

火星空间环境磁场探测研究*

——“萤火1号”磁强计的研制与应用

王劲东[†] 赵华 周斌 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 文章介绍了“萤火1号”卫星对火星空间环境磁场进行探测的目的、意义及采用的方式方法。研究火星的空间环境离不开火星磁场,它对于火星弓激波、磁鞘、电离层、大气等绝大多数空间环境效应都有着深刻的影响,因此“萤火1号”卫星安装了一台重要的科学探测载荷——高精度磁强计,以满足科学研究和应用目标的需求。磁强计从原理选择到具体设计,都考虑到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“萤火1号”装星前的地面标定测试实验,验证了高精度磁强计可以在 $-140\sim 75^{\circ}\text{C}$ 温度范围内测量 $\pm 256\text{nT}$ 以内的磁场,分辨率达到 0.01nT ,带宽内总噪声小于 0.03nT ,能够胜任“萤火1号”对火星空间环境探测的科学任务。“萤火1号”火星探测器将于2011年与俄罗斯的“福布斯-土壤”一同飞往火星,这是人类送往火星最精密的磁场探测器之一,将对火星空间环境磁场结构和动力学过程进行精密而详细的探测。

关键词 火星探测, 磁场探测, 磁通门磁强计

Martian space environment magnetic field research: Development and application of the YH-1 precision magnetometer

WANG Jin-Dong[†] ZHAO Hua ZHOU Bin CHEN Si-Wen
LIAO Huai-Zhe ZHU Guang-Wu WANG Chi ZHANG Xin
LI Lei SUN Yue-Qiang FENG Yong-Yong ZHOU Jing-Xuan TAO Ran

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

Abstract We review the purpose, significance and method of the determination of the Martian space environment's magnetic field by Yinghuo-1 (YH-1), the first Chinese Martian space environment exploration orbiter. Most of the scientific objectives of the YH-1 orbiter are related to the Martian space magnetic field, so the magnetometer is considered to be one of the most important payloads. This instrument is designed to work in the harsh environment of the Mars orbit and to collect accurate data of its magnetic field over a long period. The YH-1 magnetometer has a $\pm 256\text{nT}$ dynamic range at 0.01nT resolution, throughout an operation temperature of -140°C to 75°C . With a total noise level below 0.03nT , the magnetometer can measure three-component magnetic fields from DC to 10Hz . It will operate together with an onboard Plasma Package program to analyze the magnetic field and dynamics of the Martian space environment.

Keywords Mars exploration, magnetic field exploration, fluxgate magnetometer

1 引言

火星是位于地球轨道外侧的第一颗行星,是太阳系中最近似于地球的天体之一。火星赤道平面与公转轨道平面的交角非常接近于地球,而且自转周

* 国家高技术研究发展计划(批准号:2008AA12A206)资助项目
2009-07-03 收到初稿,2009-09-18 收到修改稿

[†] 通讯联系人。Email: wjd@cssar.ac.cn

期为 24 小时 37 分,因此火星有类似地球的四季交替与昼夜变化.通过探索火星,人类有希望建立第二家园和寻找地球外生命.研究火星的磁场、大气和气候、空间环境、地貌等内容,并掌握其规律,是实现这一目标的重要途径之一.

到目前为止,火星是除了地球以外的人类了解最多的行星,40 多年来,前苏联、美国、日本、俄罗斯和欧洲发起过多次火星探测计划,已经有超过 30 个探测器到达过火星,并向地球发回了大量数据.2011 年,我国自主研制的“萤火 1 号”火星探测器将随俄罗斯的“福布斯-土壤”探测器一同飞往火星,并对火星的空间环境如火星的弓激波、火星磁鞘、火星层、电离层等进行独立而深入的探测研究.

在众多的火星探测研究方向上,“萤火 1 号”任务是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过程和变化规律;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.为了实现这些探测研究任务,“萤火 1 号”火星探测器上搭载了多种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的磁通门磁强计.

2 火星空间环境磁场探测的目的和意义

火星上稀薄的大气中的中性成分(如 N_2 , O_2 , H_2 , CO_2 , NH_4 , H_2O 等等)在太阳极紫外辐射或高能沉降电子的作用下产生电离,形成了火星电离层.观测表明,火星全球性的固有磁场很小(小于 $\sim 5nT$)^[1].因此,对于高速的太阳风等离子体,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.由于火星全球性的固有磁场很小,因此火星与太阳风的相互作用过程与地球与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,无论是在尺度上或结构上,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].

