



中国航天科技前沿出版工程·中国航空间信息技术系列

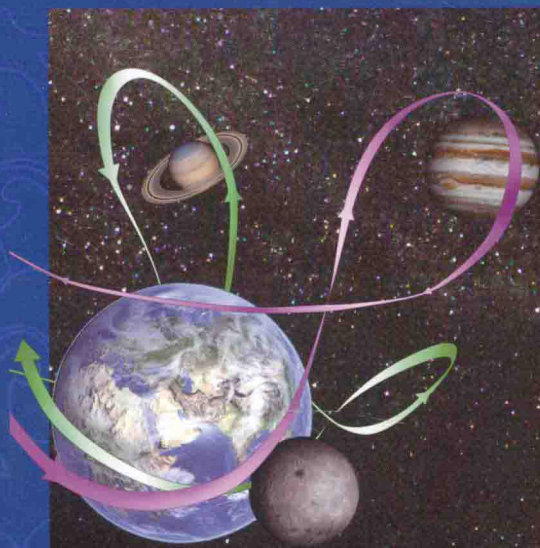
“十二五”国家重点图书出版规划项目



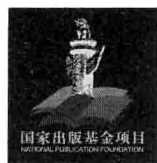
Dynamics and Control of Interplanetary Flight

深空探测动力学与控制

李俊峰 宝音贺西 蒋方华 著



清华大学出版社



中国航天科技前沿出版工程·中国

“十二五”国家重点图书出版规划项目

Dynamics and Control of Interplanetary Flight

深空探测动力学与控制

李俊峰 宝音贺西 蒋方华 著

清华大学出版社
北 京

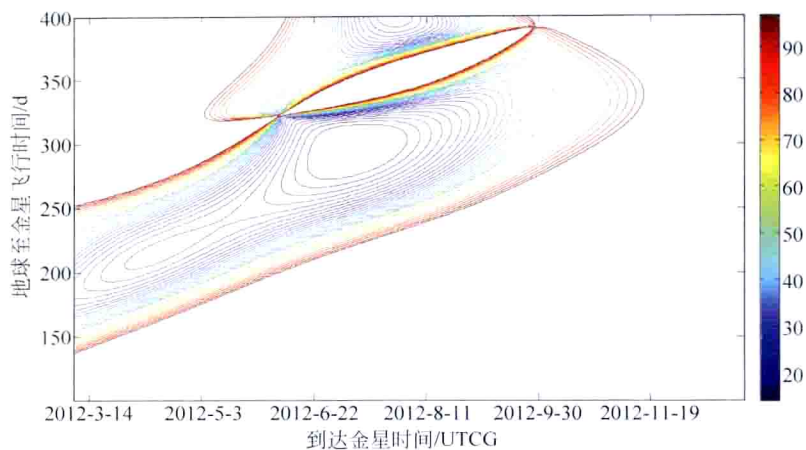


图 3.3 到达金星的 C_3 等高线图

