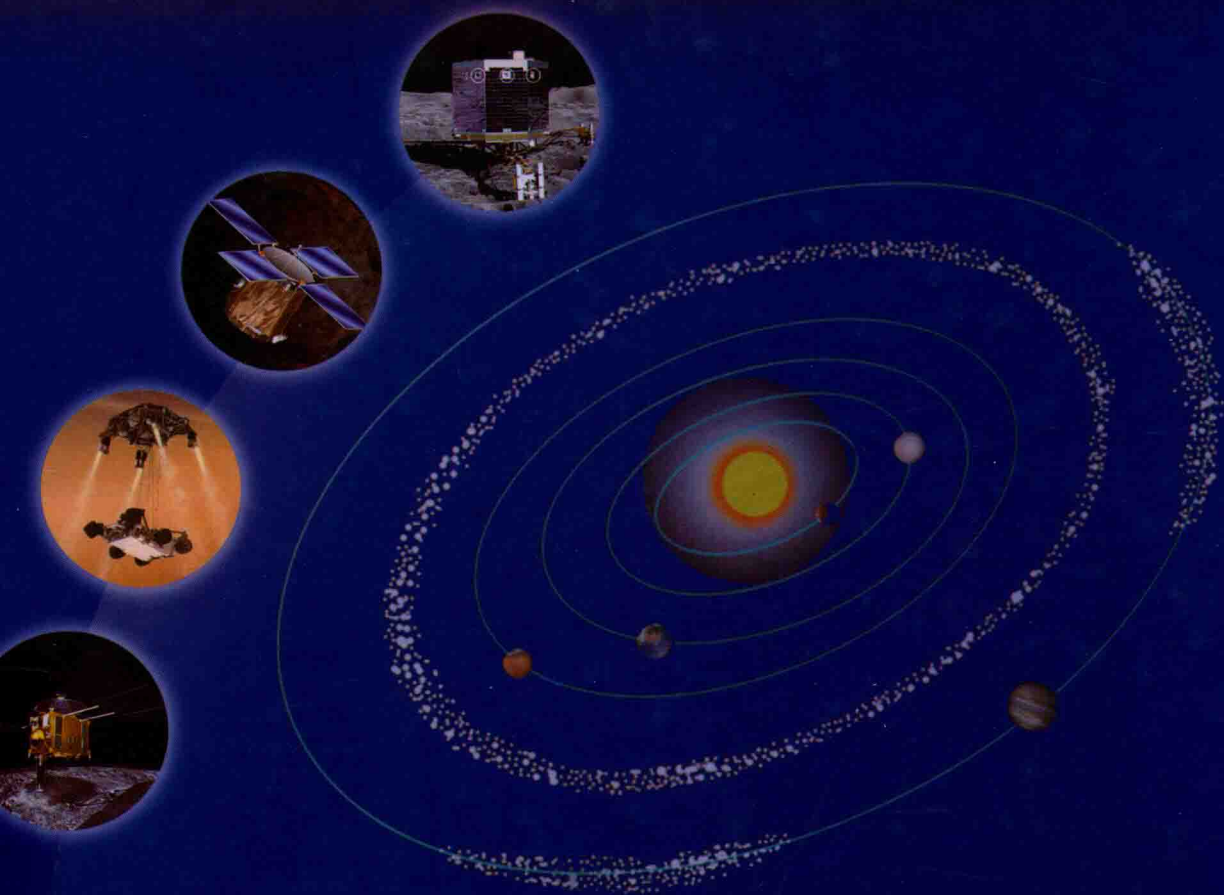




航天科技图书出版基金资助出版

深空探测器 自主导航与制导

崔平远 高 艾 朱圣英 著



中国宇航出版社

航天科技图书出版基金资助出版

深空探测器自主导航与制导

崔平远 高 艾 朱圣英 著



中国宇航出版社

· 北 京 ·

版权所有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

深空探测器自主导航与制导 / 崔平远, 高艾, 朱圣英著. -- 北京: 中国宇航出版社, 2016. 8

ISBN 978 - 7 - 5159 - 1162 - 5

I. ①深… II. ①崔… ②高… ③朱… III. ①空间探测器—导航②空间探测器—制导 IV. ①V476

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 198811 号

责任编辑 彭晨光

责任校对 祝延萍

装帧设计 宇星文化

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)60286808 (010)68768548

网址 www.caphbook.com

发行部 (010)60286888 (010)68371900
(010)60286887 (010)60286804(传真)

