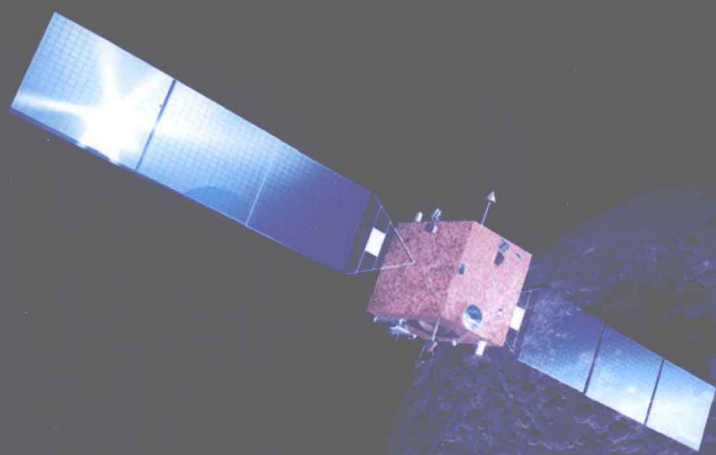




航天科技图书出版基金资助出版

深空探测器自主导航 原理与技术

吴伟仁 王大珩 宁晓琳 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 原理与技术

吴伟仁 王大珩 宁晓琳 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原理与技术/吴伟仁,王大珩,
宁晓琳著. --北京:中国宇航出版社,2011.5

ISBN 978-7-80218-956-0

I. ①深… II. ①吴… ②王… ③宁… III. ①空间探
测器—天文导航—研究 IV. ①V249.32

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 079277 号

责任编辑 曹晓勇 张铁钧

封面设计 谭颖 责任校对 王妍

出版 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 北京画中国画印刷有限公司

版次 2011 年 5 月第 1 版
2011 年 5 月第 1 次印刷

规格 787 × 1092

开本 1/16

印张 20.00

字数 474 千字

书号 ISBN 978-7-80218-956-0

定价 168.00 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

深空探测是继近地卫星、载人航天之后又一新的航天发展领域，也是人类进一步了解宇宙、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年我国自主研发的嫦娥1号绕月探测卫星成功发射和运行，标志着我国已经迈出了深空探测的第一步。在随后的深空探测任务中，我国还会实施月球软着陆、月面巡视勘察与采样返回等任务，并将逐步开展以太阳、火星、金星、小行星和太阳系其他天体为探测目标的航天活动。

随着技术的发展及进入更深更远探测空间的需要，自主导航已经成为深空探测器实现自主运行与管理的关键技术。深空探测器自主导航是指利用探测器自身携带的多种敏感器，结合探测器的运动模型，自主获得探测器的位置、速度和姿态等信息。自主导航对增强深空探测器的自主生存能力，扩展探测空间具有极其重要的意义，也是导航技术发展的必然趋势。

《深空探测器自主导航原理与技术》一书的特点是在全面、系统地阐述深空探测器自主导航基础知识与基本原理的基础上，结合我国近年来在深空探测自主导航领域的研究进展和技术成果，深入浅出地介绍了深空探测器转移轨道、软着陆、表面巡视以及交会对接等不同探测阶段的自主导航技术。

本书凝聚了探月工程总设计师吴伟仁同志及其带领的科研团队近年来在月球探测工程实践中积淀的技术经验和成果，作者们精益求精，反复修改，几易其稿，是一本不可多得的融合基础理论和工程实际应用的学术专著，既可作为从事航天工程的科研人员的参考书，也可作为高等院校相关专业高年级学生的教材，将对促进我国深空探测自主导航技术的进一步研究和发展作出贡献。

