



航天科技图书出版基金资助出版

# 航天器深空飞行 轨道设计

袁建平 赵育善 唐歌实 等著



中国宇航出版社

014031981

V412.4

31

航天科技图书出版基金资助出版

# 航天器深空飞行轨道设计

袁建平 赵育善 唐歌实 等著



中国宇航出版社



北航

C1720087

V412.4

31

120120410

版权所有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

航天器深空飞行轨道设计 / 袁建平等著. --北京:  
中国宇航出版社, 2014. 1

ISBN 978 - 7 - 5159 - 0628 - 7

I. ①航… II. ①袁… III. ①航天器轨道—设计  
IV. ①V412.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 026475 号

责任编辑 马 航 责任校对 祝延萍 封面设计 文道思

出版  
发行

中国宇航出版社

社 址 北京市阜成路 8 号

邮 编 100830

(010)68768548

网 址 [www.caphbook.com](http://www.caphbook.com)

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 北京画中国印刷有限公司

版 次 2014 年 1 月第 1 版

2014 年 1 月第 1 次印刷

规 格 880 × 1230

开 本 1/32

印 张 11.5

字 数 331 千字

书 号 ISBN 978 - 7 - 5159 - 0628 - 7

定 价 98.00 元

本书如有印装质量问题, 可与发行部联系调换

## 前 言

深空飞行或星际航行是指航天器脱离地球环绕轨道飞往月球、太阳系内其他星体（包括小行星）或太阳系外更远星球的过程。目前此类飞行已涉足月球、某些行星（如火星）和太阳系边沿。深空飞行的目的是认识地球以外的存在（深空探测）、探索其利用价值并加以利用（获取能源、矿产等），甚至在其上建立定居点。在物理（力学）的范畴，深空飞行涉及多体引力场、多效应（除引力外还有电磁力、辐射力、宇宙流、微流星流、等离子效应、陀螺效应、相对论效应等）、多尺度（宇观模型、爱因斯坦效应等）等问题；在数学层面涉及圆锥曲线及拟合、非线性问题、混沌问题、多尺度/分层变换等。

自人类文明之始，人们就从未停止探索的脚步。从陆地到海洋，从海洋到天空，如今已经将目标对准了广阔无垠的宇宙。自从美国和苏联 1958 年向月球发射探月火箭开始，世界航天大国都先后开展了多种类型的深空飞行活动。21 世纪深空飞行的重心将会围绕月球、火星以及小行星探测和利用这三大目标展开。对未知世界的探索是人类文明和科学技术进步发展的永恒动力，对茫茫宇宙的探测则是人类认识宇宙、探索宇宙起源、拓展生存空间的必由之路。

在航天技术的发展初期，人们认为要到达比火星更远的星球是

不可能的，这是因为所需的推力远远超过了人类当时火箭的能力。所以在很长的一段时间内，深空探测被局限于地球附近很小的区域，直到引力辅助技术的成功应用，人类才真正飞向深空。1974年，美国国家航空航天局（NASA）成功发射的水星10号深空探测器，是人类历史上第一个使用引力辅助技术的飞行器。在此之后，绝大多数深空任务都采用了引力辅助技术来提升飞行器能量或者降低最终的行星捕获能量，从而完成既定任务。

早期的轨道动力学和计算研究主要研究对象为人造地球卫星或航天器在主天体引力作用下的摄动运动。在这种背景下，轨道动力学和计算研究借鉴了天体力学的许多理论和方法，其中，借助摄动理论和方法已经建立了相对完善的人造卫星轨道理论，这种理论也是深空飞行的理论基础。深空飞行轨道计算要比人造卫星轨道更复杂，涉及正确认识和巧妙地利用深空中的多引力环境，例如三体问题的平动点和不变流形等。

