

# 磁悬浮微框架球形飞轮及其转子优化设计研究

刘强<sup>1,2</sup>, 胡灯亮<sup>1,2</sup>, 吴波<sup>1,2</sup>, 任元<sup>3</sup>, 王卫杰<sup>3</sup>

(1. 北京石油化工学院 精密电磁装备与先进测量技术研究所, 北京 102617;

2. 北京石油化工学院 磁悬浮轴承研发与精密制造中心, 北京 102617; 3. 装备学院 航天装备系, 北京 101416)

**摘要:** 为了克服现有外转子方案因螺钉连接而增加转子系统不平衡量的缺点, 提出一种内转子结构磁阻力-洛伦兹力混合力构型的磁悬浮微框架球形飞轮。介绍了飞轮结构和工作原理, 分析了转子系统控制模型。研究表明, 当转子质心、球心和检测中心重合时, 可消除平动悬浮对径向偏转控制的干扰, 简化控制器设计。在考虑转子最大等效力、1阶共振频率、极地与赤道转动惯量比和极转动惯量的基础上, 增加转子最大变形量和质心与球心偏差两个约束变量, 并筛选高灵敏度参数作为优化设计变量, 以转子质量最小为优化目标, 对其进行多学科优化设计。优化结果表明: 在满足设计要求的前提下, 转子质量由 5.600 kg 减小为 5.389 kg, 减小了 3.8%; 此优化设计方法提高了飞轮转子设计效率, 利于系统实现高控制力矩精度。

**关键词:** 兵器科学与技术; 磁悬浮微框架球形飞轮; 优化设计; 控制器设计; 灵敏度

**中图分类号:** V249.122+.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1093(2017)11-2280-09

**DOI:** 10.3969/j.issn.1000-1093.2017.11.027

## Vernier Gimbaling Magnetically Suspended Spherical Flywheel and Its Rotor Optimization Design

LIU Qiang<sup>1,2</sup>, HU Deng-liang<sup>1,2</sup>, WU Bo<sup>1,2</sup>, REN Yuan<sup>3</sup>, WANG Wei-jie<sup>3</sup>

(1. Institute of Precision Electromagnetic Equipment and Advanced Measurement Technology, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China;

2. Magnetic Bearings Center for Researching and Precision Manufacturing, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China; 3. Department of Space Equipment, Equipment Academy of PLA, Beijing 101416, China)

**Abstract:** To remedy the limitation of the existing outer rotor scheme which increases the unbalance of rotor system due to screw connection, a vernier gimbaling magnetically suspended spherical flywheel with inner rotor based on reluctance force and Lorentz force hybrid configuration is presented. The structure and working principle of the flywheel are introduced, and the control model of rotor system is analyzed. It is concluded that the disturbance of translation suspension on radial tilting control can be eliminated and the controller can be simplified as well when the centroid of rotor coincides with the geometrical symmetrical center of rotor and testing center. In consideration of the maximum equivalent stress, the first-order resonance frequency, the ratio of polar moment of inertia to equinoctial inertial moment, the polar moment of inertia, the maximum deformation and the deviation of the centroid of rotor and the sphere center of rotor are increased as constraint condition. The multidisciplinary optimization design of rotor system is

收稿日期: 2017-04-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51405022)

作者简介: 刘强(1983—), 男, 副教授, 硕士生导师。E-mail: liuqiangbuaa@163.com

通信作者: 吴波(1963—), 男, 教授, 硕士生导师。E-mail: wubobipt@163.com

performed by taking the high sensitivity parameters as optimal design variables and the minimum rotor mass as the optimization objective. The results indicate that the mass of rotor is decreased from 5.600 kg to 5.389 kg, which is reduced by 3.8%, under the condition satisfying the design requirements. The optimization design method can improve the design efficiency and control torque precision of flywheel system.

**Key words:** ordnance science and technology; vernier gimbaling magnetically suspended spherical flywheel; optimization design; controller design; sensitivity

## 0 引言

以新一代高分军事侦查和天基攻防对抗为代表的军事航天任务均要求天基平台具有甚稳超静和敏捷机动的功能,前者需要高精度力矩实现对姿态的精确稳定控制,后者需要大力矩实现大角度姿态灵活机动<sup>[1-2]</sup>。磁悬浮微框架飞轮既能够通过改变转速的大小输出高精度力矩,也能够改变旋转轴的方向输出瞬间较大进动力矩<sup>[3-5]</sup>。磁悬浮微框架飞轮不仅能够满足新一代天基平台的功能需求,还可以在实现天基平台敏捷机动的同时,实现天基平台的甚稳超静功能,是新一代天基平台的理想选择<sup>[6-7]</sup>。

根据磁悬浮微框架飞轮构型的不同,可将其分为磁阻力构型<sup>[8-10]</sup>、洛伦兹力构型<sup>[11-13]</sup>和磁阻力与洛伦兹力混合力构型<sup>[5,14-15]</sup>。文献[8]提出了一种径向被动悬浮的磁阻力构型方案,通过轴向三自由度永磁偏置磁轴承实现转子轴向平动悬浮和径向两自由度快速偏转。文献[9]研制了一种轴向被动悬浮磁阻力构型的微框架飞轮,利用永磁偏置磁轴承实现径向平动和偏转控制,利用U型磁极实现轴向被动悬浮。为提高飞轮转子悬浮精度和控制精度,文献[10]介绍了一种全主动磁阻力构型方案,利用纯电磁磁轴承实现转子五自由度悬浮。为克服磁阻式磁轴承因电磁力与控制电流存在非线性缺点,文献[11]研制了一种洛伦兹力构型具有微框架效应的反作用飞轮,利用洛伦兹力磁轴承实现转子五自由度全主动悬浮。文献[12]提出一种类似的洛伦兹力构型方案,并对其进行了姿态控制与敏感特性研究。因洛伦兹力承载力低,大型飞轮转子地面悬浮工作时,需配备磁阻力磁轴承进行卸载,在轨工作时利用洛伦兹力磁轴承实现转子五自由度悬浮控制<sup>[13]</sup>。借鉴文献[13]利用磁阻力磁轴承卸载原理,文献[14]提出了一种混合力构型的微框架飞轮,通过永磁偏置磁轴承和轴向被动磁轴承实现径向平动主动悬浮和轴向平动被动悬浮,利用洛伦兹力磁轴承控制径向偏转。为了提高转子平动悬浮

