

第1章 绪 论

1.1 深空探测的意义

深空探测指人类对月球及更远天体或空间环境开展的探测活动，其重要意义如下：首先深空探测能够解答太阳系的形成与演化等科学问题；其次深空探测能够推动一系列相关科学技术的发展，促进空间资源的开发和利用；最后深空探测能够提高人类进入太空的能力，为未来进一步殖民太空打下基础。因此，深空探测成为了世界各国航天领域发展的重要方向之一。

自从1958年美国和苏联启动探月计划开始，世界航天技术大国先后发射了两百多颗探测器，开展了多种类型的深空探测活动。深空探测的目标呈现出由近及远、由简单到复杂的发展规律。第一步为探索地月空间，以探月作为主要目标；第二步是近地行星探测，主要探测火星、金星两个距离地球最近的类地行星；第三步是其他行星探测，主要针对木星、土星、水星、天王星、海王星及其卫星、小行星和彗星。与此同时，深空探测的方式发展出了飞越、撞击、环绕、软着陆、巡视、采样返回、载人登陆等多种类型。

1.2 深空探测任务综述

1.2.1 月球探测

月球是距离地球最近的天体，自古以来都对人类有着极大的吸引力，月球探测可以为研究地球、地月系和太阳系的起源和演化提

供重要数据。此外,通过开发和利用其上的独特资源,月球还能够成为人类向外层空间发展的基地和前哨站。

从1959年至1976年,美国和苏联在冷战背景下展开了以月球探测为中心的太空竞赛,两国先后发射了一系列月球探测器。美国在此期间发射过38颗无人月球探测器,成功进行了月球硬着陆和软着陆。1969年7月发射的阿波罗11号(Apollo 11)实现了人类首次登月(如图1-1所示),此后又成功进行了5次,先后把12名航天员送上月球,并带回了300 kg月壤样品。



图1-1 阿波罗登月

苏联在此期间先后发射了47颗无人月球探测器,成功进行了硬着陆、软着陆、无人巡查以及三次月球采样任务,共采回370 g月壤样品。由于技术上的障碍以及美国首先登月成功,苏联最终放弃了载人登月计划。以上任务充分展示了两个航天大国的国家意志和综合实力,同时极大地促进了深空探测技术的快速发展。

20世纪70年代末到90年代,人类没有成功发射过任何月球探测器,这期间成为了探月的寂静期。20世纪90年代后人类掀起了第二次探月热潮,日本、欧洲、中国与印度等国家和组织加入到其中,美国和俄罗斯这两个航天强国也提出了新的探月计划。

1990年1月日本发射了飞天号月球探测器,从而成为了第三个探测月球的国家。1994年1月与1998年1月,美国先后发射了克莱

门汀 (Clementine) 探测器和月球勘探者 (Lunar Prospector) 探测器, 探测器传回的数据显示月球两极存在水冰。2003 年 9 月欧洲空间局成功发射了首颗月球探测器——智慧 1 号 (SMART-1)。2007 年 9 月日本发射了月亮女神 (SELENE) 月球探测器。中国为探月工程制定了绕、落、回的阶段性目标, 2007 年 10 月中国成功发射了首颗月球探测器嫦娥 1 号。2008 年 10 月印度的月船 1 号发射升空, 对月球的地质结构和矿物资源进行调查。2009 年 6 月, 美国一箭双星发射了月球勘测轨道器 (LRO) 和月球坑观测和传感卫星 (LCROSS)。2010 年 10 月中国发射的嫦娥 2 号获得了更加精确的月球照片, 在扩展任务阶段, 嫦娥 2 号首先进入日—地 L_2 点的环绕轨道, 随后飞越了图塔蒂斯 (Toutatis) 小行星。2011 年 9 月, 美国发射了重力恢复与内部实验室 (GRAIL) 月球探测器, 对月球重力场系统进行精细探测。2013 年 9 月, 美国发射了月球大气与尘埃环境探测器 (LADEE), 以探测月球大气层的散逸层和周围的尘埃。2013 年 12 月中国发射的嫦娥 3 号实现了月球软着陆和月面巡视勘察 (如图 1-2 所示)。

