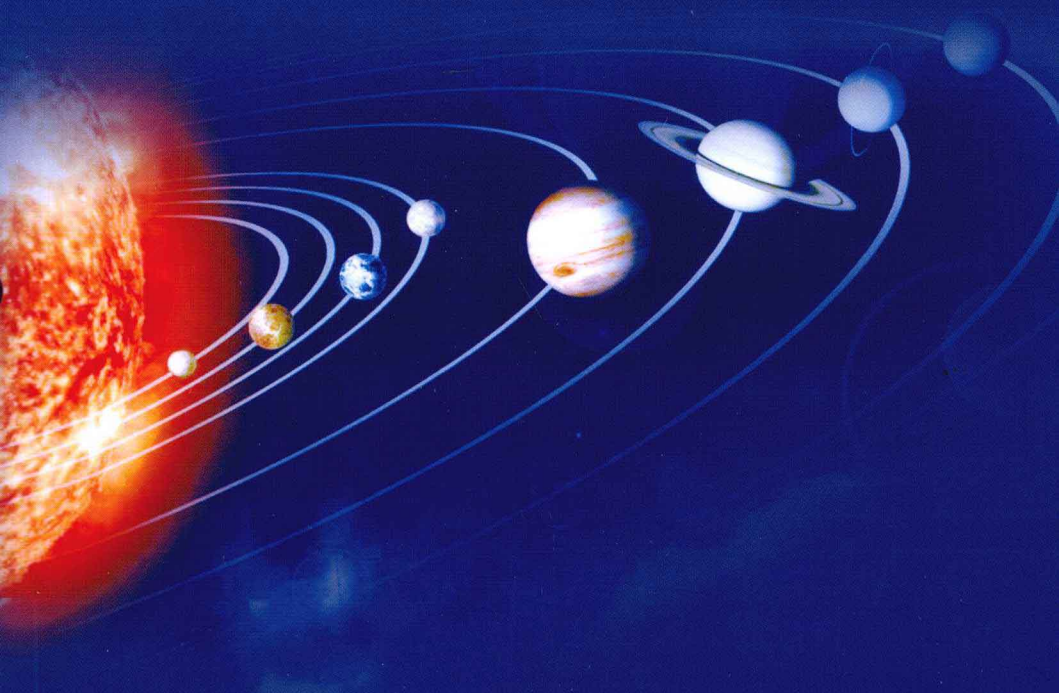




航天科技图书出版基金资助出版

基于光学成像测量的深空探测 自主控制原理与技术

王大轶 黄翔宇 魏春岭 著



中国宇航出版社

航天科技图书出版基金资助出版

基于光学成像测量的深空探测 自主控制原理与技术

王大轶 黄翔宇 魏春岭 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

基于光学成像测量的深空探测自主控制原理与技术/王大轶, 黄翔宇, 魏春岭著. --北京:中国宇航出版社, 2012. 12

ISBN 978-7-5159-0321-7

I. ①基… II. ①王… ②黄… ③魏… III. ①空间探测器—自动控制理论—研究 IV. ①V476

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 262439 号

责任编辑 曹晓勇 彭晨光

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

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 北京画中画印刷有限公司

版次 2012 年 12 月第 1 版

2012 年 12 月第 1 次印刷

规格 880 × 1230

开本 1/32

印张 14

字数 377 千字

书号 ISBN 978-7-5159-0321-7

定价 118.00 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地发展。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10~20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

经过四十多年的发展，我国航天事业取得了一系列辉煌成就，继近地卫星、载人航天之后，在深空探测领域也取得了历史性的突破。2007年发射的嫦娥1号月球探测器实现了“嫦娥奔月”的千年梦想。2010年发射的嫦娥2号探测器，在成功实现更为完整详细的绕月探测后，先后进入日地拉格朗日L2点和飞往小行星图塔蒂斯（编号4179）的转移轨道，为月球以远的深空探测进行相关技术试验。

