

深空探测器精密定轨原理与方法

曹建峰 刘山洪 李勰 编著



北京理工大学出版社

深空探测器精密定轨原理与方法

张宇峰 周山洪 李俊 编著



国防科技大学出版社

15500100

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

深空探测器精密定轨原理与方法 / 曹建峰, 刘山洪,
李颢编著. -- 北京: 北京理工大学出版社, 2023. 2
ISBN 978 - 7 - 5763 - 2159 - 3

I. ①深… II. ①曹… ②刘… ③李… III. ①空间探
测器—卫星定轨 IV. ①V476

中国国家版本馆 CIP 数据核字 (2023) 第 035590 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68944723 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 三河市华骏印务包装有限公司

开 本 / 710 毫米 × 1000 毫米 1/16

印 张 / 14.25

彩 插 / 2

字 数 / 222 千字

版 次 / 2023 年 2 月第 1 版 2023 年 2 月第 1 次印刷

定 价 / 72.00 元

责任编辑 / 李颖颖

文案编辑 / 李颖颖

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 李志强

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

彩 插

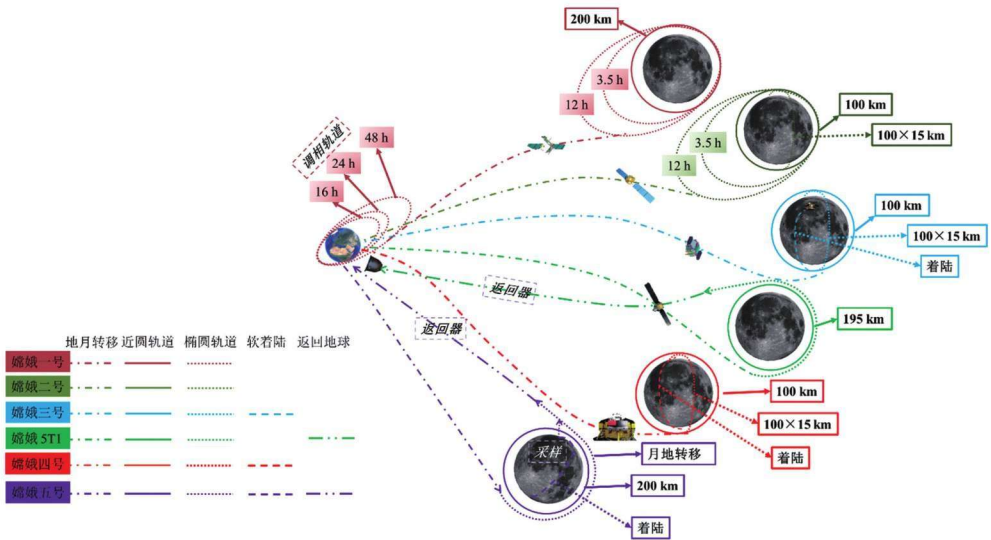


图 1-11 嫦娥系列任务典型轨道阶段

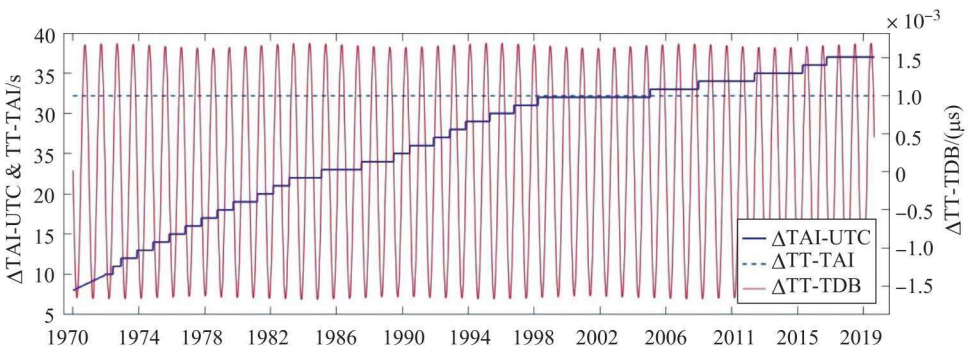


图 2-3 各时间差值序列

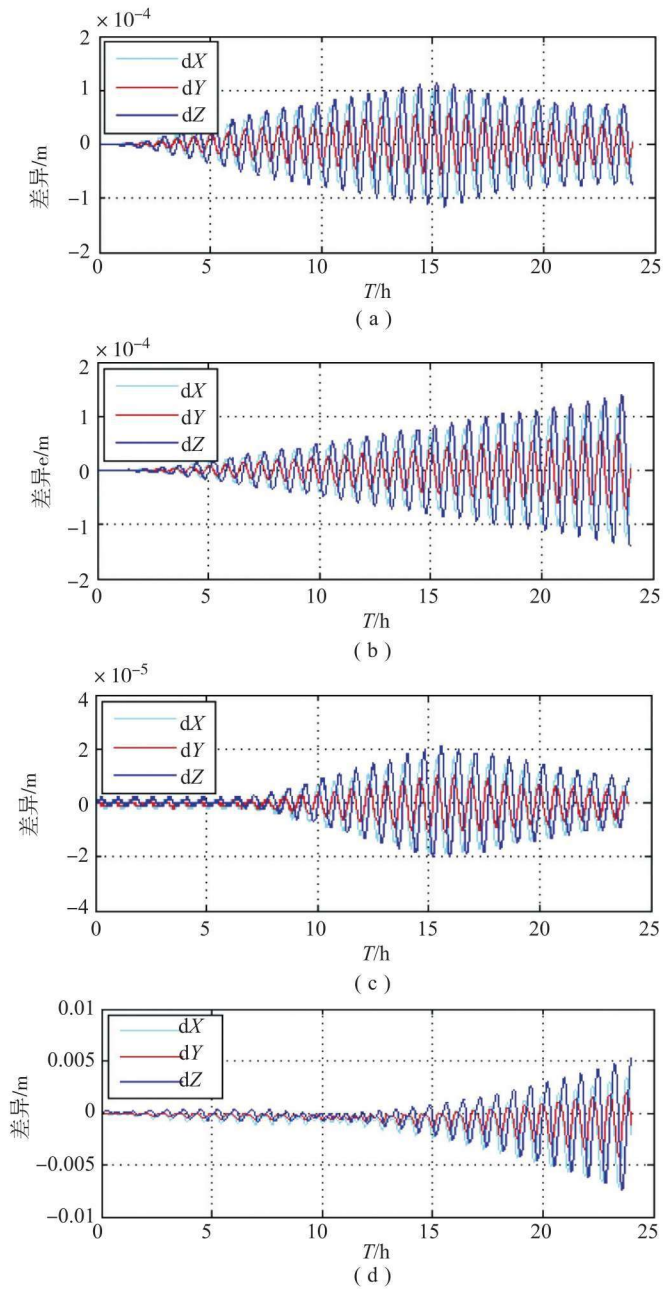


图 5-1 12 阶 Cowell 方法取不同步长时的积分效果

(a) $h = 5$ s; (b) $h = 10$ s; (c) $h = 30$ s; (d) $h = 60$ s

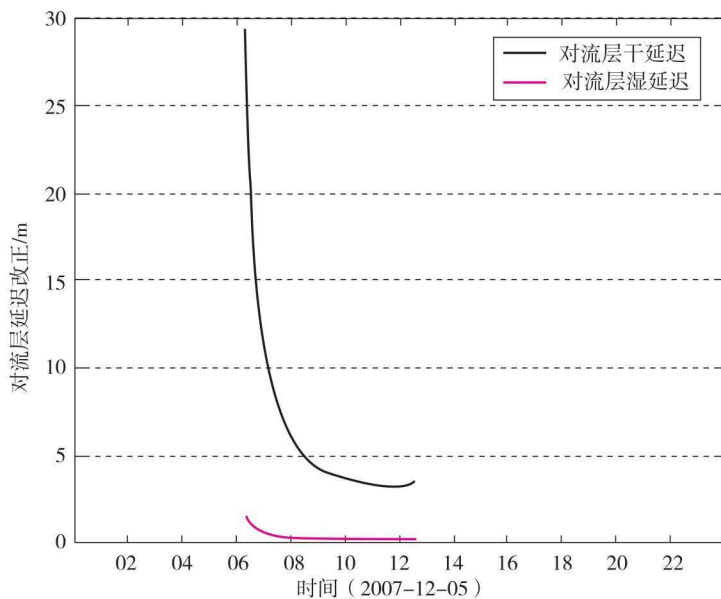


图 7-3 2007-12-15 弧段双程测距观测测量的对流层延迟改正值 (单位: m)

