

Zhou Bin, Zhao Hua, Wang Jindong, Chen Siwen, Liao Huaizhe, Zhu Guangwu, Wang Chi, Zhang Xin, Li Lei, Sun Yueqiang, Feng Yongyong, Zhou Jingxuan, Tao Ran. Martian space environment magnetic field investigation: high accuracy magnetometer. *Chin. J. Space Sci.*, 2009, **29**(5): 467-474

火星空间环境磁场探测研究——高精度磁强计^{*}

周 斌 赵 华 王劲东 陈斯文 廖怀哲 朱光武 王 赤
张 鑫 李 磊 孙越强 冯永勇 周敬萱 陶 然

(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100190)

摘 要 萤火一号卫星将对火星空间环境磁场实施探测. 火星磁场对火星弓激波、磁鞘、电离层、大气等绝大多数空间环境效应都具有重要影响, 萤火一号对火星磁场的探测是通过搭载于其上的科学载荷磁强计来实现的. 此磁强计在工作原理及具体设计上, 考虑了火星轨道严酷的工作环境和科学目标所需的测量要求. 通过装星前的地面标定测试, 验证了萤火一号磁强计可以在 $-130\sim 75^{\circ}\text{C}$ 温度范围内测量 $\pm 256\text{ nT}$ 以内的磁场, 分辨率可达到 0.01 nT , 带宽内总噪声小于 0.03 nT , 能够满足萤火一号对火星空间环境探测的需求.

关键词 火星探测; 磁场探测; 磁通门磁强计

中图法分类号 P 35

Martian Space Environment Magnetic Field Investigation— High Accuracy Magnetometer

ZHOU Bin ZHAO Hua WANG Jindong CHEN Siwen LIAO Huaizhe
ZHU Guangwu WANG Chi ZHANG Xin LI Lei SUN Yueqiang
FENG Yongyong ZHOU Jingxuan TAO Ran

(Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

Abstract This paper presents the purpose, design and methods of the exploration of Martian Space Environmental Magnetic Field by Yinghuo-1 (YH-1). YH-1 is the first Chinese Martian Space Environment Exploration Orbiter, which would be launched with Russian spacecraft “Phobos-Grunt” in October, 2009, and will reach Mars orbit in September, 2010. The main scientific objectives of the YH-1 mission are related with Martian space magnetic field structure and dynamic processes, and a fluxgate magnetometer was considered to be one of the most import payloads in the YH-1 orbiter. The instrument is designed to work in harsh environment around Mars orbit and to collect high resolution data in operational orbit. Two three-component fluxgate type sensors are installed in one boom with separation distance of 45 cm , and gradiometer mode is used to minimize the remnant field

^{*} 中国科学院创新方向性项目 (KJCX2-YW-T13)

2009-06-03 收到原稿

E-mail: zhoubin@cssar.ac.cn

of platform. The boom is located at the tip of the deployable solar panel, and the distance between the center of the spacecraft and the outer sensor is about 3.2 m. The operation temperature of YH-1 magnetometer sensors is expected in the range $-130\sim+75^{\circ}\text{C}$ and the dynamic range is $\pm 256\text{ nT}$ in 16-bit resolution. With a very low noise level below $0.01\text{ nT}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$, this magnetometer can measure three-component magnetic field from DC to 10 Hz. The magnetometer will work together with a Plasma Package onboard this orbiter to complete exploration of Martian space environment. The total mass of this magnetometer package is about 2.5 kg, and power consumption is 6.8 W.

Key words Mars exploration, Magnetic field exploration, Fluxgate magnetometer

1 引言

对火星的磁场、大气和气候、空间环境、地貌等问题的研究及掌握其规律是火星探测的重要内容. 在众多的火星探测研究方向中我们以火星空间环境探测为切入点, 研究火星空间环境的大尺度结构及其对太阳风扰动的响应过程 and 变化规律; 研究火星大气中粒子逃逸机制及其对火星水体损失的影响. 中国研制的萤火一号小卫星将随俄罗斯的 Phobos-Grunt 探测器一起进入环绕火星轨道, 对火星的空间环境如火星的弓激波、火星磁鞘、火星层、电离层等进行独立深入的探测研究. 为了实现这些探测研究任务, 萤火一号探测器上搭载了不同功能的探测仪器, 其中探测火星空间磁场的仪器是一台高精度磁通门磁强计.

