

第1章

绪论

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发射地球应用卫星、载人航天和深空探测三大领域。

其中,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(International Telecommunication Union,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》将深空的边界定义为月球及以远;1988年10月,在世界无线电管理大会(World Administrative Radio Conference,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 $2.0\times 10^6\text{ km}$ 的空间,这一规定从1990年3月16日起生效^[1]。国际空间数据系统咨询委员会(Consultative Committee for Space Data Systems,CCSDS)在其建议标准书中也将距离地球 $2.0\times 10^6\text{ km}$ 外的航天活动定义为B类任务(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。

《中国大百科全书:航空航天》在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,称“深空探测器”。深空探测器包括月球探测器、行星和行星际探测器。深空探测器是深空探测的主要工具。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。深空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12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“深空探测。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,“嫦娥一号”首颗月球探测器发射成功,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,时任国家主席胡锦涛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深空探测的起点。



图 1-1 “嫦娥一号”月球探测卫星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,人类对太阳系的深空探测活动至今已有60多年的历史。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、太阳以及小天体上。迄今为止,仅有中国、美国、苏联/俄罗斯、欧洲航天局和日本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3日发射,在2003年1月22日,最后一次接收到从“先驱者10号”发送来的极微弱信号时,它正距地球约80AU^①,截至2018年12月距离太阳约122AU,并以每年2.534AU的速度飞离太阳系^[5])和“先驱者11号”(1973年4月6日发射,截至2018年12月距离太阳约101AU,并以每年2.392AU的速度飞离太阳系^[5])、“旅行者1号”(1977年9月5日发射,截至2018年12月距离太阳约144AU,并以每年3.6AU的速度飞离太阳系^[6])和“旅行者2号”(1977年8月20日发射,截至2018年12月距离太阳约119AU,并以每年3.3AU的速度飞离太阳系^[6])已经能够飞出太阳系边缘,正在奔向更加遥

^① 1AU,即1个天文单位,约为 1.5×10^8 km。

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^[5]。

2012 年 4 月 15 日,“嫦娥二号”离开地日拉格朗日 L2 点前往 4179 号小行星(Toutatis,图塔蒂斯)进行探测。2012 年 8 月下旬,“嫦娥二号”与地球距离突破了 $2 \times 10^6 \text{ km}$,进入了真正意义上的深空。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 $7 \times 10^6 \text{ km}$ 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 1-2 所示。这是中国第一次对小行星进行探测,也是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 1-2 “嫦娥二号”拍摄的图塔蒂斯小行星照片

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, Роскосмос)、日本宇宙航空研究开发机构(Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA)等 14 个国家或组织的航天局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。

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,一个是从地月拉格朗日 L1 点的深空居民点任务到载人小行星着陆探测,最终实现载人火星探测;另一个是从月球探测到实现载人火

星探测。各个成员机构已明确 2025 年前的无人深空探测任务规划的重点仍主要集中在火星,包括了着陆器/巡视器、轨道器和采样返回任务。

在深空探测工程领域,中国也提出了一系列的宏伟计划。中国首次火星探测任务在 2020 年实施,探测器外形见图 1-3,通过一次发射,实现火星环绕和着陆巡视探测。2021 年火星探测器着陆火星,巡视探测器外形见图 1-4。后续在 2024 年前后完成小行星探测,2028 年前后火星取样返回,2036 年前后进行木星系及行星际穿越探测等。此外,还有专家提出了中国空间探索的新设想——太阳系边际探测任务,瞄准 21 世纪中叶实现 100AU 的就位探测。

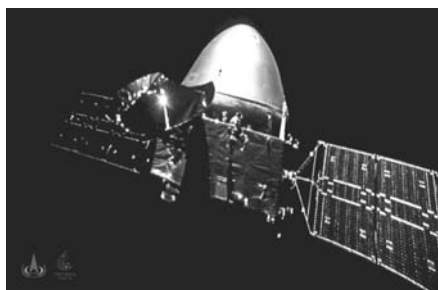


图 1-3 中国首次火星探测任务探测器外形



图 1-4 中国火星巡视探测器

1.2 深空测控

航天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,无线电信波以光速向外辐射,其强度以传播距离的平方衰减。深空航天器与近地航天器相比,其与地球之间的距离非常遥远,带来了巨大的信号衰减和传输时延。表 1-1 给出了太阳系主要天体与地球的距离以及与地球同步卫星相比较的信号衰减情况和信号传输时延情况。

