

文章编号 1004-924X(2012)09-1991-08

微框架效应磁悬浮飞轮转子轮缘优化设计

汤继强^{1,2}, 韩雪飞^{1,2*}, 刘强^{1,2}

- (1. 北京航空航天大学惯性技术重点实验室, 北京 100191;
2. 北京航空航天大学新型惯性仪表与导航系统技术国防重点学科实验室, 北京 100191)

摘要:基于由磁阻式锥形磁轴承和洛伦兹力磁轴承组成的五自由度微框架磁悬浮飞轮,对转子轮缘进行了优化设计。根据飞轮转子结构特性,提出以质量为优化目标,对轮缘质量、极转动惯量和一阶共振频率等进行理论分析和研究,确定了优化变量。应用优化设计软件 iSIGHT 集成有限元分析软件 ANSYS,采用序列二次规划算法,以一阶共振频率、极转动惯量、最大等效应力、极惯性矩与赤道惯性矩之比等作为约束条件并考虑轮辐根数对轮缘质量的影响,对轮缘进行了优化计算,得到了相关变量的最优化结果。结果表明,其他变量最优、轮辐根数为3时,轮缘具有最小质量为2.036 kg,比初始质量2.226 kg减小了8.54%。提出的优化方法提高了转子设计的合理性和效率,对飞轮系统整体优化设计具有重要意义。

关键词:磁悬浮飞轮;五自由度;微框架;转子轮缘;优化设计

中图分类号:V414.1;V448.2 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122009.1991

Optimal design of rotor rim for magnetically suspended flywheel with vernier gimbaling capacity

TANG Ji-qiang^{1,2}, HAN Xue-fei^{1,2*}, LIU Qiang^{1,2}

- (1. Key Laboratory of Science and Technology on Inertia, Beihang University, Beijing 100191, China;
 2. The National Defense Key Laboratory of Novel Inertial Instrument & Navigation System Technology, Beihang University, Beijing 100191, China)
- * Corresponding author, E-mail: hanxuefei 2011@sina.com

Abstract: A 5 DOF magnetically suspended flywheel with vernier gimbaling capacity which is composed of a conoid reluctance bearing and a Lorentz magnetic bearing was investigated and its rotor rim was designed optimally. Based on the structure of the rotor and the goal to minimize the mass of the rim, the mass, inertial moment and resonance frequency of the rim were analyzed theoretically to confirm the optimal variables. Consequently, an optimal design was achieved through iSIGHT and ANSYS, and by taking the number of spokes into account, the variables were optimized by the sequential quadratic programming algorithm in the restrain cases of the resonance frequency, inertial moment, maximum equivalent stress, and the ratio of polar inertia moment to equinoctial inertia moment. Those re-

收稿日期:2012-04-11;修订日期:2012-05-28.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61174003)

sults of optimization indicate that the mass of the rim is decreased from 2.226 kg to 2.036 kg (namely reduced by 8.54%) when the number of spokes is 3 and other design variables are optimal. The proposed optimal design method can improve the rationality and efficiency of rotor design, and will be an important part in the optimal design of flywheel systems.

Key words: magnetically suspended flywheel; 5 DOFs; vernier gimbaling capability; rotor rim; optimal design

1 引言

磁悬浮飞轮是空间飞行器实现高精度姿态控制的关键执行机构,相比机械轴承飞轮具有高转速、低功耗和长寿命的优点^[1-4]。现有的磁悬浮飞轮,一般采用 2 个单自由度轴向磁轴承+2 个三自由度径向磁轴承结构,或 2 个三自由度轴向磁轴承+1 个两自由度径向磁轴承结构,若增加冗余度,则需更多的飞轮配合使用,姿态控制系统的体积、重量和功耗较大、可靠性和输出力矩较低成为此系统配置的主要缺点。为更好地实现磁悬浮飞轮的空间优势,解决现有磁悬浮飞轮系统输出力矩较小的缺点,国内外许多学者对微框架磁悬浮飞轮系统进行了研究,微框架磁悬浮飞轮转子可以沿非惯性主轴偏转,由陀螺进动原理,可以输出较大力矩。磁阻式微框架磁悬浮飞轮主要有两种:一种采用圆锥形磁极,重量大,输出角动量较小;另一种采用由 8 块电磁铁悬浮组成的磁阻式磁轴承,转子具有小于 0.5° 的偏转功能^[5]。洛伦兹力磁轴承式微框架磁悬浮飞轮主要有两种:一种由两个径向磁轴承、一个轴向磁轴承和一个附加磁轴承组成,两个径向磁轴承用于控制转子偏转^[6];另一种由轴向/扭转磁轴承和径向磁轴承组成,轴向/扭转磁轴承用以控制转子轴向平动和沿径向的扭转,径向磁轴承用于控制转子径向平动^[7]。以上 4 种微框架磁悬浮飞轮方案在转子发生偏转时,磁轴承都需要提供更大的电流以克服扭转负力矩,从而增加了飞轮系统整体功耗。针对以上方案的缺点,本文提出了一种五自由度全主动微框架磁悬浮飞轮,采用锥形磁轴承实现 3 个平动自由度的主动控制,采用洛伦兹力磁轴承实现 2 个转动自由度的主动控制。

