

文章编号 1004-924X(2007)10-1571-06

磁悬浮反作用飞轮密封罩结构的优化设计

李 红,叶全红,韩邦成,房建成

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院,北京 100083)

摘要:研究了磁悬浮反作用飞轮密封罩结构的优化设计方法。基于有限元分析理论分别建立了两种外形设计方案的密封罩有限元模型,对密封罩壳体进行了静强度分析并利用特征值屈曲法分析其抗压稳定性,比较了两种设计方案的优缺点;对其中一种壳体的设计方案进行了变外形参数的结构优化设计,通过分析两个关键外形参数和壳体厚度对密封罩整体性能的影响,得出了最优的密封罩设计方案,最终得到壳体的设计质量为 0.197 kg,稳定性系数达 5.374。该优化设计方法提高了密封罩设计的可靠性和效率,对飞轮系统整体优化设计有重要意义。

关键词:磁悬浮反作用飞轮;密封罩;有限元分析;屈曲分析;优化设计

中图分类号:V448.22 **文献标识码:**A

Optimization design of sealed cowling structure for magnetic bearing reaction flywheel

LI Hong, YE Quan-hong, HAN Bang-cheng, FANG Jian-cheng

(School of Instrument Science & Opto-electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to minimize the mass and optimize the dynamic performance of the sealed cowling for a magnetic bearing reaction flywheel, the optimum design method for sealed cowling structure is researched. The Finite Element Models(FEM) for the sealed cowling of two outline design schemes are established based on the FEM theory. The static intensity in one of the sealed cowlings is analyzed, and the stability of each sealed cowling to contract compressive stress is analyzed using an eigenvalue buckling technique. Then the two design schemes are compared each other, the optimum design of variable parameter outline is obtained. The effects of two key outline parameters and the thickness of the shell on the whole performance of the sealed cowling are analyzed, the results show that the optimum design scheme is in the shell mass of 0.197 kg, and the stability coefficient of 5.374. The method improves the reliability and efficiency of sealed cowling design, and has important significance in optimization design of the flywheel system.

Key words: magnetic bearing reaction flywheel; sealed cowling; Finite Element Model(FEM); buckling analysis; optimization design

收稿日期:2007-03-28;修订日期:2007-06-29.

基金项目:民用航天科研专项资助项目(No. 科工技[2004]1536号)

1 引言

反作用飞轮系统是空间飞行器姿态控制的关键执行机构,它通过控制转子的转速,即改变角动量的大小来输出所需的控制力矩,从而精确控制空间飞行器的姿态^[1]。磁悬浮轴承支承的反作用飞轮系统是一种新型的航天器姿态控制系统,与传统的机械轴承支撑的反作用飞轮相比,在控制精度和使用寿命等方面具有明显的优势,因此它是未来航天器姿态控制的理想执行机构^[1-3]。磁悬浮反作用飞轮外壳体结构是磁悬浮反作用飞轮工作的载体^[4],对保证磁悬浮反作用飞轮正常工作具有重要作用。壳体由底座和密封罩两部分组成,底座用于安装磁悬浮反作用飞轮静止部分,并且提供与卫星安装的机械接口。密封罩的作用有:(1)地面试验时为飞轮内部提供相对真空的环境以减少飞轮的风阻;(2)保护反作用飞轮组件的清洁;(3)防止磁轴承和电机被空间磁性颗粒污染;(4)防止各种宇宙射线的干扰^[5]。

轻质高承载力是航空航天高科技领域对结构性能的迫切需求^[6],因此磁悬浮反作用飞轮密封罩为薄壳结构。在地面试验状态下,壳体内要保证相对真空,壳体外部承受大气压力载荷作用。密封罩主要的失效形式有两种:一是强度失效;二是失稳破坏。壳体失稳是指壳体在载荷作用下,壳体的内部应力在远未达到材料的强度失效的情况下,突然产生较大的位移而使结构降低承载能力,甚至发生破坏^[6]。密封罩失效会直接影响飞轮系统的正常工作,因此需要研究不同的结构形状和尺寸对密封罩性能的影响,优化设计磁悬浮反作用飞轮密封罩的结构,使壳体结构性能达到最佳,并且质量最小。