深空飞行有着极其重要的应用前景，而轨道设计是深空飞行的第一步。深空飞行轨道的分析与设计是以经典轨道动力学模型为基础发展出的具有一系列特征的模型和方法，其最显著的特点是将控制与优化理论应用其中，为轨道动力学的研究注入了新的内涵，也成为近十余年来的研究热点。基于这种趋势，作者团队参考国内外同行的相关资料，对深空飞行轨道设计进行了系统的梳理，并结合我国嫦娥工程中开展月球及深空飞行的工程实践，深入研究了实际工程约束条件下的深空飞行轨道设计与控制问题，近年来取得了多项研究成果，现将相关内容整理成此书，供读者参考。

全书分为9章。第1章介绍深空飞行及其轨道设计的意义及特

点；第2章~第4章以两体问题为基础，介绍星际轨道机动、借力飞行、行星际轨道修正的理论和方法；第5章介绍三体问题，包括三体问题的动力学建模方法、三体问题的平动点、周期轨道与拟周期轨道、流形的性质与计算等；第6章介绍流形拼接理论与方法，它是深空转移轨道、天地节能运输轨道设计的基础；第7章介绍深空轨道修正机动及站位保持；第8章介绍小推力低能转移轨道控制与应用问题；最后结合我国嫦娥工程深度剖析了深空飞行任务轨道设计与控制问题。师鹏、张晨、石昊、齐彧、刘磊参加了部分章节的编写，在此表示感谢。另外还要感谢航天飞行动力学重点实验室和中国宇航出版社对本书的写作和出版给予的支持。

作 者

2013年9月

# 目 录

第 1 章 深空飞行及其轨道设计 .....	1
1.1 深空飞行的意义 .....	1
1.1.1 月球探测 .....	1
1.1.2 火星探测 .....	2
1.1.3 小行星探测 .....	5
1.1.4 空间特殊点的利用 .....	7
1.2 太阳系运动、深空飞行轨道及其特点 .....	9
1.2.1 太阳系内的行星运动 .....	9
1.2.2 深空飞行轨道及其特点 .....	10
1.3 典型深空飞行轨道案例 .....	12
1.3.1 典型的月球探测轨道 .....	12
1.3.2 典型的行星探测轨道 .....	13
1.3.3 典型的特殊点探测轨道 .....	14
1.4 深空飞行轨道设计 .....	14
1.4.1 时空系统 .....	15
1.4.2 任务约束 .....	16
1.4.3 路径规划 .....	17
1.4.4 数学物理方法 .....	18
1.4.5 本书看点 .....	20
参考文献 .....	22
第 2 章 行星际轨道机动 .....	23
2.1 二体问题简述 .....	23

2.2	Lambert 问题 .....	25
2.2.1	Lambert 问题描述 .....	25
2.2.2	Lambert 问题的求解 .....	27
2.3	Pork-Chop 图 .....	32
2.3.1	Pork-Chop 图绘制方法 .....	33
2.3.2	相合周期 .....	39
2.3.3	轨道倾角和偏心率对发射窗口的影响 .....	41
	参考文献 .....	48
<b>第 3 章</b>	<b>借力飞行 .....</b>	<b>49</b>
3.1	N 体问题 .....	49
3.2	引力影响球确定及圆锥曲线拼接 .....	50
3.2.1	引力相等影响球 .....	51
3.2.2	常用的影响球 .....	53
3.2.3	希尔球 .....	56
3.2.4	仿真数据 .....	57
3.3	借力飞行理论 .....	59
3.3.1	无推力的引力辅助技术 .....	62
3.3.2	有推力的引力辅助技术 .....	65
3.4	借力飞行轨道优化设计 .....	69
3.4.1	使用 Tisserand 图确定引力辅助序列 .....	69
3.4.2	使用 Pork-Chop 图寻找粗略的引力辅助时间窗口 .....	77
3.4.3	使用 SNOPT 寻找精确的引力辅助时间窗口 .....	86
3.5	引力辅助技术的其他应用 .....	89
3.5.1	共振轨道 .....	89
3.5.2	通过引力辅助改变轨道倾角 .....	96
3.5.3	通过引力辅助降低近地点距 .....	102
3.5.4	深空机动技术 .....	106
3.5.5	仿真算例—地木转移轨道 .....	119