火星上稀薄大气中的中性成分在太阳极紫外辐射或高能沉降电子的作用下产生电离, 便形成了电离层. 观测表明, 火星全球性的固有磁场很小 (约小于 5 nT)^[1]. 因此, 在高速太阳风等离子体中, 火星就像一个导电的球体. 导电的电离层处在运动着的太阳风磁场中, 电离层内产生电流, 电流又形成感应磁场. 这个磁场使得太阳风等离子体和行星际磁场无法进入到火星表面附近几百公里的范围内. 太阳风遇到障碍后, 减速并产生方向偏转, 在行星的上游形成一个弓激波, 在激波和电离层之间形成一个区域, 即磁鞘. 由于火星全球性固有磁场很小, 因此火星和太阳风的相互作用过程与地球和太阳风的相互作用有很大的不同. 火星与太阳风相互作用形成的感应磁层无论是从尺度或结构上都与地球磁层有着根本性的区别. 和地球一样, 火星附近的磁场分布对火星附近的粒子分布起着关键的作用. 因此, 要研究火星附近等离子体的分布、火星离子的逃逸、太阳风传入

火星电离层、火星磁尾内粒子的加速机制、火星磁尾电子的沉降等问题, 都需要了解火星附近的磁场分布^[2-3].

萤火一号卫星将实施一系列科学探测^[2], 包括对火星的空间环境, 如火星的弓激波、火星磁鞘、火星层、电离层等进行独立深入的探测研究; 探测火星磁层的形状及结构、各空间区域等离子体特性及其对太阳风扰动的响应过程 and 变化规律; 探测火星离子逃逸的物理过程和输运机制对火星表面水损失途径和机制的影响, 以及空间环境对火星生命可能存在的影响; 针对太阳风与具有弱内禀磁场的火星空间环境的相互作用, 开展比较行星学的研究, 揭示类地行星的空间环境演化特征及其规律.

2 萤火一号磁强计的原理和构成

2.1 萤火一号磁强计的基本原理

萤火一号磁强计的设计性能参数列于表 1^[4].

火星空间磁场探测需要测量绝对值小于 256 nT 的磁场矢量, 适合采用磁通门原理的传感器. 磁通门传感器的构造如图 1 所示, 分为 3 个线圈, 激励线圈, 信号线圈和反馈线圈. 其中激励线圈产生激励磁场, 信号线圈中产生的感应电动势信号包了含磁场强度的信息, 反馈线圈的作用是为传感器内部提供反馈磁场和补偿磁场.

磁通门技术是利用法拉第电磁感应定律测量外界磁场强度. 根据法拉第电磁感应定律, 感应线圈上的感应电动势可以表示为

$$e = 10^{-8} \frac{d}{dt} (w \mu H_d S). \quad (1)$$

其中, w 为感应线圈匝数, μ 为磁导率, H_d 为激励磁

表 1 萤火一号卫星磁强计性能指标

Table 1 YH-1 magnetometer performance characteristics

性能指标	设计参数
测量范围/nT	-256 ~ 256
测量分辨率/nT	0.01
1Hz 点处频谱噪声/(nT·Hz ^{-1/2})	<0.01
带宽内总噪声/nT	<0.1
精度/nT	<0.125

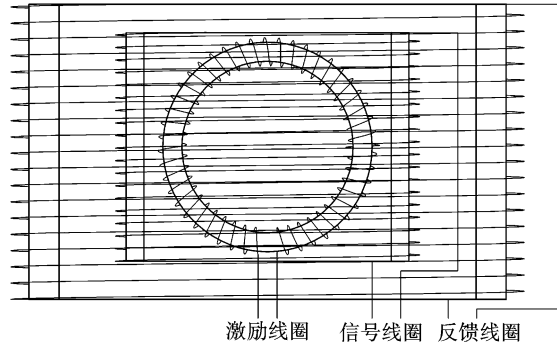


图 1 磁通门磁强计探头内部构造

Fig. 1 Inner structure of fluxgate magnetometer

场, S 为铁芯横截面积. 激励磁场一般采用正弦或者方波, 为了说明问题, 下面假定激励磁场的形式为

$$H_d = H_m \cos 2\pi f_0 t. \quad (2)$$

那么, 如果考虑到外部环境磁场 H_0 , 则式 (1) 可以推导为

$$e = 2\pi \times 10^{-8} f_0 \mu w S H_m \sin 2\pi f_0 t - 10^{-8} [d\mu(t)/dt] w S H_m \cos \pi f_0 t - 10^{-8} [d\mu(t)/dt] w S H_0. \quad (3)$$