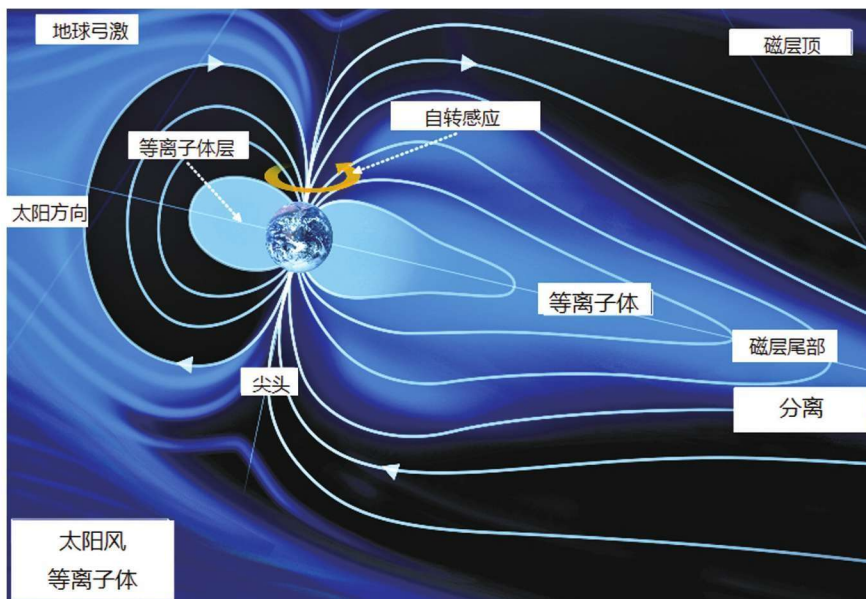


图 7-7 太阳风等离子

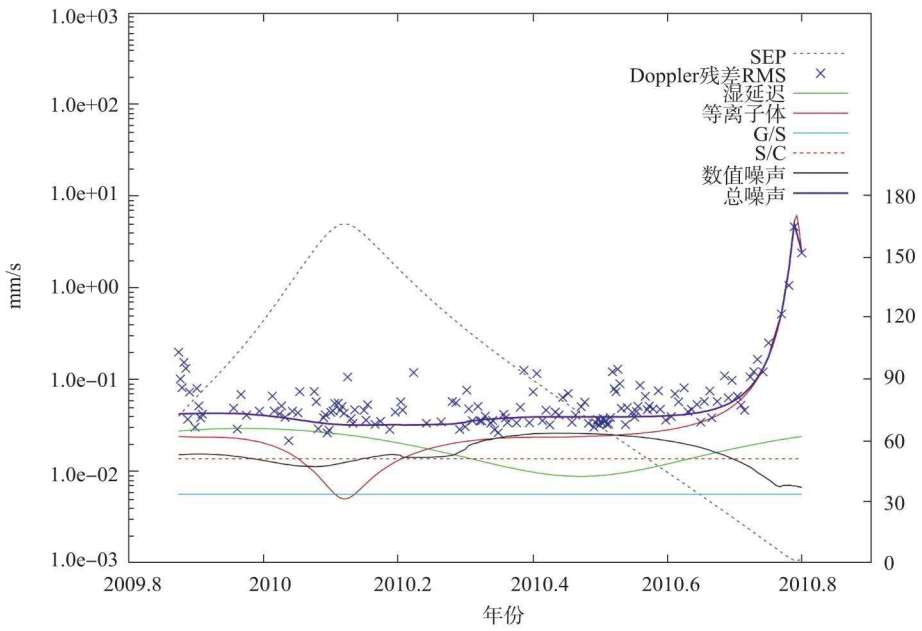


图 7-11 罗塞塔号中多普勒数据误差模型与噪声比较

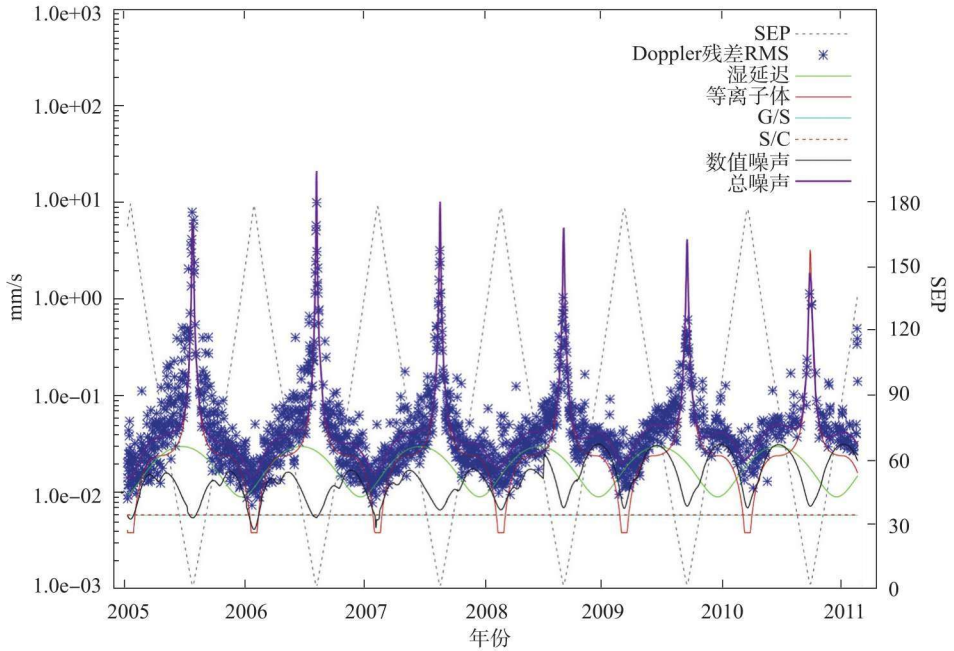


图 7-12 自旋探测器跟踪示意图

前 言

从中国古代的嫦娥奔月传说到希腊神话中自由翱翔的伊卡洛斯，人类文明自发端以来，就从未停下对浩瀚星空和广袤宇宙想象与探索的脚步。随着科学技术的不断进步，人类的活动空间已逐步从陆地和海洋，向大气层乃至外层空间延伸。19 世纪的太空竞赛，促使航天技术不断取得关键突破，探测器从地球外层空间逐渐飞向深空。时至今日，深空探测已逐渐成为人类认知宇宙和生命起源与演化的绝佳手段。

深空探测是我国国家航天整体发展战略的重要部分，我国一直坚持和平探索太空和利用外层空间，并以造福全人类为目标。1970 年，我国发射了第一颗人造地球卫星“东方红一号”，开始进入世界航天的角力场。2007 年“嫦娥一号”的成功发射是我国深空探测任务真正意义上的起点。迄今为止，我国已经圆满完成“嫦娥二号”及其图塔蒂斯小行星飞越探测任务、“嫦娥三号”着陆任务、“嫦娥五号”T1 再入返回任务、“嫦娥四号”着陆巡视任务和“嫦娥五号”采样返回任务。2021 年 2 月 10 日“天问一号”成功进入环绕火星轨道，将同时完成“绕”“落”“巡”三项任务，配合轨道器和着陆器对火星展开全面探测。深空探测中，探测器的精密定轨定位是任务成败的关键和各种科学任务顺利进行的前提。探测器精密轨道是地形测绘、行星重力场解算和反演行星内部构造的基础数据。

