



行星探测进入多卫星任务时代

范开, 魏勇*

中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

* 联系人, E-mail: weiy@mail.iggcas.ac.cn

Prospection of multi-spacecraft planetary exploration missions in upcoming future

Kai Fan & Yong Wei*

Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

* Corresponding author, E-mail: weiy@mail.iggcas.ac.cn

doi: [10.1360/TB-2021-0944](https://doi.org/10.1360/TB-2021-0944)

2021年2月,我国自主研发的首颗火星探测器“天问一号”在飞行6个多月、跨越4.65亿千米后,成功进入火星环绕轨道。“天问一号”为单颗卫星环火配合火星车着陆的联合探测模式,其主要科学任务包括调查火星浅表面、大气和空间环境,进而理解火星水、冰和大气演化历史^[1,2]。“天问一号”将作为我国行星探测计划的“开门红”,为我国后续太阳系行星探测任务揭开序幕。

1962年12月,美国“水手2号”(Mariner 2)首次将深空探测器推进至金星表面34773 km高度、飞掠并采集金星表面及大气数据。截至目前,人类取得成功或部分成功的太阳系行星飞掠、就位、着陆探测任务已有近60年的历史,共计59次探测计划(表1)。在这些探测任务中,仅有两次任务采用多卫星探测模式:1969年美国“水手6 & 7”(Mariner 6&7)火星双卫星飞掠任务和1978年美国“先驱者金星联合探测器”(Pioneer Venus Multiprobe)金星四卫星撞击式探测任务,其余57次探测均为单颗卫星或单颗卫星搭载着陆器探测模式。这些卫星的就位探测资料弥补了早期望远镜观测的不足,拓展了人类对行星内部结构及表面成分、大气及空间环境的认知,也引发了行星形成与演化过程的探索。

以火星为例,其弱重力环境下的大气逃逸过程对火星表面水环境和大气圈层均产生了深远影响:火星在约40亿年前的地质历史早期存在表面液态海洋和较当前浓密约两个量级的大气^[3]。但是,在大气逃逸过程长达约37亿年的作用下,火星表面23 m深的等效全球海洋或约80 kPa的大气二氧化碳经辐射加热和电离、加速后永久损失至行星际空间^[4]。近20年间,单颗卫星环绕火星的探测计划如欧洲航天局“火星快车”(Mars Express, 2003年)、美国国家航空航天局“火星大气

与挥发物演化”任务(Mars Atmospheric and Volatile Evolution, 2013年)均将火星空间环境的逃逸粒子作为主要科学目标开展探测,其研究成果极大地拓宽了人类对火星大气逃逸过程的认识^[5,6]。

但是,单颗卫星探测模式仍存在以下不足:(1)单颗卫星就位探测仅能测量其飞行轨迹附近的等离子体、磁场信息,无法区分逃逸现象的时空效应;(2)单颗卫星的轨道周期时间较长,如MAVEN约为4.5 h、“天问一号”约为7 h,火星磁层逃逸粒子对太阳风的响应需要牺牲时间分辨率对观测数据进行小时量级的平均,无法获得高精度时间分辨率的火星磁层实时观测;(3)空间天气事件(如日冕物质抛射事件、太阳耀斑爆发事件)抵达火星空间时,单颗卫星无法同时监测火星上游太阳风条件和火星磁层,仅能根据数值模拟结果和经验公式粗略估计空间天气事件对火星磁层、逃逸粒子的影响^[7]。

早期的行星空间探测同样被上述单颗卫星探测模式限制,因此,1978年“先驱者金星联合探测器”的四颗探测器分别在金星日侧偏南、日侧赤道、夜侧北极、夜侧近赤道区域进行短时间连续投掷,4颗卫星覆盖区域的表面温度、大气成分、结构、风场、硫酸云等观测结果革新了同时期金星表面至中高层大气、电离层的认识^[8,9]。如出一辙,近20年间围绕地球磁层开展的多卫星探测计划如2000年欧洲航天局“星簇计划II”(Cluster II)、2003年中国国家航天局“地球空间双星探测计划”同样为进一步理解磁层动力学和地球磁场与大气逃逸过程带来了新的突破。

美国国家航空航天局计划于2024年开展“逃逸与等离子体加速及动力学探索者”(The Escape and Plasma Acceleration

表 1 成功或部分成功的行星探测任务列表(1962~2021年)

Table 1 List of successful or partially successful planetary exploration missions (1962–2021)

