

# 基于遗传算法的卫星磁模型研究

徐超群<sup>1,2</sup>, 易忠<sup>1,2</sup>, 孟立飞<sup>2</sup>, 刘超波<sup>2</sup>, 黄魁<sup>2</sup>

(1. 可靠性与环境工程技术重点实验室, 北京 100094; 2. 北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

**摘要:** 针对卫星磁特性研究与磁试验, 建立了卫星多磁偶极子模型, 分离了线性和非线性部分, 利用遗传算法, 以测点的模拟值和测量值之差的均方根作为目标函数, 搜索多磁偶极子的位置, 同时检测拟合误差, 使得目标函数达到最优的同时, 拟合误差也满足要求. 最后对卫星静止状态和加电状态的磁性进行了计算, 试验结果表明, 用该方法建立卫星磁场模型精度高, 磁矩和磁场的误差均小于 5%, 并且对测量误差不敏感, 具有很强的鲁棒性.

**关键词:** 卫星; 多磁偶极子; 遗传算法; 误差

**中图分类号:** O441.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112 (2020)06-1108-05

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2020.06.009

## Research on Satellite Magnetic Model Based on Genetic Algorithm

XU Chao-qun<sup>1,2</sup>, YI Zhong<sup>1,2</sup>, MENG Li-fei<sup>2</sup>, LIU Chao-bo<sup>2</sup>, HUANG Kui<sup>2</sup>

(1. Science and Technology on Reliability and Environmental Engineering Laboratory, Beijing 100094, China;

2. Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094, China)

**Abstract:** According to the research of satellite magnetic characteristics and magnetic test, the model of satellite multi-magnetic dipole is established, the linear part and nonlinear parts are separated, The root mean square of the difference between the simulated value and the measured value is taken as the objective function, and the genetic algorithm is used to search the position of the multi-magnetic dipoles, at the same time, the fitness error between measurements and calculations is monitored so that when the object function reaches the optimum, the fitness error can meet the requirement. At last, the magnetic properties of the satellite in static state and electrified state are calculated, the result shows that the magnetic model obtained by adopting the method is high accurate and strong robust, the error of magnetic field and magnetic moment are both less than 5%.

**Key words:** satellite; multi-magnetic dipole; genetic algorithm; error

## 1 引言

卫星工程规模大、复杂性高, 且难以维护, 一旦发生事故, 便会造成巨大的损失. 空间磁场<sup>[1]</sup>是构成航天器在轨运行环境的要素之一, 而航天器自身带有多种磁性部件, 表现出一定的磁性, 空间磁场对航天器的磁力作用<sup>[2]</sup>, 会严重影响航天器一些重要部件的运转, 以及自身的姿态控, 同时会对在轨磁试验产生巨大影响. 因此, 对卫星的磁性做出准确的描述和评估, 使其保持在一定范围内至关重要.

目前, 在卫星地面磁性试验时, 一般利用赤道法<sup>[3]</sup>分析整体磁矩, 误差可控制在 10% 以内, 其结果为航天器内部多个磁部件的整体效果, 不能真实分辨航天

器内部磁源位置及磁矩大小. 随着航天技术的发展, 航天器磁测试验不仅要评估整体磁矩, 而且还要分析其内部关键磁源的分布, 这些结果可以提供更加丰富的磁信息, 还可以监控主要磁性部件的异常变化. 在求解此类问题时, 磁偶极子模型<sup>[4-6]</sup>因其理论推导清晰, 在国防和环境领域备受瞩目, 常被用于磁目标建模<sup>[7-9]</sup>与定位<sup>[10-12]</sup>, 卫星的多磁源问题转化为多磁偶极子的定位和磁矩研究, 为计算带来便利而不失真实性.

