

文章编号 1004-924X(2014)02-0331-07

# 小卫星用反作用飞轮系统设计

王 辉<sup>1,2</sup>, 武俊峰<sup>1</sup>, 李 胤<sup>1</sup>, 吴一辉<sup>1\*</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;  
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**考虑小卫星用反作用飞轮系统小型化的要求,提出了飞轮电机体积最小时的电枢尺寸确定方法,并设计了一种定子无铁芯式反作用飞轮系统。为防止磁路饱和,将多学科优化设计方法应用于飞轮转子结构和电机磁场联合设计中,并采用外罚函数法及序列二次规划算法(SQP)组合优化策略对飞轮系统进行多目标优化设计。选取飞轮转子质量最小和电机气隙磁通密度最大为优化目标,以最大等效应力、一阶共振频率、极转动惯量、磁饱和等作为约束条件,将 iSIGHT 软件作为优化平台,集成有限元软件 ANSYS 实现了优化过程,最后依据优化结果制造出飞轮样机。优化结果表明,优化后飞轮转子质量由 0.73 kg 减小到 0.67 kg,减小了 8.22%,气隙磁通密度由 0.376 T 增大到 0.401 T,增大了 6.65%。设计的优化方法提高了飞轮设计的合理性,推动了飞轮系统的小型化研究。

**关键词:**小卫星;反作用飞轮;电机;多学科优化设计;组合优化策略;有限元分析

**中图分类号:**V448.222 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142202.0331

## Design of reaction flywheel systems for small satellites

WANG Hui<sup>1,2</sup>, WU Jun-feng<sup>1</sup>, LI Yin<sup>1</sup>, WU Yi-hui<sup>1\*</sup>

(1. *State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

*2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

*\* Corresponding author, E-mail: yihuiwu@ciomp.ac.cn*

**Abstract:** According to the requirement of reaction flywheels in small satellites for small sizes, the design method for an armature size was proposed when the electrical motor was at a minimal volume, and a stator coreless reaction flywheel system was designed based on the method. To avoid the magnetic saturation, the multidisciplinary design optimization method was applied to the design of flywheel rotor and magnetic field of the motor. A optimization strategy combined with Exterior Penalty (EP) function and Sequential Quadratic Programming(SQP) was proposed to optimize the system as well. With optimization, the minimum mass and maximum air-gap magnetic flux density of the rotor were chosen as the objects, respectively, and the maximum equivalent stress, resonance frequency, the polar moment of inertia and the magnetic saturation were taken as constrains. Then, the software iSIGHT with finite element analysis (ANSYS) were integrated to achieve the optimization. Finally, a

收稿日期:2013-07-21;修订日期:2013-09-30.

基金项目:国家总装备部十二五预研资金资助项目(No. 61501020302);国家自然科学基金资助项目(No. 51205381)

flywheel prototype was designed based on the optimal results. The results indicate that the total mass of the flywheel rotor has been decreased from 0.73 kg to 0.67 kg (reduced by 8.22%) and the flux density has been increased from 0.376 T to 0.401 T (increased by 6.65%). The optimal design method can improve the rationality of flywheel design, and will promote the progress of the miniaturization investigation of flywheel systems.

**Key words:** small satellite; reaction flywheel; motor; multidisciplinary design; combinatorial optimization strategy; Finite Element Analysis (FEA)

## 1 引言

反作用飞轮利用自身角动量大小的变化对飞行器载体的姿态加以控制,具有可靠性好、控制精度高和功耗低等优点,已被广泛应用于卫星姿态控制之中<sup>[1-3]</sup>。永磁无刷直流电机作为反作用飞轮的驱动装置,其电枢尺寸直接影响反作用飞轮的机械尺寸和结构方式。基于传统经验公式的电枢尺寸确定方法,在工程实际应用中往往受到经验参数多、计算繁琐等的束缚<sup>[4-6]</sup>。为了提高设计方法的实用性,文献[5]提出了满足电机机械特性的目标设计法,从满足电机性能要求出发,简化了设计过程,文献[6]应用该设计思想推导了飞轮驱动电机径长比极值的确定方法,对于研究大径长比飞轮电机具有一定的指导意义。小卫星用反作用飞轮在满足姿控要求的前提下需要更小的体积,按文献[6]中的方法来选取径长比,则参数选取任意性较大,所以有必要继续深入研究满足飞轮系统小型化特殊要求的驱动电机结构方案和电枢尺寸的计算方法。