本书第一章介绍了国内外深空探测历史，尤其是我国深空探测历程。第二章针对深空探测器轨道确定特性，详细介绍了时空参考系和维持技术。第三章和第四章，主要从工程和科学应用两个方面出发，介绍了所用的基础理论和动力学框

架。第五章，着重梳理了适用的积分器、基本公式及其基本思想。第六章，首先介绍了测控系统，然后结合实际任务中用到的测量技术和处理经验，介绍了对应的测量技术与观测量归算方法，这是射电数据处理的基本遵循。第七章，针对传播路径上诸多影响因素使测量量不再是理想的几何距离及其变化关系，详细介绍了处理信号传播过程中的误差，还有诸多涉及硬件方面的误差。第八章和第九章，介绍了精密定轨一般理论、存在的相关问题以及误差分析技术。

本书的撰写和呈现的任务经验均在北京航天飞行控制中心的全力支持下完成，在此对单位和相关工程技术人员表示感谢。希望本书能对相关从业人员和学习人员起到一定的参考作用。

因受时间、精力和水平所限，本书撰写可能会存在疏漏、错误和欠妥之处，肯盼指正。

编著者

2023年1月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 深空探测发展史	2
1.2 我国深空探测历史	9
1.3 深空探测器轨道计算	13
参考文献	13
第 2 章 时空参考系	17
2.1 时间系统	17
2.2 坐标系统	25
2.3 地球坐标系统	27
2.4 实用坐标系统转换	29
2.5 行星自转模型	39
参考文献	43
第 3 章 行星历表	46
3.1 解析和半解析历表	46
3.2 高精度现代数值历表	49
3.3 典型数值历表 DE 结构	51
3.4 小行星历表	57
参考文献	59

第4章 动力学模型及其偏导数	61
4.1 动力学模型介绍	62
4.2 中心天体引力加速度	62
4.3 非球形引力加速度	63
4.4 潮汐摄动	68
4.5 第三体引力	70
4.6 太阳辐射压	71
4.7 大气阻力	74
4.8 后牛顿效应	81
4.9 姿轨控推力加速度	84
参考文献	85
第5章 数值积分	87
5.1 数值解法的基本思想	87
5.2 数值积分方法的分类	88
5.3 单步法数值积分器	90
5.4 多步法数值积分器	98
5.5 变阶变步长数值积分器	105
参考文献	107
第6章 测量技术与观测量的归算	110
6.1 国内外测控系统的建设	110
6.2 光学测量技术	114
6.3 激光测距技术	115
6.4 天基测量技术	117
6.5 射电跟踪测量技术	124
6.6 观测量归算	125
参考文献	141

第7章 测量误差处理	142
7.1 传播介质误差的修正	143
7.2 其他测量误差的修正	155
参考文献	161
第8章 精密定轨一般理论	163
8.1 精密定轨过程	163
8.2 估值理论	167
8.3 定轨方法	170
8.4 精密定轨的一般步骤	174
参考文献	174
第9章 精密定轨中的相关问题和误差分析	176
9.1 动力学模型的选取	176
9.2 中心天体的选取	178
9.3 力模型补偿	183
9.4 条件方程的求解问题	185
9.5 数据剔除与加权问题	189
9.6 天地基网联合定轨	191
9.7 轨道精度的评估	192
9.8 协方差分析	194
参考文献	204
附录一 IAU 2009 天文常数系统	205
附录二 太阳系大天体质量参数	207
附录三 常用略缩语	208
附录四 常用网址	210
索引	212