是为序。

吴宏鑫

2011年4月20日

前 言

深空探测是对地球以外天体开展的空间探测活动。20 世纪 50 年代末，美国、苏联竞相开展了以月球、火星为主要目标的太阳系星际探测，取得了丰硕的成果。进入 21 世纪，欧洲空间局、日本、印度都相继开展了深空探测活动。2000 年中国政府发布了《中国的航天》白皮书，提出开展以月球探测为主的深空探测活动。2007 年 10 月 24 日，我国成功发射了嫦娥 1 号月球探测卫星，实现了中华民族的千年梦想；2010 年 10 月 1 日发射的嫦娥 2 号卫星实现了精确入轨、稳定运行、有效探测，标志着我国在深空探测领域取得了突破性进展，中国的深空探测迎来了一个新纪元。目前我国正在开展月球软着陆、月面巡视勘察和采样返回的工程实施，未来还将开展以火星和金星探测为代表的太阳系行星探测活动。发展深空探测是我国矢志不渝的追求，对推动我国的航天事业发展，引领科技创新具有十分重要的意义。

与地球轨道航天器相比，深空探测器飞行距离远、运行时间长，依赖地面导航方法对深空探测器进行导航在实时性、覆盖性、可靠性等诸多方面受到限制，难以满足深空探测对高精度实时导航的迫切需求。GPS 等卫星导航虽然精度高，但仅能应用于近地空间。因此，在深空探测过程中不与地面进行信息传输和交换的自主导航技术受到了国内外航天界的广泛关注，已成为深空探测领域的关键技术之一。

本书针对我国深空探测工程对自主导航技术的迫切需求，系统研究了转移轨道、软着陆过程、巡视探测和空间交会对接的自主导航技术。全书共 8 章，第 1 章综述了国内外深空探测器自主导航技术的发展现状。第 2 章和第 3 章简要介绍了深空探测器自主导航过程中必备的基础知识和基本原理。第 4 章围绕深空探测器在转移轨道的自主导航，研究了其运动模型、测量信息和系统组成等，并分别针对普通转移轨道、与小行星交会转移轨道和行星捕获前转移轨道的不同特点和要求提出了相应的自主导航方法。第 5 章围绕深空探测器软着陆过程，研究了软着陆过程自主导航系统的组成和工作流程、导航敏感器配置和

测量信息的处理方法,并对月球探测器软着陆自主导航过程进行了分析和仿真。第6章针对巡视器的自主导航技术,重点研究了月面巡视器的自主导航系统配置、自主导航方法和路径规划方法。第7章针对空间交会对接的自主导航技术,研究了空间交会对接过程的相对运动方程、相对测量敏感器和自主导航方法。第8章对深空探测器自主导航技术的发展趋势进行了展望。

本书是作者及其带领的科研团队近年来在参与我国月球探测理论研究和工程实践过程中,积累的专业技术和经验的总结与归纳,是我国深空探测自主导航领域最新研究成果的梳理和提炼,可为未来深空探测自主导航技术的发展和工程应用提供理论基础和实践指导,也可供从事深空探测工程的科研工作者和高等院校相关专业师生参考。

本书初稿完成于2009年夏,后几经修改,前后历时3年,在此过程中,北京控制工程研究所邢琰、胡海霞、黄翔宇,北京航空航天大学马辛、蔡洪炜,以及北京跟踪与通信技术研究所李海涛、中国航天工程咨询中心蒋宇平参与了本书的部分编写和文图整理工作。

承蒙栾恩杰院士、吴宏鑫院士对本书给予了指导,探月工程张荣桥副总师、北京航空航天大学房建成教授等深空探测领域专家提出了宝贵意见。中国宇航出版社张铁钧副社长、曹晓勇编辑做了大量工作,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。

由于水平所限,书中不尽完善之处在所难免,恳请广大同行、读者不吝指正。

作 者

2011年2月于北京

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 深空探测活动简述	1
1.1.1 月球探测	1
1.1.2 火星探测	6
1.1.3 金星探测	9
1.1.4 其他行星探测	10
1.1.5 小行星和彗星探测	12
1.1.6 我国的深空探测技术	14
1.2 深空探测器导航	14
1.2.1 深空探测器导航回顾	14
1.2.2 深空探测器的地基导航	15
1.2.3 深空探测器的自主导航	21
1.3 深空探测器自主导航的必要性	27
参考文献	29
第 2 章 深空探测器自主导航基础知识	30
2.1 天文学基础	30
2.1.1 太阳系	30
2.1.2 月球	39
2.1.3 火星	42
2.2 常用坐标系	48
2.2.1 天球坐标系	48
2.2.2 地球坐标系	53
2.2.3 月球坐标系	56
2.2.4 太阳坐标系	58
2.2.5 轨道坐标系	58
2.2.6 本体坐标系	59
2.2.7 坐标系间转换	59