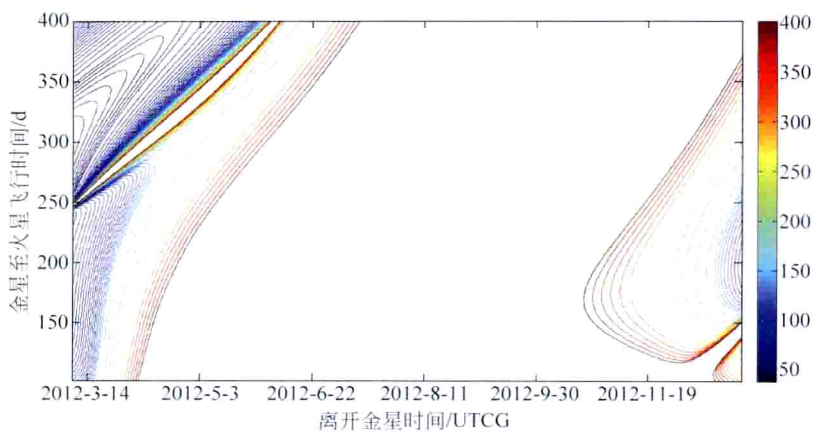


图 3.4 离开金星的 C_3 等高线图

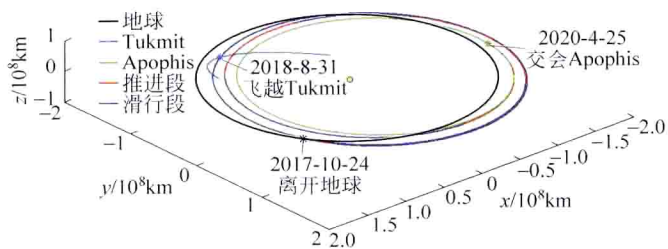


图 3.11 地球至 Apophis 的飞行轨道

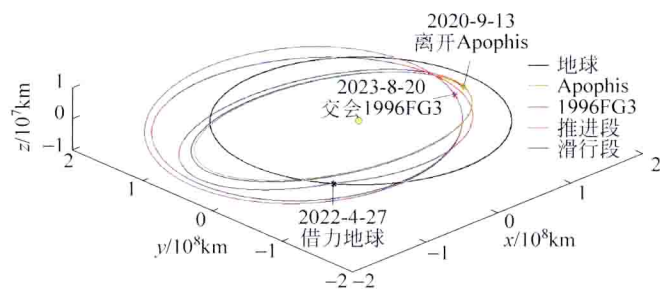


图 3.13 Apophis 至 1996FG3 的飞行轨迹

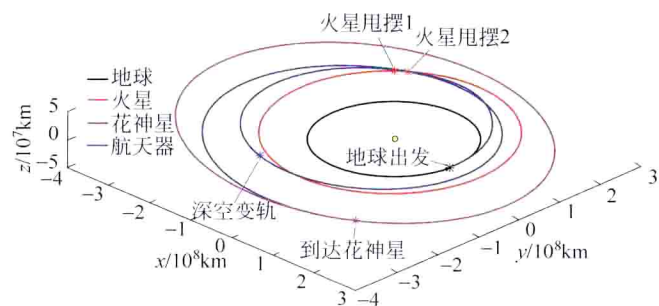


图 3.21 两次火星引力辅助至 Flora 的轨道

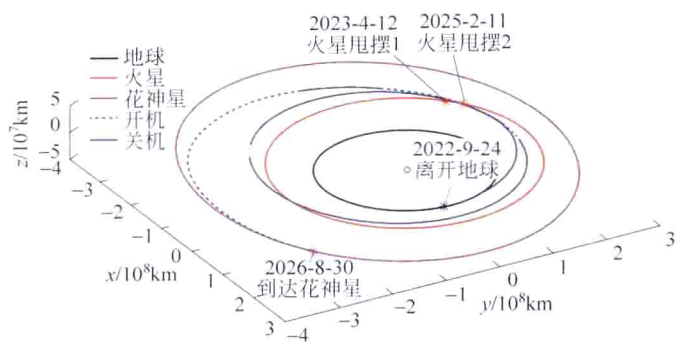


图 3.25 电推进转移轨道示意图

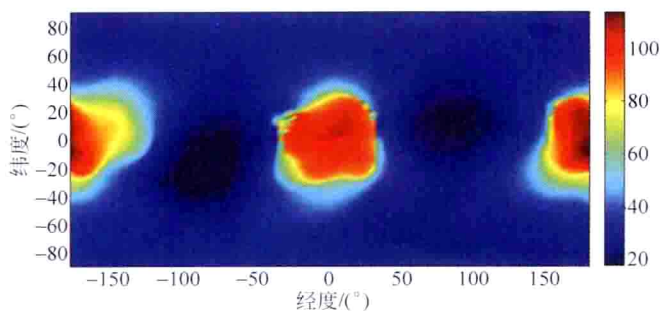


图 7.12 Kleopatra 的地形等高图(单位: km)

