

磁通门磁强计在深空探测中的应用

李磊, 王劲东, 周斌, 程炳钧, 张艺腾, 冯永勇, 陈思文

(中国科学院 国家空间科学中心, 北京 100190)

摘要: 磁场测量是深空探测的重要任务之一, 通过磁场可以遥感行星内部、研究行星演化历史、认知太阳系天体空间环境。基于法拉第电磁感应原理的磁通门磁强计, 因空间适应性强、技术成熟度高、可靠性高等特点, 是深空磁场测量最为常用的载荷。简要描述了磁通门磁强计的基本测量原理, 探讨了地面和在轨标定的原理和实施方法, 并介绍了磁强计在空间任务中的应用方式。目前, 我国已经具备了星载高精度磁通门磁强计的研制能力。在不久的将来, 磁通门磁强计有望在深空探测任务中发挥重要作用。

关键词: 行星探测; 磁场; 磁通门磁强计

中图分类号: V437+.1

文献标识码: A

文章编号: 2095-7777(2017)06-0529-06

DOI:10.15982/j.issn.2095-7777.2017.06.005

引用格式: 李磊, 王劲东, 周斌, 等. 磁通门磁强计在深空探测中的应用[J]. 深空探测学报, 2017, 4(6): 529-534.

Reference format: LI L, WANG J D, ZHOU B, et al. Application of fluxgate magnetometer in deep space exploration[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2017, 4(6): 529-534.

0 引言

太阳系行星周边的磁场主要有4个来源:

1) 行星内部发电机过程产生的全球性磁场, 又称为主磁场。地球、木星、土星具有较强的主磁场, 这些行星通常拥有一个液态金属的核, 内核温度很高, 热流驱动导电流体对流, 在外核以及核与幔的交界处形成电流, 电流产生行星的主磁场^[1]。而有的巨行星, 如天王星和海王星, 可能并没有形成金属内核, 但它们的壳层具有较高的电导率, 且呈现液态, 壳层中流动的电流, 也可成为主磁场的源头。

2) 行星壳层内物质的剩余磁场。类地行星, 地球和火星以及月球, 主磁场可造成壳层物质磁化, 形成局部磁异常。即便是内部的发电机过程停止了, 全球性的主磁场随之消失了, 行星的壳层仍然会保留很强的剩余磁化。这就是火星当前的状态, 没有全球性的主磁场, 但很多区域, 尤其是南半球的台地具有很强的剩余磁场^[2]。而在月球, 剩磁主要分布在撞击盆地的对峙区, 这点很让人困惑^[3]。

3) 太阳风与行星相互作用产生的外源场。超声速的太阳风携带着行星际磁场到达行星, 与行星的磁场、电离层/大气层、表面相互作用, 形成各种空间电流体系, 这些电流产生磁场, 磁场强度、形态取决于

太阳风与行星之间的作用性质, 如与主磁场相互作用形成的磁层(地球、木星等)、与电离层相互作用形成的感应磁层(金星、火星)、与表面相互作用形成的尾迹(月球)。

4) 随时间变化的外源场在导电的行星内部产生的感应磁场。太阳风是高度动态的, 太阳风与行星的相互作用形成的外源场也是时变的。如果行星内部具有较高的电导率, 根据电磁感应定律, 外场的时变即可能在行星内部诱导磁场。

上述4种磁源产生的磁场, 在不同的行星, 对总磁场的贡献有很大的不同。有主磁场的行星, 主磁场通常是最强的场。在地球的高纬度地区, 地表磁场强度在5万nT, 而木星是太阳系中主磁场最强的行星, 低纬度表面的磁场是3 G, 而高纬度可达14 G ($1\text{ G} = 10^5\text{ nT}$)。对于没有主磁场的行星, 从全球角度, 太阳风与行星相互作用产生的外源场, 是主要的磁场, 但通常小于数百nT。从区域性的角度, 剩磁可能占主导地位, 如火星, 南半球台地的剩磁高达上万nT。行星磁场探测的主要任务之一就是区分各种场源产生的磁场, 确定其对总磁场的贡献。