反作用飞轮作为卫星姿控单元的直接执行部件,其质量和力学特性直接影响系统的整体性能(如系统的功耗、振动情况及可靠性等)。此外,基于飞轮系统轻量化的需要,也必须对反作用飞轮系统结构进行优化。主要途径是应用有限元法,从静力学和动力学的角度对飞轮组件和转子进行研究<sup>[7-12]</sup>。文献[7]基于有限元分析对飞轮锁紧装置进行了优化,文献[8-10]以 iSIGHT 软件为优化平台对磁悬浮飞轮转子机械结构进行了优化设计,文献[11-12]则对飞轮的形状作了优化研究。以上研究成果对于大角动量飞轮系统设计具有重要指导意义,但却忽略了机械结构的改变对驱动电机磁路特性的影响。特别是小卫星用反作用飞轮需提供的角动量小,轮缘直接驱动已代替

了传统的轮毂驱动形式,飞轮转子作为电机磁路的一部分,改变其机械尺寸容易引起磁路饱和,限制了气隙磁通密度的增加,造成永磁材料的利用率偏低,驱动电流偏大等弊端<sup>[5,13]</sup>。因此,为提高飞轮系统设计的合理性,对飞轮系统进行静力学、动力学和电磁学的协同优化设计具有重要的研究意义。

本文首先从满足小卫星用反作用飞轮小型化的要求出发,在保证额定机械效率最大的前提下,推导了基于最小体积的飞轮电机电枢尺寸的确定方法,并在此基础上设计了一种定子无铁芯式反作用飞轮系统,为避免电机磁路饱和,将多学科优化设计方法应用于飞轮转子结构和电机磁场联合设计中,利用多学科优化设计软件 iSIGHT 集成有限元分析软件 ANSYS,采用外罚函数法(Exterior Penalty)及序列二次规划算法(Sequential Quadratic Programming, SQP)优化组合策略,以飞轮转子质量最小和电机气隙磁通密度最大为优化目标,在满足强度、刚度、极转动惯量、磁饱和等多学科约束条件下对飞轮系统进行了优化,最后依据优化结果制造出用于实验研究的飞轮样机,证明了优化方法的实用性。

## 2 驱动电机及飞轮系统设计

### 2.1 基于最小体积的驱动电机电枢尺寸确定

由电机理论可知,电机的机械特性曲线可由额定转矩  $T_N$  和计算堵转转矩  $T_D$  两点决定,忽略控制电路压降,则  $T_D$  可表示为:

$$T_D = UK_T / R, \quad (1)$$

式中:  $T_D$  为计算堵转转矩,  $U$  为电机的电枢端电压,  $K_T$  为力矩系数,  $R$  为绕组电阻。

电机的电磁效率和机械效率可分别表示为:

$$\eta_{em} = \frac{E}{U} = \frac{U - IR}{U} = 1 - \frac{T_L + T_i}{K_T U} R, \quad (2)$$

$$\eta_m = \frac{E(I - I_0)}{UI} = \frac{E}{U} \left(1 - \frac{T_f/K_T}{(T_L + T_f)/K_T}\right) = \frac{T_L}{T_L + T_f} \eta_{em}, \quad (3)$$

式中: $\eta_{em}$ 为电磁效率, $\eta_m$ 为电机的机械效率, $I$ 为电枢电流, $I_0$ 为空载电流, $T_L$ 为输出力矩, $E$ 为反电动势, $T_f$ 为摩擦转矩。

式(3)对力矩  $T_L$  求导并结合式(1)、(2)可得电机取得最大机械效率时  $T_D$  为:

$$T_D = (T_L + T_f)^2 / T_f, \quad (4)$$

此时最大机械效率  $\eta_{max}$  为:

$$\eta_{max} = (1 - \sqrt{T_D T_f})^2. \quad (5)$$

由文献[6]知,当电机采用“两相通星型三相六状态”方波驱动时,满足电机机械特性曲线的电枢尺寸关系式:

$$\frac{k_w}{D_a + \delta} + \frac{\pi/2p}{L_a} = \frac{B_a IU}{2\rho J T_D} = K, \quad (6)$$