未来世界各国的月球探测项目将以建立永久月球基地、开发利用月球资源、以月球作为中转站走向深空为目标。

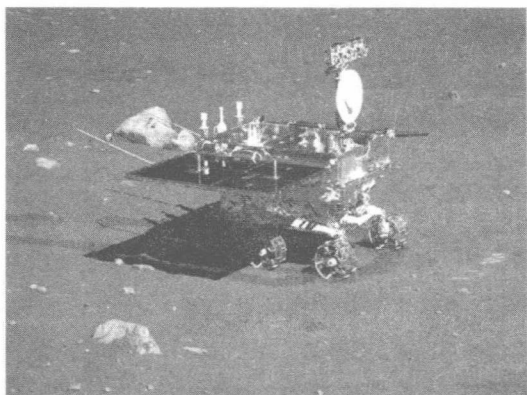


图 1-2 嫦娥 3 号搭载的玉兔号月球车

1.2.2 火星探测

由于火星与地球最为相似,并可能曾经有过能孕育生命的气候条件,因而火星也是目前人类探测最为深入的行星之一。截至2014年底,全世界共发射过42次火星探测器,成功或部分成功的为22次。下面仅对部分探测任务进行简要介绍。

1962年苏联发射了火星1号探测器,虽然在飞离地球后失去联系,但标志着人类火星探测的开端。1964年美国发射的水手4号(Mariner-4)成功掠飞火星,并发回了第一批火星照片,实现了火星首次探测。1971年美国发射的水手9号(Mariner-9)是第一枚成功进入环绕火星轨道的探测器,并首次拍摄到火星的全貌。1971年苏联发射的火星3号成为了有史以来第一个成功在火星表面着陆的探测器。1975年美国海盗1号(Viking-1)、海盗2号(Viking-2)探测器相继发射,并成功在火星表面着陆,如图1-3所示。

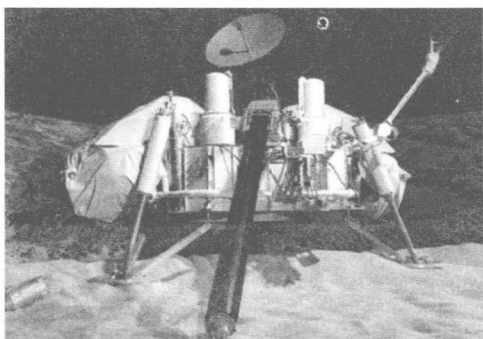


图1-3 海盗号火星着陆器

1996年11月美国的火星全球勘测者(Mars Global Surveyor, MGS)发射升空,随后进入火星环绕轨道,在服役的10年内发回了大量信息。1996年12月美国发射了火星探路者号(Mars Pathfinder, MPF)探测器,并将人类第一部火星车——旅居者送往火星(如图1-4所示)。

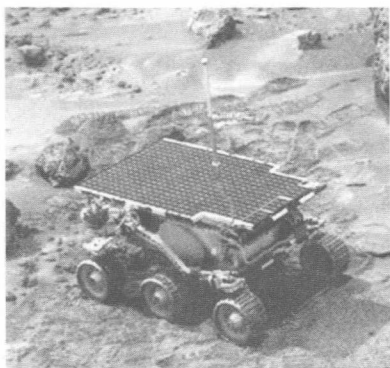


图 1-4 旅居者火星车

2001 年 4 月美国发射了奥德赛号 (Odyssey) 探测器, 传回的数据发现火星表面可能有丰富的冰冻水, 这为改造火星并使之适合人类生存奠定了理论基础。2003 年 6 月欧洲空间局发射了火星快车号 (Mars Express) 探测器并使其成功进入环绕火星的任务轨道, 但其搭载的猎兔犬 2 号着陆器失去了联系。2003 年美国实施了火星探测漫游者 (Mars Exploration Rover, MER) 计划, 先后于 2004 年将勇气号 (Spirit, MER-A) 和机遇号 (Opportunity, MER-B) 两部火星车送往火星 (如图 1-5 所示)。

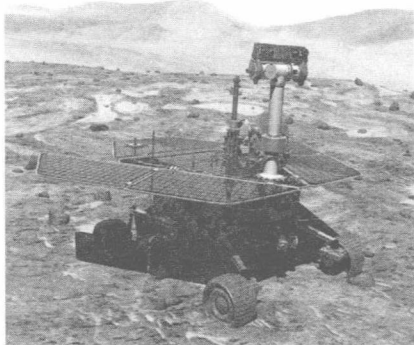


图 1-5 勇气号和机遇号火星车

2005 年 8 月美国成功发射了火星勘测轨道飞行器 (Mars Reconnaissance Orbiter, MRO)。2007 年 8 月美国成功发射了凤凰号 (Phoenix) 探测器 (如图 1-6 所示), 首次实现了火星北极软着陆, 同时发现了水冰的存在。