目标	撞击、环绕、着陆任务		飞掠任务、中途飞掠	
	任务名称	探测时间	任务名称	探测时间
水星	MESSENGER	2011~2015年	Mariner 10 MESSENGER BepiColombo	1974, 1975年 2008, 2009年 2021年
	Venera 4~16 Pioneer Venus 1 Pioneer Venus Multiprobe Vega 1&2 Magellan Venus Express Akatsuki	1967~1984年 1978~1992年 1978年 1984年 1990~1994年 2006~2014年 2015年至今	Mariner 2&5&10 Galileo Cassini-Huygens MESSENGER IKAROS Parker Solar Probe BepiColombo Solar Orbiter	1962, 1967, 1974年 1989年 1997年 2004年 2010年 2018年 2018年 2020年
金星	Mars 2&3&5 Mariner 9 Viking 1&2 Phobos 2 Mars Global Surveyor Mars Pathfinder 2001 Mars Odyssey Mars Express Spirit Opportunity Mars Reconnaissance Orbiter Phoenix Mars Science Laboratory Mars Orbiter Mission MAVEN ExoMars-2016 InSight Emirates Mars Mission 天问一号 Mars 2020	1971~1974年 1971~1972年 1976~1982年&1976~1980年 1989年 1997~2006年 1997年 2001年至今 2003年至今 2004~2010年 2004~2019年 2006年至今 2008年 2012年至今 2014年至今 2014年至今 2016年至今 2018年至今 2021年至今 2021年至今 2021年至今	Mariner 4 Mariner 6&7 Mars 4&6&7 Rosetta Dawn	1965年 1969年 1974年 2007年 2009年
	木星	Galileo Juno	1995~2003年 2016年至今	Pioneer 10&11 Voyager 1&2 UlyssesCassini-Huygens New Horizons
土星	Cassini-Huygens	2004~2017年	Pioneer 11 Voyager 1&2	1979年 1980, 1981年
天王星	无	无	Voyager 2	1986年
海王星	无	无	Voyager 2	1989年

and Dynamics Explorers)双卫星火星探测任务^[10], 简称“逃逸探索者”(EscaPADE). 这将是美国国家航空航天局继1969年之后第二次火星“双卫星”探测任务, 也将是世界首个对火星空间环境开展长期环火探测的双卫星任务. “逃逸探索者”计划单个探测器重量小于90 kg, 轨道近火点为200 km, 远火点根据任务不同阶段依次为7000和5660~8685 km, 卫星轨道周期约4~6 h, 如图1(c)所示.

每颗“逃逸探索者”卫星计划携带3种科学载荷: 磁强计(EscaPADE Magnetometer, EMAG)、静电分析仪(EscaPADE

Electrostatic Analyzer, EESA)和朗缪尔探针(EscaPADE Langmuir Probe, ELP). 这些载荷将围绕磁场、热和超热离子/电子能谱、热等离子体密度、55~130 nm太阳紫外辐射强度及飞船电势开展测量(图1(b)). “逃逸探索者”的主要科学目标包括: (1) 进一步理解火星磁层的主要控制因素及这些驱动源对磁层离子流的影响; (2) 进一步理解太阳风向火星磁层的能量、动量传输过程; (3) 进一步理解火星大气层逃逸/沉降粒子的能量、物质交换过程.

两颗“逃逸探索者”卫星的飞行模式计划为: 同轨道一前

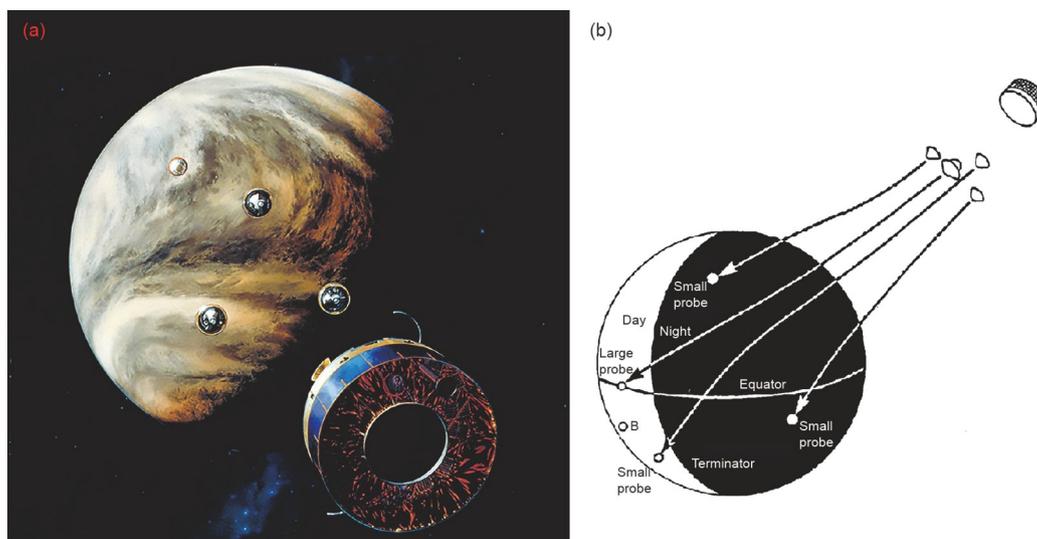


图1 美国国家航空航天局“先驱者金星联合探测器”任务简介(1978)。(a) 任务宣传示意图; (b) 探测计划示意图。图片来源: NASA
 Figure 1 NASA's Pioneer Venus Multiprobe mission (1978). (a) Fantasy poster of the mission; (b) sketch of the mission. Credit: NASA