2.3 时间系统	61
2.3.1 世界时	61
2.3.2 恒星时	62
2.3.3 原子时	63
2.3.4 力学时	63
2.3.5 历元	63
2.4 飞行轨道	64
2.4.1 多体问题	64
2.4.2 引力作用球和圆锥曲线拼接法	65
2.4.3 霍曼转移轨道	66
2.4.4 逃逸轨道	69
2.4.5 捕获轨道	71
2.4.6 行星历表	72
参考文献	75
 第3章 深空探测器自主导航基本原理	76
3.1 自主导航系统工作流程	76
3.1.1 观测量	77
3.1.2 敏感器	78
3.1.3 滤波方法	100
3.2 天文导航	105
3.2.1 天文导航系统的组成和特点	105
3.2.2 天文导航的基本原理	106
3.2.3 天文导航的误差分析	106
3.3 惯性导航	107
3.3.1 惯性导航系统的组成和特点	108
3.3.2 惯性导航的基本原理	108
3.3.3 惯性导航的误差分析	111
3.4 图像导航	111
3.4.1 图像导航系统的组成和特点	111
3.4.2 图像导航的基本原理	112
3.4.3 图像导航的误差分析	116
3.5 组合导航	116
3.5.1 组合导航系统的设计模式	116

3.5.2 组合导航系统滤波器设计	117
参考文献	120
第4章 深空探测器转移轨道自主导航技术	121
4.1 转移轨道运动模型	121
4.1.1 深空探测器在转移轨道的飞行过程	122
4.1.2 转移轨道的动力学模型	124
4.2 转移轨道自主导航系统	127
4.2.1 系统组成和工作流程	127
4.2.2 敏感器	127
4.3 转移轨道测量信息的获取	133
4.3.1 天体信息	133
4.3.2 角速度和加速度	138
4.4 火星探测器转移轨道的自主导航方法	141
4.4.1 基于太阳、地球和火星观测信息的自主导航方法	141
4.4.2 基于小行星观测信息的自主导航方法	145
4.4.3 基于火星及其卫星观测信息的自主导航方法	151
参考文献	158
第5章 软着陆过程的自主导航技术	160
5.1 软着陆飞行过程	160
5.2 软着陆自主导航系统	162
5.2.1 系统组成和工作流程	162
5.2.2 惯性测量单元	163
5.2.3 测距测速敏感器	164
5.2.4 成像敏感器	164
5.3 软着陆导航测量信息的处理方法	165
5.3.1 距离和速度信息处理方法	165
5.3.2 图像处理方法	167
5.3.3 三维地形图像处理方法	169
5.4 月球探测器软着陆的自主导航方法	172
5.4.1 导航坐标系	172
5.4.2 月球探测器软着陆动力学模型	174
5.4.3 利用惯性测量单元的自主导航方法	175

5.4.4 基于惯性测量单元配以测距测速修正的自主导航方法	179
5.4.5 基于惯性测量单元配以图像信息修正的自主导航方法	187
5.4.6 基于三维地形图像的自主障碍识别和安全着陆区选取方法	191
参考文献	195
第6章 深空探测巡视器自主导航技术	196
6.1 深空探测巡视器自主导航过程	196
6.1.1 深空探测巡视器自主导航功能	196
6.1.2 深空探测巡视器自主导航特点	201
6.2 深空探测巡视器自主导航系统	201
6.2.1 系统组成和 workflow	201
6.2.2 天体敏感器	204
6.2.3 惯性敏感器	206
6.2.4 视觉敏感器	208
6.2.5 运动传感器	210
6.3 深空探测巡视器测量信息的获取与处理	211
6.3.1 天体测量信息	211
6.3.2 惯性测量信息	212
6.3.3 环境信息	213
6.4 月球巡视器自主导航定位方法	222
6.4.1 天文导航	222
6.4.2 航位推算导航	224
6.4.3 天文/航位推算组合导航	225
6.4.4 视觉测距导航	226
6.5 深空探测巡视器路径规划方法	228
6.5.1 双目立体视觉导航规划	228
6.5.2 结构光视觉导航规划	233
参考文献	235
第7章 空间交会对接的自主导航技术	237
7.1 空间交会对接过程	238
7.1.1 空间交会对接的飞行过程	238
7.1.2 阿波罗号飞船月球轨道交会对接的飞行程序	239
7.1.3 月球轨道交会对接的特点	241

