



中国航天科技前沿出版工程·中国航空间信息技术系列

“十二五”国家重点图书出版规划项目



Principles and Design Methods of
Deep Space TT&C System

深空测控通信系统 设计原理与方法

北京跟踪与通信技术研究所

李海涛 著



清华大学出版社



中国航天科技前沿出版工程·中国航天

“十二五”国家重点图书出版规划项目

Principles and Design Methods of
Deep Space TT&C System

深空测控通信系统 设计原理与方法

李海涛 著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书结合作者亲历的探月工程经验、相关科研成果以及国外航天大国和组织在深空测控通信方面所取得的技术成就,对深空测控通信系统设计的原理和方法进行了较为全面系统的论述,可供航天、电子通信等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

深空测控通信系统设计原理与方法/李海涛著.--北京:清华大学出版社,2014
中国航天科技前沿出版工程.中国航空间信息技术系列/钱卫平主编
ISBN 978-7-302-38186-0

I. ①深… II. ①李… III. ①空间通信系统—系统设计 IV. ①TN927

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 225938 号

责任编辑:石磊 赵从棉

封面设计:李海涛

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:22.5 字 数:388千字

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:98.00元

产品编号:046119-01

中国航空间信息技术系列

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

柳仲贵

秘书：陈凌晖

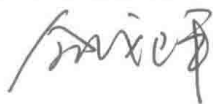
人类探索宇宙的步伐正随着航天技术的发展逐步加快。21世纪,航天技术及能力的迅速成熟,促使其更加深入地渗透到人们生产生活的各个方面,成为科技、经济领域中强劲的增长点;同时,还使其强烈释放出空间力量的效能,在国家安全领域受到越来越广泛的关注。

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作为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所组织策划了“中国航空间信息技术系列”丛书。本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



2014年6月

仰望星空、探索宇宙是人类永恒追求的梦想。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。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活动。我国嫦娥一号月球探测任务的圆满成功,是继人造地球卫星、载人航天飞行取得成功之后我国航天事业发展的又一座里程碑,也开启了中国人走向深空、探索宇宙奥秘的新时代,标志着我国已经进入世界具备深空探测能力的国家行列。嫦娥二号和嫦娥三号任务的连续顺利实施,进一步深化了我国深空探测成果;探月工程三期再入返回飞行试验任务的圆满成功更是为三期工程的月球自动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探测任务也已提上了议事日程。

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和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途径,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,它还为相关系统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。

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,不断跟踪和研究国际深空测控通信技术,先后完成了我国深空测控网的顶层设计以及历次探月任务的测控系统总体设计,积累了深空测控通信系统设计的有益经验。本书结合作者亲历的探月工程经验、相关科研成果以及国外航天大国和组织在深空测控通信方面所取得的技术成就,从深空测控通信系统概念、技术基础知识、系统设计过程与方法、天地系统链路设计、链路损耗计算、链路噪声温度分析与估算、天地一体化链路设计与试验验证等方面进行了较为全面的论述,试图从技术原理和方法层面为从事深空探测任务测控通信系统设计的工程技术人员提供一个相

对比较完整的系统技术参考。

全书共分为9章。第1章绪论,介绍了深空探测和深空测控通信的概念;第2章深空测控通信系统概述,介绍了天地一体的深空测控通信系统概念、全球深空测控网基本情况以及航天器测控通信分系统概况等;第3章深空测控通信基础知识,着重介绍了深空测控通信相关的天文知识、时间与坐标系、无线电知识、深空测量和深空通信基础等;第4章系统设计过程与方法,借鉴国内外系统工程应用成果,从系统工程方法论的角度描述了系统设计的过程与方法;第5章天地测控通信系统链路设计,论述针对特定深空探测任务的测控通信系统链路设计,即根据地面深空测控通信系统性能和功能以及任务需求,设计确定天地测控通信系统链路性能及参数的过程;第6章链路损耗计算,详细介绍了链路估算过程中,准确评估计算大气损耗和设备损耗的原理和方法;第7章链路噪声温度分析与估算,重点探讨影响接收系统外部噪声温度的各种因素及其在链路计算过程中的估算方法;第8章天地一体化链路设计与试验验证,针对深空航天器直接对地的测控通信情况,通过实例介绍了天地一体化链路设计,并总结了试验验证方法;第9章未来深空测控通信技术发展,结合未来深空测控通信需求,对天线组阵技术、深空光通信技术、行星际网络技术、自主与认知技术、网络编码技术和太赫兹通信技术等深空测控通信新技术进行介绍和展望。

本书的主要特点是理论与实际相结合,突出基础理论分析,内容较为全面,工程实用性强。相信本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,而且对深空测控通信相关技术研究也具有一定的指导意义。