---

参考文献 .....	133
<b>第 4 章 行星际轨道修正 .....</b>	<b>137</b>
4.1 常用坐标系定义 .....	137
4.1.1 EME2000 惯性坐标系 .....	137
4.1.2 以火星为中心的非惯性坐标系 .....	138
4.1.3 以火星为中心的惯性坐标系 .....	141
4.1.4 惯性系、非惯性系和本体系之间的联系 .....	142
4.2 B-plane 概念 .....	148
4.2.1 期望打靶点的确定 .....	152
4.2.2 真实打靶点的确定 .....	154
4.3 打靶法 .....	155
4.4 从近地圆轨道出发 .....	159
4.4.1 最优入轨条件及分析 .....	159
4.4.2 利用优化的方法求解入轨问题 .....	166
4.4.3 仿真算例 .....	168
4.5 轨道修正机动算例 .....	169
4.6 进入目标行星任务轨道 .....	175
4.6.1 坐标系的转换 .....	175
4.6.2 期望打靶点的确定 .....	177
4.6.3 仿真算例 .....	180
参考文献 .....	183
<b>第 5 章 周期轨道与流形计算 .....</b>	<b>184</b>
5.1 圆型限制性三体问题简介 .....	184
5.1.1 动力学方程 .....	184
5.1.2 平动点及其稳定性 .....	187
5.1.3 能量曲面与运动区域 .....	190
5.2 共线型平动点附近的运动 .....	191
5.2.1 相对共线型平动点运动的基本方程 .....	191

5.2.2	共线型平动点附近运动的线性化 .....	193
5.2.3	考虑高次项影响的共线型平动点附近运动 .....	195
5.3	Lindstedt-Poincaré 方法 .....	195
5.4	Richardson 三阶近似解 .....	197
5.5	Halo 轨道的计算 .....	200
5.5.1	微分修正法简介 .....	201
5.5.2	Halo 轨道近似初值的微分修正 .....	203
5.6	Lissajous 轨道的计算 .....	206
5.6.1	三阶近似解 .....	206
5.6.2	Lissajous 轨道的微分修正 .....	207
5.7	平动点附近流形计算方法 .....	214
5.7.1	相关概念和定理 .....	214
5.7.2	流形的计算 .....	217
5.8	流形的性质 .....	220
5.8.1	共线型平动点附近运动线性化 .....	221
5.8.2	线性化的相空间 .....	222
5.8.3	域 $\mathcal{R}$ 中的流 .....	223
5.8.4	非线性系统中的流及 McGehee 表示法 .....	225
	参考文献 .....	227
<b>第 6 章</b>	<b>流形拼接 .....</b>	<b>228</b>
6.1	流形拼接法简介 .....	228
6.2	四体问题的简化模型 .....	229
6.2.1	同心圆模型 .....	230
6.2.2	双圆模型 .....	230
6.3	日—地—月—航天器限制性四体系统模型分析 .....	231
6.3.1	地—月旋转坐标系下航天器的动力学方程 .....	232
6.3.2	日—地旋转坐标系下航天器的动力学方程 .....	234
6.4	坐标系转换 .....	237
6.5	二维流形拼接 .....	239