表 1-1 太阳系内各大行星与地球的通信距离、延迟及与地球同步卫星相比的信号衰减

行星	距地球最远 距离/ 10^6 km	地球同步卫星距地球		通信单向延迟/min
		距离的倍数	0.036 $\times 10^6$ km	
			通信路径损耗增 加量/dB	
水星	222	6167	76	12.3
金星	261	7250	77	14.5
火星	401	11 139	81	22.3
木星	968	26 889	89	53.8
土星	1659	46 083	93	92.2
天王星	3155	87 639	99	175.3
海王星	4694	130 389	102	260.8

1) 信号空间衰减大

无线电信号强度以传播距离的平方衰减,遥远的距离带来巨大的信号路径损耗,意味着同样强度的发射信号,接收方得到的信号更加微弱,可传输的有效信息将急剧下降,为保证一定的信息量传输将花费更大的代价。为了弥补深空测控通信巨大的信号空间衰减,通常采用增大天线口径、增大射频发射功率、降低接收系统噪声温度、提高载波频率、应用信道编解码技术、降低传输码速率、通过数据压缩降低信息传输数据量等措施。例如,美国的深空网天线最大口径已经达到 70m,工作频段已经提高到 Ka 频段(32GHz),地面最大发射功率也已经达到上百千瓦。

深空探测的通信数据分为两类,一类是现场感知数据,主要是探测器拍摄的现场照片和视频信息,另一类是科学探测数据,主要包括探测图像、合成孔径雷达和多频谱与混合谱成像探测仪获取的数据。随着载人深空探测提上议事日程(美国计划 2030 年载人登陆火星),未来深空探测的现场感知数据也会从现在的图像,向视频乃至高清晰度电视(high definition television,HDTV)发展,数据传输速率需求将达到百兆量级。这些都对深空通信技术提出了新的挑战。

2) 信号传输时延长

对于数亿公里外的深空航天器,无线电信号单向传输长达数小时,无法像近地航天器那样对其进行实时操作控制和状态监视;由于地球自转的影响还导致单个地面深空站无法实现对其进行不间断跟踪。为了克服巨大时间延迟,主要采用地面提前注入的控制模式和多站接力的测量模式。例如,美国的“旅行者 2 号”在海王星附近时,由于距离非常遥远,往返光传输时间

超过了 8h,当信号返回地球时发射站已经随地球自转出了航天器视线,必须由另一个站来接收^[7]。

3) 信号传播环境复杂

深空测控通信无线电信号除了必须穿过近地空间的对流层和电离层之外,还要穿越变化复杂的太阳等离子区,经受随时出现的太阳风暴的冲击。同时,对具有大气层的地外天体的探测,信号还要穿过这些星体的大气层。这些都会对测控通信性能带来影响。无线电信号的频率越高,电波波长越短,电离层和太阳等离子区中带电粒子的影响就越小,从而可以提高无线电测量的精度。例如,带电粒子对 X 频段双向链路的影响将减小为 S 频段链路的 1/13。未来使用的 Ka 频段双向链路将进一步减小为 X 频段链路的 1/14^[9]。

4) 高精度导航困难

与近地航天器导航相比,深空航天器距离地球更遥远,无法使用像 GPS 这样的导航卫星系统;同时由于地面接收到的深空航天器信号非常微弱,还导致无线电测距测速精度的恶化;此外,由于深空航天器相对于单个地面站的测量几何关系变化非常微小,不利于实现高精度的轨道测量。