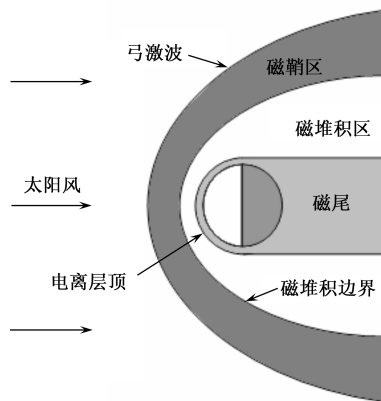


图 1 火星空间磁场环境示意图

人们对火星空间环境的认识开始于前苏联 Phobos-2 探测器的探测结果.但是 Phobos-2 出现技术故障,探测数据非常有限.美国的 Mars Global Surveyor 探测器从 1997 年开始在环绕火星轨道上运行了近十年,获得了大量火星空间环境磁场的探测数据.探测数据表明火星的内禀磁场很小,在火星赤道面上小于 $5nT$;火星的空间环境存在磁场堆积区(magnetic pileup region, MPR)和磁场堆积边界层(magnetic pileup boundary, MPB).但是 Mars Global Surveyor 上缺少等离子体探测器,无法研究等离子体的加热和逃逸等重要的物理过程.欧洲航天局 Mars Express 探测器也已在环绕火星的轨道上运行了 4 年多的时间,发现了太阳风粒子穿透到日下点距火星表面 250km 的高度,并对火星电离层离子加热;火星离子的逃逸具有“离子束”特性,这表示火星离子的加速机制与磁化等离子体相似,都是由平行磁场的波或者电场所加速.但 Mars Express 上缺少磁场探测器,对太阳风加热火星大气和电离层及火星离子逃逸机制缺乏确定性的研究.由于这些计划的局限性,人类对火星空间环境及其物理过程还缺乏全面深入的了解,这些遗憾都可能在“福布斯-土壤”与“萤火 1 号”的中俄联合火星探测中得到根本的改变.

“萤火 1 号”是中国火星探测计划中的第一颗火星探测器,作为中俄航天合作项目之一,计划于 2011 年和俄罗斯的“福布斯-土壤”卫星一起搭载联盟号运载火箭,从拜科努尔航天中心发射升空.大约经历 10 至 11 个半月的飞行后,进入环绕火星飞行的大椭圆轨道.轨道近火点 800km,远火点 80000km,与火星赤道夹角为 $0\sim 7^\circ$,轨道周期为 72.8 小时.在此轨道上,“萤火 1 号”探测器将飞越火星的弓激波、磁鞘区、磁堆积区、磁堆积边界层、磁尾以及电离层等区域(见图 1),并对这些区域展开详尽的测量和研究.

“萤火1号”火星探测器搭载了高精度磁强计,可以在轨测量探测器运行轨道的磁场数据,不仅直接反映出火星空间磁场分布强弱,同时还可以利用磁场测量结果与等离子体探测包配合,反演出火星等离子体分布函数,这对研究太阳风加热火星大气和电离层及火星离子逃逸机制有重大意义.同时利用磁场与粒子探测器测量火星周围的磁场和粒子环境,研究火星电离层和太阳风的相互作用,是近年来火星空间环境研究中十分受关注的领域.

“萤火1号”卫星主要的科学探测任务是^[2]:对火星的空间环境如火星的弓激波、火星磁鞘、电离层等进行独立而深入的探测研究;探测火星磁层的形状和结构,研究各空间区域等离子体特性及其对太阳风扰动的响应过程和变化规律;探测火星离子逃逸的物理过程和运输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的特征及其规律.

这些科学目标都直接或者间接与火星空间环境磁场探测有关,因此“萤火1号”磁强计是一台非常重要的载荷.它能否完成火星空间环境磁场探测的任务,决定了“萤火1号”的科学使命是否能够完成.

