



中国航天科技前沿出版工程 · 中国航天空间信息技术系列



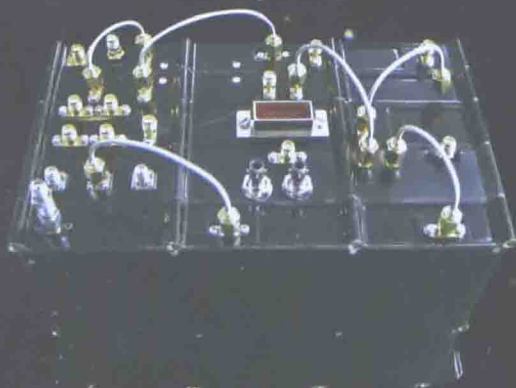
“十二五”国家重点图书出版规划项目



Deep Space TT&C Transponder Technology

深空测控应答机技术

北京跟踪与通信技术研究所
李海涛 冯贵年 朱智勇 编著



清华大学出版社



中国航天科技前沿出版工程·中国

“十二五”国家重点图书出版规划项目

Deep Space TT&C Transponder Technology

深空测控应答机技术

李海涛 冯贵年 朱智勇 编著

清华大学出版社

内 容 简 介

应答机是天地一体化测控通信的重要组成部分,也是星载测控通信分系统的核心。本书针对深空测控的需求和特点,对深空测控应答机技术进行了全面系统的论述,内容主要包括深空测控应答机技术的历史沿革和未来发展趋势、转发模式和再生模式深空应答机的基本原理与工程应用、邻近链路收发信机的原理与设计方法等。可供航天工程相关领域的科研人员和工程技术人员阅读参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

深空测控应答机技术/李海涛,冯贵年,朱智勇编著.--北京:清华大学出版社,2014
中国航天科技前沿出版工程·中国航天空间信息技术系列/钱卫平主编
ISBN 978-7-302-38188-4

I. ①深… II. ①李… ②冯… ③朱… III. ①空间探索—应答器 IV. ①V11
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 225936 号

责任编辑:石磊 赵从棉

封面设计:傅瑞学

责任校对:王淑云

责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京雅昌艺术印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:153mm×235mm 印 张:13.25 字 数:228 千字

版 次:2014 年 9 月第 1 版 印 次:2014 年 9 月第 1 次印刷

印 数:1~1500

定 价:65.00 元

产品编号:062287-01

中国航天空间信息技术系列

编审委员会

主 任：钱卫平

副主任：董光亮 吴正容 朱天林

委 员：孙 威 郭军海 李海涛 赵宗印 李 平

柳忠贵

秘 书：陈凌晖

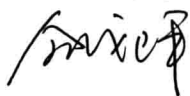
人类探索宇宙的步伐正随着航天技术的发展逐步加快。21 世纪,航天技术及能力的迅速成熟,促使其更加深入地渗透到人们生产生活的各个方面,成为科技、经济领域中强劲的增长点;同时,还使其强烈释放出空间力量的效能,在国家安全领域受到越来越广泛的关注。

空间信息技术作为航天技术的重要组成部分,其发展水平对航天系统整体技术和能力起着关键的支撑和促进作用,日益得到国内外航天领域专家与工程技术人员的高度重视。随着载人航天工程与月球探测工程的圆满完成,中国已经成为具有独立开展太空探索能力的航天大国。中国在航天技术领域的进步离不开空间信息技术的支持,航天工程的实施也凝结出一系列空间信息技术的成果与经验。

要满足航天技术迅速发展的需要,空间信息技术仍面临种种挑战。这些挑战既有认识层面的,也有理论、技术和工程实践层面的。如何解放思想,在先进理念和思维的牵引下,取得理论、技术以及工程实践上的突破,是我国相关领域科研、管理及工程技术人员必须思考和面对的问题。

