火星车磁通门磁强计技术

赵琳[1,2]，杜爱民[1,2,3]，乔东海[4]，孙树全[1,2]，张莹[1,2,3]，区家明[1,2]，郭志芳[1,2]，李智[1,2]，冯晓[1,2]，顾少燃[4]，李峰[4]

（1. 中国科学院 地质与地球物理研究所 地球与行星物理重点实验室，北京100029；
2. 中国科学院 地球科学研究院，北京 100029；
3. 中国科学院大学，北京 100049；
4. 苏州大学，苏州 215006）

摘　要： 火星磁场测量是国际火星探测任务的焦点之一，中国首次火星磁测任务通过在巡视器（即火星车）和环绕器上同时搭载磁强计，实现对火星磁场的火–空联合观测。巡视器磁强计载荷选用双探头三轴磁通门磁强计，采用亥姆霍兹补偿线圈型探头技术和全数字闭环反馈电路技术，实现空间磁场的高精度同点测量。单机在设计上考虑了可靠性安全性设计和空间环境适应性设计。经地面标定，单机量程可达到±6.5万 nT，噪声水平优于0.01 nT/√Hz，分辨率达到了0.01 nT。

关键词： 磁通门；磁强计；火星磁场测量

中图分类号： TP212.2　　**文献标识码：** A　　**文章编号：** 2095-7777(2018)05-0472-06

DOI:10.15982/j.issn.2095-7777.2018.05.010

引用格式： 赵琳，杜爱民，乔东海，等. 火星车磁通门磁强计技术[J]. 深空探测学报，2018，5（5）：472-477.

Reference format: ZHAO L，DU A M，QIAO D H，et al. The ROVER fuxgate magnetometer[J]. Journal of Deep Space Exploration，2018，5（5）：472-477.

引　言

磁场是描述火星的重要物理量之一[1]。火星磁场测量为研究火星壳磁场空间分布、磁场起源及其时间演化、与地质构造的关系，以及太阳风与电离层的相互作用等方面提供了重要的观测数据。预期取得的研究成果对于认识火星内部结构、火星空间电磁环境，以及火星大气和气候的演化过程具有重要的科学意义。

20世纪60年代，人类开始对火星磁场进行探测和研究，火星磁场的探测主要是通过在探测器上搭载的磁力仪对接近火星表面的磁场直接测量实现的[1]。获取有效磁场数据的火星磁场测量载荷信息如表 1所示。

磁通门磁强计具有小体积、低功耗、低噪声、高分辨率、高可靠性等优势，是星载磁测载荷的首选，基于矢量补偿环型磁芯传感器技术和数字处理电子学技术的磁通门磁强计在深空探测任务中得到了广泛的运用。国际上，Venus Express磁强计[2]、Rosetta磁强计[3]、THEMIS磁强计[4]、Mascot磁强计[5]的探头都采用矢量补偿环型磁芯传感器结构，这种探头主要由德国布伦瑞克工业大学的地球物理与地外物理研究所 (The Institute for Geophysics and Extraterrestrial Physics，IGeP)研发，配套的磁通门数字电路的核心设计方案主要由德国Magson公司提供[4-6]。

1　磁通门磁强计关键技术

1.1　设计指标

火星车磁通门磁强计单机设计指标如表2所示。

1.2　基本原理及构成

磁通门磁强计是一种测量微弱静态或低频交变磁场的矢量传感器，由三轴磁通门探头和电子学单元组成，其中探头部分是相互正交安装的3组磁通门线圈系统，主要包括激励线圈、感应线圈和反馈线圈。基本的工作流程是利用驱动电路向激励线圈加载一定频率 f_0（约9.6 kHz）的对称脉冲激励电流，在每个激励电流脉冲作用下，磁芯被饱和两次，感应线圈将磁信号转换为电信号。传感器输出的任意偶次谐波均可作为被测磁场的量度，由于二次谐波幅值最大，故通常选取其二次谐波电压量度被测磁场。

火星车磁强计在配置上包括两个磁强计探头（含线缆）和1块电子学单元，两个磁强计探头用来采集磁场信号，分别安装于桅杆顶端（探头1）和桅杆底部（探头2），如图 1所示；电子学单元主要为磁强计探头提供激励信号，并对探头输出信号进行低噪声放