零售店 读者服务部
(010)68371105

承印 北京画中国画印刷有限公司

版次 2016 年 8 月第 1 版
2016 年 8 月第 1 次印刷

规格 787 × 1092

开本 1/16

印张 19.75

字数 481 千字

书号 ISBN 978 - 7 - 5159 - 1162 - 5

定价 128.00 元

本书如有印装质量问题, 可与发行部联系调换

航天科技图书出版基金简介

航天科技图书出版基金是由中国航天科技集团公司于 2007 年设立的，旨在鼓励航天科技人员著书立说，不断积累和传承航天科技知识，为航天事业提供知识储备和技术支持，繁荣航天科技图书出版工作，促进航天事业又好又快发展。基金资助项目由航天科技图书出版基金评审委员会审定，由中国宇航出版社出版。

申请出版基金资助的项目包括航天基础理论著作，航天工程技术著作，航天科技工具书，航天型号管理经验与管理思想集萃，世界航天各学科前沿技术发展译著以及有代表性的科研生产、经营管理译著，向社会公众普及航天知识、宣传航天文化的优秀读物等。出版基金每年评审 1~2 次，资助 20~30 项。

欢迎广大作者积极申请航天科技图书出版基金。可以登录中国宇航出版社网站，点击“出版基金”专栏查询详情并下载基金申请表；也可以通过电话、信函索取申报指南和基金申请表。

网址：<http://www.caphbook.com>

电话：(010) 68767205, 68768904

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年我国首次月球探测工程的成功实施，标志着我国已经进入世界具有深空探测能力的国家行列；2010年第二颗月球探测器“嫦娥二号”成功发射，分别于2011年实现了日地拉格朗日L2点探测、2012年实现了对4179号小行星（Toutatis，图塔蒂斯）的近距离飞越探测；2013年“嫦娥三号”完成了月面软着陆和巡视探测，实现了中国人的无人登月。当前，我国正在实施以“绕、落、巡”为主要内容的火星探测工程，未来还将开展以火星采样返回、小行星防御探测等为代表的深空探测活动。深空探测任务的实施将对推动航天事业发展、引领国家科技创新发挥十分重要的作用。

在人类进行深空探测活动的时候，由于深空天体目标多数与地球相距遥远（近邻火星与地球距离最近时约5500万千米，最远超过4亿千米），信息传输时滞很大（地球与火星间的单向信息传输时间约在3分钟至22分钟之间），要实现深空天体目标的探测活动，仅依靠地面测控站难以满足对探测器的实时控制要求，因此探测器的自主管理成为深空探测的关键技术之一。自主管理包括探测器的自主任务规划与执行、自主导航与制导、自主科学与任务操作三个主要方面，其中自主导航与制导是在航天领域研究较早、已经进入应用阶段的一项关键技术。然而深空探测器的自主导航与制导往往面临可用导航天体源少且目标暗弱、导航信息源少且获取困难、星表形貌复杂且先验信息匮乏、小天体周围环境复杂且不确定性大等难题，同时在探测器的不同任务阶段所面临的难点问题各有不同。上述难点问题的出现，对导航与制导技术提出了更大的挑战，同时也是深空探测领域自主导航与制导技术发展的动力源泉。

《深空探测器自主导航与制导》一书从深空探测器自主导航系统可观性分析与度量入手，介绍深空环境和工程约束下的自主导航与制导问题；进而针对深空任务所包含的四个主要阶段——星际巡航段、接近交会段、环绕伴飞段和下降着陆段，分别介绍了导航信息的获取与处理方法、星际巡航和环绕伴飞的自主导航方法以及接近交会和下降着陆的自主导航与制导方法；既包含了不同飞行阶段的任务特点分析，又介绍了相应的自主导航方案及其实现方法，涵盖了深空探测自主导航与制导的主要阶段和内容；最后介绍了具有重要