北京跟踪与通信技术研究所在直接参与国家重大航天工程的总体技术单位,主要担负着导航通信、空间操作等领域的空间信息技术总体规划与设计工作,长期致力于推动空间信息技术的研究和发展。为及时总结一线科技人员的理论成果、技术创新及工程实践经验,促进经验向理论的升华,北京跟踪与通信技术研究组织策划了“中国航天空间信息技术系列”丛书。本系列丛书涉及专业面广泛,既有理论研究的创新突破,也有实践经验的系统总结,相信对我国航天领域,特别是空间信息技术领域的科技工作者和工程技术人员,一定能够提供有益的帮助与借鉴。

北京跟踪与通信技术研究所在



2014 年 6 月

测控应答机是航天器测控通信分系统的核心,其与地面测控设备配合,共同完成对航天器的测控通信任务。在深空探测任务中,测控应答机正朝着多频段、多功能、小型化、低功耗的方向发展。美国、欧洲、日本等国家和组织先后开发了新型深空测控应答机,作为支持深空导航和通信任务的主要工具,已经先后应用于“罗赛塔”、“火星快车”、“卡西尼”和“深空一号”等深空探测器。

嫦娥一号任务的圆满成功标志着我国迈出了深空探测的第一步;嫦娥二号和嫦娥三号连续顺利实施进一步深化了该成果;探月工程三期再入返回飞行试验任务的圆满成功更是为月球采样返回任务奠定了坚实的基础。随着我国探月工程“绕、落、回”三步走战略的有序推进,自主火星探测等深空任务也已提上了议事日程。因此,研发具有自主知识产权的深空测控应答机已经成为急需解决的关键课题。

作为我国航天测控系统总体设计单位,北京跟踪与通信技术研究所组织深空测控科研团队,不断跟踪研究国际深空测控通信技术发展方向,开展了基于再生伪码测距的深空测控体制研究和系统设计,并组织了天地一体化深空测控应答机的样机研发与地面的系统级验证试验。本书作者整合了国内外研究和工程实践的相关成果,融合基础与专业理论知识,对深空测控应答机技术进行了较为全面的论述。其主要特点是理论与实际相结合,内容全面,工程应用性强。相信该书的出版不仅对从事深空测控通信领域的工程技术人员具有较高的参考价值,对深空测控应答机设计、研发以及相关技术研究也具有一定的指导意义。

本书第1章从深空探测活动、深空测控,引出了深空测控应答机的重要作用;第2章回顾了国际深空测控应答机的发展历程;第3章和第4章是本书的重点,分别论述了转发模式、再生模式深空测控应答机的工作原理、工程实现及其应用;第5章简要介绍了邻近链路收发信机技术;第6章对深空测控应答机的新技术与发展趋势做了展望。

