

电磁监测卫星磁洁净控制方法研究

肖琦¹, 刘胜利², 孟立飞¹, 陈金刚¹

(1.北京卫星环境工程研究所, 北京 100094; 2.航天东方红卫星有限公司, 北京 100094)

摘要: 提出了卫星磁洁净控制的主要方法, 覆盖从卫星可行性设计到最终系统级磁试验的各个阶段。结合电磁监测卫星的研制流程, 介绍了在可行性论证、方案阶段和初样阶段卫星磁洁净控制工作的进展。开展的工作表明, 卫星平台在绝对磁场校准装置位置产生的磁场干扰不确定量可以控制在 0.5 nT, 能够满足卫星在轨科学探测任务需求。

关键词: 磁矩; 磁场; 磁洁净; 电磁监测试验卫星; 张衡一号

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2018.06.015

中图分类号: TJ07; V474.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2018)06-0078-04

Magnetic Cleanliness Control Methods of Seismo-electromagnetic Satellite

XIAO Qi¹, LIU Sheng-li², MENG Li-fei¹, CHEN Jin-gang¹

(1.Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094; 2.DFH Satellite Co. Ltd, Beijing 100094)

ABSTRACT: The article proposed the principal methods of satellite magnetic cleanliness control, covering all phases from satellite feasibility design to eventually the system level magnetic test. In combination with development procedures of seismo-electromagnetic satellite, the article also introduces the working process satellite magnetic cleanliness control on various stages like feasibility demonstration, plans appraising and prototype sample. The work carried out has demonstrated that the magnetic interference uncertainty quantity generated from the location of absolute magnetic field calibration device can be limited to 0.5 nT and meet the requirement of scientific detection.

KEY WORDS: magnetic moment; magnetic field; magnetic cleanliness; seismo-electromagnetic satellite; Zhangheng-1 satellite

国外用于地震监测的 Predvestnik-E、DEMETER 等卫星, 用于地球磁场探测的 MagSat、CHAMP、SWARM 等卫星, 用于空间环境探测的 CLUSTER、Rosetta、ST5 等卫星, 都采取了严格的磁洁净控制措施, 来保证磁场探测精度^[1-4]。中欧合作的探测双星也进行过严格的磁洁净控制, 并得到过在轨验证, 积累了一定的经验^[5-6]。整体来看, 我国在卫星磁洁净控制方法和经验方面相对还有所欠缺。

电磁监测卫星(CSES)主要用于空间电磁观测, 是我国首颗以地震前兆探测为主要目标的应用卫星, 其磁洁净度控制相较以往型号有更高的要求。为了降低卫星平台的磁场干扰, 一方面需对卫星平台进行净

磁控制, 另一方面可采用伸杆的方式将磁强计探头安装在远离卫星平台的位置, 距离越远, 则磁场干扰量越小^[7]。无论是净磁控制还是采用长伸杆, 都有工程实现的限制和昂贵的成本, 因此选择合理科学的控制方法十分重要。

文中结合电磁卫星在可行性论证、方案阶段和初样阶段卫星磁洁净控制工作的进展, 介绍 CSES 卫星磁洁净控制方法。

1 数学模型

磁性材料和电流会产生磁场, 而卫星及其部件一

般都由大量的元器件、结构件和工作电路组成, 它们在外产生的磁场非常复杂, 因此必须采用简化的数学模型来定义卫星或其部组件的磁特性。在此基础上才能开展定量的设计、测试、仿真和优化等磁洁净控制工作。

根据材料特性和电路布局直接建立卫星或其部件的磁性模型, 从工程上来讲是难以实施的, 建模所需的人力、物力、时间成本极大, 且模型太过复杂, 不利于使用。因此需要针对卫星及其部件的实际情况提出不同的数学模型, 基本思路就是通过测量设备外部的磁场, 反演计算建立设备的磁性模型, 再通过该模型计算设备外部任意位置的磁场分布。

1.1 磁偶极子模型

磁偶极子计算式为:

$$\bar{B}(\bar{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[\frac{3\bar{r}(\bar{r} \cdot \bar{M})}{|\bar{r}|^5} - \frac{\bar{M}}{|\bar{r}|^3} \right] \quad (1)$$