目前对于这种薄壳结构的研究已经做了一些工作。参考文献[4]提出了一种对密封罩壳体进行基于大型有限元分析软件的抗屈曲设计的稳定性分析方法,该方法对密封罩结构的设计具有一定的指导意义,但该方法也存在着较大的缺陷:首先,该方案没有考虑密封罩的材料强度失效,由于密封罩的支撑比较复杂,在外部大气压作用下,壳体内部上支点附近的局部拉应力比较大,有可能超过材料的抗拉强度,因此不能不考虑材料的强度失效;二是没有考虑壳体厚度对壳体结构性能

的影响;三是没有考虑两个关键的外形参数的相关性,如果两个参数相互独立就不能保证壳体中面的圆滑过渡,给设计时的参数选择增加了难度。本文提出了一种新的磁悬浮反作用飞轮密封罩的结构优化设计方法,同时考虑密封罩的静强度和抗压稳定性,比较了两种结构的性能,并且对其中一种结构进行了变结构参数的优化设计。

2 分析方法的理论基础

利用有限元分析软件 ANSYS 对磁悬浮反作用飞轮密封罩进行静强度分析可以将其看成轴对称的薄壳^[7],壳体中面上任一点的位置由角 φ 和 θ 确定,位移可由径向分量 u 、周向分量 v 和法向分量 \tilde{w} 确定。根据轴对称的薄壳理论的基本公式可以推导出薄壳单元内任意一点的内力与应变的关系如下^[7]:

$$\begin{Bmatrix} N_s \\ N_\theta \\ M_s \\ M_\theta \end{Bmatrix} = \frac{Et}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 & 0 \\ \nu & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & t^2/12 & t^2\nu/12 \\ 0 & 0 & t^2\nu/12 & t^2/12 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_s \\ \epsilon_\theta \\ \kappa_s \\ \kappa_\theta \end{Bmatrix},$$

其中 N_s, N_θ 分别是壳体内垂直于 s 或 θ 方向上的截面上单位长度的内力; M_s, M_θ 是相应截面上单位长度的力矩; $\epsilon_s, \epsilon_\theta$ 是中面内的应变; κ_s, κ_θ 是中面曲率; t 是壳体的厚度; E, ν 是弹性常数。

利用有限元分析软件 ANSYS 对磁悬浮反作用飞轮密封罩进行抗压稳定性分析,主要是对其结构进行屈曲分析。屈曲分析是研究结构在特定载荷条件下的稳定性,即确定结构失稳的临界载荷和屈曲模态^[8-9]。

3 密封罩结构设计方案

某种型号的磁悬浮反作用飞轮密封罩的安装如图 1 所示,密封罩下端与底座固连,上端通过上支撑点与轴座固连。壳体材料采用 3A-21,材料的抗拉强度 $[\sigma]=186$ MPa,受力环境为内部真空,外部为一个大气压。

两种常用的真空罩设计方案如下。设计方案一的截面内廓线如图 2 的左侧图, \widehat{AB} 为一段凸弧, \widehat{BC} 为 $R=5$ mm 的倒角,保证圆滑过渡, \widehat{AB} 半径为 188 mm,壳体厚度取 1 mm,利用大型有限元分析软件 ANSYS 建立壳体的有限元模型。壳

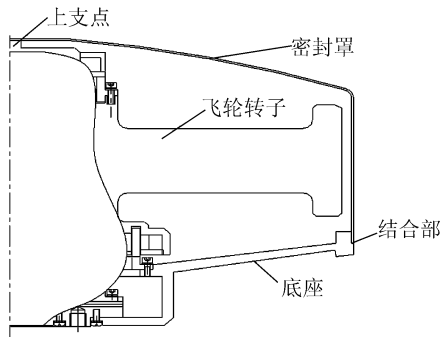


图 1 磁悬浮反作用飞轮局部剖面图

Fig. 1 Part cutaway view of magnetic bearing reaction flywheel

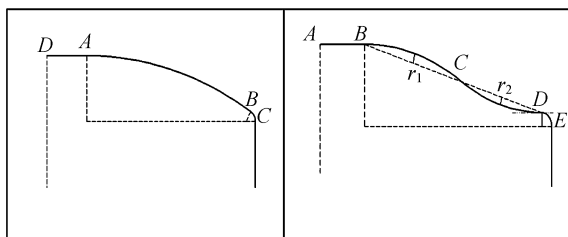
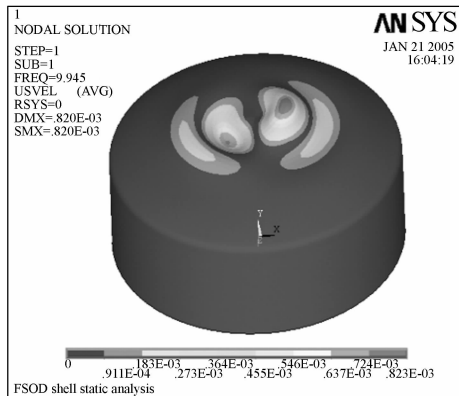