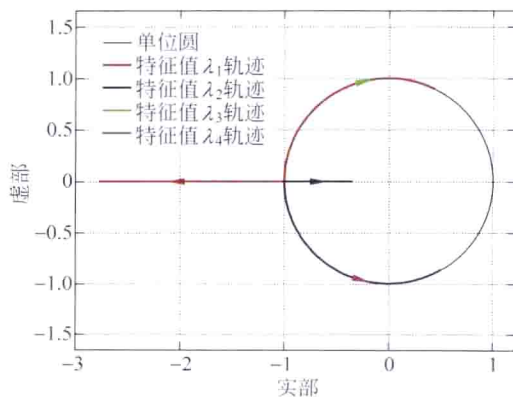


图 7.24 轨道族 7 的特征乘子在复平面内的轨迹(λ_1 、 λ_2 、 λ_3 、 λ_4 的轨迹分别以红色、蓝色、绿色和紫色表示,箭头指示了随着雅可比积分值增加轨迹的方向。黑色的圆周表示单位圆)

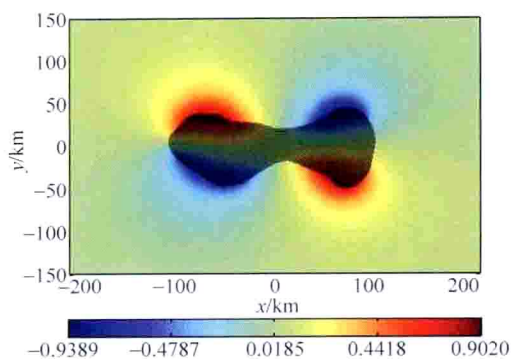


图 7.25 功率场在 Kleopatra 赤道面($z=0$)内的分布图(颜色代表幅值, 单位: m^2/s^3 , 黑色阴影区域表示小行星本体覆盖的范围)

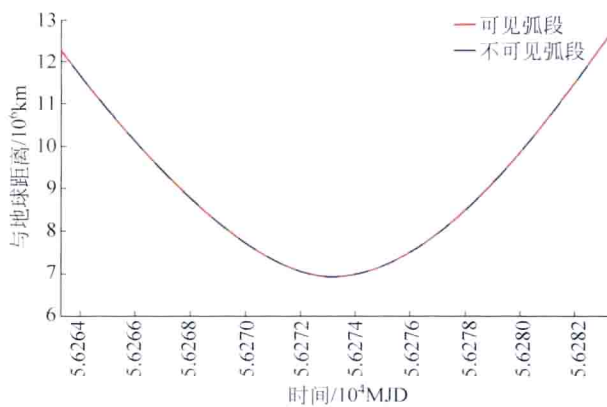


图 8.23 小行星 4179 接近地球过程中的地面测控覆盖情况

自 1959 年苏联成功发射了“月球”2 号探测器以来,世界各国发射的包括月球探测器在内的深空探测器达到了 240 多颗。经过 20 世纪 80 年代短暂的低潮后,进入 21 世纪,航天界迎来了第二次深空探测热潮。与此同时,我国成功发射了“嫦娥”系列月球探测器,提出了以月球探测为突破口,开展深空探测活动的策略,对火星及更远天体的探测正在论证和规划。早期的深空探测器轨道控制与设计方法基于的动力学模型是简单的二体模型,轨道推进使用可等效为脉冲的大推力化学推进。然而,第二次深空探测热潮更加强调方案和技术创新,如提出了拉格朗日点附近的周期轨道、悬浮轨道、两个天体的引力平衡点附近飞行的晕轨道等多种新型的任务轨道;在轨道推进上青睐更高效的方式,如采用产生连续小推力的离子电推进技术、巧妙利用行星引力辅助、探索太阳帆和磁帆等新概念飞行器;倾向于多种类型的导航技术,如大功率地面测控技术和自主导航技术;探测目标的选择更加广泛,如近地小行星、柯伊伯带小天体等,及一次探测多个目标的多任务探测。这些新型的任务轨道和推进方式可以以较低的成本实现更多的任务,相应的轨道动力学研究涉及 N 体系统、不规则弱引力场特性等,还需要研究连续推力作用下的轨道设计与控制方法等。