收稿日期：2018-06-20　修回日期：2018-07-17

表 1　火星磁测相关信息

Table 1　Information of Martian magnetic field measurement

序号	任务名称	国家/地区	发射年份	火星磁场测量仪器	采样率	分辨率	量程	安装位置
1	Mariner 4	美国	1964	氦矢量磁强计	0.9，1.5，2.4 s	0.35 nT	± 320 nT	伸杆
2	Mars 2	前苏联	1971	三轴磁通门磁强计	1 min	1.00 nT	± 60 nT	伸杆
3	Mars 3	前苏联	1971	三轴磁通门磁强计	1 min	1.00 nT	± 60 nT	伸杆
4	Mars 5	前苏联	1973	三轴磁通门磁强计	1 min	1.00 nT	± 60 nT	伸杆
5	Phobos 2	前苏联	1988	2个三轴磁通门磁强计	1.5，2.5，40，600 s	0.05 nT	± 100 nT	太阳能帆板端处
6	MGS	美国	1996	2个三轴磁通门磁强计	1/16 s	0.5 nT	± 65 536 nT	太阳能帆板端处
7	Rosetta	欧州空间局	2004	磁通门磁强计	0.05 s	0.031 nT	± 16 384 nT	伸杆
						0.015 nT	± 512 nT	
8	MAVEN	美国	2013	磁通门磁强计	1/32 s	0.062 nT	± 2 048 nT	太阳能帆板端处
						2.0 nT	± 65 536 nT	

表 2　主要性能指标

Table 2　Main performance indicators

名称	主要参数和性能
量程范围	± 6.5万nT
噪声水平	≤ 0.01 nT/√Hz
分辨率	≤ 0.01 nT
精度	优于0.1 nT
磁强计稳定性	≤ 0.01 nT/℃
采样率	1 Hz、16 Hz、32 Hz、128 Hz （1 Hz为正常工作模式，其它可选）

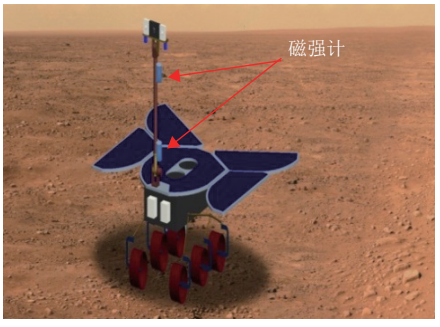


图 1　双探头安装位置

Fig. 1　Installation position of the two probes

大、处理和传输，电子学单元安装在巡视器内部载荷控制器中。

1.3　磁强计探头研制

火星车磁通门强计探头采用亥姆霍兹补偿线圈结构[7]。如图 2所示，这种高精度的三轴同心结构传感器可实现空间中磁场的同点测量，能够消除梯度场带来的三轴矢量测量偏差，具有分辨率高、噪声水平低、稳定性好的优点。

探头主要由多组线圈（包括激励线圈、感应线圈和反馈线圈）、骨架和热敏电阻构成。其中，激励线圈采用环形结构设计，整个探头有2组垂直套叠的激励线圈，其环形磁芯骨架的直径为13 mm和18 mm，选用0.2 mm的漆包线单层紧密排绕。感应线圈由2组跑道型无骨线圈和1组环形无骨线圈组成，不同分量的感应线圈相互垂直。反馈线圈是由3组相互垂直且同心组装的亥姆霍兹线圈组成，主要作用是在通入反馈电流后产生三分量的补偿磁场，使磁强计探头中心点在零磁场附近。

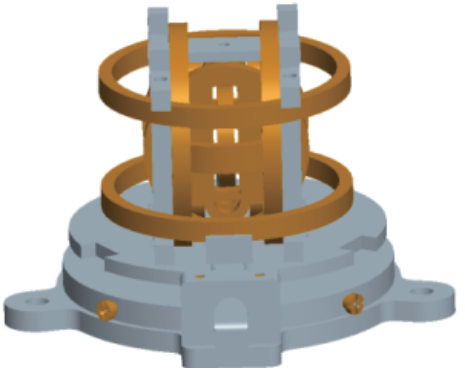


图 2　探头结构图

Fig. 2　Structure diagram of probe

探头研制过程中，主要优选热膨胀系数一致的材料，采用软件仿真和鉴定级试验相结合的方式来验证其热力学性能满足火星环境任务要求。

1.4　电子学单元研制

电子学单元硬件结构上由电源模块、现场可编程门阵列（Field-Progremmable Gate Array，FPGA）主控与信号处理模块、探头激励信号产生模块、感应信号采集模块、反馈模块和温度模块构成[8-10]，如图 3所示。载荷控制器为火星车磁通门磁强计单机提供 ± 12 V、

