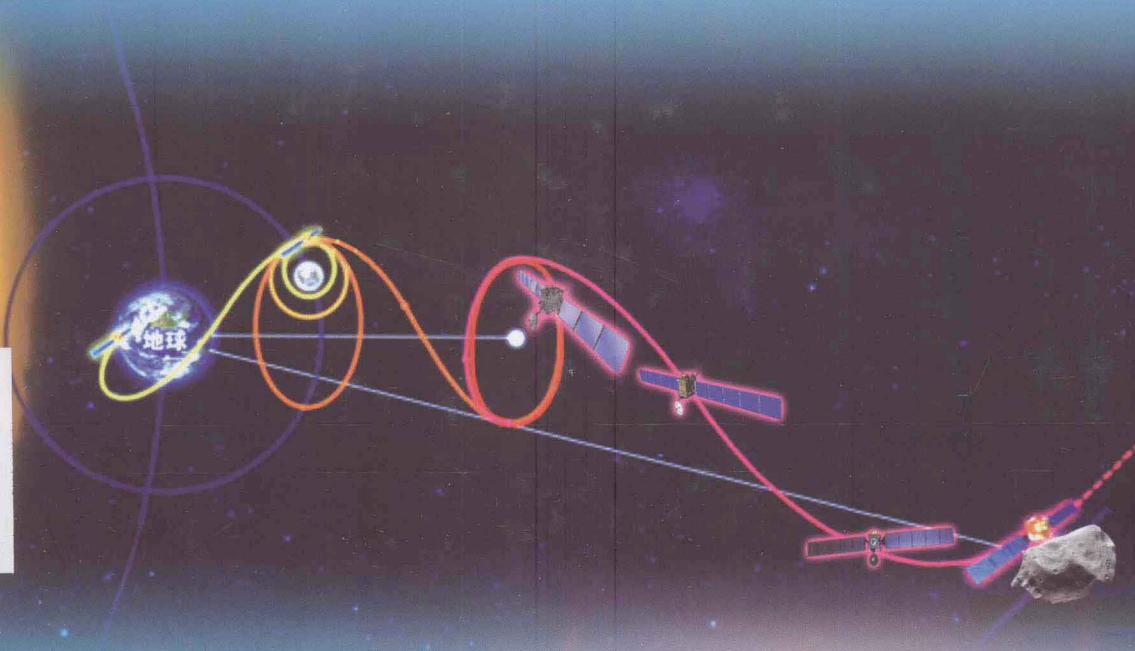




深空探测轨道设计与优化

崔平远 乔栋 崔祜涛 著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

深空探测轨道设计与优化

崔平远 乔 栋 崔祐涛 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是深空探测轨道动力学领域的一本专著,共分9章,主要内容包括:深空探测轨道设计的特点及其相关的基本轨道问题、深空探测中的发射机会搜索问题、轨道机动与轨道转移、小推力转移轨道设计与优化、借力飞行及其衍生技术、基于动平衡点的深空探测轨道设计、深空中多目标交会探测轨道设计、小天体附近的轨道动力学与运动分析、深空探测的任务实践与轨道分析等。全面系统地阐述了深空探测轨道设计与优化相关的理论与方法、模型、机理等。本书内容丰富翔实,具有较强的前沿性和实用性。

本书可供从事航天任务设计的研究人员和工程设计人员参考,也可作为高等院校飞行器设计及相关专业研究生和本科高年级学生的参考教材。

图书在版编目(CIP)数据

深空探测轨道设计与优化/崔平远,乔栋,崔祜涛著. —北京:科学出版社, 2013

ISBN 978-7-03-037264-2

I. ①深… II. ①崔… ②乔… ③崔… III. ①航天器轨道-设计
IV. ①V412.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 068425 号

责任编辑:刘宝莉 / 责任校对:钟 洋

责任印制:张 倩 / 封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销



*

2013年4月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2013年4月第一次印刷 印张:13 1/2

字数:270 000

定价:100.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

深空探测是人类了解宇宙、认识太阳系、探索地球环境的形成与演变,获取更多科学认知的重要手段。2007 年我国首次绕月探测工程的成功实施,标志着我国已经进入具有深空探测能力的国家行列,这是继人造地球卫星、载人航天飞行取得成功之后,我国航天事业发展的又一座里程碑,开启了中国人走向深空、探索宇宙奥秘的时代。当前,我国正在实施以月球软着陆、月面巡视勘察和采样返回为主要目标的月球探测二、三期工程,未来还将开展以火星、小行星探测为代表的更遥远深空的探测活动。发展深空探测对推动我国航天事业的发展,引领科技创新具有十分重要的意义。