激励磁场瞬时值方向呈周期性变化, 随之而变的铁芯磁导率 $\mu(t)$ 却无正负之分. 所以 $\mu(t)$ 为偶函数, H_0 比铁芯饱和磁场强度 H_s 和激励磁场强度幅值 H_m 小时, 忽略其对铁芯磁导率 $\mu(t)$ 的影响, 将 $\mu(t)$ 展开为傅里叶级数

$$\mu(t) = \mu_{0m} + \mu_{2m} \cos 4\pi f_0 t + \mu_{4m} \cos 8\pi f_0 t. \quad (4)$$

将式 (4) 代入式 (3) 可知由激励磁场而产生的感应电动势是奇次谐波, 而由环境磁场引起的感应电动势 $e(H_0)$ 为偶次谐波, 可表示为

$$e(H_0) = -2\pi \times 10^{-8} f_0 w S H_0 \cdot$$

$$(2\mu_{2m} \sin 4\pi f_0 t + 4\mu_{4m} \sin 8\pi f_0 t + \dots). \quad (5)$$

因此信号线圈的偶次谐波幅值强度与磁场强度成正比, 可以作为磁场的度量. 考虑到二次谐波最大, 磁强计是以信号线圈的二次谐波的幅值作为磁场信号强度.

2.2 萤火一号磁强计的基本构成

萤火一号搭载了两个电路上完全独立的三分量磁通门磁强计, 它们的电路板安装在同一个电子学箱中. 如图 2 所示, 萤火一号磁强计由两个磁强计探头和一个电子学箱构成, 探头 A 和 B 分别安装在卫星的太阳能帆板上.



图 2 萤火一号磁场探测器的安装

Fig. 2 Location sketch of two magnetometer probes on YH-1

这种硬件设计的目的是为了在未来数据处理时, 从理论上消除卫星本底磁场. 卫星的剩磁不可能控制为 0, 在伸杆长度有限的情况下, 卫星剩磁在磁强计探头所在位置表现为偶极子磁场, 单一探头探测到的数据是无法区分卫星剩磁产生的磁场和空间环境磁场的. 由于火星空间环境磁场较弱, 最大处绝对值不大于 200 nT, 那么卫星剩磁造成的误差就不可忽略. 通过双探头数据处理的方法可以消除掉卫星本底产生的偶极子磁场. 如果磁强计 A 和磁强计 B 分别测到的数据是 B_1 和 B_2 , 有

$$B_1 = B_0 + \frac{B_s}{L_A^3}, \quad (6)$$

$$B_2 = B_0 + \frac{B_s}{L_B^3}. \quad (7)$$

其中, B_s 为卫星本底剩磁距卫星几何中心 1 m 处产生的磁场强度, L_A 和 L_B 分别为磁强计探头 A 和磁强计探头 B 与卫星中心的距离. 根据下面推导可以得到探头所在位置环境磁场数据 B_0 .

$$B_0 = \frac{L_A^3 B_1 - L_B^3 B_2}{L_A^3 - L_B^3}. \quad (8)$$

这里将卫星剩磁多极子产生的磁场干扰统称杂散场, 其随距离的 5 次方以上快速衰减. 像萤火一号这样的小卫星, 在设计和研制过程中严格控制剩磁, 总剩磁矩小于 $0.2 \text{ A} \cdot \text{m}^2$, 外传感器距卫星几何中心大于 3.2 m , 杂散场的影响可以忽略不计.

2.3 磁强计探头的研制特点

磁强计探头内部有三个磁通门传感器, 分别正交安装, 在已知探头与火星相关坐标系的变换矩阵后, 可以将测量数据转换为火星相关坐标系下的三分量磁场.