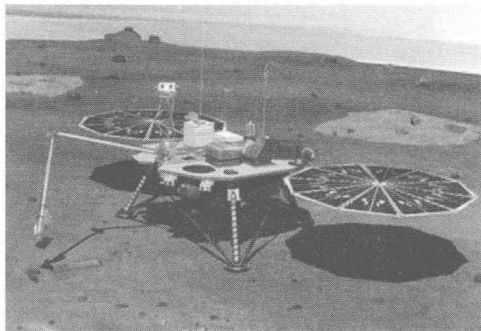


图 1-6 凤凰号着陆器

2011 年 11 月, 俄罗斯的福布斯—土壤号火星探测器发射失败, 搭载的中国第一颗火星探测器萤火一号也宣告失败。2011 年 11 月, 美国好奇号 (Curiosity) 火星探测器发射成功, 其搭载的好奇号火星车是迄今为止最大且最复杂的漫游车 (如图 1-7 所示)。

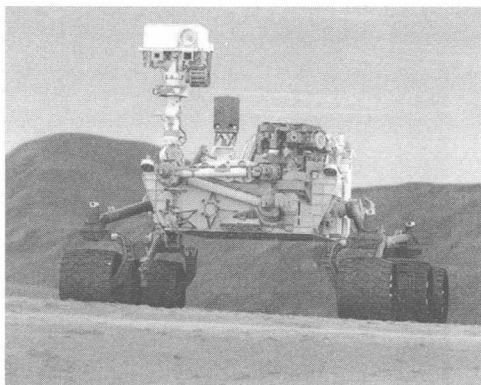


图 1-7 好奇号火星车

2013年11月,印度发射了该国首颗火星探测器——曼加里安号(Mangalyaan)。2013年11月,美国的火星大气与挥发演化探测器(MAVEN)发射升空,旨在调查火星大气层气体逃逸对火星气候和环境演变所产生的影响。

1.2.3 金星探测

1989年之前苏联和美国对金星展开过密集的探测,共执行了39次探测任务。苏联于1961年首次发射了金星1号(Venus-1)探测器,但离开地球后就失去了联系。1962年美国发射的水手2号(Mariner-2)探测器掠飞金星并传回了大气、磁场等数据。1970年苏联发射的金星7号(Venus-7)成功实现软着陆,并传回金星表面温度等数据资料。1978年5月和8月美国发射的先驱者金星1号、2号(Pioneer Venus-1,-2)探测器相继进入金星轨道,其搭载的大气探测器发现金星云中含有大量的二氧化碳。1989年美国发射的麦哲伦(Magellan)探测器成功进入环绕金星的任务轨道,并首次获得了完整金星地图,为研究金星地质地貌提供了详细的资料。

近期的3次金星探测任务为2005年欧洲空间局的金星快车(Venus Express)探测器,2010年日本的拂晓(Akatsuki)探测器以及伊卡洛斯(Ikaros)金星探测器。拂晓号探测器同年尝试进入金星轨道,但因主发动机故障而失败,在绕太阳飞行5年后拂晓号再次尝试入轨并取得成功。

1.2.4 水星探测

水星是太阳系八大行星最内侧也是最小的一颗行星。美国的水手10号(Mariner-10)探测器曾先后于1974年和1975年两次飞越水星,该任务是人类首次水星探测任务。美国2004年发射的信使号(Messenger)是第二颗水星探测器,2011年3月信使号进入任务轨道,随后对水星的地表展开详细测绘,同时对水星的构成、磁场、大气等其他特征展开了研究。图1-8为信使号拍摄的水星照片。

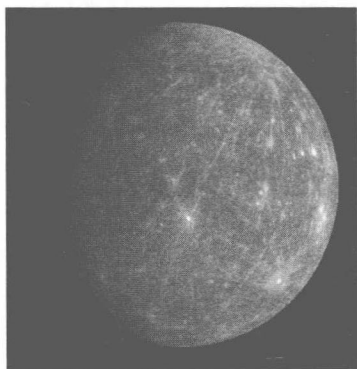


图 1-8 信使号拍摄的水星照片

欧洲空间局与日本宇宙航空研究开发机构 (JAXA) 合作项目贝皮-哥伦布 (Bepi-Colombo) 水星探测器计划于 2017 年发射升空, 该任务将对水星展开全面细致的探测。

