



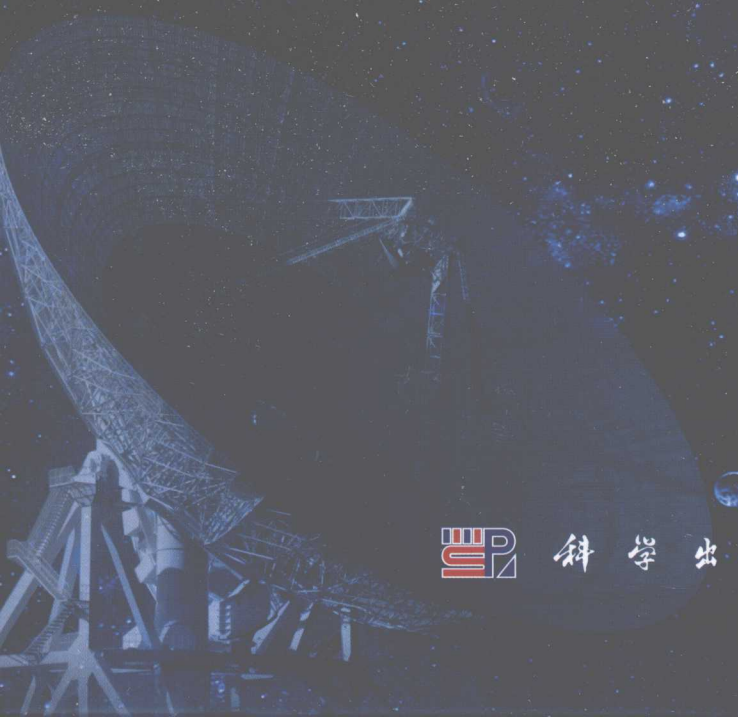
中国科学院科学出版基金资助出版



深空测控通信系统工程与技术

吴伟仁 董光亮 李海涛 等 著

*Engineering and Technology of
Deep Space TT&C System*



科学出版社

013030644

V11
25



中国科学院科学出版基金资助出版

深空测控通信系统工程与技术

Engineering and Technology of Deep Space TT&C System

吴伟仁 董光亮 李海涛 等 著



科学出版社
北京

V11
25



北航

C1638880

内 容 简 介

本书紧密结合我国深空测控通信网研制建设的工程实践,首次系统、全面地论述了深空测控通信系统的功能原理、关键技术、设计规范、性能评估、最新成果和发展趋势等内容。

全书共分10章。第1、2章介绍了深空探测的基本概念、发展历程,深空测控通信系统的构成和特点,以及深空测控通信涉及的时间系统和坐标系统、轨道动力学等基础知识。第3~6章分别从星载设备、链路信道、测量技术和地面系统等方面,详细阐述了工作原理、系统组成、技术实现和典型工程实例。第7~9章分别介绍了频谱设计与干扰防护、探测器的遥操作、深空测控通信系统天地一体化设计的主要方法与实例。第10章展望了深空测控通信技术的发展趋势。

本书是我国测控通信理论研究和工程实践创新成果与经验的总结,对从事深空测控通信领域研究和设计的科研工作者与工程技术人员有重要的参考价值,也可供高等院校航天工程、电子与通信、导航与控制等相关专业的师生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

深空测控通信系统工程与技术/吴伟仁等著. —北京:科学出版社, 2013
ISBN 978-7-03-036884-3

I. ①深… II. ①吴… III. ①空间探测—空间通信系统—工程技术
IV. ①V11 ②TN927

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 040583 号

责任编辑:张 濮 马晓晓 陈 静 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 倩 / 封面设计:迷底书装

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>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013年1月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2013年1月第一次印刷 印张:29 1/2

字数:698 000

定价:180.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

2012年8月5日,美国国家航空航天局(NASA)宣布:美国好奇号火星探测器经过254天飞行,于当地时间当日22时32分在火星盖尔陨坑成功着陆,并向地球发回了首批照片。这是美国继机遇号、勇气号火星探测器成功登陆火星,卡西尼号探测器飞抵土星并成功释放惠更斯号探测器着陆土卫六后,在深空探测领域的又一最新成就。此前,美国曾宣布将在2035年前后,派宇航员登陆火星卫星。俄罗斯、欧洲空间局、日本、印度等国家和组织也都在紧锣密鼓地实施各自的深空探测计划,又一个深空探测的热潮正在兴起。