工程应用价值的三类典型深空任务——小天体撞击、小天体附着和火星着陆的自主导航与制导系统设计方法与仿真案例。该书所介绍的自主导航与制导系统设计思想和方法算法，紧密结合深空特殊环境和工程任务约束，将基础理论与新颖思想有机融合，对读者具有很好的启发作用。

本书凝聚了崔平远教授及其带领的科研团队，近年来在国家 973 等计划支持下开展的科研工作和参加月球探测工程实践中积淀的技术经验和成果，是一本融合基础理论和工程实际应用的学术专著，既可作为从事深空探测领域相关工作研究人员和科技工作者的参考书，也可作为航空宇航相关学科研究生的教材，将对促进我国深空探测器自主导航与制导技术的进一步研究和发展做出贡献。



二〇一六年八月十日

前 言

深空探测是人类对深空环境和天体开展的探测活动。它是伴随人类航天科技水平和能力提升而发展的又一航天活动重点领域。与地球卫星相比,深空探测器距离地球远、传输时滞大、实时测控难,仅依靠地面测控难以满足探测器的实时性要求,因此,探测器的自主管理成为深空探测领域的关键问题之一。本书是针对探测器自主管理的核心问题——自主导航与制导,在作者多年从事深空探测器自主导航与制导方面研究工作的基础上,参考相关优秀文献而完成的。期待本书能为我国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章介绍深空导航与测控、自主导航与制导的特点及其相关的基本问题;第2章从深空动力学系统建模、导航观测模型与分析、深空轨道自主确定等问题出发,介绍深空探测器自主导航基本原理;第3章围绕深空自主导航系统特点,分别从导航系统可观性、非线性、稳定性与精度评价四个方面介绍自主导航系统性能分析理论与方法;第4章针对自主导航系统信息获取与处理问题,给出探测器不同飞行阶段的自主导航信息处理理论与方法;第5~8章针对深空探测器各飞行阶段特点,分别给出了星际巡航段、接近交会段、环绕伴飞段、下降着陆段的自主导航与制导方法;第9章结合小天体撞击、小天体附着、火星着陆三类典型任务,分析并给出了深空探测器自主导航与制导系统设计方法,同时介绍了三类典型任务的仿真实例。

本书围绕深空探测器自主导航与制导的特殊环境与约束问题,系统介绍了深空探测器自主导航与制导的基础理论,给出了探测器不同飞行阶段的自主导航与制导方法,包括基于暗弱目标的星际巡航段自主导航方法、基于天体视线信息的接近段自主导航与交会制导方法、基于路标信息的绕飞天体参数自主确定方法、基于矢量测量的着陆状态自主估计方法。书中既包括深空探测自主导航与制导的基础理论,又含有新颖的自主导航与制导系统设计思想和实用方法。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,也可作为高等院校相关专业的教学参考书。

本书初稿完成于2012年秋,几经修改,前后历时3年。其间,在国家973计划项目的资助下,补充完善了最新研究结果,同时得到了栾恩杰院士的精心指导。回顾十六年前

栾恩杰院士引领我们进入深空探测领域开始耕耘，其情景仍历历在目，借此《深空探测器自主导航与制导》专著出版的机会，对栾恩杰院士的引领、指导和鼓励表示衷心的感谢。

本书包含了作者所在研究团队的相关研究成果，多位已毕业博士和硕士的研究工作为本书的撰写提供了支持，在此一并致谢。

本书的出版得到了“航天科技图书出版基金”的资助，同时得到了“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

二〇一六年五月于北京

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 引言	1
1.1.1 深空与深空探测	1
1.1.2 深空探测典型任务	1
1.2 深空探测器的导航问题	4
1.2.1 探测器导航与测控	4
1.2.2 探测器制导与控制	6
1.3 深空探测器自主导航	7
1.4 本书主要内容	11
参考文献	12
第 2 章 自主导航模型与方法	14
2.1 动力学系统模型	14
2.1.1 坐标系与时间系统	14
2.1.2 轨道动力学方程	20
2.2 导航观测模型	24
2.2.1 近天体视线角测量模型	24
2.2.2 夹角信息测量模型	24
2.2.3 径向速度测量模型	24
2.2.4 距离测量模型	25
2.2.5 脉冲星测量模型	25
2.3 导航敏感器	26
2.3.1 光学敏感器	26
2.3.2 惯性测量单元	31
2.3.3 测距测速敏感器	31
2.3.4 可变辐射信号敏感器	31
2.4 导航几何分析法	32

