0254-6124/2011/31(1)-112–06 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Zhuang Hongchao, Wang Jindong, Wang Ning, Shi Rong, Li Yan. Mechanical characteristic analysis of the magnetometer structure component for the space exploration. *Chin. J. Space Sci.*, 2011, **31**(1): 112-117

空间探测磁强计安装部件的力学特性分析

庄红超[1] 王劲东[2] 王 柠[3] 史 荣[1] 李 岩[1]

1(燕山大学机械工程学院 秦皇岛 066004)

2(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100190)

3(齐齐哈尔大学计算机与控制工程学院 齐齐哈尔 161006)

摘 要 对某深空探测器中的有效载荷——高精度磁强计的安装部件进行了有限元分析, 分别获取了磁强计安装部件在升空过程中承受 $40\,g$ 加速度冲击载荷以及 $-180 \sim 75^{\circ}C$ 的极限温度情况下, 在 x, y, z 方向上的最大应力和最大位移, 给出了由于磁强计安装部件的变形而导致的三个探头在 x, y, z 方向上的偏转角度, 采用扫频实验法分析了磁强计安装部件的频谱特性, 为空间探测磁强计的设计提供了依据.

关键词 空间探测, 安装部件设计, 应力应变分析, 磁强计

中图法分类号 V 476

Mechanical Characteristic Analysis of the Magnetometer Structure Component for the Space Exploration

ZHUANG Hongchao[1] WANG Jindong[2] WANG Ning[3] SHI Rong[1] LI Yan[1]

1(*College of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao* 066004)

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

3(*College of Computer and Control Engineering, Qiqihar University, Qiqihar* 161006)

Abstract Finite element technique is utilized to analyze payload of the detector, which is the high precision magnetometer structure component. When the magnetometer structure component bears impact load of $40\,g$ in the blastoff process and simultaneously bears extreme temperature ranging from -180°C to 75°C, the maximum stress and displacement are respectively obtained in the directions of x, y and z. Moreover, due to the deformed magnetometer structure component, deflective angles of three probes are also obtained in the three directions. Finally, the sweep experiment is utilized to analyze spectrum characteristics of the magnetometer structure component, and the objective of experimental date has been obtained. It verifies the dynamic characteristics of the magnetometer structure component and provides technical support for the space-borne magnetometer designing.

Key words Space exploration, Structure component design, Stress-strain analysis, Magnetometer

2010-01-23 收到原稿, 2010-04-28 收到修定稿

E-mail: zhuangchao1026@sina.com

1 引言

磁强计是用来测量磁感应强度的传感器, 利用磁通门原理设计的磁通门磁强计在空间探测领域广泛应用于各种弱磁场的测量 [1−7]. 在外层空间探测中, 用其进行天体运行及演变的磁场检测, 而在卫星姿态测控中, 可测量空间磁场, 提供卫星姿态信息 [8−9].

本文所涉及的高精度磁通门磁强计 [10], 是为某深空探测器研制的一台有效载荷, 执行外层空间环境磁场矢量的探测任务. 在升空过程中, 磁强计承受 $40\,g$ 加速度冲击载荷 [11]. 进入太空后, 为确保测量精度, 磁强计需暴露在卫星舱外, 其工作环境的温度变化范围为 $-180\sim75$°C. 为了保证磁强计探头的测量精度, 必须对安装部件在两种载荷作用下的应力应变状态进行分析, 确保安装部件在重量最轻的前提下满足强度与刚度要求.

运用有限元法, 对磁强计安装部件的应力应变进行了热–结构耦合分析, 同时对磁强计整体动态特性进行实验研究, 为磁强计安装部件的设计提供了理论依据.

2 热–结构耦合分析原理

耦合场分析是指在有限元分析的过程中考虑两种或多种工程学科的交叉作用和相互作用, 例如热结构耦合分析考虑结构与温度的相互作用, 解决因施加温度载荷而引起的应力、应变问题 [12−13].

2.1 分析方法

耦合场分析主要有以下两种方法.

①顺序耦合方法. 按照顺序进行两次或多次相关场分析, 即将第一次场分析的结果作为第二次场分析的载荷, 实现两种场的耦合. 例如, 可将热分析得到的节点温度作为温度体载荷施加到后续的应力分析中, 从而实现耦合.

②直接耦合方法. 仅通过一次求解即可得出耦合场分析结果. 在这种情况下, 耦合计算包含所有必须项的单元矩阵或单元载荷矢量.