作者团队近 20 年来一直从事航天器动力学与控制方面的研究工作,前期主要针对的是近地航天器,近 10 年来转向深空探测。本书是作者团队近 10 年在深空探测动力学与控制方面研究成果的系统总结,其中主要包括了 4 位教师、8 位博士研究生和 5 位硕士研究生的研究成果。全书由 11 章内容组成。第 0 章是绪论,是整书的引导和概要介绍,为了方便读者阅读本书各个章节的专题内容,以综述的形式集中介绍了共性基础,及其与本书重点研究问题的关系。除绪论外,每一章都是一个专题研究。

第 1 章以火星探测任务为背景,系统地研究并介绍脉冲推进模型下行星探测轨道优化设计方法。第 2 章以光学自主导航为例,系统地研究并介绍深空自主导航的基本概念和方法。第 3 章系统地研究引力辅助技术,其中有复杂的优化问题迄今尚未彻底解决。第 4~6 章研究连续推力模型下的深空轨迹优化方法,这是近几年国际上的热点问题,也是理论上尚未完全解决的难题。其中第 4 章介绍基本方法;第 5 章研究与同伦方法相结合的

间接优化法；第6章研究运用伪普法的直接优化法。第7章研究小行星附近不规则引力场中的轨道理论，这是近年新兴起的课题，也是尚未形成完整理论体系的问题。第8章研究小行星探测制导与控制问题，给出附着、伴飞和飞越探测制导与控制的典型方法。第9章研究三体问题中轨道问题，包括拉格朗日点附近的轨道理论，以及与其相关的不变流形及其之上的轨道设计方法。第10章研究太阳帆飞行器新型任务轨道，给出逆向轨道、双逆向轨道等若干种新型轨道。

本书的绪论由李俊峰、宝音贺西编写，第1章由李俊峰、李军锋编写，第2章由宝音贺西、崔文编写，第3章由李俊峰、陈杨编写，第4章由宝音贺西、蒋方华、郭铁丁编写，第5章由蒋方华、李俊峰编写，第6章由李俊峰、郭铁丁、蒋方华编写，第7章由宝音贺西、于洋编写，第8章由宝音贺西、陈杨编写，第9章由龚胜平、宝音贺西编写，第10章由李俊峰、曾祥远编写。书中的算例一部分由龚胜平博士和蒋方华博士完成，另一部分由研究生陈杨、于洋、郭铁丁、曾祥远、崔文、李军锋完成。全书统稿由李俊峰、宝音贺西、蒋方华负责。

作者衷心感谢国家重点基础研究发展计划(“973”计划)“行星表面精确着陆导航与制导控制问题研究”(No. 2012CB720000)及国家自然科学基金重点项目“深空探测非线性动力学与控制若干问题研究”(No. 10832004)的资助。

部分英文术语释义(按字母顺序排列)

英文名词	英文(含其他语种)全称, 中文翻译
Apollo-8	“阿波罗”8号
Apollo-17	“阿波罗”17号
Apophis	阿波菲斯
ASI	Italian Space Agency, 意大利航天局
AU	Astronomical unit, 天文单位, $1\text{AU}=149\,597\,870.66\text{km}$
BepiColombo	“贝皮-哥伦布”号
BIH	Bureau International de l'Heure, 国际时间局
Cassini-Huygens	“卡西尼-惠更斯”号
Ceres	谷神星
CNES	Centre National d'Etudes Spatiales, 法国航天中心
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique, 法国国家科学研究院
Collocation method	配点法
CR3BP	圆形限制性三体问题
Curiosity	“好奇”号
Darwin	“达尔文”任务
Dawn	“黎明”号
Deep Impact	“深空撞击”任务
Deep Space-1	“深空”1号
Direct transcription method	直接转录法
Don Quijote	“唐吉珂德”号
Double H-reversal trajectory	双逆向周期轨道
EKF	Extended Kalman Filter, 扩展卡尔曼滤波
Eros	爱神星
ESA	European Space Agency, 欧洲空间局
ESA-Advanced Concepts Team	欧空局先进概念组
Europa Lander	“木卫二登陆者”号
Floquet theory	弗洛凯理论
Flora	花神星
Flora family	花神星族
GA	Genetic Algorithm, 遗传算法