7.2 空间交会对接自主导航系统	243
7.2.1 系统组成和 workflow	243
7.2.2 微波雷达	244
7.2.3 激光雷达	247
7.2.4 光学成像敏感器	250
7.3 空间交会对接导航测量信息的获取与处理	255
7.3.1 微波雷达的信息处理方法	255
7.3.2 激光雷达的信息处理方法	258
7.3.3 光学成像敏感器的信息处理方法	260
7.4 月球轨道交会对接的自主导航方法	261
7.4.1 月球轨道交会对接飞行过程方案	261
7.4.2 月面起飞段的自主导航方法	263
7.4.3 近距离导引段的自主导航方法	266
7.4.4 平移靠拢段的自主导航方法	275
参考文献	280
第 8 章 深空探测器自主导航技术展望	282
8.1 深空探测器自主导航的关键技术	282
8.1.1 自主导航方案设计	282
8.1.2 自主导航敏感器	284
8.1.3 自主导航核心算法	285
8.2 深空探测器自主导航技术发展趋势	287
8.2.1 提高自主导航方案的通用性	287
8.2.2 组合导航是必然方向	288
8.2.3 导航敏感器的微小化和复用技术	288
8.2.4 自主故障诊断和容错技术	288
参考文献	290
附录	291
附录 A 常用的单位名称、单位符号及换算关系	291
附录 B 太阳、月球及八大行星常用的天文常数	293
附录 C 深空探测大事记	294
附录 D 全书缩略语和专有名词对照表	300

第 1 章 绪 论

人类所生存的地球，只是浩瀚宇宙中的沧海一粟。认识太空、探索宇宙，自古以来就是人类不懈的追求。1958 年，在发射首个人造地球卫星后仅仅一年，人类就开始尝试发射月球探测器，踏上了进入深空的征程；20 世纪 60 年代初，人类开始尝试发射行星探测器，将探索活动向更广阔、更深远的太阳系及其以外空间拓展。

深空探测是人类航天活动的重要组成部分，是对月球及月球以远的天体和空间的探测活动，它主要通过对月球、太阳系内地球以外的行星及其卫星、小行星和彗星以及太阳等天体的探测，以及太阳系以外的银河系乃至整个宇宙的探测，帮助人类研究太阳系及宇宙的起源、演变和现状，认识地球环境的形成和演变，研究空间现象和地球自然系统之间的关系，以及寻找地外生命和研究生命的起源。

随着深空探测技术的进步，深空探测器的导航技术获得了巨大的进展，为无人探测和载人探测活动的顺利实施提供了技术基础。深空探测器导航主要包含两个方面，一是确定和预测深空探测器的位置和速度，即轨道确定，二是通过遥控深空探测器的推进系统改变其速度，即飞行路径控制。迄今为止，绝大多数的深空探测器都依靠地面深空网对其进行导航，但随着技术的进步以及进入更深更远空间的需要，深空探测器自主导航技术快速发展，并作为地面测控的辅助导航系统得到应用。20 世纪 90 年代末，不依赖地面测控网独立承担导航任务的自主导航技术成功地进行了在轨演示验证，取得了重要成果。进入 21 世纪，深空探测器自主导航技术进入了新的发展阶段，初步具备了不依赖地面测控条件独立承担导航任务的能力，成为未来深空探测器导航技术的重要发展领域。

