

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)在其建议书中也将距离地球 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。

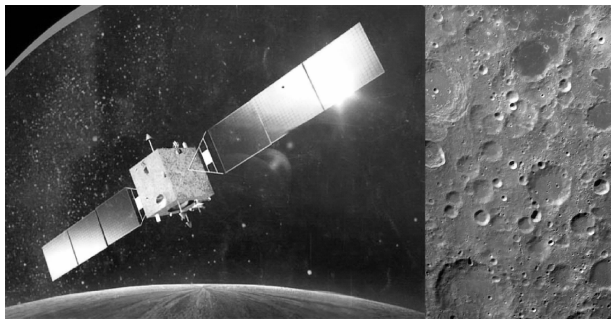


图 1-1 嫦娥一号航天器及其拍摄的月面图像

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。

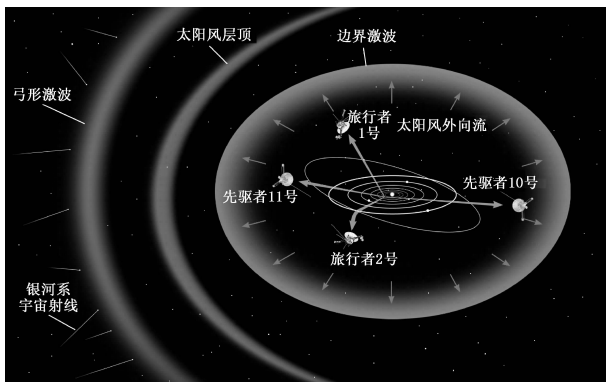


图 1-2 先驱者 10 号、先驱者 11 号、旅行者 1 号和旅行者 2 号的飞行方向示意图^[8]

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。

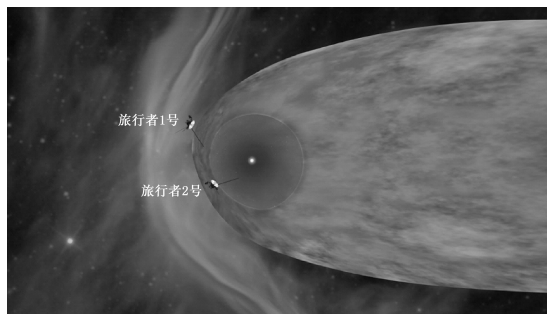


图 1-3 旅行者 1 号和旅行者 2 号在星际空间的位置示意图^[9]

2012 年 4 月 15 日,嫦娥二号离开日地拉格朗日 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)。

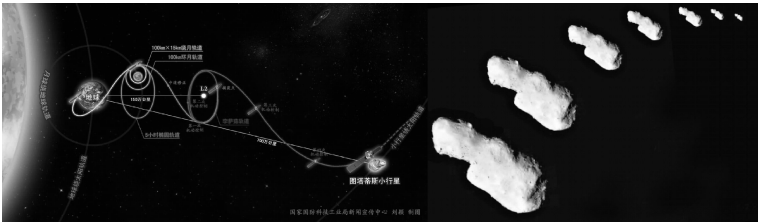


图 1-4 嫦娥二号飞行轨道示意及其拍摄的图塔蒂斯小行星照片^[9]

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。

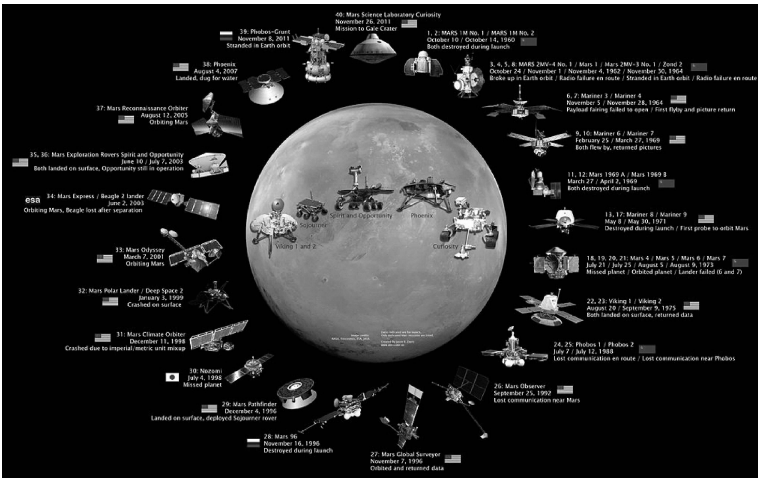


图 1-5 人类火星探测器全家福^[10]

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。

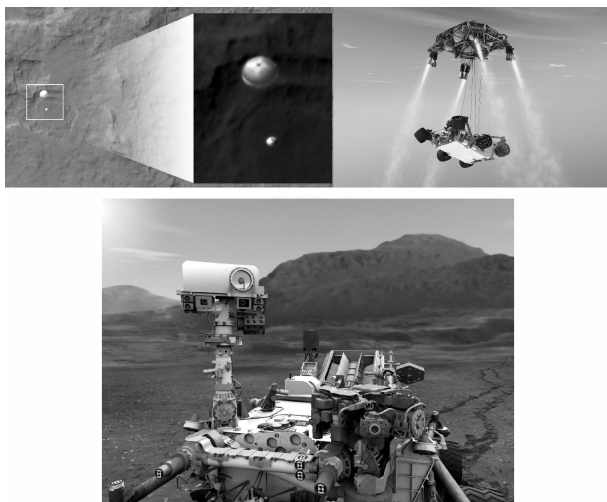


图 1-6 美国好奇号火星车^[11]