图 2 密封罩剖面廓线设计方案图

Fig. 2 Design scheme of sealed cowling outline

体的载荷条件为外表面施加一个标准大气压,边界约束条件为壳体下端边缘和内表面中心部位采用全自由度固定约束,先进行结构静力学分析,然后进行屈曲分析。静力学分析结果显示最大等效应力为 109 MPa < $[\sigma]$,最大等效应力发生在罩顶部和倒角处,等效应力云图如图 3(a);屈曲分析稳定性系数为 9.945,失稳模态如图 3(b)。

设计方案二截面内廓线如图 2 的右侧图, \widehat{BC} 为一段凸弧, \widehat{CD} 为一段凹弧, \widehat{DE} 为 $R=5\text{ mm}$ 倒角,为 1/4 圆弧,三段圆弧和线段 \widehat{AB} 圆滑过渡,



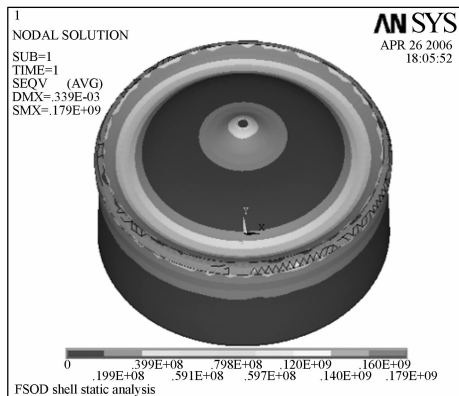
(b)

图 3 设计方案一的密封罩有限元分析结果
Fig. 3 FEM results of design scheme 1

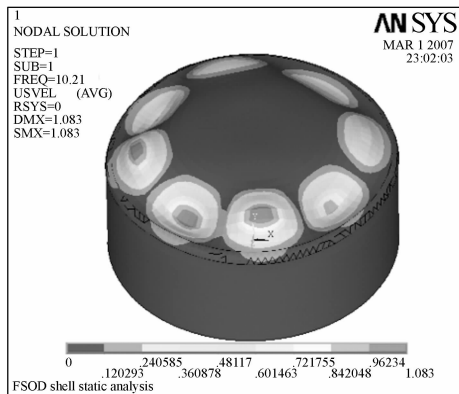
如给定 \widehat{BC} 的弓高 r_1 与 \widehat{CD} 的弓高 r_2 ,可以计算两端圆弧弓高的关系如下:

$$r_2 = \frac{r_1(l_1 - 2R_1k_1)}{2R_1k_1},$$

其中 R_1 为 \widehat{BC} 的半径, l_1 为线段 \widehat{BD} 的长度, $k_1 =$

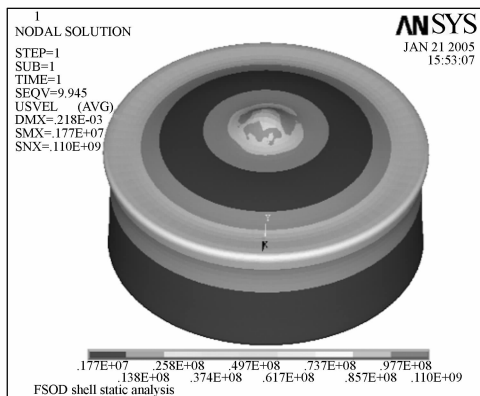


(a)



(b)

图 4 设计方案二的密封罩有限元分析结果
Fig. 4 FEM results of design scheme 2



(a)

$\sin \theta, k_2 = \cos \theta, \theta$ 为线段 \overline{BD} 与水平方向的倾角, 它们之间的关系为: $R_1 = \frac{r_1}{1-k_2}$ 。