常用的多磁偶极子目标建模方法可分为两大类: 一类是把非线性问题线性化, 使用导数的最优化方法, 也称局域优化, 该类方法实践中容易受到噪声干扰, 也易于陷入局部优化值, 甚至出现一些异常步长. 另一类是完全非线性的智能算法, 也称全局优化, 其中遗传算

法操作简单,有较高的成功率和准确率<sup>[13]</sup>,所以被广泛应用.本文建立了卫星多磁偶极子模型,在CM2实验室<sup>[14]</sup>测量了某卫星静止状态和运行状态的周围磁场数据,以测点的测量值和模拟值之差的均方根作为目标函数,用遗传算法搜索多磁偶极子的位置,同时检测拟合误差,使得目标函数达到最优的同时,拟合误差也满足要求.

## 2 卫星多磁偶极子模型

卫星的磁特性,由构成卫星的永磁材料和软磁材料决定,但其形体复杂,磁化不均匀,为了计算和描述这种磁特性(磁矩和磁场分布),就需要建立准确的卫星某状态下的磁性仿真模型.根据实际需要,将卫星测量空间设置成不同形状和大小的几何体,磁偶极子位于几何体内,磁源用红色点表示,磁矩方向用箭头表示,磁矩大小可通过红点大小或箭头长短来区分,如图1所示.

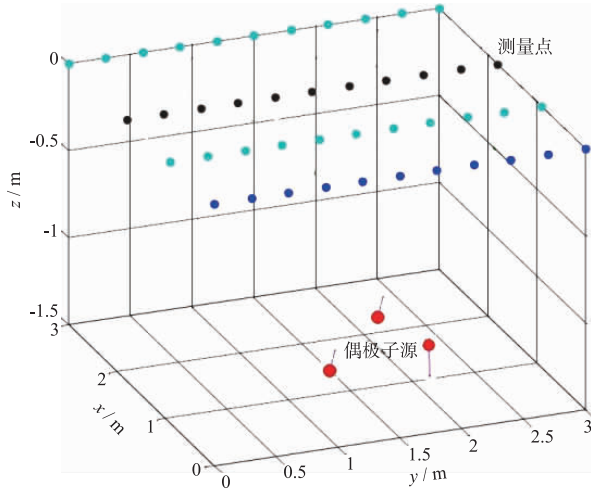


图1 卫星多磁偶极子模型

假设在卫星内部有  $N$  个磁偶极子,坐标分别为  $(x_i, y_i, z_i)$ ,  $i=1, 2, \dots, N$ . 在测量点  $P(x_j, y_j, z_j)$  处的磁场三分量为:

$$\begin{cases} B_{px} = \sum_{i=1}^N (a_{xi}M_{xi} + a_{yi}M_{yi} + a_{zi}M_{zi}) \\ B_{py} = \sum_{i=1}^N (b_{xi}M_{xi} + b_{yi}M_{yi} + b_{zi}M_{zi}) \\ B_{pz} = \sum_{i=1}^N (c_{xi}M_{xi} + c_{yi}M_{yi} + c_{zi}M_{zi}) \end{cases} \quad (1)$$

式中  $M_{xi}, M_{yi}, M_{zi}$  分别是第  $i$  个磁偶极子在  $x, y, z$  方向的磁矩分量. 系数  $a, b, c$  分别为:

$$\begin{aligned} a_{xi} &= \frac{\mu_0}{4\pi} \left[ \frac{3(x_j - x_i)^2}{r^5} - \frac{1}{r^3} \right]; \\ a_{yi} &= \frac{3\mu_0(x_j - x_i)(y_j - y_i)}{4\pi r^5} = b_{xi}; \end{aligned}$$

$$a_{zi} = \frac{3\mu_0(x_j - x_i)(z_j - z_i)}{4\pi r^5} = c_{xi};$$

$$b_{yi} = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[ \frac{3(y_j - y_i)^2}{r^5} - \frac{1}{r^3} \right];$$

$$b_{zi} = \frac{3\mu_0(y_j - y_i)(z_j - z_i)}{4\pi r^5} = c_{yi};$$

$$c_{zi} = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[ \frac{3(z_j - z_i)^2}{r^5} - \frac{1}{r^3} \right].$$