式中: $\bar{B}$ 为磁感应强度, T; μ_0 为真空磁导率; $\bar{r}$ 为测量点的位置矢量, m; $\bar{M}$ 为磁偶极矩, A·m²。

距离较远时 (r 大于 3 倍设备包络尺寸), 设备的磁场分布可近似为磁偶极子场, 可利用测量得到的 $\bar{B}$ 值, 通过式 (1) 反算设备的磁偶极矩 $\bar{M}$ 。那么再次利用式 (1), 就能计算设备在较远位置产生的磁场分布。

实际上 $\bar{B}$ 值大致随着 r 的三次方衰减, 在距离较远处, $\bar{B}$ 值很小, 工程上很难准确测量。因此需要测量设备较近位置的磁场分布, 再通过一定的算法反演设备的中心磁偶极矩^[8]。我国也建立了相应的航天行业标准及国军标, 利用近场测量数据, 计算设备的中心磁偶极矩。对于尺寸不大的卫星部件, 可采用中心磁偶极矩来定义其磁特性, 采用该模型即可计算远场的磁场分布。

1.2 多磁偶极子模型

卫星尺寸较大, 磁强计即使通过伸杆远离卫星平台, 在其安装位置也不会是一个很好的磁偶极子场, 因此卫星需要定义为多磁偶极子模型。多磁偶极子计算式为:

$$\bar{B}(\bar{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_{i=0}^N \left\{ \frac{3(\bar{r} - \bar{r}_i)[(\bar{r} - \bar{r}_i) \cdot \bar{M}_i]}{|\bar{r} - \bar{r}_i|^5} - \frac{\bar{M}_i}{|\bar{r} - \bar{r}_i|^3} \right\} \quad (2)$$

式中: $\bar{r}_i$ 为第 i 个磁偶极子的位置矢量; $\bar{M}_i$ 为第 i 个磁偶极子的磁偶极矩。

1) 直接建模。卫星建立多磁偶极子模型后, 即可计算外部任意位置的磁场分布。根据卫星圆周的磁场测量数据, 定义初始偶极子模型, 然后采用反演算法, 对磁矩 $\bar{M}_i$ 和位置 $\bar{r}_i$ 进行优化, 最终得到符合精度要求的多磁偶极子模型。

记 $3m$ 维向量 $\underline{M}$ 为 m 个磁源的未知磁矩, $3m$ 维向量 $\underline{r}$ 为磁源的未知位置, $3n$ 维向量 $\underline{B}_c$ 为理论计算磁场值, $3n$ 维向量 $\underline{B}_t$ 为 n 个测量点的磁场测量值。则按照多磁偶极子模型 ($\underline{M}, \underline{r}$), 式 (2) 由向量和矩阵形式表达则变换为:

$$\underline{B}_c = \underline{G}\underline{M} \quad (3)$$

其中 $\underline{G} = \underline{G}(\underline{r})$, 为 $3n \times 3m$ 维矩阵。

定义磁场计算值和测量值的方差函数:

$$C(\underline{M}, \underline{r}) = (\underline{B}_t - \underline{B}_c)^T (\underline{B}_t - \underline{B}_c) \quad (4)$$

模型参量 $\underline{M}$ 和 $\underline{r}$ 的优化值由函数 $C(\underline{M}, \underline{r})$ 的最小化原理确定。即磁矩优化要求:

$$\nabla_{\underline{M}} C = 0 \quad (5)$$

位置优化要求:

$$\nabla_{\underline{r}} C = 0 \quad (6)$$

通过磁矩优化和位置优化的双重反复叠代, 计算得到最优的多磁偶极子模型。

2) 间接建模。测量卫星所有部件的外部磁场分布, 由得到的试验数据建立部件的磁偶极子模型, 根据卫星构型, 组合成卫星的多磁偶极子模型^[9]。

2 伸杆长度计算

卫星部件及工作电流等磁源, 在磁强计探头位置处会产生明显的磁场干扰。在磁源不能完全消除的情况下, 需要通过伸杆的方式拉大它们之间的距离, 来有效降低磁场干扰量。卫星可行性论证阶段, 就需要评估这一关键问题, 估算磁场干扰量的大小, 确定磁强计探头安装伸杆的合理长度。在此阶段卫星的最终构型设计、选用设备的磁特性都未确定, 不能按照精确的数学模型进行整星磁场分析计算, 但仍可通过一定的简化方法进行估算。