\widehat{BC} 和 \widehat{CD} 两圆弧的比例不同, 罩的力学性能也不同。取 $r_1 = 5 \text{ mm}$, 壳体厚度为 1 mm , 建立真空罩壳体的有限元模型, 分析方法同方案一, 静力学分析得到密封罩的应力云图如图 4(a), 最大等效应力发生在上支点附近, 大小为 $179 \text{ MPa} < [\sigma]$; 屈曲分析得出稳定性系数为 10.21 , 失稳模态图如图 4(b)。

两种设计方案的比较如表 1。

表 1 两种设计方案壳体的性能比较

Tab. 1 Shell performance comparison of two design schemes

	最大等效应力 (MPa)	稳定性系数	壳体质量 (kg)
方案一	109	9.95	0.27
方案二	179	10.21	0.27

由以上数据可以看出两种设计方案均可以满足设计要求, 但是各有优缺点。方案一所设计的密封罩静力学性能较好, 但稳定性较差; 方案二所设计的密封罩虽然最大等效应力较大, 但只是集中在上支撑点和凸弧与凹弧的结合部附近很小的范围内, 其它地方的应力都很小, 可以在壳体的上应力集中的部分加厚, 其它地方减薄, 这样就可以给壳体减重, 稳定性也会有很大提高。

4 密封罩结构的优化设计

计算能力的提高使得各种结构优化技术逐渐被应用于工业领域中, 优化技术中的参数优化技术已经十分成熟^[10]。设计方案二中 \widehat{BC} 和 \widehat{CD} 两圆弧的比例不同, 密封罩的力学性能也不同; 并且壳体厚度变化使得密封罩的力学性能也将发生变化, 现从这两个角度对密封罩壳体外形参数进行优化。

4.1 变弧度比例的外形参数优化

对设计方案二将 r_1 作为一个变量, 从 $0.5 \sim 9 \text{ mm}$ 取值, 间隔为 0.5 mm , 然后利用有限元分析软件计算对应尺寸下密封罩的力学性能。其中稳

定性系数、最大等效应力和壳体质量的数据如表 2, 变化曲线如图 5。

表 2 不同凸弧弓高所对应的壳体性能

Tab. 2 Shell performance comparison of different protruding arc bow highnesses

凸弧弓高 r_1 (mm)	稳定性系数	最大等效应力 (MPa)	壳体质量 (kg)
0.5	2.826 82	803	0.267 66
1.0	2.845 43	684	0.267 95
1.5	3.048 24	595	0.268 23
2	3.438 91	520	0.268 52
2.5	3.286 27	453	0.268 8
3	3.213 57	389	0.269 08
3.5	3.479 29	326	0.269 37
4	4.451 43	271	0.269 65
4.5	6.428 53	222	0.269 94
5	10.210 12	179	0.270 22
5.5	13.056 97	150	0.270 5
6	10.797 13	138	0.270 79

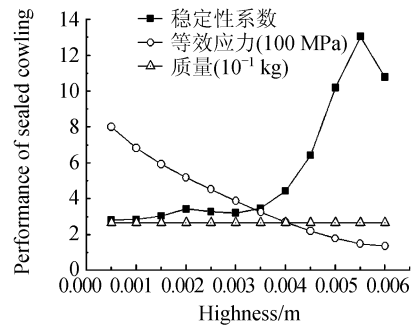


图 5 壳体外形参数对性能的影响曲线

Fig. 5 Influence of shell outline parameters on performance of sealed cowling

从图 5 中可以看出壳体质量基本不变; 最大等效应力随凸弧弓高的增大而不断减小, 当 $r_1 = 6 \text{ mm}$ 时降到最小为 138 MPa ; 稳定性系数在 $r_1 = 5.5 \text{ mm}$ 时有最大值 13.05 ; 但满足静强度的方案只有 $r_1 = 5 \text{ mm}$ 、 5.5 mm 和 6 mm 三种设计方案。

4.2 变厚度的外形参数优化

下面分析壳体厚度对密封罩力学性能的影响。根据以上的分析结论选择凸弧弓形高 $r_1 = 5.5 \text{ mm}$, 将壳体厚度作为变量, 厚度从 0.5 mm

变化到 1.4 mm 间隔为 0.1 mm,然后利用有限元分析软件计算对应尺寸下密封罩的力学性能。其中稳定性系数、最大等效应力和壳体质量的数据如表 3,变化曲线如图 6。