2.4.1 导航位置面	32
2.4.2 探测器位置确定	33
2.4.3 探测器姿态确定	35
2.4.4 天体特性参数确定	36
2.5 探测器自主轨道确定	38
2.5.1 自主轨道确定原理	38
2.5.2 自主轨道确定方法	40
参考文献	49
第3章 自主导航系统性能分析	51
3.1 自主导航系统的可观性分析	51
3.1.1 自主导航系统可观性判别	51
3.1.2 自主导航系统可观性度量	70
3.2 自主导航系统的非线性强度分析	84
3.2.1 非线性强度定义	84
3.2.2 非线性强度判别	84
3.3 自主导航系统的稳定性分析	85
3.4 自主导航系统的精度分析	87
3.4.1 状态误差椭圆	87
3.4.2 状态误差传递	89
3.4.3 导航系统的误差界	90
参考文献	97
第4章 自主导航信息处理	98
4.1 星际巡航段信息处理	98
4.1.1 星际巡航段导航信息特点	98
4.1.2 星际巡航段导航信息处理	98
4.1.3 暗弱星点拖曳图像中心特征提取	99
4.2 接近交会段信息处理	100
4.2.1 接近交会段导航信息特点	100
4.2.2 接近交会段导航信息处理	100
4.2.3 不规则目标天体几何形心获取	100
4.3 环绕伴飞段信息处理	102
4.3.1 环绕伴飞段导航信息特点	102
4.3.2 环绕伴飞段导航信息处理	103
4.3.3 复杂形貌特征鲁棒识别匹配	103

4.4 下降着陆段信息处理	105
4.4.1 下降着陆段导航信息特点	105
4.4.2 下降着陆段导航信息处理	106
4.4.3 星表形貌识别与着陆点确定	106
参考文献	140
第5章 星际巡航段自主导航	142
5.1 星际巡航任务特点	142
5.2 星际巡航段自主导航方法	142
5.2.1 小行星筛选与规划	142
5.2.2 多小行星图像自主导航方法	145
5.3 巡航姿态机动规划与控制	153
5.3.1 姿态机动规划与控制问题	153
5.3.2 单轴随机扩展大角度机动规划	154
5.3.3 多约束下姿态机动规划与控制	157
参考文献	160
第6章 接近交会段自主导航与制导	161
6.1 接近交会任务特点	161
6.2 接近交会段自主导航方法	161
6.2.1 地面辅助的光学导航方法	161
6.2.2 目标天体图像自主导航方法	169
6.3 接近交会段自主制导方法	172
6.3.1 自主交会比例制导方法	172
6.3.2 自主交会预测制导方法	177
参考文献	186
第7章 环绕伴飞段自主导航	187
7.1 环绕伴飞任务特点	187
7.2 目标天体导航特征库构建方法	187
7.2.1 序列图像观测模型	187
7.2.2 弱透视近似透视投影变换	189
7.2.3 基于因式分解算法的三维重构及状态估计	189
7.2.4 丢失及新增特征点的处理	191
7.2.5 不确定性分析	192
7.2.6 实例应用与分析	193
7.3 环绕伴飞段自主导航方法	196

