

# 基于加速度计反演火星大气密度方法研究

曹沐 杨瑞强

(兰州空间技术物理研究所 兰州 730000)

**摘要:** 通过分析国外利用惯导数据反演火星大气密度的方法,提出了直接利用加速度计数据反演火星大气密度的方法。对加速度计反演火星大气密度方法原理和可行性进行了详细讨论和分析。根据美国“凤凰号”火星探测器以及美国火星全球参考大气模型(MarsGRAM)数据对反演所用加速度计的分辨率指标做出了最低要求,加速度计分辨率指标高于 0.000 1 G,相应反演的大气密度分辨率达到 MarsGRAM 相应数据指标。对比“凤凰号”IMU 数据,证明了采用该指标的加速度计完全可以直接用来进行火星大气密度反演。

**关键词:** 火星;大气密度;加速度计;分辨率

**中图分类号:** V416.8   **文献标识码:** A   **国家标准学科分类代码:** 590.99

## Research of martian atmospheric reconstruction based on accelerometer

Cao Mu Yang Ruiqiang

(Lanzhou Institute of Physics, CAST, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** The experimental method is performed pertaining to reconstruct Martian atmospheric density based on accelerometer by analyzing inertial data in abroad and its principle and feasibility have been discussed. According to the data of Phoenix Mars lander and MarsGRAM, the minimum indicators for the resolution of accelerometer is required to higher than 0.000 1 G and corresponding to the data of MarsGRAM. Compared with the data of Phoenix Mars lander, it demonstrates that accelerometer can be used to reconstruct Martian atmospheric density.

**Keywords:** Mars; atmospheric density; accelerometer; resolution

## 1 引言

火星大气密度结构是火星探测任务中一项必不可少的探测内容,它不仅在科学研究上具有重要意义,同时也是火星探测器着陆成败的关键。目前,我国并没有建立统一自主的火星大气数据,下一步,通过火星探测获取数据建立火星大气模型是我国开展火星探测的必要环节。

火星大气密度约为地球的 1%,大气活动受多种因素影响,如季节、经纬度、日火距离的变化,都会使火星空间大气状态产生变化,情况较地球更为频繁复杂,大气中悬浮的尘埃也会影响大气层结构和大气环流,影响程度也比地球上大得多<sup>[1]</sup>。许多在地球上适用的探测方法并不能在火星上展开。并且,对于深空探测器而言,对重量和功耗有极为严格的限制。这些因素都加大了火星大气探测器的研制难度。目前,国内外火星大气探测主要应用以下 3 种方法:在环绕过程应用无线电掩星法、在下降过程中应用测量的加速度数据反演火星大气垂直结构分布和着陆后应用传感器测量火星表面大气压力、温度的方法<sup>[2-3]</sup>。无线电掩星法和

传感器测量法主要是针对火星大气剖面以及电离层和火星地表大气的探测<sup>[4]</sup>,而对于火星大气结构分布的精确探测,尤其是火星大气密度垂直分布难以形成有效测量<sup>[5]</sup>。因此,利用加速度数据反演火星大气密度对于火星大气垂直分布的探测是一种有效手段。

## 2 理论方法研究

目前,国外关于惯性数据反演大气测量法在火星大气测量的应用上主要利用安装在着陆器上的惯性轨迹测量单元(IMU),它由 3 轴加速度计和陀螺仪组成,反演时可以通过对 IMU 所测加速度数据做一系列换算得到阻力加速度数据和速度数据,进而反演得到大气密度,如图 1 所示。该方法可直接利用着陆器上现有 IMU 进行数据采集,美国成功着陆火星的探测器包括“海盗号”、“凤凰号”、“好奇号”等都采用这种方法。但是该方法反演过程复杂、分辨率受到限制。为此提出一种直接利用 3 轴加速度计数据的反演方法,该方法不含陀螺仪,只包含 1 个非保守力 3 轴加速度计,一般规格的导航加速度计价格仅为陀螺仪的 1/10,结