精度,文献[5,15]利用锥形磁轴承代替文献[14]中的径向永磁偏置磁轴承和轴向被动磁轴承,实现转子三自由度平动悬浮。

混合力构型的磁悬浮微框架飞轮充分利用磁阻力磁轴承承载力大和洛伦兹力磁轴承控制精度高的优点,是微框架飞轮理想构型方案。文献[14]中的柱壳气隙和文献[5,15]中的锥壳气隙在偏转状态下气隙形状发生改变,导致气隙磁密不均匀,产生偏转负力矩,降低了悬浮精度和控制精度。若将磁阻力磁轴承磁极设计成球面,偏转前后球壳气隙形状不变,磁极处的电磁力不会产生负力矩,且全部经过磁极球面的球心,当转子球心与质心重合时,可消除平动悬浮对偏转控制的干扰,因此转子是飞轮的核心部件之一,有必要对其进行详细优化。

针对飞轮转子多学科优化方法,诸多学者对其进行了研究。文献[16]针对50 N·m·s磁悬浮反作用飞轮,考虑转子最大应力、1阶共振频率、极地与赤道转动惯量比和角动量,对其进行了优化设计。文献[17]采用文献[16]的优化方法对磁悬浮控制力矩陀螺高速转子进行了优化设计。为简化磁轴承控制器,文献[18]在文献[16]的基础上,引入转子质心和磁轴承几何中心偏差这一约束变量,对15 N·m·s磁悬浮反作用飞轮转子进行了优化。为了进一步降低陀螺转子质量,文献[19]在文献[17]的基础上,采用遗传算法和序列二次规划法的组合优化策略,对大型磁悬浮控制力矩陀螺转子进行了优化。文献[20]为提高储能飞轮转子可靠性,对转子储能密度和应力分布进行了优化。文献[21]介绍了一种微框架效应磁悬浮飞轮,并对轮缘进行了优化。文献[22]在文献[16-21]的基础上,考虑发射振动工况,增加了锁紧状态下的1阶共振频率,对转子进行了多学科优化。文献[16-22]均未考虑转子质心、形心和检测中心间的偏差对系统控制精度的影响。

本文综合现有微框架飞轮构型的优点,提出了一种基于球形转子混合力构型的磁悬浮微框架飞

轮,对转子系统进行动力学建模与灵敏度分析,根据分析结果选择合适结构参数作为优化变量,以转子质量最小为优化目标,对其进行多学科优化设计。

## 1 磁悬浮微框架球形飞轮

### 1.1 飞轮结构及其工作原理

为了避免外转子结构因螺钉连接而引起转子不平衡量增加和质量分布不均匀的问题,本文综合现有磁悬浮微框架飞轮构型<sup>[5-15]</sup>的优点,提出了一种混合力构型的内转子方案,其结构如图 1 所示。飞轮系统主要包括上、中、下陀螺房(提供结构支撑和内部真空洁净环境)、径向与轴向电涡流位移传感器(检测转子径向与轴向位移和偏转角度)、飞轮转子(额定转速 9 000 r/min,角动量 15 N·m·s,偏转角  $\pm 1^\circ$ )、电机、径向与轴向球面磁轴承(控制转子径向与轴向平动)和洛伦兹力磁轴承(控制转子偏转)。径向与轴向球面磁轴承的气隙为球壳状,偏转前后球壳形状不变,即磁极内电磁力均匀分布,且均指向球心。当转子球心与质心重合时,电磁力不会对转子产生偏转负力矩,即平动悬浮不会对偏转控制产生干扰。

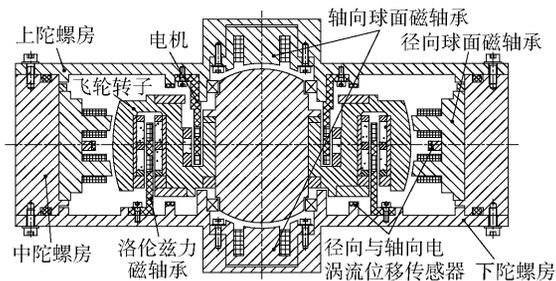


图 1 磁悬浮微框架球形飞轮结构示意图

Fig. 1 Construction of vernier gimballing magnetically suspended spherical flywheel

### 1.2 球形飞轮转子

球形飞轮转子结构如图 2 所示,其中  $h_1$ 、 $h_2$  和  $h_3$  分别为电机下端转盘厚度、球心至转盘下端高度和球心至转轴上端轴肩高度,  $r_1$ 、 $r_2$  和  $r_3$  分别为电机内侧半径、转盘上端内孔半径和内导磁套内孔半径,  $sr_1$  和  $sr_2$  分别为转盘外球面半径和转轴上下端两对称球面半径。转轴上下端两对称球面用作轴向磁轴承转子球面磁极,转盘外球面用作径向磁轴承转子球面磁极。为了便于转子上的 3 个共球心球面的制造,转子采用两体结构,通过改变调心环厚度,实现 3 个磁极球面共球心。为增大偏转力矩,将洛伦兹力磁轴承置于转盘内部外侧,用于增加力臂。转盘

和转轴作为转子核心部件,对材料性能要求较高。磁性方面:转子质量较大,而磁极面较小,为确保磁轴承具有较大起浮力,材料应具有较高的饱和磁密;力学方面:为避免高转速状态下转子离心力引起的拉应力超过转子屈服应力,材料应具有较高的屈服强度;工艺性:转盘形状复杂,转子应具有较好的加工工艺性。常用的软磁材料如表 1 所示,屈服应力高于 400 MPa 的磁性材料为 1J22 和 FeCr15,且二者饱和磁密较高,均大于 1.7 T。由于 1J22 软态硬度为 HRB90,较硬不便于加工,而 FeCr15 软态硬度为 HRB70,工艺性好,被选作转盘和转轴材料。由于电涡流位移传感器对 FeCr15 材料的敏感线性范围较窄,在转盘上下端均安装了敏感线性范围较宽的硬铝合金检测盘。

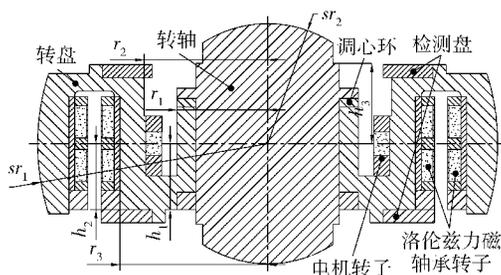


图 2 球形转子结构示意图

Fig. 2 Construction of spherical rotor

表 1 常用软磁材料属性

Tab. 1 Soft magnetic material properties

材料	饱和磁密 $B/T$	屈服应力 $\sigma_s/MPa$	磁导率 $\mu/(mH \cdot m^{-1})$	硬度
1J22	2.4	490	11.44	HRB90
DT4C	1.8	166	15	HV121
FeCr15	1.7	430	10	HRB70
1J50	1.5	147	65	HBS130
1J79	0.75	147	275	HBS120
1J85	0.7		325	