磁场测量是遥感行星内部、研究行星演化历史的重要手段。从磁场的测量数据可以推断行星磁场的起

源,反演行星内部的构造。另外,从岩石剩余磁场中,还可研究行星的演化历史,例如从月球和火星磁场异常的分布中,看到了大撞击在太阳系形成和演化过程中的作用,使得对40亿年前的过程有限的认知,达到了一个新的高度。

由于洛伦兹力的作用,带电粒子的运动受到磁场的约束。变化的磁场和运动的带电粒子相互作用,产生复杂的能量、动量和质量交换过程。因此,磁场测量对于分析空间等离子体分布及其动力学过程至关重要,是认知太阳系天体空间环境不可或缺的手段。

深空磁场探测,通常都会需要同时满足多个目标测量的需求,磁强计必须具备大的动态范围。如美国木星探测器Juno上的磁强计,量程范围分了6档,从 $\pm 1\ 600 \sim \pm 16 \times 10^5\text{ nT}$,既能在巡航段测量几nT的行星际磁场,又能在木星环绕轨道上测量上百万nT木星的磁场^[4]。深空任务面临各种复杂的环境,如大的温度变化、强辐射等。另外,探测器任务周期都比较长,“伽利略号”木星探测器1989年发射,1995年入轨,工作8年,总共历时14年;而“旅行者1号”“旅行者2号”,20世纪70年代末发射,目前已经飞至日球层边界,寿命更是长达40载。

磁场探测的手段多种多样。磁通门技术最早于20世纪30年代由德国开发,并在第二次大战期间进入实用阶段。与磁阻效应技术、光泵技术、超导效应、磁光效应技术相比,磁通门技术具有技术成熟性高、适应性强、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,以及其体积、重量、可靠性、分辨力和精度上的综合优势,世界各国90%以上的航天器选用三轴磁通门磁强计作为磁场测量的载荷,在深空探测任务中也得到了广泛应用。

1 测量原理

磁通门磁强计测量的基本原理是法拉第电磁感应定律。传感器由绕在磁芯上的初级绕组和包围磁芯的次级线圈组成。在初级线圈上加载一定频率的激励电流脉冲,每个激励电流脉冲在磁芯中产生磁感应强度 B ,由于磁场过强,每个周期内磁芯饱和2次。次级线圈中的感应电动势由2部分组成,激励脉冲产生的奇次谐波和外磁场产生的偶次谐波,偶次谐波的幅度正比于外场的大小。磁通门磁强计利用次级线圈中二次谐波正比于外磁场的原理,将磁信号转换为电信号,实现外磁场的测量。

典型的磁通门磁强计由三轴磁通门传感器和信号处理电路组成,工作原理如图1所示。磁通门传感器分为3个线圈,激励线圈、信号线圈和反馈线圈。激励线圈通过交变电流产生交变磁场,内部磁芯反复饱和。信号线圈将外磁场产生的二次谐波转换为感应电动势信号。反馈线圈的作用是产生与外界相反的磁场,使激励线圈和信号线圈始终工作在零场下。信号处理电路包括输入放大器、带通滤波器、移相器、相敏解调器、同步解调器、积分器、低通滤波器等。为实现整机正常工作,还需要配备电源、磁场反馈补偿器、模数转换器、遥测遥控时钟数据接口、数据处理电路等部件。