Galileo	“伽利略”号
Genesis	“起源”号
GTOC	Global Trajectory Optimisation Competition, 国际深空轨迹优化竞赛
Gravitational keyhole	引力锁眼
Gravity assist	引力辅助
Halo orbit	晕轨道, Halo 轨道
Harmonic expansion	球谐函数方法
Hayabusa	“隼鸟”号
Highly non-Keplerian orbit	高度非开普勒轨道
Hope	“希望”号
IKAROS	Interplanetary Kite-craft Accelerated by Radiation Of the Sun, “伊卡洛斯”号
Interplanetary Superhighway	行星际高速公路
Interstellar mission	恒星际探测任务
Invariant manifold	不变流形
ISAS	Institute of Space and Astronautical Science, 日本宇宙科学研究所
ISEE-3	International Sun-Earth Explorer-3, “国际日地探测器”3 号
JAXA	Japan Aerospace Exploration Agency, 日本宇宙航空研究开发机构
JEO	Jupiter Europa Orbiter, “木卫二轨道器”
JGO	Jupiter Ganymede Orbiter, “木卫三轨道器”
JPL	Jet Propulsion Laboratory, 美国喷气推进实验室
Juno	“朱诺”号
KKT	Karush-Kuhn-Tucker
Kuiper belt	柯伊伯带
Lambert	兰伯特
Laplace	“拉普拉斯”木星探测计划
LINEAR	Lincoln Near-Earth Asteroid Research, 林肯近地小行星研究小组
Lissajous orbit	李萨如轨道
Luna-2	“月球”2 号
Luna-3	“月球”3 号
Mariner-10	“水手”10 号
Mariner-9	“水手”9 号
Mars Exploration Rover	“火星漫游者”任务
Mars Express	“火星快车”任务

Mars Global Surveyor	“火星全球勘探者”号
Mars Odyssey	“火星奥德赛”号
Mars Pathfinder	“火星探路者”号
MRO	Mars Reconnaissance Orbiter, “火星侦查轨道器”号
Mars Science Laboratory	“火星科学实验室”任务
Mars-1	“火星”1号
Mars-2	“火星”2号
Mars-3	“火星”3号
Marsnik-1	“火星探测器”1号
Marsnik-2	“火星探测器”2号
Mass concentrations	质点群方法
Messenger	“信使”号
MAXIM	Micro-Arcsecond X-Ray Imaging Mission
MPBVP	Multi-Point Boundary-Value Problem, 多点边值问题
Muses	Mu Space Engineering Spacecraft, “缪斯”任务
Muses-A	“缪斯”A号
Muses-B	“缪斯”B号
NanoSail-D	“纳帆”D号
NASA	National Aeronautics and Space Administration, 美国宇航局
NEAR Shoemaker	NEAR (Near Earth Asteroid Rendezvous) Shoemaker, “尼尔鞋匠”号
NEAT	Near-Earth Asteroid Tracking, 近地小行星跟踪小组
New Horizons	“新地平线”号
Non-Keplerian Orbit	非开普勒轨道
Opportunity	“机遇”号
OSIRIS-REx	Origins Spectral Interpretation Resource Identification Security Regolith Explorer, 源光谱释义资源安全风化层辨认探测器
PSO	粒子群优化算法, Particle Swarm Optimization
Phobos-1	“火卫一”1号
Phobos-2	“火卫一”2号
Phobos-Grunt	“福布斯-土壤”号
Phoenix	“凤凰”号
Pioneer-10	“先驱者”10号
Planck	“普朗克”号(航天器)
Planetary Science Institute in Tucson	美国图森行星科学研究所
Polyhedral approach	多面体方法
Pontryagin	庞特里亚金