表 3 不同壳体厚度所对应的壳体性能

Tab.3 Shell performance comparison of different shell thicknesses

壳体厚度 (mm)	最大等效应力 (MPa)	稳定性系数	壳体质量 (kg)
0.5	379	1.96	0.137
0.6	293	3.27	0.164
0.7	237	5.01	0.192
0.8	201	7.15	0.219
0.9	172	9.82	0.246
1.0	149	12.98	0.274
1.1	131	16.63	0.301
1.2	116	20.81	0.329
1.3	104	25.49	0.356
1.4	94	30.74	0.384

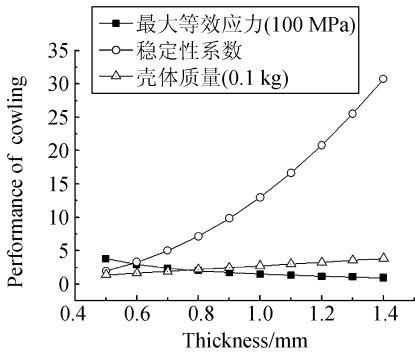


图 6 壳体厚度对性能的影响曲线

Fig. 6 Influence of shell thicknesses on performance of sealed cowling

由以上数据图标可以看出随着壳体厚度的增加壳体质量成比例增加,稳定性系数成指数增加,壳体最大等效应力减小;当壳体厚度 < 0.8 mm 时,壳体的最大等效应力大于材料的抗拉强度,但由应力云图可以看出大应力只是集中在上支撑点附近等很小的范围内,可以在这些部位适当地增加厚度改善应力分布,并且质量增加也不会太多;稳定性系数取在 3~5 就可以了,建议选择密封罩壳体的总体厚度为 0.7 mm。

4.3 密封罩最终设计方案

根据以上分析结果设计最终密封罩的总体设计方案的外廓线如图 7,支撑点附近应力比较集

中,加厚为 1.7 mm,其它部位的壳体厚度为 0.7 mm。利用有限元分析软件对最终的设计方案进行静力学分析和屈曲分析,最后设计方案的密封罩的总质量为 0.197 kg,静力学分析得到密封罩的应力云图如图 8(a),最大等效应力发生在上支撑点附近和壳体边缘的过渡处,大小为 137 MPa < $[\sigma]$,应力分布比较合理;屈曲分析得出稳定性系数为 5.374,失稳模态图如图 8(b)。

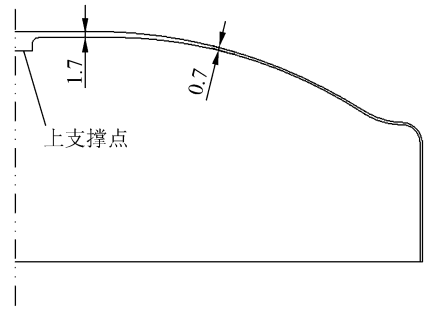
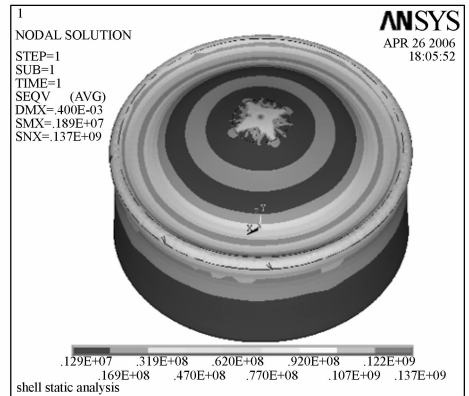
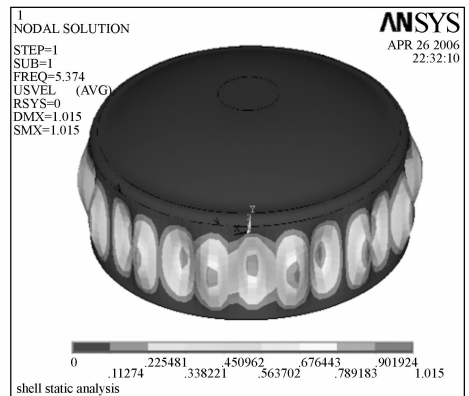


图 7 密封罩最终剖面廓线设计方案

Fig. 7 Final design scheme of sealed cowling outline



(a)



(b)