7.3.1 目标天体物理参数估计方法	196
7.3.2 目标天体特征自主导航方法	209
参考文献	219
第8章 下降着陆段自主导航与制导	220
8.1 下降着陆任务特点	220
8.2 下降着陆段自主导航方法	221
8.2.1 多特征图像光学导航方法	221
8.2.2 三矢量信息组合导航方法	232
8.3 下降着陆段自主制导方法	236
8.3.1 多项式制导算法	236
8.3.2 能量最优制导算法	239
8.3.3 多约束着陆轨迹优化方法	241
8.3.4 路径点优化反馈制导算法	245
参考文献	248
第9章 自主导航与制导系统仿真	250
9.1 仿真系统的功能与结构	250
9.1.1 仿真系统设计	250
9.1.2 数学仿真系统	255
9.1.3 半物理仿真系统	273
9.2 小天体撞击自主导航与制导半物理仿真	279
9.2.1 小天体撞击任务分析	279
9.2.2 仿真系统设计	279
9.2.3 典型任务仿真实例	282
9.3 小天体附着自主导航与制导半物理仿真	284
9.3.1 小天体附着任务分析	284
9.3.2 仿真系统设计	286
9.3.3 典型任务仿真实例	289
9.4 火星着陆自主导航与制导数学仿真	291
9.4.1 火星着陆任务分析	291
9.4.2 仿真系统设计	291
9.4.3 典型任务仿真实例	296
参考文献	304

第1章 绪论

1.1 引言

深空探测是人类航天技术发展的高级阶段，是对地外天体或空间进行的探测活动。通过深空探测活动，可以使人类更深入地了解太阳系及宇宙的起源、演化和现状，进一步认识地球环境的形成和演变，获得空间现象和地球自然系统之间的关系，同时也有利于推动地外天体防御技术的发展，促进航天技术创新和空间科学研究水平提升。

1.1.1 深空与深空探测

目前，关于深空的定义主要有两种。第一种定义认为距离地球大于或等于地月距离的宇宙空间即为深空；第二种定义由国际电信联盟（ITU, International Telecommunication Union）给出^[1]，把距离地球 200 万千米以远的宇宙空间作为深空。

基于上述深空的定义，深空探测相应有两种定义^[2]。一种是月球及月球以远的空间探测活动为深空探测；另一种是距离地球 200 万千米以远的空间探测活动称为深空探测。与此相应，还有以探测器所受天体引力作用的性质来划分深空探测活动的第三种定义，即不以地球为主要引力场的探测活动可定义为深空探测。按照上述第一种和第三种定义，月球探测属于深空探测；若按第二种深空探测的定义，月球探测则不属于深空探测。目前为止人类进行的深空探测活动主要以太阳系为主，同时兼顾宇宙空间的观测。

1.1.2 深空探测典型任务

(1) 深空 1 号

NASA “新千年”计划的目标是在低成本探测器上试验新技术，为未来更复杂的深空任务提供技术储备。深空 1 号（Deep Space 1）探测器于 1998 年 10 月 24 日发射，是 NASA “新千年”计划中的第一个任务。在其发射之后的 9 个月内，深空 1 号成功地测试了 12 项新技术，并进行了小行星 Braille (1992 KD) 的近距离伴飞^[3]。1999 年末，其恒星跟踪器出现故障。通过对探测器进行重新配置，在 2000 年年初成功修复故障，并提出了探测 Borrelly 彗星的拓展任务。2001 年 9 月，深空 1 号飞近 Borrelly 彗星的彗核，在相距 2 171 km 处拍下了高分辨率的彗星图像。

深空 1 号进行了一系列新技术试验，光学自主导航是其关键技术之一。探测器通过星载相机拍摄小行星和恒星的图像，导航与控制系统自主计算和修正探测器的飞行轨道。深

空 1 号的光学导航系统是其自主系统的核心部分,称之为 AutoNav 系统^[4]。该系统存储的数据包括事先计算好的标称轨迹,以及目标天体、小行星、太阳系行星和 250 000 颗恒星的星历。在整个任务中,AutoNav 大约每周工作一次,除了能够在巡航段通过多小行星图像导航进行轨道确定外,还可以在接近交会段执行目标跟踪,为姿态控制系统提供精确的姿态指向信息,并基于对目标接近时间的估计进行交会序列操作的初始化。

深空 1 号任务的成功实施对深空探测技术的发展至关重要。任务中不仅传回了大量的科学任务数据,而且验证了多项深空探测自主技术,其性能参数为后续的探测器设计提供了详细参考。作为 NASA “新千年”计划的重要任务之一,深空 1 号也体现出深空探测自主导航与制导技术是未来深空探测发展的重要方向。