磁强计探头设计充分考虑到了火星探测任务的特殊性. 由于磁强计在火星轨道工作时, 探头上的温度变化比较剧烈, 为了适应这种工作条件, 在材料的选择上非常谨慎. 磁芯材料选择的是磁导率很高的 IJ86 坡莫合金, 磁芯骨架材料选择了与坡莫合金热膨胀系数相近的高温合金钢, 确保不会在温度发生剧烈变化时出现变形及挤压应力. 信号线圈骨架和反馈线圈骨架以及传感器外壳采用的是热膨胀系数很小的材料, 在温度变化时线圈长度变化很小, 确保不会影响到反馈磁场和补偿磁场, 另外它具有良好的抗辐照特性, 在长期运输和工作过程中对传感器可以起到很好的保护作用. 磁强计探头在安装于卫星上之后还需要利用热毯进行包扎, 尽量减小探头温度变化程度. 萤火一号上的传感器为了适应火星探测的严酷空间环境, 特别在液氮中存储 48 h, 再恢复到工作温

度加电工作.

图 3 所示为萤火一号磁强计探头的外观.

2.4 磁强计电子学系统设计

萤火一号磁强计电子学系统主要由激励系统、信号电路系统、数据处理系统以及二次电源 4 部分组成.

激励系统的主要功能是驱动激励线圈, 它由主时钟、分频器和激励信号放大器组成.

信号电路系统的主要功能是对信号线圈的感应电动势信号进行处理, 构成闭环反馈回路, 输出表征磁场强度的电压信号. 它由前级放大、中间级放大、后级放大、带通滤波器、移相器、相敏解调器、积分器、低通滤波器、调零电路以及反馈电路组成.

数据处理单元的部分结构如图 4 所示, 其主要作用如下.

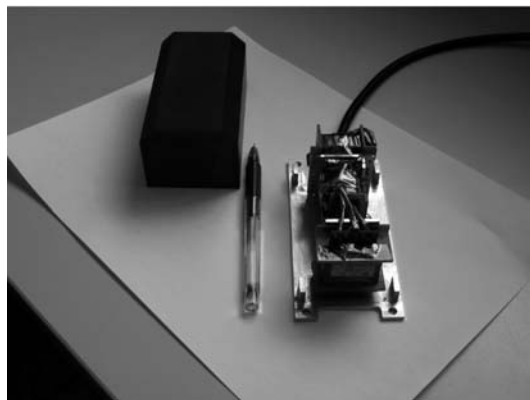


图 3 磁通门磁强计传感器外观

Fig. 3 YH-1 magnetometer probe appearance

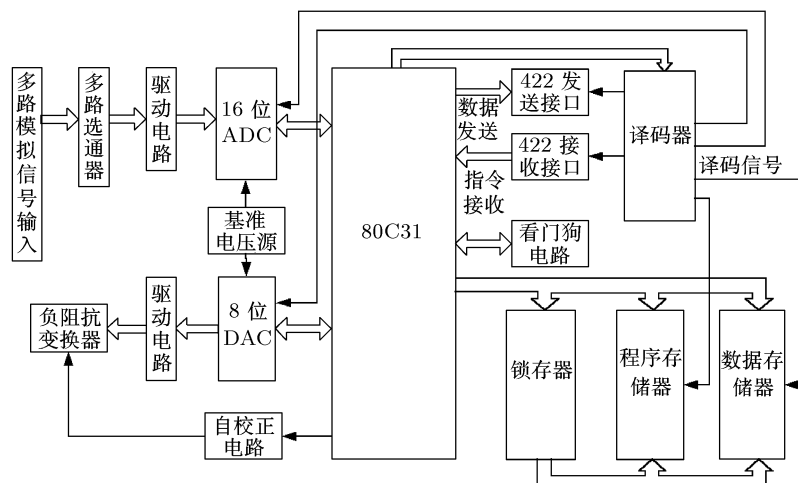


图 4 磁强计数据处理单元部分结构

Fig. 4 Block diagram of the magnetometer DPU part

(1) 通过 16 位 AD 将所获得的磁场模拟信号转换为数字信号, 并且进行相关的处理计算.

(2) 通过 8 位 DA 输出补偿信号.

(3) 对采集的数据进行打包, 并通过 422 总线发送给萤火一号有效载荷数据管理分系统.

(4) 接收来自卫星的指令, 对磁强计进行相关的控制, 例如校时、自校正等.

磁强计的软件控制整个仪器的工作, 包括科学数据的读取、处理和传输, 接收数据注入指令并完成相应的控制等. 具体的软件运行逻辑如图 5 所示,

3 测试实验和探测器标定实验

磁强计的主要性能参数有, 测量范围、分辨率、线性度、噪声、稳定性和温度系数, 在仪器装星之前这些参数需要在实验室内标定完毕. 针对不同的参数, 对实验条件的要求也不尽相同 [5].