由于转子的其他几个部件已经确定了设计方案,没有优化的余地,因此只能对轮缘进行优化设

计。优化设计主要应用 ANSYS 和 iSIGHT 软件^[8-10]。文献[8]是对设计变量以一定间隔取值,并用 ANSYS 软件分别对各组设计量值进行仿真分析,取得质量最优的一组设计变量值;文献[9-10]都是应用 iSIGHT 软件集成 ANSYS 软件进行优化设计,但都没有考虑轮辐根数对轮缘结构的影响。本文通过改进文献中的优化方法,以质量为优化目标,以材料强度、一阶共振频率、极转动惯量和最大等效应力同时作为约束,采用序列二次规划算法,考虑轮辐根数对轮缘结构的影响,对轮缘进行优化设计。

2 微框架磁悬浮飞轮系统结构及其工作原理

五自由度全主动微框架磁悬浮飞轮主要由锥形磁轴承、洛伦兹力磁轴承、传感器、轮缘、轮毂和电机等组成。锥形磁轴承用于支承飞轮转子,通过控制上下锥形转子所受电磁力的大小和方向,完成转子轴向平动自由度的主动控制,利用径向定子和径向转子之间的相互作用来控制径向平动,从而实现转子 3 个平动自由度的主动控制。锥形磁轴承可通过改变锥面的倾斜角度使电磁力在空间上交汇于转子质心,即当转子偏转输出力矩时,虽然转子不同位置存在大小不同的负刚度力,但在长度为 0 的力臂作用下不会产生偏转负力矩,与现有五自由度全主动微框架磁悬浮飞轮相比,具有转子偏转时负力矩较小的特点。

洛伦兹力磁轴承仅用于控制飞轮的径向偏转,利用磁轴承定转子之间的相互作用力来控制转子沿径向转动,实现力矩输出,且将洛伦兹力磁轴承置于飞轮轮盘,增大了扭转力臂的长度,因此相对于纯洛伦兹力磁悬浮飞轮出力减小。由于洛伦兹力磁轴承在径向+X、-X 或+Y、-Y 方向

可以产生一作用力偶,且洛伦兹力磁轴承定转子间气隙较大,使飞轮转子具有沿径向 Y 或 X 方向的偏转角速度 ω (ω 视为陀螺进动角速度),由陀螺进动公式 $\omega \times H = M$,相当于飞轮转子具有沿径向 X 或 Y 方向的控制力矩,使磁悬浮飞轮具有微框架作用,输出较大力矩,形成五自由度全主动微框架磁悬浮飞轮。

3 微框架磁悬浮飞轮轮缘力学分析

3.1 轮缘结构

转子作为微框架磁悬浮飞轮的关键部件,对飞轮系统质量、转动惯量和可靠性等都有重要影响,其结构如图 1 所示,包括轮毂、轮缘、洛伦兹力磁轴承转子、锥形磁轴承转子和电机转子等。

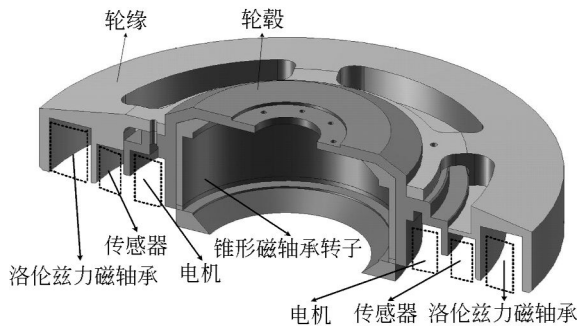


图 1 转子系统结构示意图

Fig. 1 Sketch map of the rotor

其工作原理为轮缘固定在与锥形磁轴承转子连接的轮毂上,从而由锥形磁轴承实现转子 3 个平动自由度主动控制,洛伦兹力磁轴承实现其 2 个转动自由度主动控制,电机带动转子输出转动惯量。为使转子在质量最小的情况下满足动量矩的要求,轮缘采用辐条式结构并置于转子的径向边缘。为兼顾洛伦兹力磁轴承定子和传感器探头在结构尺寸上的要求,轮缘径向外边缘的环形凹槽用于放置洛伦兹力磁轴承转子,其径向内边缘用于放置传感器探头,其上端固定在轮毂上,初步设计结构参数如图 2 所示。