(2) 隼鸟号

2003 年 5 月 9 日,日本发射了其首个小行星探测器隼鸟号(Hayabusa)。任务的主要目的是实现对 25143 小行星(又名糸川,Itokawa)的采样返回,并在任务实施过程中对新技术进行测试^[5]。

自主导航与制导技术是隼鸟号的亮点之一^[6]。为了在着陆区先验信息不足的条件下实现小行星着陆,日本宇宙与航天科学研究所所以隼鸟号任务为背景研制了着陆小行星的自主导航与制导系统。该系统通过光学导航相机对着陆目标区拍照,利用激光测距仪测量探测器到小行星表面的距离,导航滤波器通过处理图像和距离信息来获得探测器的位置和速度,再将状态信息反馈给制导系统,进而实现探测器的软着陆。

小行星探测是技术含量高、投入成本低、科学回报大的深空探测任务,“隼鸟号”发展和验证了小行星采样返回的诸多技术,为未来小天体着陆探测任务提供了重要参考。

(3) 火星漫游者

火星漫游者(MER, Mars Exploration Rover)是 NASA 火星探测计划的一部分,主要用于探测火星上是否出现过生命、火星岩石与土壤的形成过程中是否出现过水,以及火星气候特征等。火星漫游者任务包括 MER-A 和 MER-B 两次火星着陆任务,两颗火星探测器分别称为勇气号(Spirit)和机遇号(Opportunity)。勇气号于 2003 年 6 月 10 日成功发射,机遇号于同年 6 月 25 日成功发射。两颗探测器分别于美国东部时间 2004 年 1 月 3 日和 24 日在古谢夫陨石坑和维多利亚陨石坑实现成功着陆。

火星漫游者首次在火星着陆过程中采用了光学导航,其星载的下降图像运动估计系统(DIMES, Descent Image Motion Estimation System)在三个不同高度拍摄着陆地形获得下降图像,通过三幅序列图像间的特征点匹配,估计探测器每两幅图像拍摄之间的水平位移,进而结合匀速运动的假设,确定探测器的平均水平速度^[7]。此外,火星漫游者考虑了未知风的干扰,在水平方向上通过控制主减速发动机来抵消水平速度。在竖直方向上,勇气号和机遇号载有雷达高度计^[8],可以实时精确获取探测器相对火星表面的高度和竖直方向速度,结合水平速度的估计,通过制导控制实现软着陆。

(4) 罗塞塔

2004 年 3 月 2 日,发射了罗塞塔(Rosetta)彗星探测器,探测目标为 67P/丘留莫夫-

格拉西缅科 (67P/Churyumov - Gerasimenko) 彗星, 主要科学目标包括对彗星的全局及动态特性的测定, 彗星挥发物和矿物成分测定, 以及研究彗星表层活动演化过程等^[9]。在为期 10 余年的深空飞行过程中, 罗塞塔探测器经历了一次火星借力和三次地球借力, 在飞往目标彗星的过程中, 罗塞塔对 2867Steins 和 21Lutetia 两颗小行星进行了飞越探测, 并于 2014 年 11 月在距离彗星表面 22.5 km 处释放菲莱 (Philae) 着陆器, 实现了首次彗星着陆。

菲莱的整个下降过程持续 7 个小时。菲莱着陆器无导航和轨道控制系统, 仅依靠彗星微弱的引力下降, 着陆器通过内部的飞轮进行姿态控制^[10]。由于无法实现软着陆, 加之彗星引力微弱, 菲莱以微小的速度与彗星表面接触后发生了第一次反弹, 反弹高度约 1 km, 速度达到 38 cm/s, 历时约 1 小时 50 分钟。此后, 菲莱以 3 cm/s 的速度被第二次弹回, 7 分钟后着陆在最终位置。由于菲莱位于巨大洼地中, 并且部分处于黑暗, 导致光照不足, 因而无法正常工作。菲莱的着陆过程说明了自主导航与制导技术在小天体着陆中的重要性。着陆器依靠精确的自主导航系统确定自身的位置和速度, 结合制导控制才有可能成功实现软着陆。