1.2.5 木星探测

木星是太阳系内第一大行星, 并拥有多达 67 颗卫星, 通过了解木星和木星系统, 可以更好地理解气态巨行星及其卫星的形成和演化。

目前一共有 7 颗探测器以远距离掠飞的方式对木星进行了探测。其中美国的先驱者 10 号 (Pioneer-10) 和先驱者 11 号 (Pioneer-11) 先后于 1974 年和 1975 年掠飞木星, 并发回了木星照片。随后美国的旅行者 1 号 (Voyagers-1) 和旅行者 2 号 (Voyagers-2) 也于 1979 年掠飞木星。掠飞木星的任务还包括 1990 年美国国家航空航天局 (NASA) 和欧洲空间局 (ESA) 发射的尤里塞斯 (Ulysses)、1997 年 NASA 和 ESA 发射的卡西尼-惠更斯 (Cassini-Huygens), 以及 2006 年 NASA 发射的新地平线 (New Horizons) 探测器。

此外, 美国还发射了两颗木星专用探测器。1989 年美国发射的伽利略 (Galileo) 探测器对木星及其卫星的化学成分和物理状态进行了探测, 发现木卫二和木卫三表层下可能存在海洋。图 1-9 为伽

利略拍摄的木星和木卫二照片。另一颗是 2011 年发射的朱诺 (JUNO) 探测器, 预计于 2016 年 7 月抵达木星轨道并对木星进行环绕探测。

NASA 和 ESA 还将集中资源在 2020 年后实施木卫二木星系统任务 (EJSM), 计划对木卫二和木卫三展开研究。

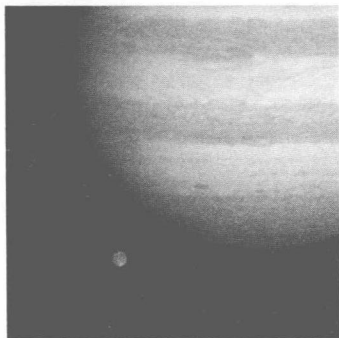


图 1-9 伽利略拍摄的木星和木卫二

1.2.6 土星探测

土星在太阳系内的大小和质量仅次于木星。早期探测任务以掠飞拍照为主。1979 年美国的先驱者 11 号探测器掠飞土星, 实现了土星的首次探测; 1980 年美国的旅行者 1 号探测器掠飞土星并发回了土星环照片; 1981 年美国的旅行者 2 号探测器抵近土星, 观测了土星和土星环。

1997 年 10 月 15 日发射的卡西尼-惠更斯探测器是 NASA 和 ESA 联合研制的世界上第一颗土星专用探测器, 它由卡西尼轨道器和惠更斯着陆器组成。2004 年 7 月 1 日, 卡西尼进入环绕土星的轨道, 开始了为期 4 年的土星系探测活动。2005 年 1 月 14 日惠更斯在土卫六大气中着陆。图 1-10 为卡西尼-惠更斯探测器拍摄的土星和土卫六照片。

NASA 和 ESA 还计划于 2020 年后联合实施土卫六土星系统任务 (TSSM)。

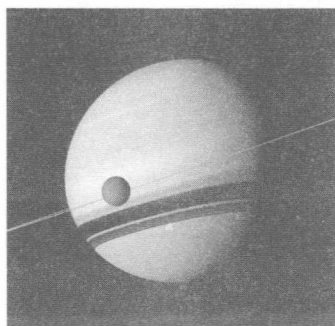
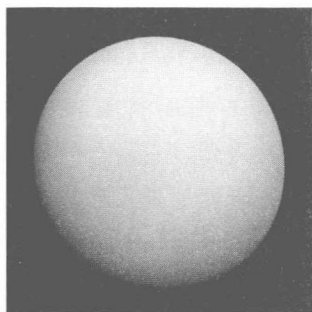


图 1-10 卡西尼-惠更斯探测器拍摄的土星和土卫六照片

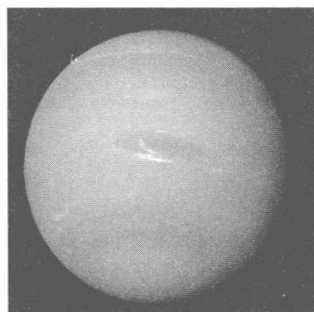
1.2.7 天王星、海王星和冥王星探测

天王星和海王星的内部和大气构成与木星、土星不同，天文学家将其定义为冰巨星。美国发射的旅行者 2 号探测器于 1986 年和 1989 年分别实现了天王星和海王星（如图 1-11 所示）的首次探测。