由于磁强计安装部件所承受的冲击载荷及温度载荷为已知量, 因此可采用第二种方法对其进行求解, 一次性求得磁强计安装部件的应力应变.

2.2 数学描述

用有限元法进行热力耦合问题应力场分析时, 普遍采用几何方程和本构关系进行求解. 但是, 用此方法求得的应力场误差较大. 根据几何关系和本构关系求得初始应力场, 应用最小二乘法, 重新进行应力场的有限元计算, 求得改进的应力场 [14].

在瞬态温度场数学模型的基础上, 应用 Galerkin 法和高斯定律得到空间离散有限元模型, 即

$$\sum_{e=1}^{m}\left(C^{\mathrm{e}}\frac{\partial T^{\mathrm{e}}}{\partial t}+K_T^{\mathrm{e}}T^{\mathrm{e}}\right)=\sum_{e=1}^{m}\boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{e}}. \tag{1}$$

式中, T^{e} 为待求单位节点温度, 单位 °C; t 为时间参数, 单位 s; m 为求解域离散后的单元数.

定义 $C^{\mathrm{e}}, K_T^{\mathrm{e}}$, $\boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{e}}$ 依次为单元热容矩阵、单元热传导矩阵、单元温度载荷矩阵, 有

$$\boldsymbol{C}^{\mathrm{e}}=\int_{S^{\mathrm{e}}}\rho c N^{\mathrm{T}}N\mathrm{d}S,$$

$$\boldsymbol{K}_T^{\mathrm{e}}=\int_{V^{\mathrm{e}}}\lambda\Big[\frac{\partial N^{\mathrm{T}}\partial N}{(\partial x)^2}+\frac{\partial N^{\mathrm{T}}\partial N}{(\partial y)^2}+\frac{\partial N^{\mathrm{T}}\partial N}{(\partial z)^2}\Big]\mathrm{d}V,$$

$$\boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{e}}=\int_{V^{\mathrm{e}}}N^{\mathrm{T}}q_{\mathrm{v}}\mathrm{d}V+\oint_{V^{\mathrm{e}}}\lambda N^{\mathrm{T}}\frac{\partial T^{\mathrm{e}}}{\partial n}\mathrm{d}S.$$

其中, λ 为材料的导热系数, 单位 W $(\mathrm{m}\cdot^{\circ}\mathrm{C})^{-1}$; ρ 为材料密度, 单位 $\mathrm{kg}\cdot\mathrm{m}^{-3}$; c 为材料的比热容, 单位 J $(\mathrm{kg}\cdot^{\circ}\mathrm{C})^{-1}$; q_{v} 为材料的内热源强度, 单位 $\mathrm{W}\cdot\mathrm{m}^{-3}$; N 为单元插值函数; $\partial T/\partial n$ 为沿求解域曲面法线方向的方向导数.

用 Galerkin 差分格式替换式 (1) 中的时间倒数项, 得到空间离散和时间离散的瞬态温度场有限元模型, 有

$$\sum_{e=1}^{m}\left\{\Big[2[\boldsymbol{K}_T^{\mathrm{e}}]_t+\frac{3[\boldsymbol{C}^{\mathrm{e}}]_t}{\Delta t}\Big][\boldsymbol{T}^{\mathrm{e}}]_t\right\}=$$
$$\sum_{e=1}^{m}3\left\{\Big[[\boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{e}}]_t+3\frac{[\boldsymbol{C}^{\mathrm{e}}]_t}{\Delta t}-[\boldsymbol{K}_T^{\mathrm{e}}]_{t-\Delta t}\Big][\boldsymbol{T}^{\mathrm{e}}]_{t-\Delta t}\right\}.$$

即

$$\bar{\boldsymbol{K}}_T\cdot\boldsymbol{T}=\bar{\Phi}. \tag{2}$$

根据静力平衡条件及 Galerkin 法, 参照几何方程和本构方程的关系, 得到空间离散有限元模型, 有

$$\sum_{e=1}^{m}\Big(\int_{V^{\mathrm{e}}}B^{\mathrm{T}}\boldsymbol{D}\boldsymbol{B}\mathrm{d}V\cdot\boldsymbol{U}^{\mathrm{e}}\Big)=$$
$$\sum_{e=1}^{m}\Big(\int_{V^{\mathrm{e}}}N^{\mathrm{T}}\cdot\boldsymbol{f}\mathrm{d}V+\oint_{S^{\mathrm{e}}}N^{\mathrm{T}}T_n\mathrm{d}S+$$
$$\oint_{V^{\mathrm{e}}}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{D}\mathrm{d}V\cdot\alpha\Delta T^{\mathrm{e}}\boldsymbol{I}\Big),$$