1.1 深空探测活动简述

从 1958 年启动月球探测活动至今，人类开展深空探测活动已超过半个世纪。在这期间，人类发射的无人探测器已经对月球、7 个行星、重要的小天体和太阳进行了探测，实现了 12 名航天员登陆月球进行现场考察，获得了大量珍贵的研究资料和科学成果。

1.1.1 月球探测

月球是距离地球最近的天体，具有可供人类开发和利用的多种资源，也是人类进入深空的理想基地和前哨站。月球探测是深空探测的起点，1959 年至 2010 年，全球实施了 109 次月球发射任务，其中 58 次任务中的月球探测器或载人飞船成功抵达了月球表面或月球空间，并获得了科学数据。这一时期，先后有苏联/俄罗斯、美国、日本、欧洲空间局（European Space Agency, ESA）、中国和印度等 6 个国家或组织成功实现了对月球的探测。纵观人类月球探测的历史，月球探测大致经历了 3 个阶段。

第一阶段(1958—1976)是月球探测的第一个高潮期。这一时期,美、苏空间竞赛引发了人类第一次大规模的月球探测高潮。人类先后实现了飞越探测、硬着陆探测、软着陆探测、绕月探测、自动采样返回探测和月面巡视探测等各种无人月球探测,以及航天员登月探测等活动。

苏联1959年1月2日发射的月球1号探测器首次进入以月球引力场为主引力场的月球空间,从距月球表面5 995 km的上空飞过,成为世界上首个飞越月球空间的探测器。1959年9月12日和10月4日,苏联先后发射了月球2号和月球3号探测器,前者实现了月球表面硬着陆,首次将人造物体送上月球;后者首次拍摄并向地球传回了月球背面照片。1966年1月31日和3月31日,苏联成功发射了月球9号和月球10号探测器,前者率先实现了月球软着陆探测;后者成为人类第一个环绕月球飞行的月球轨道器。1970年9月12日和11月10日,苏联先后发射了月球16号和月球17号探测器,月球16号首次成功实现了自动采样返回探测,取回了101 g月球样品;月球17号携带的月球车1号则首次实现了月面巡视探测,并在月球表面工作了301个地球日。1976年8月9日,苏联在发射月球24号自动采样探测器之后,暂停了月球探测活动,至今苏联/俄罗斯没有发射任何月球探测器。

这一时期,美国实施了30多次月球探测器的发射任务,其中20世纪60年代发射的月球探测器主要为阿波罗载人登月工程提供月球数据。美国1959年3月3日发射的先驱者4号探测器从距月球表面约60 000 km的上空飞过,成为美国首个实现飞越月球探测的月球探测器。1961年~1965年美国先后发射了9个徘徊者号月球硬着陆探测器,其中1964年7月发射的徘徊者7号探测器在撞击月球之前成功拍摄了4 316幅图片,成为美国首个成功的硬着陆月球探测器。1966年5月和8月,美国发射的勘察者1号和月球轨道器1号探测器先后实现了月球软着陆探测和绕月探测。至1968年1月,美国发射的徘徊者号(Ranger)硬着陆器(3个完全成功)、7个勘察者号(Surveyor)软着陆器、5个月球轨道器(Lunar Orbiter)为阿波罗(Apollo)载人登月工程提供了大量的宝贵数据。

1969年7月29日,美国阿波罗11号载人飞船成功登月(图1-1),人类第一次踏上了月球,在此后的3年时间内美国又成功实现了5次载人登月。在总共6次成功的载人登月任务中,共有6组12名航天员成功登陆月球,航天员在月面停留的累计时间约305 h 20 min,舱外活动累计时间约80 h 36 min,最大活动半径达30 km(阿波罗17号),取回月岩及月壤样品共381.7 kg。航天员在月面上开展了多种科学考察活动,安放了阿波罗月面实验组件(Apollo Lunar Surface Experiments Package, ALSEP)等科学探测设备,取得了丰富的月球数据和科学考察成果。阿波罗载人登月计划的成功,标志着美国在空间竞赛中取得了最终胜利。此后,政治需要不再是美、苏/俄推动月球探测的主要因素,预示着月球探测第一次高潮的结束。