构简单,体积、质量小<sup>[6]</sup>,且非保守力加速度计所测加速度即为阻力加速度,不含重力等其他因素,不需要处理换算,利于提高反演分辨率,非常适合于深空探测,如图 2 所示。本文主要针对该方法的原理实现做一些探讨。同时,利用美国“凤凰号”火星探测器数据和美国火星全球参考大气模型(MarsGRAM)数据计算未来应用于火星大气密度反演的加速度计的最小分辨率,计算结果与“凤凰号”惯导系统分辨率数据对比,分析结果。

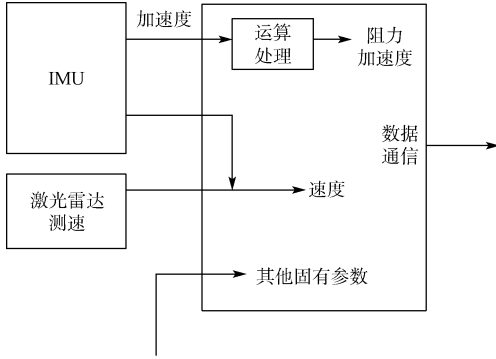


图 1 利用 IMU 数据反演大气密度方法

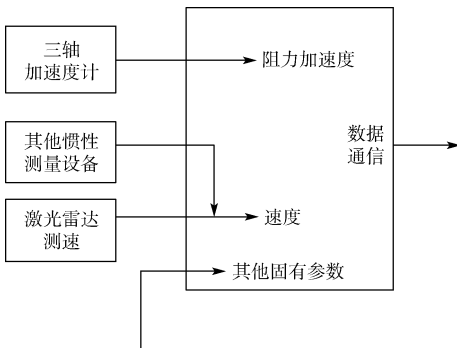


图 2 利用加速度计反演大气密度方法

## 2.1 反演原理

火星探测器的软着陆过程与载人飞船返回地球的过程十分相似,着陆方式分为弹道式、弹道半升力式,整个过程如图 3 所示,分为接近段、进入段、降落伞减速段和动力下降段。其中进入段到动力下降段又被称为 EDL (entry descent and landing)。

1)接近段(entry prep phase)。从轨道器与探测器分离开始直到探测器与火星大气接触(约 125 km 高度)。2)进入段(Hypersonic Phase)。从距离火星地表 125 km 的位置到开伞为止。期间探测器相对于火星的速度为 4~7 km/s,除气动减速之外,不施加其他减速措施。3)降落伞减速段(parachute phase)。从开伞至距离火星地表 5~20 km 的位置。4)动力下降段(terminal descent phase)。此过程通常借助其他外力减速到零。

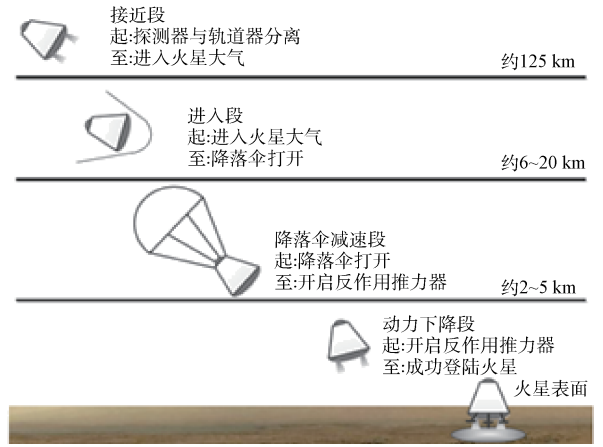


图 3 火星探测器着陆过程示意图

从上述可知,EDL 进入段是着陆器无动力飞行过程,着陆器所受非保守力包括气动阻力、火星反照辐射压。对着陆器而言,火星反照辐射压很小,比气动阻力小 3~4 个数量级,计算时可以忽略它。所以该阶段着陆器所受阻力只有气动阻力,完全可以通过加速度计直接测量。根据空气动力学,当飞行器在空气中的速度大于 2 mach 时,气动阻力加速度可由如下公式:

$$u = \frac{1}{2} \rho v^2 \frac{C_D S}{m} \quad (1)$$

式中: $u$  为阻力加速度, $S$  为参考面积(着陆器沿速度方向的投影面积), $m$  为探测器质量, $\rho$  为大气密度, $v$  为着陆器速度, $C_D$  为阻力系数。而着陆器在 EDL 进入段速度远大于 2 mach,所以可以通过式(1)由阻力加速度反演大气密度。