在人类迈向深空、进行更遥远深空目标探测的时候,飞行轨道的设计是其重要的关键技术之一。深空目标多数与地球相距遥远,近邻火星与地球距离最近处约 5500 万 km,最远处超过 4 亿 km,土星、木星等天体更远。要实现对这些深空目标天体的探测,探测器需要具有足够的逃逸速度,如何在多种约束条件下设计满足任务要求的轨道方案是深空探测轨道设计面临的一个难题。探测器在星际飞行时,还将受到多天体引力的共同作用,而由此产生的混沌运动,将是传统的二体理论和方法无法解决和阐释的。此外,以电推进和太阳帆为代表的高效新型推进系统的应用,将使得非开普勒轨道成为深空探测轨道设计中的普遍问题,而这些问题都是经典的开普勒轨道理论无法解决的。正是这些新的轨道问题的出现,才极大地推动了深空探测轨道设计技术的发展。

《深空探测轨道设计与优化》一书从星际转移发射机会的搜索方法入手,介绍深空探测转移轨道的设计与优化问题。从传统的脉冲转移、未来有很好应用前景的小推力转移、远程星际探测必不可少的借力飞行以及新颖的动平衡点转移四个方面,分别介绍了深空探测转移轨道的设计方法;然后介绍了具有重要工程应用价值的多天体借力飞行的轨道设计方法和小天体附近的轨道运动特性;最后结合实例分析,给出了深空探测转移轨道设计值得注意的问题。该书将基础理论与新颖设计思想有机融合,对读者具有很大的启发意义。

该书凝聚了崔平远教授及其带领的科研团队,近年来在从事深空探测技术研究和参加月球探测工程实践中积淀的技术成果和设计经验,是一本融合基础理论

和工程实践的学术专著,既可作为从事深空探测领域相关研究工作的科技人员的参考书,也可作为航空宇航相关学科专业研究生的教材,将对促进我国深空探测轨道设计技术的进一步研究和发展做出贡献。



二〇一二年十一月五日

前 言

深空探测是指人类对地球以外天体开展的探测活动。它是继卫星应用、载人航天之后的人类航天活动重点发展领域,也是人类开发浩瀚无垠宇宙资源的前奏。本书是针对深空探测领域的关键问题之一——轨道设计与优化,在作者多年从事深空探测转移轨道设计与优化方面研究工作的基础上,参考国内外相关优秀文献而完成的。期待本书能为我国未来深空探测任务的规划、设计与实现提供相应的理论方法。

全书共 9 章。第 1 章介绍深空探测轨道设计的特点及其相关的基本轨道问题;第 2 章介绍深空探测轨道设计的首要问题——发射机会搜索问题;第 3~6 章,从不同的轨道转移方式出发,分别介绍脉冲转移、小推力转移、借力飞行和动平衡点转移四种深空探测转移轨道的设计方法;第 7 章介绍多天体借力飞行轨道的设计与优化方法;第 8 章介绍小天体附近的轨道动力学与探测器的运动特性;第 9 章结合国外深空探测中的经典飞行任务,分析其转移轨道的设计方案,同时也介绍了我国首个小天体探测任务的轨道方案构想。

本书内容主要涉及深空探测有控转移轨道设计与优化方面的基础理论与方法,从不同轨道转移方式入手,深入浅出,比较系统地介绍了深空探测转移轨道的设计与优化方法。包括工程上通常采用的脉冲转移、基于先进电推进或离子推进的小推力转移、以节省能量为出发点的借力飞行以及新颖的低能量动平衡点转移。书中既包括转移轨道设计的基础理论,又含有新颖的设计思想和方法,同时,也介绍了深空中具有特殊物理性质的小天体附近的轨道动力学与运动特性。本书的主要读者为从事深空探测领域相关工作的研究人员和科技工作者,也可作为航空宇航和控制工程等学科研究生和高年级本科生的参考书。

本书初稿完成于 2007 年夏,后几经修改,前后历时 5 年。在此过程中虽然得到了栾恩杰院士的精心指导,但因才疏学浅,难以全部领悟,只好先出一拙作,请读者不吝赐教。回顾 12 年前栾恩杰院士引领作者进入深空探测领域开始耕耘,其情景历历在目,经过 12 年的努力,首部专著终于出版了。借此机会对栾恩杰院士的引领、指导和鼓励表示衷心地感谢。