自 20 世纪后期甚长基线干涉测量(very long baselining interferometry, VLBI)技术诞生以来,美国 NASA 喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)提出了基于 VLBI 的无线电导航方式,即 Δ DOD(delta-differential one-way Doppler)和 Δ DOR(delta-differential one-way range)两种技术。NASA 深空网(deep space network, DSN)早在 20 世纪 70 年代就研究利用多种模式的 VLBI 测量技术,对深空航天器进行导航与定位;并利用 Δ VLBI 技术完成了对“旅行者 1 号”和“旅行者 2 号”航天器的导航与定轨的验证。在 20 世纪 80 年代至 90 年代,这项技术被 JPL 进一步完善和发展,用于支持行星际任务的精度达到了 30nrad(nano-radian, 纳弧度)的量级。在 20 世纪 90 年代早期,这项跟踪技术被应用于行星轨道器“麦哲伦号”在金星跟踪,其数据帮助提高了天球坐标系内金星星历的测量精度,达到了 5nrad 的水平。在 2001 年的“火星奥德赛”任务中,测量精度达到了 5nrad,而在最近的 MRO 任务中更是达到了 2nrad 的水平^[9]。

NASA 深空网的导航跟踪精度发展历程及展望如图 1-5 所示^[8]。再生伪码测距则可以消除上行链路噪声的影响、提高测距精度, NASA 已经在对冥王星及其卫星进行探测的“新地平线号”(2006 年 1 月 19 日发射)任务中应用了该技术。

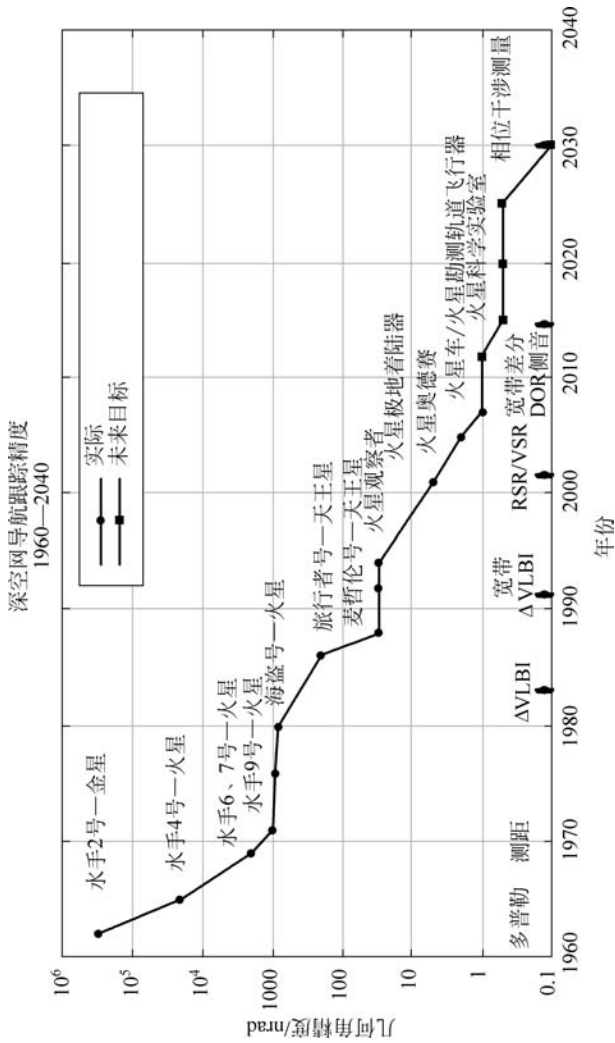


图 1-5 NASA 深空网的导航跟踪精度发展历程及展望

1.3 深空测控通信系统

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。从深空航天器发射入轨到全任务周期结束,测控通信系统将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^[9]。

深空测控通信系统一般由航天器星载测控通信分系统、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 1-6 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 2×10^6 km 以远深空航天器的测控通信任务^[9]。为了克服地球自转影响,