其中:  $r = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2 + (z_j - z_i)^2}$

这样磁场信息可写成下面的矩阵形式:

$$\mathbf{B} = \mathbf{G} \cdot \mathbf{M} \quad (2)$$

其中:

$$\mathbf{B} = [B_{x_1} \ B_{y_1} \ B_{z_1} \ \dots \ B_{x_n} \ B_{y_n} \ B_{z_n}]^T$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} a_{x11} & a_{y11} & a_{z11} & \dots & a_{x1n} & a_{y1n} & a_{z1n} \\ b_{x11} & b_{y11} & b_{z11} & \dots & b_{x1n} & b_{y1n} & b_{z1n} \\ c_{x11} & c_{y11} & c_{z11} & \dots & c_{x1n} & c_{y1n} & c_{z1n} \\ a_{x21} & a_{y21} & a_{z21} & \dots & a_{x2n} & a_{y2n} & a_{z2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{xnm} & a_{ymn} & a_{znm} & \dots & a_{xmn} & a_{ymn} & a_{zmn} \\ b_{xnm} & b_{ymn} & b_{znm} & \dots & b_{xmn} & b_{ymn} & b_{zmn} \\ c_{xnm} & c_{ymn} & c_{znm} & \dots & c_{xmn} & c_{ymn} & c_{zmn} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{M} = [M_{x_1} \ M_{y_1} \ M_{z_1} \ \dots \ M_{x_n} \ M_{y_n} \ M_{z_n}]^T$$

这样,磁场信息  $\mathbf{B}$  变为  $3m \times 1$  的矩阵,磁矩  $\mathbf{M}$  变为  $3n \times 1$  的矩阵,  $\mathbf{G}$  变为  $3m \times 3n$  的矩阵. 此时式(2)中的线性部分和非线性部分分开,在求解时,只需要对非线性部分进行反复搜索,较大程度上降低了搜索难度.

## 3 遗传算法实现

### 3.1 目标函数选取

假设卫星内部有  $N$  个磁偶极子,令其初始参数为  $(\mathbf{G}_1, \mathbf{G}_2, \dots, \mathbf{G}_n, \mathbf{M}_1, \mathbf{M}_2, \dots, \mathbf{M}_n)$ ,则可计算出卫星外部每个测点的磁场值  $\mathbf{B}$ ,而实际每个测点的磁场值  $\mathbf{B}_r$  为:

$$\mathbf{B}_r = \mathbf{G}(\mathbf{G}_1, \mathbf{G}_2, \dots, \mathbf{G}_n) \cdot \mathbf{M}(\mathbf{M}_1, \mathbf{M}_2, \dots, \mathbf{M}_n) + \mathbf{B}_0 \quad (3)$$

其中  $\mathbf{B}_0$  为背景噪声,这样可以定义目标函数为:

$$\sigma = \text{sqrt} \left( \frac{\sum |B_r - B(\mathbf{G}_{q1}, \mathbf{G}_{q2}; \dots, \mathbf{G}_{qn}, \mathbf{M}_{q1}, \mathbf{M}_{q2}; \dots, \mathbf{M}_{qn})|^2}{n} \right) \quad (4)$$

上式为测点的测量值和模拟值之差的均方根,利用遗传算法搜索,使式(4)取极小值的一组  $(\mathbf{G}_{q1}, \mathbf{G}_{q2}, \dots, \mathbf{G}_{qn}, \mathbf{M}_{q1}, \mathbf{M}_{q2}, \dots, \mathbf{M}_{qn})$  作为问题的解,这样也就确定了磁偶极子的位置和磁矩信息.