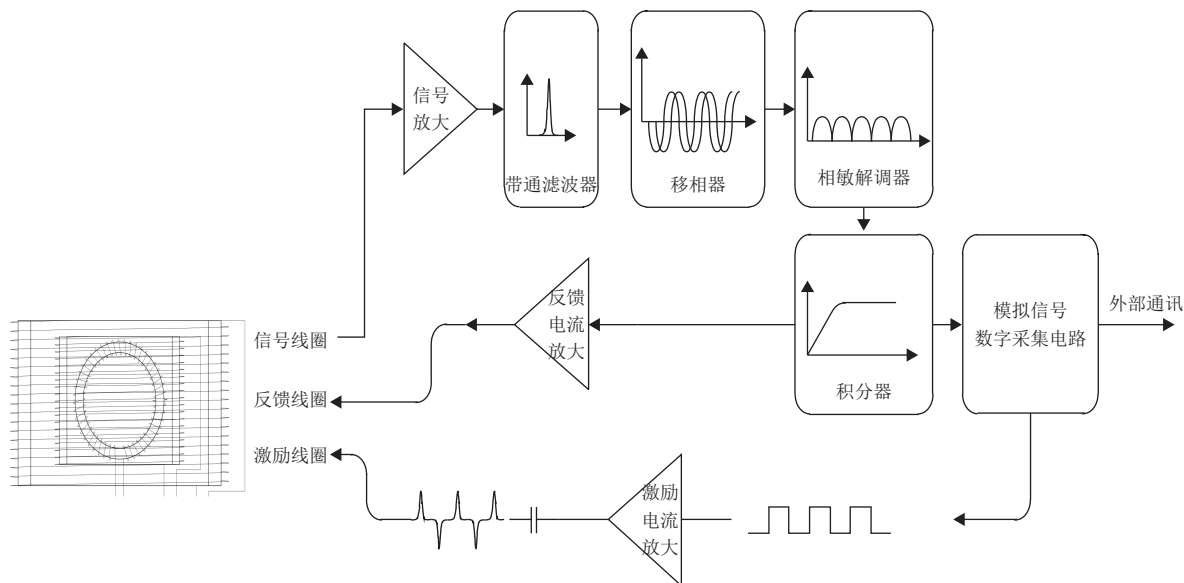


图1 磁通门磁强计工作原理图

Fig. 1 System schematic of the fluxgate magnetometer

空间磁场探测往往需要磁通门磁强计同时满足大动态范围、高分辨率等的要求。传统的磁通门磁强计通常需要通过复杂的分步补偿技术才能满足量程与分辨率的双重要求。近年来,随着低功耗、高分辨率的A/D的上市,数字磁强计技术采用过采样 Σ - Δ 调制方式解决了此问题,实现了空间磁场探测的低噪声、高采样率、高分辨率^[5]。

2 空间应用

在深空探测任务中,磁强计通常安装在轨道器、着陆区或巡视器等平台上。平台由复杂的机、电、电子学等部件组成,这些部件自身都会产生磁场。对于有高精度测量要求的深空磁场探测任务来说,平台的磁洁净设计和剩磁控制是极为重要的。为了尽可能地减少平台的杂散场对环境磁场测量的影响,电池、太阳翼、电机、电路、结构材料等都需要经过专门的设计或选择。

实际上,一般的平台都不可能将杂散场控制到满

足磁场精密测量的要求,因此只能考虑用伸杆将磁场传感器放置到远离平台本体的地方。伸杆的基本出发点是平台的剩磁随距离 r 至少以 r^{-3} 衰减,如果选用长杆,可以有效降低平台在传感器处的剩磁。例如,“旅行者1号”“旅行者2号”磁强计的伸杆长达14 m。然而,磁场矢量测量又对传感器的测量坐标系的方位有要求,要求长杆还必须具有很高的刚性,以保证平台与磁场传感器之间的姿态传递。伸杆的高要求使得卫星在设计制造过程中,需要综合考虑杆的长度以及卫星的磁洁净方案。

20世纪70年代初,在空间磁场测量任务中引入了双探头技术^[6],降低了对伸杆长度的要求。双探头的基本原理是平台的杂散场在距离平台一定距离后可近似为偶极子磁场,强度随距离的3次方衰减。将2个磁场传感器沿着径向分别安装在距离平台 r_1 、 r_2 处,如图2所示,平台在2个传感器上产生不同的测量值,而环境磁场的空间变化尺度远大于卫星尺度,2个传感器上测量值相同。