## 2 转子动力学建模

对图 2 所示转子系统进行坐标系定义,得到磁轴承-转子系统的简化模型如图 3 所示。 $OXYZ$ 、 $O_1X_1Y_1Z_1$  和  $O_2X_2Y_2Z_2$  分别为转子球心坐标系、质心坐标系和传感器坐标系,  $O$ 、 $O_1$  和  $O_2$  分别为转子球心、转子质心和传感器检测中心,  $OO_1$  为转子球心与质心的偏差  $\xi$ ,  $O_1O_2$  为转子质心与检测中心的偏差  $\delta$ ,  $Z$  轴为旋转轴(转速为  $\Omega$ ),按照右手定则定义  $X$  轴和  $Y$  轴( $\alpha$  和  $\beta$  分别为转子绕  $X$  轴和  $Y$  轴角位

移), 3 个坐标系各轴对应的方向相同。 $f_{eX}$ 、 $f_{eY}$  和  $f_{eZ}$  分别为球面磁轴承沿  $X$  轴、 $Y$  轴和  $Z$  轴作用于转子球心上的合力,  $P_X$  和  $P_Y$  分别为磁轴承沿  $X$  轴和  $Y$  轴作用于转子球心上的合力矩,  $f_{iX}$  和  $f_{iY}$  为洛伦兹力磁轴承线圈在  $X$  轴和  $Y$  轴永磁体磁场中受到的安培力。 $r_s$  为轴向位移传感器探头中心距转子转轴距离,  $r_1$  为洛伦兹力磁轴承线圈中心距转轴的距离。建立转子动力学模型需做如下假设: 1) 转子为线性时不变系统; 2) 径向与轴向磁轴承及控制系统性能相同; 3) 不考虑电机对系统的作用; 4) 不考虑重力对系统的作用; 5) 不考虑外界对系统的干扰力; 6) 不考虑偏转误差的影响。

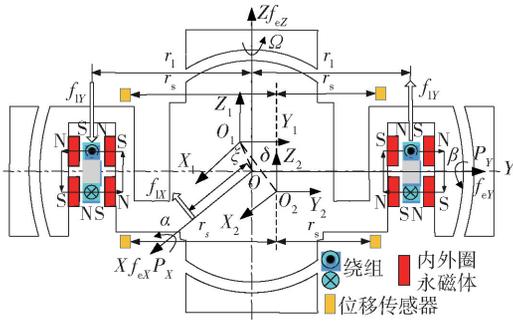


图 3 转子坐标系定义

Fig. 3 Coordinate system of rotor

转子的动力学方程为

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{F}, \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{M} = \text{diag}(m \ J_Y \ m \ J_X \ m)$ ,  $\mathbf{q} = [X \ \beta \ Y \ -\alpha \ Z]^T$ ,

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} J_Z \Omega \quad \text{和} \quad \mathbf{F} = [f_X \ P_Y \ f_Y \ -$$

$P_X \ f_Z]^T$  分别为质量阵、广义坐标、陀螺阵和广义力,  $m$  为转子质量,  $J_X$ 、 $J_Y$  和  $J_Z$  分别为转子绕  $X$  轴、 $Y$  轴和  $Z$  轴的转动惯量。将转子各悬浮通道的电磁力线性化后得:

$$\begin{cases} f_{eX} = k_{mX} X_m + k_{iX} I_{iX}, \\ f_{iX} = k_{iX} I_{iX}, \\ f_{eY} = k_{mY} Y_m + k_{iY} I_{iY}, \text{ 即 } \mathbf{f}_e = \mathbf{K}_m \mathbf{q}_m + \mathbf{K}_i \mathbf{I}_i, \\ f_{iY} = k_{iY} I_{iY}, \\ f_{eZ} = k_{mZ} Z_m + k_{iZ} I_{iZ}, \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $k_{mX}$ 、 $k_{mY}$  和  $k_{mZ}$  分别为  $X$  向、 $Y$  向和  $Z$  向磁轴承位移刚度;  $k_{iX}$ 、 $k_{iY}$  和  $k_{iZ}$  分别为  $X$  向、 $Y$  向和  $Z$  向磁轴承电流刚度;  $k_{iX}$  和  $k_{iY}$  分别为  $X$  向和  $Y$  向洛伦兹力磁轴承电流刚度;  $I_{iX}$ 、 $I_{iY}$  和  $I_{iZ}$  分别为  $X$  向、 $Y$  和  $Z$  向

磁轴承控制电流;  $I_{iX}$  和  $I_{iY}$  分别为  $X$  向和  $Y$  向洛伦兹力磁轴承控制电流;  $\mathbf{f}_e = [f_{eX} \ f_{iX} \ f_{eY} \ f_{iY} \ f_{eZ}]^T$  为磁轴承坐标轴承力;  $\mathbf{K}_m = \text{diag}(k_{mX} \ 0 \ k_{mY} \ 0 \ k_{mZ})$  和  $\mathbf{K}_i = \text{diag}(k_{iX} \ k_{iX} \ k_{iY} \ k_{iY} \ k_{iZ})$  分别为磁轴承位移刚度阵和电流刚度阵;  $\mathbf{q}_m = [X_m \ d_X \ Y_m \ d_Y \ Z_m]^T$  为轴承坐标转子位置,  $X_m$ 、 $Y_m$  和  $Z_m$  分别为  $X$  向、 $Y$  向与  $Z$  向轴承坐标系下的转子位移,  $d_X$  和  $d_Y$  分别为  $X$  向和  $Y$  向转子偏转位移;  $\mathbf{I}_i = [I_{iX} \ I_{iX} \ I_{iY} \ I_{iY} \ I_{iZ}]^T$  为磁轴承控制电流。在分散 PID 控制律作用下磁轴承控制电流为

$$\mathbf{I}_i = \mathbf{k}_s \mathbf{k}_w (-\mathbf{k}_p \mathbf{q}_s - \mathbf{k}_1 \int \mathbf{q}_s dt - \mathbf{k}_D \dot{\mathbf{q}}_s) = \text{control}(-\mathbf{q}_s), \quad (3)$$

