

火星探测器着陆过程综述

姜晶莉 刘洪林 (航天工程大学士官学校 北京 102249)

摘要：随着航天科技的发展，人类对于火星的探测越来越深入。而在火星探测的过程中，探测器着陆是一个关键环节。本文以火星探测器的着陆为研究重点，首先介绍了着陆过程，包括大气进入、降落伞减速、动力减速及缓冲着陆四个阶段。而后分析了由于地火距离遥远、火星大气稀薄及火星表面环境复杂等问题造成的着陆过程的难点。最后，针对这些难点，概括了着陆过程中使用的关键技术。

关键词：火星探测器着陆；着陆过程；着陆难点；着陆关键技术

中图分类号：V11 **文献标志码：**A

Review of the landing Process of Mars Probe

JIANG Jingli, LIU Honglin (School of Non-Commissioned officer, Space Engineering University, Beijing 102249, China)

Abstract: With the development of space science and technology, the exploration of Mars is more and more deeply. In the process of Mars exploration, Mars probe landing is a key link. This paper focuses on the landing of Mars probe. Firstly, the landing procedure is introduced, which includes four stages: atmospheric entry, parachute deceleration, power deceleration and cushion landing. Then, the difficulties of landing procedure which causes by the far distance between Mars and Earth, the thin atmosphere of Mars and the complex environment on the surface of Mars is analyzed. At last, key technology used in the landing procedure is summarized in view of those difficulties.

Keywords: Mars probe landing; landing procedure; landing difficulties; key technology for landing

1. 引言

随着航天技术的快速发展，作为衡量一个国家综合国力的重要标志，深空探测越来越受到各个国家的关注。而火星作为地球的近邻，在所有太阳系行星中，其自转时间、昼夜长短、公转倾角等参数都与地球相近，且有很多证据表明过去的火星可能是宜居的。因而，火星是一颗承载人类最多梦想的星球，吸引了各个国家对其探测。

对火星的探测是通过向火星发射火星探测器的方式。而火星探测器从地球到达火星，首先利用火箭发射，到达火星附近被火星捕获后，按某一轨道绕火星航行，待地球下达着落命令后着陆，进而开始对火星的探测。在这个过程中，火星探测器的着陆是一个关键环节，直接影响着火星探测器发射的成败。然而，地火极远的距离及火星复杂的环境给探测器的着陆带来的极大的困难。

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

到现在为止,世界各国至少举行了 46 次火星探测任务,其中仅有 21 次取得成功,成功率不足 45%,而发射失败几乎都是发生在接近火星表面的着陆过程中^{[1][2]}。

针对上述情况,本文对火星探测器的着陆过程进行研究。首先介绍了火星探测器着陆的 4 个阶段:大气进入段、降落伞减速段、动力减速段及缓冲着陆段;而后结合实际情况分析了这 4 个过程中的可能遇到的困难;最后,针对这些难点,介绍了在这 4 个过程中利用的关键技术。

2. 着陆过程

火星探测器从在轨道绕行到着陆基本可以分为 4 个阶段:大气进入段、降落伞减速段、动力减速段及最后的缓冲着陆段^[3]。

首先,接收到着陆命令后,探测器与航天器分离,调整角度进入大气层,这个过程中探测器快速减速;但仅靠气动阻力减速,无法达到软着陆水平,因而在适当的角度打开降落伞,帮助探测器减速;而后为进一步减速,在适当高度打开

缓冲火箭,利用制动阻力进行动力减速;最后,在与火星表面接触时,利用着陆支腿、缓冲气囊等装置保护探测器,实现软着陆^[7]。

2.1 大气进入段

大气进入段,又叫高超声速段,是指火星探测器从进入大气层到降落伞完全展开的这一阶段。

首先,接收到地面的着陆命令后,在距离火星表面约 125 公里的位置,藏在进入舱中的火星探测器与携带其前往火星的航天器分离,探测器改变原有轨道,调整姿态,制动,而后转向以正确的角度进入火星大气层,以高达两万公里的时速进入火星大气层。在这个过程中,探测器主要靠火星大气进行气动减速,速度可以减小到 2Ma,动能可被消耗掉约 99%。此外,由于与大气摩擦,还产生了大量的气动热和动压,是着陆过程中气动环境最恶劣的阶段。