冥王星作为太阳系外层轨道的天体，探测它有助于了解太阳系的起源。2015 年 7 月 14 日新地平线探测器首次实现了冥王星探测，获得了有史以来最为清晰的冥王星照片（如图 1-12 所示），从而完成了太阳系原九大行星的探测。之后新地平线探测器飞向太阳系外层的柯伊伯带。



(a) 天王星



(b) 海王星

图 1-11 旅行者 2 号探测器拍摄的天王星和海王星照片

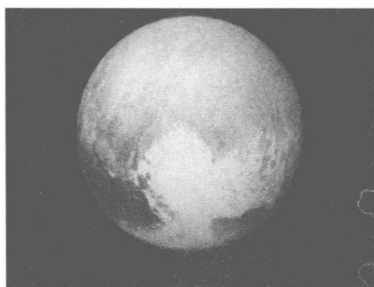


图 1-12 新地平线探测器拍摄的冥王星照片

1.2.8 太阳探测

太阳探测是深空探测的重点目标，太阳探测主要采用太阳环绕轨道和日—地 L_1 拉格朗日点观测两种方式。美国在 20 世纪六七十年代发射的先驱者系列以及和西德合作的太阳神 1 号/2 号等探测器采用太阳环绕轨道对太阳风和太阳磁场等进行探测。1990 年美国和欧洲空间局合作的尤里塞斯太阳探测器通过在木星引力辅助下实现了太阳近极轨道探测。此外人类还发射了多颗探测器，利用日—地拉格朗日 L_1 点对太阳进行观测或进行粒子采样。这些任务包括了 1978 年发射的国际日地探测者 3 号 (ISEE-3)、1994 年 11 月 NASA 发射的风 (WIND) 卫星，1995 年发射的日光层观测台 (SOHO)，1997 年发射的先进高能粒子成分探测器 (ACE)，2001 年 NASA 发射的平动点采样返回探测器起源号 (Genesis)，以及 2015 年发射的深空气候观测台 (DISCOVER)。

1.2.9 小行星和彗星探测

由于小行星和彗星等小天体保存着太阳系早期形成的原始信息，对它们进行探测可以得到太阳系起源与演化等问题的答案。此外小行星上可能蕴藏着丰富的水以及贵金属等资源，因而小行星可以作为载人登陆火星或其他行星的中转站，帮助人类探索更加遥远的太空。

1978 年美国和欧洲空间局合作的国际日地探测者 3 号 (ISEE-

3) 在扩展任务当中, 于 1985 年和 1986 年分别对贾可比尼 (Giacobini - Zinner) 彗星和哈雷 (Halley) 彗星进行了探测。苏联 1984 年发射的金星—哈雷彗星探测器分别对金星和哈雷彗星进行了探测。欧洲空间局于 1985 年发射的乔托 (Giotto) 探测器分别对哈雷彗星和格里格—斯克杰利厄普 (Grigg - Skjellerup) 彗星进行了探测。日本 1985 年发射的先驱 (Sakigake) 和彗星 (Suisei) 两个探测器都对哈雷彗星进行了探测。1989 年美国发射的伽利略探测器分别于 1991 年和 1993 年飞越了 Gaspra 和 Ida 小行星。1996 年 2 月, 美国发射了世界首个小行星探测器——近地小行星交会 (NEAR), 并对爱神 (Eros) 小行星进行了探测, 这是航天器首次成功进入围绕小行星运行的轨道。美国 1998 年发射的深空 1 号 (Deep Space - 1) 探测器对小行星和彗星进行探测。美国于 1999 年发射的星尘号 (Stardust) 于 2004 年对怀尔特-2 (Wild - 2) 彗发物质进行了取样返回。2003 年日本发射的隼鸟 - 1 (Hayabusa - 1) 对糸川 (Itokawa) 小行星进行了采样返回任务。美国于 2004 年发射的深度撞击号 (Deep Impact) 释放撞击器, 成功与坦普尔-1 (Tempel - 1) 彗星相撞。欧洲空间局于 2004 年发射的罗塞塔 (Rosetta) 彗星探测器携带菲莱 (philae) 着陆器于 2014 年对代号为 67P 的彗星进行了探测。2007 年美国发射了黎明 (Dawn) 小行星探测器, 该探测器对小行星带上质量最大的两颗星体——灶神星 (Vesta) 和谷神星 (Ceres) 进行探测, 以揭示太阳系开始形成时的条件和演变过程。中国 2010 年发射的嫦娥 2 号探测器在完成月球探测任务和日地 L_2 点的拓展任务后, 对图塔蒂斯小行星进行了飞越探测。

