

一种火星多模式组合探测任务设想

陈颖, 周璐, 王立

(钱学森空间技术实验室, 北京 100094)

摘要:针对火星探测科学发现及任务创新需求,探索更先进的探测模式,提出了一种火星多模式组合探测任务设想。该任务设想的特点在于结合了轨道环绕、表面着陆、多点穿透和浮空探测,获取立体多层多源信息,一次任务实现深度科学探测。对火星开展多模式组合探测,不仅会开拓更加具有优势的火星探测新方式,发展新的探测能力和技术,也会加深对火星的全面了解,提高探测活动的综合效果。多模式探测设想不仅适用于火星,对金星、土星等地外天体探测也有很好的支撑作用。

关键词: 火星探测; 多模式; 立体组合探测

中图分类号: V476.4

文献标识码: A

文章编号: 2095-7777(2014)02-0156-05

A Conception of Mars Multi-mode Combination Exploration Mission

CHEN Ying, ZHOU Lu, WANG Li

(QIAN Xuesen Laboratory of Space Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: Focusing on the requirements of scientific findings and Mars exploration mission innovations, and exploring advanced exploration modes, a novel scenario of Mars multi-mode combination exploration mission is proposed. Its characteristics rest with the combination of several exploration modes such as orbiting, landing, multi-point penetrating and ballooning, and consequently three-dimensional multi-layer and multi-source information is obtained and scientific exploration is carried out in depth through one mission. Therefore, Mars can be explored in three-dimensional multi-mode combinational ways, which not only develops the capability and technology for exploration activity but also helps to get a good grasp of Mars and heighten a comprehensive effect of exploration activity. The design results of multi-mode combination exploration not only apply to Mars exploration but also help to explore other extraterrestrial bodies such as Venus and Saturn.

Key words: Mars exploration; multi-mode; three-dimensional combination exploration

0 引言

深空探测是一个国家航天技术和空间科学高度发达的重要标志之一,是综合国力的具体体现。“机遇号”和“勇气号”^[1]第一次实现了在火星不同位置同时进行科学探测,大大加深了对火星环境的了解;“凤凰号”^[2]第一次实现了在火星高纬度的着陆探测,发现了存在水的有力证据;“隼鸟号”^[3]第一次实现了从小行星上采集到岩石样本,为日本在国际深

空探测领域赢得了一席之地。综合分析国外深空探测任务,科学发现的首创性是其影响力大小至关重要的因素,国外每次深空探测任务都有创新,探测方式是任务创新的根本。我国选择多样的探测方式是实现创新性的科学任务、得到原创性的科学数据、提高我国深空探测任务影响力的重要保证。

火星是太阳系中除地球外最可能存在生命的地方,对探索宇宙和生命起源具有重要科学意义。以美国为首的航天大国已实现了飞越、环绕和着陆

3 种方式的火星探测,并取得了重大科学发现。轨道器距离火星表面几百千米之外,能大范围观测火星任意位置,但无法像装有仪器设备的着陆器一样贴近地表进行精细探测。而着陆器只能对着陆点附近小范围区域进行探测,不具备大范围探测能力,不利于寻找有价值的新线索。近年,一些科学家提出利用气球携带相应载荷在行星大气中漂浮观测^[4]。目前,国际上尚未实现 3 类及以上模式组合探测,未来火星任务必然向立体多维探测方式发展。

本文针对火星探测科学发现及任务创新需求,提出了一种结合轨道环绕、表面着陆、多点穿透以及浮空探测的火星多模式组合全方位立体探测任务模型,具有探测范围大、立体多层多源信息获取、一次任务实现深度科学探测等特点,为我国未来深空探测活动提供创新概念和新系统方案储备。

1 火星多模式探测任务总体设想

为了满足全方位了解火星环境和地质结构的需求,本文提出了一种轨道器+浮空器+火星车+穿透器组合探测的火星多模式全方位立体探测任务设想。任务的科学目标具有深空多模式探测特色:结合着陆与浮空组合探测实现火星大气探测,通过火星车巡游火星表面来探测火星表面不同地点的大气特性,通过浮空器在空中飞行对火星中层大气进行连续观测,研究火星大气的结构、成分、气象和气候特征及变化规律,研究火星气象与气候的演化历史及未来变化趋势;结合穿透与着陆组合探测研究火星生命是否存在,通过在穿透器和火星车上配备生命物质探测仪帮助寻找火星生命存在或曾经存在过的证据;结合环绕、浮空与着陆组合探测实现火星地形、地貌的精细探测;结合着陆与穿透组合探测实现火星表面浅层结构和地下水冰探测。图 1 给出了火星多模式探测示意图。