其中, R_1 为内孔半径, R_2 为内孔与内短壁半径差, R_3 为内短壁径向厚度, R_4 为径向边缘斜坡内径, H 为总高度, H_1 为固定端厚度, H_2 为内短壁轴向长度, H_4 为深凹槽深度, H_5 为径向边缘斜坡高度, d_1 为内长壁厚度, d_2 和 d_3 分别为边缘两毗邻凹槽宽度, d_4 为外壁厚度, d 为两凹槽深度差。

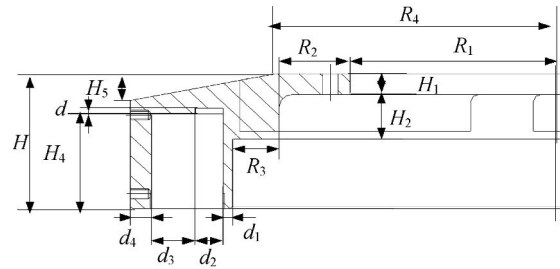


图 2 轮缘结构及参数图

Fig. 2 Structure and parameters of the rim

3.2 结构力学分析

轮缘作为飞轮转子的关键部件,其静力学性能对飞轮系统的影响如下:

(1) 在高速旋转状态下轮缘的转动惯量决定磁悬浮飞轮转动惯量大小;

(2) 飞轮工作时,过低的一阶共振频率会引起飞轮系统共振,影响卫星定姿精度;

(3) 过大的质量会影响飞轮系统功耗。

根据图 2 所示的轮缘结构尺寸,可得轮缘部件的极转动惯量:

$$J = \frac{1}{5} \pi \rho \left[\begin{array}{l} (R_1 + R_2 + R_3 + d_1 + d_2 + d_3 + d_4)^5 \cdot \\ (H - H_5) - (R_1 + R_2)^5 \cdot H_2 - \\ (R_1 + R_2 + R_3)^5 \cdot (H - H_1 - H_2) \\ + (R_1 + R_2 + R_3 + d_1)^5 \cdot H_4 \\ - (R_1 + R_2 + R_3 + d_1 + d_2 + d_3)^5 \cdot \\ (H_4 - d) + (R_1 + R_2 + R_3 + d_1 + d_2)^5 \cdot \\ (-d) + r_4^5 \cdot H_5 - R_1^5 \cdot H_1 \end{array} \right] - J_1, \quad (1)$$

其中: J 为轮缘极转动惯量, J_1 为辐孔极转动惯量。

整个轮缘可以视为厚度为 b 的等效悬臂梁在圆周方向上的积分^[11]。根据悬臂梁结构共振方程:

$$([\mathbf{M}]^{-1}[\mathbf{K}] - \lambda[\mathbf{I}])\{\mathbf{X}\} = \{0\}, \quad (2)$$

令 $[\mathbf{M}]^{-1}[\mathbf{K}] = (k/m) \cdot [\mathbf{S}]$, 有

$$[(k/m)[\mathbf{S}] - \lambda[\mathbf{I}])\{\mathbf{X}\} = \{0\}, \quad (3)$$

其中: $[\mathbf{M}]$ 为系统质量矩阵, $[\mathbf{K}]$ 为系统刚度矩阵, λ 为系统矩阵 $[\mathbf{M}]^{-1}[\mathbf{K}]$ 的特征值, λ_1 为最小的特征值, $\{\mathbf{X}\}$ 为振幅的特征矢量, k 为轮缘等效刚度。无限小厚度 b 的轮缘部件剖面可以等效为一悬臂梁,所得等效结构如图 3 所示,其上端固定,下端附有质量分别为 m_1 、 m_2 、 m_3 和 m_4 的物体。