图2 双探头梯度法测量空间磁场

Fig. 2 Measuring space magnetic field by dual sensor gradiometer

2个探头的测量值 B_1 和 B_2 分别为

$$\begin{aligned} B_1 &= B_0 + B_{sc1} \\ B_2 &= B_0 + B_{sc2} \end{aligned} \quad (1)$$

其中: B_0 为环境磁场; B_{sc1} 和 B_{sc2} 分别为传感器1和2处的平台杂散磁场。

如果平台的杂散磁场可以用位于平台中心O的偶极子模型表示。那么,就可由2个传感器的测量值计算得到环境磁场 B_0 为

$$B_0 = (B_2 - xB_1) / (1 - x) \quad (2)$$

其中: x 由探头1和2的位置决定, $x = (r_1/r_2)^3$

从计算过程可以看到,利用式(2)计算环境磁场 B_0 ,既不需要已知平台的剩磁,也不需要假设平台剩磁为0,即:并不需要用很长的伸杆将平台的剩磁降低至0,这就是双探头技术的最大好处。然而,这并不等于可以对伸杆的长度不做要求。因为只有当平台剩磁可以用中心位于O的偶极子磁场模型来描述时,式(1)方能严格成立。否则,双探头技术得到的外磁场

仍然受到平台剩磁的干扰^[7]。为了满足偶极子磁场的要求,一般要求传感器距离平台中心O的距离是平台自身尺寸的2.5倍以上($r \geq 2.5d_{sc}$,其中: d_{sc} 为平台有效直径)^[8]。

双探头法的另外一个用处是判断磁场波动信号的来源。当磁场数据出现波动时,从单探头上,无法判断这种波动来自外部环境还是来自卫星平台。由式(1)可知

$$B_1 - B_2 = B_{sc1} - B_{sc2} \quad (3)$$

式(3)是与环境磁场无关的量,这就成为了判断磁场波动来源的依据。在数据处理时,如发现磁场测量值 $B_1 - B_2 = 0$,则可以判断波动是来自于环境;如果 $B_1 - B_2 \neq 0$,则表明 $B_{sc1} - B_{sc2} \neq 0$,波动来自平台,是需要剔除的干扰场。这种方法已经被成功应用到短伸杆的平台上,用于判断卫星干扰事件,结合卫星工程参数,可定位干扰的来源,从而根据干扰信号的特点并对数据作相应的处理或剔除^[9]。

双探头还有一个显而易见的优点,就是磁场测量系统的备份。这对于工作时间动辄十几年甚至几十年的深空探测来说,双探头可提高系统的长期可靠性。

3 地面标定和在轨标定

假定磁通门磁强计测量输出与外磁场之间为线性关系,其测量方程可以写作

$$\mathbf{AY} = \mathbf{MB} + \mathbf{O} \quad (4)$$

即:

$$\begin{pmatrix} A_x & 0 & 0 \\ 0 & A_y & 0 \\ 0 & 0 & A_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Y_{x'} \\ Y_{y'} \\ Y_{z'} \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} O_{x'} \\ O_{y'} \\ O_{z'} \end{pmatrix} \quad (5)$$

其中: $\mathbf{B}$ 为外磁场,单位为nT; $\mathbf{Y}$ 为磁强计输出量,单位为电压V; $\mathbf{A}$ 为转换系数; $\mathbf{M}$ 为外磁场坐标系xyz到磁强计测量坐标系 $x'y'z'$ 的转换矩阵; $\mathbf{O}$ 为磁强计的测量零点。

磁通门磁强计必须要经过严格的标定,方能进行磁场的精密测量。地面标定的参数主要有式(5)中的零点 $\mathbf{O}$ 、比例因子 $\mathbf{A}$ 和坐标转换矩阵 $\mathbf{M}$,及其上述参数随温度、时间的稳定性。深空任务一般任务寿命周期较长,进入空间后,由于空间辐照等引起的器件老化变性,热应力、真空下的应力变化导致的支撑结构、参考坐标系的变形等,测量方程中的诸系数还会发生变化,因此,需要开展在轨标定。