任务设计于 2024 年从海南文昌发射场发射,运载火箭采用 CZ-5,将探测器送入地火转移轨道。探测器由轨道器和进入器两部分组成,其中进入器包含 1 个浮空器、1 个火星车和 3 个穿透器。图 2 为进入器构型图。探测器经历地火转移轨道、火星捕获轨道、分离轨道,最终实现进入器分离。轨道器负

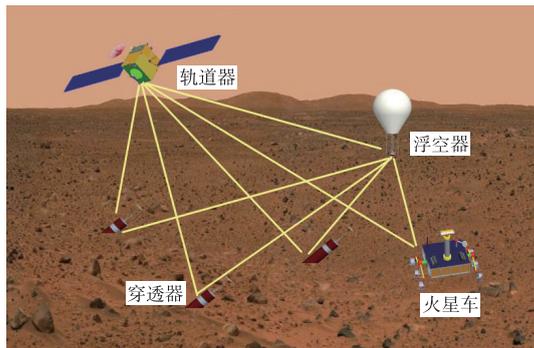


图 1 火星多模式探测示意图

Fig. 1 Sketch of Mars multi-mode exploration mission

责完成轨道中途修正,在进入火星大气前为实现精确着陆而进行机动调整,并在分离前负责探测器整体的电源、导航、对地通信和热控等功能。进入器进入下降轨道后依次释放穿透器、火星车和浮空器,其中穿透器布撒在 $100\text{ km} \times 20\text{ km}$ 范围,工作 3 天;火星车采用缓推火箭着陆并在着陆区域附近巡游探测,工作 1 年;浮空器利用火星大气的浮力在空中 $1\sim 5\text{ km}$ 大气区域飞行,工作 1 周。

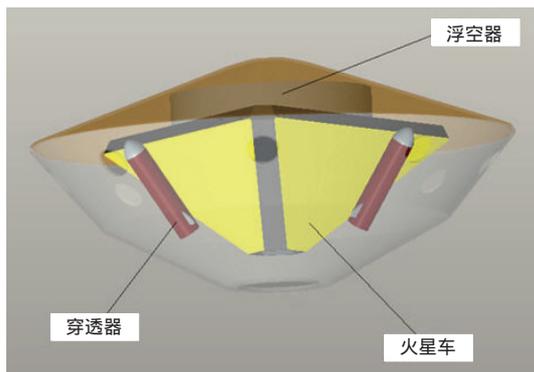


图 2 进入器构型

Fig. 2 EDM configuration

在探测任务期间,浮空器、火星车、穿透器与轨道器之间建立 UHF 频段通信链路,多个探测单元间依靠无线通信、图像信息、高度计信息等组合导航方式实现高精度导航定位。本任务的轨道器可与已经在火星轨道运行的其他轨道器组成火星中继网络通过 X 频段与地面通信。

