



航天科技图书出版基金资助出版

火星探测征程

侯建文 张晓岚 王 燕 张德雄 陈昌亚 编著



中国宇航出版社

航天科技图书出版基金资助出版

火星探测征程

侯建文 张晓岚 王 燕 张德雄 陈昌亚 编著



中国宇航出版社

版权所有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

火星探测征程/侯建文等编著. --北京:中国宇航出版社, 2013. 5
ISBN 978 - 7 - 5159 - 0411 - 5

I. ①火… II. ①侯… III. ①火星探测 IV. ①P185.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 074661 号

责任编辑 舒承东 责任校对 祝延萍 封面设计 文道思

出版
发行

中国宇航出版社

社址 北京市阜成路 8 号
(010)68768548

邮 编 100830

网 址 www.caphbook.com

经 销 新华书店

发行部 (010)68371900
(010)68768541

(010)88530478(传真)

(010)68767294(传真)

零售店 读者服务部
(010)68371105

北京宇航文苑

(010)62529336

承 印 北京画中国印刷有限公司

版 次 2013 年 5 月第 1 版

2013 年 5 月第 1 次印刷

规 格 880 × 1230

开 本 1/32

印 张 10.5

字 数 292 千字

书 号 ISBN 978 - 7 - 5159 - 0411 - 5

定 价 88.00 元

本书如有印装质量问题, 可与发行部联系调换

航天科技图书出版基金简介

航天科技图书出版基金是由中国航天科技集团公司于2007年设立的，旨在鼓励航天科技人员著书立说，不断积累和传承航天科技知识，为航天事业提供知识储备和技术支持，繁荣航天科技图书出版工作，促进航天事业又好又快地发展。基金资助项目由航天科技图书出版基金评审委员会审定，由中国宇航出版社出版。

申请出版基金资助的项目包括航天基础理论著作，航天工程技术著作，航天科技工具书，航天型号管理经验与管理思想集萃，世界航天各学科前沿技术发展译著以及有代表性的科研生产、经营管理译著，向社会公众普及航天知识、宣传航天文化的优秀读物等。出版基金每年评审1~2次，资助10~20项。

欢迎广大作者积极申请航天科技图书出版基金。可以登录中国宇航出版社网站，点击“出版基金”专栏查询详情并下载基金申请表；也可以通过电话、信函索取申报指南和基金申请表。

网址：<http://www.caphbook.com>

电话：(010) 68767205, 68768904

序

在行星探测的历史中，火星一直是备受关注的太阳系行星之一。这不仅因为它是人类生活的家园——地球的近邻，还因为它的结构和历史与地球有相似之处，因此对火星的探测始终是人类梦寐以求的目标。人类对火星的天文观测已有 400 多年的历史，而发射探测器对火星进行直接工程探测也有 50 多年了。截至 2012 年底，以美俄为首的航天大国共进行了 41 次火星探测任务。人类不畏艰险，克服重重困难，矢志不渝地开拓进取，取得了极其丰硕的成果。我国的火星探测活动虽然晚于美、俄、欧空局和日本，但进入 21 世纪以来，也已将火星列为我国深空探测活动的一个重要探测目标，有关研制工作正在紧锣密鼓地开展中。与俄罗斯国家航天局合作发射的萤火一号，是我国第一个火星探测器。该探测器虽然因俄方计算机系统故障造成上面级发动机无法点火而未能进入火星轨道，但就轨道器本身而言，其研制工作是十分成功的，突破了超远距离深空探测一系列关键技术，为我国未来的行星探测工程奠定了很好的基础。

20 世纪下半叶以来，世界各国在大规模深空探测活动的基础上，相继出版了一系列火星探测方面的著作。但这些著作多数集中在科普、过程情节和天文观测等领域，比较典型的是美国航空航天局火星漫游车项目首席科学家史蒂夫·斯奎尔斯在 2005 年所著的《Roving Mars》（《登陆火星》）一书，讲述了美国勇气号和机遇号火星漫游车的研制、发射和火星巡视探测的精彩故事。但遗憾的是，这些著作对工程领域的论述或者较少涉足，或者比较分散。中文版的专著更是凤毛麟角，这和我当前轰轰烈烈的火星探测工程活动很不