地面和在轨标定一般通过磁强计和外磁场之间的相对运动来实现^[9-11]。如磁强计的性能在短时间内不变,根据方程(1),当外场 $\mathbf{B}$ 不变或已知时,通过改变测量坐标系和外磁场坐标系的之间的相对关系,由一组测量值可建立一个线性方程组,其中方程(1)的 $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{O}$ 和 $\mathbf{M}$ 为方程组的未知数,求解线性方程组,即可得到磁强计的关键参数。

3.1 地面标定

磁强计的地面标定通常是在精密控制的外磁场(包括方向、强度)环境下进行。转动磁强计的传感器,获取磁强计的若干组测量值,求解方程(1),即可得到需要标定的参数^[9]。

3.2 在轨标定

在轨标定的基本条件有2个:①磁强计测量坐标系和外磁场矢量之间必须有相对几何关系的变化,且方向覆盖尽可能大地;②外磁场不变或已知。

按照这2个基本条件,标定方法一般又可分为2类:一是磁强计的测量坐标系在外磁场中转动;二是平台及磁强计的测量坐标系不动,利用外磁场的特定

波动进行在轨标定。

3.3 磁强计标定方法在深空中的应用

1) 通过磁强计测量坐标系的运动进行在轨标定

磁强计测量坐标系的运动可通过卫星平台的旋转来实现。利用平台的旋转标定磁强计,最为直接便利的就是自旋卫星。在卫星常规的工作过程中,就可实现自旋平面内磁强计2个磁场分量的标定^[9]。当然,标定的精度还与外磁场条件有关,如果外磁场变化剧烈,由多个测量值建立的线性方程组是无法求解的。因此,在轨标定一般都选择在磁场变化平缓的区域进行,例如在行星的磁层内。对于垂直卫星自旋平面的第三个磁场测量分量,按照这种方法,则需要通过卫星主动调整姿态,改变自旋轴进行旋转才能进行相应的标定。

对于三轴稳定的卫星,则只能由卫星进行主动的姿态控制,在短时间内围绕卫星的2个轴分别进行旋转,进行磁强计的在轨标定。为了平抑空间环境磁场的波动,一般需要积累几圈的数据,才能保证一定的标定精度。例如,美国的火星探测器MAVEN以2°/s的角速度围绕2个轴分别旋转了12圈,在近80 min的时间内完成了磁强计的一次在轨标定^[10]。

无论是三轴稳定卫星或自旋卫星,如需卫星围绕非自旋轴进行旋转,都需要事先制定详细的在轨标定计划,选择空间磁场较为平静的时段或区域,同时还需要协调星上其他工作单元,避免工作或观测上的时间冲突。所幸的是,磁强计需要标定的参量一般都是缓变的,常规情况下,在轨标定每2~3个月进行1次即可。

2) 利用磁场的变化进行在轨标定

在轨标定的基本出发点是磁场测量坐标系和外磁场矢量之间几何关系的相对变化。在测量坐标系不动时,如果外磁场矢量的方向发生改变,同样也可实现相对几何关系的变化,实现磁强计的在轨标定。

利用外场的变化进行标定的想法,最初来自于对行星际磁场观测任务。地球轨道上行星际磁场很微弱,典型值只有几个nT,平台剩磁或者磁强计的零点漂移都可能对测量结果有重大影响,因此行星际磁场测量任务具有迫切的在轨标定需求。观测发现,太阳风中存在着阿尔文波,其主要特点是行星际磁场的大小基本不变,而磁场的方向在不断变化。这个波动特征符合磁强计在轨标定的基本条件,因此,阿尔文波被应用到了行星际卫星磁场测量的在轨标定中^[11]。