整个火星多模式探测任务过程如图 3 所示。

2 火星多模式探测任务分析

2.1 进入过程分析

为了保证着陆精度要求,要求飞行过程有一定

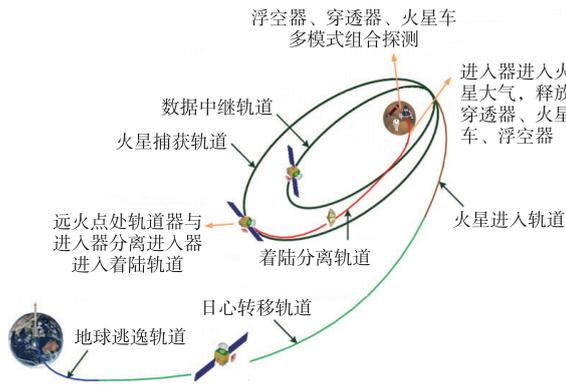


图 3 火星多模式探测任务过程
Fig. 3 Mars multi-mode exploration process

的机动控制能力,故本任务采用半弹道式进入方式。由轨道器提供进入器变轨的动力,进入器配备发动机用于调整姿态和变轨。进入器采用圆台倒锥体外形,通过质心偏置来产生升力,进入火星大气后通过调整姿态来进行机动。为保证降落伞工作的稳定性,降落伞设计为具有一定结构透气量的伞型,采用盘缝带伞^[5]。为了探测器安全,必须减低末段速度,所有探测单元分离都在气动外形减速和降落伞减速之后。整个进入释放过程的工作程序如图 4 所示。进入器进入下降轨道后打开减速降落伞,抛掉防热大底,依次释放穿透器、火星车和浮空器。

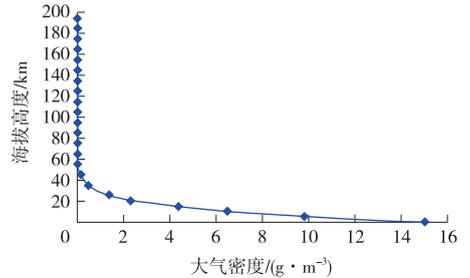


图 4 多模式探测任务进入释放过程
Fig. 4 EDL Sequence of Mars multi-mode exploration mission

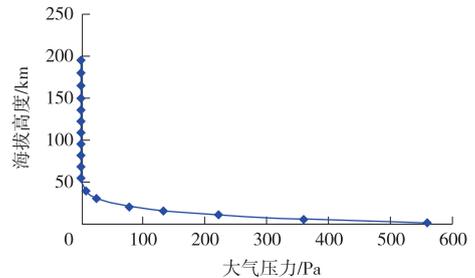
2.2 浮空任务分析

截至目前,国际上还没有气球参与到火星的探测中。本任务设想设计利用浮空器平台在空中飞来对着陆区火星中层大气进行连续观测,研究火星大气的中层次结构、演化机制及火星气候,填补轨道器和着陆器探测之间的空白。

火星大气稀薄,主要成分是 CO_2 , 占火星大气体积 95% 左右^[4,6]。火星表面大气密度约是地球的 1%, 大气压力不足地球的 1%。在 0~195 km 高度范围内,大气密度在 $0.015 \sim 3.8 \times 10^{-12} \text{ kg/m}^3$ 范围变化,大气压力在 $557.4 \sim 2.2 \times 10^{-7} \text{ Pa}$ 范围变化。随着高度升高,大气密度和大气压力均迅速降低。图 5 为火星大气密度、大气压力随高度变化曲线图。



(a) 火星大气密度随高度的变化



(b) 火星大气压力随高度的变化

图 5 火星大气密度、大气压力随高度的变化

Fig. 5 Variety of density and atmospheric pressure of Mars along with the altitude

对于火星探测,采用气球作为探测工具具有很高的难度,面临的关键技术主要有 3 项:

1) 浮空器充气展开技术。保证整个气球系统不会撞击到地面,与降落伞的开伞高度、降落伞的稳定时间、气球的充气速率有关。

2) 火星超压气球技术。气球的蒙皮材料不仅需要承受相应的压力,保持非常低的泄漏率,还必须足够轻,才能满足火星大气的漂浮条件。

3) 探测气球升降技术。探测气球升降主要是通过外部综合热环境变化,根据系统总体的浮/重平衡关系,获得探测气球的升降状态。升降运动过程涉及热力学、传热学、流体力学、飞行力学等多个学科,浮力、压力、温度和环境参数紧密耦合,过程复杂,实现难度较大。

多模式任务设想中,为了保证足够的浮力来携带有效载荷,所在高度的大气密度应大于 0.01 kg/m^3 。由于火星昼夜温度的变化,浮空器的高度也会变化,为了使浮空器能够工作较长时间,其工作高度选择为 $1\sim 5 \text{ km}$ 。关于充气方式,气瓶充气由于流量限制,导致充气时间过长,一般到达 100 s 以上。多模式任务由于释放的探测器多,要求充气时间足够短,为保证承重更多的载荷,特利用下降速度为浮空器充气。预计浮空器充气时的速度为 20 m/s ,充气时间为 30 s 。另外,为保证浮空器的稳定飞行,设计采用核电对浮空器的气体进行加热。