相称。为此上海航天技术研究院组织相关专家，深入地研究了世界各国 50 多年来的火星探测历程，撰写了《火星探测征程》。

本书的重要特色是从火星探测的目的出发，详细论述了人类火星探测活动的各个方面。除了火星概貌、探火目标和探火技术综览外，本书重点详尽地叙述了人类探火的艰辛历程，通过不懈努力取得的丰硕成果和未来火星探测的开发前景。为了充分借鉴前人的经验教训，本书还重点讨论了 50 多年火星探测活动中发生的 40 多起典型故障案例，期望从中得到启示。相信本书的出版，将有力地配合我国深空探测活动的开展，促进未来的火星探测任务向纵深发展。同时，它对向全社会传播深空探测工程的科学思想和科学方法，激发中国民众对深空探测活动的热情也是一项十分有意义的工作。

朱芝松

2013 年 5 月

前 言

火星是地球的近邻，并且是和地球最为相似的行星，因此自古以来就一直受到人类的密切关注。火星的形成年代和地球相近；轨道面与地球公转轨道面接近于共面；它的自转方向和地球相同；自转周期和地球非常接近；其赤道平面与公转轨道面之间也有一个和地球极其相似的倾角，因此它也存在着和地球类似的四季变化；火星的直径只有地球的约 $1/2$ ，四周也有大气层包围着，只是比地球大气层稀薄得多。

人类对于火星的观测始于 1608 年，即在天文望远镜发明之后不久。借助望远镜，可观测到分辨率为 $100\sim 200\text{ km}$ 的火星表面特征。观测发现，火星表面有模糊的暗亮斑纹。此外，一个非常有趣的现象是火星两极还有白色的极冠现象，随着季节的变化，极冠面积会增大或缩小，就像地球上南北两极的积雪和冰山一样。1877 年夏，意大利布雷拉天文台台长夏帕雷里发现火星表面有一些狭窄的暗线，还有一些较大面积的暗区，很像是一些海峡连通着宽阔的海洋。于是他把这些暗线叫作 Canali，在意大利语中的意思是“沟渠，水道”。但是这个发现经过新闻媒体宣传后，就变成了火星上有运河，因为英文 Canal 的意思是人工挖掘的运河。于是火星上有运河的消息很快便轰动了全球。后来人们用更大的望远镜观测，发现所谓的“火星运河”是由许多孤立的形状不规则的暗斑所组成，而不是运河。虽然火星被证实不存在运河，可是这并没有彻底改变人们对火星上有生命存在的看法。

进入航天时代以来，火星很快就成为人类探测太阳系行星的重

点。世界各国发射的火星探测器已越来越先进,探测的成功率和探测精度也不断提高,火星探测事业取得的重大成就使它的面貌逐渐为人们所熟悉。在科学技术高速发展的今天,对太阳系的起源与演化、地球的起源与演化、生命的起源与演化等自然科学基本问题的研究逐步深入,作为这些研究工作有力的旁证,火星探测的特殊地位已愈来愈被人们所确认。20世纪90年代以来,以美国为代表的航天大国掀起了火星探测活动的第二个高潮。

空间时代的来临,揭开了这颗红色星球的神秘面纱,书写了人类探测火星的新篇章。截至2012年底,人类共进行了41次火星探测任务,其中苏联/俄罗斯20次,美国19次,欧洲和日本各1次。

早期的火星探测任务数量很多,但技术上不够成熟。从1960年到1964年短短5年中,美国和苏联共发射了8颗火星探测器,前6次任务均以失败告终。第7颗火星探测器——美国的水手-4,是第一颗成功的火星探测器。在飞越火星的过程中,它成功地发回了21张照片,首次向人类展示了与月球类似的荒芜的火星表面。1971年,苏联的火星-3在火星表面着陆,成为首个成功着陆火星的着陆器。1975年美国发射的两颗火星探测器海盗-1和海盗-2在技术上已有较大进步,提供了大量关于火星的数据,使人类对于火星的了解大大超过100多年前的望远镜时代。

进入20世纪90年代以后,美国共发射了11颗火星探测器,其中火星观测者、火星气候轨道器和火星极地着陆器失败,但其他8颗探测器均获成功,包括火星探路者、火星全球勘测者、奥德赛、勇气号、机遇号、凤凰号、火星勘测轨道器、好奇号。这些探测器中既有着陆器也有火星车,它们无论是在尺寸大小还是复杂性都较之前的任务有重大飞跃。2003年欧空局成功发射的火星快车轨道器,和美国探测器进行了密切的配合,也代表了当代先进技术水平。但在这20年间俄罗斯进行的两次火星探测均以失败告终。