### 3.2 程序步骤

遗传算法从随机一个群体开始,核心是经过“选

择”、“交换”和“变异”三个过程,得到新群体,然后重复运算,直到群体变得“一致”,即目标函数满足要求. 在卫星多磁偶极子计算中,主要是对磁源位置  $\mathbf{g}$  矢量和磁矩  $\mathbf{M}$  求解,方法如下:

(1) 首先设置含有位置和磁矩信息的初始参数:  $\mathbf{g} = (r_1, r_2, \dots, r_n; m_1, m_2, \dots, m_n)$ ,  $\mathbf{g}$  代表一个“染色体”单元,表示一个完整解,然后随机生成大量群体:  $\mathbf{g}_1, \mathbf{g}_2, \mathbf{g}_3, \dots$ .

(2) 计算目标函数,判断每个单元的适应度:  $f(\mathbf{g}_1), f(\mathbf{g}_2), f(\mathbf{g}_3), \dots$ , 按比例保留适应度较好的单元:  $\mathbf{g}_1, \mathbf{g}_2, \mathbf{g}_3, \dots$ .

(3) 对部分单元进行片段交叉,按一定概率进行单元变异,例如:磁源位置交叉和磁源磁矩变异:

$$\begin{cases} r_k(\mathbf{g}_i) = (1-b)r_k(\mathbf{g}_i) + br_l(\mathbf{g}_j) \\ r_l(\mathbf{g}_j) = (1-b)r_l(\mathbf{g}_j) + br_k(\mathbf{g}_i) \end{cases}$$

$$\text{和 } m_i = \begin{cases} m_i + (m_i - m_{\max})r\left(1 - \frac{\mathbf{g}}{\mathbf{G}}\right)^2 \\ m_j + (m_{\min} - m_i)r\left(1 - \frac{\mathbf{g}}{\mathbf{G}}\right)^2 \end{cases}$$

(4) 形成子代,同时加入随机生成的新单元,评估目标函数,如满意则停止输出;如不符合要求,则重复评估、遗传的步骤,直到适应度满足要求的“染色体”单元.

## 4 实验验证

在 CM2 实验室进行了某卫星静止状态和通电状态情况下的实测,如图 2 所示.

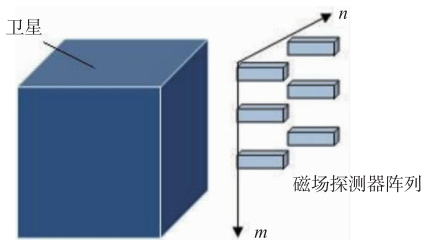


图2 卫星磁数据采集示意图

对卫星的四个面上共 48 个点进行数据采集和模拟计算,测量点数目不小于两倍的偶极子数目,优化计算过程中磁偶极子数目小于 24 个,取目标函数最优的个数输出;另外在计算机实现过程中,应加上各磁偶极子位置参数不超过试件尺寸的约束,使其位置的计算结果包含在模型内部,这样更有利于计算和研究. 同时对各偶极子位置的重叠性进行判断,对于重叠的偶极子进行矢量合并.

### (1) 卫星静止状态

卫星静止状态是指卫星在地面磁试验时,处于不供电、不运行的状态. 通过对卫星测量面的磁数据测量,

然后利用遗传算法计算卫星磁模型,得到其内部含有 5 个磁偶极子的最优分布,结果如图 3 所示.

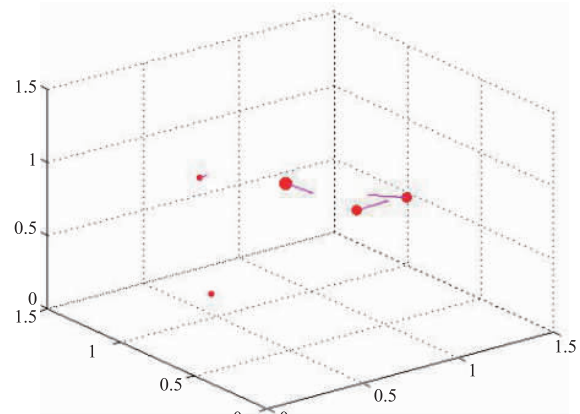


图3 磁偶极子最优分布

整个过程耗时 569s,主要是后期优化较慢. 目标函数如图 4 所示,迭代设置 8000 步,发现遗传算法收敛速度很快,在 200 步就开始平缓,最终目标函数达到  $2.24 \times 10^{-4}$ .