(5) 深度撞击

2005 年 1 月 12 日, NASA 将彗星探测器发射升空, 实施深度撞击 (Deep Impact) 计划。探测器于 2005 年 7 月 4 日抵达坦普尔 1 号 (9P/Tempel 1) 彗星, 并释放一个小型撞击器撞向彗星, 用以探测彗星表层下物质; 同时观测弹坑形状, 测量弹坑深度、半径及弹坑内部与喷出物的组成, 并确定彗星释放气态物质的变化^[11]。2005 年 7 月 21 日, 飞越器执行了一次深空机动, 进入了返回地球的旅程, 并于 2007 年 12 月经过地球借力, 在 2008 年 12 月 5 日飞向 Boethin 彗星, 继续执行 NASA 的发现计划 (Discovery Program)。

深度撞击探测器包括一个飞越器和一个撞击器, 其自主导航与制导系统是影响撞击任务成败的关键因素, 该系统负责飞越器的指向控制与撞击器的末段制导。其中, 自主导航系统包含 3 个独立模块: 图像处理、轨道确定、机动计算^[12], 可处于两种工作模式: 1) 有星模式, 即利用包含目标天体与两颗以上其他星体的图像, 在每个曝光时刻确定探测器方位; 2) 无星模式, 即利用姿态确定控制系统 (ADCS) 确定探测器姿态, 在每个曝光时刻与相机拍摄信息联合确定飞越器方位。撞击器的制导系统采用预测制导策略与脉冲制导方式, 通过动力学递推预测撞击位置, 并计算其与目标位置误差, 用以确定推力大小和方向。

(6) 火星科学实验室

北京时间 2011 年 11 月 26 日, NASA 成功发射了火星科学实验室 (MSL, Mars Science Laboratory) 探测器, 其携带的好奇号 (Curiosity) 火星巡视探测器于 2012 年 8 月 6 日成功着陆在火星的盖尔陨坑进行探测活动。按照 NASA 的计划, 好奇号将在火星表面至少工作一个火星年 (686 个地球日)。在此期间, 好奇号将挖掘火星土壤, 钻取火星岩石粉末, 分析火星岩石样本, 探测火星是否具有支持微生物生存的环境。

火星科学实验室是美国新一代火星探测器的先驱, 成功将大质量火星车着陆于目标区

域,且着陆点海拔高度是历次火星着陆任务中最高的。火星科学实验室在火星大气进入过程中依靠惯性测量单元递推位置和速度,并首次采用大气进入制导,以消除由于进入初始偏差、大气模型不确定性及探测器动力学参数不确定性引起的落点误差,进而提高了探测器进入轨道控制能力和着陆精度^[13]。在动力下降段,火星科学实验室依靠六波束多普勒雷达测量相对火星表面的高度和速度^[14],并采用二次多项式制导策略对着陆器进行制导控制^[15]。最终利用“空中吊车”技术,采用绳系结构将好奇号平稳放至火星表面。此外,在下降过程中,着陆器还依靠星载相机对盖尔陨坑进行拍照,并对着陆区域地形进行评估,初步实现了障碍检测与规避能力。由于采用了大气进入制导技术,好奇号的着陆精度相比火星漫游者有了明显提高。

上述6次典型深空探测任务中,自主导航与制导技术是任务成功实施的关键。探测器具备星上自主导航与制导能力,不仅能有效避免测控信号传输造成的时延,也能解决人为数据处理和指令计算引起的延迟问题。应用星上自主导航与制导技术,从导航定位到指令生成的时间可缩短到几分钟甚至几秒钟,减少了操作复杂性,降低了任务成本,简化了地面支持系统,有效扩展了探测器的可执行任务范围,增加了科学回报。同时探测器自主导航也是探测器自主化的关键,可以进一步增强探测器的自主生存能力,扩展其空间应用潜力。

1.2 深空探测器的导航问题

1.2.1 探测器导航与测控

广义的导航是指将探测器从一个位置引导到另一个位置的过程,也可以理解为引导探测器沿预定轨道,以要求精度在指定时间内到达目的地的技术。本书中讨论的深空探测器导航是指确定或估计探测器的状态,包括描述质心运动的位置和速度,以及描述绕质心转动的姿态角和角速度。