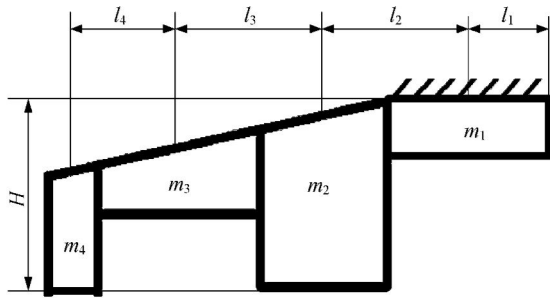


图 3 轮缘等效结构图

Fig. 3 Equivalent structure of the rim

轮缘等效模型可视为 4 种不同刚度刚体串联,其等效刚度为:

$$\delta_2 = [1.5(R_2/2)^2 \cdot (R_3 + d_1) \cdot m_1 g + 2(R_2/2)^3 \cdot m_1 g + 0.25(R_3 + d_1)^3 \cdot m_2 g] / 6EI, \quad (8)$$

$$m_2 = \pi \rho b [R_3 \cdot H_2 + d_1 \cdot H - 0.5 \cdot H_5 \cdot (R_1 + R_2 + R_3 + d_1 - R_4)^2 / (R - R_4)], \quad (9)$$

$$\delta_3 = [3R_3^2 \cdot (R_3 + d_1) + 2R_3^3] \cdot m_1 g / 48EI + 2(R_3 + d_1 + d_2 + d_3)^3 \cdot m_3 g / 48EI + [3(R_3 + d_1)^2 \cdot (R_3 + d_1 + d_2 + d_3) + 2(R_3 + d_1)^3] \cdot m_2 g / 48EI, \quad (10)$$

$$m_3 = \pi \rho b \{ (d_2 + d_3)(H - H_4) + d_3 \cdot d - 0.5(d_2 + d_3) \cdot H_5 \cdot [2 - (2R_4 + d_3) / (R - R_4)] \}, \quad (11)$$

$$\delta_4 = [3R_2^2(R_3 + d_1) + 2R_2^3] \cdot m_1 g / 48EI + [3(R_3 + d_1 + d_2 + d_3)^2 \cdot (d_2 + d_3 + d_4) + 2(R_3 + d_1 + d_2 + d_3)^3] \cdot m_3 g / 48EI + [3(R_3 + d_1)^2 \cdot (R_3 + d_1 + d_2 + d_3) + 2(R_3 + d_1)^3] \cdot m_2 g / 48EI + 2(d_2 + d_3 + d_4)^3 \cdot m_4 g / 48EI, \quad (12)$$

$$m_4 = \pi \rho b \{ d_4 \cdot H - 0.5[2 - d_4 / (R - R_4)] \cdot d_4 \cdot H_5 \}, \quad (13)$$

$$\text{一阶振动频率可表示为: } F_{\text{req}} = \lambda_1 = \omega_1 \propto k/m = 1 / [m \cdot (\delta_1 / m_1 g + \delta_2 / m_2 g + \delta_3 / m_3 g + \delta_4 / m_4 g)]. \quad (14)$$

4 微框架磁悬浮飞轮轮缘的优化设计

4.1 优化设计方案

在初步设计阶段,综合考虑了飞轮转子的设计转速、转动惯量、几何尺寸等影响因素,最终确定了飞轮转子轮缘的基本结构如图 2 所示。根据结构力学分析知,影响轮缘质量的主要尺寸参数为: H_1 、 H_2 、 R_2 、 R_3 与轮辐根数 n ,应用多学科综合优化平台 iSIGHT 和有限元分析软件 ANSYS 对主要影响参数进行优化设计。

优化设计模型一般包括设计变量、目标函数、优化算法、约束条件等部分,下面建立微框架磁悬浮飞轮轮缘优化数学模型。

(1)设计变量:优化变量为 H_1 、 H_2 、 R_2 、 R_3 与轮辐根数 n ,其中轮辐根数 n 为离散变量取整数,其他 4 个变量为连续变量。设计变量关系如下:

$$X = (R_2, R_3, H_1, H_2, n). \quad (15)$$

(2)优化设计目标:以尽可能小的质量在额定

$$k = 1 / (1/k_1 + 1/k_2 + 1/k_3 + 1/k_4), \quad (4)$$

$$k = 1 / (\delta_1 / m_1 g + \delta_2 / m_2 g + \delta_3 / m_3 g + \delta_4 / m_4 g), \quad (5)$$

令 $R = R_1 + R_2 + R_3 + d_1 + d_2 + d_3 + d_4$, k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 、 δ_1 、 δ_2 、 δ_3 、 δ_4 分别为图 3 中质量为 m_1 、 m_2 、 m_3 、 m_4 重物的等效刚度和静挠度, EI 为等效模型的抗弯刚度, E 为轮缘材料的弹性模量, $I = bH^3/12$ 为轮缘等效模型截面惯性矩, g 为重力加速度, F_{req} 为一阶振动频率, ω_1 为发生共振的最低转速,则有:

$$\delta_1 = (R_2/2)^3 \cdot m_1 g / 3EI, \quad (6)$$

$$m_1 = \pi \rho b \cdot R_2 \cdot H_1, \quad (7)$$

转速下达到设计角动量,同时满足刚度、强度等方面的要求,即:

$$M = f(X) = \min f(R_2, R_3, H_1, H_2, n). \quad (16)$$

(3)优化设计算法:从结构优化设计的角度来说,微框架磁悬浮飞轮轮缘的优化设计是一个有约束的非线性数学规划问题,采用稳定性较高的序列二次规划算法(NLPQL)。

(4)可行域:由于锥形磁轴承转子、洛伦兹力磁轴承转子和电机转子结构尺寸已经确定,为限制轮缘重量,并结合工程实践经验,要求设计变量的范围如式(17)所示。

$$\begin{cases} 10.5 \text{ mm} \leq R_2 \leq 43.2 \text{ mm} \\ 0 \text{ mm} \leq R_3 \leq 17.2 \text{ mm} \\ 3 \text{ mm} \leq H_1 \leq 8 \text{ mm} \\ 0 \text{ mm} \leq H_2 \leq 17.7 \text{ mm} \\ 2 \leq n \leq 10, n \in \mathbb{N} \end{cases}. \quad (17)$$

(5)约束条件:主要是从静力学和动力学性能角度对轮缘提出要求。静力学要求主要是为使轮

缘安全系数在 2 以上,要求轮缘的最大等效应力 $\sigma_{\max} \leq [\sigma]/2$, $[\sigma] = 435 \text{ MPa}$ 为 7A09 的材料许用应力;动力学要求主要是对轮缘模态特性的要求,对于最高转速为 7 000 r/min 的飞轮转子则要求轮缘的一阶共振频率 $F_{\text{req}} > 175 \text{ Hz}$ (大于转子最高转速的 1.5 倍)。为满足转子在额定转速 (5 000 r/min) 下提供 68 N·ms 动量矩的要求,此时转子的极转动惯量为 0.130 kg·m²,则要求轮缘的转动惯量至少为 0.023 kg·m²,为保留 15% 的设计裕量,则轮缘的转动惯量 $J > 0.027 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$,同时要求转子极惯性矩/赤道惯性矩之比 q 在 1.4~2 之间。综上所述,轮缘的约束条件为:

$$\begin{cases} \sigma_{\max} \leq \sigma/2 \\ F_{\text{req}} = \omega_1 > 175 \text{ Hz}, \\ J \geq 0.027 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \\ 1.4 \leq J_p/J_e \leq 2 \end{cases} \quad (18)$$

根据以上优化变量、优化目标、优化算法和约束条件,以 iSIGHT 为平台集成 ANSYS,在初步设计的基础上对轮缘进行优化设计,其流程如图 4 所示。先对轮辐根数 $n=2$ 的结构参数进行优化,获得设计结果后,对 $n=3 \sim 10$ 的结构参数进行优化,分析对比各次优化结果,获得关于所有变量的最优化结果。

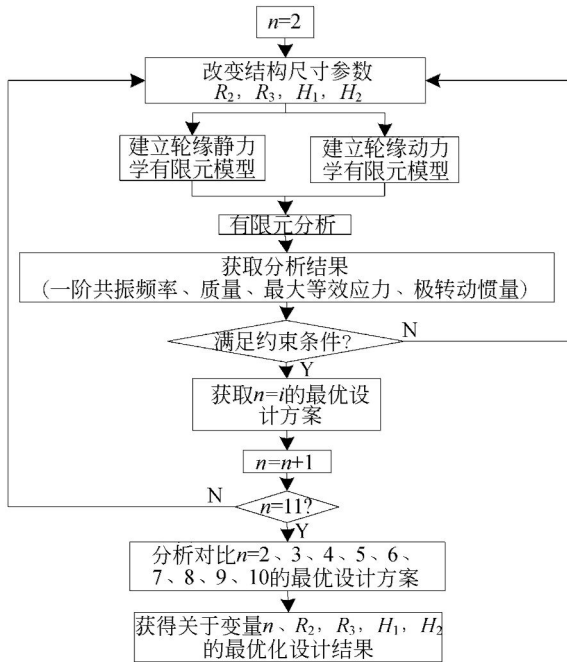


图 4 飞轮轮缘优化设计流程

Fig. 4 Optimal flow chart of rim design

4.2 优化设计结果

利用优化设计软件 iSIGHT 集成有限元分析软件 ANSYS 计算轮缘质量 M 、其对应最大应力 σ_{\max} 、一阶共振频率 F_{req} 、极转动惯量 J 与轮辐根数 n 的对应关系如图 5 所示。