2012年我国在深空探测领域取得了突破性进展。嫦娥二号卫星于12月13日16时30分09秒,在距地球700万km的深空,以10.73 km/s的相对速度,与图塔蒂斯(Toutatis)小行星由远及近擦肩而过,首次实现我国对小行星的交会飞越探测,首次对该小行星进行近距离、高清晰光学成像。自此,我国航天飞行实现了从40万km到700万km以远的跨越。随着我国经济和科技实力的不断增强,进一步开展对火星、小行星和太阳探测,将是我国未来深空探测的主要目标。

测控通信系统是对飞行器进行跟踪、遥测、控制和数据传输的技术与相应设施,是卫星工程、载人航天、深空探测等系统工程的重要组成部分。它主要有四大功能:一是跟踪,即测量探测器的位置、速度、加速度,以精确实现轨道确定与航天器导航;二是遥测,即对探测器工作状态、设备状态和宇航员生理状态进行监测;三是控制,即对飞行器的运行轨道、姿态、工作参数和系统安全实施控制;四是通信,即对宇航员的话音、图像与科学探测数据进行传输。

测控通信系统的发展始终伴随着军事应用与航天活动的开展,从国际上看,大体经历了四个阶段。第一个阶段的主要特征是采用分离式的测控设备,完成对火箭和导弹的测控。该阶段始于第二次世界大战德国V2火箭的研制,充分利用测轨、遥控、遥测设备组成的相对分离的测控系统,支撑了工程研制和试验。第二个阶段的主要特征是采用了微波统一测控系统,该系统在载波频段、设备配置等方面进行了统一设计、集中配置,解决了分离系统设备庞杂、载荷太重和电磁干扰等问题,成功应用于20世纪60年代美国的阿波罗登月工程。第三个阶段的主要特征是天基和地基测控系统一体化应用,如20世纪80年代美国的跟踪与数据中继卫星系统(TDRSS),该系统利用三颗地球定点卫星与星间链

路,对低轨道卫星的测控覆盖率达到 100%。第四个阶段是深空测控通信系统,主要特征是地面大口径天线测控站和空间星际中继站相结合,以实现远距离、信号弱、时延长的深空探测器的有效测控,其技术水平处于测控通信领域的最前沿。

该书是我国深空测控通信领域第一部将工程实践与技术相结合的专著。作者长期从事测控通信系统研究、总体设计、设备研制和任务操作等专业工作,具有扎实的理论功底和丰富的工程实践经验。他们站在系统研究的高度,凭借丰富的总体设计经验和娴熟的专业制造技术,结合近年来在深空测控通信领域的技术成果和工程实践,深入浅出地介绍了深空测控通信系统主要技术的原理、实现和工程应用。全书结构合理、语言精练、内容新颖、可读性强。

该书将给测控技术专家以总体理念之拓展,给总体设计人员以技术细节之补充,给从事航天领域的工程技术人员以开阔思路之启迪,使我国航天队伍整体素质得到充实与升华。同时,也将为立志献身航天事业的新生代提供一间“温馨书屋”。我们有理由相信,该书的出版不仅会受到我国广大航天科技工作者的欢迎,也将对未来航天测控通信领域工程与技术的结合,起到推波助澜的作用。

是为序,与读者共勉!

中国工程院院士 张俊谋

二〇一三年元月

前 言

深空探测是指对太阳系内除地球以外的行星及其卫星、小行星、彗星等天体或空间环境的探测,以及太阳系以外的银河系乃至整个宇宙的探测。纵观世界深空探测的发展历程,各国都是从月球探测开始的。20世纪60年代以来,人类相继开展了以月球、火星为主要目标的星际探测活动,多种探测器先后造访了太阳系各大行星,大大拓展了人类对浩瀚宇宙的认识。2007年10月24日,我国成功发射嫦娥一号月球探测器,开启了中华民族探月之旅。2010年10月1日,嫦娥二号探测器再次奔向月球,并在距地球700万km处成功实现对图塔蒂斯(Toutatis)小行星的交会飞越探测。目前,月面“落”和“回”的工程正在实施,火星与太阳探测也已提上日程。发展深空探测,探索未知世界,寻找地外生命和扩大生存空间,是人类矢志不渝的追求。