本书由李海涛、冯贵年、朱智勇共同编写,李海涛负责全书的策划和统

稿。在本书的编写过程中,北京跟踪与通信技术研究所的黄磊、李平、丁溯泉等提供了相关文献资料和有益帮助,在此一并表示感谢。

由于编写时间紧促,加之编者水平有限,书中难免有错误或疏漏之处,恳请读者批评指正。

编 者

2014 年 8 月

第 1 章 绪论 1

 1.1 深空探测 2

 1.2 深空测控 9

 1.2.1 深空测控频段 9

 1.2.2 深空测控的概念 10

 1.3 深空测控应答机概述 12

 参考文献 13

第 2 章 深空测控应答机的技术发展 15

 2.1 概述 16

 2.2 第一代 S/X 双频段深空测控应答机 18

 2.2.1 S/X 双频段 DST 的结构 18

 2.2.2 数字接收机工作 22

 2.2.3 转发功能 24

 2.2.4 性能 25

 2.3 新一代 X/Ka 双频段深空测控应答机 26

 2.3.1 设计改进 26

 2.3.2 X/Ka 双频段 DST 的结构 28

 2.3.3 性能 33

 2.4 未来的深空测控应答机 35

 参考文献 36

第 3 章 转发模式深空测控应答机 39

 3.1 概述 40

 3.2 转发测距基本原理 40

 3.2.1 测距原理 40

 3.2.2 多种测距技术 41

 3.3 转发测距性能分析 42

 3.3.1 测距通道的 AGC 控制模式 42

 3.3.2 三种模式的性能比较 44

3.3.3 测试方法	46
3.4 转发模式深空测控应答机的工程应用	51
3.4.1 ESA DST 的信号处理	51
3.4.2 ISA DST 的转发测距	55
3.4.3 DST 应答机性能和特性	58
附录	60
参考文献	62
第 4 章 再生模式深空测控应答机	65
4.1 概述	66
4.2 再生伪码测距系统	66
4.2.1 伪码测距基础	66
4.2.2 伪码结构	68
4.2.3 调制	75
4.2.4 航天器上捕获	76
4.2.5 航天器上伪码跟踪抖动	87
4.2.6 地面站捕获	93
4.2.7 地面站及端到端的抖动	99
4.2.8 对遥测遥控的干扰	111
4.3 伪码透明转发测距系统	123
4.3.1 引言	123
4.3.2 选定序列 T2B	123
4.3.3 与再生测距的比较	124
4.4 再生模式深空测控应答机的工程应用	125
参考文献	141
第 5 章 邻近链路收发信机	145
5.1 概述	146
5.2 系统要求	147
5.3 射频集成电路收发信机的结构	151
5.3.1 顶层框图	151
5.3.2 射频集成电路框图	152
5.3.3 发射模式	153
5.3.4 频率综合	153
5.3.5 接收模式	155

5.3.6	中频滤波和 1bit 模数转换	156
5.4	数字调制解调器的设计	157
5.4.1	数字发射机	157
5.4.2	数字接收机	159
5.5	蓝宝石硅集成电路的加工	161
5.6	射频集成电路设计	162
5.6.1	射频集成电路的重复原型	162
5.6.2	接收机射频集成电路模型	163
5.6.3	LNA 设计与性能	166
5.6.4	中频子系统稳定性和电源过滤	168
5.6.5	接地点问题和布局规划	169
5.7	设计举例	172
5.7.1	设计目标	172
5.7.2	应答机的主要特点	174
5.7.3	工作模式	175
5.7.4	接口	176
5.7.5	小结	183
	参考文献	183

第 6 章	深空测控应答机技术的未来发展	187
6.1	光通信技术	188
6.2	软件再配置通信技术	191
6.3	自主无线电接收机技术	192
6.4	射频集成技术	194
6.5	其他技术	195
	参考文献	196

名词索引	197
------------	-----

第1章

绪论

遥远太空对人类一直是谜一样的存在。深空探测是人类解开这个谜团的钥匙,更是人类永恒追求的梦想。本章从这一梦想起飞,引出深空测控的基本概念,进而详细介绍了深空测控应答机的地位、作用、组成及原理。

1.1 深空探测

随着科学技术水平的发展,人类已经具备了通过航天活动来探索地球以外天体的能力。根据探测目标和任务的不同,人类的航天活动主要分为地球应用卫星、载人航天和深空探测三大领域。

深空探测是指脱离地球引力场,进入太阳系空间和宇宙空间的探测。关于深空的定义,国际宇航界公认的是国际电信联盟(ITU)的《无线电规则》第1.77款中关于深空的规定。过去的《无线电规则》将深空的边界定义在月球的距离上;1988年10月,在世界无线电管理大会(WARC)ORB-88会议上确定将深空的边界修订为距离地球大于或等于 2.0×10^6 km的空间,这一规定从1990年3月16日起生效^[1]。国际空间数据咨询委员会(CCSDS)在其建议书中也把距离地球 2.0×10^6 km以远的航天活动定义为B类任务(即深空任务)。目前,国际上主要航天国家和组织均把这一定义作为深空的标准定义。

在《中国大百科全书——航空·航天卷》的空间探测器条目中提出:对月球和月球以远的天体和空间进行探测的无人航天器,又称深空探测器。空间探测器包括月球探测器、行星探测器和行星际探测器。空间探测器是深空探测的主要工具。深空探测主要包括月球探测、行星探测和行星际探测。探测的主要目的是:了解太阳系的起源、演变和现状;通过对太阳系内的各主要行星的比较研究进一步认识地球环境的形成和演变;了解太阳系的变化历史;探索生命的起源和演变。空间探测器实现了对月球和行星的逼近观测和直接取样探测,开创了人类探索太阳系内天体的新阶段。^[2]