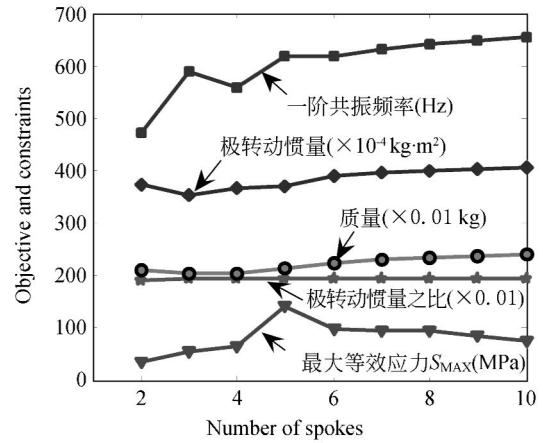


图 5 目标函数与轮辐根数关系曲线

Fig. 5 Objective and constraints versus number of spokes

从图 5 可以看出,质量最优时,一阶共振频率 F_{req} 、极转动惯量 J 和最大等效应力 σ_{\max} 都满足要求, F_{req} 随 n 的增加呈上升趋势, J 与 M 具有一致变化性。各 M 相差不大,但当 $n=3$ 时,轮缘具有最低的质量和最高的一阶共振频率,所以轮辐根数取 $n=3$ 。 n 取 3 时,优化结果曲线如图 6 和图 7 所示。图 6 为轮缘设计变量在优化过程中的变化曲线,图 7 为目标函数和状态变量的变化曲线。

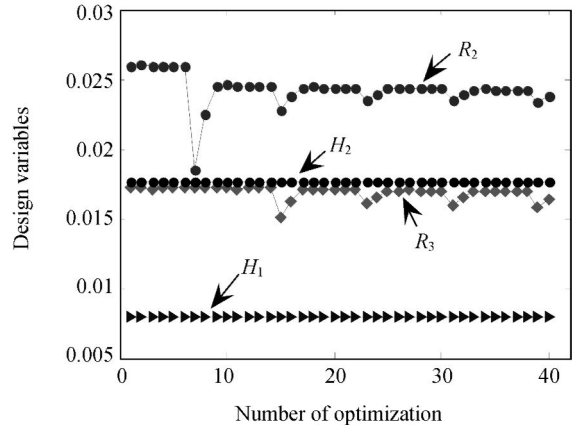


图 6 设计变量的优化过程曲线

Fig. 6 Optimal curves of design variables

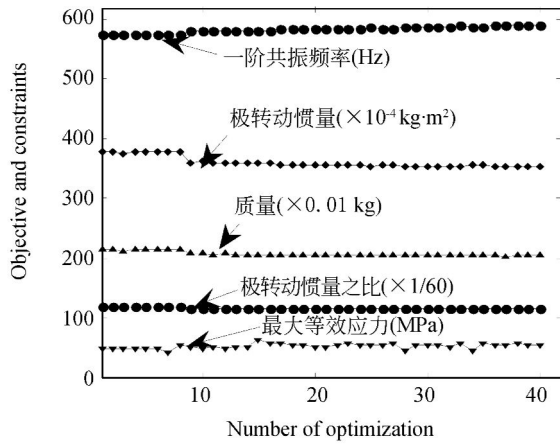


图 7 目标函数的优化过程曲线
Fig. 7 Optimal curves of design results

由图 6 可以看出优化过程中 H_1 和 H_2 的变化幅度非常小,可以视 H_1 和 H_2 为常量,由图 6、7 及计算结果可知,当 R_2 从 26.00 mm 降到 24.28 mm, R_3 从 17.20 mm 降为 16.89 mm 时,由式(1)及结构尺寸参数图(图 2)可以看出,极转动惯量 J 明显变小,与图 7 中 J 的变化趋势吻合;质量 m 的变化趋势与 J 具有一致性。

根据图 6 中设计变量的变化趋势,式(14)可以简化为:

$$F = \lambda_1 = \omega_1 \propto 1 / \{ [R_2^3 + R_3^3 + R_2^3 (R_2 + R_3) / R_2^2 + (R_2 + R_3)^4] \cdot (R_2 + R_3) \}. \quad (19)$$

当 R_3 不变, R_2 从 26.00 mm 降为 24.50 mm 时,由式(19)得一阶共振频率呈上升趋势,与图 7 中 F_{req} 的变化趋势相吻合;当 R_2 从 26.00 mm 降到 24.28 mm, R_3 从 17.20 mm 降为 16.89 mm 时,由式(19)得一阶共振频率呈上升趋势,与图 7 中 F_{req} 的变化趋势相一致。从图 7 可以看出最优化结果出现在第 40 步。在最优化设计变量下,轮缘的质量为 2.036 kg,利用有限元分析软件对最优设计方案进行静力学和动力学分析,轮缘的一阶振型如图 8 所示,模态分析得出一阶共振频率为 590.29 Hz,远大于轮缘最高转频;轮缘的应力云图如图 9 所示,最大等效应力发生在辐孔导圆角处,分布比较合理,大小为 53.60 MPa ($< [\sigma] / 2$)。优化前后轮缘结构优化变量和目标函数的结果对比如表 1 所示。