目前我国“探月二期”的月球软着陆、月面巡视探测任务研制进展顺利，正在进行“探月三期”取样返回的技术攻关工作，后续还将逐步开展以太阳、火星、金星和小行星等天体为目标的深空探测活动。由于深空探测器飞行距离远、运行时间长，对自主控制技术的需求非常迫切。在接近、着陆等特殊轨道段，自主控制已成为深空探测的必备技术，直接决定了探测器的任务成败和生存能力。

本书凝聚了王大珩研究员及其研究团队近十年来在深空探测自主导航与自主控制领域的研究成果。该书系统地阐述了基于光学成像测量的深空探测自主控制原理和方法，内容涉及自主导航原理、导航信息获取和参数估计方法、系统设计和试验验证技术以及典型轨道任务段自主导航方案的应用实例等，反映了本领域的研究前沿和发展趋势，是一本不可多得的学术专著。相信本书的出版必将进一步推动深空探测自主控制技术的研究和发展，为圆满完成月球以远深空探测任务作出重要贡献。

吴宏鑫

2012年10月

前 言

与地球轨道航天器相比，深空探测器的飞行距离更远、运行时间更长、任务环境更复杂，因此，仅依赖地面测控网进行导航，在精度、实时性、可靠性等诸多方面受到限制，难以满足深空探测特殊任务阶段对高精度实时导航和轨道控制的要求。自主导航与控制技术是解决这些问题的有效途径，已实现的深空探测任务一般都具有一定的自主控制能力。目前发展的深空探测自主控制主要是以光学成像测量为基础的自主导航和自主轨道控制技术。

本书深入系统地介绍了基于光学成像测量的深空探测自主控制原理、方法、技术和应用问题。全书内容分为4部分，共12章。第一部分是基本概念和基本原理，其中第1章为绪论，介绍了自主控制的基本概念，综述了自主控制在深空探测中的发展历程和技术特点；第2章介绍了基于光学成像测量的自主控制基本原理。第二部分主要介绍光学成像自主导航的基本技术和方法，具体涉及导航信息的获取和导航参数的估计问题，包括第3~6章，对于导航信息的获取问题，研究了导航天体选取与规划方法、导航天体光学图像处理方法；对于导航参数的估计问题，研究了自主导航系统可观性分析方法、自主导航滤波与信息融合方法。第三部分包括第7~11章，将前两部分的研究成果应用到深空探测日心转移轨道段、接近轨道段、环绕轨道段和撞击轨道段中，主要研究了各个任务阶段的自主导航方案以及相应的自主导航、制导与控制技术，此外，还介绍了基于光学成像测量的自主导航数学仿真和半物理仿真试验技术。第四部分即第12章，是对全书的总结和对技术发展趋势的展望。

本书是作者近十年来在从事深空探测自主导航与控制技术研究的基础上,结合该领域的最新进展,总结相关课题的研究成果而成,内容集基本原理与方法、系统设计和试验技术于一体,反映了本领域的研究前沿和技术发展趋势。本书既可作为航天科研人员和工程技术人员的参考书,也可作为相关专业的研究生教材。

本书成稿过程中,得到了空间智能控制技术重点实验室深空探测制导、导航与控制技术研究团队的大力支持,其中李骥、熊凯、毛晓艳、张晓文等参与了本书部分内容的编写和图文整理工作,张晓文、毛晓艳、郝云彩、褚永辉、朱志斌和张斌等承担了部分仿真试验和数据整理工作。

衷心感谢吴宏鑫院士、李铁寿研究员对本书给予的指导,以及李果研究员、刘良栋研究员和何英姿研究员对本书提出的宝贵意见。中国宇航出版社张铁钧副社长为本书的出版做了大量工作,在此一并致谢。

本书涉及的研究工作得到了国家 863 计划、国家 973 计划、基础科研、民用航天、国家自然科学基金、北京控制工程研究所和空间智能控制技术重点实验室的大力支持,本书的出版得到了“航天科技图书出版基金”的资助,作者在此表示衷心感谢。