3.1 测量范围、分辨率及线性度标定实验

在测量范围、分辨率及线性度标定时, 要求实验提供准确的标准磁场强度, 我们选择具有国家标准资质的中国计量科学院北京卧佛寺弱磁实验室进行此项标定实验. 这里能够提供 $10 \sim 100\,000\text{ nT}$ 的标准磁场, 不确定度为 1 nT , 这样的精度下, 测量线性度、分辨率产生的系统误差均可满足萤火一号磁强计的设计要求.

图 6 是实验装置和实验步骤, 其中一个探头分量的实验结果如图 7 所示, 数据显示磁强计的测量范围大于 $\pm 270\text{ nT}$, 分辨率为 0.0098 nT , 线性度为 0.041% , 完全达到设计要求.

3.2 噪声及稳定度测试实验

对于噪声和稳定度测试来说, 实验环境磁场稳定性是测试能否准确的关键, 理想的实验环境是零磁空间. 零磁空间指的是磁场强度始终保持为 0 nT 的空间. 在实验室中, 一般采用屏蔽筒制造近似的零磁空间. 磁屏蔽筒是用多层坡莫合金制成, 中心一段区域磁场屏蔽效果最好并且均匀, 称为均匀区, 均匀区长度与屏蔽效果受到屏蔽筒的层数和物理构型的影响, 一般来说均匀区内直流磁场的抑制比可以达到万分之一, 对交流磁场来说频率越高抑制越差. 在城市日常环境里, 电磁干扰很强, 而且频率分布十分复杂, 即使采用屏蔽筒也很难得到理想的测试环境, 因此对测试地点也需要进行选择. 北京的十三陵地磁台站, 周围环境电磁干扰少, 地磁环境稳定, 是理想的实验场地, 在这里利用屏蔽筒可以制作出接近零磁空间的测试环境. 如测试当地磁比较平静, K 指数一般小于 3, 屏蔽筒内的扰动可以小于 0.01 nT , 满足萤火一号磁强计的噪声测试要求.

图 8 所示为噪声实验在平稳磁场环境下的性能测试系统, 其中一个探头的谱估计曲线如图 9 所示, 可见三个分量在 1 Hz 点处的噪声均小于 $1\text{ Hz}^{-1/2}$