1) 参考同类卫星平台以往型号, 根据磁测试结果进行整星磁场建模计算。如图 1 所示, 为某卫星磁

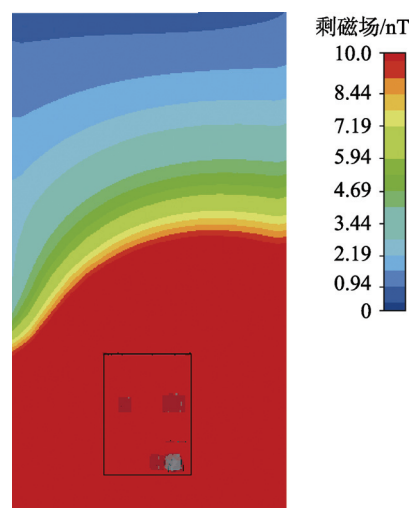


图1 卫星磁场分布

场分布计算结果(不包括磁力矩器),其中黑框部分为卫星外面板轮廓。根据计算结果可知,离开卫星4 m处,剩磁场约为1 nT,波动场可以控制到0.5 nT以内。

2) 基于卫星选用的部件分析,有同类设备测试结果的根据测量结果计算其磁偶极矩,没有测试结果的合理预估其磁偶极矩。由于卫星最终布局未知,可采用正态分布法进行统计计算,国外采用蒙特卡洛方法计算,两者结果一致,加权系数 α 的值一般取为0.5^[10]。计算式为:

$$B(r) = \alpha \cdot \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_{i=0}^N \frac{M_i}{\sqrt{3}} \quad (7)$$

式中: r 为卫星中心和磁场计算点之间的距离; M_i 为第*i*个设备的磁偶极矩合量。

利用式(7),无须知道单台设备的安装位置 and 方向,即可估算卫星较远位置的磁场大小。远场计算结果和图1接近。因此可行性论证阶段确定CSES卫星伸杆长度最短不小于4 m,在卫星后续研制过程中,根据工程实现难度,伸杆的长度最终被确定为4.5 m。

3 磁设计方案

在卫星研制方案阶段,形成覆盖项目全周期的磁设计方案,有效控制卫星磁洁净度。内容主要包括三部分:磁性指标分配、磁性控制方法和规范、磁场测量和标定。

3.1 磁性指标分配

开展大量单机设备磁性摸底测试,参考国内外科学考察类卫星磁性指标分解方法,根据CSES卫星磁场干扰控制目标,提出所有单机设备的磁场和磁矩控制指标,具体包括磁矩、磁矩变化量以及磁场变化量。

其中磁矩指标控制的是设备产生的剩磁场大小,可根据式(1)进行计算。磁矩变化量指标控制的是设备的剩磁场波动大小,主要由设备不同的加电状态和充退磁效应引起。磁场变化量指标控制的是设备感应磁场大小(轨道磁场引起的感应磁场),主要由在轨地磁场的变化引起。研制过程中各单机需要严格按照磁控制规范设计、生产和测试,确保能够满足分配的磁性指标要求,不满足则进行磁洁净改造和处理。以最常见的电子学箱为例,尺寸在20 cm左右,三类指标一般为:10 mA·m²、5 mA·m²和5 nT(距离0.5 m)。该指标要求较严,普通单机通常达不到,需要净磁设计和控制。

3.2 磁性控制方法和规范

主要包括:无磁或低磁材料和元器件的选用要求;所有电流回路的控制方法和要求;普通设备和分系统的净磁设计和布局要求;特殊设备的磁性控制

方法;总装、试验、运输、发射等各阶段的磁控制要求;整星磁仿真、优化设计的方法和要求;元器件、单机、整星磁试验项目和要求。

3.3 磁场测量和标定

卫星使用的磁力矩器带来了很大的剩磁场和感应磁场的干扰。在设计时就将其布局在伸杆的延长线附近,利于使用双探测器消除其部分影响^[11]。同时通过严格的磁性控制措施进行设计、生产、总装和试验,有效降低干扰磁场的影响。最后通过整星标定的办法得到磁强计探头位置的干扰磁场大小,后期通过数据处理消除其大部分影响。