式中:  $\mathbf{k}_s$  和  $\mathbf{k}_w$  分别为传感器放大系数阵和功率放大系数阵;  $\mathbf{k}_p$ 、 $\mathbf{k}_1$  和  $\mathbf{k}_D$  分别为比例、积分与微分系数阵;  $\mathbf{q}_s = [X_s \ d_X \ Y_s \ d_Y \ Z_s]^T$  为传感器坐标系下的转子位置,  $X_s$ 、 $Y_s$  和  $Z_s$  分别为  $X$  向、 $Y$  向和  $Z$  向传感器坐标系下的转子位移;  $\text{control}$  为磁轴承控制器。考虑质心与球心间的偏差  $\xi$ , 将广义力  $\mathbf{F}$  用磁轴承坐标轴承力  $\mathbf{f}_e$  表示为

$$\begin{cases} f_X = f_{eX}, \\ p_Y = f_{eX} \xi_Z + 2f_{iX} r_1 - f_{eZ} \xi_X, \\ f_Y = f_{eY}, \text{ 即 } \mathbf{F} = \mathbf{T}_f \mathbf{f}_e, \\ p_X = -f_{eY} \xi_Z + 2f_{iY} r_1 + f_{eZ} \xi_Y, \\ f_Z = f_{eZ}, \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $\xi_X$ 、 $\xi_Y$  和  $\xi_Z$  分别为偏差  $\xi$  在  $X$  向、 $Y$  向与  $Z$  向上的分量;  $\mathbf{T}_f$  为磁轴承坐标轴承力  $\mathbf{f}_e$  与广义力  $\mathbf{F}$  之间的坐标变换矩阵, 具体表达式为

$$\mathbf{T}_f = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \xi_Z & 2r_1 & 0 & 0 & -\xi_X \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \xi_Z & -2r_1 & -\xi_Y \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

轴承坐标转子位置  $\mathbf{q}_m$  可表示为

$$\begin{cases} X_m = X + \xi_X, \\ d_X = 2r_1 \beta, \\ Y_m = Y + \xi_Y, \text{ 即 } \mathbf{q}_m = \mathbf{T}_m (\mathbf{q} + \xi), \\ d_Y = -2r_1 \alpha, \\ Z_m = Z + \xi_Z, \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $\xi = [\xi_X \ 0 \ \xi_Y \ 0 \ \xi_Z]^T$ ;  $\mathbf{T}_m$  为质心坐标系与磁轴承坐标系间的坐标变换矩阵, 具体表达式为

$$\mathbf{T}_m = \text{diag}(1 \ 2r_1 \ 1 \ 2r_1 \ 1). \quad (7)$$

传感器坐标转子位置  $\mathbf{q}_s$  可表示为

$$\begin{cases} X_s = X + \delta_x, \\ d_x = 2r_s \beta, \\ Y_s = Y + \delta_y, \text{ 即 } \mathbf{q}_s = \mathbf{T}_s(\mathbf{q} + \boldsymbol{\delta}), \\ d_y = -2r_s \alpha, \\ Z_s = Z + \delta_z, \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $\boldsymbol{\delta} = [\delta_x \ 0 \ \delta_y \ 0 \ \delta_z]^T$ ;  $\mathbf{T}_s = \mathbf{T}_m$  为质心坐标系与传感器坐标系间的坐标变换矩阵。将(2)式~(8)式代入(1)式中, 可将磁轴承控制的输出量表示为

$$\text{control}(\mathbf{q} + \boldsymbol{\delta}) = \begin{bmatrix} \frac{K_m X + K_m \xi_x - m \ddot{X}}{K_i} \\ \frac{K_m \beta}{K_i} - \frac{J_y \ddot{\beta} - J_z \Omega \dot{\alpha} - m \ddot{X} \xi_z + m \ddot{Z} \xi_x}{4r_s r_1 K_i} \\ \frac{K_m Y + K_m \xi_y - m \ddot{Y}}{K_i} \\ -\frac{K_m \alpha}{K_i} - \frac{J_x \ddot{\alpha} + J_z \Omega \dot{\beta} - m \ddot{Z} \xi_y + m \ddot{Y} \xi_z}{4r_s r_1 K_i} \\ \frac{K_m Z + K_m \xi_z - m \ddot{Z}}{K_i} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

由(8)式、(9)式可知: 当转子质心与检测中心不重合时, 会引入传感器误差; 当转子质心与球心不重合时, 会导致转子平动控制与偏转控制的耦合, 增加了控制器的设计难度, 也给后续调试带来困难。若将三者重合, 即  $\boldsymbol{\xi} = \boldsymbol{\delta} = 0$ , 则(9)式可简化为

$$\text{control}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} \frac{K_m X - m \ddot{X}}{K_i} \\ \frac{K_m \beta}{K_i} - \frac{J_y \ddot{\beta} - J_z \Omega \dot{\alpha}}{4r_s r_1 K_i} \\ \frac{K_m Y - m \ddot{Y}}{K_i} \\ -\frac{K_m \alpha}{K_i} - \frac{J_x \ddot{\alpha} + J_z \Omega \dot{\beta}}{4r_s r_1 K_i} \\ \frac{K_m Z - m \ddot{Z}}{K_i} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

从(10)式可知: 第1项、第3项、第5项只含  $X$ 、 $Y$  或  $Z$ , 不含  $\alpha$  和  $\beta$ , 该控制器只控制平动; 第2项、第4项只含  $\alpha$  和  $\beta$ , 不含  $X$ 、 $Y$  和  $Z$ , 该控制器只控制偏转, 即控制器实现了平动与偏转控制的解耦, 提高了转子悬浮精度, 降低了调试难度。所以基于转子质心、球心和检测中心重合的优化具有现实意义。

### 3 转子优化设计

#### 3.1 灵敏度分析

为了提高优化效果, 避免错选结构参数, 优化前对结构参数进行灵敏度分析。由文献[16-22]可知, 转子性能包括最高转速下的最大等效应力  $\sigma_{\max}$ 、1阶共振频率  $\omega_{\text{fl}}$ 、极地与赤道转动惯量比  $\varepsilon$  和极转动惯量  $J_d$ 。为避免转子变形量过大, 引起磁间隙和悬浮力的改变, 产生干扰力矩, 须考虑转子最大变形  $d_{\max}$ 。基于前文分析, 还应考虑转子质心、球心和检测中心间的偏差。检测中心由传感器(属于定子)安装精度决定, 转子部分只需考虑其质心与球心的偏差  $|\boldsymbol{\xi}|$ 。设计变量  $\mathbf{X}_s$  和约束变量  $\mathbf{D}$  的向量形式如下:

$$\begin{cases} \mathbf{X}_s = [h_1 \ h_2 \ h_3 \ r_1 \ r_2 \ r_3 \ sr_1 \ sr_2], \\ \mathbf{D} = [\sigma_{\max} \ \omega_{\text{fl}} \ \varepsilon \ J_d \ d_{\max} \ |\boldsymbol{\xi}|]. \end{cases} \quad (11)$$