Pork-chop	猪排图
Powered gravity assist	动力甩摆
Pseudospectral knotting method	带结伪谱法
Reference signal	参考信号
Rosetta	“罗塞塔”号
SERT-1	Space Electric Rocket Test 1, “太空电火箭试验”1号
SERT-2	Space Electric Rocket Test 2, “太空电火箭试验”2号
SMART-1	Small Missions for Advanced Research in Technology-1, 欧空局的月球探测器“小型先进技术研究飞行任务”1号
SOHO	Solar and Heliospheric Observatory, ESA 和 NASA 发射的太阳观测航天器“太阳和太阳风层探测器”
Solar Sail Spacecraft/ Sailcraft	太阳帆航天器
Spirit	“勇气”号
Stardust	“星尘”号
Swing-by	引力甩摆
TAI	International Atomic Time, 国际原子时
TDT	Terrestrial Dynamical Time, 地球动力学时
TPBVP	Two-Point Boundary-Value Problem, 两点边值问题
TPF	Terrestrial Planet Finder, 类地行星搜索者
UKF	Unscented Kalman Filter, 无迹卡尔曼滤波
Ulysses	“尤利西斯”号
UT	Unscented Transform, 无迹变换
UTC	Coordinated Universal Time, 协调世界时
Vesta	灶神星
Viking-1	“海盗”1号
Viking-2	“海盗”2号
Voyager-1	“旅行者”1号
Voyager-2	“旅行者”2号
Weakly stable boundary	弱稳定边界
WIND	NASA 发射的拉格朗日点探测器
WLS	Weighted Least Squares, 加权最小二乘算法

第 0 章 绪论	1
0.1 深空探测的意义	2
0.2 深空探测概况	2
0.3 深空探测动力学与控制新问题	4
0.4 本书的内容	5
0.4.1 脉冲推进和连续小推力轨道设计	5
0.4.2 深空探测自主导航技术	7
0.4.3 引力辅助技术及其在深空探测中的应用	9
0.4.4 小行星附近的轨道及轨道控制	11
0.4.5 拉格朗日点周围的轨道	13
0.4.6 不变流形及其在深空探测中的应用	15
0.4.7 太阳帆航天器在深空探测中的应用	16
参考文献	17
 第 1 章 脉冲推进深空探测轨道设计	25
1.1 引言	26
1.1.1 国外火星探测情况	26
1.1.2 本章内容和方法	28
1.2 转移轨道初步设计	30
1.2.1 日心轨道设计和发射窗口选择	30
1.2.2 地心段参数设计	33
1.2.3 火心段参数设计	38
1.3 精确模型下轨道参数修正	40
1.4 中途修正	42
1.4.1 国外深空任务中途修正案例	42
1.4.2 中途修正的理论基础	44
1.4.3 日心段中途修正策略	47
1.4.4 中途修正策略仿真及分析	50
1.5 捕获控制	54

1.5.1	行星捕获问题	55
1.5.2	燃料最优捕获策略	59
1.5.3	其他推力模型捕获参数优化问题	61
1.5.4	误差分析	64
1.6	本章小结	66
	参考文献	67
第2章	深空探测光学自主导航	69
2.1	引言	70
2.1.1	深空导航的发展概况	71
2.1.2	深空自主导航系统中的光学敏感器	72
2.1.3	主要研究方法	73
2.2	深空探测自主导航建模及算法	75
2.2.1	时间及坐标系统	75
2.2.2	巡航段动力学模型	77
2.2.3	接近段动力学模型	78
2.2.4	光学自主导航观测模型	78
2.2.5	滤波算法	80
2.3	火星探测巡航段的光学自主导航方法	84
2.3.1	火星探测巡航段的标称轨道	84
2.3.2	巡航段中的光学自主导航原理	85
2.3.3	导航小行星筛选	87
2.3.4	仿真计算及分析	90
2.4	火星探测接近段中的光学自主导航方法	96
2.4.1	火星探测接近段的标称轨道	96
2.4.2	导航系统在接近段的可观测性	97
2.4.3	仿真计算及分析	98
2.5	本章小结	101
	参考文献	102
第3章	深空探测引力辅助	107
3.1	引言	108
3.2	行星引力辅助的原理	110