6.6 三维流形拼接 .....	244
6.6.1 庞加莱截面的选取 .....	245
6.6.2 周期轨道离散化 .....	245
6.6.3 庞加莱截面上的流形投影 .....	246
6.6.4 拼接点的选取 .....	250
6.6.5 仿真算例 .....	251
参考文献 .....	258
第7章 修正机动及站位保持 .....	259
7.1 Halo 轨道修正机动 .....	259
7.2 轨道修正机动算例 .....	260
7.3 Target Point 方法与 Floquet 方法站位保持策略 .....	269
7.3.1 目标点追踪法 .....	269
7.3.2 Floquet 模方法 .....	271
7.3.3 控制模型及仿真算例 .....	273
参考文献 .....	279
第8章 小推力低能转移轨道 .....	280
8.1 直接法 .....	284
8.1.1 Hermite-Simpson 方法 .....	285
8.1.2 Gauss-Lobatto 方法 .....	288
8.1.3 伪谱方法 .....	290
8.2 Hermite-Simpson 方法最优控制问题实例 .....	292
8.2.1 增加 Jacobian 和 Hessian 矩阵 .....	294
8.2.2 任意阶的 Gauss-Lobatto 方法 .....	296
8.3 求解二体小推力轨道转移问题 .....	300
8.3.1 时间最优和燃料最优问题 .....	301
8.3.2 网格优化方法 .....	305
8.4 求解三体小推力轨道转移问题 .....	310
8.4.1 从 GTO 到 $L_1$ 的 Halo 轨道 .....	312
8.4.2 从 GTO 到 $L_2$ 的 Halo 轨道 .....	314

---

---

参考文献 .....	316
<b>第 9 章 嫦娥任务的轨道设计与控制 .....</b>	<b>317</b>
9.1 平动点任务轨道设计 .....	317
9.1.1 约束条件 .....	318
9.1.2 初步轨道设计 .....	319
9.1.3 测控条件分析 .....	322
9.2 月球逃逸轨道控制 .....	327
9.2.1 数学模型 .....	327
9.2.2 控制策略 .....	330
9.3 平动点任务中途修正控制 .....	331
9.3.1 数学模型 .....	331
9.3.2 控制策略 .....	333
9.4 Lissajous 轨道维持 .....	335
9.4.1 控制时机分析 .....	335
9.4.2 测控实施方案 .....	336
9.5 小行星任务轨道设计 .....	338
9.5.1 小行星分布 .....	339
9.5.2 交会目标选择 .....	341
9.5.3 转移轨道设计 .....	343
9.5.4 数值实例 .....	346
9.5.5 实际飞行任务 .....	350
参考文献 .....	353

# 第 1 章 深空飞行及其轨道设计

## 1.1 深空飞行的意义

深空飞行是人类对太阳系和宇宙进行考察、勘探、开发、利用和定居的第一步。深空飞行目前主要是飞向月球和行星，未来还要到达更遥远的深空。

深空飞行意义重大，通过对深空探测可以解答诸如地球如何起源与演变、行星和太阳系究竟是如何形成与演化、又将如何消亡，以及人类是不是宇宙中唯一的智慧生物等基本问题的奥秘。同时，深空飞行有利于人类积极开发和利用空间资源，拓展人类的生存空间。

自从 1958 年美国和苏联启动探月计划开始，世界航天技术大国都先后开展了多种类型的深空探测活动。

21 世纪深空飞行的重心将会围绕月球探测、火星探测以及小行星探测这三大目标展开。

对未知世界的探索是人类文明和科学技术进步发展的永恒动力，对茫茫宇宙的探测则是人类认识宇宙、探索宇宙的起源、拓展生存空间的必由之路。

一直以来，人类对于空间的探索从未止步，从陆地到海洋，从海洋到天空，如今已经将目标瞄准了广阔无垠的宇宙。

### 1.1.1 月球探测

月球是离地球最近的星球，自古以来，月球对人类就有着极大的吸引力。在古代，无论是中国还是西方国家，人们眼中的月球都

披着一层神秘的面纱，是可望而不可及的。然而随着科学技术的发展，尤其是航天技术的崛起，人类在 20 世纪 50 年代末到 70 年代初实现了对月球的探测和载人登月，这使得人类对月球有了全新的认识。月球虽然是人类迄今为止了解得最详细的星体，但依旧有很多问题尚待进一步研究。