3 “萤火1号”磁强计的原理和构成

3.1 “萤火1号”磁强计的基本原理

火星空间磁场环境探测需要进行三维矢量测量,因此采用成熟可靠的磁通门磁强计作为磁场探测的科学载荷是理想的选择.“萤火1号”磁强计的设计性能参数如表1所示^[3].

表1 “萤火1号”磁强计性能指标

性能指标	设计参数
测量范围	-256nT—256nT
测量分辨率	0.01nT
噪声	$<0.01\text{nT}/\sqrt{\text{Hz}}$ (1Hz点处)
带宽内总噪声	$<0.1\text{nT}$
精度	$<0.125\text{nT}$

磁通门技术最早于1930年由德国开发,并在同

一时期开始进入实用阶段.与磁阻效应技术、光泵技术、超导效应、磁光效应技术相比,具有技术成熟性高、适用性强、综合技术经济水平好等特点,是目前应用最为广泛的磁测量技术.同时由于磁通门技术具有在各种恶劣环境和复杂工作条件下的适应性,因此以其体积、重量、可靠性、分辨力和精度上的综合优势,使世界各国90%以上的卫星都选用三轴磁通门磁强计.

磁通门磁强计的原理是利用法拉第电磁感应定律测量外界磁场强度.在激励线圈上施加频率为 f_0 的正弦激励电压时,若不考虑铁芯磁导率的变化,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如下:

$$e = 10^{-8} \frac{d}{dt} (\omega \mu H_- S), \quad (1)$$

其中 ω 为感应线圈匝数, μ 为磁导率, H_- 为激励磁场, 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 H_- 可表示如下:

$$H_- = H_m \cos 2\pi f_0 t, \quad (2)$$

并考虑到外部环境磁场 H_0 ,则由(1)式可以推导得到

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

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,忽略对铁芯磁导率 $\mu(t)$ 的影响,将 $\mu(t)$ 展开为傅里叶级数,可得

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

将上代入(3)式,可知由激励磁场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, $e(H_0)$ 可表示如下:

$$e(H_0) = -2\pi \times 10^{-8} f_0 \omega S H_0 (2\mu_{2m} \sin 4\pi f_0 t + 4\mu_{4m} \sin 8\pi f_0 t + \dots). \quad (5)$$

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.考虑到二次谐波的强度最大,磁强计以信号线圈的二次谐波的幅值作为磁场信号强度.

3.2 “萤火 1 号”磁强计的基本构成

“萤火 1 号”搭载了两套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. 图 2 是仪器的外形照片, 磁强计由两个磁强计探头和一个电子学箱构成.

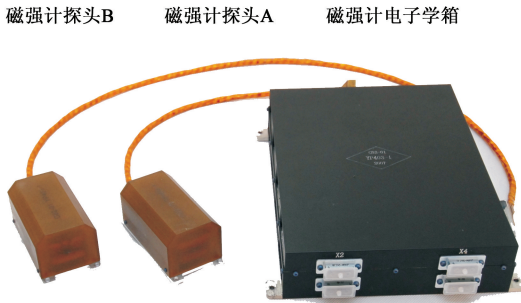


图 2 “萤火 1 号”搭载的高精度磁通门磁强计

为提高探测精度, “萤火 1 号”采用梯度法测量空间磁场, 以消除卫星剩磁的影响. 磁强计探头 A, B 分别安装在卫星的太阳能帆板上(见图 3). 磁强计探头 A 位于太阳帆板远端的支架顶端, 与卫星本体之间距离 L_A 约为 3.2m; 磁强计探头 B 与探头 A 距离 450mm, 同处在卫星 X 轴线上.

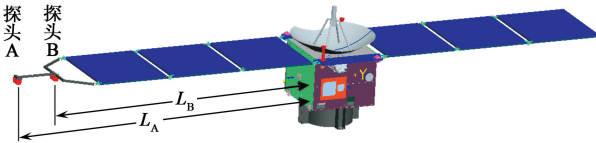


图 3 “萤火 1 号”卫星磁强计安装示意图

采用这种磁强计探头配置的目的是为了从理论上消除卫星本身的剩磁影响. 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 200nT, 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 测到的磁场强度的数据分别是 B_A 和 B_B , 而火星空间磁场强度为 B_M , 则有

$$B_A = B_{AN} + B_M, \tag{6}$$

$$B_B = B_{BN} + B_M, \tag{7}$$

B_{AN} 和 B_{BN} 分别为卫星剩磁在探头 A 与 B 处所产生的磁感应强度. 对于卫星所引起的磁场扰动, 可

以认为其主要组成部分为偶极子剩磁所产生. 而卫星剩磁多极子产生的磁场干扰, 统称为杂散场, 它随距离的 5 次方以上快速地衰减. 像“萤火 1 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 0.2Am^2 , 外传感器距卫星几何中心大于 3.2m, 杂散场的影响可以忽略不计.