即

$$\boldsymbol{K}\cdot\boldsymbol{U}=P. \tag{3}$$

式中, $\boldsymbol{B}$ 为几何矩阵, $\boldsymbol{D}$ 为弹性物理矩阵, $\boldsymbol{U}^{\mathrm{e}}$ 为单元节点位移列矢量, $\boldsymbol{f}$ 为单元体力分量列矢量, $\boldsymbol{T}_n$ 为单元面力分量列矢量, α 为物体线膨胀系数, $\boldsymbol{I}=[1\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0]^{\mathrm{T}}$, ΔT^{e} 为单元各节点温度变化值.

用最小二乘法改进应力场的泛函, 即

$$x(\sigma,\bar{\sigma})=\sum_{e=1}^{m}\int_{V^{\mathrm{e}}}(\sigma-\bar{\sigma})^{\mathrm{T}}(\sigma-\bar{\sigma})\mathrm{d}V. \tag{4}$$

由于 $\bar{\sigma}=\bar{N}\ \bar{\sigma}^{\mathrm{e}}$, 并由 $\partial x/\partial\bar{\sigma}^{\mathrm{e}}=0$, 得到

$$\sum_{e=1}^{m}\int_{V^{\mathrm{e}}}\bar{\boldsymbol{N}}^{\mathrm{T}}\ \bar{\sigma}^{\mathrm{e}^{\mathrm{T}}}\cdot\bar{\boldsymbol{N}}\mathrm{d}V=\sum_{e=1}^{m}\int_{V^{\mathrm{e}}}\sigma^{\mathrm{T}}\bar{\boldsymbol{N}}\mathrm{d}V.$$

即

$$\boldsymbol{K}_{\sigma}\cdot\bar{\boldsymbol{\sigma}}=P_{\sigma}. \tag{5}$$

式中, $\boldsymbol{\sigma}$ 为位移场在有限元模型中求得的单元初始应力解, $\bar{\boldsymbol{\sigma}}$ 为待求单元改进应力解, $\bar{\boldsymbol{N}}$ 为插值函数矩阵, $\bar{\sigma}^{\mathrm{e}}$ 为待求单元节点改进应力值.

耦合计算模型由式 (2)、式 (3) 和式 (5) 三式联立得到, 即

$$\begin{pmatrix}\bar{K}_{\mathrm{T}}&0&0\\0&K&0\\0&0&K_{\sigma}\end{pmatrix}\cdot\begin{pmatrix}T\\U\\\bar{\sigma}\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}\bar{\Phi}\\P\\P_{\sigma}\end{pmatrix}. \tag{6}$$

3 有限元计算结果分析

3.1 磁强计安装部件力学模型

3.1.1 安装部件的结构

磁强计安装部件的设计原则是, 在满足传感器安装要求的前提下, 要求结构简单, 几何尺寸小、重量轻. 磁强计安装部件结构如图 1 所示.

3.1.2 载荷与约束条件

①静载荷: 传感器质量、安装部件的质量, 共计 $168\,g$.

②动载荷: 安装部件在升空过程中承受 $40\,g$ 的加速度冲击载荷.

③温度载荷: 从地面到外层空间, 磁强计安装部件的工作环境温度变化范围为 -180°C$\sim$ 75°C.

④约束条件: 磁强计安装部件的 4 个安装孔 ($a\sim d$) 用于固定传感器, 对其施加 z 方向位移约束, 并在 a,d 处施加 x 方向约束, 在 c,d 处施加 y 方向约束. 安装部件的力学模型如图 2 所示.