本书的出版得到了“国家科学技术学术著作出版基金”的资助,同时也得到了

“国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2012CB720000)”的资助。

由于作者水平所限,书中难免存在疏漏不足之处,恳请广大读者不吝指正。

作 者

二〇一二年七月于北京

序

深空探测是人类了解宇宙、认识太阳系、探索地球环境的形成与演变,获取更多科学认知的重要手段。2007 年我国首次绕月探测工程的成功实施,标志着我国已经进入具有深空探测能力的国家行列,这是继人造地球卫星、载人航天飞行取得成功之后,我国航天事业发展的又一座里程碑,开启了中国人走向深空、探索宇宙奥秘的时代。当前,我国正在实施以月球软着陆、月面巡视勘察和采样返回为主要目标的月球探测二、三期工程,未来还将开展以火星、小行星探测为代表的更遥远深空的探测活动。发展深空探测对推动我国航天事业的发展,引领科技创新具有十分重要的意义。

在人类迈向深空、进行更遥远深空目标探测的时候,飞行轨道的设计是其重要的关键技术之一。深空目标多数与地球相距遥远,近邻火星与地球距离最近处约 5500 万 km,最远处超过 4 亿 km,土星、木星等天体更远。要实现对这些深空目标天体的探测,探测器需要具有足够的逃逸速度,如何在多种约束条件下设计满足任务要求的轨道方案是深空探测轨道设计面临的一个难题。探测器在星际飞行时,还将受到多天体引力的共同作用,而由此产生的混沌运动,将是传统的二体理论和方法无法解决和阐释的。此外,以电推进和太阳帆为代表的高效新型推进系统的应用,将使得非开普勒轨道成为深空探测轨道设计中的普遍问题,而这些问题都是经典的开普勒轨道理论无法解决的。正是这些新的轨道问题的出现,才极大地推动了深空探测轨道设计技术的发展。

《深空探测轨道设计与优化》一书从星际转移发射机会的搜索方法入手,介绍深空探测转移轨道的设计与优化问题。从传统的脉冲转移、未来有很好应用前景的小推力转移、远程星际探测必不可少的借力飞行以及新颖的动平衡点转移四个方面,分别介绍了深空探测转移轨道的设计方法;然后介绍了具有重要工程应用价值的多天体借力飞行的轨道设计方法和小天体附近的轨道运动特性;最后结合实例分析,给出了深空探测转移轨道设计值得注意的问题。该书将基础理论与新颖设计思想有机融合,对读者具有很大的启发意义。

该书凝聚了崔平远教授及其带领的科研团队,近年来在从事深空探测技术研究和参加月球探测工程实践中积淀的技术成果和设计经验,是一本融合基础理论

和工程实践的学术专著,既可作为从事深空探测领域相关研究工作的科技人员的参考书,也可作为航空宇航相关学科专业研究生的教材,将对促进我国深空探测轨道设计技术的进一步研究和发展做出贡献。

A stylized handwritten signature in black ink, consisting of several fluid, interconnected strokes.

二〇一二年十一月五日

前 言

深空探测是指人类对地球以外天体开展的探测活动。它是继卫星应用、载人航天之后的人类航天活动重点发展领域,也是人类开发浩瀚无垠宇宙资源的前奏。本书是针对深空探测领域的关键问题之一——轨道设计与优化,在作者多年从事深空探测转移轨道设计与优化方面研究工作的基础上,参考国内外相关优秀文献而完成的。期待本书能为我国未来深空探测任务的规划、设计与实现提供相应的理论方法。

全书共 9 章。第 1 章介绍深空探测轨道设计的特点及其相关的基本轨道问题;第 2 章介绍深空探测轨道设计的首要问题——发射机会搜索问题;第 3~6 章,从不同的轨道转移方式出发,分别介绍脉冲转移、小推力转移、借力飞行和动平衡点转移四种深空探测转移轨道的设计方法;第 7 章介绍多天体借力飞行轨道的设计与优化方法;第 8 章介绍小天体附近的轨道动力学与探测器的运动特性;第 9 章结合国外深空探测中的经典飞行任务,分析其转移轨道的设计方案,同时也介绍了我国首个小天体探测任务的轨道方案构想。