如果认为卫星偶极子剩磁位于卫星的中心位置, 其剩磁偶极矩为 m , 则有

$$B_N = \frac{\mu_0 m}{2\pi L^3}, \tag{8}$$

式中 B_N 为卫星剩磁偶极矩在磁强计探头处所产生的磁感应强度, μ_0 为真空中的磁导率, L 为探头到磁偶极子中心的距离.

由(8)式可知,

$$\frac{B_{AN}}{B_{BN}} = \left(\frac{L_B}{L_A}\right)^3, \tag{9}$$

则通过(6), (7), (9)式即可求得火星空间环境磁场强度 B_M :

$$B_M = \frac{L_A^3 B_A - L_B^3 B_B}{L_A^3 - L_B^3}. \tag{10}$$

由于磁强计探头安装在卫星太阳帆板的顶端, 因此太阳帆板的电流对磁强计探头会产生一定的干扰. 为排除电流产生的附加磁场, 提高磁场探测精度, 对太阳帆板的电流建立了分析模型. 图 4 是紧邻磁强计探头的太阳帆板电流示意图, 蛇形线段为太阳电池片的引线, 共有三段, 其电流强度分别为 W_1, W_2, W_3 .

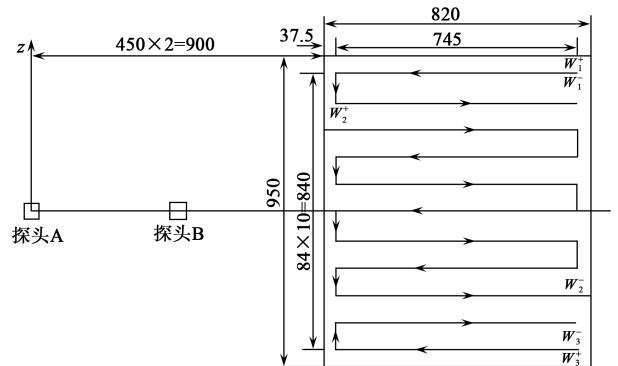


图 4 太阳帆板的电流模型

根据毕奥—萨伐尔定律, 载流导体所产生的磁场强度为

$$\mathbf{B} = \int d\mathbf{B} = \int \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{d\mathbf{l} \times \mathbf{e}_r}{r^2}. \tag{11}$$

按照(11)式对引线电流进行逐段计算与积分后, 即可得到太阳帆板电流在磁强计探头处所产生的磁场扰动值. 在数据处理中, 根据卫星工程参数, 可知电

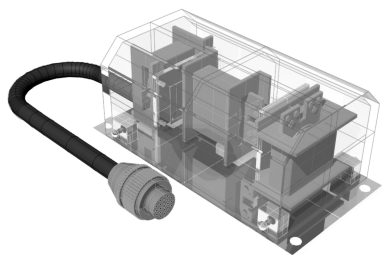


图 5 磁通门磁强计传感器结构示意图

流 W_1 、 W_2 、 W_3 的大小, 则可以通过计算模型得到太阳帆板电流所产生的磁场扰动。

根据卫星的典型工况, $W_1 = W_3 = 0.2A$, $W_2 = 0.1A$, 通过计算可以得到此状态下卫星太阳帆板所产生的电流干扰磁场方向为卫星的 $-z$ 方向(垂直纸面向里), 其强度为: 在探头 A 处的电流干扰磁场强度 $B_{IA} = 1.969nT$; 在探头 B 处的电流干扰磁场强度 $B_{IB} = 8.383nT$ 。