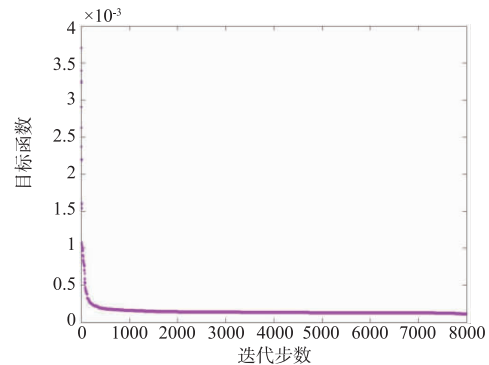


图4 目标函数优化过程

建立完卫星磁模型后,对卫星赤道周围的 36 个点进行建模值和测量值在  $x, y, z$  三方向的对比,结果如图 5(a) ~ 5(c) 所示,可以看出拟合结果很好,并且总磁场误差为 3.07%,总磁矩误差为 3.72%.

### (2) 卫星通电状态

卫星通电状态是指卫星在地面磁试验时,处于供电运行的状态. 通过对卫星四个面周围磁数据测量和计算得到 16 个磁偶极子的最优分布,如图 6 所示,可看到卫星通电运行后,内部部件受到影响并带有一定的磁性.

整个过程耗时 1261s,后期优化耗时较多. 目标函数如图 7 所示,同样遗传算法收敛速度很快,在 200 步就开始平缓,最终目标函数达到  $3.18 \times 10^{-4}$ .

同样,在建立完卫星通电工作状态的磁模型后,对卫星赤道周围的 36 个点进行建模值和测量值在  $x, y, z$  三方向的对比,结果如图 8(a) ~ 8(c) 所示,拟合结果很

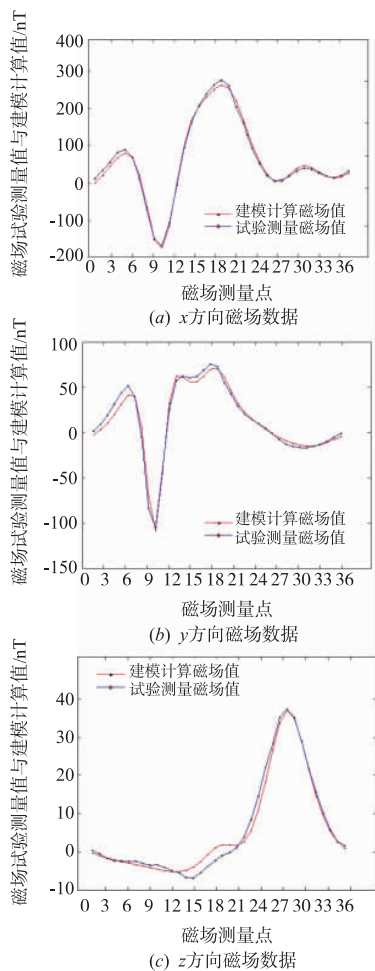


图5 建模值和测量值比较图

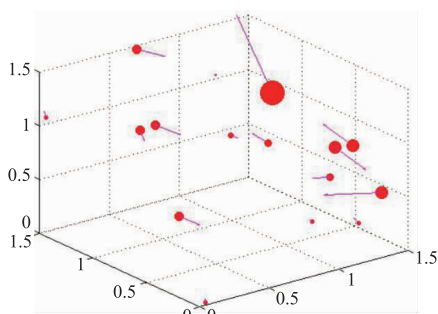


图6 磁偶极子最优分布

好,并且总磁场误差 2.78%,磁矩误差为 4.83%.