利用有限元法计算结构参数对约束变量的灵敏度, 结果如表2所示。由表2可看出, 只有结构参数  $h_3$  对所有约束变量灵敏度较小, 优化时不予考虑。

#### 3.2 优化模型

基于前文灵敏度分析结果, 优化设计变量  $\mathbf{X}_0$  写成向量形式如下:

$$\mathbf{X}_0 = [h_1 \ h_2 \ r_1 \ r_2 \ r_3 \ sr_1 \ sr_2]. \quad (12)$$

根据工程经验和本文所研究磁悬浮微框架球形飞轮结构的特点, 将可行域限定如下:

$$\begin{cases} 18 \text{ mm} \leq h_1 \leq 24 \text{ mm}, \\ 18 \text{ mm} \leq h_2 \leq 23 \text{ mm}, \\ 28 \text{ mm} \leq r_1 \leq 33 \text{ mm}, \\ 41 \text{ mm} \leq r_2 \leq 46 \text{ mm}, \\ 47 \text{ mm} \leq r_3 \leq 54 \text{ mm}, \\ 76 \text{ mm} \leq sr_1 \leq 79 \text{ mm}, \\ 37 \text{ mm} \leq sr_2 \leq 45 \text{ mm}. \end{cases} \quad (13)$$

最高转速下, 转子因自身离心力引起的最大等效应力小于转子材料 FeCr15 屈服应力  $\sigma_s$  (430 MPa) 的一半, 即  $\sigma_{\max} \leq \sigma_s/2$ 。为降低转子变形对径向磁间隙的影响, 提高径向悬浮力精度, 要求转子最大变形  $d_{\max}$  小于径向磁间隙 (350  $\mu\text{m}$ ) 的 1/20, 即  $d_{\max} \leq 17.5 \mu\text{m}$ 。飞轮额定角动量为 15  $\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$ , 额定转速 9 000  $\text{r}/\text{min}$ , 对应的极转动惯量  $J_d$  为 0.015 9  $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ , 即  $J_d = 0.015 9 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 。为利于抑制陀螺效应, 极地与赤道转动惯量比  $\varepsilon$  应为 1.4~2.0 之间<sup>[16-18, 21-22]</sup>。为避免最高转速 (10 000  $\text{r}/\text{min}$ , 对

表 2 结构参数对约束变量灵敏度

Tab.2 Sensitivity of constraints to structural parameters

参数	$\sigma_{\max}$	$\omega_{\text{fl}}$	$\varepsilon$	$J_d$	$d_{\max}$	$ \xi $
$h_1$	$-3.69 \times 10^{-7}$	$5.34 \times 10^{-3}$	$-5.16 \times 10^{-4}$	$6.86 \times 10^{-4}$	$1.16 \times 10^{-5}$	$6.00 \times 10^{-1}$
$h_2$	$2.04 \times 10^{-3}$	$2.45 \times 10^{-3}$	$-9.12 \times 10^{-4}$	$6.66 \times 10^{-3}$	$3.47 \times 10^{-4}$	1.96
$h_3$	$2.42 \times 10^{-5}$	$8.56 \times 10^{-4}$	$-5.47 \times 10^{-4}$	$2.37 \times 10^{-4}$	$4.39 \times 10^{-5}$	$-1.21 \times 10^{-3}$
$r_1$	$9.64 \times 10^{-3}$	$-2.67 \times 10^{-3}$	$-6.06 \times 10^{-4}$	$-1.55 \times 10^{-3}$	$-9.59 \times 10^{-4}$	$-6.41 \times 10^{-1}$
$r_2$	$3.13 \times 10^{-3}$	$-1.26 \times 10^{-2}$	$6.59 \times 10^{-4}$	$-6.92 \times 10^{-3}$	$-4.63 \times 10^{-3}$	2.24
$r_3$	$1.34 \times 10^{-1}$	$-6.00 \times 10^{-2}$	$-3.64 \times 10^{-3}$	$-2.89 \times 10^{-2}$	$1.22 \times 10^{-1}$	$-4.19 \times 10^{-1}$
$sr_1$	$1.12 \times 10^{-1}$	$7.26 \times 10^{-2}$	$2.23 \times 10^{-2}$	$2.79 \times 10^{-1}$	$9.44 \times 10^{-2}$	$-1.13 \times 10^{-1}$
$sr_2$	$-2.06 \times 10^{-7}$	$2.93 \times 10^{-6}$	$-1.01 \times 10^{-2}$	$9.02 \times 10^{-3}$	$-2.65 \times 10^{-7}$	$-9.79 \times 10^{-2}$

应的转频 167 Hz) 下转子共振, 要求转子 1 阶共振频率  $\omega_{\text{fl}}$  大于转子转频的 2 倍<sup>[22]</sup>, 即  $\omega_{\text{fl}} \geq 334$  Hz. 此外, 当转子质心与球心重合时, 可消除平动悬浮对径向偏转控制的干扰, 有利于系统高精度控制, 要求飞轮转子质心和球心偏差  $|\xi| = 0$ . 综上所述, 约束域数学表述如下:

$$\begin{cases} \sigma_{\max} \leq \sigma_s/2 = 215 \text{ MPa}, \\ \omega_{\text{fl}} \geq 334 \text{ Hz}, \\ 1.4 \leq \varepsilon \leq 2.0, \\ J_d = 0.0159 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, \\ d_{\max} \leq 17.5 \text{ } \mu\text{m}, \\ |\xi| = 0. \end{cases} \quad (14)$$

转子质量越大, 发射成本越高, 要求以转子质量  $m$  最小为优化目标, 即

$$m = \min f(h_1, h_2, r_1, r_2, r_3, sr_1, sr_2). \quad (15)$$

### 3.3 优化方法与优化结果

如图 2 所示, 若增大转盘外球面半径  $sr_2$  能够增大极转动惯量  $J_d$ , 但会增大转子质量  $m$  和磁轴承功耗. 若减小电机下端转盘厚度  $h_1$  和球心至转盘下端高度  $h_2$ , 同时增大转盘上端内孔半径  $r_2$  能降低转子质量  $m$ , 但又导致最大等效力  $\sigma_{\max}$  和最大变形量  $d_{\max}$  变大, 降低系统结构稳定性. 此外, 单一设计变量变化还会导致质心与球心偏差  $\xi$  增大, 产生干扰力矩, 增加控制系统复杂性. 因此应综合考虑各设计变量和约束条件, 对转子进行多学科协同优化.