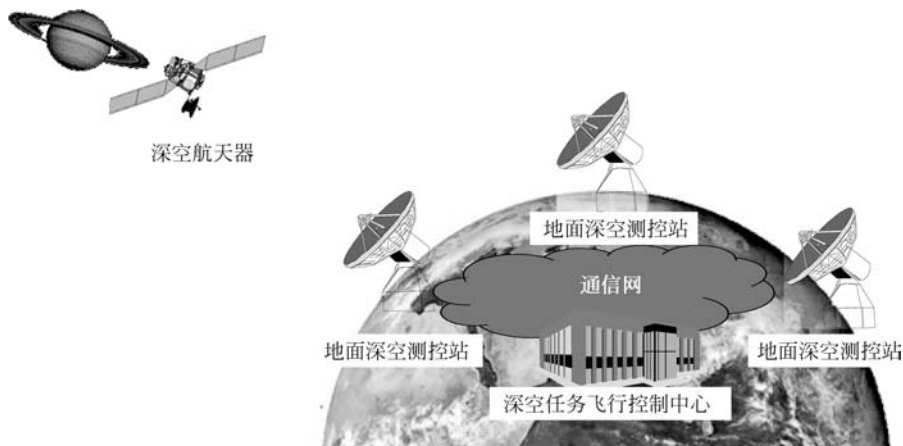


图 1-6 深空测控通信系统组成

实现对深空航天器的连续跟踪,深空网的布局通常是在全球范围内经度上间隔 120° 布站,这样就可以确保对距离地球表面 $3 \times 10^4 \text{ km}$ 以上的航天器进行连续跟踪。综合考虑跟踪弧段和天线性能,深空站站址纬度通常选择在南北纬 $30^\circ \sim 40^\circ$ [10]。

深空测控通信系统利用深空测控站上行或下行无线链路和深空航天器上的测控应答机,可以实现三种基本功能。第一个功能,也是最为重要的,就是产生无线电测量数据的功能。在深空航天器在轨运行期间,任务中心利用许多无线电测量信息估计航天器的精确位置,包括多普勒信号数据、测距信息数据、两个测站构成的干涉仪差分测量数据等。深空测控通信系统的第二个功能是利用加入到上行链路(从深空测控站发出)和下行链路(从深空航天器发出)的调制信号。遥控指令通过上行链路发送至深空航天器,同时工程和科学数据通过下行链路发送回地球。第三个功能是利用深空测控网作为科学仪器设备研究无线电科学和雷达天文学。目前,在 NASA 政策支持鼓励下,利用深空航天器发射的无线电信号、银河系外的无线电信号或者戈尔德斯通(Goldstone)的大功率雷达发射器回波,科学家们可以使用深空网作为科学仪器设备来了解宇宙深处的秘密。深空测控通信网的功能如图 1-7 所示 [11]。

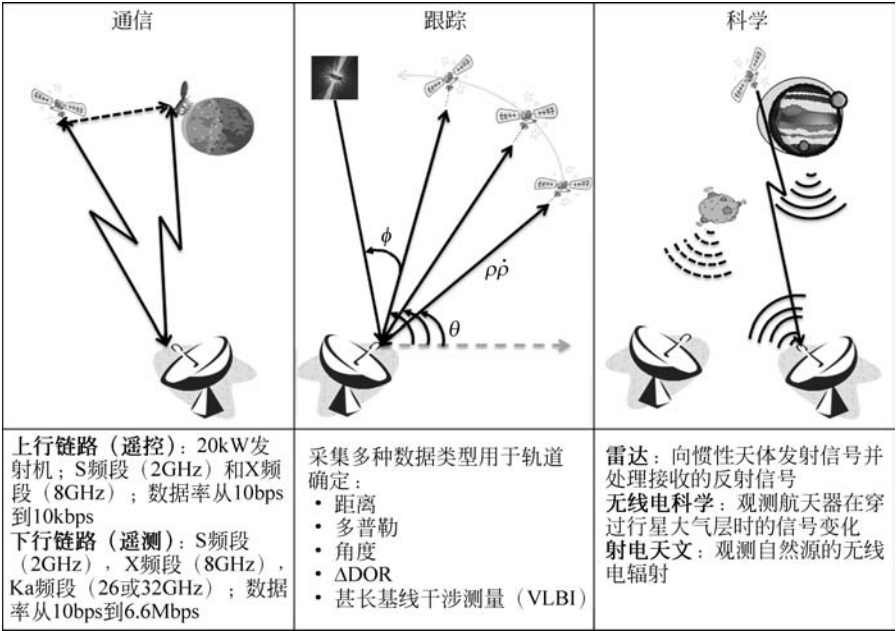


图 1-7 深空测控通信网的功能示意