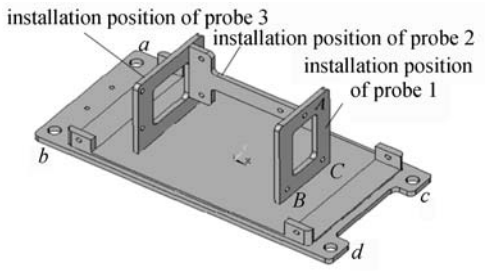


图 1 磁强计安装部件结构

Fig. 1 Structural diagram of the magnetometer structure component

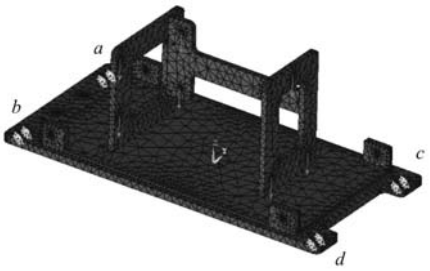


图 2 磁强计安装部件的力学模型及网格划分

Fig. 2 Meshing and mechanical model of the magnetometer structure component

3.2 材料属性、软件选择及模型网格划分

磁强计安装部件材料采用 LY12[15], 具体参数列于表 1.

有限元分析工具广泛应用于航空航天领域, 例如航空电子产品热设计、飞机结构仿真、航空发动机仿真、航空航天气动分析、卫星设计等.

在有限元分析软件中, ANSYS 软件具有多物理场耦合功能, 可在同一模型中进行热–结构、磁–结构、电–磁–流体–热等多种耦合计算, 是功能较强大的有限元分析软件之一, 为此本文采用该软件对磁强计安装部件应力应变场及温度场进行数值模拟 [16−19].

表 1 材料 LY12 的物理特性

Table 1 Properties of material LY12

密度/(kg·m^{-3})	弹性模量/MPa	泊松比 μ
2780	7.1×10^{5}	0.33

比热容 /(J·kg^{-1}·K^{-1})	导热系数 /(W·kg^{-1}·K^{-1})	线膨系数 /K^{-1}
880	237	2.35×10^{-6}

温度/(°C)	−253	−196	−70	100	150	175	200
屈服限/MPa	520	420	320	275	265	245	255

本计算采用 Brick 20node 226 类型单元并对其进行网格划分, 网格大小设定为 8, 采用自由网格划分方法. 单元总数为 20435, 节点总数为 42037. 如图 2 所示.

3.3 计算结果分析

(1) 冲击载荷作用下的应力分布

磁强计在升空起始时刻, 安装部件承受 $40\,g$ 的冲击载荷作用, 作用时间为 0.01 s, 计算结果如图 3 所示. 图 3 中安装部件的最大 Mises 应力为 9.25 MPa, 最大应力区域在磁强计安装部件底座的 4 个安装孔位置. 最大位移在 z 方向, 数值为 0.0125 mm.

(2) 耦合计算结果

磁强计由地面上升到一定高度后, 温度引起的变形将成为安装部件的主要载荷. 在发射过程中, 所经历的温度一般为 −180°C∼ 75°C, 其热–结构耦合应力应变云如图 4∼7 所示. 耦合计算结果见表 2.

由图 4 和图 6 可知, 最大应力出现在底板 c,d 端的内侧圆角局部处, 小于材料屈服极限 (75°C, 280 MPa; −180°C, 391.9 MPa). 由图 5 和图 7 可知, 最大位移出现在底板的两个外边缘, 而传感器安装支架的变形量非常小, 变形最大处仅有 0.03 mm.

由于安装部件的变形, 导致三个探头角度发生偏转, 如果偏转过大, 则影响探头测量的精度. 图 8 为探头 1 安装部件变形前后安装点 A (见图 1) 的位移情况, 在 ANSYS 输出文件中找到 A 点在 3 个方向的位移, 经计算确定的其 3 个方向的转角, 结果列于表 3.

探头角度变化计算公式为

$$\Delta\theta_{1x}=\left|\arccos\frac{x_2}{\sqrt{x_2^2+y_2^2+z_2^2}}-\arccos\frac{x_1}{\sqrt{x_1^2+y_1^2+z_1^2}}\right|,$$

$$\Delta\theta_{1y}=\left|\arccos\frac{y_2}{\sqrt{x_2^2+y_2^2+z_2^2}}-\arccos\frac{y_1}{\sqrt{x_1^2+y_1^2+z_1^2}}\right|,$$

$$\Delta\theta_{1z}=\left|\arccos\frac{z_2}{\sqrt{x_2^2+y_2^2+z_2^2}}-\arccos\frac{z_1}{\sqrt{x_1^2+y_1^2+z_1^2}}\right|.$$