作者有幸亲身参与和见证了中国特色的深空探测这一伟大工程,并在工程实施的过程中强烈感受到,深空测控通信系统往往成为工程的难点和焦点。20世纪80年代末,我国工程和科学界在酝酿实施月球探测计划时,终因测控通信系统支持能力受限,搁置了该设想。90年代中期,曾有提案在载人航天工程中研制的CZ-2F运载火箭首次飞行试验时,将试验载荷发射到月球,论证中同样因为测控通信系统支持能力问题,这一充满想象力的方案未能实现。2002年,当中国绕月探测工程论证进入到可行性设计阶段,测控通信系统再次成为工程关注的焦点之一。尽管采取了一些技术措施,使应用于地球轨道卫星的测控网完成了嫦娥一号任务,但达成的共识是,要开展我国后续的月球与深空探测,必须建设先进的深空测控通信系统。这一共识在探月工程二期中得以实现,建成了具有世界先进水平的以35 m、66 m口径天线测控站为骨干的深空网,并在嫦娥二号与图塔蒂斯小行星交会飞越探测中成功应用,首次体现了它的重要价值。

深空探测活动与方式的多样性和复杂性,对测控通信系统不断提出新的挑战,正是这种挑战带动了一系列新技术的发展和应用。深空探测的远距离和信息传输的高速率始终是一对矛盾。为解决这对矛盾,测控通信正在从S、X扩展到Ka频段,并逐步向光通信技术发展,天线组阵、高灵敏度信号接收、高效信道编译码等新技术得到突破并快速应用。深空高精度测定轨需求也促进了时空基准框架的参数测量、超稳定度时频、测量误差估计等基础理论和技术的发展。因此,深空测控通信是新技术不断涌现,新方法不断应用,新

实践不断开展,充满挑战性,又不时能够获得激动人心成果的创新领域。

在近十年的时间内,我国就实现了从地球空间测控到深空测控的重大跨越。作者在全程参与深空测控通信系统的论证、设计、研制和工程应用中,研究、应用和接触到大量的最新技术和科研成果,我们认为有必要,也有义务将这些测控通信理论研究和工程实践中积累的创新成果与经验进行提炼和总结,呈现给从事和关注中国测控通信的同仁们。这部书不是第一部,也绝不是最后一部介绍深空测控通信系统方面的专著。深空探测活动如此活跃,现代科学技术发展常常令人瞠目,就在本书出版之际,更新的测控通信技术正在问世,这将激励我们向更先进的方向努力,而不至于停留在本书所介绍的范围内。

本书共分10章。第1、2章介绍了深空探测的基本概念、发展历程,深空测控通信系统的构成和特点,以及深空测控通信涉及的时间系统和坐标系统、轨道动力学等基础知识。第3~6章分别从星载设备、链路信道、测量技术和地面系统等方面,详细阐述了工作原理、系统组成、技术实现和典型工程实例。第7章介绍了频谱设计与干扰防护,第8章介绍了探测器的遥操作,第9章介绍了深空测控通信系统天地一体化设计的主要方法与实例,第10章展望了深空测控通信技术的发展趋势。

本书的特点是紧密结合我国深空测控通信网研制建设的工程实践,重点针对深空测控通信的特点和难点,从天地一体化的整体层面出发,对系统的功能原理、设计规范、性能评估、最新成果和发展趋势等方面进行了系统性论述,为突出重点,没有进行冗长烦琐的数学推导和一般性的基础知识介绍。书中大量的公式、图表、曲线和数据对工程技术人员有很好的参考价值,可供从事深空测控通信领域研究和设计的科研工作者及高等院校相关专业的师生参考。

本书以吴伟仁、董光亮和李海涛为主,完成初稿撰写。本书先后进行了多次修改和补充,最后由吴伟仁审阅、修改并定稿。在编著过程中,北京跟踪与通信技术研究谭伟博士、陈杨博士,北京遥测技术研究所湛明研究员,中国空间技术研究院黄晓峰研究员,石家庄通信测控技术研究所耿虎军研究员,西北电子设备研究所段玉虎研究员,北京航空航天大学宁晓琳教授,北京理工大学乔栋教授,探月与航天工程中心节德刚博士,参与了部分章节的编写与图表整理工作。还有樊敏、石善斌、喻韬、林一、牛飞、徐宝碧、刘适、郭肃丽、姚奇松、孙世瑞、李大志、黄佩诚、王龙华、金光远等同志,在不同专业、从不同方面为本书做出了贡献,在此一并致谢。

承蒙栾恩杰院士、孙家栋院士、张履谦院士、李济生院士对本书的关心和指导;北京跟踪与通信技术研究房鸿瑞研究员参与了全书讨论和指导;科学出版社彭斌副社长给予了大力支持,张濮、马晓晓、陈静等编辑付出了辛勤劳动,谨致谢忱。