第二阶段(1976—1994)是月球探测的宁静期。这一时期,除日本于1990年1月发射了一个并不完全成功的飞天号(Hiten)探测器之外,人类在近20年的时间内没有开展任何月球探测活动。这一时期,美、苏/俄等国的研究机构对获得的月球数据和样品开展了系统的研究,整理、消化和分析了大量的月球资料,总结了月球探测的经验与教训,将

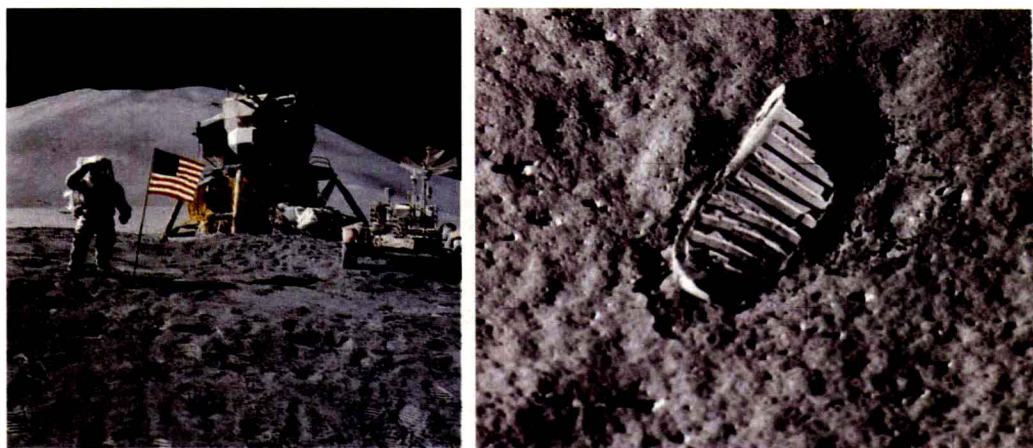


图 1-1 阿波罗 11 号载人飞船成功登月及航天员在月面留下的足迹

对月球的科学认识提升到了更高层次。同时，以月球探测取得的技术成果为基础，美、苏/俄等国开发了更先进的空间技术，完善了航天技术系统，为实施更先进的航天活动奠定了基础。这一时期，通过对月球探测技术的消化和二次开发，由月球探测带来的大批高新技术向各种民用和军用领域转化和应用，由此产生的技术成果或衍生的二代或三代技术，融入了人们的日常生活和工业体系，推动了技术进步与经济社会的发展。

第三阶段（1994 年至今）是月球探测的第二个高潮期。进入 20 世纪 90 年代，随着高新技术的发展和深空探测技术的进步，特别是 1994 年美国发射的克莱门汀号（Clementine）探测器发现月球上可能存在水的证据，人类的月球探测活动进入了第二个高潮期。1994 年 1 月，美国发射的克莱门汀号探测器对月球进行了高精度摄影测量，获得了月球的数字地图和地形图，在向月球南极地区发射电磁波以进行探测时，地球接收到的反射回波表现出水的特征，这一发现推动了新的月球探测活动。1998 年美国发射了以探测月球是否存在水为主要科学目标的月球勘探者号探测器，但这次探测活动未能给出月球是否存在水的确切结论。进入 21 世纪，欧洲空间局、日本、中国、印度和美国先后成功发射了各自的月球探测器，其中欧洲空间局 2003 年发射的智慧 1 号（Small Mission for Advanced Research and Technology, SMART, 图 1-2）探测器对自主导航技术、电推进技术、激光通信技术等多项技术进行了验证，研究了月球表面物质的成分、绘制了月面地形图、开展了寻找水冰的研究等活动；日本 2007 年 9 月 24 日发射的月亮女神号（SElenoLogical and EngiNeering Explorer, SELENE/Kaguya）月球探测器考察了月球所含的元素资源及矿物成分、地形学和地质结构、引力场和磁场、等离子体环境，获取了高分辨率月球图像，为研究月球的起源和演化提供了重要数据；印度于 2008 年发射的首个月球轨道器月船 1 号探测了月表化学元素、放射性物质及某些矿物的分布情况，绘制了月球三维图，并对地-月空间进行了探测；美国 2009 年发射的月球勘测轨道器（Lunar Reconnaissance Orbiter, LRO）/月球陨坑观测与感知卫星（Lunar Crater Observation and Sensing Satellite, LCROSS）探测和测绘了月球表面的情况，为未来选取机器人探月的着陆点提供了数