本书内容主要涉及深空探测有控转移轨道设计与优化方面的基础理论与方法,从不同轨道转移方式入手,深入浅出,比较系统地介绍了深空探测转移轨道的设计与优化方法。包括工程上通常采用的脉冲转移、基于先进电推进或离子推进的小推力转移、以节省能量为出发点的借力飞行以及新颖的低能量动平衡点转移。书中既包括转移轨道设计的基础理论,又含有新颖的设计思想和方法,同时,也介绍了深空中具有特殊物理性质的小天体附近的轨道动力学与运动特性。本书的主要读者为从事深空探测领域相关工作的研究人员和科技工作者,也可作为航空宇航和控制工程等学科研究生和高年级本科生的参考书。

本书初稿完成于 2007 年夏,后几经修改,前后历时 5 年。在此过程中虽然得到了栾恩杰院士的精心指导,但因才疏学浅,难以全部领悟,只好先出一拙作,请读者不吝赐教。回顾 12 年前栾恩杰院士引领作者进入深空探测领域开始耕耘,其情景历历在目,经过 12 年的努力,首部专著终于出版了。借此机会对栾恩杰院士的引领、指导和鼓励表示衷心地感谢。

本书的出版得到了“国家科学技术学术著作出版基金”的资助,同时也得到了

“国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2012CB720000)”的资助。

由于作者水平所限,书中难免存在疏漏不足之处,恳请广大读者不吝指正。

作 者

二〇一二年七月于北京

目 录

序

前言

第 1 章 概述	1
1.1 引言	1
1.1.1 深空探测的定义	1
1.1.2 深空探测轨道设计的特点	1
1.1.3 本书的主要内容	4
1.2 轨道动力学中的多体问题与二体问题	5
1.2.1 轨道动力学中的多体问题	5
1.2.2 轨道动力学中的理想二体问题	7
1.3 深空探测中的基本轨道问题	18
1.3.1 兰伯特问题	18
1.3.2 影响球与圆锥曲线拼接法	20
参考文献	23
第 2 章 深空探测中的发射机会搜索	25
2.1 深空探测的发射机会	25
2.1.1 深空探测中的霍曼转移	25
2.1.2 深空探测中的会合周期	27
2.2 基于等高线图的发射机会搜索	28
2.2.1 等高线图的参数定义	28
2.2.2 基于等高线图的发射机会搜索方法	30
2.3 基于智能优化算法的发射机会搜索	32
2.3.1 发射机会搜索的问题描述	32
2.3.2 发射机会搜索算法的设计	34
2.3.3 基于智能优化算法的发射机会搜索方法应用	35
2.4 太阳系行星探测的发射机会	38
2.4.1 金星探测的发射机会	38
2.4.2 火星探测的发射机会	39
2.4.3 小行星探测的发射机会	41
参考文献	44

第3章 深空探测中的轨道机动与脉冲转移	45
3.1 轨道机动	45
3.1.1 轨道过渡机动的分类	45
3.1.2 同平面相交轨道间的过渡机动	45
3.1.3 异面相交轨道间的过渡机动	48
3.1.4 同平面不相交轨道间的过渡机动	48
3.1.5 异面不相交轨道间的过渡机动	52
3.2 端点时间自由的最优轨道转移	54
3.2.1 端点时间自由的轨道转移问题描述	55
3.2.2 端点状态变分关系与边界条件	55
3.2.3 端点时间自由的最优转移轨道求解	58
3.3 端点时间固定的最优轨道转移	60
3.3.1 端点时间固定的轨道转移问题描述	60
3.3.2 端点时间固定的最优转移必要条件	61
3.3.3 端点时间固定的最优转移轨道求解	62
参考文献	65
第4章 小推力飞行轨道的设计与优化	66
4.1 小推力转移的动力学模型	66
4.1.1 笛卡儿坐标系下的动力学模型	66
4.1.2 经典轨道根数动力学模型	68
4.1.3 改进春分点轨道根数动力学模型	69
4.1.4 小推力轨道动力学模型的无量纲化处理	69
4.2 小推力飞行器的轨道优化模型	70
4.2.1 笛卡儿坐标系下的小推力轨道优化模型	70
4.2.2 基于轨道根数的小推力轨道优化模型	72
4.3 小推力转移轨道的优化方法	74
4.3.1 小推力转移轨道的直接优化算法	74
4.3.2 小推力转移轨道的间接优化算法	79
4.3.3 小推力转移轨道的混合优化算法	82
参考文献	85
第5章 借力飞行及其衍生技术	87
5.1 借力飞行的基本原理	87
5.2 借力飞行的机理分析	90
5.2.1 基于二体模型的借力飞行分析	90
5.2.2 基于圆形限制性三体模型的借力飞行分析	91