图 8 密封罩最终设计方案的有限元分析结果

Fig. 8 FEM results of final design scheme

采用参考文献[4]所述的传统的设计方法所得到的壳体质量为 0.27 kg,可见本方案的设计使质量减少了 25.9%,应力分布也更加合理。

5 结 论

(1)本文基于大型有限元分析软件 ANSYS 分析比较了两种外形结构的磁悬浮反作用飞轮密封罩,同时考虑材料的静强度和抗压稳定性,并比较了两种结构的力学性能。

(2)以其中一种结构为例分析了密封罩的圆弧曲率和壳体厚度等外形参数对真空罩力学性能的影响,得到了较为优化的设计方案,最后设计方案的密封罩总质量为 0.197 kg,比传统方法减少了 25.9%,稳定性系数为 5.374。

本文的设计方法提高了磁悬浮反作用飞轮设计的可靠性,在同时满足材料静强度和抗压稳定性的条件下使壳体质量尽可能减小,达到了优化设计的目的,进一步提高了设计效率。

参考文献:

- [1] AUER W. Ball bearing versus magnetic bearing reaction and momentum wheels as momentum actuators[C]. *Aiaa International Meeting & Technical Display "Global Technology 2000"* AIAA-80-0911, Baltimore, 1980:1-5.
- [2] 韩邦成,虎刚,房建成. 磁悬浮控制力矩陀螺高速转子的优化设计[J]. *光学精密工程*, 2005,14(4):662-666.
HANG B CH, HU G, FANG J CH. Optimization design of magnetic suspended gyroscope rotor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005,14(4):662-666. (in Chinese)
- [3] HORIUCHI Y,INOUE M. Development of magnetic bearing momentum wheel for ultra-precision spacecraft attitude control[C]. *Seventh International Symp. on Magnetic Bearings, ETH Zurich*, 2000:525-503.
- [4] 赵丽宾,赵友选,张建宇,等. 反作用轮密封罩结构的稳定性研究[J]. *航天器环境工程*, 2006,23(6):344-346.
ZHAO L B, ZHAO Y X, ZHANG J Y, *et al.*. Buckling analysis of reaction-wheel's sealed cowling structure [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2006,23(6):344-346. (in Chinese)
- [5] 平菊英,刘胜忠. 卫星大动量矩飞轮的设计[J]. *上海航天*, 2002,(1):8-12.
PING J Y, LIU SH ZH. Big-moment flywheel design for satellite[J]. *Aerospace Shanghai*, 2002,(1):8-12. (in Chinese)
- [6] 刘书田,陈秀华,曹先凡,等. 夹心圆柱壳稳定性优化[J]. *工程力学*, 2005,22(1):135-140.
LIU SH T, CHEN X H, CAO X F, *et al.*. Optimization of buckling-prone cylindrical shells with porous material core[J]. *Engineering Mechanics*, 2005,22(1):135-140. (in Chinese)
- [7] 王勖成,邵敏. 有限元法基本原理和数值方法(2版)[M]. 北京:清华大学出版社,2003.
WANG X CH, SHAO M. *The Basic Theory and Numerical Value Method of FEM(2nd Edition)*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003. (in Chinese)
- [8] 梁斌,乐金朝. 弹性圆柱壳的稳定性优化设计[J]. *机械强度*, 2002,24(3):463-465.
LANG B, LE J CH. Optimum design of cylindrical shell on stability [J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2002, 24(3):463-465. (in Chinese)
- [9] 刘宏伟,张芹,丁亚林,等. 基于有限元分析的长条状主镜支撑结构设计[J]. *光学精密工程*, 2003,11(6):555-559.
LIU H W, ZHANG Q, DING Y L, *et al.*. Design of strip primary mirror supporting structure based on finite element analysis[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(6): 555-559. (in Chinese)
- [10] 吴清彬,陈时锦,董申. 参数优化方法在轻质反射镜结构设计中的应用[J]. *光学精密工程*, 2003,11(5):466-471.
WU Q B, CHEN SH J, DONG SH. Optimization of parameters structural design of light weight reflector[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(5): 466-471. (in chinese)

作者简介:李 红(1959—),女,北京人,北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院副教授,主要研究方向为磁悬浮反作用飞轮,磁悬浮控制力矩陀螺总体方案设计,精密装配与加工工艺研究。E-mail: lihong@buaa.edu.cn
叶全红(1983—),男,湖北天门人,北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院硕士研究生,主要研究方向为磁悬浮反作用飞轮,磁悬浮控制力矩陀螺多学科优化设计。E-mail: yqh0104@126.com; yqh0104@gmail.com