连接条件	(30)
2.4 直接解法	(30)
第3章 飞行器运动方程	(34)
3.1 大气中飞行器运动方程	(34)
3.1.1 坐标及其坐标变换	(34)

3.1.2	大气层内的运动微分方程	(36)
3.1.3	地球(行星)大气旋转对飞行器运动的影响	(41)
3.2	大气飞行中飞行器的纵向运动方程和侧向运动方程	(43)
3.3	修正 Chapman 变量表示的运动方程及其改进方程	(44)
3.3.1	修正 Chapman 变量表示的运动方程	(44)
3.3.2	计及行星旋转大气的精确运动方程	(45)
3.3.3	四参数变分方程——精确运动方程的优化解	(46)
3.4	太阳系内飞行器航行的运动方程	(49)
3.4.1	在星际航行的运动方程	(49)
3.4.2	航天器在太阳坐标系与在行星坐标系运动参数之间转换	(50)
3.4.3	行星大气层内飞行运动方程	(51)
3.5	运动方程的简化式	(52)
第4章	优化变轨的性能指标和参数分析	(54)
4.1	空间飞行任务的低成本问题	(54)
4.1.1	轨道转移飞行	(55)
4.1.2	星际航行飞行	(58)
4.1.3	协同机动(Synergetic Maneuver)飞行	(61)
4.2	优化弹道的性能指标	(63)
4.2.1	性能指标	(63)
4.2.2	组合性能指标	(64)
4.3	气动辅助变轨的参数分析	(65)
4.3.1	升阻比对变轨性能的影响	(65)
4.3.2	弹道系数对变轨性能的影响	(67)
4.3.3	大气参数对变轨性能的影响	(69)
4.3.4	近地点高度对变轨性能的影响	(69)
4.3.5	最大升力系数对变轨性能的影响	(71)
第5章	燃料最省气动力辅助平面变轨	(72)
5.1	大气辅助平面变轨问题	(72)
5.2	最优大气飞行	(74)
5.3	边界条件分析	(76)
5.4	控制无约束问题的简化	(77)
5.5	数值算例及分析	(78)
第6章	燃料最省气动力辅助异面变轨	(86)
6.1	大气辅助异面优化变轨	(86)
6.2	边界条件分析	(89)
6.2.1	大气飞行段倾角变化量固定	(89)
6.2.2	大气飞行段倾角变化量最优	(90)

6.3	控制无约束问题的处理	(91)
6.4	数值算例及分析	(92)
第7章	热流限制下的最优气动力辅助变轨	(97)
7.1	变轨过程中的约束	(97)
7.2	平面最优变轨分析	(98)
7.3	异面最优变轨分析	(102)
7.4	数值算例	(105)
第8章	过载限制下的最优气动力辅助变轨	(113)
8.1	最优变轨问题的描述	(113)
8.2	变轨优化分析	(114)
8.3	数值算例及讨论	(117)
8.4	关于过载约束的讨论	(121)
8.5	过载限制下平衡滑行解	(122)
第9章	气动辅助变轨中的推力协同控制	(124)
9.1	问题的数学描述	(124)
9.2	推力协同下的最优控制	(125)
9.3	推力协同下的奇异优化问题	(127)
9.3.1	正常弧分析	(127)
9.3.2	奇异弧分析	(129)
9.4	优化弧段的连接条件	(132)
9.5	例题和结论	(135)
第10章	气动力辅助空间拦截和交会	(140)
10.1	空间拦截和交会问题的描述	(140)
10.2	拦截轨道优化的直接求解方法	(142)
10.3	拦截问题的直接解法的数值算例	(146)
10.3.1	时间最小优化解	(146)
10.3.2	耗能最小优化解	(151)
10.4	拦截轨道优化的间接求解方法	(152)
10.4.1	最优控制律	(152)
10.4.2	拦截轨道最优解	(155)
10.5	交会轨道优化的求解方法	(157)
第11章	基于气动辅助变轨的变气动外形飞行器	(158)
11.1	最优问题的描述	(158)
11.1.1	变气动外形与最优变轨	(159)
11.1.2	变气动外形下的优化控制律	(161)
11.2	变气动外形 AOTV 的二层优化问题	(162)
11.2.1	二层优化问题的数学描述	(162)

11.2.2	目标函数和约束方程	(163)
11.3	气动外形变化对轨道优化的影响	(165)
11.3.1	飞行器几何外形对优化上升轨道影响	(165)
11.3.2	最大升阻比变化对上升和再入轨道的影响	(169)
11.4	求解过程分析	(171)
11.4.1	(P1)问题中气动特性参数计算方法	(172)
11.4.2	(P2)问题求解的终端条件和约束条件	(173)
11.4.3	对给定的飞行条件,建立所需气动参数数据库	(173)
11.4.4	计算程序设计	(174)
第12章	星际航行中气动力辅助变轨	(176)
12.1	模型与假设	(176)
12.2	星际间航行轨道	(177)
12.2.1	系统方程	(177)
12.2.2	从地球到火星转移轨道的边界条件	(178)
12.2.3	经转移轨道从火星返回地球的边界条件	(179)
12.2.4	能量最省问题	(180)
12.2.5	快速转移问题	(181)
12.3	从行星起飞的低轨道的飞行	(181)
12.3.1	系统方程	(181)
12.3.2	边界条件	(182)
12.3.3	最优控制问题	(183)
12.4	星际航行中气动力辅助变轨	(183)
12.5	气动力辅助引力转弯	(188)
12.5.1	绕飞轨道分析	(189)
12.5.2	星际绕飞任务设计	(191)
12.5.3	讨论	(192)
第13章	气动力辅助变轨的控制	(194)
13.1	控制设计要求	(194)
13.1.1	轨道进入点和逸出点要求	(194)
13.1.2	稳定性分析	(196)
13.1.3	控制与制导方法	(196)
13.2	预测校正法和数值算例	(197)
13.2.1	目标函数与最优控制变量	(198)
13.2.2	安全区域制导	(199)
13.2.3	进入和逸出全制导	(201)
13.2.4	数值计算方法和推力协同的制导	(202)
13.3	显式制导律方法	(203)