3.3 磁强计探头的研制

磁强计探头内部有 3 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。

磁强计探头的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。磁强计探头安装在卫星上之后, 还需要利用热毯进行包扎, 尽量减小探头温度变化程度。磁强计传感器为了适应火星探测的严酷空间环境, 特别进行了超低温存储试验, 即在液氮中存储 48 小时后, 再恢复到工作温度进行工作。

图 5 是“萤火 1 号”磁强计探头的结构示意图。设计中充分考虑了振动、冲击与高低温对传感器带来的影响, 应用了有限元仿真分析计算, 最终优化后的结构可以保证在各种条件下, 传感器角位移不大于 10 角秒。

3.4 磁强计电子学系统设计

“萤火 1 号”磁强计电子学系统主要是由激励系统、信号电路系统、数字处理系统以及二次电源等 4 部分组成^[5]。

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。

数字处理系统的主要作用是通过 16 位 ADC 将所获得的磁场模拟信号转换为数字信号, 并进行相关的处理计算; 通过 8 位 DAC 输出补偿信号, 对采集的数据进行打包, 并通过 422 总线传送给“萤火 1 号”的有效载荷数据管理分系统, 接收来自卫星的指令, 对磁强计进行相关的控制, 例如校时、自校正等等(见图 6)。

3.5 “萤火 1 号”磁强计的测试与标定实验

磁强计的主要性能参数有: 测量范围、分辨率、

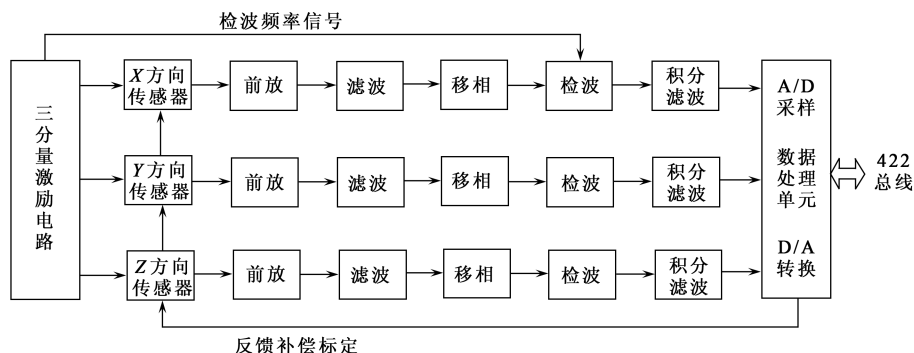


图 6 磁强计电路结构框图

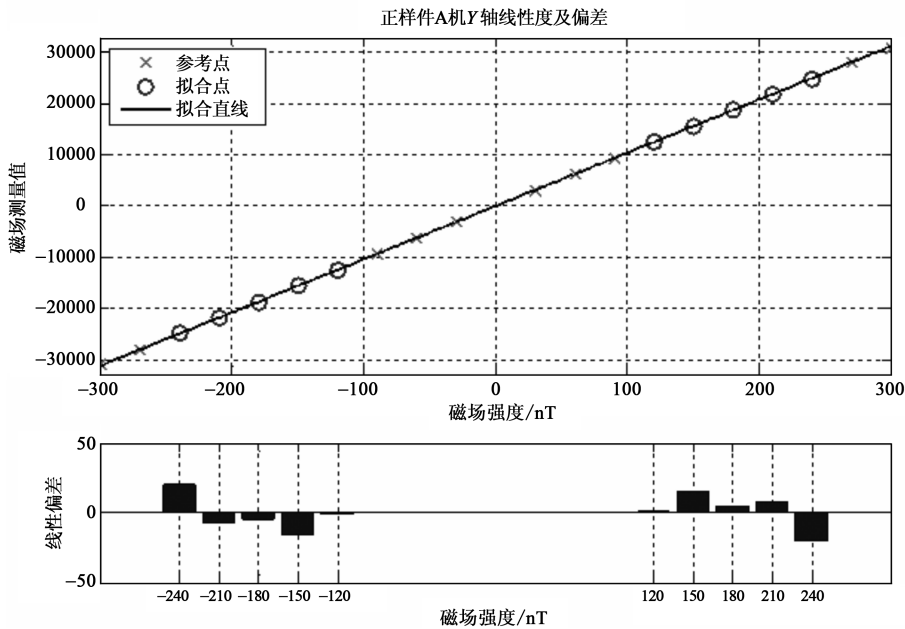


图 7 磁强计正样件 A 机 Y 方向传感器线性度曲线

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不同^[6]。