2.2 降落伞减速段

由于火星大气稀薄,仅仅依靠气动减速根本无法达到软着陆标准。因此,当探测器速度降到一定程度时,要利用能承受巨大压力的超音速降



降落伞继续减速。在计算好的高度，利用制动火箭打开超音速降落伞，在降落伞的帮助下，探测器继续减速。当探测器速度降到约 0.65Ma 时，为减轻自重，抛掉阻碍雷达观察地面视线的防热罩。在这个阶段，火星探测器的速度降为亚声速段。

值得注意的是，受降落伞材料和结构的限制，打开降落伞的高度和速度都要满足一定条件，若开伞高度过低，则无法使探测器在着陆时速度减为 0；若开伞高度过高，则速度可能不满足要求。这就要求根据降落伞的结构及材料、火星大气密度、风速等实际情况计算降落伞打开高度及速度，给探测器着陆带来了很大的困难。

2.3 动力减速段

经过气动减速和降落伞减速后，探测器仍有约 80m/s 的速度，此时仅依靠降落伞无法达到软着陆要求，此时，可利用发动机进行动力减速。

在适当的高度，探测器剪断降落伞，利用固体和液体发动机产生升力，进行动力减速。同时打开着陆雷达，实时观测与地面距离，为最后的缓冲着陆做准备。

2.4 缓冲着陆段

探测器经过气动阻力减速、降落伞减速及动力减速后，速度已经降到很低。但为了保证探测器安全着陆，即在到达火星表面时速度降为 0，在最后与火星表面接触的瞬間，利用缓冲装置吸收掉最后来自火星的冲撞。这个过程需要考虑初始速度、缓冲末速度、着陆环境、缓冲系统可靠性等。一般可以利用缓冲气囊、着陆支腿等方式。

这样，火星探测器经过了火星稀薄的大气，利用降落伞、制动火箭及缓冲气囊等装置减速，终于成功到达火星。然而，由于火星大气比地球稀薄得多，加上火星复杂的地表环境等因素，使得着陆过程存在重重困难。

3. 着陆难点

如今，我国已成功实现登月。与登录月球不同，地火遥远的距离、火星上空稀薄的大气及火星表

面复杂的环境，给地火通信、探测器软着陆等方面带来了极大的困难，使得登火比登月要难数十倍^[4]。现将着陆过程面临的主要难点总结如下：

3.1 地火距离遥远

火星是距离地球第二近的行星，由于两颗行星环绕太阳运行，导致火星与地球的距离大约在 5600 万 ~4 亿公里之间变化。遥远的距离导致在火星和地球通信时存在很长的时延，最短超过 3 分钟，最长甚至可以达到 23 分钟，给地球与火星之间的实时通信带来极大的困难，无法满足地面实时测控干预的条件。

因而，要根据计划发射时期的地火距离、探测器轨道参数等数据，预先给探测器注入指令。在登火过程中，探测器要自行对指令执行效果进行判断，一旦出现问题则需自行诊断和恢复。无人为干预、完全自动化的进入、减速及着陆进程对探测器的自主导航、管理与控制能力提出了更高的要求，在技术层面具有极强的难度，因而带来了极大的困难。

3.2 火星大气稀薄

火星大气密度低，仅为地球大气密度的 1%。因此，如果仅仅依靠探测器自身气动阻力进行减速，通常需要持续到一个很低的高度。这就使得在下降过程和着陆过程没有充足的时间来检测和规避危险地形、修正飞行轨迹、监测安全着陆位置等，因而仅依靠气动阻力减速，远远达不到着陆水平。在这种情况下，就需要探索其他的减速手段。除此之外，火星大气中有 95% 都是二氧化碳，在探测器进入时由于摩擦会产生大量的气动热，这就对探测器的防热系统提出了更高的要求，是着陆火星面临的又一困境^[5]。

3.3 火星表面环境复杂

火星表面遍布斜坡、高山、岩石、巨大的火山坑、沟壑等障碍物，地形非常复杂。因而在着陆时，需要精确合理的选择着陆位置，这就要求探测器具有实时对着陆地区障碍地形和着陆点进行检测、评估及轨迹规划、制导的能力。此外，由于

火星表面温度分布不均，大气运动十分剧烈，因而常常有尘暴现象出现，其平均风速可达 50m/s。这就对减速装置及着陆稳定性的设计有较高要求。

4. 关键技术

针对火星着陆的难点问题，主要可以用以下技术手段进行解决：

4.1 气动外形减速技术

从进入火星开始到降落伞开伞完成，探测器的速度从每秒几千米迅速减小到每秒几百米，这个过程主要是靠探测器的气动外形减速的。而由于火星大气稀薄，与在地球着陆相比，相同的有效载荷质量需要更大的直径外形结构，体积和质量也会相应的增加；此外，火星大气成分主要为二氧化碳。在进入过程中，探测器穿过火星大气，会产生大量的摩擦热，这就对探测器外部的防热材料提出了更高的要求。