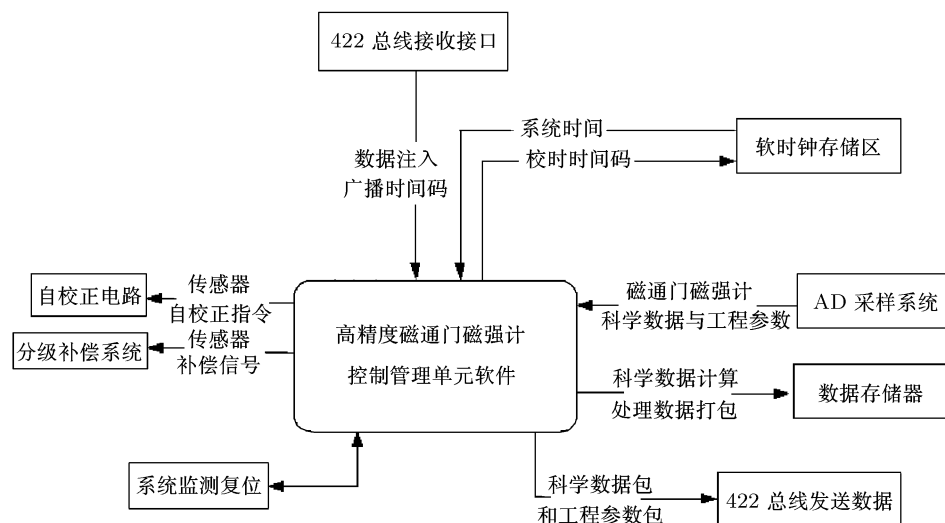


图 5 软件运行系统

Fig. 5 Operation diagram of the magnetometer software

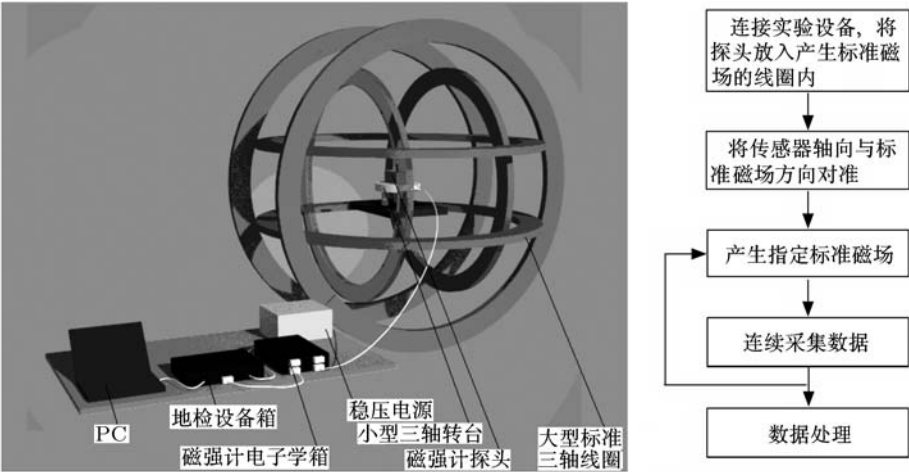


图 6 线性度实验系统以及实验基本流程

Fig. 6 Linearity test system and experimental process

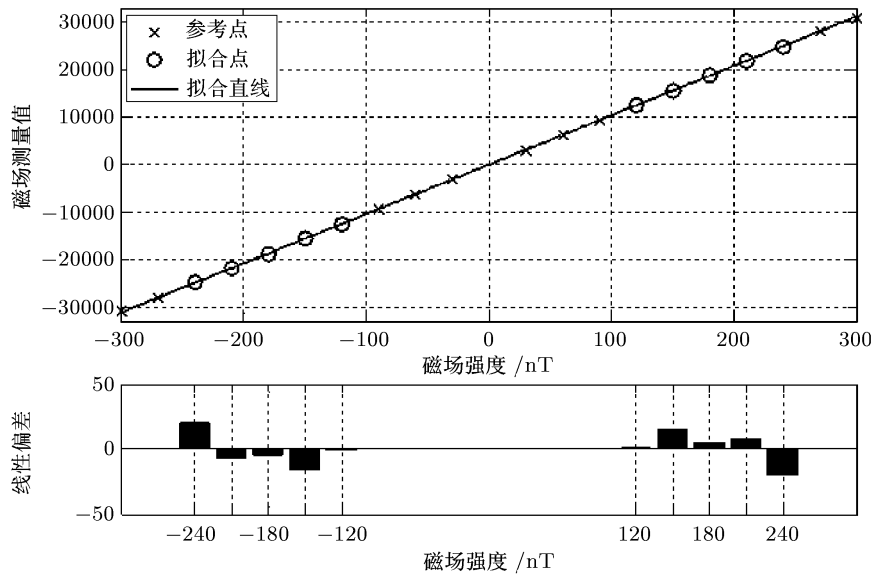


图 7 磁强计正样 A 机 y 方向传感器线性度曲线

Fig. 7 Linearity test result of the y -axis sensor of the magnetometer probe A

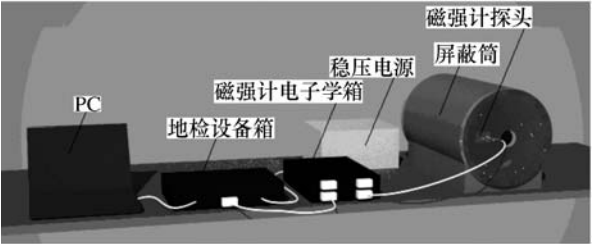


图 8 噪声测试系统

Fig. 8 Noise test system

(1 为 仪器测量值的最小单位, 需根据分辨率转换为磁场值), 根据对应探头的分辨率转换后约为 $8\text{ pT}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$, 优于设计要求。

稳定度实验要求也是在这种环境下进行的, 如图 10 所示, 磁强计探头 A 的稳定度为每 24 小时 0.022 nT 。

3.3 温度系数实验

萤火一号运行在火星轨道, 距离太阳比较远, 过火影区时探头温度很低, 因此磁强计探头的设计工作

温度为 $-140 \sim 75^{\circ}\text{C}$. 在这样宽的温度范围内, 探头线圈材料的物理特性会发生较大的变化, 导致测量偏差, 为了校正这一偏差, 仪器研制过程中设计了温度系数实验来标定温度对于测量的影响, 以此作为未来磁强计数据校准的依据.