1.2.10 宇宙观测

宇宙观测目前主要采用近地轨道太空望远镜和利用日—地 L_2 点进行观测。前者主要依靠 1990 年美国发射的哈勃太空望远镜 (Hubble Space Telescope), 由于位于地球大气层之上, 成功弥补了地面观测的不足, 帮助天文学家解决了许多重要的问题。

日—地 L_2 点具有稳定的热环境和较低的辐射环境, 是进行天体观测的理想位置。NASA 于 2001 年 6 月发射了威尔金森微波各向异性探测器 (WMAP), 该探测器放置在日—地系统 L_2 点, 目的是探测宇宙中大爆炸后残留的辐射热。2009 年欧洲空间局采用一箭双星技术成功发射的赫歇尔 (Herschel) 卫星和普朗克 (Planck) 卫星被放置于日—地 L_2 附近的利萨如 (Lissajous) 轨道, 其携带的大型红外空间望远镜用于研究星体与星系的形成过程。2013 年欧洲空间局的盖亚号 (GAIA) 探测器发射升空, 它运行于日—地拉格朗日 L_2 点的利萨如轨道, 用于绘制银河系 10 亿颗恒星的三维图。NASA 与 ESA 合作的詹姆斯·韦伯空间望远镜 (JWST) 作为哈勃太空望远镜的后续任务, 计划放置于日—地 L_2 点, 并于 2018 年投入使用。

1.3 深空探测轨道设计方法

轨道设计和优化是制定深空探测任务首要且关键的一环。在深空轨道设计中, 最早出现也最为简单的是基于脉冲的直接转移方式。由于深空探测任务对降低推进剂消耗、提高科学回报有着非常强烈的需求, 随着技术的发展, 各种节能轨道设计方法不断涌现, 例如借力飞行技术、 n 体引力场下的低能轨道设计技术、以电推进和太阳帆为代表的先进推进技术等。在某些任务当中甚至利用了不止一种的节能轨道设计方法。下面从轨道设计的角度, 按照所采用的节能轨道设计方法的不同对深空任务进行简单汇总。

1.3.1 基于脉冲的直接转移轨道

20 世纪 60 年代至 80 年代之间, 绝大多数的月球探测器都采用了基于霍曼转移或圆锥曲线拼接技术的直接转移方式, 例如苏联的月球系列和美国的阿波罗系列任务。典型的地—月直接转移轨道始于地球停泊轨道, 探测器施加一次脉冲后将远地点提高到月球附近, 随后探测器施加一次制动脉冲从而进入环月任务轨道。我国的嫦娥 1 号也采用了直接转移方式, 如图 1-13 所示。

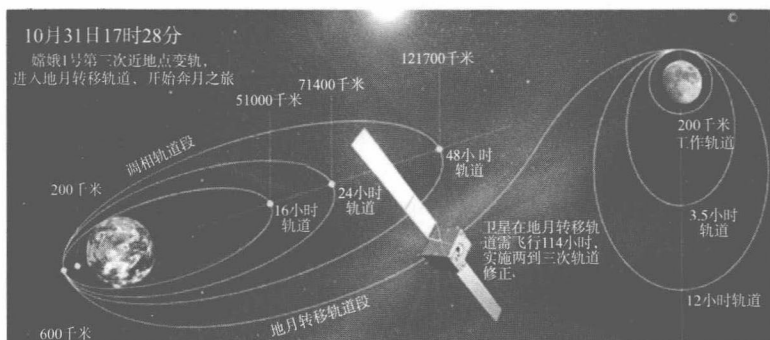
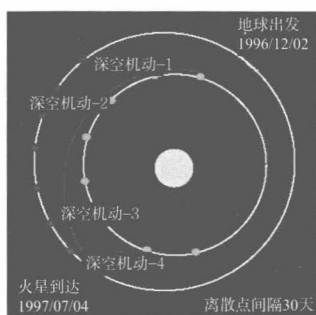
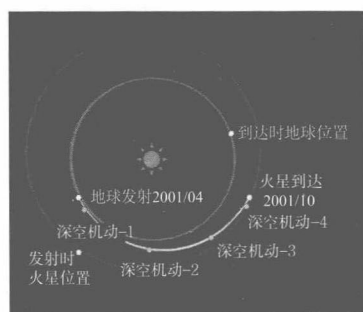