表 2 磁强计安装部件最大应力和位移

Table 2 Maximum stress and displacement of the magnetometer structure component

−180°C	加速度方向		
	x	y	z
最大应力/MPa	239	240	241
最大位移/mm	0.149	0.149	0.161
75°C	加速度方向		
	x	y	z
最大应力/MPa	159	159	157
最大位移/mm	0.0986	0.100	0.0873

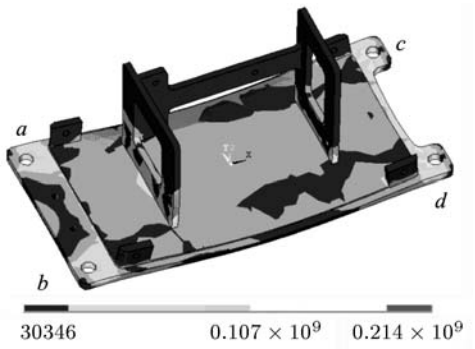


图 4 −180°C 时 Mises 应力

Fig. 4 Mises stress at −180°C

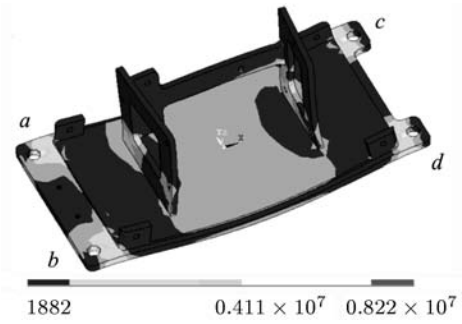


图 3 冲击载荷作用下的 Mises 应力云

Fig. 3 Nephogram of Mises stress under impact loading

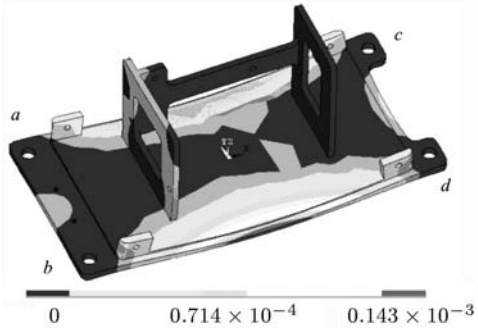


图 5 −180°C 时的位移

Fig. 5 Displacement at −180°C

由计算结果可见, 探头在 3 个方向上的偏转角非常小, 不会影响传感器的测量结果.

表 3 探头各方向偏转角度. 单位 (″)

Table 3 Deflection angles of magnetometer sensors in different directions. unit (″)

受力方向	x	y	z
探头 1 角度变化	5.79	0.78	17.44
探头 2 角度变化	0.08	6.14	5.68
探头 3 角度变化	18.65	1.14	6.56

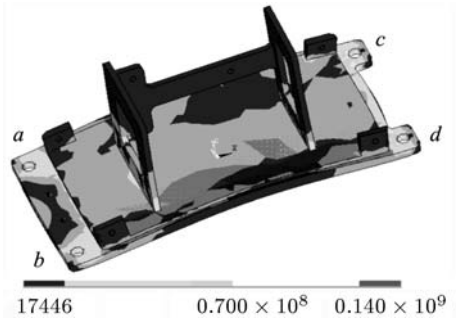


图 6 75°C 时米赛斯应力

Fig. 6 Mises stress at 75°C

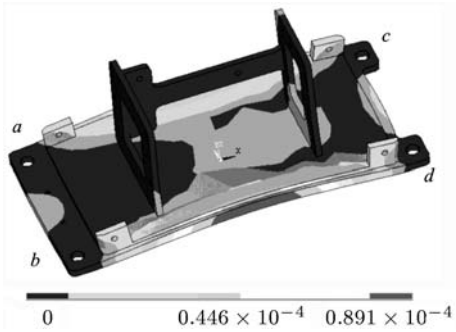


图 7 75°C 时的位移

Fig. 7 Displacement at 75°C

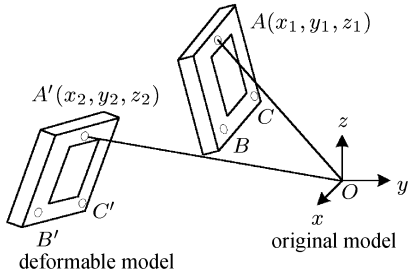


图 8 探头 1 的磁强计安装部件变形前后状态

Fig. 8 Schematic diagram of pre and post 1st probe deforming of the magnetometer structure component

4 振动冲击响应频谱特性

磁强计的频谱特性实验在实验室环境下进行, 采用正弦激励, 即在规定的速率 (或规定的时间内) 做扫频实验. 扫描频率范围均为 20~2000 Hz, 分别加载加速度 2.55 g, 6.51 g, 12.47 g 做扫频, 实验结果如图 9 所示.