2.3 着陆任务分析

要成功实施火星着陆任务,选择一个合适的着陆区域无疑是关键的一环。目前只有美国的 7 个探测器成功在火星表面着陆,其中大多数的着陆点都在火星赤道以北,南半球的着陆点几乎没有,这是由于多种限制条件造成的。目前人类已经成功登陆的着陆区如图 6 所示。选择着陆区域首先要考虑有利于实现科学探测目标,要求着陆地区地质现象丰富,尽量是国外没有探测过或没有深入探测的区域,同时要考虑保证着陆器安全着陆在指定位置并正常工作。着陆探测工程上的约束条件主要包括:着陆精度、高度、斜坡、岩石、地表尘土、能源、通信链路等。结合火星多模式探测任务情况,选择了尼洛·悉提斯环形山为着陆区,选择特比环形山和盖尔环形山为备用着陆区。预选的着陆区位置、海拔及探测目标情况如表 1 所示^[7]。

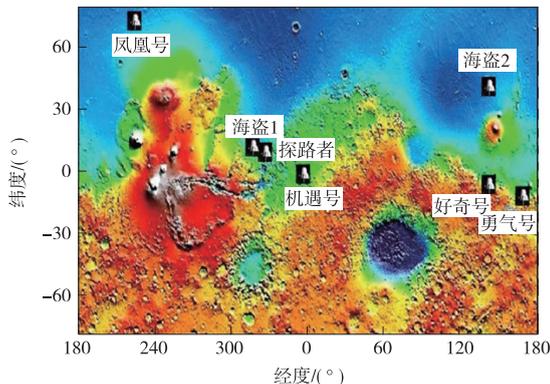


图 6 人类已经登陆的着陆区

Fig. 6 Landing sites that humans landed

本任务设计采用缓推火箭方式进行火星车的着陆,之后进行大范围的巡视探测。为了能够对阴暗地区进行观测,着陆火星车将配备核电源,拥有长达 1 年的工作寿命。

表 1 多模式探测任务预选的着陆区

Table 1 Landing sites proposed for Mars multi-mode mission

地点名称	位置	海拔/km	探测目标
尼洛·悉提斯山	23°N, 76°E	< -2.0	页状硅酸盐
特比环形山	27.4°S, 73.4°E	-4.7	层状物质
盖尔环形山	4.6°S, 137.4°E	-4.5	内部层状沉积物

2.4 穿透任务分析

开展火星表面穿透探测,影响任务成败的关键技术主要有如下 3 个方面:

1) 抗高过载结构技术。穿透器的撞击速度一般约为 $60\sim 300 \text{ m/s}$,在地质材料中减速所形成的撞击过载通常大于 500 g 。穿透器高速撞击火星表面时,会产生复杂的冲击载荷和结构响应:火星表面开坑、坑外裂纹、坑下穿洞;穿透器的端头可能被压碎,后部弹体也会因弯曲而折断。为了使穿透器耐冲击,应选用合适的材料并大力改善结构的动力学性能。大攻角、大倾角和大长径比都将显著削弱弹体的承载能力。

2) 穿透器分离和触地时的速度和姿态控制技术。穿透器在分离后通常采用自旋稳定的方式保持轨道和姿态的稳定性,不再具备中途调整的能力,因此对分离前探测器组合体的轨道姿态以及分离方式等提出了严格的要求,以保证分离时穿透器的轨道和姿态参数在合理的设计范围内。

3) 信息收集、保存和传输技术。火星表面穿透器电子集成系统最重要的工作是进行信息收集和保存,主要由传感器、专用感应装置、调理器、多路采集系统、无线编码器、无线发射装置和天线等部件构成。按目前的电子技术这些设备的功能实现不存在任何困难,但如要满足高过载、恶劣环境、低能耗、远地传送和高可靠性的应用条件则面临较大的挑战。

由于尺寸和重量等各方面的限制,穿透器一般采用蓄电池作为主要供电装置。根据国外深空穿透探测的研究经验,穿透器的整体构型一般分为整体式和分体式两种。采用整体式结构时,穿透器撞击

时或者部分穿入地下,或者整体穿入地表浅层。而在分体式结构设计中,穿透器仅是将探测载荷的一部分穿入地表以下,其他部分则留在地面以上,两者之间通过电缆等形式连接,从而大大简化了撞击任务和通信数传。