整星磁场标定困难在于需要大尺寸、高稳定度、均匀的零磁场和标准磁场环境。目前国内能提供的大型磁环境模拟系统,其磁场模拟范围±100 000 nT,磁场模拟分辨力1 nT,环境磁场干扰不大于1 nT/10 min。在此条件下,无法直接进行精度优于0.5 nT微弱干扰磁场的测量和标定。

“近场测量、远场计算”的整星磁场测量和标定方法被提出,如图2所示。通过测量卫星较近位置圆周的磁场分布,建立模型,计算磁强计探头位置的磁场强度。计算方法见多磁偶极子直接建模法,误差不大于15%。在磁强计探头位置磁场总量不超过3 nT的情况下,标定的磁场不确定量不大于0.45 nT,可以满足任务需求。

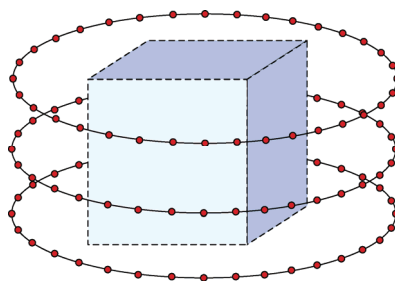


图2 磁场测量

4 磁性控制和分析结果

按照卫星的设备选型(包括磁力矩器),在没有严格的磁性控制条件下,在伸杆顶端磁强计安装位置产生的剩磁场、剩磁场变化以及感应磁场分别不小于2, 1, 5 nT。按照磁设计方案和控制规范,对大量设备进行了磁性设计和改造工作,有效控制了卫星磁性。总体来看,在伸杆顶端磁强计安装位置, z 方向的干扰磁场最大,结果如图3、图4所示。图中横坐标为统计的设备数量,包含了卫星所有磁性部件。图3纵坐标为剩磁场大小,根据设备数量的增加,计算剩磁场合量的变化情况。误差棒为剩磁场的不确定部分,由设备工况变化、充退磁效应引起,同样逐台计