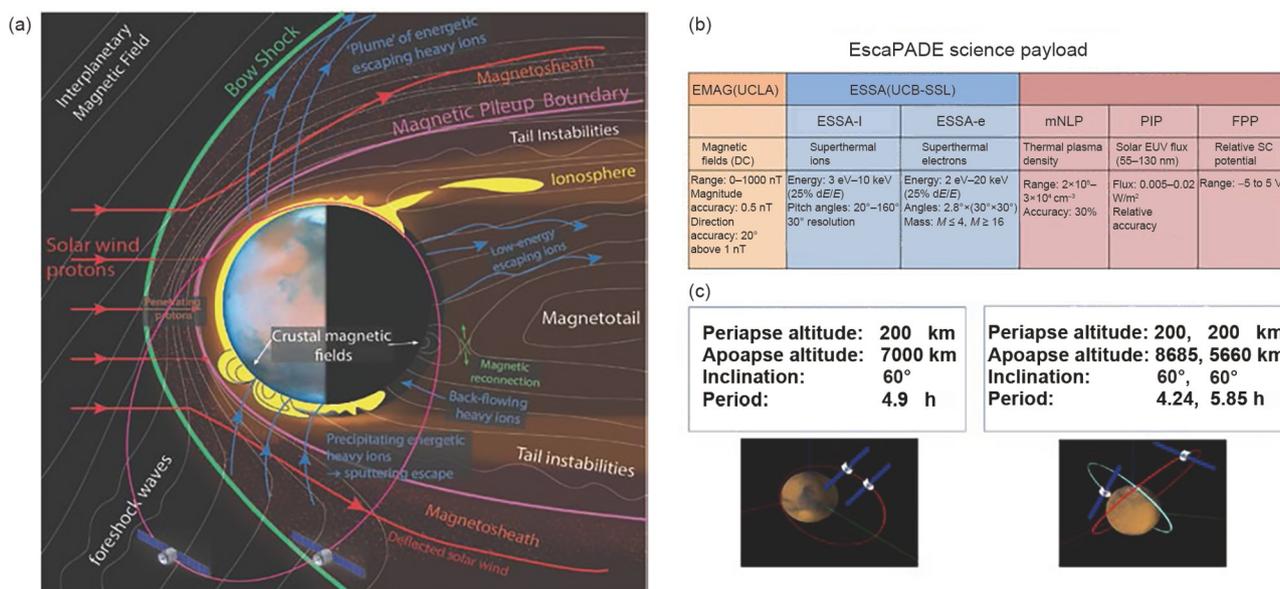


图2 美国国家航空航天局“逃逸探索者”任务简介^[10]。(a) 两颗探测器同时测量火星磁鞘/磁层和太阳风示意图; (b) 科学载荷清单; (c) 卫星轨道模式: “双星伴飞”(左)和“高低搭配”(右)

Figure 2 NASA's EscaPADE mission^[10]. (a) Twin-spacecraft measuring the Martian magnetosheath and magnetosphere simultaneously; (b) list of scientific payloads onboard both twin-spacecraft; (c) scientific campaign of EscaPADE: Temporally (left) or spatially-separated (right) measurements

一后的“双星伴飞”和两轨道高差约为3000 km的“高低搭配”(图2(c))。“双星伴飞”模式既能同时观测空间尺度小于卫星间隔的磁层动力学过程,也可以在同一位置获取两颗卫星依次跨越的短时间尺度信息,因此这一模式能够有效区分火星逃逸粒子的空间分布和时间演化。“高低搭配”模式则能够使两颗探测器分别位于火星上游太阳风和磁层、电离层,对驱动源和逃逸粒子进行同时、实时观测,获取近火空间环境在太阳风条件变化后的实时响应。“逃逸探索者”双卫星探火

计划的双卫星、多姿态探测模式,弥补了单颗卫星探测任务无法同时获取驱动源和响应源时空变化的不足,预计将为火星大气逃逸问题带来新的突破。

此外,欧洲航天局与日本宇宙航空研究开发机构(JAXA)合作开展的“贝皮科伦布”(BepiColombo)水星双卫星探测计划已于2018年成功发射,预计将于2025年共计6次水星飞掠后进入环水星轨道,卫星已于2021年10月完成首次水星飞掠。“贝皮科伦布”的两颗探测器分别为:水星环绕器(mercury pla-