目前,无线电测控是技术成熟、应用广泛的深空导航方式,也是天地信息交互的唯一途径。深空测控通信系统包括地面基站和空间应答机两部分,其主要任务是通过上行链路完成对深空探测器的遥测、跟踪与指令控制。下行链路则负责科学数据、音频及图像等信息的下传任务,即通过双向无线电通信链路,对探测器进行跟踪测量、导航定位、指挥控制等。深空测控与地球卫星测控最根本的区别在于,由于探测器距离地球远,导致信息传输时延大,从而衍生出一系列深空探测的测控通信问题。

(1) 测控通信衰减与时延问题

通信距离变远,增加了通信路径的损耗,如表1-1所示^[16]。如何弥补如此巨大的损失以达到测控通信的目的是深空测控面临的难题之一。由于距离过大引起天线能量发散,加之受天线尺寸与功率的限制,深空探测器即使采用定向天线用以集中能量指向地球,所取得的效果也是极其有限的。同时,由于探测器存储容量有限,使得不能完全采用传统存储转发的方式解决距离过大引起的时延问题。随着深空探测任务的多样化和复杂化,需要

传送的数据量会变得非常巨大，传统的数据传输方式也难以满足未来深空探测的需求。

表 1-1 地球至太阳系各行星、月球的距离和时延

天体	距地球最远 距离/ (10^6 km)	增加路径 损耗/dB	最大时延	距地球最近 距离/ (10^6 km)	增加路径 损耗/dB	最小时延
月球	0.405 5	21.030	1.35 s	0.363 3	20.75	1.211 s
水星	221.9	75.797	12.378 min	101.1	68.969	5.617 min
金星	261.0	77.207	14.5 min	39.6	60.829	2.2 min
火星	401.3	80.943	22.294 min	59.6	64.345	3.31 min
木星	968.0	88.591	53.78 min	593.7	84.345	32.983 min
土星	1659.1	93.271	92.172 min	1 199.7	90.457	86.661 min
天王星	3 155.1	98.854	260.783 min	2 591.9	97.146	143.994 min
海王星	4 694.1	102.305	418.617 min	4 304.9	101.533	239.161 min

(2) 断续测控和通信问题

探测器对地外天体的探测，包括飞越、绕飞和硬/软着陆等几种方式。由于地球和目标天体的自转运动，地面的单座深空测控通信站平均只能观测到探测器 8~12 h；反之，探测器也只能和单座深空测控通信站建立 8~12 h 的通信链路，如表 1-2 所示。如何将深空探测器采集到的珍贵数据和资料及时连续地传回地球，也是深空测控通信中的难点问题。

表 1-2 深空探测中的断续测控和通信时间

飞越方式	绕飞方式	硬/软着陆方式	着陆巡游方式
8~12 h	绕飞周期一半时间 (另一半被遮挡)	目标星自转周期一半时间 (另一半无法直接通信)	目标星自转周期一半时间 (另一半无法直接通信)

(3) 高精度导航定位问题

导航定位是深空通信的基础。深空探测器在空间运行，地面站与其建立通信链路、保证通信质量必须确切获知探测器在相应坐标系中的位置和速度，进而使天线方向能够对准探测器并接收信号，反之同理。由于深空探测距离远，因此就更加需要地面站具有精确的测角、测距和测速能力，为深空探测器导航定位。

20 世纪 70 年代初，导航系统主要依靠与航天器之间的双向通信链路传输时延和载波多普勒频移来测距测速。20 世纪 70 年代后期，增加了甚长基线干涉法测角，继而又发展了能够实时测角的连接元干涉技术和同波束干涉技术等^[17]。深空探测器距离地球远，获得高精度的距离、角度和速度信息十分困难，这要求时钟和载频的稳定性非常高，且需要精确已知深空测控通信站在地球坐标系中的位置。传统方法需要对多天的测量数据作相关处理，才能得到相对精确的数值。同时，为了保证通信可靠性，就需要降低码速率，这又增加了相关处理的时间。因此发展一种实时的高精度定轨方法是深空测控通信的迫切需求。