式(1)中,为了获得大气密度,必须在反演时同时获得探测器的质量  $m$ 、迎风面积  $S$ 、阻力系数  $C_D$  及速度  $v$ ,其中探测器的质量  $m$  和迎风面积  $S$  可由地面实验直接获得,而阻力系数  $C_D$  及速度  $v$  两个变量则是判定反演数据精度高低的关键,需要做更讨论。

## 2.2 阻力系数的确定

阻力系数主要由 4 个变量影响,大气声速、雷诺数、气体组成以及探测器进入攻角<sup>[7]</sup>。一般情况下,在反演时需要明确变量的变化情况来确定每一刻的阻力系数。然而,当探测器以超高音速进入大气时,由于探测器本身是高宽长比的钝体,强大的大气阻力形成的阻力系数几乎与大气声速无关;同时粘性阻力对探测器的影响也变得非常小,这样雷诺数对阻力系数的影响可以忽略;另外,在这个条件下,气体组成对阻力系数的相对影响也较小。另一方面,由于火星大气密度较小,为了使探测器气动减速,探测器需要更大的高宽长比以扩大迎风面积,同时探测器进入火星的速度也远大于声速。由于以上两个因素,所以在火星探测中,大气声速、雷诺数和气体组成对阻力系数的影响非常小。

除了上述 3 个变量,对阻力系数影响较大的变量仅有探测器进入段攻角的变化。根据经验公式,排除其他变量,钝体飞行器阻力系数随攻角的变化情况近似依赖于攻角改变时升力和攻角的变化情况,如下式:

$$C_D = C_{D_{\infty}} + C_L \alpha^2 \quad (2)$$

式中: $C_D$  为阻力系数、 $C_L$  为升力线斜率、 $\alpha$  为攻角。 $C_{D_{\infty}}$  为攻角为 0 即没有升力时的阻力系数,通过此经验公式,可以通过对攻角和升力的计算而近似得出弹道半升力式探测器的阻力系数。

### 2.3 速度的确定

反演时同样需要确定每一刻探测器的速度。探测器在 EDL 进入段速度的测量主要通过 3 种方式。一是通过加速度计或者 IMU 惯性组件得到速度数据,由于加速度计可以测量加速度,同样对于进入火星大气后的探测器速度如下式:

$$V = V_E + \int_0^t a_s dt \quad (3)$$

式中: $V$  是探测器相对大气速度, $V_E$  是探测器进入火星大气即  $t=0$  时的速度, $a_s$  是加速度对探测器的轴向分量。这种自助测速方法受初值影响,且误差随时间积累,测量精度差,需要对数据做出不断的修正。还有两种测量方式包括无线电测速法以及利用皮托压力计(Pitot-static system)测量空速。无线电测速主要利用火星轨道上已有的航天器和火星陆地已有信标,根据多普勒效应,通过发射无线电发射与接收的频率变化计算径向速度,它的主要问题是 EDL 进入段的通信黑障。皮托压力计(空速管)性测量的补充。上述 3 种方式互有优劣,在实际导航、反演中通常同时启用,互为补充。以 3 轴加速度计数据反演大气密度时,速度数据主要利用惯性数据和激光雷达的结和。目前在美国最新一代火星探测器“好奇号”上还启用了包括光学导航相机、激光雷达等新型速度测量装置<sup>[8]</sup>。

### 3 加速度计的分辨率指标

通过式(1)及上述讨论可知,采用加速度计反演的大气密度分辨率与加速度计的分辨率和误差密切相关,且随着反演传递累积<sup>[9-10]</sup>。为了得到较为精确的大气密度,必须对反演所用加速度计分辨率指标做一定要求。

火星大气反演所用加速度计主要工作时段在火星登陆 EDL 进入段,进入段始于进入点( $h=125$  km,  $V=5\sim 7$  km/s,  $FPA=-10^\circ\sim -20^\circ$ ),结束于降落伞展开。该阶段着陆器利用大气阻力进行减速,将速度从  $6\sim 7$  km/s 减到开伞条件(mach 数 2 左右)<sup>[11]</sup>。在这个阶段飞行器超声速飞行,动力学模型高度非线性化,大气环境模型有很多不确定因素和干扰,期间经历热流峰值、过载峰值,阻力加速度变化大,是火星着陆过程中气动环境最恶劣的阶段,也是最为重要的阶段。