式中: $D_a$ 为电枢直径, $L_a$ 为电枢长度, $\rho$ 为导线电阻率, $\delta$ 为电机气隙长度, $k_w$ 为表示导线实际轴向长度与电枢长度之比的系数, $p$ 为电机极对数, $B_a$ 为电机气隙磁通密度幅值, $J$ 为电枢电流密度, $K$ 为目标系数。为保证电机工作时达到最大额定效率,设计时  $U$ 、 $I$ 、 $T_L$  均取额定数据, $T_f$ 取额定转速时的摩擦转矩, $T_D$ 由式(4)确定,根据电机结构和设计要求预选参数  $B_a$ 、 $J$ ,则  $K$  为常数。

电机的体积可用  $\pi D_a^2 L_a / 4$  表示,由式(6)得:

$$\frac{1}{4} \pi D_a^2 L_a = \frac{\pi^2 D_a^3}{8\rho(KD_a - k_w)}, \quad (7)$$

式(7)对  $D_a$  求导并令其等于 0 可得电机体积最小时的电枢尺寸为:

$$D_a = \frac{3k_w}{2K}, L_a = \frac{3\pi}{2\rho K}. \quad (8)$$

上述各式表明,在保证驱动电机获得最大额定机械效率的前提下,可根据式(8)确定电机电枢尺寸,此时电机可获得最小体积,这对于小卫星用反作用飞轮小型化设计具有重要意义。

### 2.2 飞轮系统结构设计

根据驱动电机的电枢尺寸,可适当调整并初步确定飞轮转子的机械结构和尺寸,图2所示为飞轮系统机械结构装配图。

其中飞轮转子由飞轮本体、稀土永磁磁钢和内磁轭组成。驱动电机采用定子无铁芯式外转子结构,以提高飞轮系统的转动惯量/质量比。永磁

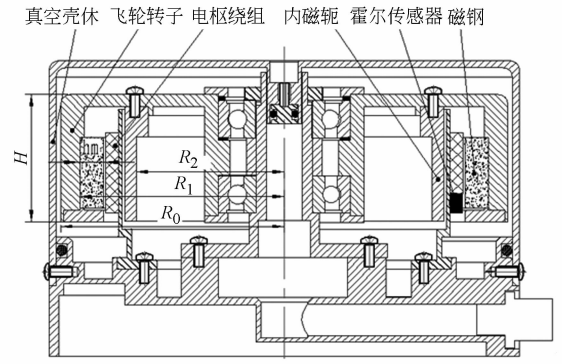


图1 飞轮系统机械结构装配图

Fig. 1 Structure diagram of flywheel system

磁钢采用剩磁密度高、温度系数小的钕钴永磁体。为降低电机涡流损耗并减小力矩波动,电机采用空心杯式无齿槽绕组结构,霍尔位置传感器安装于绕组之中,飞轮安装于密闭的真空壳体中,以保证系统的真空环境。

### 2.3 飞轮电机气隙磁场计算模型

对图1中的飞轮转子进行电磁场有限元分析,其径向和轴向磁场分布如图2所示。为了考虑径向和轴向磁场分布对气隙磁通密度的影响,采用等效气隙磁通密度法来计算气隙磁通密度<sup>[13]</sup>,以使分析结果更具合理性。

对不同半径和不同轴向高度处的气隙磁通密度分析,得径向和轴向计算极弧系数:

$$\alpha_{rad(axel)} = \frac{B_{rad(axel),\delta,ave}}{B_{rad(axel),\delta,max}}, \quad (9)$$

则等效气隙磁通密度可以表示为:

$$B_{eq,\delta} = B_{rad,\delta,max} \alpha_{rad} \alpha_{axel}, \quad (10)$$

式中: $B_{eq,\delta}$ 为等效气隙磁通密度; $B_{rad(axel),\delta,ave}$ 和  $B_{rad(axel),\delta,max}$ 分别为径向(轴向)气隙磁通密度平均值和幅值。

