

## 科技新闻

## ·深度报道·

# 用行星大气“刹车”：大气制动如何改写深空探测的轨道方案

文/董捷<sup>1</sup>,张海洋<sup>2</sup>

在深空探测任务中,航天器从行星际转移轨道进入环绕轨道,往往需要通过长时间点火减速。推进剂质量不仅直接决定了运载火箭的发射能力需求,也制约着航天器可搭载的科学载荷规模。如何在不显著增加航天器质量的前提下完成大尺度轨道调整,是行星探测工程长期面临的关键问题之一。

大气制动(aerobraking)为这一问题提供了一条不同于传统推进制动的技术路径。该技术利用行星稀薄大气在航天器近行星点飞行时产生的气动阻力,将航天器的轨道动能逐步转化为热能并耗散,从而在多次绕飞过程中持续降低轨道远心点高度。相比完全依赖推进系统的减速方式,该技术可

提供超过 1000 m/s 的减速量,而过程中所需推进剂等效的速度增量仅为几十 m/s,这使其在轨道设计优化和任务成本控制方面具有显著优势。大气制动过程如下图所示。目前该技术已在金星和火星的多项遥感探测任务中得到实际应用,验证了其工程可行性。

## 1 在大气边缘“走钢丝”

典型的大气制动过程可分为初始步入阶段、稳定减速阶段和步出阶段。航天器在每一圈轨道的近心点附近短暂进入大气层,在可控的气动力和热载荷条件下完成少量减速,随后回到远离大气的轨道高度。这一过程往往需要持续数周甚至数月,通过多圈累积效应实现轨道能量的大幅

削减。

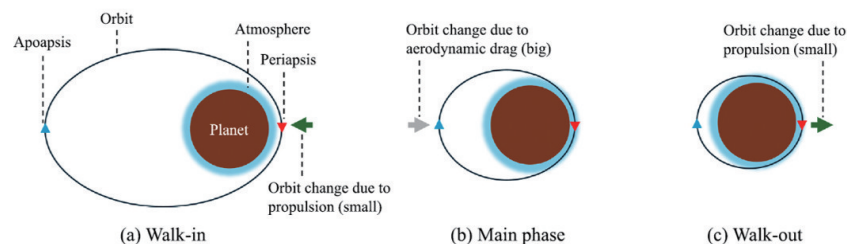
为确保航天器安全运行,工程上引入了“大气制动走廊”的概念。这里的“走廊”是指航天器近心点高度必须控制在一个有限区间内:进入过深,气动力和热流可能超过结构与防热系统的承受能力;进入过浅,则减速效果不足,导致制动周期显著延长。如何在 uncertain 的大气环境中始终将航天器保持在这一安全走廊内,是大气制动任务的核心控制问题。

## 2 不确定性带来的工程挑战

2025 年 12 月,日本东京大学的 Maximilien Berthet 在《Acta Astronautica》发表综述,指出大气制动面临的挑战主要集中在气动力与热环境控制、大气密度不确定性、轨道与姿态协同控制及地面运行复杂性等方面。

以火星任务为例,美国喷气推进实验室 David A. Spencer 等提出大气制动的 5 大风险。不同轨道圈次之间的大气密度变化幅度可超过 100%,现有大气模型(如 MarsGRAM)在局部、短期预测方面仍存在明显误差。这意味着航天器在连续 2 次进入火星大气时,可能遭遇强度差异巨大的气动环境。与此同时,太阳翼等结构部件在大气制动中既是产生阻力的关键部件,也是最为脆弱的受力与受热单元,其安全裕度直接关系任务成败。

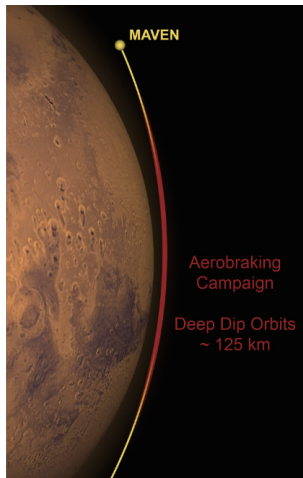
在大气制动后期,随着轨道逐渐收缩,轨道周期明显缩短,航天器姿态调整频繁,对地通信窗口经常性中断,地面团队难以及时评估减速效果并上传控制指令,操作