现实中“纯”阿尔文波是不存在的,利用阿尔文波在轨标定磁强计,其精度很大程度上取决于数据的选取。另外,某一段磁场数据即便符合阿尔文波判断准

则,其方向变化的覆盖范围可能是非常有限的。为了得到较高的标定精度,就需要在较长时间内积累阿尔文波数据,增加方向覆盖,这给标定的精度、标定的周期就带来了一定的限制,尤其是对于偶尔进入太阳风的磁层探测卫星,就不一定能找到合适的阿尔文波数据对磁强计进行在轨标定。另外,由于太阳风中磁场脉动均方值的径向变化正比于 $r^{-1.5}$,其中: r 为日心距离。太阳风阿尔文波比较适合于太阳系内行星轨道附近的磁强计标定,如金星快车磁强计^[12]。而对于外行星探测任务,太阳风阿尔文波可能就不很适于标定了。

另外,深空探测器在飞越地球时,利用地磁场模型也可对磁强计的性能进行评估。但地磁场模型本身精度有限,同时磁场还受到空间各种电流系的干扰,单靠地磁场模型进行精准的标定是不可能的。

4 结束语

磁通门技术具有技术成熟度高、适应性强,综合技术经济水平好等特点,是空间应用最为广泛的磁场测量技术。我国在20世纪70年代就开始星载磁通门磁强计的研制,并于1981年在“实践2号”卫星上成功搭载。此后,磁强计为多颗卫星上提供了卫星姿态服务。近年来,首台应用于深空探测的磁通门磁强计——火星探测器“萤火1号”高精度磁强计性能指标达到国际先进水平^[13-14]。遗憾的是,由于俄罗斯发射失利,“萤火1号”未能抵达火星。目前,火星、月球等探测任务正在酝酿中,期待着磁通门磁强计在未来的深空探测中发挥重要作用。

参 考 文 献

- [1] ACUNA M H, BEHANNON K W, CONNERNEY J E P. Jupiter's magnetic field and magnetosphere, in physics of the Jovian magnetosphere[M]. Cambridge, UK: Cambridge U. Press, 1983: 1-50.
- [2] ACUNA M H, CONNERNEY J E P, WASILEWSKI P, et al. Magnetic field of Mars: summary of results from the aerobraking and mapping orbits[J]. Journal of Geophysical Research, 2001, 106(E10): 23403-23418.
- [3] BINDER A B. Lunar prospector overview[J]. Science, 1998, 281(5382): 1475-1476.
- [4] CONNERNEY J E P, BENN M, BJARNO J B, et al. The Juno magnetic field investigation[J]. Space Science Review, 2017(213): 39-138.
- [5] PRIMDAHL F, HERNANDO B, PETERSEN J R, et al. Digital detection of the flux-gate sensor output signal[J]. Measurement Science and Technology, 1994, 5(4): 359-362.
- [6] NESS N F, BEHANNON K W, LEPPING R P, et al. Use of tow magnetometers for magnetic field measurement on a spacecraft[J]. Journal of Geophysical Research, 1971, 76(16): 3564-3573.
- [7] 周斌, 王劲东. 卫星磁部件分布对梯度法消除剩磁的影响分析[J]. 中国空间科学技术, 2013, 33(5): 29-34.
ZHOU B, WANG J D. Influence of magnetic component distribution of satellite on eliminating remanant magnetic field by gradient method[J]. Chinese Space Science and Technology, 2013, 33(5): 29-34.
- [8] 张朝阳, 肖昌汉, 高俊吉, 等. 磁性物体磁偶极子模型适用性的试验研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2010, 18(5): 862-867.
ZHANG Z Y, XIAO C H, GAO J J, et al. Experiment research of magnetic dipole model applicability for a magnetic object[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2010, 18(5): 862-867.
- [9] BALOGH A, CARR C M, ACUÑA M H, et al. The cluster magnetic field investigation: overview of in-flight performance and initial results[J]. Annales Geophysicae, 2001, 19(10): 1207-1217.
- [10] CONNERNEY J E P, ESLEY J, LAWTON P, et al. The MAVEN magnetic field investigation[J]. Space Science Reviews, 2015, 195(1-4): 257-291.
- [11] BELCHER J W. A variation of the Davis-Smith method for in-flight determination of spacecraft magnetic fields[J]. Journal of Geophysical Research, 1973, 78(22): 6480-6489.
- [12] ZHANG T L, BERGHOFER G W, MAGNES, et al. MAG: the fluxgate magnetometer of Venus express[J]. ESA Special Publication, 2007(SP 1295): 1-10.
- [13] 王劲东, 赵华, 周斌, 等. 火星空间环境磁场探测研究——“萤火一号”磁强计的研制与应用[J]. 物理, 2009, 38(11): 785-792.
WANG J D, ZHAO H, ZHOU B, et al. Martian space environment magnetic field research: development and application of the YH-1 precision magnetometer[J]. Physics, 2009, 38(11): 785-792.
- [14] 周斌, 赵华, 王劲东, 等. 火星空间环境磁场探测研究——高精度磁强计[J]. 空间科学学报, 2009, 29(5): 467-474.
ZHOU B, ZHAO H, WANG J D, et al. Martian space environment magnetic field investigation—high accuracy magnetometer[J]. Chinese Journal of Space Science, 2009, 29(5): 467-474.