与此同时,火星探测的空间合作也取得了重要进展。1993年在德国威斯巴登成立了“火星国际探测工作组”(IMEWG),约有10

个空间机构和组织加入这项合作计划。工作组每隔两年在各成员国召开一次会议，在火星探测战略计划和任务部署方面取得了显著的成效。世界上主要的火星探测机构联合成立了火星表面地质观测网。进入 21 世纪后，人类对火星的探测将继续往开来，国际合作更加深入，这将为人类探索宇宙的奥秘，寻找生命的起源，开发、利用太空作出卓越的贡献。

我国航天事业的成就举世瞩目，但行星探测活动刚刚开始，与美、俄、欧相比存在着较大差距，行星探测成为我国航天事业中亟待开发的处女地。2007 年，在中俄两国国家元首的见证下，两国国家航天局正式签署了关于联合探测火星和火卫一的协议。这是我国继月球探测后在深空探测领域迈出的崭新一步，其科学意义和工程意义均十分重大。虽然这次发射由于俄方计算机系统故障而失败，但中方的萤火一号火星轨道器研制工作本身是十分成功的，所进行的一系列试验已表明了它的优异性能。在研制过程中取得了极其宝贵的经验，攻克了大量关键技术问题，为未来的火星探测任务奠定了基础。

为了积极配合我国未来火星探测任务的研制，我们编写了《火星探测征程》。

全书共分 8 章，第 1 章为火星概貌，介绍了火星的物理、气候和地质地貌特征；第 2 章叙述了火星探测对生命起源研究的重要意义和火星探测的 5 个发展阶段；第 3 章是火星探测技术纵览，扼要地讨论了火星探测轨道与发射窗口、进入下降和着陆、主要技术难题，以及载人火星探测问题；第 4 章～第 8 章是本书的重点，其中第 4 章介绍美、苏两国早期的火星探测历程；第 5 章逐项详细介绍了 20 世纪 90 年代以来各国的火星探测任务；第 6 章讨论了 50 多年来火星探测的丰硕成果，包括科学探测成果和工程技术成果；第 7 章系统分析了历年来火星探测中出现的重大故障和从中取得的经验教训；第 8 章讨论了火星探测的前景，包括未来十年的火星探测计划和载人火星探测构想；最后还附有世界各国火星探测活动编年表

和火星探测故障表。希望本书能够为我国火星探测任务提供有力的借鉴和佐证，促进探测任务的圆满完成；并且能够对我国未来的火星探测发展战略的制定、火星探测技术的发展发挥很好的支撑作用。

本书编写过程中，方宝东、褚英志、赵晨、袁勇、华春、徐劼等提供了大量有价值的原始资料；此外还得到国防科工局系统一司的大力支持和全程指导，在此特表衷心感谢。

限于编者的水平，书中难免有不妥之处，恳请专家和读者批评指正。

作者

2013 年 5 月

目 录

第 1 章 火星概貌	1
1.1 火星的物理特性	1
1.1.1 火星的运动特征	2
1.1.2 火星的物理性质	2
1.1.3 火卫一和火卫二	5
1.2 火星大气和气候	7
1.2.1 大气成分和大气化学	7
1.2.2 大气结构	9
1.2.3 云、雾、霜	10
1.2.4 大气环流和尘暴	11
1.2.5 极冠与水	12
1.2.6 火星的气候变迁	13
1.3 火星地质地貌	14
1.3.1 火星地貌	14
1.3.2 火星地质	15
第 2 章 探火目的和各个探火阶段	18
2.1 火星探测最重要的使命是研究生命起源	18
2.1.1 寻找生物出现前化学现象的证据	21
2.1.2 寻找过去的生命	23
2.1.3 寻找现有的生命	25
2.2 各个探火阶段	27