本书的出版得到了“中国科学院科学出版基金”的资助。

由于水平所限,疏漏不足之处在所难免,恳请广大读者不吝指正。

作者

二〇一三年元月于北京

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 深空探测活动进展	1
1.1.1 太阳探测	3
1.1.2 以火星为主的行星探测	3
1.1.3 小天体探测	4
1.2 深空探测活动未来发展	5
1.2.1 美国	5
1.2.2 俄罗斯	6
1.2.3 欧洲空间局	6
1.2.4 日本	6
1.3 中国的深空探测活动	7
1.3.1 月球探测	7
1.3.2 火星探测	8
1.4 深空测控通信系统	8
1.4.1 任务功能	8
1.4.2 深空测控通信的特点	9
1.4.3 深空网概述	12
参考文献	17
第 2 章 轨道动力学	19
2.1 太阳系天体运动	19
2.1.1 太阳系行星	19
2.1.2 太阳系行星轨道参数	19
2.1.3 月球的运动规律	20
2.1.4 火星的运动规律	21
2.1.5 金星的运动规律	23
2.2 时间系统	23
2.2.1 世界时	24
2.2.2 历书时	25
2.2.3 原子时	25

2.2.4 力学时25

2.2.5 坐标时26

2.2.6 时间系统转换26

2.2.7 历元29

2.3 坐标系统29

2.3.1 日心坐标系29

2.3.2 火心坐标系31

2.3.3 月心坐标系32

2.3.4 地心坐标系36

2.3.5 站心坐标系45

2.3.6 坐标系统转换47

2.4 轨道动力学基础48

2.4.1 二体问题48

2.4.2 多体问题55

2.5 深空探测轨道设计62

2.5.1 月球探测轨道设计62

2.5.2 日地拉格朗日点探测器轨道设计66

2.5.3 小天体探测轨道设计77

2.5.4 火星探测轨道设计80

参考文献86

第3章 无线电测量87

3.1 测距87

3.1.1 基本原理87

3.1.2 测距体制88

3.1.3 测距模式102

3.1.4 距离零值校标103

3.2 测速107

3.2.1 基本原理107

3.2.2 测速模式108

3.2.3 上行频率补偿112

3.3 干涉测量114

3.3.1 基本原理114

3.3.2 干涉测量类型115

3.3.3 测量流程119

3.3.4 数据获取123

3.3.5 数据处理和校正124

3.4 测量误差分析128

3.4.1 传输媒介对测量精度的影响128

3.4.2 时标准确度造成的测量误差134

3.4.3 地面接收机引入的测量误差135

3.4.4 频率源准确度和稳定度引入的测量误差138

3.4.5 其他测量误差139

参考文献139

第 4 章 遥测、遥控与数据通信技术	143
4.1 信源编码	143
4.1.1 无失真信源编码	143
4.1.2 限失真信源编码	145
4.2 信道编码	149
4.2.1 基本概念与分类	149
4.2.2 级联码	151
4.2.3 LDPC 码	153
4.2.4 Turbo 码	155
4.2.5 信道编码性能	157
4.3 数据分包与格式化	160
4.3.1 数据分包的特点	160
4.3.2 数据分包的分层结构	161
4.3.3 数据分包的格式化	163
4.4 调制与解调	167
4.4.1 常用信号调制体制	167
4.4.2 恒包络连续相位数字调制	171
4.4.3 载波调制性能分析	173
4.5 遥测	174
4.5.1 深空遥测典型系统	174
4.5.2 遥测系统性能	176
4.5.3 极低损耗遥测解调技术	182
4.6 遥控	187
4.6.1 深空遥控典型系统	187
4.6.2 低码率指令接收技术	189
4.7 数据通信	190
4.7.1 深空数据通信典型系统	191
4.7.2 微弱抑制载波信号捕获技术	192
参考文献	194
第 5 章 深空探测器射频系统	195
5.1 系统组成与性能	195
5.1.1 系统组成	195
5.1.2 系统性能	197
5.2 应答机	199
5.2.1 应答机的组成和工作原理	199
5.2.2 高灵敏度载波捕获	200
5.2.3 低门限相干解调技术	202
5.2.4 转发测距与再生测距	204
5.2.5 DOR 音的生成与调制	208
5.3 功率放大器	210
5.3.1 固态功率放大器	211
5.3.2 行波管放大器	214

- 5.3.3 功率放大器的性能指标 216
 - 5.3.4 两种功率放大器的比较 217
- 5.4 探测器天线 219
 - 5.4.1 探测器天线类型 219
 - 5.4.2 天线设计 220
 - 5.4.3 天线测量 223
 - 5.4.4 天线误差与损耗分析 227
- 5.5 探测器间通信链路 229
 - 5.5.1 器间通信系统设计 229
 - 5.5.2 器间通信链路衰减计算 230
- 5.6 探测器射频技术发展 237
 - 5.6.1 软件无线电技术 237
 - 5.6.2 新型应答机技术 238
 - 5.6.3 高频段通信技术 238
 - 5.6.4 新型器载天线技术 239
 - 5.6.5 高稳振荡器技术 240
- 参考文献 241