在本书的编写过程中,北京跟踪与通信技术研究所的樊敏、郝万宏、李赞、张波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,加之编者学识和水平有限,书中难免有错误或疏漏之处,诚请读者批评指正。

作 者

2014年7月

目录

第1章 绪论	1
1.1 深空探测	2
1.2 深空测控通信	8
参考文献	12
第2章 深空测控通信系统概述	15
2.1 深空测控通信系统的组成	16
2.2 航天器测控通信系统	33
2.2.1 数据管理分系统	34
2.2.2 航天器射频分系统	36
2.3 地面测控通信系统	42
2.3.1 地面深空测控站	42
2.3.2 深空任务飞行控制中心	48
2.3.3 地面通信网络	51
参考文献	52
第3章 深空测控通信基础知识	53
3.1 天文知识	54
3.1.1 太阳系	54
3.1.2 太阳	56
3.1.3 行星际空间	57
3.1.4 行星	58
3.1.5 小行星和彗星	64
3.1.6 月球	64
3.1.7 火星	68
3.2 时间系统	70
3.2.1 世界时	70
3.2.2 原子时	71
3.2.3 测控通信时间术语	72
3.2.4 历元	73

3.3	坐标系	73
3.3.1	天球坐标系	73
3.3.2	地球坐标系	78
3.3.3	月球坐标系	80
3.3.4	太阳坐标系	82
3.3.5	航天器本体坐标系	83
3.4	无线电知识	83
3.4.1	电磁辐射	83
3.4.2	电磁频谱	84
3.4.3	射频	86
3.4.4	多普勒效应	91
3.4.5	相位	92
3.5	深空测量基础	93
3.6	深空通信基础	96
3.6.1	锁相与相干	97
3.6.2	进入双向模式造成数据丢失	98
3.6.3	调制和解调、载波和副载波	99
3.6.4	信标	100
3.6.5	符号、比特和编码	101
3.6.6	多路复用技术	101
3.7	深空测控通信术语	102
	参考文献	103
第4章	系统设计过程与方法	105
4.1	航天任务系统设计过程	106
4.1.1	NASA 航天任务设计	108
4.1.2	ESA 航天任务设计	125
4.1.3	中国航天任务设计	132
4.2	系统设计的方法	135
4.2.1	要求的确定	136
4.2.2	决策和评估准则	140
4.2.3	最优化和缩小规模选择	140
4.2.4	鲁棒性和灵活性	141
4.2.5	风险评估和缓解	142

4.2.6	确定设计余量	144
4.2.7	分析和权衡研究	145
4.2.8	技术性能测量	147
4.3	系统设计的约束	149
4.4	测控通信系统设计概念	152
4.5	测控通信系统设计过程	154
4.5.1	确定测控通信系统结构	154
4.5.2	测控通信链路设计	157
	参考文献	158
第 5 章	天地测控通信系统链路设计	161
5.1	测控通信链路的构成	162
5.2	链路设计基本原理	163
5.2.1	链路方程	163
5.2.2	副载波调制信号频谱	164
5.2.3	不同副载波波形的功率分配	167
5.3	链路指标分配	170
5.3.1	跟踪门限与带宽	170
5.3.2	精度门限	172
5.3.3	数据门限	174
5.4	链路预算方法	177
5.4.1	接收功率计算	177
5.4.2	噪声温度计算	179
5.4.3	接收系统品质因数	183
5.5	链路余量	183
5.5.1	载波捕获余量	183
5.5.2	载波跟踪余量	184
5.5.3	测速余量	185
5.5.4	测距余量	185
5.5.5	遥测和遥控余量	185
附录 5.1	多音调相信号频谱结构推导	186
附录 5.2	跟踪正弦信号的经典锁相环(PLL)信噪比推导	193
附录 5.3	正态误差函数表	196
	参考文献	197