本文在现有转子优化设计方法<sup>[16-22]</sup>的基础上, 考虑转子系统质心和球心之间的偏差, 对其进行了多学科优化, 优化流程如图 4 所示. 基于图 4 所示的优化模型, 利用多学科优化设计软件 iSIGHT 集成有限元分析软件 ANSYS 对飞轮转子进行了优化.

转子优化前的应变云图如图 5 所示, 目标函数  $m$  的变化曲线如图 6 所示.

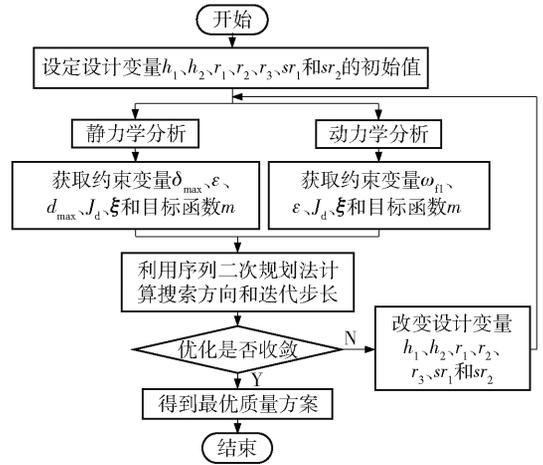


图 4 飞轮转子优化流程

Fig.4 Optimization flow chart of flywheel rotor

从图 6 可看出, 目标函数  $m$  经过 9 次迭代后, 变化趋于平缓, 并在第 33 步收敛, 得到最优方案. 最终转子极转动惯量由  $0.0157 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$  提高至  $0.0159 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ , 其质量由最初的  $5.60 \text{ kg}$  降至  $5.389 \text{ kg}$ , 质心与球心之间的偏差由  $74.5 \text{ } \mu\text{m}$  降为  $13.9 \text{ } \mu\text{m}$ . 利用有限元软件对最优方案进行静力学和动力学分析, 结果如图 7 和图 8 所示. 由图 7(a) 可知, 转子在最高转速  $10000 \text{ r/min}$  下的最大等效力  $\sigma_{\max}$  为  $45.9 \text{ MPa}$ , 远小于转盘材料 FeCr15 屈服应力  $\sigma_s$  ( $430 \text{ MPa}$ ) 的一半. 从图 7(b) 可看出, 转子最大变形  $d_{\max}$  由  $15.94 \text{ } \mu\text{m}$  降为  $14.77 \text{ } \mu\text{m}$ , 小于径向磁间隙 ( $350 \text{ } \mu\text{m}$ ) 的  $1/20$ . 自由状态下转子 1 阶共振频率由优化前的  $2831 \text{ Hz}$  提高至  $2932 \text{ Hz}$  (见图 8), 远高于转子最高转频  $167 \text{ Hz}$ . 优化前后设计变量、约束变量和目标函数的对比如表 3 所示.

NCDAL SOLUTION  
 SIEP=1  
 SUB=1  
 TIME=1  
 USUM  
 RSYS=0  
 DMX=0.159×10<sup>-4</sup>  
 SMN=0.438×10<sup>-6</sup>  
 SMX=0.159×10<sup>-4</sup>

MAY 30 2017  
 21:58:59  
 PLOT No.1

STEP=1  
 SUB=1  
 TIME=1  
 SEQV (AVG)  
 RSYS=0  
 DMX=0.148×10<sup>-4</sup>  
 SMN=87 348.9  
 SMX=0.459×10<sup>8</sup>

MAY 21 2017  
 18:35:44  
 PLOT NO.1

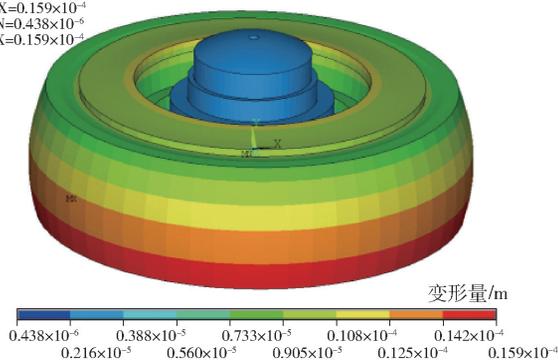


图 5 优化前应变云图

Fig. 5 Strain nephogram before optimization

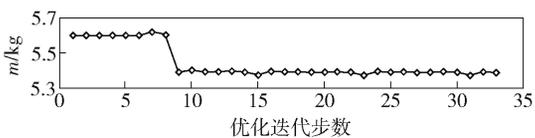


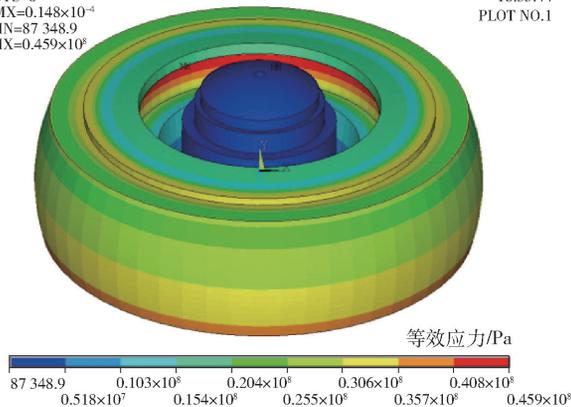
图 6 目标函数  $m$  的优化过程曲线

Fig. 6 Optimization curves of objective function  $m$

表 3 优化设计结果

Tab. 3 Optimal design results

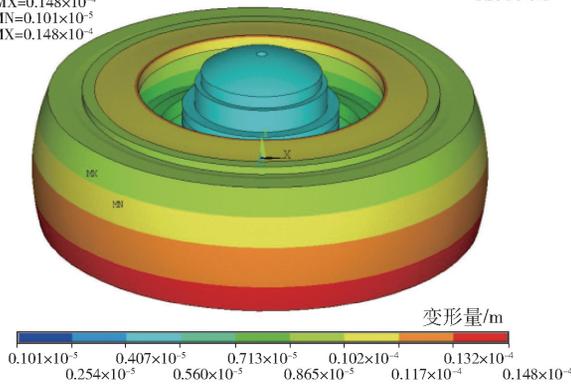
变量	优化前	优化后
$h_1$ /mm	22.5	19.0
$h_2$ /mm	21.5	19.0
$r_1$ /mm	31	29
$r_2$ /mm	42.4	44.0
$r_3$ /mm	49.7	48.0
$sr_1$ /mm	77.70	77.92
$sr_2$ /mm	43.5	39.0
$J_d$ /(kg·m <sup>2</sup> )	0.015 7	0.015 9
$\varepsilon$	1.695	1.738
$\sigma_{max}$ /MPa	44.2	45.9
$d_{max}$ /μm	15.94	14.77
$\omega_n$ /kHz	2831	2932
$\xi$ /μm	74.5	13.9
$m$ /kg	5.600	5.389