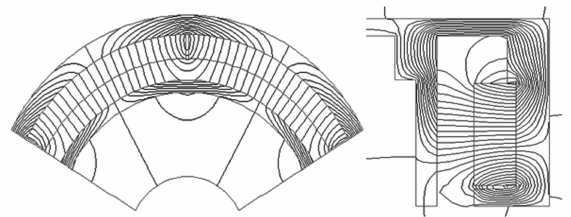


图2 飞轮径向与轴向气隙磁通线分布

Fig. 2 Radial and axial air-gap magnetic flux distributions of flywheel

### 3 飞轮系统优化

#### 3.1 优化模型的建立

(1) 优化变量: 选取飞轮转子外形尺寸和磁钢的厚度(如图 1)作为优化变量, 以控制飞轮的结构和形状:

$$x = (R_0, R_1, R_2, H, H_m), \quad (11)$$

(2) 目标函数: 为了减小飞轮系统的质量并增大电机的电磁效率, 选取飞轮转子质量最小和电机气隙磁通密度最大为优化目标, 数学描述为:

$$\begin{cases} X = \min[M(x)] \\ Y = \max[B_a(x)] \end{cases}, \quad (12)$$

式中:  $M(x)$ 、 $B_a(x)$  分别为飞轮转子的质量函数和气隙磁通密度函数。

(3) 边界条件: 依据飞轮系统的机械结构, 综合考虑飞轮的设计转速和转动惯量要求, 并结合工程实践经验, 确定其取值为:

$$\begin{cases} 45 \text{ mm} \leq R_0 \leq 50 \text{ mm} \\ 40 \text{ mm} \leq R_1 \leq 44 \text{ mm} \\ 28 \text{ mm} \leq R_2 \leq 32 \text{ mm} \\ 26 \text{ mm} \leq H \leq 28 \text{ mm} \\ 4 \text{ mm} \leq h_m \leq 5.5 \text{ mm} \end{cases} \quad (13)$$

(4) 中间变量的约束条件: 主要从强度、刚度、转动惯量、形状和电磁学性能角度对飞轮转子提出要求。要求飞轮强度安全系数在 2 以上, 则最高转速时飞轮的最大等效应力  $S_{\max} \leq \delta_{0.2}/2, \sigma_{0.2}$  为材料的屈服强度; 飞轮在最高工作转速 10 000 r/min 范围内必须为刚性转子, 其一阶共振频率  $\text{Freq} > 250 \text{ Hz}$  (最高转速的 1.5 倍); 要求飞轮转子转速为 5 000 r/min 时提供的角动量为 0.5 Nms, 则其极转动惯量  $J_p$  为  $9.549 \times 10^{-4} \text{ kgm}^2$ ; 飞轮转子形状设计为扁平, 其极惯性矩/赤道惯性矩之比  $J_p/J_e$  为 1.4~2<sup>[8]</sup>; 为了防止磁轭饱和时降低磁性材料的利用率, 要求磁轭磁通密度小于其饱和值的 90%, 即:  $B_{\text{steel}} < 0.9B_{\text{sat}}$ 。

设计中飞轮转子材料选用不锈钢 2Cr13, 其屈服强度为 440 MPa, 饱和磁通密度 1.4 T, 永磁体采用磁能积大、矫顽力可靠、耐高温的  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  型钕钴材料, 其最大磁能积为  $250 \text{ kJ/m}^3$ , 剩磁为 1.17 T。

综上所述, 约束条件的数学描述为:

$$\begin{cases} S_{\max} \leq [\sigma]/2 = 220 \text{ MPa} \\ J_p \geq 9.549 \times 10^{-4} \text{ kgm}^2 \\ 1.4 \leq J_p/J_e \leq 2 \\ \text{Freq} > 250 \text{ Hz} \\ B_{\text{steel}} < 0.9B_{\text{sat}} = 1.26 \text{ T} \end{cases}. \quad (14)$$

(5) 优化算法: 从结构设计角度考虑, 反作用飞轮系统优化是一个有约束的非线性数学规划问题, 采用 Exterior Penalty 算法和 NLPQL 算法组合优化。Exterior Penalty 算法将约束条件合并到目标函数中, 能够快速确定可行区域, 避免陷入局部优化, 是解决非线性规划问题的重要方法之一。NLPQL 算法由二次目标函数和线性约束函数建立数学规划, 可以在单峰的连续设计空间快速寻找到最优解, 稳定性较高。组合优化策略既保证了优化速度, 又确保了稳定性。