通过调研美国历史上成功着陆火星表面的探测器在

EDL 进入段的主要技术参数。2008 年着陆火星的“凤凰号”进入方式为弹道半升力式,进入质量较低,与我国未来计划开展的火星着陆方式最为接近。所以本文以“凤凰号”为模型数据,研究和分析进入段利用加速度计反演火星大气密度的可行性以及加速度计所需的分辨率。

根据“凤凰号”数据模型,采集系统从着陆器进入火星大气开机(距离火星表面 125 km,速度为 5.6 km/s,飞行路径角  $\gamma=-13.0^\circ$ ),到降落伞降落阶段关机(距离火星表面 13.4 km,速度降为 1.74 mach),整个过程历时 221 s<sup>[11]</sup>。

着陆器 EDL 进入段所受阻力加速度主要通过式(1)表示,其中:

$$\beta = \frac{m}{C_D S} \quad (4)$$

称为弹道系数,它由着陆器质量、阻力系数和迎风面积组成,决定了 EDL 降落阶段的开伞海拔,与阻力加速度成反比。弹道系数较小时,着陆器会在更高海拔便开始减速,进入段中产生更小的峰值热流和峰值阻力加速度。为了减小弹道系数,着陆器通常需要更小的质量和更大的迎风面积即着陆器的外壳直径,然而增大外壳直径又是对深空运载能力的挑战。美国过去从“海盗号”到“凤凰号”的外壳直径都在 2.65 m,弹道系数在  $60\sim 90$  kg/m<sup>2</sup>。在 EDL 进入段弹道系数会随着攻角的不同产生微小变化,在此处可以将其视为常值。

将式(4)代入式(1),得:

$$\rho = \frac{2\beta u}{v^2} \quad (5)$$

由于大气密度  $\rho$  是通过对着陆器所受阻力加速度  $u$  以及速度  $v$  的实时测量反演而得。所以加速度计要满足一定分辨率才能精确反映大气密度变化情况,将式(5)中  $\rho$  对加速度求偏导,得:

$$\frac{\partial \rho(u, v)}{\partial u} = \frac{2\beta}{v^2} \quad (6)$$

由上式可知,EDL 进入段大气密度  $\rho$  随加速度  $u$  的变化率为,对于“凤凰号”来说:

$$\frac{\partial \rho(u, v)}{\partial u} = \frac{140}{v^2} \quad (7)$$

可见,随着着陆器进入火星大气层,大气密度是随阻力加速度的变化率随着着陆器速度的不断减小而增大。

$$\frac{\partial \rho(u, v)}{\partial u} = \lim_{\Delta u \rightarrow 0} \frac{\rho((u + \Delta u), v) - \rho(u, v)}{\Delta u} = \frac{140}{v^2} \quad (8)$$

由式(8)可知,当所测加速度变化较小时,即可认为式(8)中  $\Delta u$  约等于加速度的分辨率,这样就可以通过由所要求的火星大气密度分辨率反推加速度的变化率,即加速度计的分辨率,如下式:

$$\lim_{\Delta u \rightarrow 0} \Delta u = \lim_{\Delta u \rightarrow 0} \Delta \rho / \frac{\partial \rho(u, v)}{\partial u} \approx \Delta \rho / \frac{140}{v^2} \quad (9)$$

式中: $\Delta \rho$  为加速度微小变化时相应大气密度的变化。可以根据“凤凰号”EDL 进入段数据估算“凤凰号”在相应速度

下加速度计的最小变化率,如:着陆器刚进入火星大气时, $h=125\text{ km}$ , $v=5.6\text{ km/s}$ 。

$$\Delta u \Big|_{v=5.600} \approx \Delta \rho / \frac{140}{v^2} = 224\ 000 \Delta \rho \quad (10)$$