本任务设想中,设计使用多层缓冲隔震及分离天线结构,以解决多点布撒穿透器的减震和通信难题。穿透器进入星体表层以下进行科学探测,寿命 3 天,通过生命物质探测仪对火星表层的物质进行生命确认,而 3 个穿透器布撒在不同的区域形成组网,利用地震波探测仪实现对火星地质内部结构的探测。考虑未来空间电源的发展,穿透器能够工作更长时间,将可以长期监测火星地质变化情况。

3 结束语

创新探测任务设计有利于获得更有价值的科学发现,目前我国开展火星探测可供选择的探测方式有限,而结合环绕探测、着陆探测、浮空探测和穿透探测的多模式组合立体探测任务设计将实现我国火星探测方式的创新,提高实现突破性科学发现的可能性,是一种可行的、效益最大化的探测方式。

火星多模式组合探测是一项全新的深空探测任务模式,任务复杂,技术实施难度较大,创新性强,但目前我国在部分技术领域已具备一定的技术基础。探月工程的实施为我国深空探测的测控、数传、地外天体表面着陆等技术领域积累了宝贵的经验,为火星多模式探测任务提供了技术支撑。除浮空探测、穿透探测外,国内针对火星着陆探测和环绕探测的研究相对比较成熟,基本具备集成的基础。浮空探测和穿透探测实施的技术难度较大,虽已进行了浮空器充气展开及导航定位、穿透器结构动力学分析等关键技术的初步技术方案论证,但在工程化应用方面仍待进一步研究,安全性和可靠性设计将是后续研究的重点。本任务设想设计于 2024 年发射,考虑未来各项关键技术的发展,火星多模式组合探测任务在技术上是可行的。

在我国未来的行星探测活动中,机会有限,多模式组合探测是无疑是极为重要探测方式,开展多模

式组合立体探测设计取得的成果不仅适用于火星,对小行星、金星和土星等地外天体探测也将有很好的支撑作用。

参 考 文 献

- [1] 朱仁璋,王鸿芳,泉浩芳,等. 美国火星表面探测使命述评(下)[J]. 航天器工程,2010,19(3):8-27. [Zhu R Z, Wang H F, Quan H F, et al. Overview of the US Mars surface missions (Part TWO) [J]. Spacecraft Engineering, 2010, 19(3):8-27.]
- [2] Kornfeld R P, Bruvold K N, Morabito D D, et al. Reconstruction of entry, descent and landing communications for the Phoenix Mars lander[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2011,48(5):822-835.
- [3] 尹怀勤. 日本的隼鸟号小行星探测器[J]. 太空探索,2009(7):42-45. [Yin H Q. Japanese Hayabusa explorer[J]. Space Exploration, 2009(7):42-45.]
- [4] 王劲东,李磊,吴季,等. 火星气球探测[C]//中国宇航学会深空探测技术专业委员会第九届学术年会,杭州:[s. n.],2012. [Wang J D, Li L, Wu J, et al. Mars balloon exploration[C] // The 9th Conference of Committee of Deep Space Exploration Technology, Chinese Society of Astronautics, Hangzhou:[s. n.], 2012.]
- [5] 陈旭,荣伟,陈国良.“火星探测漫游者”降落伞的研制[J]. 航天器工程,2007,16(2):50-56. [Chen X, Rong W, Chen G L. Development of the parachute of Mars exploration rover [J]. Spacecraft Engineering, 2007,16(2):50-56.]
- [6] Niles P B, Catling D C, Berger G, et al. Geochemistry of carbonates on Mars: implications for climate history and nature of aqueous environments[J]. Space Science Reviews, 2013,174(1):301-328.
- [7] Grant J A, Golombek M P, Grotzinger J P, et al. The science process for selecting the landing site for the 2011 Mars Science Laboratory[J]. Planetary and Space Science, 2011,59:1114-1127.

作者简介:

陈颖(1984—),女,工程师,主要研究方向:深空探测、航天器总体设计。

通信地址:北京市海淀区友谊路 104 号(100094)

电话:(010)68745839

E-mail:yingchenjz@163.com

[责任编辑:高莎]