第 6 章 深空测控通信地面系统 243

- 6.1 系统概述 243
 - 6.1.1 系统组成 243
 - 6.1.2 工作流程 245
- 6.2 大口径天线 252
 - 6.2.1 深空天线的构成 252
 - 6.2.2 天线的标校 268
 - 6.2.3 波束波导馈电系统的跟踪 282
- 6.3 超低噪声温度接收机 286
 - 6.3.1 低温射频前端 287
 - 6.3.2 超低温制冷系统 291
 - 6.3.3 噪声温度测试 298
- 6.4 大功率发射机 303
 - 6.4.1 大功率速调管 303
 - 6.4.2 大功率高压电源 308
 - 6.4.3 大功率冷却设备 313
 - 6.4.4 大功率无源器件 315
 - 6.4.5 实现更大输出功率的途径 320
- 6.5 高稳定度时间频率基准 321
 - 6.5.1 深空站时间频率基准的组成 321
 - 6.5.2 微波原子频标原理 322
- 参考文献 325

第 7 章 射频频谱设计与干扰防护 327

- 7.1 深空测控通信电磁频谱规划 327
 - 7.1.1 ITU 有关频率划分规定 327

7.1.2	CCSDS 航天测控通信频段建议	329
7.1.3	SFCG 深空测控通信频率使用建议	329
7.1.4	NASA 月球与深空导航通信频谱结构	332
7.2	深空测控通信干扰保护	335
7.2.1	干扰影响分析	335
7.2.2	干扰保护标准	336
7.2.3	干扰判定准则	341
7.2.4	深空地面站选址电磁环境要求与协调区划分	342
7.3	深空测控通信频谱设计	345
7.3.1	测控通信频段选择	345
7.3.2	发射机带外发射约束	347
7.3.3	接收机选择性要求	349
7.4	典型电磁干扰计算	350
7.4.1	主要干扰类型	350
7.4.2	HDFS 对深空站的干扰计算	351
7.4.3	地球轨道航天器网络对深空链路的干扰计算	352
	参考文献	353
第 8 章	深空探测遥操作	355
8.1	遥操作	355
8.1.1	基本概念	355
8.1.2	模式分类	356
8.2	深空探测典型遥操作系统	357
8.2.1	苏联月球探测遥操作	357
8.2.2	美国火星探测遥操作	359
8.2.3	中国月球探测遥操作	362
8.3	巡视探测遥操作关键技术	364
8.3.1	巡视探测遥操作面临的技术难题	364
8.3.2	视觉测量与环境重构技术	366
8.3.3	遥操作规划技术	371
8.3.4	虚拟现实与人机交互技术	375
8.3.5	地面仿真与试验验证技术	379
	参考文献	383
第 9 章	深空测控通信系统设计	385
9.1	任务分析	385
9.2	系统设计方法	386
9.3	链路设计	387
9.3.1	深空测控通信链路	387
9.3.2	测控通信门限的确定	390
9.3.3	接收功率计算	394
9.3.4	系统噪声温度计算	396
9.3.5	链路裕量	399
9.4	链路损耗计算	401

9.4.1 大气损耗的模型计算	401
9.4.2 12 GHz 以下频段外部损耗估算	404
9.4.3 雨衰损耗	405
9.4.4 云雾损耗	407
9.4.5 实测数据的损耗统计方法	409
9.5 链路噪声温度估算	411
9.5.1 外部噪声温度的测量和计算	411
9.5.2 噪声指数和天线噪声	418
9.5.3 其他外部噪声	418
9.5.4 地面站系统噪声温度	418
9.5.5 系统噪声温度的测量	419
9.5.6 不同参考点系统噪声温度的归算	419
9.6 其他因素对测控链路性能的影响	420
9.6.1 星载应答机工作模式对转发噪声的影响	420
9.6.2 不同副载波波形的功率分配	423
9.6.3 仰角对链路损耗的影响	425
9.6.4 极化损耗	426
9.6.5 指向误差对天线增益的影响	426
参考文献	427
第 10 章 深空测控通信技术发展	429
10.1 自主与认知技术	430
10.2 天线组阵技术	432
10.3 深空光通信技术	434
10.4 行星际网络技术	436
参考文献	438
附录 A	439
A1 八大行星轨道参数	439
A2 IAU 2000 章动模型	440
A3 圆锥曲线轨道特性	442
附录 B 贝塞尔函数表	443
附录 C 正态误差函数表	449
附录 D 链路计算参数概率密度函数	451
附录 E 天体的黑体亮温度值	453
附录 F 缩略词表	455