5.2.3 基于椭圆形限制性三体问题模型的借力飞行分析	101
5.3 有推力借力飞行技术	106
5.3.1 有推力借力问题的描述	106
5.3.2 基于二体模型的有推力借力分析	107
5.3.3 基于限制性三体模型的有推力借力飞行分析	109
5.4 气动-借力飞行技术	114
5.4.1 气动-借力飞行的基本原理	114
5.4.2 气动-借力飞行的参数分析	114
参考文献	121
第 6 章 基于动平衡点的深空探测轨道设计	122
6.1 动平衡点及其稳定性	122
6.1.1 圆形限制性三体问题与动平衡点	122
6.1.2 雅可比积分与希尔域	129
6.1.3 平衡点的稳定性	132
6.2 动平衡点附近的周期轨道	134
6.2.1 动平衡点附近的运动	134
6.2.2 动平衡点附近周期轨道的确定	135
6.3 不变流形结构与深空探测转移轨道设计	141
6.3.1 动平衡点附近周期轨道的流形结构	142
6.3.2 基于不变流形的动平衡点转移轨道设计	148
6.3.3 基于不变流形的深空探测转移轨道设计	149
参考文献	154
第 7 章 深空多目标交会转移轨道设计	155
7.1 多天体借力序列的选择	155
7.1.1 借力飞行的能量图谱	155
7.1.2 借力飞行序列的选择	156
7.2 基于能量匹配拼接的多天体借力飞行轨道设计	158
7.2.1 能量匹配拼接的借力飞行轨道设计原理	158
7.2.2 能量匹配拼接的深空探测借力飞行轨道设计与分析	160
7.3 多天体借力飞行的混合设计方法	162
7.3.1 多天体借力飞行转移轨道问题描述	163
7.3.2 多天体借力飞行转移轨道的混合设计方法	164
参考文献	170
第 8 章 小天体附近的轨道动力学与运动分析	171
8.1 小天体的引力位模型	171

8.2 小天体附近的平衡点及周期轨道	171
8.2.1 小天体附近的平衡点	172
8.2.2 小天体平衡点附近的运动	174
8.2.3 小天体平衡点附近的周期与拟周期轨道	175
8.3 环绕慢自旋小天体轨道的稳定性分析	181
8.3.1 小天体扁率和椭率的摄动分析	181
8.3.2 天平面冻结轨道	182
8.3.3 环绕小天体轨道的控制	183
参考文献	185
第9章 深空探测任务的实践与轨道分析	186
9.1 美国 Galileo 任务轨道方案	186
9.2 美国 NEAR 任务的轨道设计与分析	187
9.2.1 NEAR 任务概述	187
9.2.2 NEAR 任务转移轨道方案设计与分析	188
9.3 美国 DAWN 任务轨道设计与分析	190
9.3.1 DAWN 任务概述	190
9.3.2 DAWN 任务转移轨道方案设计	191
9.4 欧洲空间局 ROSETTA 任务	192
9.4.1 ROSETTA 任务概述	192
9.4.2 ROSETTA 任务约束分析	192
9.4.3 ROSETTA 任务转移轨道方案设计与分析	193
9.5 EXPEDITION 构想任务轨道设计与分析	196
9.5.1 EXPEDITION 任务概述	196
9.5.2 EXPEDITION 任务转移轨道方案设计	197
参考文献	204

第 1 章 概 述

1.1 引 言

随着航天技术的快速发展,人类探测空间的范围正在不断扩展,从近地空间到 38 万 km 的月球,再到数亿千米的火星,甚至到数十亿千米的冥王星。随着人类探索外太空活动的深入,深空探测正逐步成为航天活动的新热点。

1.1.1 深空探测的定义

关于深空探测的定义,目前国际上仍有争议。有标准认为距离地球等于或大于地-月距离的宇宙空间为深空。若按此标准,月球探测应属于深空探测范围。而世界无线电联合会则以距离地球 200 万 km 作为深空与近空的分界线,为避免深空与近空无线电信号的干扰,而配置不同的频率范围。