温度实验主要是测试磁强计测量基准值随温度的漂移, 要求实验在一个能够控制温度并且磁屏蔽的环境下进行. 为此设计了一套设备, 主要由两部分组成, 一部分是温度控制装置, 一部分是立式屏蔽筒. 温度控制装置的杜瓦瓶和内部的所有部件都是铜、铝和非金属材料制成的, 确保无磁. 立式屏蔽筒的大小可以将杜瓦瓶置于其中, 确保杜瓦瓶底部区域磁场在萤火一号的测量范围之内.

实验示装置如图 11 所示, 磁强计探头 A 的测量基准随温度的漂移曲线如图 12 所示. 磁强计在轨运

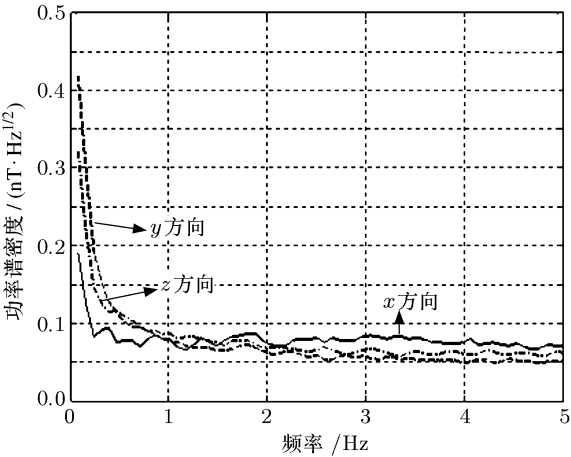


图 9 磁强计正样件 A 机三分量传感器的谱估计曲线
Fig. 9 Spectrum curve of three axial sensors of the magnetometer probe A

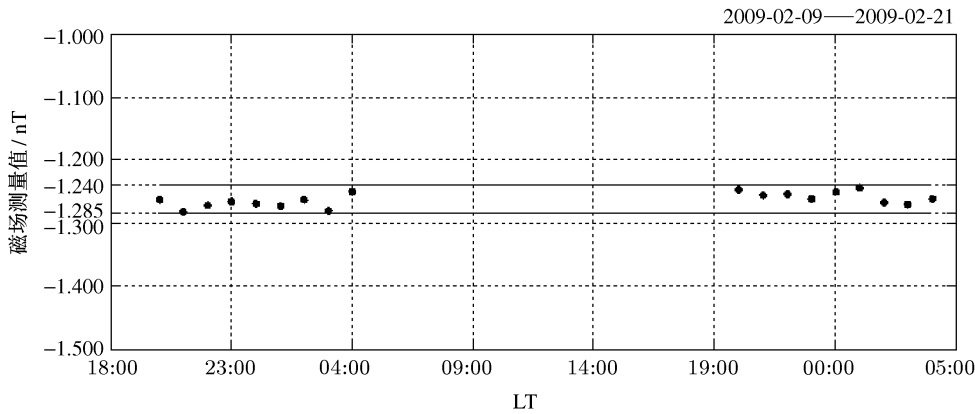


图 10 磁强计正样件 A 机 x 分量稳定度实验结果
Fig. 10 Stability test result of the x -axis sensor of the magnetometer probe A

行期间, 探头工作环境恶劣, 根据探头温度, 依照温度漂移曲线可以准确反演出外部的真实磁场强度. 图 12 中纵坐标是传感器磁场测量值 (单位是相对值, 可以转换为磁场强度值). 从图 12 可以看出, 我们研制的传感器在 $0 \sim 60^{\circ}\text{C}$ 范围内都可以保持较好的稳定性. 在萤火一号绝大部分的运行期间, 传感器都处于光照区, 温度不会太低; 另外, 传感器包覆热毯, 温度不会出现快速的变化. 在短火影期 (小于 2h), 磁强计保持加电, 传感器的温度也不会下降很大; 对于长火影期, 传感器温度可能会降至较低温度, 根据本实验结果可以对这一阶段的科学数据进行标定, 使之