自 1959 年以来，美国、苏联、日本、欧盟以及中国、印度均向月球发射了探测器，此外，美国还进行过 8 次载人月球探测，其中包括 6 次航天员登月。在对月球的探索方面排名第二位的是苏联（1991 年 12 月 25 日解体），从 1959 年 1 月至 1976 年 8 月间先后共发射了 47 个无人月球探测器，成功地进行了硬着陆、软着陆和月面探测。20 世纪 70 年代以后，由于技术上逐渐落后以及美国首先登月成功等诸多原因，苏联渐渐地放弃了对月球的探索。日本早在 1990 年就发射了“飞天”月球探测器，一跃成为第 3 个进军月球的国家，2007 年日本发射了名为“月亮女神”的月球探测器。欧盟是另一个主要的探月组织，2003 年欧盟发射的 SMART-1 号月球探测器成功实现了绕月飞行的既定目标，之后它以 2 km/s 的速度实施了月球定点撞击。目前我国深空探测的主要目标是月球，探月工程是我国向深空探测迈出的第一步，将在 2020 年前完成“绕”、“落”、“回”三个步骤。2007 年 10 月 24 日，我国第一颗月球探测器嫦娥一号成功发射并完成探月工程三步走中的第一步，为中国的探月工程打下了坚实的基础。

自 1958 年苏联月球 1 号探测器掠月而过，迄今全世界共进行了上百次月球探测活动，但直到今天，这个离地球最近的星球上的任何资源都未在人类生活中得到直接应用。尽管月球资源的利用遥远到无法预期，科学家从不怀疑这一天的到来。

### 1.1.2 火星探测

从 20 世纪 60 年代至今，火星探测是人类航天历史上的又一重要的篇章。1962 年，苏联火星 1 号探测器在飞离地球 1 亿千米时与

地面失去联系，从此下落不明，它被看作是人类火星探测的开端。1965年，美国水手4号探测器飞越火星，从距离火星1万千米处拍摄了21幅珍贵的照片，这是人类第一次近距离观测火星。1971年，苏联火星2号探测器在火星着陆，这是人类飞行器第一次踏上这颗火红色的星球。2001年4月，美国发射奥德赛号火星探测器，意外地发现火星表面可能有丰富的冰冻水，这为改造火星、使之适合人类生存奠定了理论上的基础。一时间火星就是下一个地球的理论在航天界引起轩然大波。2012年8月6日，已经在太空中遨游了8个月的好奇号火星探测器（Curiosity）在火星表面成功着陆，并传回火星图片以及之前携带发射的声音文件，这是人类第一次听到从其他行星发来的声音。目前，探索火星的活动越来越多，2011年11月9日，我国萤火一号火星探测器由俄罗斯天顶运载火箭发射，因俄罗斯运载火箭故障未能进入轨道，但这标志着中国也加入了探索火星的行列中。

在太阳系的8大行星之中，火星是除了金星以外，距离地球最近的行星。大约每隔26个月就会发生一次火星冲日。地球与火星的距离在冲日期间会达到极近值，通常只有不足1亿千米，而在火星发生大冲时，这个距离不足6000万千米。火星冲日意味着这时可以用较小花费将探测器送往火星或令探测器返回地球，火星探测通常也会利用此天文现象来实现地球与火星之间的转移。截至2011年10月，已经有超过30枚探测器到达过火星，它们对火星进行了详细的考察，并向地球发回了大量数据。同时，火星的探测历程也充满了坎坷，大约三分之二的探测器，特别是早期发射的探测器，都没有能够完成它们的使命。但是火星对于人类却有一种特殊的吸引力，其主要原因有以下几个方面。

第一，探索火星上的生命存在。这是目前探测火星的重要课题之一。探测表明，火星目前的环境并不适合生命的存在，其主要是火星表面没有水且气候极为恶劣，火星大气的密度不足以使得火星表面有合适的温度和温差，其成分也不适合生命的存在。但观测结