(a) 应力云图  
 (a) Stress nephogram

STEP=1  
 SUB=1  
 TIME=1  
 USUM (AVG)  
 RSYS=0  
 DMX=0.148×10<sup>-4</sup>  
 SMN=0.101×10<sup>-5</sup>  
 SMX=0.148×10<sup>-4</sup>

MAY 21 2017  
 18:34:51  
 PLOT NO.1



(b) 应变云图  
 (b) Strain nephogram

图 7 最优方案静力学分析

Fig. 7 Statics analysis of optimal scheme

STEP=1  
 SUB=1  
 FREQ=2 932.46  
 USUM (AVG)  
 RSYS=0  
 DMX=1.381 63  
 SMN=0.453×10<sup>-5</sup>  
 SMX=1.381 63

MAY 21 2017  
 18:32:50  
 PLOT NO. 1

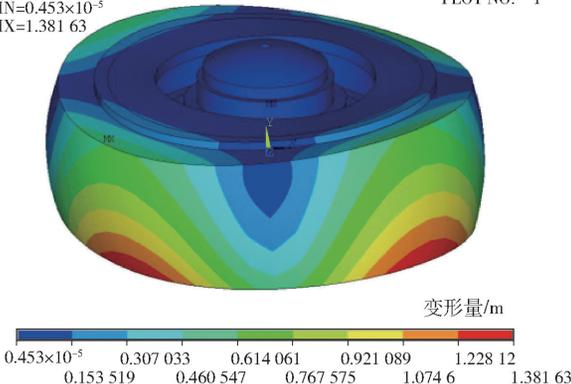


图 8 最优方案 1 阶模态

Fig. 8 First-order model of optimal scheme

### 4 实验验证

根据优化结果加工的球形转子及磁悬浮微框架球形飞轮如图 9 所示。为便于转子 3 个球面磁极的精密制造,将转子分为转轴和转盘两体结构,并采用网格研磨工艺实现 3 个球面的镜面加工,表面粗糙

度不低于  $0.1 \mu\text{m}$ , 球度为  $3/1\ 000 \text{ mm}$ , 尺寸精度为  $\pm 0.01 \text{ mm}$ . 转轴上两对称球面磁极的一致性和转轴与转盘上球面磁极的球心与中心转轴的偏差依靠精密加工保证. 通过调整调心环厚度, 实现两对称球面的球心与转盘外球面的球心完全重合. 利用在线动平衡实验测得转子两端不平衡量大小, 将所需的平衡顶丝拧入配重顶丝孔内, 实现转子质心与 3 个球面球心的重合.

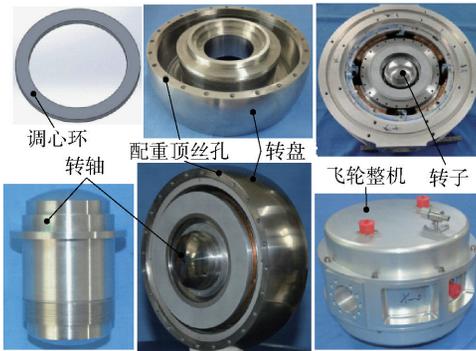


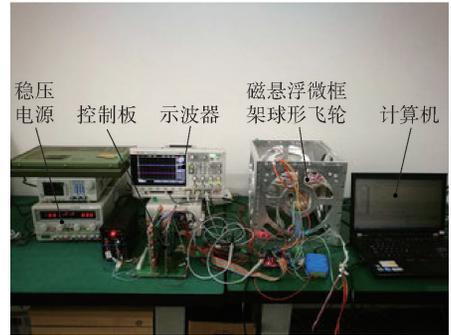
图 9 飞轮系统及其球形转子

Fig. 9 Flywheel system and spherical rotor

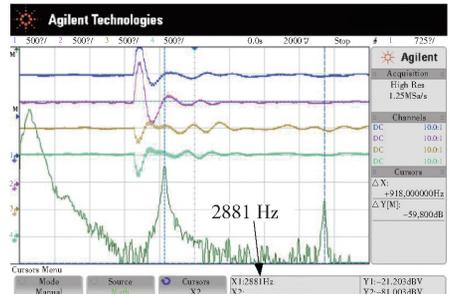
为了检验优化结果和优化方法的正确性, 对自由状态下的球形飞轮转子进行 1 阶模态测试实验, 实验测试系统如图 10(a) 所示. 模态测试过程中, 采用径向与轴向球面磁轴承和洛伦兹力磁轴承将转子稳定悬浮, 对径向与轴向球面磁轴承添加同频电流进行扫频测试, 利用示波器监测转子位移变化量. 当扫频频率与 1 阶模态重合发生共振时, 传感器信号会有明显波纹, 实验结果如图 10(b) 所示. 实测转子 1 阶模态为  $2\ 881 \text{ Hz}$ , 优化结果为  $2\ 932 \text{ Hz}$ , 相差  $51 \text{ Hz}$ , 误差为  $1.8\%$ . 因建模优化过程中未考虑转盘两端配重螺钉孔、零部件的安装工艺孔、结构倒角以及加工误差等对转子性能的影响, 造成理论设计结果与实测值之间有一定的差异性.

## 5 结论

本文提出了一种内转子结构磁阻力-洛伦兹力混合力构型的磁悬浮微框架球形飞轮, 介绍了其结构和工作原理. 建立了转子动力学模型, 分析了球形转子质心、球面磁极球心和检测中心三者间的偏差对飞轮系统控制精度的影响, 得出当三者重合时, 可消除平动悬浮对偏转控制的干扰. 通过计算结构参数对约束变量的灵敏度, 选择高灵敏度结构参数作为优化设计变量. 在此基础上, 考虑球形转子质心与球心的偏差, 对转子进行了多学科优化设计. 转



(a) 实验系统  
(a) Experimental system



(b) 自由状态下的频谱特性  
(b) Spectral characteristics in free state

图 10 飞轮系统实验结果

Fig. 10 Experimental results of flywheel system

子极转动惯量由  $0.015\ 7 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$  提高到  $0.015\ 9 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$  的同时, 转子质量由  $5.600 \text{ kg}$  降至  $5.389 \text{ kg}$ , 降幅为  $3.8\%$ .