深空探测是进一步认识宇宙,了解太阳系现状、起源与演化,并通过对它们的探测,研究地球环境的形成、演变及太阳对地球环境的影响;探寻地外生命,开发和利用空间资源,扩展人类生存空间。深空探测也是一个浩大而且极为复杂的工程,其发展涉及推进、导航、测控等众多技术,而轨道设计与优化技术则是其中的一项关键技术。它直接影响到深空探测任务的设计与规划,以及其他系统的设计和要求。

1.1.2 深空探测轨道设计的特点

与近地飞行器轨道设计不同,深空飞行器轨道设计受到与探测目标相距遥远、空间动力学环境复杂等诸多因素的影响,使得其设计与近地飞行器有较大区别。

1) 飞行器所需的发射能量大,飞行时间长

深空目标多数与地球相距遥远,距离地球最近的月球也有 38 万 km。地球的近邻火星与地球的距离最近约 5570 万 km,最远约 1.2 亿 km。土星、木星等更远。要实现到这些目标的探测,所需的发射能量巨大。由基本的轨道动力学理论可知,进行近地空间飞行,飞行器所需的最小速度为第一宇宙速度,即 7.91km/s ,若要进行深空飞行,则必须大于第二宇宙速度 11.19km/s ,进入环绕太阳飞行的轨道。双曲线超速通常是指飞行器逃逸地球引力场后还具有的速度。发射能量是双曲线超

速的平方(杨嘉墀,1995)。从地球飞向金星所需最小的发射能量约为 $6.25\text{km}^2/\text{s}^2$, 飞向火星最小约为 $8.70\text{km}^2/\text{s}^2$ 。目前的运载火箭具备完成直接向金星和火星转移的发射任务,而飞向木星和土星就很难实现,因为从地球直接飞向木星所需的最小发射能量约为 $77.5\text{km}^2/\text{s}^2$,飞向土星最小发射能量约为 $106\text{km}^2/\text{s}^2$ 。当然,直接飞向天王星和海王星就更加困难。由此可见,发射能量大是目前深空任务轨道设计面临的一个难题。

同样,深空目标与地球相距遥远也导致了飞行时间长。近地飞行器从 200km 的圆形停泊轨道转移至距离地面约 $35\,786\text{km}$ 的地球同步轨道,大约需要 5.3h 。而以霍曼双切轨道从地球直接转移到火星大约需要 260 天,飞到木星大约需要 1000 天,飞到土星则需要 6 年,而飞到天王星和海王星就分别需要 16 年和 31 年。如此长的飞行时间,对飞行器的寿命等带来了挑战,同时也为如何通过轨道设计缩短飞行时间提出了问题。

2) 深空动力学环境复杂,探测目标受星历约束

近地飞行器的运动主要是受地球引力的作用,其运动规律的分析主要是以二体问题为基础,同时还需考虑一些摄动因素,例如大气摄动、地球非球形引力摄动、第三体摄动等。开普勒轨道的基本定律和摄动理论,使得近地飞行器的轨道动力学日趋成熟,这些基础理论也有力地推动了近地飞行器及其应用技术的发展。与近地飞行器相比,深空飞行器则有所不同。深空飞行器在星际飞行时,受到太阳、地球、目标天体、土星、木星等多个天体引力的共同作用,属于多体问题的范畴,而对于多体问题,在理论上目前尚无较好的解决方法。除复杂动力学环境外,还需注意星历约束问题。深空中天体都在按各自的规律运动,进行深空探测轨道设计时,必须考虑这些目标的运动规律(即星历),选择合适的发射时间和飞行路径。

3) 特殊任务轨道的需求

深空探测除了认知宇宙,研究太阳系起源与演化,获取破解国际重大科学前沿问题的信息与线索外,还为新技术的验证提供平台和环境。这样的科学和工程目标就决定了深空探测任务需要特殊的轨道设计方案为其科学探测和工程验证服务(Barden et al.,1998)。例如,对太阳观测就需要设计日-地 L_1 动平衡点附近的长期驻留轨道或太阳极轨;对宇宙进行天文观测就需要设计日-地 L_2 动平衡点附近的驻留轨道;对木星系统的连续探测就需要设计木星系统各卫星之间的低能量转移轨道等。这些特殊深空探测任务轨道的设计需要三体动力学系统及流形理论等轨道设计中的新理论、新方法。这些方法与近地飞行器轨道设计的方法和理论有本质区别。

正是因为存在这些不同,所以在进行深空探测轨道设计时所采用的手段和方法与近地飞行器有显著区别。为了解决深空探测轨道设计中的这些难题,目前主