深空探测技术发展迅速,加上作者水平所限,难以全面、完整地就深空探测自主控制技术的研究前沿一一深入探讨。书中错误及不当之处,恳请读者批评指正。

作者

2012 年 7 月于北京

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 制导、导航与控制	2
1.1.1 基本概念	2
1.1.2 自主控制技术	4
1.2 深空探测自主控制的典型任务	6
1.2.1 月球探测自主控制技术	8
1.2.2 行星探测自主控制技术	15
1.2.3 小行星及彗星探测自主控制技术	21
1.3 本书的主要内容	32
参考文献	36
第 2 章 光学成像自主导航与控制基本原理	39
2.1 参考坐标系及坐标变换	39
2.1.1 参考坐标系的定义	40
2.1.2 坐标系之间的变换	43
2.2 时间系统	45
2.2.1 时间系统的定义	45
2.2.2 儒略日的定义及转换	47
2.3 导航天体星历	48
2.3.1 高精度天体星历计算	49
2.3.2 简单天体星历计算	51
2.4 航天器轨道动力学模型	53

2.4.1	轨道摄动模型	53
2.4.2	轨道动力学方程	58
2.4.3	深空探测器轨道动力学模型	60
2.5	光学成像自主导航	62
2.5.1	基本原理	62
2.5.2	导航天体的选取与规划	67
2.5.3	导航天体图像的处理方法	68
2.5.4	观测方程和状态方程的建立	68
2.5.5	导航滤波算法的选择	69
2.6	自主轨道控制方法	70
2.6.1	基于 B 平面参数的自主中途修正方法	71
2.6.2	接近目标天体的自主轨道规划方法	80
2.7	小结	91
参考文献		92
第3章	导航天体选取与规划方法	94
3.1	导航天体类型及其特点	94
3.1.1	行星轨道与光学特性	95
3.1.2	行星卫星轨道与光学特性	97
3.1.3	小行星轨道与光学特性	98
3.2	导航天体选取标准	101
3.2.1	太阳相角标准	102
3.2.2	视星等标准	103
3.2.3	视运动标准	105
3.2.4	三星概率标准	105
3.2.5	深空探测器与天体距离标准	108
3.3	导航天体最优组合选取方法	108
3.3.1	精度衰减因子	108
3.3.2	基于 PDOP 的导航天体最优组合选取方法	109

3.4 导航天体观测序列规划方法	113
3.4.1 导航天体观测序列优化标准	113
3.4.2 基于遗传算法的导航天体观测序列规划方法	114
3.4.3 基于蚁群优化算法的导航天体观测序列规划 方法	117
3.5 小结	121
参考文献	122
第4章 导航天体光学图像处理方法	123
4.1 光学测量原理	123
4.1.1 光学成像模型	124
4.1.2 平移及旋转变换	128
4.2 星点和星迹图像处理	129
4.2.1 星点光学成像特点	129
4.2.2 星点图像的处理方法	130
4.2.3 星迹图像的处理方法	139
4.3 规则天体图像处理	154
4.3.1 规则天体光学成像特点	154
4.3.2 规则面目标图像处理算法的基本原理	155
4.3.3 图像算法的处理过程	158
4.3.4 仿真实例	162
4.4 不规则天体图像处理	163
4.4.1 不规则天体光学成像特点	163
4.4.2 目标分割方法	163
4.4.3 中心提取方法	165
4.4.4 仿真实例	167
4.5 小结	168
参考文献	169