图 1-13 嫦娥 1 号变轨图 (2007)

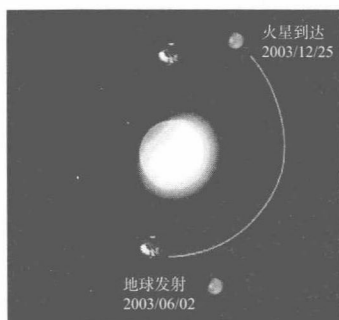
此外火星和金星探测器也多采用直接转移轨道, 如图 1-14 和图 1-15 所示。



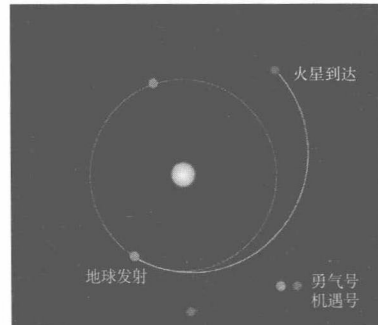
(a) 火星探路者任务(1996)



(b) 奥德赛任务(2001)

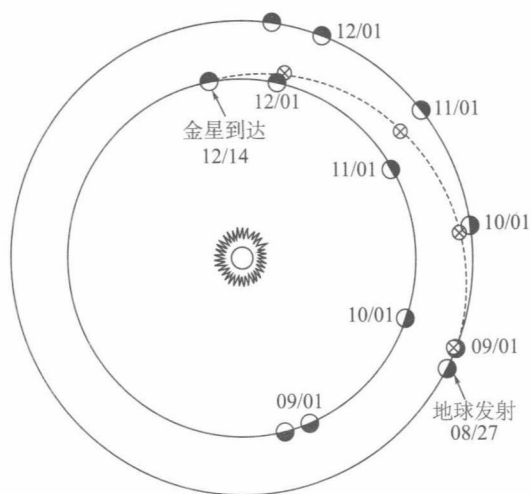


(c) 火星快车任务(2003)

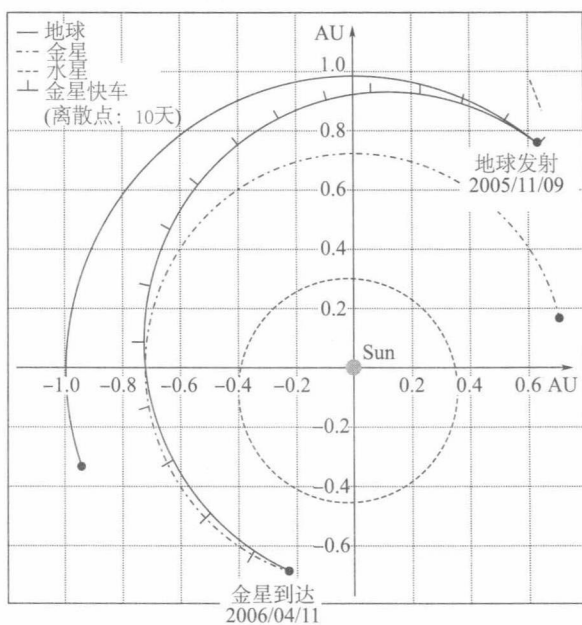


(d) 火星探测漫游者任务(2003)

图 1-14 地—火直接转移轨道



(a) 水手2号(1962)



(b) 金星快车(2005)