大气制动过程

(图片来源:《Advances in Space Research》)

1. 北京空间飞行器总体设计部,研究员,  
《科技导报》青年编委
2. 北京空间飞行器总体设计部,工程师



MAVEN 火星大气层减速计划:利用大气制动,MAVEN 飞行器执行一系列“深俯冲”轨道,最低高度接近火星表面约 125 km,利用大气阻力减缓飞行器速度

(图片来源:美国航空航天局)

压力显著增加。欧洲火星痕量气体轨道器(ExoMars TGO)的在轨实践显示,为应对火星大气的高度不确定性,任务设计中不得不引入高达 150% 的安全余量,并依赖高精度加速度计持续修正大气模型和制动走廊参数。

此外,欧空局飞控任务专家 Gabriele Bellei 还在第 18 届澳大利亚国际航空航天大会,强调在大气制动过程中,航天器应具有高姿态机动能力、低弹道系数(指航天器质量/阻力面积。数值越小,大气阻力减速能力越强,热流越小),以及防热能力。其中快速姿态机动可以增加穿越大气前后定轨和测控的时间,这对于大气制动末期的短周期轨道尤其重要。低弹道系数和防热能力则可增加每次穿越大气的速度增量,缩短大气制动操作总时间,减少人力和操作风险。

### 3 从“人工操作”走向“自主控制” 针对制动周期长、操作复杂

度高等问题,研究人员正在探索多种技术路径以提升大气制动的效率与安全性。

在控制策略方面,为显著缩短减速时间,伊利诺伊大学 Giusy Falcone 等在《Journal of Guidance, Control and Dynamics》发文,提出通过调节太阳翼相对来流的攻角来主动改变气动阻力,使航天器在较低近心点高度下仍能满足气动力和热约束。米兰理工大学的 Alban Beshaj 等还在《Advances in Space Research》发文,通过引入深度强化学习方法,在仅略微增加推进剂消耗的前提下,优化远心点机动策略,可同时避免热流超限。此外,NASA 兰利研究中心的 Jill L. Prince 等在《Journal of Spacecraft and Rockets》报道,开发了基于高精度有限元热分析结果构建的简化温度模型,用于航天器自主规划大气制动过程,可有效减少设计余量。

在航天器构型层面,小卫星与空间帆的结合被视为一个具有潜力的发展方向。质量小、弹道系数低、转动惯量小的航天器,更有利于获得较大的气动减速效果,同时具备更高的姿态机动能力,已开始在近地轨道任务结束后的离轨和太空碎片清除任务中进行验证。相关结果表明,配置空间帆的小型航天器可在更高的近心点高度完成有效减速,并显著缩短制动周期。但仍须解决步入与步出阶段的速度增量获取,以及太阳光压干扰下的姿态控制问题。由于小卫星推进系统规模有限,需要研究借助轨道摄动的方法。

### 4 面向未来的深空任务

目前,大气制动技术主要针对地球、金星和火星环绕任务中开展工程应用,未来还可以推广至火星取样返回,以及木星、土星、天王星、海王星等其他具备大气层的天体探测任务。

中国已经规划了“天问三号”火星取样返回任务,北京空间飞行器总体设计部孙泽洲在《深空探测学报》指出,大气制动技术可用于轨返组合体从大椭圆轨道进入开展中继和交会的低高度近圆轨道,以解决现有运载能力不足的问题;其技术相对成熟,重点针对减速时间、气动力/热约束,定期开展近火点高度预计及轨道控制,对太阳翼及航天器本体进行必要的热防护。

美国国家科学院发布的 2023—2032 年行星科学任务规划、欧空局发布的空间科学中长期发展规划均提出了天王星和海王星等冰巨星及土卫六探测计划,杨孟飞团队也提出相应任务设想。在这些天体实施大气制动,面临的器地通信时延更大、大气模型认知更为有限,需要极强的自主执行能力以提高任务安全性与执行效率。

总体来看,大气制动通过充分利用行星大气“环境资源”,以极少的推进剂实现大规模轨道调整,为降低航天器规模和任务成本、突破运载能力瓶颈提供了新的技术路径。随着行星大气观测能力的提升、自主控制技术的发展,以及小型航天器与空间帆的应用深化,这一技术有望在未来深空探测工程中发挥更加重要的作用。