13.3.1	匹配渐近展开法求轨道参数	(204)
13.3.2	高阶解问题	(206)
13.3.3	显式制导方程	(207)
13.4	能量控制器制导法	(210)
13.5	标准轨道法	(213)
13.5.1	纵向制导	(213)
13.5.2	侧向制导	(214)
13.5.3	纵向制导最佳反馈增益	(214)
附录 13. A		(218)
附录 13. B		(220)

下篇 大气层外最优变轨

第 14 章	最省燃料共面轨道有限推力变轨	(223)
14.1	共面轨道最优变轨理论分析	(223)
14.1.1	飞行器质心平面运动方程	(223)
14.1.2	最优控制分析	(224)
14.2	单次变轨的边界条件	(226)
14.2.1	目标轨道和初始轨道均为椭圆轨道	(226)
14.2.2	初始轨道和目标轨道均为圆轨道	(229)
14.2.3	初始轨道为圆轨道目标轨道为椭圆轨道	(229)
14.2.4	初始轨道为椭圆轨道目标轨道为圆轨道	(229)
14.2.5	积分终止条件的选择	(230)
14.2.6	小结	(230)
14.3	多次变轨的边界条件分析	(231)
14.4	多次变轨滑行段解析分析	(232)
14.5	多次变轨初始值分析	(234)
14.6	数值算例及分析	(236)
14.6.1	停泊轨道到同步转移轨道的最优变轨	(236)
14.6.2	同步转移轨道到同步轨道的最优变轨	(238)
14.6.3	相邻圆轨道的最优变轨	(239)
14.6.4	近地圆轨道到共面同步轨道的最优多次变轨	(240)
第 15 章	空间异面多次变轨	(244)
15.1	空间最优多次变轨理论	(244)
15.2	边界条件分析	(246)
15.3	滑行段解析分析	(248)
15.4	数值算例及分析	(250)

参考文献	(255)
附录 A 地球和大气模型	(272)
一、地球模型	(272)
二、大气模型	(272)
2.1 温度	(272)
2.2 压强	(273)
2.3 密度	(273)
附录 B 飞行器气动模型	(276)
一、气动力与阻力极线	(276)
1.1 抛物型阻力极线	(276)
1.2 椭圆型阻力极线	(277)
二、气动热	(278)
三、推力	(278)
附录 C 轨道参数与运动参数之间的关系(无量纲)	(279)
一、由运动参数求轨道参数	(279)
二、由轨道参数求运动参数	(279)

Contents

Part I Optimal Aeroassisted Orbit Transfer

Chapter1 Introduction	(3)
1. 1 Space Technology Development and Aeroassisted Orbit Transfer Spacecraft ...	(3)
1. 2 Aeroassisted Orbit Transfer and Its Research Development	(7)
1. 2. 1 Brief Introduction to Optimal Aeroassisted Orbit Transfer Theory	(7)
1. 2. 2 Research Progress of Optimal Aeroassisted Orbit Transfer	(10)
1. 3 Finite-thrust Orbit Transfer and Its Research Progress	(13)
1. 4 Orbit Optimal Theory and Research Development of Optimal Control	(14)
1. 4. 1 From Classical Variation Method to Modern Optimal Control Theory	(14)
1. 4. 2 Research on Guidance Method for Optimal Orbit Transfer	(16)
1. 5 Main Study Scope	(16)
Chapter2 Optimization Theory and Solution Method	(18)
2. 1 Formulation of Optimal Problem	(18)
2. 1. 1 Mathematical Description of Optimal Control Problems	(18)
2. 1. 2 Lagrange, Mayer, Barza and Chebyshev Problems	(19)
2. 1. 3 Existence of the Optimal Solution	(20)
2. 2 Indirect Solution Method for Variation Method and Optimal Control Problems	(21)
2. 2. 1 Variation Method in Optimal Control Problems	(21)
2. 2. 2 D-form Lagrangian Function in Indirect Method	(22)
2. 2. 3 P-form Lagrangian Function in Indirect Method	(24)
2. 2. 4 Pontryagin Maximum Principle and the Numerical Solution of Two-Point Boundary Value Problem	(26)
2. 3 Extreme Value Arc	(28)
2. 3. 1 Regular Arc	(29)
2. 3. 2 Singular Arc	(29)
2. 3. 3 Junction Condition	(30)
2. 4 Direct Solution Method	(30)
Chapter3 Motion Equation of Spacecraft	(34)