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

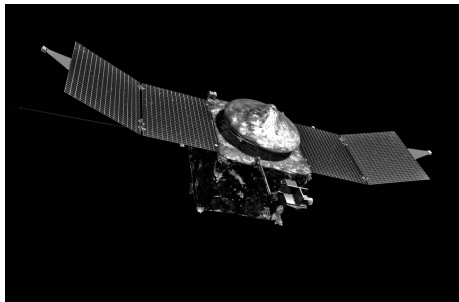


图 1-7 NASA MAVEN 火星探测器^[12]

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

1.2 深空测控

深空测控通信是人类与深空探测器联络的唯一途径,在深空探测任务中具有重要地位。由于距离远、信号弱等特点,深空测控任务中需要集成最先进的测控技术,使用最灵敏的天线设施等。

1.2.1 深空测控频段

探测器测控通信通常采用无线电信号进行天地之间的信息传输。无线电频段基本上是按电波传播特性来划分的,但随着无线电技术的发展,各国有不同的划分办法和称谓,目前常用的一些频段划分如表 1-1 所示。

表 1-1 常用频段的划分

频 段	频 率	波 长	备 注
高频(HF)	3~30MHz	100~10m	
甚高频(VHF)	30~300MHz	10~1m	
特高频(UHF)	300~1000MHz	1~0.3m	225~390 MHz 常为 P 频段
L	1~2GHz	30~15cm	
S	2~4GHz	15~7.5cm	
C	4~8GHz	7.5~3.75cm	
X	8~12GHz	3.75~2.5cm	
Ku	12~18GHz	2.5~1.67cm	
K	18~27GHz	1.67~1.11 cm	
Ka	27~40GHz	1.11~0.75cm	
毫米波(mm)	40~300GHz	7.5~1mm	毫米波又分 3 个频段： O: 36~46GHz V: 46~56GHz W: 56~100GHz

深空测控任务中,主要采用 S 频段、X 频段和 Ka 频段,国际上分配的从地球到飞行器和从飞行器到地球的测控通信频段^[14]如表 1-2 所示。

表 1-2 深空测控通信上下行链路频率

频段	上行频率/MHz	下行频率/MHz
S	2110 ~ 2120	2290 ~ 2300
X	7145 ~ 7190	8400 ~ 8450
Ka	34 200 ~ 34 700	31 800 ~ 32 300

1.2.2 深空测控的概念

深空测控通信系统是对执行深空探测任务的航天器进行跟踪测量、监视控制和信息交换的专用系统,其在深空探测任务中具有举足轻重、不可替代的地位和作用。首先,它是天地之间进行信息交互的唯一手段,也是航天器正常工作运行、充分发挥其应用效能的重要保证。通过地面站建立地面与航天器之间的天地无线电通信链路,完成对航天器的跟踪测量、遥测、遥控和天地数据通信业务。其次,它是深空探测体系的重要组成部分。在深空航天器从发射入轨一直到全任务周期结束,测控通信系统一直负责对航天器进行操作管理,提供长期的飞行状态监视和飞行控制,并进行探测信息接收、处理和数据交换。此外,它还还为相关系统提供科学应用处理所需的基准信息,提供航天器精确轨道与姿态数据,遥测数据,作为科学探测载荷应用数据处理的基准信息。^[15]

深空测控通信系统一般由航天器测控通信分系统、分布于地面的深空测控站、深空任务飞行控制中心以及将测控站和飞行控制中心连接在一起的通信网组成,如图 1-11 所示。通常,将地面的多个深空测控站组成的测控网称为深空网或深空测控网,特指专门用于深空航天器测控和数据传输的专用测控网。其特点是配有大口径抛物面天线、大功率发射机、极高灵敏度接收系统、信号处理中心以及高精度高稳定度时间和频率系统,能完成 200 万 km 以远深空航天器的测控通信任务。^[16]

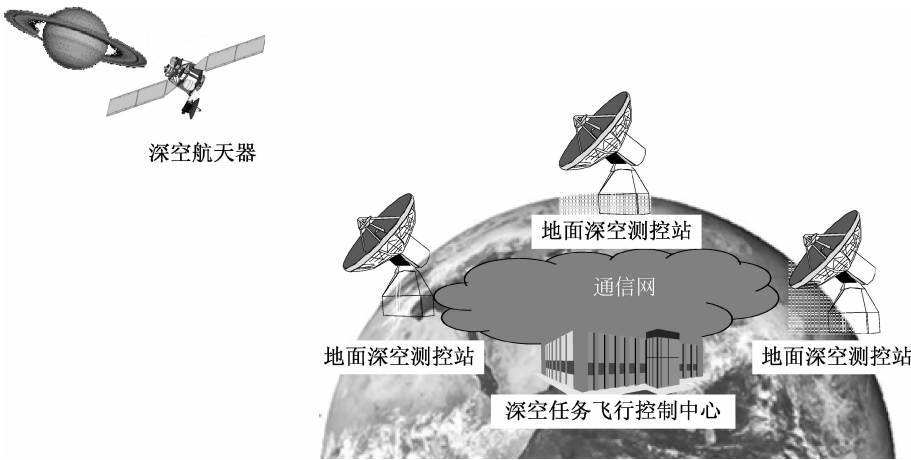


图 1-11 深空测控通信系统的组成^[16]