2.2.1 飞越和环绕勘测阶段	28
2.2.2 机器人着陆器和火星车阶段	29
2.2.3 生物实验室阶段	29
2.2.4 采样返回阶段	30
2.2.5 载人探火阶段	30
第3章 火星探测技术综览	33
3.1 探测轨道与发射窗口	33
3.1.1 复杂的轨道设计	33
3.1.2 有限的发射窗口	40
3.2 进入、下降与着陆	42
3.2.1 进入、下降和着陆的挑战	45
3.2.2 气动外形减速	47
3.2.3 火星用降落伞	49
3.2.4 着陆缓冲系统	51
3.3 火星探测的主要技术难题	54
3.3.1 制导控制	54
3.3.2 测控通信	55
3.3.3 探测器智能自主技术	56
3.3.4 新型空间电源技术	63
3.4 载人火星探测	70
3.4.1 载人探火的基本问题	70
3.4.2 星际飞行推进系统	75
3.4.3 载人探火的特需技术	83
第4章 早期的火星探测 (1960—1990 年)	90
4.1 苏联火星号系列和福布斯系列	90
4.1.1 火星—1960A/1960B	94
4.1.2 火星—1962A/1962B	95
4.1.3 火星—1969A/1969B	96

4.1.4	火星—1	98
4.1.5	火星—2/3 (Mars—2/3)	99
4.1.6	火星—4/5 (Mars—4/5)	102
4.1.7	火星—6/7 (Mars—6/7)	104
4.1.8	探测器—2 (Zond—2)	105
4.1.9	探测器—3 (Zond—3)	106
4.1.10	宇宙—419 (Cosmos—419)	107
4.1.11	福布斯—1/2 (Phobos—1/2)	107
4.2	美国水手号系列和海盗号系列	110
4.2.1	水手—3 (Mariner—3)	112
4.2.2	水手—4 (Mariner—4)	112
4.2.3	水手—6/7 (Mariner—6/7)	113
4.2.4	水手—8/9 (Mariner—8/9)	114
4.2.5	海盗—1/2 (Viking—1/2)	116
第5章	火星探测高潮迭起 (1990 年代至今)	125
5.1	美国的新型火星探测器	129
5.1.1	火星观测者 (Mars Observer)	129
5.1.2	火星全球勘测者 (Mars Global Surveyor, MGS)	130
5.1.3	火星探路者 (Mars Pathfinder)	133
5.1.4	火星气候轨道器 (Mars Climate Orbiter, MCO)	135
5.1.5	火星极地着陆器 (Mars Polar Lander, MPL)	136
5.1.6	奥德赛 (Odyssey)	139
5.1.7	勇气号/机遇号火星车 (Spirit, Opportunity)	142
5.1.8	火星勘测轨道器 (Mars Reconnaissance Orbiter, MRO)	153
5.1.9	凤凰号极地着陆器 (Phoenix)	158

5.1.10 火星科学实验室 (Mars Science Laboratory, MSL)	167
5.2 俄罗斯和中国的新型火星探测器	173
5.2.1 火星-8 (Mars-8)	173
5.2.2 福布斯-土壤探测器 (Phobos-Grunt)	175
5.2.3 萤火一号轨道探测器 (YH-1)	181
5.3 日本和欧空局的新型火星探测器	184
5.3.1 希望号 (Nozomi)	184
5.3.2 火星快车 (Mars Express)	186
第6章 火星探测硕果累累	196
6.1 火星探测的科学成果	197
6.1.1 火星大气和气候探测	197
6.1.2 火星地形地貌和土壤岩石探测	199
6.1.3 火星上水的勘测	202
6.2 火星探测的工程成果	208
6.2.1 深空通信技术	208
6.2.2 空间姿控技术	209
6.2.3 轨道器气动减速技术	209
6.2.4 软着陆技术	211
6.2.5 遥感探测技术	212
6.2.6 机器人探测技术	214
6.2.7 采样和现场理化分析技术	215
第7章 探测故障与教训	221
7.1 火星探测分系统故障分析	221
7.1.1 推进分系统	222
7.1.2 结构和机构系统	226
7.1.3 热控系统	227
7.1.4 电源系统	228