经过大量实践应用发现,在采集卫星周围磁场信息时,磁场探测器阵列只需布放于卫星包围半径的 1.2~1.5 倍区间均可获得较好的结果,说明该算法对测量误差并不敏感,在实际应用中具有很强的鲁棒性.另外,遗传算法优化过程相对较慢,可对其进行改进或结合其它方法加速计算过程.

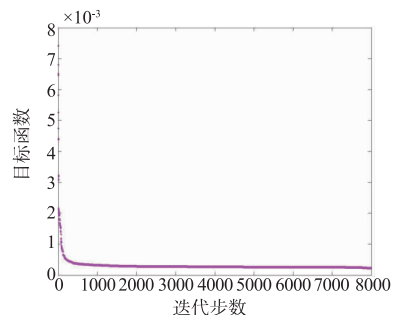


图7 目标函数优化过程

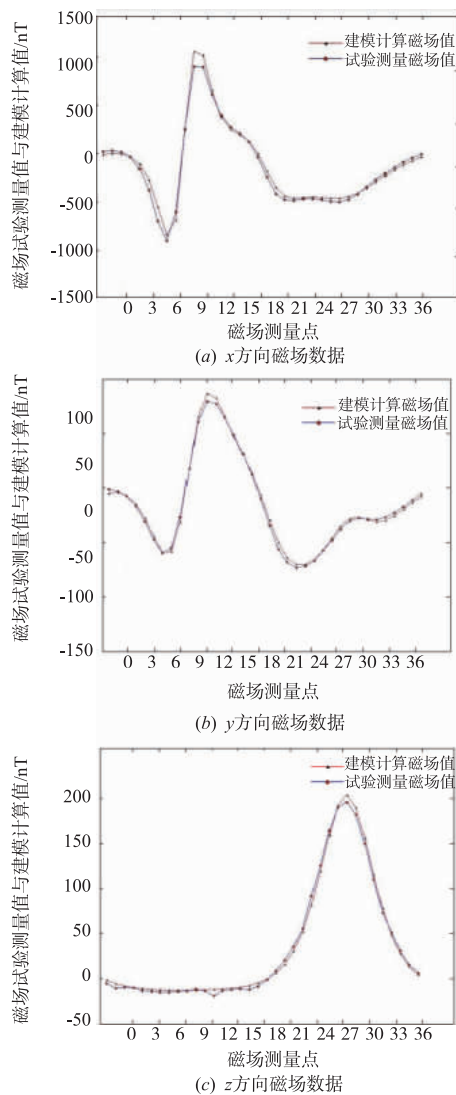


图8 建模值和测量值比较图

## 5 结束语

本文建立了卫星的多磁偶极子模型,将线性计算部分和非线性部分分离,利用遗传算法,以测点的模拟值和测量值之差的均方根作为目标函数,搜索多磁偶极子的位置,同时检测拟合误差,使得目标函数达到最

优的同时,拟合误差也满足要求.通过卫星静止状态和通电状态的试验结果表明,用该方法建立卫星磁场模型精度高,磁矩和磁场的误差均小于5%,是一种很好的卫星磁性研究方法.