第1章 绪 论

深空探测是对月球和月球以远的天体或空间环境进行的探测活动。1988年以后,国际电信联盟(International Telecommunication Union, ITU)把深空探测定义为对 200 万 km 以远的天体或空间环境进行的探测。目前,这两种定义方法都在应用。

深空探测是人类探索宇宙奥秘和寻求长久发展的必然途径,是衡量一个国家综合国力和科学技术发展水平的重要标志。开展深空探测活动能够有效带动空间技术、空间科学和空间应用的大发展,促进对太阳系及宇宙的起源与演化、太阳及小天体活动对人类生存环境的灾害性影响、地外生命信息探寻等重大科学问题的研究,为人类可持续发展服务^[1-2]。

1.1 深空探测活动进展

1957 年苏联发射第一颗人造地球卫星后仅 3 年,苏联和美国即竞相发射深空探测器,拉开了人类探测太阳系的序幕。自 1960 年 3 月美国发射世界上第一颗深空太阳探测器先驱者 5 号(Pioneer 5),至 2011 年 11 月俄罗斯发射福布斯-土壤(Phobos-Grunt)火星卫星探测器,世界主要航天大国和组织共实施深空探测任务 120 次,成功或部分成功 73 次,失败 43 次,4 次尚在飞行途中,成功率为 61%,两探测器如图 1-1 所示。

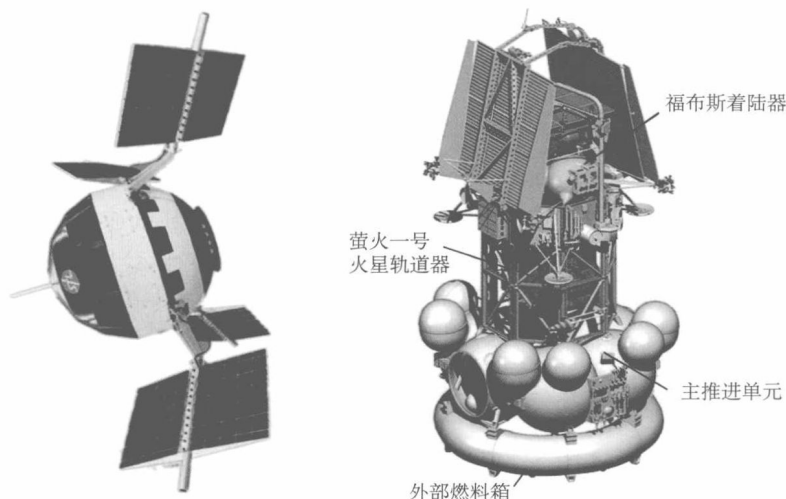


图 1-1 先驱者 5 号深空太阳探测器(左)和福布斯-土壤火星卫星探测器(右)^[2-3]

五十余年的深空探测发展历程,大致可以分为“竞争期”、“平静期”和“成熟期”三个阶段。1960—1979年是美、苏两国在冷战背景下以相互展示意志和能力为特征的“竞争期”,20年间共实施68次任务,虽然失败34次,但两国空间技术和空间科学能力得到了飞速发展。1980—1994年是深空探测活动的“平静期”,美、苏此时都致力于空间科学数据的分析和消化,在此期间日本和欧洲空间局(European Space Agency, ESA)相继加入了深空探测行列,但15年间仅实施16次任务。1995—2012年是以科学探索为主要驱动力开展深空探测活动的“成熟期”,17年间共实施了36次任务。不同时期深空探测活动统计如图1-2所示。