第 6 章 链路损耗计算	199
6.1 大气损耗计算	200
6.1.1 空气和水汽损耗	202
6.1.2 电离层闪烁损耗	208
6.1.3 雨衰损耗	211
6.1.4 雾、云损耗	219
6.1.5 实测大气引起的衰减	221
6.2 设备损耗计算	224
6.2.1 指向误差对天线增益的影响	224
6.2.2 发射/接收馈线损耗	227
6.2.3 极化损耗	227
6.2.4 接收信号处理引起的损耗	228
参考文献	229
第 7 章 链路噪声温度分析与估算	231
7.1 噪声温度的概念	232
7.2 外部噪声温度的测量和计算	234
7.2.1 大气噪声	234
7.2.2 黑体噪声	236
7.2.3 太阳噪声	242
7.2.4 银河系噪声	246
7.2.5 类噪声干扰	247
7.3 系统噪声温度	250
7.3.1 接收机有效输入噪声温度	250
7.3.2 系统噪声温度的测量	251
7.3.3 不同参考点系统噪声温度的归算	251
7.4 航天器上应答机工作模式对转发噪声的影响	253
7.4.1 测距通道采用非相干 AGC 控制的情况	253
7.4.2 测距通道相干 AGC 控制	255
7.4.3 测距通道前采用限幅器的情况	256
7.4.4 采用射频非相干 AGC 控制	258
7.4.5 采用射频相干 AGC 控制	259
7.4.6 不同模式对噪声影响的比较	259

参考文献	260
第 8 章 天地一体化链路设计与试验验证	263
8.1 天地一体化链路设计	264
8.1.1 任务概述	265
8.1.2 测控通信要求	267
8.1.3 地面测控通信设施	272
8.1.4 航天器测控通信分系统设计	279
8.1.5 天地一体化链路性能分析	290
8.2 天地一体化链路射频与调制规范	308
8.3 系统验证	310
8.3.1 地面验证	310
8.3.2 在轨航天器验证	315
参考文献	317
第 9 章 未来深空测控通信技术发展	319
9.1 天线组阵技术	321
9.2 深空光通信	326
9.3 行星际网络技术	330
9.4 自主与认知技术	332
9.5 网络编码技术	335
9.6 太赫兹通信技术	336
参考文献	336
附录 A 链路计算参数概率密度函数	339
名词索引	341

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到月球的距离上($3.6\sim 4.0\times 10^6\text{ km}$);1988年10月,在世界无线电管理大会(WARC)ORB-88会议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]。空间数据系统咨询委员会(CCSDS)在其建议标准中也将距离地球 $2.0\times 10^6\text{ km}$ 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,我国嫦娥一号首颗月球探测卫星发射成功,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。

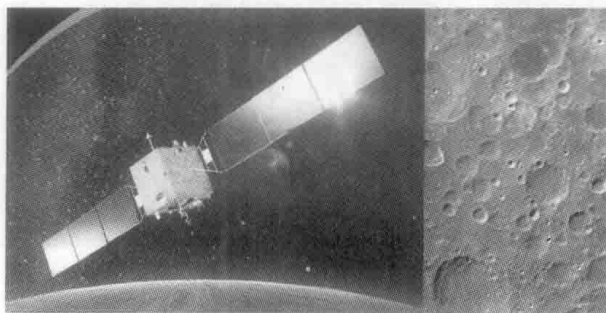


图 1-1 嫦娥一号月球探测卫星及其拍摄的月面图像

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(Pioneer 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80AU^①,截止到2014年3月距离太阳约110.526AU,并以每年2.534AU的速度飞离^[5])和先驱者11(Pioneer 11)号(1973年4月6日发射,截止到2014年3月距离太阳约89.994AU,并以每年2.392AU的速度飞离^[5])、旅行者1(Voyager 1)号(1977年9月5日发射,截止到2013年9月距离太阳约125.3AU,并以每年3.6AU的速度远离太阳系^[6])和旅行者2(Voyager 2)号(1977年8月20日发射,截止到2013年9月距离太阳约102.6AU,并以每年3.3AU的速度远离太阳

① 1AU,即1个天文单位,约为1.5亿km。

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。

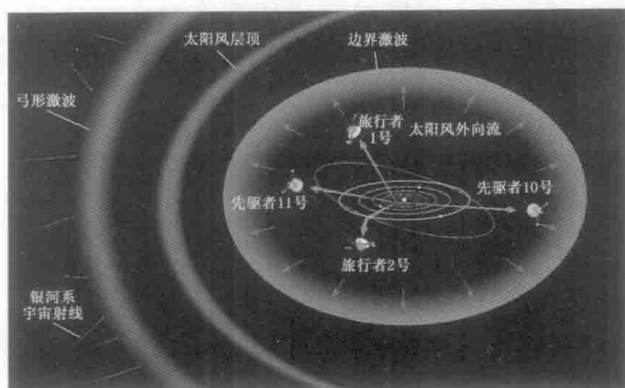


图 1-2 先驱者 10 号、先驱者 11 号、旅行者 1 号和旅行者 2 号的飞行方向示意^[8]

2013 年 9 月 12 日,美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, 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。