+5 V、+3.3 V的二次电源，电路中各器件所需的电源由单机内部电源模块给出，FPGA主控模块控制外围芯片完成信号处理、指令解析、数据传输等功能。温度模块主要是用来采集探头和电路板的温度，实现磁测数据的温漂修正。

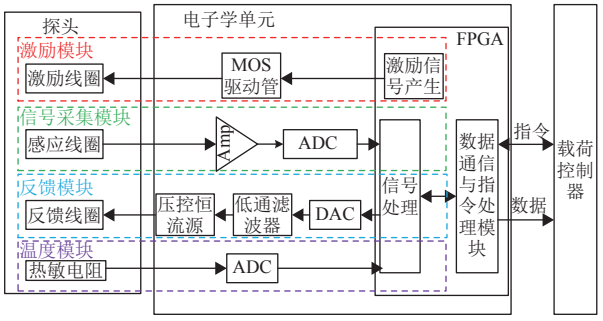


图 3 数字磁通门模块构成

Fig. 3 Module of digital fluxgate

单机激励信号频率是9.6 kHz，采样频率为80~160 kHz之间，选用FPGA做主控，通过算法准确消除数字处理系统的量化误差，利用过采样和数字滤波方式来降低仪器噪声和功能[11]。采用D/A数字补偿，消除探头非对称引起的零偏信号或假信号，实现磁场动态实时补偿，以提高测量精度。通常，数字磁通门在大动态范围磁场测量中，常采用分档切换、精度调节的技术，这使得磁场测量数据出现跳变，但火星车磁通门磁强计采用FPGA数字反馈技术和探头线圈反馈结构相结合，实现了±6.5万nT的全量程自适应测量，同时保证了单机分辨率优于0.01 nT（见图4）。

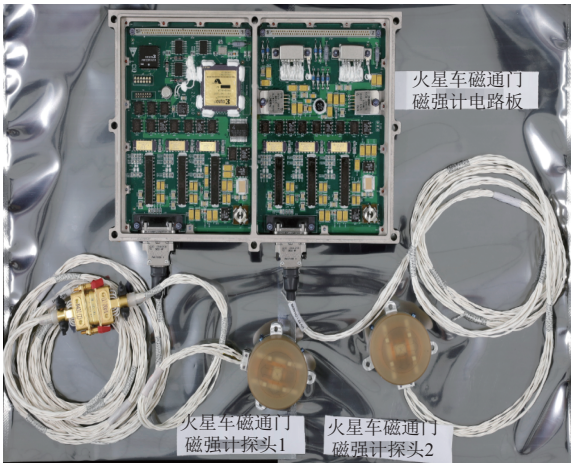


图 4 火星表面磁场探测仪鉴定件实物图

Fig. 4 Identification parts of the ROVER fluxgate magnetometer

为适应巡视器载荷产品应用需求，火星车磁通门磁强计在保证探测精度的前提下，参照了Magson公司的硬件设计理念，采用全数字式电路方案替代传统的模拟电路方案，使得产品功耗降低至4 W以内，电路板（含外框）重量控制在610 g以内，实现了载荷产品的小型化、低功耗。