#### 3.2 优化设计流程

飞轮系统优化流程如图 3 所示。首先根据优化变量、目标函数、约束条件、优化算法, 以 iSIGHT 软件为平台集成有限元分析软件 ANSYS, 采用 APDL 语言在初步设计的基础上建立静力学、动力学和电磁场分析的参数化模型。其中静力学和动力学分析采用六面体 SOLID45 实体单元, 电磁场分析中采用空气圆柱体包围飞轮转子模型, 在空气圆柱外表面建立远场自然边界

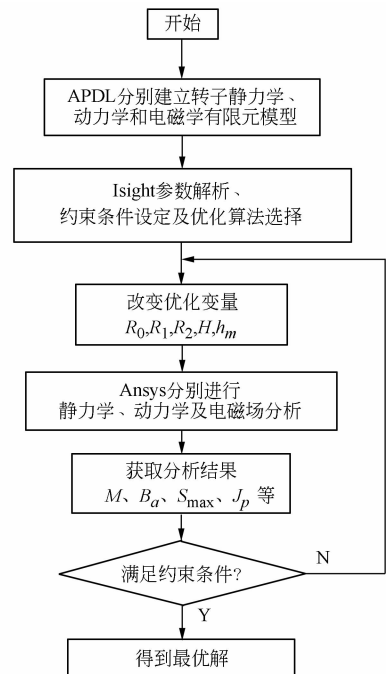


图 3 飞轮转子优化设计流程

Fig. 3 Optimal flow chart of flywheel rotor design

条件,使用六面体 SOLID96 实体单元并采用标量势法求解计算空间磁场分布。利用 Ansys 对上述参数化模型分别进行有限元分析,分析对比各次优化结果,最终获得优化变量的最优设计值。

### 4 优化结果分析

优化目标及约束条件的优化过程如图 4 和图 5 所示。优化前后飞轮转子的优化变量、目标函数及约束条件的结果对比如表 1 所示。

由表 1 可以看出,优化后飞轮转子质量由 0.73 kg 减小到 0.67 kg,减小了 8.22%,气隙磁通密度由 0.376 T 增大到 0.401 T,增大了 6.65%。

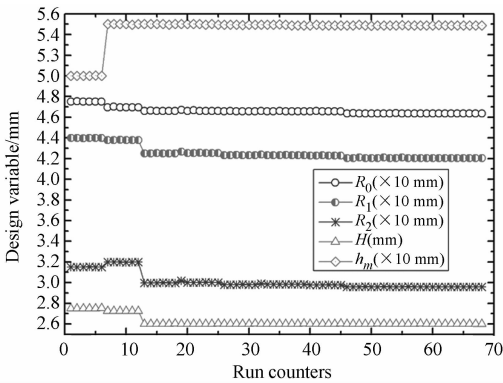


图 4 设计变量的优化过程曲线

Fig. 4 Optimal curves of design variables

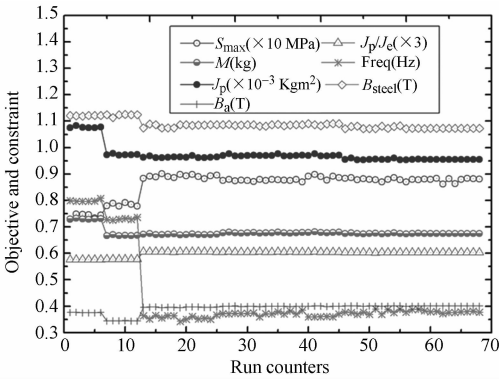


图 5 优化目标及约束条件优化过程曲线

Fig. 5 Optimal curves of optimization objective and constraints

表 1 飞轮转子优化设计结果

Tab.1 Optimal design results

参数	优化前	优化后
$R_0/mm$	47.50	46.35
$R_1/mm$	44.00	42.06
$R_2/mm$	31.50	29.59
$H/mm$	27.50	26.00
$h_m/mm$	5	5.49
$J_p/(kgm^2)$	0.001 08	0.000 955
$J_p/J_e$	1.73	1.81
$S_{max}/MPa$	7.28	8.81
$Freq/Hz$	798.97	366.23
$M/kg$	0.73	0.67
$B_{steel}/T$	1.07	1.22
$B_a/T$	0.376	0.401