第 1 章

绪 论

在我国的航天发展规划中，深空探测是空间探测活动的重要内容。21 世纪初，我国提出了自主的探月计划，计划以不载人的月球探测为目标，分为“绕”“落”“回”3 个阶段。“嫦娥一号”对月球背面进行探测并获取影像图，2009 年 3 月 1 日以受控撞月方式完成其科学使命；“嫦娥二号”在进行一系列技术改造后以二期先导星的角色开展部分关键技术的试验验证，深化月球科学研究；“嫦娥三号”首次实现了中国地外天体软着陆和巡视探测；“嫦娥四号”通过“鹊桥”卫星中继通信，首次实现航天器在月球背面软着陆和巡视勘察；“嫦娥五号”实现我国首次地外天体采样返回，将 1 731 g 月球样品成功带回地球，标志着我国探月工程的圆满收官。

执行首次自主火星探测任务的“天问一号”成功发射，实现火星环绕、着陆。“祝融号”火星车开展巡视探测，标志着中国航天实现从地月系到行星际探测的跨越。

未来，我国将继续实施月球探测工程，“嫦娥六号”计划完成月球极区采样返回；“嫦娥七号”计划完成月球极区高精度着陆和阴影坑飞跃探测，并完成“嫦娥八号”任务关键技术的攻关；继续实行星探测工程，发射小行星探测器、完成近地小行星 2016HO3 采样返回和主带彗星 311P 飞越探测，完成火星采样返回、木星系探测等关键技术的攻关；论证太阳系边际探测等实施方案。

深空探测活动中对航天器开展测定轨是一项基础性研究工作，测定轨的能力直接决定深空探测任务的成败。一方面，测定轨是保证航天器正常飞行、轨控策略制定、测站跟踪计划安排的基础；另一方面，轨道确定是空间科学应用的一项

关键性内容，是安排科学探测活动、开展科学探测数据分析的重要前提。而随着观测手段的增加和测量能力的提升，各类科学应用也对轨道确定提出了更为严格的要求。

1.1 深空探测发展史

1.1.1 月球探测

在过去六十多年中，国外航天机构对月球探测的尝试超过百次。1959年，苏联的 Luna 2 号航天器撞击月球表面，标志着人类第一次光顾月球。同年，Luna 3 号完成了第一次月球飞掠。美国紧随其后进行了月球探索，1962—1965年，美国发射了 Ranger 月球探测器，为之后 Surveyor 系列（1966—1968年）月球探测器及着陆器铺平了登月道路。1966—1967年，苏联 Luna 9 号和 Luna 10 号任务和美国月球轨道飞行器（Lunar Orbiter, LO）任务几乎同时启动。1968—1976年，美国国家航空航天局（National Aeronautics and Space Administration, NASA）负责实施的阿波罗系列（Apollo）与苏联的 Luna 系列任务几乎重叠实施，获得了丰富的月球探测科学成果。在苏联 Luna 24 任务执行之后，月球探测迎来了近 20 年的空窗期。

直到 20 世纪 90 年代，月球探测再次活跃起来，日本航天探索局（Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA）实施 Hiten 任务，NASA 联合星站计划（Ballistic Missile Defense Organization）实施 Clementine 任务及 Lunar Prospector (LP) 任务。进入 21 世纪，在 NASA、欧洲航天局（European Space Agency, ESA）、JAXA、中国国家航天局（China National Space Administration, CASA）及印度空间研究组织（Indian Space Research Organization, ISRO）的推动下，月球探索的步伐逐渐加快，向月球发送了十几枚探测器用于科学探索。国外任务包括来自 ESA 的 SMART - 1、JAXA 的 SELENE Kaguya、ISRO 的 Chandrayaan - 1、NASA 的 Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO) 和 Gravity Recovery and Interior Laboratory (GRAIL)，带来了月球的许多新发现和科学成果。