3.5.1 测量范围、分辨率及线性度标定实验

“萤火 1 号”磁强计研制完成后，在中国计量科学研究院北京卧佛寺弱磁实验室进行了测量范围、分辨率及线性度标定。该实验室中的测试装置可产生 10—100,000nT 的标准磁场，不确定度为 1nT，测量线性度、分辨率产生的系统误差均可满足“萤火 1 号”磁强计的设计要求。

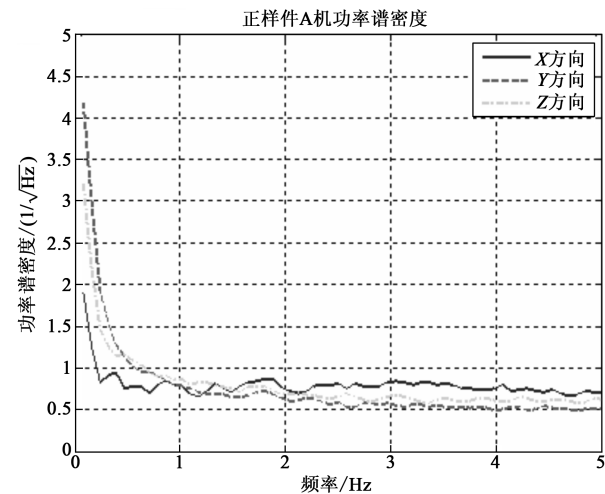


图 8 磁强计正样件 A 机三分量传感器的谱估计曲线

图 7 是磁强计的一个探头分量的实验结果，数据显示磁强计的测量范围大于±270nT，分辨率为 0.0098nT，线性度为 0.041%，完全达到设计要求。

3.5.2 噪声及稳定性测试实验

对于测试噪声和稳定性来说，实验环境的磁场稳定性是测试能否准确的关键。在实验室中，一般采用多层玻莫合金制成的屏蔽筒制造出局部的弱磁环境，屏蔽外界地磁场与干扰磁场。测试地点选择在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。测试当天地磁比较平静， K_p 指数小于 3，屏蔽筒内的扰动可以小于 0.01nT，满足“萤火 1 号”磁强计的噪声测试要求。

图 8 是噪声实验测试结果，图中曲线为一个探头的三轴向谱估计值。从图中可见，3 个分量在 1Hz 点处的噪声均小于 $1/\sqrt{\text{Hz}}$ （其中 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 $8\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ ，优于设计要求。

稳定性实验也是在相同的环境下进行的，测量结果如图 9 所示，磁强计探头 A 的稳定性达到了 0.022nT/24 小时。

3.5.3 温度系数实验

“萤火 1 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是 -140—75℃。在大温度范围内，探头线