算合量的变化情况。图4纵坐标为感应磁场大小, 由于地磁场均匀, 其各设备感应磁场方向一致, 因此合量逐步变大。基于部件实测结果统计计算, 卫星平台

产生的剩磁场、剩磁场变化以及感应磁场总量分别为 -0.37 , 0.37 , 1.17 nT。通过整星标定, 可以将干扰量进一步降低。

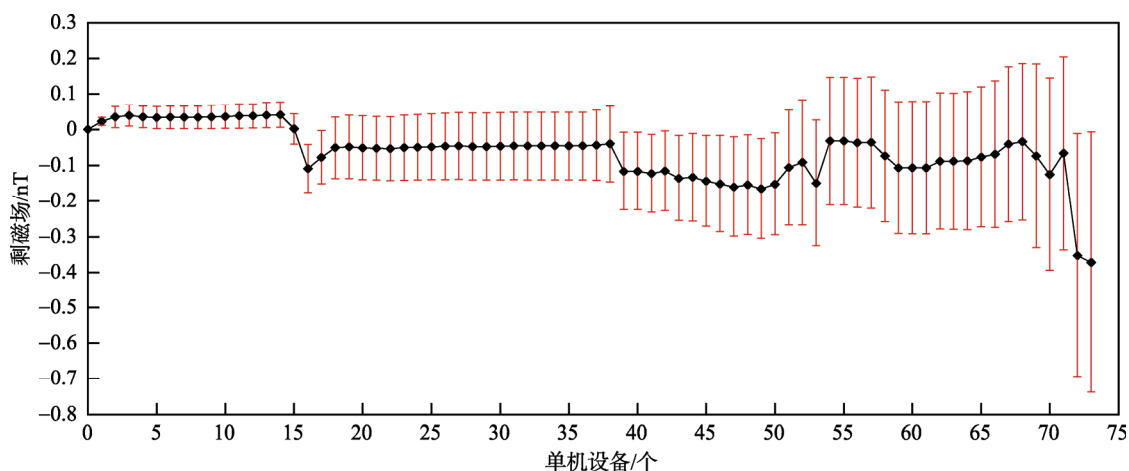


图3 剩磁场

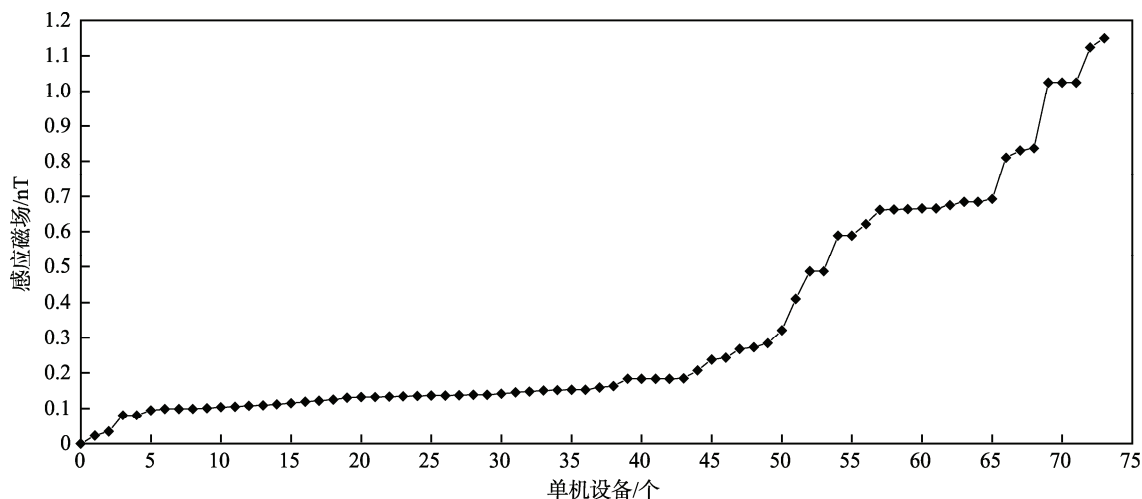


图4 感应磁场

5 结语

按照文中提出的磁洁净控制方法, CSES 卫星完成了相应的磁性控制工作。基于部件实际测量结果的分析表明, 在系统级标定之后, 卫星磁洁净度可以达到预期要求。从结果来看, 感应磁场干扰比较大, 需重点关注感应磁场的控制。另外还需研究如何进一步提高整星磁场测量和标定的精度。

参考文献:

- [1] 冯彦, 安振昌, 孙涵, 等. 地磁测量卫星[J]. 地球物理学进展, 2010, 25(6): 1947-1958.
- [2] LUDLAM M, ANGELOPOULOS V, TAYLOR E, et al. The THEMIS Magnetic Cleanliness Program[J]. Space Science Review, 2008, 141: 171-184.
- [3] NARVAEZ P. The Magnetostatic Cleanliness Program for the Cassini Spacecraft[J]. Space Science Review, 2004, 114:

385-394.

- [4] WEIKERT S, MEHLEM K, WIEGAND A. Spacecraft Magnetic Cleanliness Prediction and Control[C]// 2012 ESA Workshop on Aerospace EMC. Venice, Italy, ESA SP-702, 2012.
- [5] 陈斯文. 卫星磁洁净的控制和测量[J]. 地球物理学进展, 2009, 24(2): 797-800.
- [6] 易忠, 孟立飞. 探测双星磁性仿真分析计算[J]. 装备环境工程, 2006, 3(3): 37-42.
- [7] 张润宁, 杨芳, 王海明, 等. 我国地震电磁监测卫星总体技术研究[J]. 地震, 2009, 29(z1): 9-16.
- [8] EICBBORN W L. Magnetic Dipole Moment Determination by Near-Field Analysis[R]. NASA TN D-6685, 1972.
- [9] 易忠. 卫星磁性仿真模型建立[J]. 航天器环境工程, 2004, 21(2): 8-16.
- [10] BOSCHETTI D, GERVASIO G, MARZIALI I. Montecarlo Approach for Magnetic Cleanliness Evaluation on Spacecraft[R]. ESA SP-702, 2012.
- [11] 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.