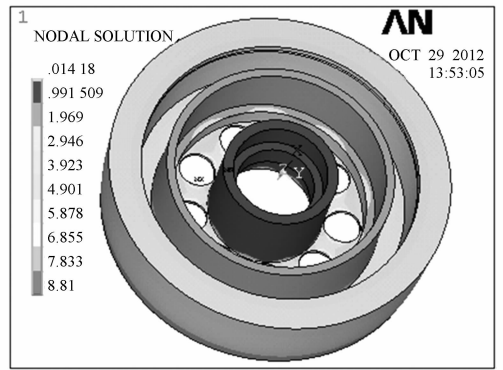


图 6 等效应力云图

Fig. 6 Nephogram of equivalent stress

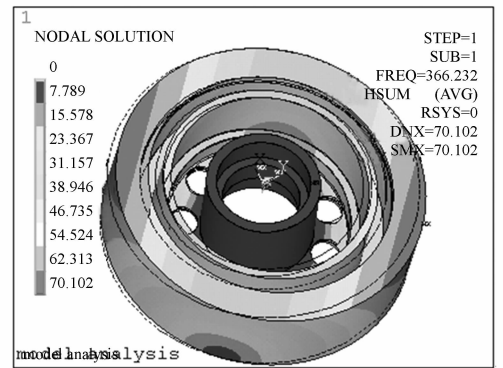


图 7 弹性一阶频率振型图

Fig. 7 Mode of elastic first order frequency

利用 ANSYS 对最优设计方案分别进行静力学、动力学和电磁学分析,得到飞轮转子的应力等效云图、一阶振型、磁通密度分别如图 6~8 所示。从图 6 可以看出转速为 5 000 r/min 时的最大等效应力为 8.81 MPa,远小于材料的许用应

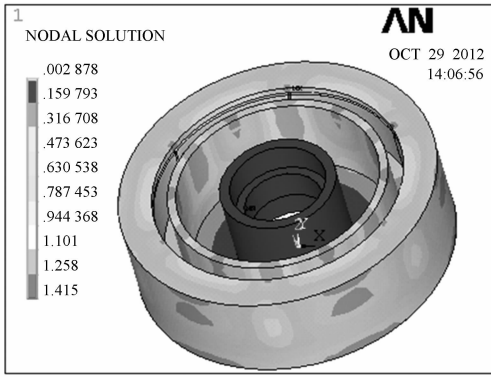


图 8 磁通密度云图

Fig. 8 Nephogram of flux density

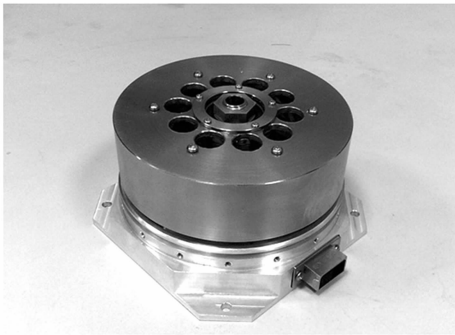


图 9 飞轮系统样机

Fig. 9 Prototype of flywheel system

力。图 7 的动力学结果表明,飞轮转子的一阶振型为径向摆动,一阶共振频率为 366.23 Hz。从图 8 磁通密度分布云图可以看出,最大磁通密度

#### 参考文献:

- [1] ISMAIL Z, VARATHARAJOO R. A study of reaction wheel configurations for a 3-axis satellite attitude control [J]. *Advances in Space Research*, 2010, 45(6): 750-759.
- [2] MOHAMMED S, BENYETTOU M, BENTOUTOU Y, et al.. Three-axis active control system for gravity gradient stabilized microsatellite [J]. *Acta Astronaut*, 2009, 64(8): 796-809.
- [3] 武俊峰, 吴一辉, 安静, 等. 姿控飞轮变结构变速积分控制的实现 [J]. *光学精密工程*, 2010, 18(1): 149-155.  
WU J F, WU Y H, AN J, et al.. Implementation of variable structure and speed-changed integration control for flywheels [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(1): 149-155. (in Chinese)
- [4] 唐任远. 现代永磁电机理论与设计 [M]. 北京: 机械