着陆器结束 EDL 进入段, $h=12.9\text{ km}$ , $v=1.65\text{ mach}=364\text{ m/s}$ 。

$$\Delta u \Big|_{v=364} \approx 946.4 \Delta \rho \quad (11)$$

由式(1)可以由所要求密度分辨率通过式(9)推出不同阶段加速度计的测量分辨率。如,当海拔高度在  $12.9\text{ km}$  (即“凤凰号”刚结束 EDL 进入段),根据美国火星全球参考大气模型(MarsGRAM)数据, $\rho=4.650 \times 10^{-3}\text{ kg/m}^3$ , $\Delta \rho=0.001 \times 10^{-3}\text{ kg/m}^3$ 。通过式(11)得 $\Delta u \Big|_{v=364}=9.464 \times 10^{-4}\text{ m/s}^2$ ,即约  $0.000\ 1\text{ G}$ 。进一步,由式(9)可简单推得,在 EDL 进入段随着着陆器速度的减小,所要求加速度计的最小分辨率是不断变小的,也就是说 EDL 进入段整个过程中都大于(EDL 进入段结束时)。所以认为加速度计的测量分辨率要高于最小值  $0.000\ 1\text{ G}$ 。

#### 4 结 论

据相关文献,“凤凰号”的加速度数据是由惯导系统输出的速度变化量间接得到,的最小变化量即分辨率为  $2.7\text{ mm/s}$ ,其中噪声水平约为  $0.075\ 3\text{ mm/s}$ ,由此数据反演构建的大气密度分辨率约为  $2 \times 10^{-6}\text{ kg/m}^3$ <sup>[11]</sup>,与上述初步推得由加速度计反演所得大气密度分辨率数据  $1 \times 10^{-6}\text{ kg/m}^3$  相接近。即可认为当加速度分辨率高于  $0.000\ 1\text{ G}$ 时,完全可以用于反演火星大气密度。而且相对于“凤凰号”的 IMU 系统,直接采用高分辨率 3 轴加速度计反演能得到更高的大气密度分辨率。

本文分析研究了国外利用惯导数据反演火星大气密度的方法,提出了直接利用加速度计数据反演的方法。对加速度计反演火星大气密度方法原理和可行性进行了详细讨论和分析,以此为基础对反演所用加速度计的分辨率指标做出了最低要求。证明了采用该指标的加速度计完全可以用来进行火星大气密度反演,且能达到 MarsGRAM 相应数据标准。相对于以 IMU 作为加速度采集系统,直接利用 3 轴加速度计更利于提高测量大气密度的分辨率。为我国未来开

展火星探测以及建立火星大气模型提供了一定的技术手段。

#### 参考文献

- [1] 欧阳自远,肖福根. 火星探测的主要科学问题[J]. 航天器环境工程,2011,28(3):209-218.
- [2] 白伟华,孙越强,朱光武,等. 星星间无线电掩星探测火星电离层的仿真[J]. 系统仿真学报,2009(10):71-73.
- [3] 贺晓雷,迟晓珠,唐胜武,等. 一种新型高精度大气压力传感器的研究. 电子测量技术,2012,35(6):1-4.
- [4] 杜起飞,孙越强,陶鹏,等. 萤火一号火星探测器星星掩星接收机设计与实现[J]. 上海航天,2013,30(4):192-194.
- [5] 张素君,史弦,平劲松. 基于 MGS 探测器掩星观测的火星电离层数据初步分析[J]. 天文学进展,2009,7(3):280-284.
- [6] 冯玉光,单珊,奚文骏. MEMS 在运动轨迹显示中的应用[J]. 国外电子测量技术,2015,34(6):77-81.
- [7] 周美江. 火星 EDL 轨迹优化和进入制导研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.
- [8] 彭玉明. 新型火星 EDL 导航、制导与控制技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2011.
- [9] 许高斌,李新,陈兴,等. 三轴电容式微加速度计接口 ASIC 设计[J]. 电子测量与仪器学报,2015,29(7):978-987.
- [10] 尤晶晶,李成刚,吴洪涛,等. 并联式六维加速度传感器的混合解耦及误差自补偿算法[J]. 仪器仪表学报,2015,36(10):2249-2257.
- [11] BLANCHARD R C, DESAI P N. Mars phoenix entry, descent, and landing trajectory and atmosphere reconstruction[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2011,48(5):809-821.

#### 作者简介

曹沐,工学硕士,就读于中国空间技术研究院兰州空间技术物理研究所,主要研究方向为空间电子技术。

E-mail:laochaiccz@163.com