1.1.2 行星探测

1. 火星

火星探测历史悠久。1960年，苏联发射了“火星1960A号”（Mars 1960A）和“火星1960B”号（Mars 1960B）拉开火星探测的序幕，但由于当时技术水平的限制，它们均失败了。之后十五年，由于美苏争霸，火星探测任务密集实施，世界范围内共实施约二十次探测任务，其中大部分为飞掠探测，少数几个成功实施了环绕和着陆巡视探测。值得一提的是，1971年，“水手九号”（Mariner 9）（图1-1）成功实现了火星的环绕探测，对火星进行了全面的遥感探测，绘制了85%火星区域的影像。1975年，“海盗1号”（Viking 1）和“海盗2号”（Viking 2）相继发射，实现了人类在火星表面的着陆，极大地推动了火星的形貌研究，如图1-2所示。

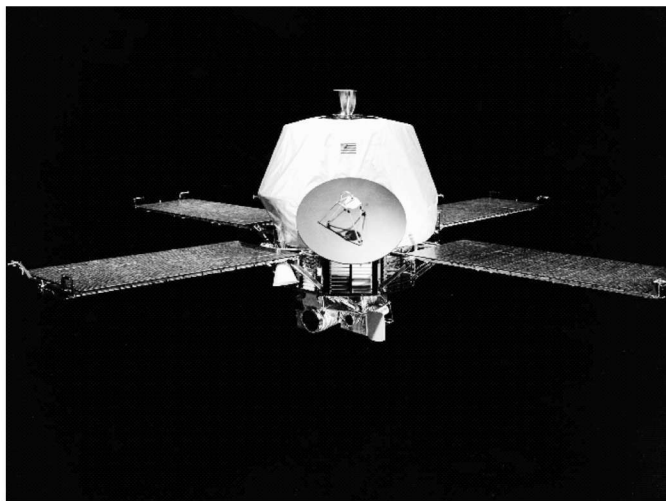


图1-1 “水手九”号

(cited: <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/image/spacecraft/mariner09.jpg>)

1976—1995年是相对沉寂的时期，近二十年间基本没有成功的火星探测任务。仅1988年苏联实施两次对火星的“福波斯”（Phobos）探测任务和1992年美国实施的“火星观测”（Mars Observer）探测任务，但最终均没有实现任务目标。1996年到现在，火星探测进入一个新的发展时期，欧洲、日本、印度、阿