根据图 9 中磁强计振动冲击响应频谱特性实验结果可知, 在规定的频率范围内, 并未发现频谱尖峰, 这可以说明, 磁强计固有频率很高, 在其发射过程中不会出现共振.

5 结论

(1) 磁强计安装部件在三个方向加速度载荷作用下, 最大应力不超过 10 MPa. 最大应力远小于材料屈服极限.

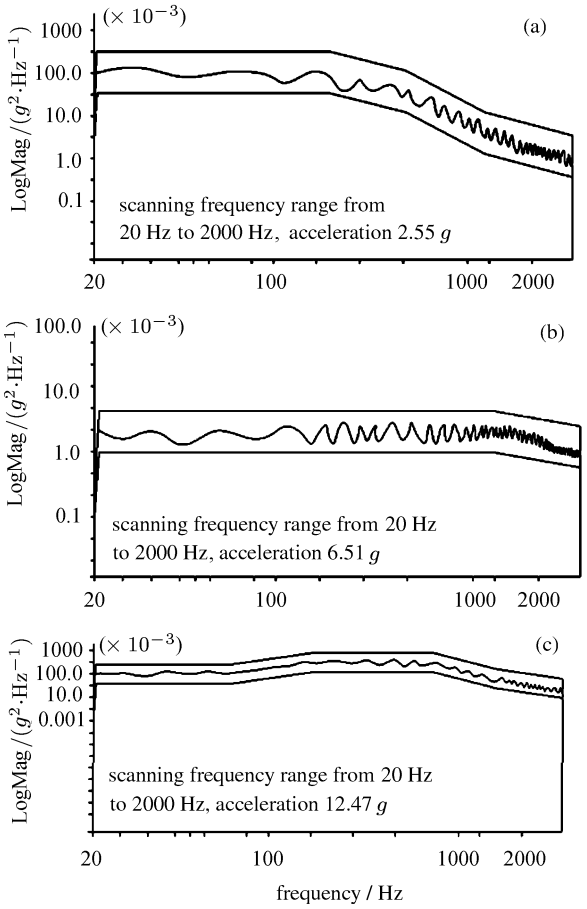


图 9 功率谱密度曲线

Fig. 9 Power spectral of sweep experiments

(2) 磁强计安装部件在 $-180°$C 时应力数据值为 241 MPa, 在 $75°$C 应力数据值为 159 MPa, 均小于材料的屈服极限.

(3) 探头最大偏转角为 $19''$.

(4) 由磁强计振动冲击响应频谱特性实验结果可见, 在规定的频率范围内, 未发现频谱尖峰, 说明磁强计的固有频率很高, 在发射过程中不会产生共振现象.

参考文献

[1] Åke Forslund. Designing a miniaturized fluxgate magnetometer [D]. Sweden: Division of Space and Plasma Physics, School of Electrical Engineering Royal Institute of Technology SE-10044 Stockholm, 2006, **04**:4-14

[2] Cao Hongsong, Chen Guoguang, Zhao Handong, Xin Changfan. Designing of fluxgate magnetometer used by attitude test [J]. *J. Ball.*, 2002, **14**(2):79-83. In Chinese (曹红松, 陈国光, 赵捍东, 辛长范. 姿态测试用磁通门磁强计的设计 [J]. 弹道学报, 2002, **14**(2):79-83)

[3] Cruz J C, Trujillo H, Rivero M. New kind of fluxgate magnetometer probe with enhanced electronic processing [J]. *Sensors Actuat. A: Phys.*, 1998, **71**(3):167-171

[4] Dong Xinping, Feng Xuan, Zhang Chengyan. New type fluxgate magnetometer [J]. *J. Transd. Tech.*, 1999, **18**(6):34-36. In Chinese (董新平, 冯焯, 张承燕. 一种新型磁通门磁强计 [J]. 传感器技术, 1999, **18**(6):34-36)

[5] Dyal P. Lunar Surface Magnetometer [J]. *IEEE General Electric*, 1970, **8**:203

[6] Haradu K. Measurement of the temperature bistribution of a sintering process. *IEEE Trans. Magnet.*, 1984, **20**(5):1726-1728