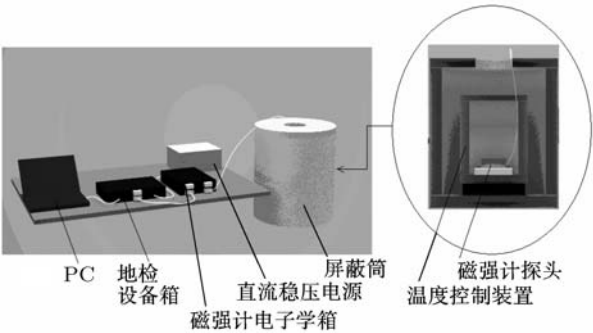


图 11 磁强计测量基准温度漂移装置
Fig. 11 Temperature stability test system

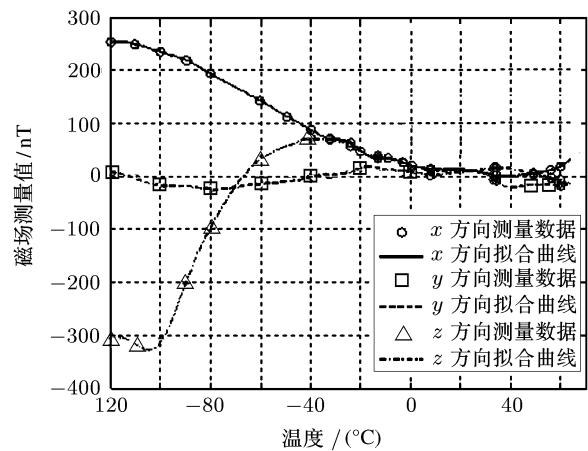


图 12 萤火一号磁强计正样件 A 机的零点温飘曲线
Fig. 12 Temperature stability curve of three axial sensors of the magnetometer probe A

有效化. 因此, 我们研制的磁强计可以满足火星轨道温度适应性的要求.

4 小结

萤火一号火星探测器的主载荷高精度磁强计具有明确的科学目标, 在设计中始终围绕着它的科学目标进行. 研制的过程中充分考虑了火星轨道上温度条件的恶劣程度, 确保磁强计传感器在这种条件中始终可以保持正常工作. 磁强计目前已经研制完成, 所有技术指标符合设计要求 (见表 2).

2009 年 10 月, 萤火一号探测器将随俄罗斯 Phobos-Grunt 探测器一起飞往火星. 当萤火一号探测器到达火星轨道时, 其上的磁强计将与其他科学有效载荷一起共同完成预计的各种科学任务.

表 2 萤火一号磁强计性能设计参数与实际参数对照
Table 2 YH-1 magnetometer performance characteristics comparison

性能指标	设计参数	实际标定测试结果
测量范围/nT	-256 ~ 256	-270 ~ 270
测量分辨率/nT	0.01	优于 0.01
1 Hz 点处频谱噪声 /(nT·Hz ^{-1/2})	0.01	<0.01
带宽内总噪声/nT	<0.1	<0.03
精度/nT	<0.125	<0.09

参考文献

[1] Acuna M, *et al.* The magnetic field of Mars: Summary of results from the aerobraking and mapping orbits [J]. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**:23 403-23 418

[2] Zhao Hua, *et al.* YingHuo-1—Martian space environment exploration orbiter [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2008, **28**(5):395-401

[3] Li Lei, Wang Jindong, Zhou Bin, Zhao Hua. Mars magnetic pileup boundary layer features exploration based on the magnetic field detection data //the 21st Conference of Committee for Space Exploration [C]. Chinese Society of Space Research. 2008. in Chinese (李磊, 王劲东, 周斌, 赵华. 利用磁场观测数据确定火星磁堆积边界特性[C] // 中国空间科学学会空间探测专业委员会第二十一次学术会议论文集, 2008)

[4] Zhao Hua, Zhu G W, Yu P, Wang J D *et al.* Flux-gate Magnetometer for Mars exploration [M]//Jiancheng Fang, Zhongyu Wang. Proc. of SPIE 7129. Washington: SPIE, 2008

[5] Zhou Bin, Chen Siwen. Ambient and methods for fluxgate magnetometer performance test // the 21 Conference of Committee for Space Exploration [C]. Chinese Society of Space Research. 2008. in Chinese (周斌, 陈斯文. 磁通门磁强计性能测试的环境和方法[C] // 中国空间科学学会空间探测专业委员会第二十一次学术会议论文集. 2008)