第 5 章 自主导航系统可观性分析方法	171
5.1 线性系统的可观性	172
5.1.1 线性定常系统的可观性	172
5.1.2 线性时变系统的可观性	176
5.2 非线性系统的可观性	178
5.2.1 非线性系统可观性定义及判据	178
5.2.2 基于奇异值分解的可观性分析	183
5.3 自主导航系统的可观度	186
5.3.1 自主导航系统可观度分析	187
5.3.2 状态可观度分析	198
5.4 小结	203
参考文献	204
第 6 章 自主导航滤波与信息融合方法	206
6.1 基于确定性模型的滤波算法	207
6.1.1 最小二乘算法	207
6.1.2 卡尔曼滤波算法	210
6.1.3 扩展卡尔曼滤波算法	214
6.2 基于不确定模型的滤波方法	226
6.2.1 鲁棒滤波问题描述	226
6.2.2 鲁棒滤波算法设计	231
6.2.3 改进的鲁棒滤波性能分析	238
6.2.4 基于无模型加速度估计的自适应导航滤波算法	245
6.3 基于信息融合的深空探测自主导航	250
6.3.1 多源测量信息融合基本概念	250
6.3.2 基于光学成像测量和 X 射线脉冲星的自主导航	255
6.3.3 多源信息融合的组合导航性能分析	263
6.4 小结	266
参考文献	268

第 7 章 日心转移轨道段的自主导航与制导	271
7.1 日心转移轨道段自主导航与制导方案	271
7.1.1 系统组成与功能	271
7.1.2 导航敏感器	273
7.1.3 执行机构	274
7.2 日心转移轨道段自主导航技术	275
7.2.1 导航图像处理	275
7.2.2 导航观测方程	275
7.2.3 导航状态方程	278
7.2.4 导航参数的滤波估计	279
7.3 日心转移轨道段自主制导技术	284
7.3.1 采用速度脉冲控制的中途轨道修正方法	284
7.3.2 采用小推力连续控制的中途轨道修正方法	287
7.4 应用实例	289
7.5 小结	295
参考文献	296
第 8 章 接近轨道段的自主导航与轨道控制	298
8.1 接近轨道段自主导航与轨道控制方案	298
8.1.1 系统组成与功能	298
8.1.2 导航敏感器	300
8.1.3 执行机构	301
8.2 接近轨道段自主导航技术	301
8.2.1 接近大天体	302
8.2.2 接近小天体	308
8.3 接近轨道段自主轨道控制技术	316
8.3.1 基于 B 平面的制导方法	316
8.3.2 自主轨道规划	320

8.4	应用实例	322
8.4.1	接近大天体过程的自主导航与轨道控制	322
8.4.2	接近小天体过程的自主导航与轨道控制	324
8.5	小结	327
参考文献		328
第9章	环绕轨道段的自主导航与轨道控制	329
9.1	环绕轨道段自主导航与轨道控制方案	329
9.1.1	系统组成与功能	329
9.1.2	导航敏感器	331
9.1.3	执行机构	332
9.2	环绕轨道段自主导航技术	333
9.2.1	环绕大天体自主导航	333
9.2.2	环绕小天体自主导航	337
9.3	环绕轨道段自主轨道控制技术	345
9.3.1	环绕轨道段轨道控制数学模型	345
9.3.2	半长轴和偏心率联合控制	346
9.3.3	轨道倾角控制	348
9.3.4	近天体点高度控制	348
9.4	应用实例	349
9.4.1	环绕火星探测任务的应用	349
9.4.2	环绕爱神小行星探测任务的应用	353
9.5	小结	355
参考文献		356
第10章	撞击轨道段的自主导航与制导	358
10.1	撞击轨道段自主导航与制导方案	358
10.1.1	系统组成与功能	358

10.1.2	导航敏感器	360
10.1.3	执行机构	360
10.2	撞击轨道段自主导航技术	361
10.2.1	自主导航图像处理	361
10.2.2	自主轨道确定	363
10.3	轨道机动	363
10.3.1	比例导引	363
10.3.2	预测制导	364
10.4	观测序列规划	368
10.4.1	撞击时间的计算	368
10.4.2	拍照终止时间计算	370
10.4.3	序列规划	372
10.5	应用实例	373
10.6	小结	376
参考文献		377
 第 11 章 基于光学成像测量的自主导航地面试验		378
11.1	基于光学成像测量的数学仿真验证技术	378
11.1.1	静态星点成像仿真	380
11.1.2	动态星迹成像仿真	381
11.1.3	面目标成像仿真	386
11.1.4	仿真实例	395
11.2	转移轨道段自主导航半物理仿真试验	400
11.2.1	试验方案	400
11.2.2	试验系统组成	401
11.2.3	试验系统数据接口与信息流程	405
11.2.4	试验实例	407
11.2.5	外场观星试验	410