进入火星的气动减速和热防护外形都是由探测器的弹道系数 β 决定的，研究得到， β 越小，则经气动减速后探测器所能达到的稳降速度越小。而 β 的定义为：

$$\beta = M / (C_D A) \quad (1)$$

式中， M 为探测器质量， C_D 表示阻力系数， A 为有效面积。

为充分发挥探测器的气动减速作用，使稳降速度尽可能减小，即令 β 减小，在探测器质量一定的情况下，就要使阻力系数和有效面积增大。因而，一般采用半锥角较大（头部较钝）的球锥形，一方面阻力系数随着半锥角的增大而增大，

另一方面头部钝度越大则气动摩擦热越小。目前国外较为成熟的火星探测器的半锥角一般设计为 70° [6]。当前发射成功的几种火星探测器气动外形参数如下表所示。

由表 1 可以看出，气动外形头部整体偏钝，半锥角较大，其弹道系数较小，不超过 $120 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

4.2 超音速降落伞减速技术

火星稀薄的大气使得仅仅利用自身气动阻力减速无法达到着陆要求，因而需在较低高度利用超音速降落伞进一步的减速。

由于火星的地理环境、大气成分与地球有较大差异，因而降落伞的开伞条件、开伞控制方法等都与在地球着陆有很大差别。从地球到火星，降落伞的稳定性、透气性及充气性能等都会发生变化。此外，在超声速条件下，降落伞还存在这开伞困难、不稳定及阻力系数下降等问题。在这种情况下，就对降落伞的研制提出了更高的要求，降落伞的伞舱造型、透气量、材料、包装工艺等选择，到与之相关的各项指标、参数，再到验证方法等一系列设计要素都需要精密设置 [8]。






一般对于火星探测用降落伞研制的基本思路如下 [9]：

- 1) 确定降落伞的基本构型，初步设计降落伞；
- 2) 通过风洞试验、低空和高空投放试验来分别模拟验证各单项条件的影响，并逐步改进，建立和完善物伞系统动力学理论分析模型或仿真系统；
- 3) 通过仿真系统再对进入火星大气环境条件下的物伞系统性能进行评估，并确定改进内容；
- 4) 通过风洞和空投试验来验证改进的降落伞系统；
- 5) 通过仿真系统来鉴定进入火星大气环境条件下的物伞系统的性能。

4.3 着陆缓冲技术

在探测器最终触地时，为了降低其着陆冲击，保护其不受损坏，通常利用着陆缓冲装置吸收掉最后的冲击。根据初始速度、缓冲末速度、着陆

表1 火星探测器气动外形参数
Table 1 Aerodynamic shape parameters of Mars probe

名称	海盗号	探路者	漫游者	凤凰号	好奇号
气动外形					
直径 /m	3.5	2.65	2.65	2.65	4.6
质量 /kg	990	584	830	600	2800
弹道系数 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	64	63	94	70	115

环境要求、缓冲过程姿态等因素,常用的冲击吸收方式通常包括着陆支腿、缓冲气囊等^[10]。


着陆支腿的方法是借鉴了月球探测器“勘测者”的着陆技术。着陆支腿一般由3条支腿组成:1个主承力支腿、2个侧向辅助支腿。这种方案在月球和火星着陆工程中被多次验证,可以承受很大的质量,且容易与着陆器结构集成,在美国“海盗号”及“好奇号”等火星探测器上成功使用。但也存在易受支架高度和稳定性限制的缺陷。

由于着陆支腿方案系统配置较为复杂,且存在一定的缺陷,因而后续出现了利用缓冲气囊进行着陆缓冲的方法。缓冲气囊可保护火星探测器在着陆反复弹跳过程中受到冲击而不损坏。当探测器到达适当高度时,气囊快速充气,这样,在与火星表面碰撞时,缓冲气囊通过压缩内部气体加上自身材料的弹性来吸收能量,经过多次弹跳后使载荷动能降低到零,而后气囊直接分离或完全放气,将探测器释放,进而开始对火星的探测。当前,美国的“探路者”、“勇气号”、“机遇号”,欧空局发射的“猎兔犬2号”及俄罗斯的“火星-96”都利用缓冲气囊的方式进行最后的着陆缓冲。