空间探测系统包括空间探测器和深空网。空间探测器是系统的空间部分,装载科学探测仪器,执行空间探测任务。为执行不同的探测任务和探测不同的目标,可构成不同的空间探测系统。空间探测的主要方式有:①从月球或行星近旁飞过,进行近距离观测;②成为月球或行星的人造卫星,进行长期的反复观测;③在月球或行星表面硬着陆,利用坠毁之前的短暂时机进行探测;④在月球或行星表面软着陆,进行实地考察,也可将取得的样品送回地球研究。^[2]

在2000年11月国务院新闻办公室发布的《中国的航天》白皮书中提出

“开展以月球探测为主的深空探测的预先研究”^[3]。《2006年中国的航天》白皮书在“过去五年的进展”中又指出“在深空探测方面,开展了绕月探测工程的预先研究和工程实施,取得重要进展”^[4]。2007年10月24日,首颗月球探测器嫦娥一号发射成功,同年11月,成功传回月球表面照片。图1-1即为嫦娥一号卫星及其拍摄的月面图像。2007年12月,胡锦涛主席在庆祝我国首次月球探测工程取得圆满成功大会上明确指出“首次月球探测工程,是我国开展深空探测的第一步”。可见,中国将月球探测作为了深空探测的起步。

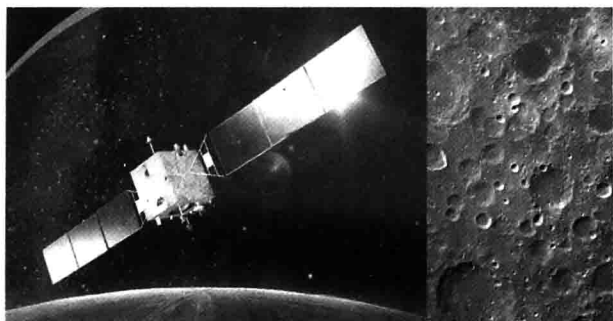


图 1-1 嫦娥一号航天器及其拍摄的月面图像

从1958年8月17日美国发射第一个月球探测器先驱者0号开始,人类迈向太阳系的深空探测活动至今已有50多年的历史了。人类开展的深空探测活动已基本覆盖了太阳系内的各类天体,包括太阳、除了地球之外的其他七大行星及其卫星、小行星和彗星等,实现了飞越、撞击、环绕、软着陆、巡视、采样返回等多种探测方式。探测的重点主要集中在火星、金星、太阳以及小天体。迄今为止,仅有美国、苏联/俄罗斯、欧洲航天局、日本、中国和印度独立开展了深空探测活动。而美国则是目前唯一已经对除地球之外的其他七大行星、太阳、小天体及太阳系以外宇宙空间开展过探测活动的国家。

美国在20世纪70年代发射的先驱者10号(1972年3月2日发射,在2003年1月23日,最后一次接收到从先驱者10号发送来的极微弱信号时,它正处于距地球约80个AU^①的位置,截至2014年3月距离太阳约110.526个AU,并以每年2.534个AU的速度飞离^[5])、先驱者11号(1973年4月6日发射,截至2014年3月距离太阳约89.994个AU,并以每年2.392个AU的速度飞离^[5])、旅行者1号(1977年9月5日发射,截

① 1AU,即1个天文单位,约为1.5亿km。

至 2013 年 9 月距离太阳约 125.3 个 AU,并以每年 3.6 个 AU 的速度远离太阳系^[6])和旅行者 2 号(1977 年 8 月 20 日发射,截至 2013 年 9 月距离太阳约 102.6 个 AU,并以每年 3.3 个 AU 的速度远离太阳系^[6])已经能够飞出太阳系边缘,正在奔向更加遥远的星际空间。先驱者 10 号正在飞向银河系的中心,而先驱者 11 号正在朝相反的方向飞行^[7],旅行者 1 号和旅行者 2 号则正在飞向另外两个方向,如图 1-2 所示。