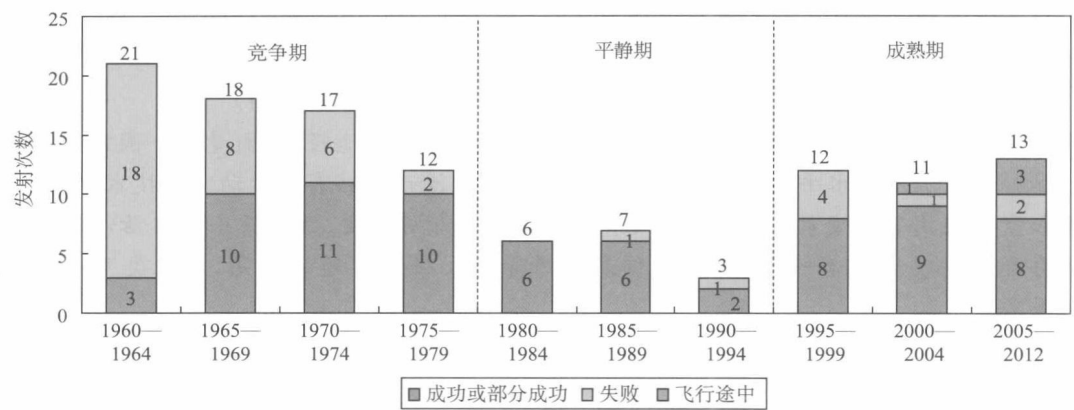


图 1-2 不同时期深空探测活动统计图

迄今为止,仅有美国、苏联/俄罗斯、日本和欧洲空间局独立开展了深空探测活动。美国最早开始实施深空探测任务,是目前唯一对太阳、七大行星、小天体和太阳系以外宇宙空间都开展过探测活动的国家;苏联/俄罗斯曾发射过多个探测器,但成功率较低,自1996年火星96号(Mars 96)任务失败后,至今再未发射深空探测器;日本虽在行星探测方面受挫,却在小天体探测方面取得了较大成功;欧洲空间局发射次数虽少,但全部取得成功或取得部分成功,在较短时间内达到了很高的水平。世界各国和组织深空探测活动统计如图1-3所示。

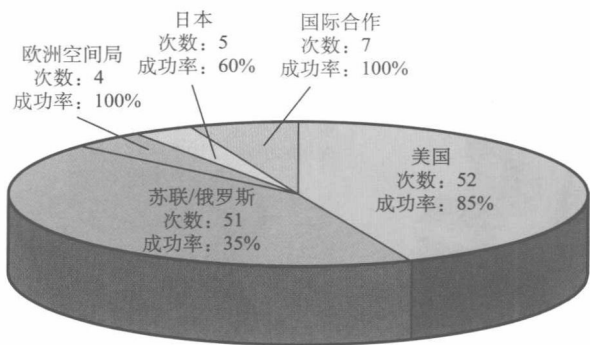


图 1-3 世界各国和组织深空探测活动统计图

人类已开展的深空探测活动已基本覆盖太阳系各类天体,如太阳、七大行星及其卫星、矮行星、小行星和彗星等,实现了飞越、撞击、环绕、软着陆、巡视和采样返回等多种探测方式。探测的重点集中在火星、金星、太阳和小天体,不同天体探测活动统计如图 1-4 所示。