5. 结语

随着航空航天技术的飞速发展,人类与火星的距离越来越远。而火星探测器的着陆是探测火星的关键步骤。本文针对火星着陆过程,首先介绍了探测器着陆的4个阶段,分别为大气进入段、降落伞减速段、动力减速段及缓冲着陆段;而后分析了这4个着陆阶段中探测器存在的难点,针对这些难点,对着陆过程中的关键技术进行了总结。

人类对于火星的研究,不仅能揭示宇宙的奥秘、寻找生命之源,对于研究我们居住的地球也有重要意义。如今,美国、俄罗斯、欧洲空间局及印度已经成功登陆火星。而我国在火星探测方面虽然起步较晚,但起点很高,已于2020年7月23日将我国首个火星探测器“天问一号”发

射升空,计划一次性实现巡航、着陆及探测三大步。问天之路漫漫其修远兮,让我们一起期待着揽星九天那一天的到来! 

作者简介:

姜晶莉

航天工程大学士官学校航天测控通信系无线电测控教研室 助教

通信地址:北京市昌平区府学路7号

邮政编码:102249

联系电话:18811155185

电子邮箱:jiangjingliok@163.com

参考文献

- [1] 饶伟,孙泽洲,孟林智等.火星着陆探测任务关键环节技术途径分析[J].深空探测学报,2016,3(02):121-128.
Rai Wei, Sun Zezhou, Meng Linzhi, etc. Analysis of Key Technologies for Unmanned Mars Sample Return Mission[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2016,3(02):121-128.
- [2] 于登云,孙泽洲,孟林智等.火星探测发展历程与未来展望[J].深空探测学报,2016,3(02):108-113.
Yu Dengyun, Sun Zezhou, Meng Linzhi, etc. The Development Process and Prospects for Mars Exploration[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2016,3(02):108-113.
- [3] 崔平远,于正澍,朱圣英.火星进入段自主导航技术研究现状与展望[J].宇航学报,2013,34(04):447-456.
Cui Pingyuan, Yu Zhengshi, Zhu Shengying. Research Progress and Prospect of Autonomous Navigation Techniques for Mars Entry Phase[J]. Journal of Astronautics, 2013,34(04):447-456.
- [4] 董捷,饶伟,王闯等.国外火星探测典型失败案例分析与应对策略研究[J].航天器工程,2019,28(05):122-129.
Dong Jie, Rao Wei, Wang Chuang, etc. Research on the Typical Failure Cases and Coping Strategy of Foreign Mars Exploration[J]. Spacecraft Engineering, 2019,28(05):122-129.
- [5] 蔡震波,曲少杰.火星探测器全任务期环境特征与防护要点[J].航天器环境工程,2019,36(06):542-548.
Cai Zhenbo, Qu Shaojie. Space Environment Characteristics and Key Points in Space Environmental Protection Design for Mars Probe Mission[J]. Spacecraft Engineering, 2019,36(06):542-548.
- [6] 贾贺,荣伟.火星探测器减速着陆技术分析[J].航天返回与遥感,2010,31(03):6-14.
Jia He, Rong Wei. Mars Exploration Deceleration Landing Technology Analysis[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2010,31(03):6-14.
- [7] 高滨.火星探测器着陆技术[J].航天返回与遥感,2009,30(01):1-9+20.
Gao Bin. Mars Exploration Entry, Descent and Landing Technologies[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2009,30(01):1-9+20.
- [8] 荣伟,鲁媛媛,包进进等.火星探测器减速着陆过程中若干问题的研究[J].南京航空航天大学学报,2016,48(04):445-453.
Rong Wei, Lu Yuanyuan, Bao Jinjin, etc. Several Problems Relative with Descent and Landing Process of Mars Explorer[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2016,48(04):445-453.
- [9] 荣伟,陈国良.火星探测器减速着陆技术特点[J].航天返回与遥感,2010,31(04):1-6.
Rong Wei, Chen Guoliang. The Characters of Deceleration and Landing Technology on Mars Explorer[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2010,31(04):1-6.
- [10] 韩鸿硕,王一然,蒋宇平等.国外深空探测器着陆缓冲系统的特点和应用[J].航天器工程,2012,21(06):7-24.
Han Hongshuo, Wang Yiran, Jiang Yuping, etc. Characteristics and Application of Deep-space Explorer Landing Impact Attenuation System[J]. Spacecraft Engineering, 2012,21(06):7-24.