#### 参考文献

- [1] 刘开磊,张珩,李文皓,等.近地空间磁场梯度分布特性及磁力效应研究[J].航天器环境工程,2012,29(5):493-497.  
LIU Kai-lei, ZHANG Heng, LI Wen-hao, et al. The characteristics of geomagnetic field's gradient distribution and the magnetic force effects in near-earth space [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2012, 29(5): 493-497. (in Chinese)
- [2] 肖琦,张文彬,孟立飞.磁力矩器在磁洁净卫星平台中的应用技术研究[J].宇航学报,2016,37(2):235-239.  
XIAO Qi, ZHANG Wen-bin, MENG Li-fei. Research on application of magnetorquer in magnetic cleanliness satellite platform [J]. Journal of Astronautics, 2016, 37(2): 235-239. (in Chinese)
- [3] EICHHORN W L. A New Method for Determining the Magnetic Dipole Moment of a Spacecraft from Near-Field Data [R]. Washington District of Columbia: NASA, 1969.
- [4] 张朝阳,肖昌汉,高俊吉,等.磁性物体磁偶极子模型适用型的实验研究[J].应用基础与工程科学学报,2010,18(5):862-867.  
ZHANG Chao-yang, XIAO Chang-han, GAO Jun-ji, et al. Experiment research of magnetic dipole model applicability of a magnetic object [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2010, 18(5): 862-867. (in Chinese)
- [5] 陈俊杰,易忠,孟立飞,等.基于欧拉方法的多磁偶极子分辨技术[J].航天器环境工程,2013,30(4):401-406.  
CHEN Jun-jie, YI Zhong, MENG Li-fei, et al. Multi-dipole discrimination technology based on euler inverse method [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2013, 30(4): 401-406. (in Chinese)
- [6] 唐劲飞,龚沈光,王金根.基于磁偶极子模型的目标定位和参数估计[J].电子学报,2002,30(4):614-616.  
TANG Jin-fei, GONG Shen-guang, WANG Jin-gen. Target positioning and parameter estimation based on magnetic dipole model [J]. Acta Electronica Sinica, 2002, 30(4): 614-616. (in Chinese)
- [7] PHAM D M, AZIZ S M. A real-time localization system for an endoscopic capsule using magnetic sensors [J]. Sensors, 2014, 14(11): 20910-20929.
- [8] 尹刚,张英堂,李志宁,等.磁偶极子梯度张量的几何不变量及其应用[J].地球物理学报,2016,59(2):749-756.  
YIN Gang, ZHANG Ying-tang, LI Zhi-ning, et al. Research on geometric invariant of magnetic gradient tensors for a magnetic dipole source and its application [J]. Chinese Journal of Geophys. 2016, 59(2): 749-756. (in Chinese)
- [9] 戴忠华,周穗华,单珊.基于模拟退火算法的舰船磁场高精度建模方法[J].电子学报,2018,46(6):1524-1529.  
DAI Zhong-hua, ZHOU Sui-hua, SHAN Shan. High accuracy method for ship magnetic field based on simulated annealing algorithm [J]. Acta Electronica Sinica, 2018, 46(6): 1524-1529. (in Chinese)
- [10] TAKA AKI N. A closed-form formula for magnetic dipole localization by measurement of its magnetic field and spatial gradients [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2006, 42(10): 3291-3293.
- [11] SALEM A. Interpretation of magnetic data using analytic signal derivatives [J]. Geophysical Prospecting, 2005, 53: 75-82.
- [12] 戴忠华,周穗华,张宏欣,单珊.初值自适应的磁性目标跟踪方法[J].电子学报,2019,47(12):2457-2464.  
DAI Zhong-hua, ZHOU Sui-hua, ZHANG Hong-xin, SHAN Shan. Initial value adaptive method for magnetic target tracking [J]. Acta Electronica Sinica, 2019, 47(12): 2457-2464. (in Chinese)
- [13] UUTELA K, HAMALAINEN M, SALMELIN R. Global optimization in the localization of neuromagnetic sources [J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 1998, 45(6): 716-723.
- [14] 齐燕文.空间磁环境模拟技术[J].航天器环境工程,2005,22(1):19-21.  
QI Yan-wen. Spacecraft magnetic environment simulation technology [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2005, 22(1): 19-21. (in Chinese)

#### 作者简介



徐超群 男,1985年生于陕西宝鸡.中国空间技术研究院,博士研究生,研究方向为航天器磁环境工程.  
E-mail: xucq111@163.com



易忠(通信作者) 男,1968年生于北京.中国空间技术研究院研究员,博士生导师,研究方向为航天器磁环境效应与测试技术.  
E-mail: yizhong6808@sina.com