果表明火星上有干枯的河床，有水曾流过的痕迹，也就是说远古时期，火星可能存在过生命。

第二，研究火星表面水的消失过程。火星表面水的消失可能是其生命消失的主要原因。关于火星表面水的消失过程的理论机制问题，科学界主要有两种观点：一种认为火星表面的水以沉积岩的形式存在于火星的地表以下，另一种认为水是通过蒸发和电离，变成带电粒子沿着火星的磁力线逃逸出了火星大气。面向第一种观点的研究，需要对火星的地质进行进一步探测，从而研究火星的地质成分以及火星上岩石的形成机制；而面向第二种观点的研究则需要对火星磁场的长期变化进行观测，通过探测火星岩石中的剩余磁场，从而研究火星上组成水的离子成分是如何在不同历史时期的不同强度磁场的控制之下逃逸的。

第三，研究火星磁场的长期演变。这对于研究地球磁场的长期演化具有重要的意义。在远古时期，火星同地球一样，都具有允许生命存在的基本条件，火星之所以具有今天这样的环境，关键在于其磁场的演化。火星磁场的演化，对于火星的磁层和电离层中离子的动力学和逃逸过程起着十分关键的控制作用。

第四，研究火星的大气和气候的演化过程。远古气候和大气的状况以及火星大气和气候长期演变的原因，对于研究火星上生命存在与消失这一问题是非常重要的。通过火星上岩石的取样可以揭示火星过去气候和大气的资料，从而了解火星大气的演变过程。

第五，研究火星的地貌和地质特征。火星表面分布着大峡谷和高山，高差约为 12~14 km，峡谷中有水流过的痕迹。初步探测表明，火星表面大部分地区覆盖着土壤且火星岩石元素成分中，氧元素含量最高，其次是硅，然后依次为铁、镁、钙和硫。但这是否具有火星的全球代表性，仍然需要进一步的探测来回答。探测火星的岩石成分，除了对研究火星表面水的消失过程、火星本地磁场的长期变化以及火星大气和气候的长期演化过程具有重要意义外，还对研究火星的形成过程、火星地质长期演变过程、火星表面成分长期



演化过程、岩石和空气的相互作用、岩石和水的相互作用以及火星地貌的长期变化具有重要的科学意义。

### 1.1.3 小行星探测

在掀起月球和火星探测热潮的同时，小行星的探测工作也引起了人们的重视。早在 1766 年，德国中学教师提丢斯 (J. D. Titius) 就发现各大行星与太阳之间的平均距离遵循一定规律，但是在火星与木星之间，这个规律被打破了，他认为其间应有对应的天体存在。1801 年，意大利天文学家皮亚齐发现了这个天体，但是其直径只有 1 000 km，不足以称为行星，但是这一发现仍然极大地鼓舞了研究人员的热情。随后不久，研究人员就在这颗小行星附近找到了多颗类似的小行星。到目前为止，正式命名的小行星数目已经超过 1 万个。人们终于意识到，在火星与木星的轨道之间，并不是存在一颗大行星，而是有一个小行星带。小行星是围绕太阳运行的岩石或金属天体，最大的小行星直径仅有 1 000 km，而最小的直径只有几十米。小行星在太阳系内运动范围从地球轨道内侧一直延伸到太阳系边缘，其中绝大多数小行星分布在火星和木星轨道之间，这一区间被称为主带小行星。少数小行星的轨道与地球轨道十分接近，有些甚至已经和地球相撞发生湮灭，这类小行星被称作近地小行星，它们对地球和人类的安全构成潜在威胁。目前大部分学者认为小行星是 46 亿年前太阳系初期形成的行星体。

早期的小行星探测活动以近距离飞越为主，1991 年，Galileo 木星探测器飞越了 951 号小行星，并对其进行观测，得到了该颗小行星的宝贵资料。2000 年，近地小行星交会号小行星成功绕近地小行星飞行，揭开了小行星深空探测的新纪元。我国嫦娥 2 号月球探测器于 2012 年 6 月 24 日飞抵距地球 700 万千米的深空，以 10.73 km/s 的相对速度、3.2 km 的相对距离飞越图塔蒂斯 (Toutatis) 小行星，这在国际上尚属首次。下面我们将详细叙述小行星探测的科学意义。

第一，研究小行星轨道演化的机制以及近地小行星撞击地球的