## 参考文献 (References)

- [1] 王有懿, 汤亮, 何英姿. 一种超静平台主动指向容错控制方法[J]. 宇航学报, 2016, 37(12): 1331-1339.  
WANG You-yi, TANG Liang, HE Ying-zi. Fault-tolerant control method for active pointing of ultra quiet platform[J]. Journal of Astronautics, 2016, 37(12): 1331-1339. (in Chinese)
- [2] Zhang Y, Li M, Song Z Y, et al. Design and analysis of a moment control unit for agile satellite with high attitude stability requirement[J]. Acta Astronautica, 2016, 122: 90-105.
- [3] 袁惠群, 李莹, 李东, 等. 磁悬浮轴承弹性转子非线性系统的建模与控制[J]. 兵工学报, 2011, 32(2): 247-251.  
YUAN Hui-qun, LI Ying, LI Dong, et al. The nonlinear model and control of magnetic suspension bearing flexible rotor[J]. Acta Armamentarii, 2011, 32(2): 247-251. (in Chinese)
- [4] 王平, 王华, 任元. 基于磁悬浮控制力矩陀螺的航天器姿态角速率测量方法[J]. 兵工学报, 2015, 36(10): 1907-1915.  
WANG Ping, WANG Hua, REN Yuan. Measurement method of spacecraft attitude angular rate based on magnetically suspended control moment gyroscope [J]. Acta Armamentarii, 2015, 36(10): 1907-1915. (in Chinese)
- [5] Tang J Q, Xiang B, Wang C E. Rotor's suspension for vernier-gimballing magnetically suspended flywheel with conical magnetic

- bearing[J]. *ISA Transactions*, 2015, 58: 509–519.
- [6] Peng C, Fan Y H, Huang Z Y, et al. Frequency-varying synchronous micro-vibration suppression for a MSFW with application of small-gain theorem[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, 82: 432–447.
- [7] 邓瑞清, 赵岩, 房建成, 等. 磁悬浮飞轮与机械飞轮干扰特性的对比分析[J]. *宇航学报*, 2016, 37(8): 917–923.  
DENG Rui-qing, ZHAO Yan, FANG Jian-cheng, et al. Disturbance characteristics analysis of magnetically suspended and mechanical flywheels[J]. *Journal of Astronautics*, 2016, 37(8): 917–923. (in Chinese)
- [8] Yabu-Uchi K, Inoue M, Akishita S, et al. A compact magnetic bearing for gimballed momentum wheel[C]//*Proceedings of the 17th Aerospace Mechanisms Symposium*. Pasadena, CA, US: NASA, 1983: 333–342.
- [9] Seddon J, Pechev A. 3D wheel-a single actuator providing 3-axis control of satellites [J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2012, 49(3): 553–556.
- [10] Chassoulier D, Chillet C, Delamare J, et al. Ball joint type magnetic bearing for tilting body: US, 6351049[P]. 1988-02-26.
- [11] Gerlach B, Ehinger M, Raue H K, et al. Gimbaling magnetic bearing reaction wheel with digital controller[C]//*Proceedings of the 6th International ESA Conference on Guidance, Navigation and Control Systems*. Loutraki, Greece: ESA, 2005: 293–299.
- [12] 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 Bin, FANG Jian-cheng, LIU Gang. Design of a magnetically suspended gyrowheel and analysis of key technologies[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2011, 32(8): 1478–1487. (in Chinese)
- [13] Oglevie R E, Eisenhaure D B. Advanced integrated power and attitude control system (IPACS) study, NASA Contractor Report 3912[R]. Washington, DC, US: NASA, 1985.
- [14] Li J Y, Xiao K, Liu K, et al. Mathematical model of a vernier gimbaling momentum wheel supported by magnetic bearings[C]//*13th International Symposium on Magnetic Bearings*. Arlington, VA, US: UVA, 2012.
- [15] Xiang B, Tang J Q. Suspension and titling of vernier-gimbaling magnetically suspended flywheel with conical magnetic bearing and Lorentz magnetic bearing [J]. *Mechatronics*, 2015, 28: 46–54.
- [16] 韩邦成, 虎刚, 房建成, 等. 50 N·m·s 磁悬浮反作用飞轮转子优化设计方法的研究[J]. *宇航学报*, 2006, 27(3): 536–540.  
HAN Bang-cheng, HU Gang, FANG Jian-cheng, et al. Optimization design of magnetic bearing reaction wheel rotor[J]. *Journal of Astronautics*, 2006, 27(3): 536–540. (in Chinese)
- [17] 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*, 2006, 14(4): 662–666.  
HAN Bang-cheng, HU Gang, FANG Jian-cheng. Optimization design of magnetic suspended gyroscope rotor[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, 14(4): 662–666. (in Chinese)
- [18] 叶全红, 李红, 韩邦成. 基于 iSIGHT 的磁悬浮反作用飞轮优化设计[J]. *宇航学报*, 2007, 28(6): 1619–1623.  
YE Quan-hong, LI Hong, HAN Bang-cheng. Optimization design of magnetic bearing reaction wheel rotor using iSIGHT software[J]. *Journal of Astronautics*, 2007, 28(6): 1619–1623. (in Chinese)
- [19] 韩邦成, 袁倩. 大型磁悬浮 CMG 转子的组合优化策略[J]. *宇航学报*, 2012, 33(2): 275–280.  
HAN Bang-cheng, YUAN Qian. The combinatorial optimization strategy for large-sized magnetic suspension rotor in CMG system [J]. *Journal of Astronautics*, 2012, 33(2): 275–280. (in Chinese)
- [20] 汤继强, 张永斌, 赵丽滨. 过盈装配的金属轮毂-复合材料飞轮转子[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(10): 2639–2647.  
TANG Ji-qiang, ZHANG Yong-bin, ZHAO Li-bin. Interference fitted metal-composite material flywheel rotor [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(10): 2639–2647. (in Chinese)
- [21] 汤继强, 韩雪飞, 刘强. 微框架效应磁悬浮飞轮转子轮缘优化设计[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(9): 1991–1998.  
TANG Ji-qiang, HAN Xue-fei, LIU Qiang. Optimal design of rotor for magnetically suspended flywheel with vernier gimbaling capacity[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(9): 1991–1998. (in Chinese)
- [22] 刘强, 武登云, 韩邦成, 等. 磁悬浮飞轮优化设计与实验[J]. *宇航学报*, 2015, 36(11): 1324–1331.  
LIU Qiang, WU Deng-yun, HAN Bang-cheng, et al. Optimization design and experiment of magnetic suspension flywheel[J]. *Journal of Astronautics*, 2015, 36(11): 1324–1331. (in Chinese)