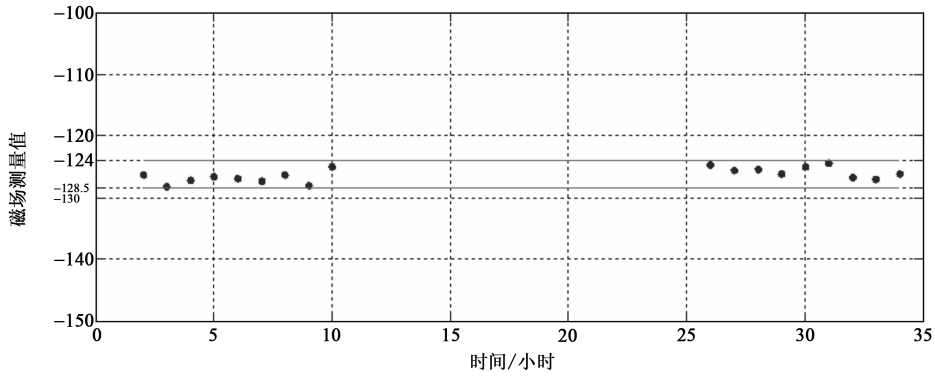


图9 磁强计正样件A机X分量稳定度实验结果示意图

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测量的影响,以此作为对将来磁强计数据校准的依据。

图10为磁强计探头A的测量基准随温度漂移曲线.磁强计在轨运行期间,探头工作环境恶劣,根据探头温度,依照温度漂移曲线,可以准确地反演出外部的真实磁场强度。

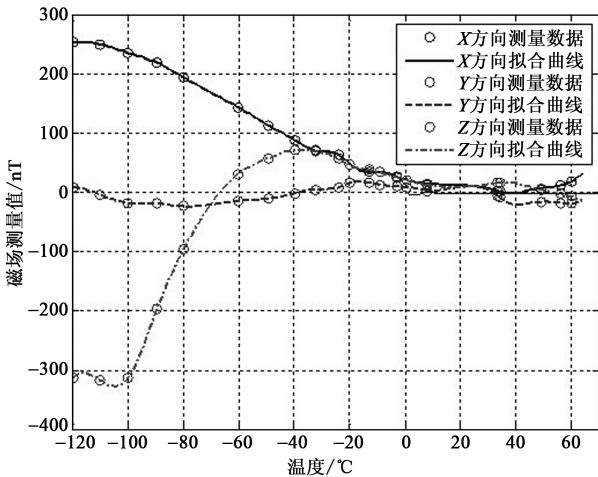


图10 “萤火1号”磁强计正样件A机的零点温度漂移曲线

4 应用前景分析

“萤火1号”搭载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下始终可以保持正常工作.磁

强计目前已经研制完成,所有技术指标均符合设计要求和实现科学目标的要求,测试结果如表2所示。

表2 “萤火1号”磁强计实测性能指标

性能指标	设计参数	实际标定测试结果
测量范围	-256nT—256nT	大于-270nT—270nT
测量分辨率	0.01nT	优于0.01nT
噪声	0.01nT / $\sqrt{\text{Hz}}$ (1Hz点处)	$<0.01\text{nT} / \sqrt{\text{Hz}}$ (1Hz点处) (约0.008nT / $\sqrt{\text{Hz}}$)
带宽内总噪声	$<0.1\text{nT}$	$<0.03\text{nT}$
精度	$<0.125\text{nT}$	$<0.09\text{nT}$

2011年,“萤火1号”火星探测器将随俄罗斯“福布斯-土壤”探测器一起飞往火星.当“萤火1号”火星探测器到达火星轨道时,其搭载的磁强计将成为火星轨道上精度最高的磁强计^[1],它将对火星空间环境磁场进行精确测量,并与“萤火1号”上的其他科学有效载荷共同完成预定的各种科学任务。

参考文献

[1] Acuña M *et al.* J. Geophys. Res., 2001, 106: 23403
 [2] Zhao H, Huo Y. Chinese Journal of Space Science, 2008, 28(5): 395
 [3] 李磊,王劲东,周斌等.利用磁场观测数据确定火星磁堆积边界特性.见: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.黑龙江省绥芬河,2008. [Li L, Wang J D, Zhou B *et al.* Deducing Martian MPB Characteristics from the Magnetic Field Data. In: Proceedings of 21st Conference of Commission on Space Exploration, Chinese Society for Space Research. China Shuifenhe, 2008 (in Chinese)]

- [4] Zhao H *et al.* Flux-gate Magnetometer for Mars Exploration. In: Jiancheng Fang and Zhongyu Wang Eds. , Proc. of SPIE Vol. 7129. Washington: SPIE, 2008, 71292N
- [5] 王劲东,赵华等. 火星空间环境探测用高精度磁强计,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. 黑龙江省绥芬河, 2008. [Wang J D, Zhao H *et al.* Precision Magnetometer for Martian Environment Exploration. In: Proceedings of 21st Conference of Commission on Space Exploration, Chinese Society for Space Research. China Shuifenhe, 2008 (in Chinese)]
- [6] 周斌,陈斯文. 磁通门磁强计性能测试的环境和方法. 见: 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. 黑龙江省绥芬河; 2008. [Zhou B, Chen S W. Environment and Method of Fluxgate Magnetometer Performance Experiment. In: Proceedings of 21st Conference of Commission on Space Exploration, Chinese Society for Space Research. China Shuifenhe, 2008 (in Chinese)]