2 地面定标试验

在国防科技工业弱磁一级计量站（宜昌测试技术研究所磁学检测校准实验室）进行了火星车磁通门磁强计地面定标工作。

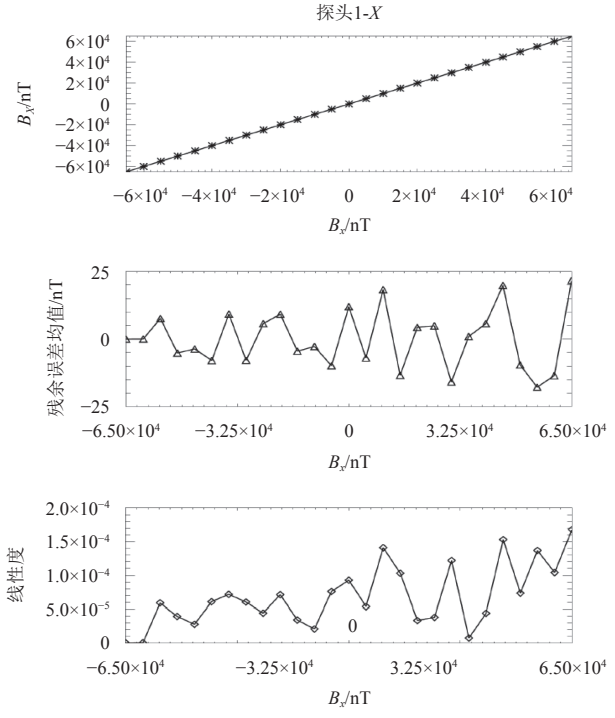
2.1 量程、线性度标定

首先，对每个探头每轴分别进行线性加场试验，将待标定磁强计探头放置在三维亥姆霍兹加场线圈内，利用磁通门磁强计校准装置产生稳定的磁场，全量程的加场范围为–6.5~+6.5万nT，每5 000 nT一个测试点，每个测试点记录有效数据不少于1 min，对数据进行线性拟合并得出拟合曲线公式$B_0 = A*B_X + C$，其中，B_0为标准磁场数据，B_X为待标定磁强计探头测量值，A为比例因子，C为零偏。然后与标准磁场数据做对比，得出每轴的线性度、量程指标。

图 5是火星车磁通门磁强计探头1的地面加场试验结果，数据显示探头1的三分量量程均达到±6.5万nT，X轴、Y轴、Z轴线性度分别为0.016 %、0.017 %、0.020 %。