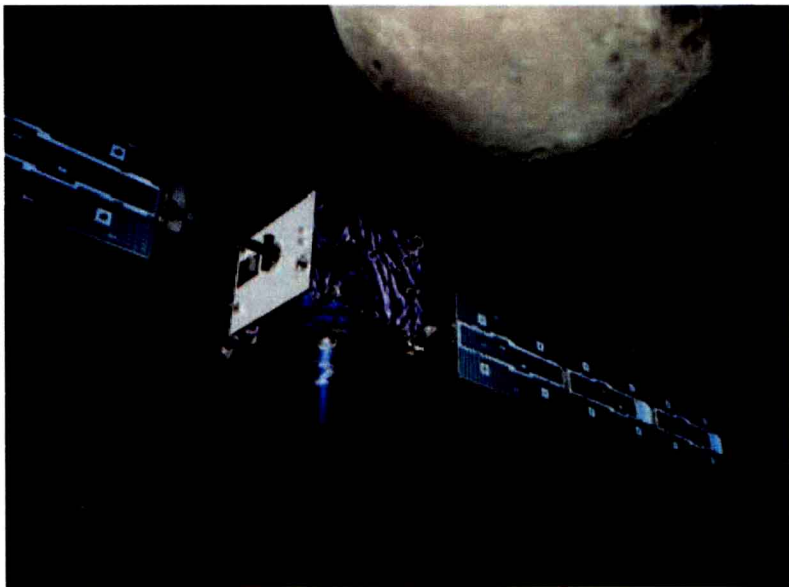


图 1-2 欧洲空间局智慧 1 号月球探测器示意图

据。该探测器利用运载火箭上面级和月球陨坑观测与感知卫星先后高速撞击月球南极地区的永久阴影区，勘察了月球南极永久阴影区的水冰资源，证实了月球南极存在着水成分。

21 世纪初，美国、俄罗斯、印度、日本、欧洲空间局和中国等国家和组织均制订了新世纪的月球探测计划。美国制订并实施了月球先驱机器人计划（Lunar Precursor Robotic Program, LPRP），并将在近期（2011 年左右）发射月球大气与尘埃环境探测器（Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer, LADEE）以及引力恢复和内部实验室探测器^①（Gravity Recovery And Interior Laboratory, GRAIL）。俄罗斯在《2006 年～2015 年俄罗斯联邦航天计划》中确定研制和发射由轨道器、着陆器和穿透器组成的月球—全球探测器，对月球内部结构、挥发性物质、极区的月壤和月岩成分等开展研究；俄罗斯还提出了月球—土壤（Luna—Grunt）自动采样返回探测计划，并对载人月球探测开展了研究和论证。印度在成功发射月船（Chandrayaan）1 号探测器后，与俄罗斯合作开展了新的月球探测活动，它由印度的月船 2 号计划和俄罗斯的月球—资源计划组成，将研制和发射由印度研制的轨道器、俄罗斯研制的软着陆器以及俄、印共同研制的月面巡视器组成的月球探测器系统。此外，印度还制订并开展了载人登月计划。日本继月亮女神号探测器计划之后，还将发射新的月球探测器，并提出 2030 年前建设月球基地的设想。欧洲空间局制订了包括载人月球探测活动在内的曙光（Aurora）计划，提出在 2025 年左右派航天员登陆月球。