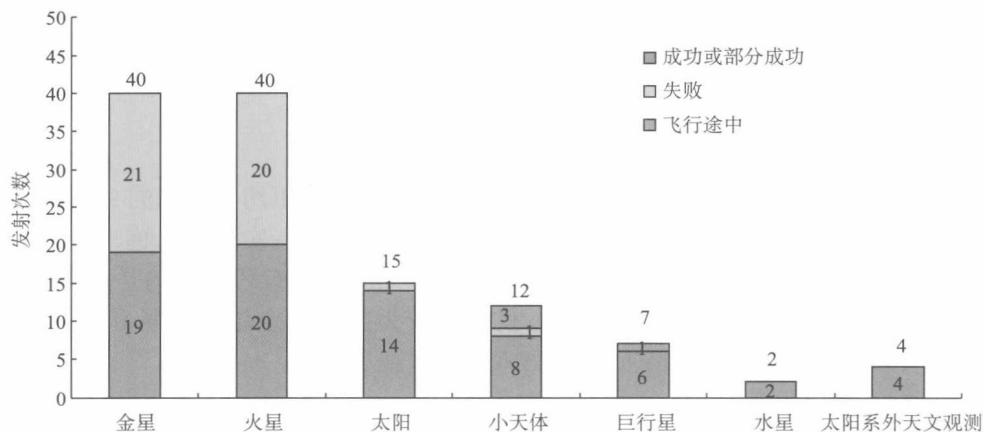


图 1-4 不同天体探测活动统计图

需要指出的是,金星探测主要集中在 20 世纪六七十年代,1990 年之后仅实施过 2 次。此外,近年来美国和欧洲空间局相继开始了对太阳系以外宇宙的天文观测。

1.1.1 太阳探测

太阳作为太阳系的主宰,对人类生存环境的影响非常巨大,也是深空探测的重点目标。在深空任务中,对太阳的探测,主要采用太阳环绕轨道观测和日地拉格朗日点 L_1 晕轨道观测两种方式。早期美国的前驱者(Pioneer)系列、太阳神(Helios) 1 号和太阳神 2 号,主要采用太阳环绕轨道对太阳风和太阳磁场等进行探测。1990 年美国和欧洲空间局合作发射了尤利西斯(Ulysses)太阳探测器,第一次成功实现了太阳近极轨道(倾角 70°)的探测^[4]。此外,在日地拉格朗日点 L_1 对太阳进行长期观测的主要有国际日地探险者(ISEE-3)等 5 颗探测器,其中起源号(Genesis)探测器成功采集到了太阳风粒子并返回地球^[5-9]。2006 年美国还发射了日地天文台(STEREO)探测器,采用双星对太阳开展立体观测,首次从地球轨道以外位置提供太阳的三维视图^[10]。

1.1.2 以火星为主的行星探测

1) 火星探测

和其他行星比较而言,火星的自然环境与地球较为相似,是目前人类认识最深入的类地行星。人类已先后发射 40 颗火星探测器,实现了飞越、环绕、着陆和巡视探测。50 余年的火星探测历程从探测方式上大致可分为两个阶段。第一阶段是以美国和苏联为主的国家对火星的初期探测,主要采用飞越、环绕和硬着陆的方式,获得了大量关于火星大气、地形地貌等方面的科学数据。第二阶段是在 20 世纪 90 年代后,主要是美国先后

实施了 11 次火星任务,成功 8 次,实现了软着陆和火星车巡视探测。其中,具有代表性的机遇号(Opportunity)、勇气号(Spirit)在火星表面进行了长期巡视探测^[11-12],凤凰号(Phoenix)则成功实现了火星极地软着陆,发现了大量水冰的存在^[13]。2011 年底发射的火星科学实验室(MSL),即好奇号(Curiosity)火星车,全部采用核电源、空中吊车式软着陆方式,再次开展火星巡视探测。2011 年底俄罗斯发射的福布斯-土壤火星卫星探测器,由于故障未能进入地火转移轨道。此外,欧洲空间局和日本也对火星探测进行了尝试。

2)金星探测^[14]

金星是距离地球最近的类地行星,其环境恶劣,表面大气压约为地球的 90 倍,表面温度高达 400℃。人类先后对金星进行了 40 次探测,成功 19 次,实现了飞越、撞击、环绕和 8 次软着陆,着陆器在金星表面工作寿命最长仅 127 min。最有代表性的是 1989 年美国发射的麦哲伦号(Magellan)金星轨道器,获得了较为完整金星引力场和地形地貌数据^[15]。自 1990 年以后,仅欧洲空间局和日本实施过金星探测。

3)水星探测

在八大行星中,水星质量最小,距太阳最近。到目前为止,只有美国对其开展过探测活动。水手 10 号(Mariner 10)探测器于 1974 年和 1975 年对水星进行过飞越探测,获得了水星大气成分和磁场分布等数据。为了进一步认识了解水星的内部结构等,美国 2004 年发射了信使号(Messenger)水星轨道器^[16-17],它在飞行约 7 年后,于 2011 年 3 月成功入轨。

4)巨行星探测

巨行星包括木星、土星、天王星和海王星。木星是太阳系中最大的行星。目前,人类对木星进行了 5 次飞越探测和 1 次轨道器探测,1 次尚在飞行途中。1989 年美国和西德联合发射了伽利略号(Galileo)轨道探测器,对木星及其卫星的化学成分和物理状态进行了探测,证实了木卫二、木卫三表面覆盖着冰层^[18]。2011 年 8 月发射的朱诺号(Juno)轨道探测器预计 2016 年到达木星,对木星大气成分、磁场和重力场等开展为期至少一年的研究。

土星是太阳系内第二大行星,美国发射的先驱者 11 号(Pioneer 11)等三次任务,对土星进行了飞越探测。1997 年美国和欧洲空间局联合发射的卡西尼-惠更斯(Cassini-Huygens)探测器首次对土星及其卫星开展了环绕探测^[19-20]。2004 年,卡西尼与惠更斯分离,卡西尼继续环土星轨道探测,惠更斯则成功着陆在土卫六表面。

巨行星探测主要采用飞越探测,少部分实现了环绕探测。由于探测距离遥远,飞行时间长,所以对探测器的寿命、自主控制和测控通信要求很高。由于距离太阳遥远,探测器一般采用核电源。

1.1.3 小天体探测

一般认为,小行星和彗星等小天体保存着太阳系早期形成的原始信息,可作为研究太阳系起源与演化的证据。迄今各国共实施过 12 次探测任务,成功 8 次,3 次尚在飞行