2.2 三轴正交度标定

在相邻的两次对X轴的加场B_i和B_{i+1}下，利用公式



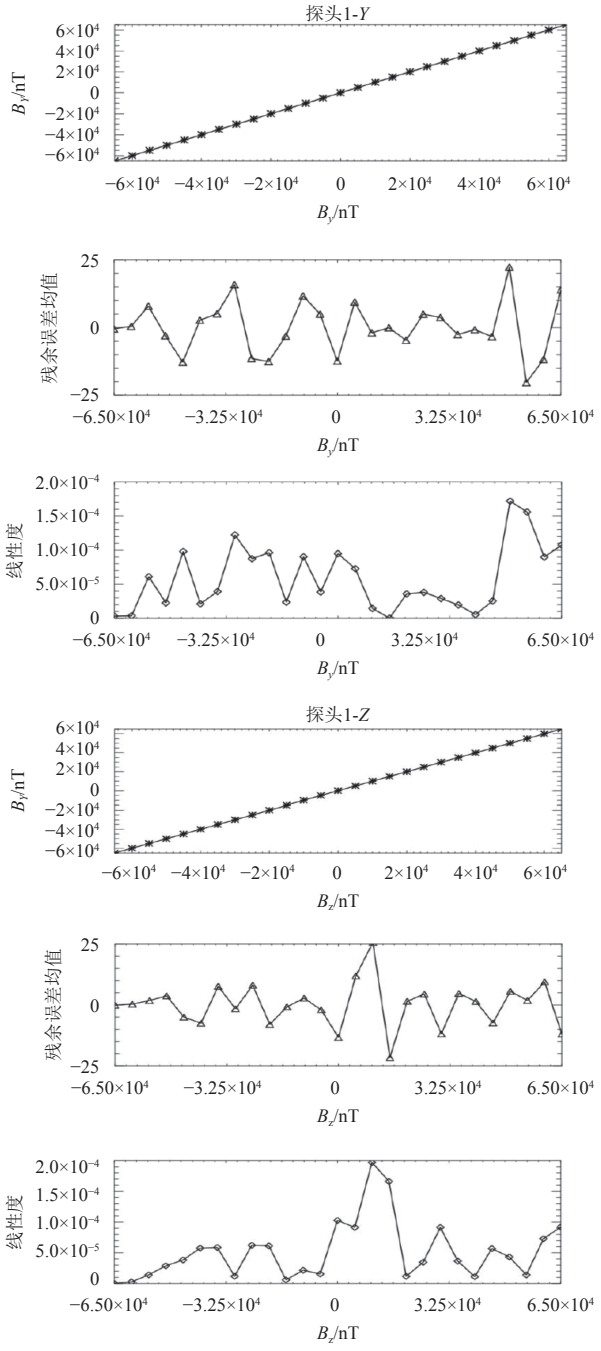


图 5　探头1的量程、线性度

Fig. 5　Range and linearity of probe 1

（1）、公式（2）分别得到Y轴、Z轴与X轴之间的非正交性；同样在相邻的两次对Y轴的加场B_i和B_{i+1}下，利用公式（3）可得到Z轴与Y轴之间的非正交性。

$$\theta_{B_i,X-Y} = \arcsin\frac{Y_{i+1}-Y_i}{B_{i+1}-B_i} \tag{1}$$

$$\theta_{B_i,X-Z} = \arcsin\frac{Z_{i+1}-Z_i}{B_{i+1}-B_i} \tag{2}$$

$$\theta_{B_i,Y-Z} = \arcsin\frac{Z_{i+1}-Z_i}{B_{i+1}-B_i} \tag{3}$$

在测试过程中，加场的标准磁场值从6.5万 nT变化到–6.5万 nT。选用一半的测试数据计算得到非正交性系数，然后利用非正交性系数修正磁场数据后，代入另一半测试数据，计算得到各轴间的正交性参数如表 3 所示。

表 3　标定后各轴向的正交性

Table 3　Orthogonality of each axis after calibration

轴向	探头 1-*XY*	探头 1-*XZ*	探头 1-*YZ*	探头 2-*XY*	探头 2-*XZ*	探头 2-*YZ*
正交度/(arcmin)	0.65	0.92	0.85	0.58	0.48	1.38

2.3　噪声水平、分辨率、精度标定

磁强计噪声水平的测试需要一个稳定、扰动小的磁场环境，一般要求测试环境的磁场扰动要远小于仪器本身的测量噪声。试验过程中将待标定磁强计探头放置在1.6 m长的圆柱形多层屏蔽筒内，屏蔽筒内部的噪声≤ 0.1 pT（5 Hz~10 kHz），持续测量30 min，记录三分量磁场数据。对测试数据进行FFT频谱分析，分别得到探头1和探头2的各轴噪声FFT功率谱密度谱图如图 6~7所示。取1 Hz附近5点均值，得到探头1的X、Y、Z三轴噪声分别为0.006 3 nT/√Hz、0.003 2 nT/√Hz、0.005 1 nT/√Hz、探头2的X、Y、Z三轴噪声分别为0.003 0 nT/√Hz，0.004 0 nT/√Hz，0.007 0 nT/√Hz，