7.1.5 制导、导航与控制系统 (GNC)	230
7.1.6 测控和通信系统 (TT&C)	232
7.1.7 其他	234
7.2 经验和教训	236
7.2.1 探火途中充满艰辛	236
7.2.2 正确的发展战略是深空探测事业的头等大事	239
7.2.3 严格周密的管理是探测任务成功的保障	241
第8章 火星探测前景	246
8.1 未来10年的火星探测计划	246
8.1.1 火星大气和挥发物演化探测器 (MAVEN)	247
8.1.2 洞察号地震和内核探测器 (InSight)	249
8.1.3 地外生物探测器 (ExoMars)	252
8.1.4 空中机器人 (Aerobots)	255
8.1.5 火星表面采样返回	259
8.2 载人火星探测构想	261
8.2.1 NASA 的载人探火构想	263
8.2.2 欧空局的载人探火构想	273
附表一 火星探测活动编年表	285
附表二 火星探测故障表	301

第 1 章 火星概貌

1.1 火星的物理特性

人类生活的地球是一颗围绕太阳转动的行星，公转轨道是一个椭圆，太阳位于椭圆的一个焦点上。和地球一起围绕太阳转动的还有 7 颗行星，统称“八大行星”。这八大行星按照距离太阳的远近，从近到远依次是水星、金星、地球、火星、木星、土星、天王星、海王星（见图 1-1）。火星和木星之间还有一个小行星带。太阳与围绕它转动的这些大大小小的行星、彗星和小行星等天体组成了一个非常和谐美妙的天体系统，这就是我们的太阳系。太阳是八大行星的核心，因为太阳的质量非常大，占整个太阳系所有天体总质量的 99% 以上，巨大的质量产生的巨大引力将八大行星牢牢地维系在自己的周围，永不离散。在八大行星中，火星与地球是最相似的行星，关于火星上有没有生命这个问题已经困惑了人类几个世纪。因此揭开火星神秘的面纱成为 20 世纪后半期和新世纪初行星探测的重头

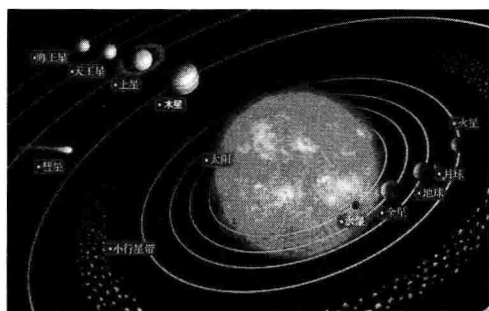


图 1-1 太阳系的八大行星

戏。了解火星的物理特性、大气气候和地质地貌对于进一步探测火星有着至关重要的作用。

1.1.1 火星的运动特征^[1-4]

火星是地球的一个邻近行星，其轨道也是一个椭圆，偏心率为 0.0934。它的近日点和远日点分别为 2.066 亿 km 和 2.492 亿 km，距太阳平均距离是 2.279 4 亿 km，即 1.523 7 AU（天文单位，1 AU=1.495 978 706 $\times 10^8$ km）。火星距离地球最大距离为 4.013 亿 km，2.67 AU；最近距离为 5 570 万 km，即 0.37 AU；轨道面对黄道面倾角为 1.850°。

火星与地球的会合周期为 779.94 个地球日，即每隔 2 年 50 天接近地球一次，称为“冲日”，因此火星探测器的发射窗口相隔约 26 个月。当火星过近日点前后冲日时离地球最近，称为“大冲”，这是从地球上观测火星的最佳时机，大约每 15 年或 17 年发现一次火星的大冲。火星在 21 世纪头 20 年的冲日发生时间见表 1-1。

表 1-1 2001 年到 2020 年发生的冲日

2001-06-14	2003-08-29	2005-11-07	2007-12-25	2010-01-30
2012-03-04	2014-04-09	2016-05-22	2018-07-27	2020-10-14

火星的自转周期是 24 小时 37 分，因此火星的一天与地球的一天很接近；但火星公转周期为 686.98 个地球日，火星上的一年大约相当于地球上的两年。地球上之所以有一年四季的变化，是因为地球的自转轴与其公转轨道面的法线并不重合，而是有一个 23°27' 的倾角。火星同样也有一个 25°10' 的倾角，与地球的倾角相差很小，因此火星上也有比较明显的四季变化。

1.1.2 火星的物理性质^[1-4]

火星的直径为 6 794 km，约只有地球直径的 1/2。通过火星的直径即可推算出火星表面积为 1.45 亿 km²，相当于地球的陆地面