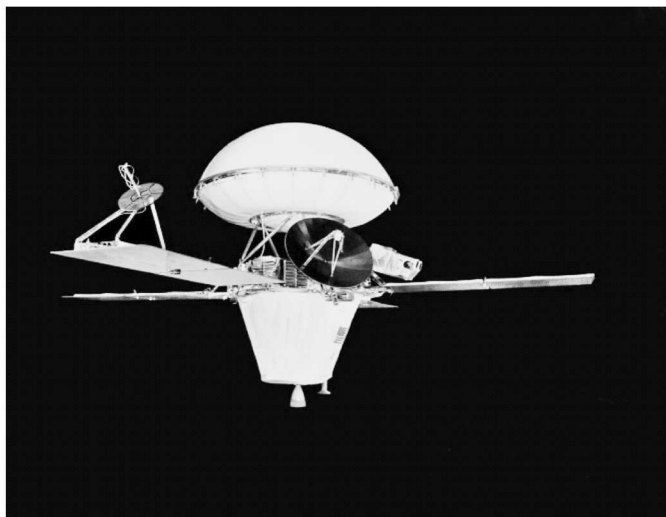


图 1-2 “海盗” 1 号

联酋和中国纷纷加入火星探测阵营，发展驱动力以技术发展和科学发现为主，探测形式从环绕和着陆逐步拓展到巡视探测。在近 30 年中，涌现了诸多取得重要科学发现的具有代表性的火星探测器，如“火星全球探勘者”号（Mars Global Surveyor）、“火星探路者”号（Mars Pathfinder）、“2001 火星奥德赛”号（2001 Mars Odyssey）、“火星快车”号（Mars Express）、“勇气”号（Spirit）、“机遇”号（Opportunity）、“火星勘测轨道器”（Mars Reconnaissance Orbiter）、“凤凰”号（Phoenix）、“洞察”号（InSight）等。值得一提的是，1996 年，火星探路者携带的“索杰纳”号（Sojourner）火星车对火星首次实现了有限区域巡航，直到 2003 年发射的机遇号、勇气号在真正意义上实现了火星表面的巡视探测。2020 年，美国和阿联酋分别发射了“火星 2020”号（Mars 2020）和“希望”号（Hope）（图 1-3）。“火星 2020”号的任务主要包括着陆车“毅力”号，如图 1-4 所示，其目的是探明火星表面可居住性、过去是否存在生命，并且为未来任务采集岩石样本数据；它还携带一种小型旋翼飞行器“智慧火星直升机”，旨在探测火星大气。“希望”号实施环绕探测，研究火星大气动力学及其与外太空和太阳风的相互作用。

2. 金星

金星是太阳系中距离地球最近的行星，苏联对金星探测次数较多，但成功率

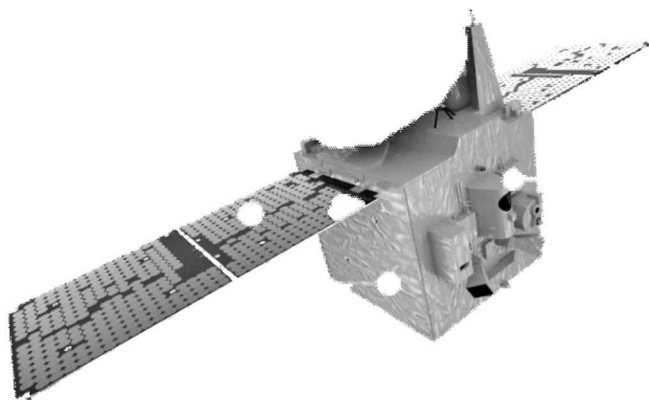


图 1-3 “希望”号 (<https://emiratesmarsmission.ae/>)

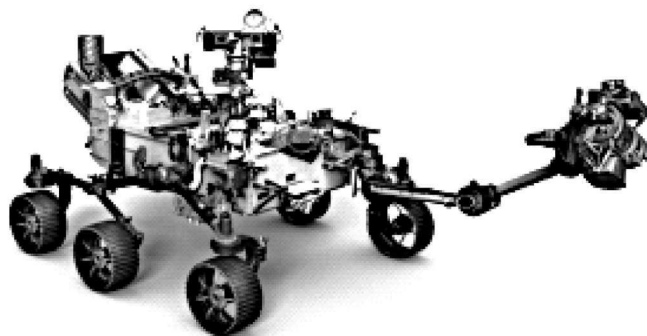


图 1-4 “毅力”号

(<https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraft/display.action?id=2020-052A>)

远低于火星探测。1961年，苏联发射了“人造卫星七”号（Sputnik 7）和“韦涅拉一”号（Venera 1）（图 1-5 左）金星探测器，均以失败告终。1962年，美国首次金星飞掠任务“水手一”号（Mariner 1）发射失败，“水手二”号（Mariner 2）作为备份任务发射成功。而后五年，苏联的近十个金星任务也均以发射失败或失联告终。直到1967年，苏联发射了“韦涅拉四”号（Venera 4）（图 1-5 右）最终成功抵达金星，对金星大气和磁场进行了测量。同年，“水手四”号（Mariner 4）也飞掠过金星。1969—1970年，“韦涅拉五”号（Venera 5）和“韦涅拉六”号（Venera 6）成功发射，主要任务为测量金星大气；“韦涅拉七”号（Venera 7）执行首个着陆器任务。之后十年，苏联又成功实施了“韦涅拉八”号（Venera 8）至“韦涅拉十六”号（Venera 16）金星探测任务。