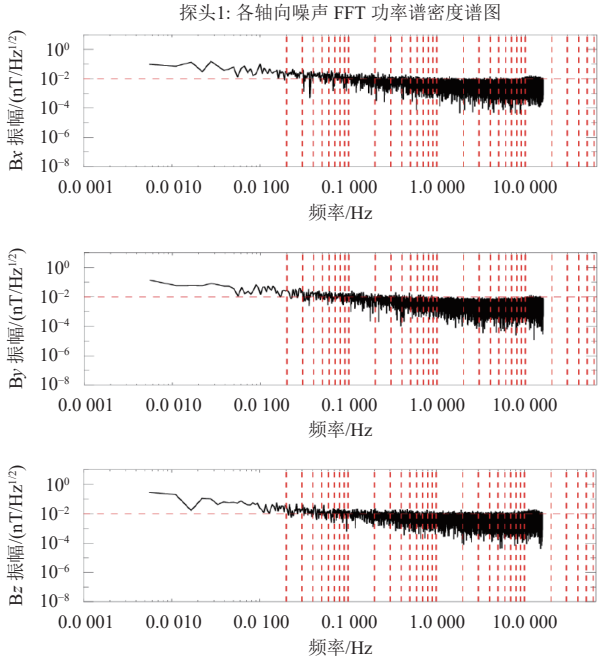


图 6　探头1 的FFT功率谱密度谱图

Fig. 6　The FFT power spectral density spectrum of probe 1

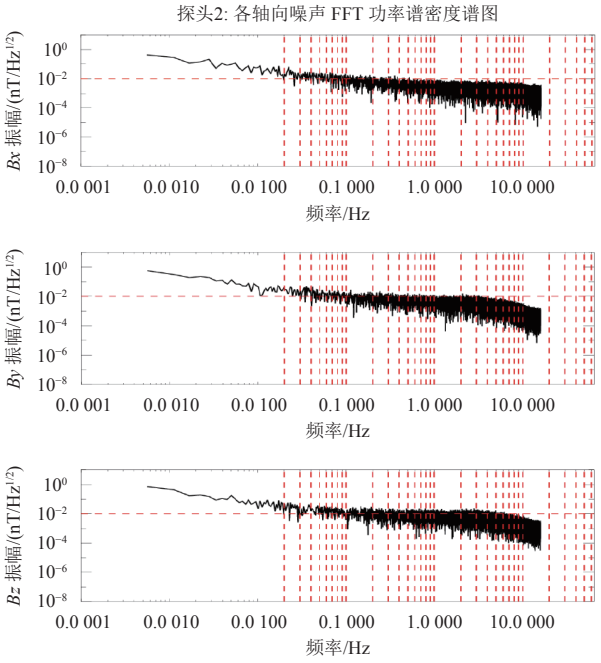


图 7 探头2的FFT功率谱密度谱图

Fig. 7 The FFT power spectral density spectrum of probe 2

两个探头的各轴分辨率均优于0.01 nT，精度优于0.1 nT。

2.4 温度稳定性

将待标定磁强计探头放置在温控箱的工作区内，在工作区内复现零场环境。控制高低温调控箱内的温度每隔5℃变化，每个温度校准点测量时间长度不少于40 min，记录数据。

取温度较平坦段10 min数据，利用19 200个点计算磁场平均值$\overline{B_v}(T)$，进一步利用公式（4）和公式（5）分别求得相邻温度点下磁场平均值的变化值和磁场温漂值，通过计算，火星车磁通门磁强计的温度稳定性指标优于0.01 nT/℃，具体见表 4。

表 4 各轴向的温度稳定性

Table 4 The temperature stability of each axis

轴向	探头 1-*X*	探头 1-*Y*	探头 1-*Z*	探头 2-*X*	探头 2-*Y*	探头 2-*Z*
温度稳定性/(nT/°C)	0.008	0.009	0.006	0.006	0.005	0.009

$$B_{vi} = \overline{B_v}(T_i) - \overline{B_v}(T_{i-1}) \tag{4}$$

$$B_T = \frac{\overline{B_{vi}}}{T_i - T_{i-1}} \tag{5}$$

其中：B_{vi}为相邻温度点下磁场平均值的变化值；B_T为相邻温度点下磁场温漂值。

3 结 论

开展了火星车磁通门磁强计单机的设计和研制工作，单机采用亥姆霍兹补偿线圈型探头技术和全数字闭环反馈电路技术，可实现空间磁场的高精度同点测量。通过地面定标，单机量程、噪声水平、分辨率、精度、稳定性指标满足设计要求，到达国际先进水平，与国际火星磁强计（MAVEN磁通门磁强计[12]）对比，结果见表5。

表 5 与THEMIS磁强计性能比较

Table 5 Performance comparison with the THEMIS fluxgate magnetometer

	火星车磁强计	MAVEN 磁强计
量程	± 6.5万 nT	±6.553 6万 nT ± 2 048 nT ± 512 nT
分辨率	10 pT	2 nT 0.062 nT 0.015 nT
噪声	<7 pT/√Hz	<2 nT/√Hz
采样率	128 Hz，32 Hz，16 Hz，1 Hz	32 Hz

参 考 文 献

[1] 欧阳自远, 邹永廖. 火星科学概论[M]. 上海: 上海科技教育出版社, 2017: 54-59.

[2] ZHANG T L, BERGHOFER G. MAG: The Fluxgate Magnetometer of Venus Express[J]. ESA Special Publication，2007(SP 1295)：1-10.

[3] AUSTER H U, APATHY I, BERGHOFER G, et al. Rosetta magnetometer and plasma monitor[J]. Space Sci Rev，2007，128：221-224.

[4] AUSTER H U, GLASSMEIER K H, MAGNES W, et al. The THEMIS fluxgate magnetometer[J]. Space Sci Rev，2008，141：235-264.