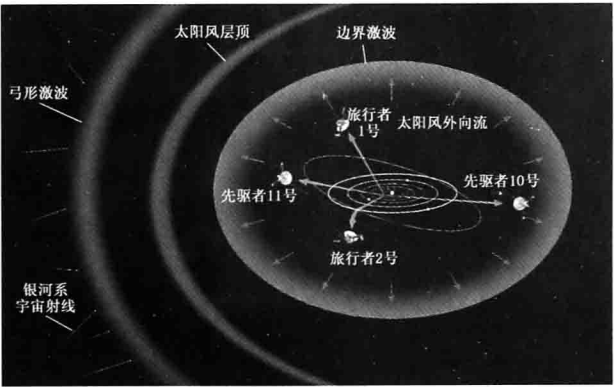


图 1-2 先驱者 10 号、先驱者 11 号、旅行者 1 号和旅行者 2 号的飞行方向示意图^[8]

2013 年 9 月 12 日,美国国家航空航天局(NASA)宣布旅行者 1 号已经飞出了太阳系,进入由等离子体和电离气体占主导的星际空间,成为目前离地球最远的人造飞行器,也是第一个进入星际空间的人造物体。图 1-3 给出了旅行者 1 号和旅行者 2 号在星际空间的位置示意,上方的航天器是旅行者 1 号。

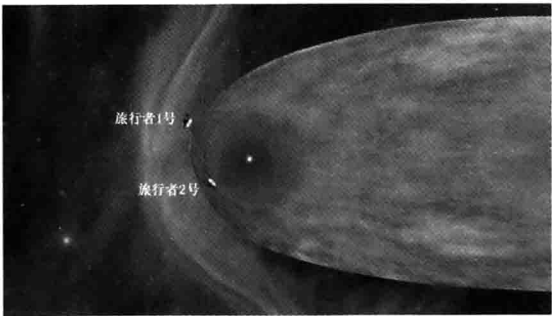


图 1-3 旅行者 1 号和旅行者 2 号在星际空间的位置示意图^[9]

2012 年 4 月 15 日,嫦娥二号离开地拉格朗日 L2 点前往 4179 号小行星(Toutati,图塔蒂斯)进行探测。2012 年 8 月下旬,嫦娥二号与地球的

距离突破了 200 万 km,进入了真正意义的深空。北京时间 2012 年 12 月 13 日 16 时 30 分 09 秒,嫦娥二号在距地球约 700 万 km 远的深空,对 4179 号小行星进行了飞越探测,并成功对其进行了拍照,如图 1-4 所示。这是中国第一次对小行星进行探测,也是第一次真正意义上的深空探测活动。中国也成为继美国、欧洲航天局和日本之后,第四个对小行星实施探测的国家(或组织)。



图 1-4 嫦娥二号飞行轨道示意及其拍摄的图塔蒂斯小行星照片^[9]

由于火星的自然环境与地球较为相似,是人类目前认识最深入的类地行星,一直以来都是国际上深空探测的重点目标。截至 2014 年 12 月,人类已先后发射 42 颗火星探测器,实现了飞越、环绕、着陆和巡视探测,如图 1-5 所示。在 50 余年的火星探测历程中,人类已经获得了大量关于火星大气、地形地貌等的科学数据。

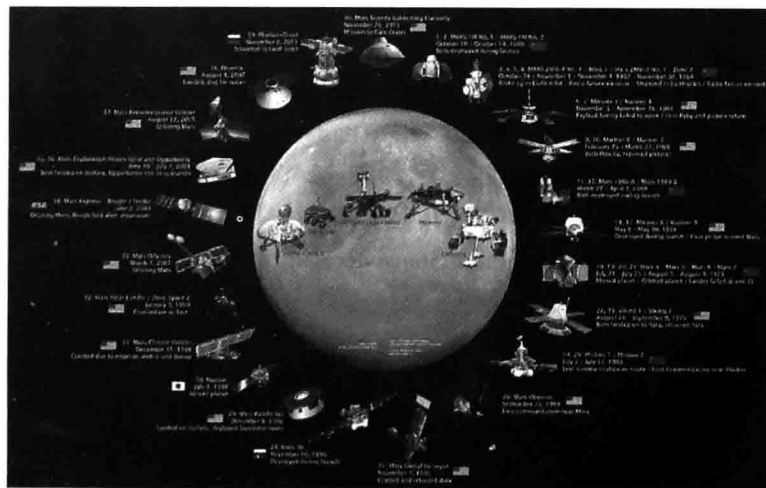


图 1-5 人类火星探测器全家福^[10]