3.2.1	引力辅助简化模型	110
3.2.2	动力甩摆	112
3.2.3	引力辅助轨道设计与优化方法	115
3.2.4	引力辅助作用效果分析	120
3.2.5	共振借力轨道及其应用	125
3.3	引力辅助方式选择与轨道设计	127
3.3.1	近地小行星探测	127
3.3.2	主带小行星探测	133
3.3.3	木星探测	144
3.4	精确动力学模型中的引力辅助	155
3.4.1	简单模型中的轨道初步设计	156
3.4.2	精确动力学模型中的轨道修正	158
3.4.3	设计算例与分析	161
3.4.4	小结	164
	参考文献	164
第 4 章	连续推力深空探测轨道设计	167
4.1	引言	168
4.2	直接法	172
4.2.1	研究现状	172
4.2.2	轨迹优化设计的直接法	174
4.3	间接法	176
4.3.1	研究现状	176
4.3.2	轨迹优化设计的间接法	178
4.3.3	间接法应用于深空轨道设计算例	181
4.4	混合法	183
4.5	本章小结	183
	参考文献	184
第 5 章	连续推力轨迹优化的同伦方法	191
5.1	连续推力轨迹优化与设计技术现状	192
5.2	深空探测优化问题	195
5.2.1	时间最优问题	195

5.2.2	燃料最优问题	196
5.3	约束处理	197
5.3.1	端点时间和状态给定的约束	200
5.3.2	初始时间和状态受约束	200
5.3.3	末端时间和状态受约束	201
5.3.4	中途飞越的内点约束	201
5.3.5	中途交会的内点约束	202
5.3.6	中途引力辅助的内点约束	203
5.4	燃料最优问题同伦方法求解	205
5.4.1	协态变量初值归一化	207
5.4.2	带开关函数检测的定步长积分	208
5.4.3	运用粒子群优化算法的全局优化	211
5.4.4	非线性方程求解和求解策略总结	213
5.5	引力辅助的脉冲估计	214
5.6	数值算例	216
5.6.1	从地球到金星的交会问题	216
5.6.2	从地球到木星并利用火星引力辅助的交会问题	219
5.6.3	长任务时间的近地轨道转移	223
5.7	本章小结	226
	参考文献	227
第 6 章	连续推力轨迹优化的伪谱法	233
6.1	引言	234
6.2	伪谱法的理论基础	237
6.2.1	伪谱法的数学基础：函数/积分/微分的近似	237
6.2.2	伪谱法的优化基础：非线性规划问题与 KKT 条件	241
6.3	伪谱离散的轨迹优化问题	242
6.3.1	连续小推力轨迹优化	242
6.3.2	时间域离散与微分矩阵	242
6.3.3	伪谱离散的轨迹优化问题	244
6.3.4	非线性规划问题及其 KKT 条件	245
6.4	乘子等价映射与伪谱法应用	246
6.4.1	最优控制与两点边值问题	246
6.4.2	轨迹优化中的乘子等价映射	249

6.4.3	关于乘子等价映射的讨论	250
6.4.4	伪谱法求解能量最优轨迹	253
6.5	伪谱-同伦混合方法与 Bang-Bang 控制	259
6.5.1	伪谱法求解燃料最优轨迹的困难	259
6.5.2	同伦技术的初始化困难	261
6.5.3	伪谱-同伦混合方法	263
6.5.4	伪谱-同伦混合法求解燃料最优轨迹	264
6.6	分块伪谱法及乘子等价映射的推广	270
6.6.1	含时变内点约束的轨迹优化问题	270
6.6.2	分块伪谱法及其非线性规划问题	272
6.6.3	基于伪谱网格的离散多点边值问题	276
6.6.4	含时变内点约束的乘子等价映射	278
6.6.5	分块伪谱法及其乘子映射的应用	285
6.7	本章小结	293
	参考文献	294

第 7 章	小行星附近的轨道	299
7.1	引言	300
7.2	小行星附近的力学环境	303
7.2.1	轨道分布	304
7.2.2	引力作用范围	305
7.2.3	轨道运动方程	307
7.3	小行星引力场描述方法	308
7.3.1	质点群方法	308
7.3.2	球谐函数方法	310
7.3.3	多面体方法	311
7.3.4	三种方法的比较	315
7.4	小行星附近轨道平衡点与不变流形	316
7.4.1	(216)Kleopatra 模型	317
7.4.2	运动方程和守恒量	319
7.4.3	平衡点	320
7.4.4	局部流形	322
7.4.5	平衡点附近的周期轨道	323
7.5	小行星附近的周期轨道	328