[5] HERČÍK D, AUSTER H U, BLUM J, et al. The MASCOT magnetometer[J]. Space Sci Rev，2017，208：433-449.

[6] MAGSON GmbH. About Magson GmbH high-performance fluxgate magnetometers[EB/OL]. 2018[2018-09-12]. http://www.magson.de/.

[7] 赵琳, 杜爱民, 孙树全, 等. 一种球形结构的三分量磁通门磁传感器:中国, ZL201710939975.4[P].2018-03-20.

[8] 李永. 卫星磁测载荷电子学单元研制[D]. 苏州: 苏州大学, 2018.
LI Y. Research on electronic units of spaceborne magnetic field measurement load[D]. Suzhou: Soochow University, 2018.

[9] 支萌辉. 高精度数字磁通门传感器研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2017.
ZHI M H. Research on high precision digital fluxgate sensor[D]. Suzhou: Soochow University, 2017.

[10] 郎雪, 杜爱民, 李琼, 等. 基于PIC单片机的小型化低功耗磁通门磁强计的硬件设计和实现[J]. 地球物理学进展，2016，31(2)：0908-0912.
LANG X, DU A M, LI Q, et al. Hardware design and realization of pic SCM-based miniaturized low-power fluxgate magnetometer[J]. Progress in Geophysics (in Chinese)，2016，31(2)：0908-0912. (in Chinese)

[11] 李琼, 杜爱民, 曹馨, 等. 基于MAC单元的低功耗低延时FIR滤波器的设计与分析[J]. 现代电子技术，2016，39(16)：155-158.
LI Q, DU A M, CAO X, et al. Design and analysis of low-power consumption and low-latency FIR filter based on MAC unit[J]. Modern Electronics Technique，2016，39(16)：155-158.

[12] CONNERNEY J E P, ESPLEY J, LAWTON P, et al. The MAVEN magnetic field investigation[J]. Space Sci Rev，2015，195：257-291.

作者简介：

赵琳(1987–)，工学硕士，主要研究方向：信号与信息处理、磁传感器技术。

通信地址：北京市朝阳区北土城西路19号(100029)

电话：(010)82998048

E-mail：453549816@qq.com

The ROVER Fluxgate Magnetometer

ZHAO Lin[1,2]，DU Aimin[1,2,3]，QIAO Donghai[4]，SUN Shuquan[1,2]，ZHANG Ying[1,2,3]，OU Jiaming[1,2]，GUO Zhifang[1,2]，LI Zhi[1,2]，FENG Xiao[1,2]，GU Shaoran[4]，LI Feng[4]

（1. Key Laboratory of Earth and Planetary Physics，Institute of Geology and Geophysics，Chinese Academy of Sciences，Beijing 100029，China；
2. Institutions of Earth Science，Chinese Academy of Sciences，Beijing 100029，China；
3. University of Chinese Academy of Sciences，Beijing 100049，China；
4. Soochow University，Suzhou 215006，China）

Abstract：Martian magnetic field measurement is one of the focuses of international Mars exploration mission. China's first Mars magnetic measurement mission would carry magnetometers on the rover and the orbiter to achieve joint observation of the surface magnetic field and the spatial magnetic field. Dual tri-axial fluxgate magnetometer would be carried on the rover，which adopts Helmholtz compensation coil probe technology and all digital closed-loop feedback circuit technology to realize high precision same-point measurement of space magnetic field. Reliability, safety and space environment adaptability of the instrument are well considered in the design. According to ground calibration, the range of the ROVER fluxgate magnetometer is ± 65 000 nT，the noise level is 0.01 nT/√Hz，and the resolution achieves 0.01 nT.

Key words：fluxgate；magnetometer；Marian magnetic field measurement

High lights：

- Dual tri-axial fluxgate magnetometer would be carried on the rover.
- Helmholtz compensation coil structure is adopted in the sensor probe , which can realize same-point measurement of space magnetic field and eliminate the deviation of three-axis vector measurement caused by gradient field.
- Full-range adaptive measurement of ±65000 nT is realized by combining the digital feedback technology of FPGA with the feedback of the probe coil.
- The Rover fluxgate magnetometer has a ±65000 nT range, with the noise level less than 0.01 nT/√Hz, and the resolution reaches 0.01nT.

[责任编辑：杨晓燕，英文审校：朱恬]