[7] RusselL C T. The ISEEI and 2 fluxgate magnetometer [J]. *IEEE General Electric*, 1978, **16**:239

[8] Xu Yourui. Fastly developing magnetic field sensors [J]. *J. Trans. Tech.*, 1999, **18**(4):5-8. In Chinese (涂有瑞. 飞速发展的磁传感器 [J]. 传感器技术, 1999, **18**(4):5-8)

[9] Tu Yourui. The past and future of semiconductor magnetic field sensors [J]. *Sensor World*, 2003, **9**(7):1-10. In Chinese (涂有瑞. 半导体磁场传感器过去和未来 [J]. 传感器世界, 2003, **9**(7):1-10)

[10] Chen Haiying. Development stat and application of precision magnetometer [J]. *Mod. Inst.*, 2002, **6**:5-7. In Chinese (陈海英. 精密磁强计的发展现状及应用 [J]. 现代仪器, 2002, **6**:5-7)

[11] Wang Shuxian, Chen Linquan, Liu Nisheng. Effect of acceleration on the erosion of aft dome insulation of solid motors [J]. *J. Solid Rocket Tech.*, 2003, **26**(2):17-19. In Chinese (王书贤, 陈林泉, 刘霓生. 飞行加速度对固体发动机后封头绝热层烧蚀的影响 [J]. 固体火箭技术, 2003, **26**(2):17-19)

[12] Wang Tao, Feng Gang, Zhuang Duo, Jiang Jinqing. Analysis of heat-structure coupling on flexible solar cell series [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2002, **22**(SII):50-54. In Chinese (王焘, 冯刚, 张铎, 姜晋庆. 柔性太阳电池阵的热–结构耦合分析 [J]. 空间科学学报, 2002, **22**(增刊 II):50-54)

[13] Su Hua, Chen Guoding. Analysis of temperature field and coupled thermal and structure for finger seal [J]. *J. Aeros. Power*. 2009, **24**(1):196-203. In Chinese (苏华, 陈国定. 指尖密封的温度场及热结构耦合分析 [J]. 航空动力学报, 2009, **24**(1):196-203)

[14] Yu Janguo, Ye Qingtai, Lü Chenliang. Elastic thermal-mechanical coupling simulation analysis of subway brake resistance [G]//First FEPG user annual meeting collection, 2003. 13-17. In Chinese (于建国, 叶庆泰, 吕晨亮. 地铁用制动电阻的弹性热力耦合仿真分析 [G]. 首届 FEPG 用户年会论文集, 2003. 13-17)

[15] Xü Hao, Qiu Xuanhuai. Mechanical design handbook [M]. Beijing: China Machine Press, 1991. 256-265. In Chinese (徐灏, 邱宣怀. 机械设计手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1991. 256-265)

[16] Su Ya. Based ANSYS on structural finite element analysis [D]. Beijing: Center For Space Science And Applied Researsh, Chinese Academy of Sciences, 2007. 1-3. In Chinese (苏亚. 基于 ANSYS 的结构有限元分析 [D]. 北京: 中国科学院空间科学与应用研究中心, 2007. 1-3)

[17] Li Fanchun, Li Cheng, Yue Guihua. Application of finite element analysis software ANSYS to 3-D modeling of rocket engine [J]. *Appl. Sci. Tech.*, 2004, **31**(10):59-60. In Chinese (李范春, 李成, 岳桂花. ANSYS 有限元分析软件在固体火箭发动机三维实体建模中的应用 [J]. 应用科技, 2004, **31**(10):59-60)

[18] Wang Yongxin. The analysis method of the coupled field in ANSYS software and its application [J]. *Yunnan Water Power*, 2006, **22**(4):32-34. In Chinese (王永新. ANSYS 软件中耦合场分析方法及应用 [J]. 云南水力发电, 2006, **22**(4):32-34)

[19] Song Jinchun, Ma Gang, Wang Changzhou, Peng Sai, Zhang Jingmei. Structure-thermal coupling finite element analysis of hollow rubber seal for hood-type annealing furnace [J]. *Lubric. Eng.*, 2007, **32**(5):150-152. In Chinese (宋锦春, 马刚, 王长周, 彭赛, 张敬妹. 罩式退火炉空心密封圈的结构–热耦合有限元分析 [J]. 润滑与密封, 2007, **32**(5):150-152)