图 1-15 地—金直接转移轨道

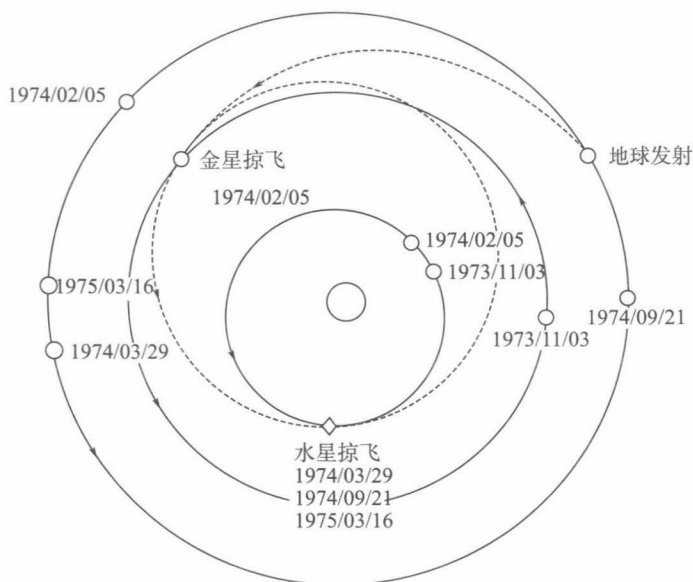
对于探月、探火和探金任务而言,直接转移方式所需飞行时间较短,推进剂消耗尚可接受,但对于其他行星的探测任务而言,则需采用节能轨道设计方法降低推进剂消耗。

1.3.2 借力飞行技术

借力飞行技术是指借助行星的引力调整或改变探测器飞行轨道的轨道设计技术。采用借力飞行技术,可以减小星际探测任务发射能量和总的速度增量。下面对采用借力飞行的深空任务进行简要汇总。

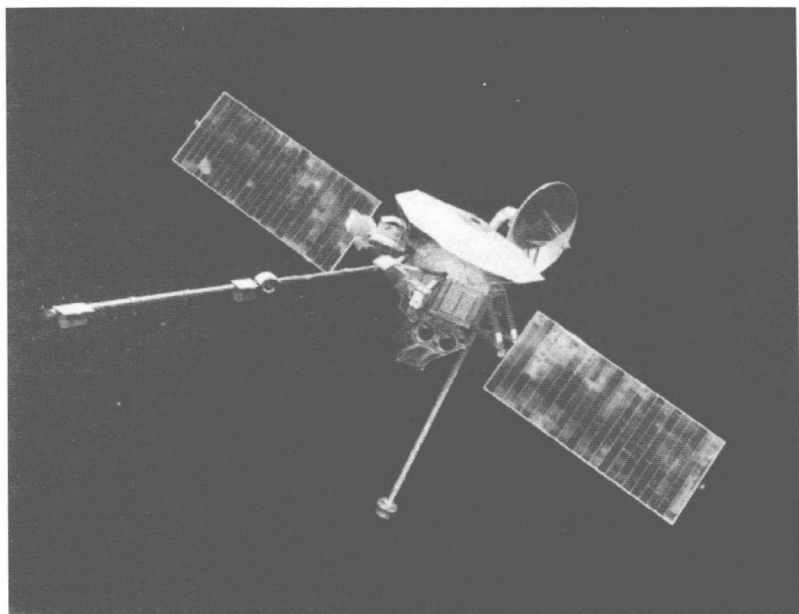
(1) 水手 10 号

1973 年 11 月 3 日 NASA 成功发射了水手 10 号探测器,它是人类首个执行双星探测的飞行器。1974 年 2 月 5 日,水手 10 号掠飞金星,借力后于 1974 年 3 月 29 日飞越水星,在后续时间里又两次飞越水星。共拍摄了 1 万多张照片,涵盖了水星表面积 57%。图 1-16 为水手 10 号任务示意图。



(a) 水手10号轨道示意图

图 1-16 水手 10 号任务示意图



(b) 水手10号探测器

图 1-16 水手 10 号任务示意图 (续)

(2) 先驱者 10 号和先驱者 11 号

1972 年 3 月 2 日, NASA 成功发射了先驱者 10 号 (Pioneer - 10) 探测器, 它是人类历史上第一个穿越小行星带到达木星附近的航天器。1985 年 6 月 13 日先驱者 10 号飞越海王星, 成为第一个离开太阳系的航天器。

1973 年 4 月 6 日, NASA 成功发射了先驱者 11 号 (Pioneer - 11) 探测器, 用来研究木星和外太阳系。与先驱者 10 号不同的是, 先驱者 11 号不仅拜访木星, 它还用木星的强大引力变轨飞向土星, 成为了第一个探测土星及光环的航天器, 在离开土星后先驱者 11 号飞向太阳系边缘。图 1-17 为先驱者 10 号/11 号任务示意图。