自 20 世纪 90 年代以来,主要是美国先后实施了 12 次火星探测任务,其中 9 次取得成功,实现了软着陆和火星车巡视探测。其中具有代表性的

是机遇号(Opportunity)和勇气号(Spirit)在火星表面进行了长期巡视探测;凤凰号(Phoenix)成功实现了火星极地软着陆,并发现了火星上水冰的存在;2011年11月26日发射的火星科学实验室(Mars Science Laboratory,MSL),即好奇号火星车(Curiosity),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,并已于2012年8月6日成功着陆在火星表面的Gale陨石坑,如图1-6所示。

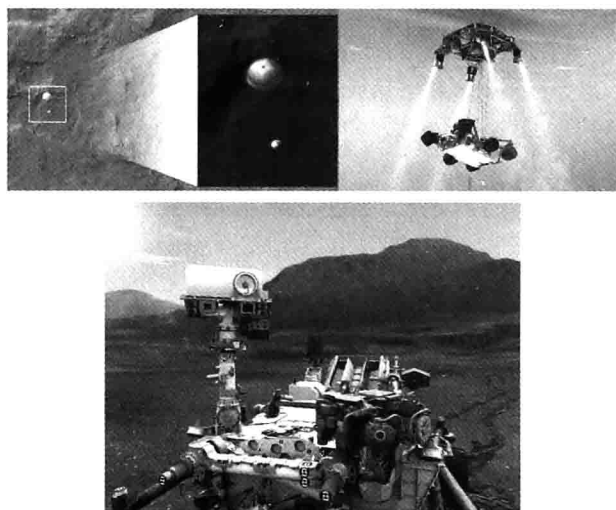


图 1-6 美国好奇号火星车^[11]

2013年11月18日13时28分(美国东部时间)美国NASA发射了“火星大气与挥发演化”(Mars Atmosphere and Volatile Evolution, MAVEN)探测器,如图1-7所示,2014年9月22日MAVEN探测器顺利进入环火轨道,开展火星上层大气、电离层及其与太阳和太阳风之间的相互影响探测。

印度航天研究组织(Indian Space Research Organization, ISRO)2013年11月5日发射了印度第一个火星探测器——火星飞船(Mangalyaan),于2014年9月24日进入火星轨道,成为世界上第四个将航天器送达火星轨道的航天机构,也是亚洲第一个实现火星探测的国家。

进入21世纪以来,世界上各主要航天大国和组织都制定了20年乃至更长远的深空探测发展规划。2011年9月,由美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)、欧洲航天局(European Space Agency, ESA)、俄罗斯联邦航天局(Федеральное космическое агентство России, Roscosmos)、日本宇宙航空开发机构(Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA)等14个国家或组织的航天局(如

图 1-7 NASA MAVEN 火星探测器^[12]

图 1-8 所示)组成的国际空间探索协调组(International Space Exploration Coordination Group, ISECG)发布了《全球探测路线图》,并于 2013 年 8 月进行了修订。该路线图规划了未来 25 年通过国际合作人类持续探测月球、小行星和火星的途径,确定了探测目的地、任务目标、任务方案及探测准备活动等,如图 1-9 所示。

图 1-8 国际空间探索协调组(ISECG)成员机构^[13]

ISECG 提出的未来 25 年的空间探测活动的最终目标是实现载人火星探测。各个成员机构针对这一目标在路线图中提出了两种技术路线,一种是以美国 NASA 为主导提出的小行星优先路线,另一种是其他国家和组织提出的月球优先路线。两种路线的主要差异是在 2020 年之后的载人探测任务规划上,一个是从月地拉格朗日 L1 点的深空定居点任务到载人小行星着陆探测,最终实现载人火星探测;另一个是从载人月球探测到实现载人火星探测。各个成员机构已明确的 2025 年前全球无人深空探测任务规