^① 2004 年 1 月，时任美国总统布什提出了“太空探索新构想”，宣布在 2020 年前派航天员登陆月球，2006 年美国航空航天局正式启动了以载人登月为目标的“星座计划”（Constellation Program）。2010 年美国奥巴马政府宣布取消“星座计划”，提出新的载人火星探测计划，并计划在 2030 年以后实现载人火星探测的目标。

中国航天事业自1956年创建以来,经历了艰苦创业、配套发展、改革振兴和走向世界等几个重要时期,迄今已经形成了完整配套的研究、设计、生产和试验体系,在空间技术、空间应用和空间科学等领域取得了辉煌的成就。2000年11月,中国国务院办公厅发布了《中国的航天》白皮书,明确了“开展以月球探测为主的深空探测的预先研究”。2004年1月,以嫦娥工程命名的中国月球探测一期工程——绕月探测工程经国务院正式批准立项,标志着中国的月球探测工程正式启动。2006年2月9日,国务院发布了《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020)》,将探月工程列为未来15年力争取得突破的16个重大科技专项之一。

考虑到中国的科学技术水平、综合国力以及国家整体发展战略,中国的月球探测工程分为“绕”、“落”、“回”三个阶段实施:第一阶段(2004—2007)为绕月探测阶段,即研制和发射月球卫星,探测分析月球表面14种元素的资源量和分布、月球土壤特征与厚度、地月空间环境,以及绘制全月面的三维立体影像图并开展月面形貌和构造研究。第二阶段(2008—2013)为月面软着陆探测与月面巡视勘察阶段,即发射月球软着陆器,试验月球软着陆技术,研制和发射月面巡视车,探测着陆区岩石的化学与矿物成分,测定着陆点的热流、岩石剩磁,对月表环境进行高分辨率摄影和月岩的现场探测或采样分析,为月球基地的选址提供月面环境、地形、月岩化学与物理性质等数据。第三阶段(2011—2020)为月面勘察与采样返回阶段,即研制和发射月球软着陆器、小型采样返回舱、月球样品采集装置等,采集月球样品返回地面,同时对着陆区进行考察,为下一步载人登月、建设月球前哨站的选址提供数据,并深化对地月系统尤其是月球起源与演化的认识。

2007年10月24日,中国的首个月球探测器——嫦娥1号成功发射,在随后的494天中,嫦娥1号围绕月球运行了5 514圈,绘制了全月数字三维影像图(图1-3),取得了月球两极的影像资料,测定了月表多种元素及矿物分布,研究了月壤的厚度并由此估算了月壤中氦-3的资源量和分布特征,获得了月球环境以及空间的数据。在超期服役100多天后,于2009年3月1日在地面控制下成功撞击月球,顺利完成了中国首次月球探测任务。

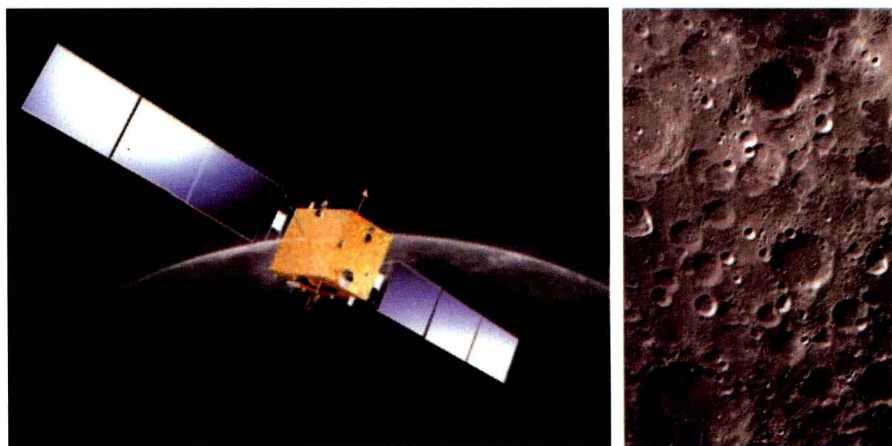


图1-3 嫦娥1号月球探测器示意图及嫦娥1号拍摄的月面图像