11.3 环绕轨道段自主导航半物理仿真试验	411
11.3.1 试验方案	411
11.3.2 试验系统组成	413
11.3.3 试验实例	416
11.4 小结	419
参考文献	421
第12章 深空探测自主控制发展展望	422
参考文献	427
全书缩略语和专有名词对照表	428

第 1 章 绪论

随着时代的进步和科学技术的发展，人类了解自己生存环境和探索未知空间的需求与愿望日益迫切。航天活动正是人类了解太阳系和宇宙起源以及开发和利用太空的重要途径，而这些活动必须通过航天器来实现。航天器（Spacecraft）是指在地球大气层以外的宇宙空间（太空）飞行，执行探索、开发或利用太空及天体等特定任务的探测器^[1]。

火箭和人造地球卫星的出现，使人类能够把各种仪器送入空间，从而更好地对地球稠密大气层以外的空间物理现象和过程进行研究。同时人类逐渐将目光投向更遥远的太空，投入了极大的热情和资源进行深空探测活动，其目的是了解太阳系的起源、演变和现状，通过对太阳系内各行星的比较研究，进一步认识地球环境的形成和演变，探索生命的起源。深空探测是人类继发展应用卫星、载人航天后的第三大航天技术。

我国 2000 年发布的《中国的航天》白皮书指出，深空探测是指对太阳系内除地球外的行星及卫星、小行星、彗星的探测，以及太阳系以外的银河系乃至整个宇宙的探索。因此，按照我国通常的定义，深空探测航天器（以下简称深空探测器）是指对月球和月球以外的天体与空间进行探测的航天器，包括月球探测器、行星和行星际探测器等。而国际上，按照世界无线电大会的标准，通常将距离地球 2×10^6 km 以上的宇宙空间才称为深空，并在世界航天组织中交流时使用这一标准。

20 世纪 50 年代末开始，美国和苏联就进行了包括月球探测、行星探测、行星际探测和小行星与彗星探测的一系列深空探测研究和深空探测器的研制与发射工作。目前世界各国已发射前往月球及月

球以外天体的深空探测器共有 200 多个。

与地球轨道航天器相比，深空探测器的飞行距离远、运行时间长，传统的基于地面测控网的导航与控制方法在实时性、可观测弧段和运行成本等方面存在较大限制，已经越来越难以满足日益增多和距离更远的深空探测任务的需要。因此，深空探测器自主导航与控制技术受到了国内外航天界的广泛关注，成为深空探测领域的关键技术之一，特别是基于光学成像的自主导航与控制技术，已成为其中研究的热点问题。本书重点研究基于光学成像的深空探测器自主导航技术，也涉及一些制导与控制相关的研究内容。

1.1 制导、导航与控制

航天器进入太空后，为了完成所承担的任务，通常按照预定计划、采取一定方位、沿一定的轨道或轨迹飞行，也就是说必须要对航天器的轨道、姿态进行测量和控制。制导、导航与控制（GNC）是保证航天器能够准确地按预定的轨道和姿态运行，完成复杂飞行任务的关键技术，也是一项涉及多学科、多领域的综合技术，其水平直接制约着航天器的功能和性能。

1.1.1 基本概念

要实现轨道控制，首先要解决导航问题，即回答航天器当前运行轨道是什么，处在什么位置，运动状态如何的问题；然后根据目标所在，导引并控制航天器沿某种轨道到达预定位置。

1.1.1.1 导航技术

通常所说的导航（Navigation），是指将航天器从一个位置（当时位置）引导到另一个位置（目的地）的过程，也可以理解为引导航天器沿着预定的轨道，以要求的精度在指定的时间内到达目的地的技术。对于本书讨论的深空探测器而言，导航就是指确定或估计深空探测器运动状态参数的过程，相应的运动状态参数包括描述质