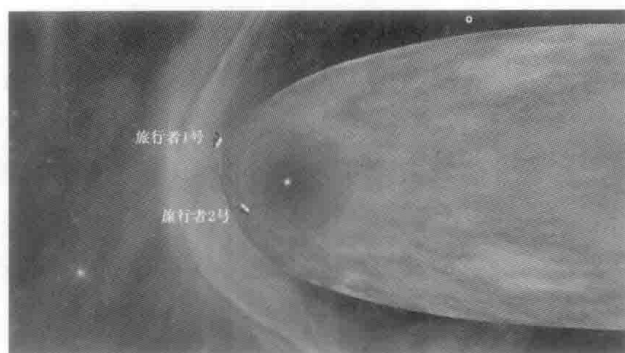


图 1-3 旅行者 1 号和旅行者 2 号在星际空间位置示意^[9]

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(Toutati,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 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)。

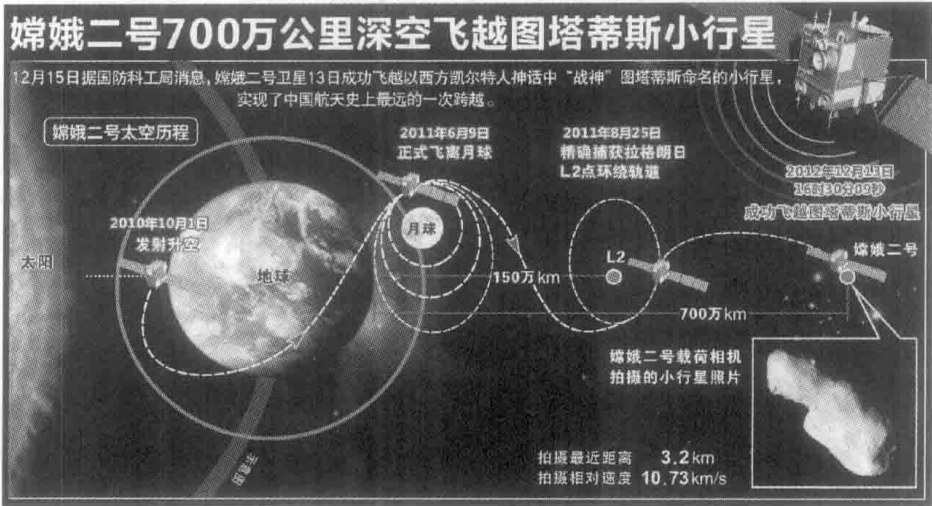


图 1-4 嫦娥二号飞行轨道示意图及其拍摄的图塔蒂斯小行星照片^[9]

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。截止到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。

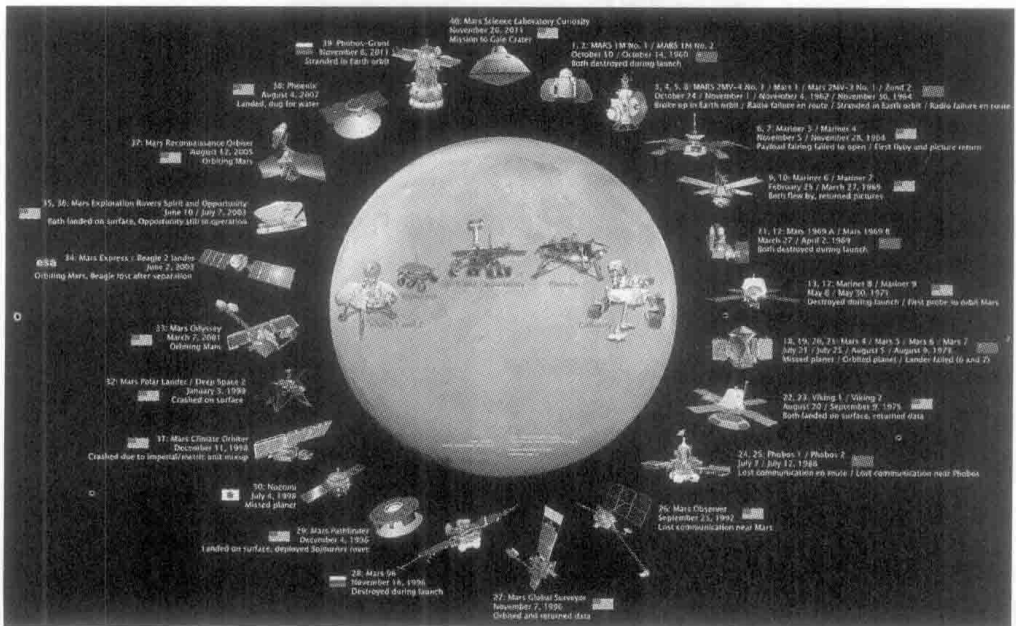


图 1-5 人类火星探测器全家福^[10]