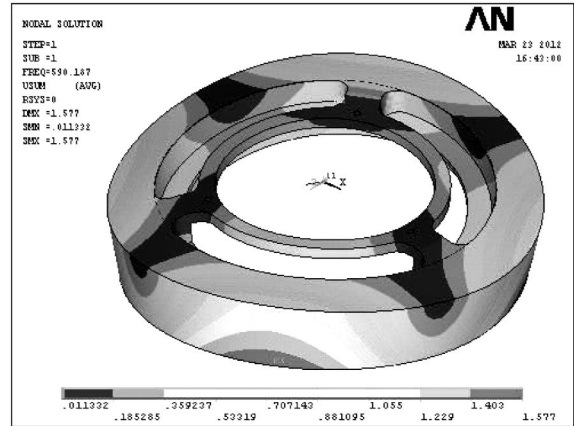


图 8 一阶模态

Fig. 8 First model of the rim

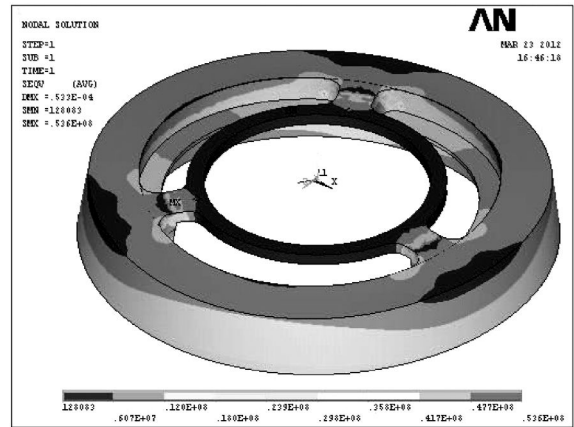


图 9 应力云图

Fig. 9 Stress nephogram of the rim

表 1 轮缘结构参数的优化设计结果

Tab. 1 Optimal design results of the rim

变量	优化前	优化后
轮辐根数 n	5	3
内壁半径 R_2 /mm	26.00	24.28
内壁径向厚度 R_3 /mm	17.20	16.89
轮辐圆角半径 R_5 /mm	14.00	10.54
固定端厚度 H_1 /mm	8.00	7.90
内壁轴向长度 H_2 /mm	17.70	17.70
一阶共振频率 F_{req} /Hz	610.96	590.29
极转动惯量 J /(kg · m ²)	0.038 8	0.035 3
最大等效应力 S_{max} /MPa	51.19	53.60
质量 m /kg	2.226	2.036
转动惯量之比(J_p/J_e)	1.953	1.953

5 结 论

本文基于一种利用锥形磁轴承实现3个平动自由度的主动控制和利用洛伦兹力磁轴承实现2个转动自由度的主动控制的五自由度全主动微框架磁悬浮飞轮,以其转子轮缘为研究对象,以质量最小为优化目标,进行力学分析,并以多学科优化软件 iSIGHT 为平台,集成有限元分析软件 ANSYS,综合考虑轮缘的一阶共振频率、最大等效应

力、极转动惯量等多种因素,采用序列二次规划算法并改进现有优化设计方法,即考虑轮辐根数对轮缘质量的影响,对其进行优化设计。通过综合优化设计,其他设计变量均为最优,轮辐根数由5调整为3时,质量由2.226 kg减小到2.036 kg(减小了8.54%),一阶共振频率由610.96 Hz降为590.29 Hz,最大等效应力由51.19 MPa升为53.60 MPa。优化结果表明在优化结果满足约束条件的情况下,该优化方法提高了转子设计的合理性和效率,对飞轮转子优化设计有重要意义。

参考文献:

- [1] 刘虎,房建成,刘刚. 基于磁悬浮动量轮微框架能力的卫星滚动—偏航姿态稳定控制研究[J]. 宇航学报, 2010, 31(4): 1063-1069.
LIU H, FANG J CH, LIU G. Satellite Roll-yaw axis attitude stable control based on magnetically suspended momentum wheel with vernier gimbaling capacity [J]. *Journal of Astronautic*, 2010, 31(4): 1063-1069. (in Chinese)
- [2] 刘彬,房建成,刘刚,等. 磁悬浮飞轮不平衡振动控制方法与试验研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(12): 188-194.
LIU B, FANG J CH, LIU G, et al.. Unbalance vibration control and experiment research of magnetically suspended flywheels [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(12): 188-194. (in Chinese)
- [3] 吴一辉,高庆嘉,白越,等. 反作用飞轮驱动电机的电磁设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18(6): 1319-1325.
WU Y H, GAO Q J, BAI Y, et al.. Electromagnetic design of driving motors in reaction wheels [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(6): 1319-1325. (in Chinese)
- [4] 韩邦成,刘强. 基于自锁原理的磁悬浮飞轮电磁锁紧机构[J]. 光学精密工程, 2009, 17(10): 2456-2464.
HAN B CH, LIU Q. Electromagnetic locking device based on self-locking for magnetic suspended flywheel [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(10): 2456-2464. (in Chinese)
- [5] SAWADA H, HASHIMOTO T, NINOMIYA K. High-stability attitude control of satellites by magnetic bearing wheels [J], *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences*, 2001, 44(145): 133-141.
- [6] GERLACH B, EHINGER M, RAUE H K. Digital controller for a gimbaling magnetic bearing reaction wheel [C]. *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*, San Francisco, USA, 2005: 1-6.
- [7] 刘彬,房建成,刘刚. 一种磁悬浮陀螺飞轮方案设计与关键技术分析[J]. 航空学报, 2011, 32(8): 1478-1487.
LIU B, FANG J CH, LIU G. Design of a magnetically suspended gyrowheel and analysis of key technologies [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2011, 32(8): 1478-1487. (in Chinese)
- [8] 李红,叶全红,韩邦成,等. 磁悬浮反作用飞轮密封罩结构的优化设计[J]. 光学精密工程, 2007, 15(10): 1571-1576.
LI H, YE Q H, HAN B CH, et al.. Optimization design of sealed cowling structure for magnetic bearing reaction flywheel [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(10): 1571-1576. (in Chinese)
- [9] ARVIN A C, BAKIS C E. Optimal design of press-fitted filament wound composite flywheel rotors [J]. *Composite Structures*, 2006(72): 47-57.
- [10] RAFIQUE A F, HE L S, KAMRAN A, et al.. Multidisciplinary design of air launched satellite launch vehicle; performance comparison of heuristic optimization methods [J]. *Acta Astronautica*, 2010, 67: 826-844.
- [11] 蔡森甫,刘浩荣. 高等数学上册[M]. 上海: 同济大学出版社, 1988.
CAI S F, LIU H R. *Advanced Mathematics Volume 1* [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1988. (in Chinese)

作者简介:



韩雪飞(1987—),女,吉林长春人,硕士研究生,2010年于北京交通大学获得学士学位,主要从事磁悬浮飞轮技术的研究。E-mail: hanxuefei2011@sina.com



刘 强(1983—),男,江西九江人,博士研究生,2005年于北京石油化工学院获得学士学位,主要从事磁悬浮飞轮及磁悬浮控制力矩陀螺技术的研究。E-mail: liuqiangbuaa@aspe.buaa.edu.cn

导师简介:



汤继强(1972—),男,重庆人,博士后,讲师,硕士生导师,2005年于哈尔滨工程大学获得博士学位,主要从事磁悬浮飞轮及磁悬浮控制力矩陀螺技术的研究。E-mail: tq_72@163.com

● 下期预告

相干和多模热光场光子统计实验研究

张合勇^{1,2}, 赵 帅¹, 郭 劲¹, 王挺峰¹

(1 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 激光与物质相互作用国家重点实验室, 吉林 长春 130033; 2 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

本文以激光外差探测中两束光的特性为基础,分析了相干光场和多模热光场的光子统计模型。分别讨论了上述两种光场的二阶和三阶统计特征,其中二阶统计对应于 Fano 因子,三阶统计对应于对称因子。对上述两种光场的 Fano 因子和对称因子进行实验测量。相干光场的 Fano 因子和对称因子不随入射光子数而变化,由此进行直线拟合,进而得到与之对应的窜扰概率 $\epsilon = 0.0321$,探测器增益系数 $\gamma = 1.0460$ ph。多模热光场的 Fano 因子随着入射光子数增加,呈直线上升趋势;目标运动速度加快,Fano 因子逐渐减小,表示回波光子波动减小,本质原因是热模个数增加引起的平均效应。多模热光场对称因子呈抛物线趋势逐渐增加。通过对相干和多模热光场统计特性研究,为光子计数体制激光外差探测奠定基础。