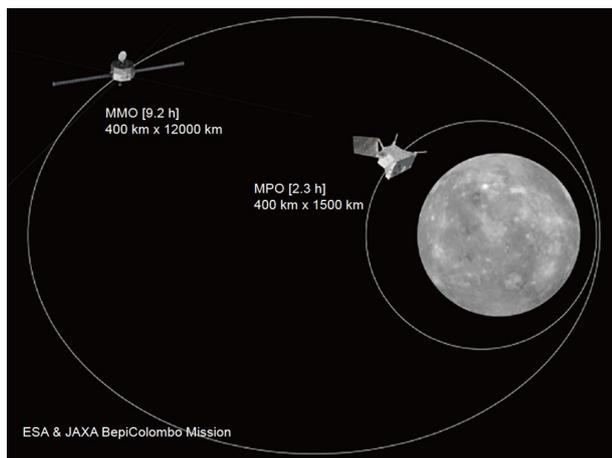


图3 水星双卫星探测任务：“贝皮科伦布”。图片来源: ESA/ATG
Figure 3 Mercury double-satellite exploration mission: BepiColombo.
 Credit: ESA/ATG

netary orbiter, MPO)和水星磁层环绕器(mercury magnetospheric orbiter, MMO)^[11]。MPO为400 km×1500 km的小椭圆轨道,周期为2.3 h; MMO为400 km×12000 km的大椭圆轨道,周期为9.3 h。两颗卫星采取“高低搭配”探测模式,均搭载磁强计、中性及等离子体测量仪,加深对水星磁场重联、磁层亚暴等磁层动力学过程的认识^[12]。此外, MPO上搭载的一系列光谱仪也将对水星表面物质成分、逃逸层形态、太阳引力作用下的水星形变特征等现象进行观测。

回顾行星探测历史(表1),从早期单颗/多颗卫星撞击式、飞掠式探测到单颗探测器环绕、着陆探测,行星探测技术的进步使观测数据更加丰富,也为进一步揭示太阳系行星演化历史带来了一线曙光。未来多卫星探测任务的开展,不仅使火星大气逃逸、金星温室效应、水星逃逸层的全球图像更加清晰,更能填补人类对巨行星多卫星探测计划的空白,为巨行星多卫星系统带来新的发现。多卫星联合探测的时代,已指日可待。

参考文献

- 1 Wan W X, Wang C, Li C L, et al. The payloads of planetary physics research onboard China's First Mars Mission (Tianwen-1). *Earth Planet Phys*, 2020, 4: 331–332
- 2 Zou Y, Zhu Y, Bai Y, et al. Scientific objectives and payloads of Tianwen-1, China's first Mars exploration mission. *Adv Space Res*, 2021, 67: 812–823
- 3 Citron R I, Manga M, Hemingway D J. Timing of oceans on Mars from shoreline deformation. *Nature*, 2018, 555: 643–646
- 4 Jakosky B M, Brain D, Chaffin M, et al. Loss of the Martian atmosphere to space: Present-day loss rates determined from MAVEN observations and integrated loss through time. *ICurr Alzheimer Resus*, 2018, 315: 146–157
- 5 Ramstad R, Barabash S, Futaana Y, et al. Ion escape from Mars through time: An extrapolation of atmospheric loss based on 10 years of Mars express measurements. *J Geophys Res Planets*, 2018, 123: 3051–3060
- 6 Dubinin E, Fraenz M, Pätzold M, et al. The effect of solar wind variations on the escape of oxygen ions from Mars through different channels: MAVEN observations. *J Geophys Res-Space*, 2017, 122: 11285–11301
- 7 Wei Y, Fraenz M, Dubinin E, et al. Enhanced atmospheric oxygen outflow on Earth and Mars driven by a corotating interaction region. *J Geophys Res-Space*, 2012, 117: A03208
- 8 Pollack J B, Black D C. Implications of the gas compositional measurements of pioneer Venus for the origin of planetary atmospheres. *Science*, 1979, 205: 56–59
- 9 Stewart A I, Barth C A. Ultraviolet night airglow of Venus. *Science*, 1979, 205: 59–62
- 10 Lillis R J, Curry S, Curtis D W, et al. EscaPADE: Coordinated multipoint observations of the Martian magnetosphere. In: American Geophysical Union Fall Meeting 2019. 2019, abstract #SM42B-09
- 11 Benkhoff J, Murakami G, Martin P, et al. BepiColombo—Status and next Activities. In: American Geophysical Union Fall Meeting 2019. 2019, abstract #P13C-3534
- 12 Clery D, Normile D. BepiColombo set to probe Mercury's mysteries. *Science*, 2018, 362: 11–12