作者简介:

李磊(1964—), 女, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向: 空间环境研究探测。

通信地址: 北京中关村南二条1号(100190)

电话: (010)62586413

E-mail: lil@nssc.ac.cn

Application of Fluxgate Magnetometer in Deep Space Exploration

LI Lei, WANG Jindong, ZHOU Bin, CHENG Bingjun, ZHANG Yiteng,
FENG Yongyong, Chen Siwen

(National Space Science Center, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Measurement of magnetic fields is one of the important tasks in deep space exploration missions. From magnetic fields, it is possible to explore the planetary interiors, to study the evolution of the planets, and to understand space environment of the Solar system. The fluxgate magnetometer based on the Faraday's law is used to measure the magnetic field. Due to its high adaptability, maturity and low cost, it is the most widely used magnetometry instrument in the deep space missions. The principles of the measurement, and the methods of the ground and in-orbit calibrations of the instrument are briefly reviewed. The applications of the instrument in deep space exploration missions are also introduced. At present, China has already been able to develop high precision fluxgate magnetometer for space applications. It is expected that the fluxgate magnetometer will play important roles in future deep space exploration missions.

Key words: planetary exploration; magnetic field; fluxgate magnetometer

High lights:

- Magnetometry is an important way to understand the planets in the Solar system.
- The fluxgate magnetometer is the most reliable instrument for space magnetometry.
- Ground and in-flight calibrations are necessary to ensure high quality data for scientific research.

[责任编辑: 宋宏, 英文审校: 朱恬]

(上接第514页)

Integral Technical Scheme of Payloads System for Chinese Mars-1 Exploration

ZHU Yan, BAI Yunfei, WANG Lianguo, SHEN Weihua, ZHANG Baoming,
WANG Wei, ZHOU Shengyu, DU Qingguo, CHEN Chunhong

(National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Science objectives and payloads configuration for Chinese Mars-1 exploration project are introduced. Integral technical scheme of the payloads system are introduced, including the power supply, telecontrol and telemetry, science data processing, onboard autonomous, and the major program of workflow. According to the complex functions and decentralized placement of the Mars-1 orbiter payloads system, a dedicated payload-controller is designed to organically link the system through bus network, providing a unitive electrical interface with the orbiter platform. According to the restriction on the weight, volume and power supply of the Mars-1 rover payloads system, a public payload-controller is designed, integrating most of the main control units of the rover payloads, and realizing centralized control and management.

Key words: Mars exploration; payload; orbiter; Mars rover

High lights:

- A dedicated payload-controller is designed to organically link all the Mars-1 orbiter payloads.
- A public payload-controller is designed to integrate the main control units of the Mars-1 rover payloads.
- Payloads onboard autonomous is realized through the payload-controllers.

[责任编辑: 高莎, 英文审校: 朱恬]