产生在极间漏磁处,转子内部磁通密度小于 1.258 T。图 9 为依据优化设计结果制造的已应用于实验研究的飞轮系统样机。

## 5 结 论

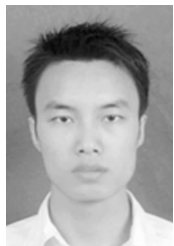
小卫星用反作用飞轮系统需要更小的体积和质量。为此,本文在保证额定机械效率最大的前提下,提出了一种满足飞轮电机体积最小时的电枢尺寸确定方法,着重给出了该方法的理论推导过程并建立了电枢尺寸的计算公式,在此基础上设计了一种定子无铁芯式反作用飞轮系统。为避免电机设计中的磁路饱和现象,将多学科优化设计方法应用于飞轮机械结构和电机电磁场联合设计中,以转子质量最小和电机气隙磁通密度最大为优化目标,在同时满足强度、一阶共振频率、转动惯量和磁饱和等多学科约束条件下,对飞轮转子进行多目标优化设计,并给出了整个优化设计的过程。优化结果表明,在满足各约束条件的前提下,优化后飞轮转子质量由 0.73 kg 减小到 0.67 kg,减小了 8.22%;气隙磁通密度由 0.376 T 增大到 0.401 T,增大了 6.65%,最终依据优化结果制造出飞轮样机。优化方法综合了静力学、动力学和电磁学的设计要求,提高了飞轮设计的合理性和设计效率,对小卫星用反作用飞轮系统的研究具有重要意义。

工业出版社,1997.

- TANG R Y. *Modern Permanent Magnet Machines Theory and Design* [M]. Beijing: China Machine Press, 1997. (in Chinese)
- [5] 邱国平, 邱明. 永磁直流电机实用设计及应用技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.  
QIU G P, QIU M. *Permanent Magnet DC Motor Practical Design and Application Technology* [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2009. (in Chinese)
- [6] 吴一辉, 高庆嘉, 白越. 反作用飞轮驱动电机的电磁设计 [J]. *光学精密工程*, 2010, 18(6): 1317-1325.  
WU Y H, GAO Q J, BAI Y. Electromagnetic design of driving motors in reaction wheels [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(6): 1317-1325. (in Chinese)
- [7] 刘强, 房建成. 磁悬浮飞轮用可重复抱式锁紧装置

- [J]. 光学 精密工程, 2012, 20(8): 1802-1810.
- LIU Q, FANG J CH. Repeated clamping locking device for magnetic bearing flywheel [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(8): 1802-1810. (in Chinese)
- [8] 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 J Q, HAN X F, LIU Q. Optimal design of rotor rim for magnetically suspended flywheel with vernier gimbaling capacity [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(9): 1991-1998. (in Chinese)
- [9] 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 B CH, YUAN Q. The combinatorial optimization strategy for large-sized magnetic suspension rotor in CMG system [J]. *Journal of Astronautics*, 2012, 33(2): 275-280. (in Chinese)
- [10] 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 Q H, LI H, HAN B CH. Optimization design of magnetic bearing reaction wheel rotor using iSIGHT software [J]. *Journal of Astronautics*, 2007, 28(6): 1619-1623. (in Chinese)
- [11] MANDI M. An optimal two-dimensional geometry of flywheel for kinetic energy storage [J]. *Int. J. of Thermal & Environmental Engineering*, 2011, 3(2): 67-72.
- [12] SUNG K, SEONG J, SANA U, et al.. Design optimization and fabrication of a hybrid composite flywheel rotor [J]. *Composite Structures*, 2012, 94(11): 3290-3299.
- [13] 王辉, 武俊峰, 吴一辉. 轮缘驱动式姿控飞轮电机设计[J]. 工程设计学报, 2012, 19(3): 225-230.
- WANG H, WU J F, WU Y H. Design of rim-driven attitude control flywheel motor [J]. *Chinese Journal of Engineering Design*, 2012, 19(3): 225-230. (in Chinese)

#### 作者简介:



王 辉(1987—),男,湖北广水人,博士研究生,2010年于武汉理工大学获得学士学位,主要从事卫星姿控飞轮系统优化设计等方面的研究。E-mail: wanghuihb@126.com

#### 导师简介:



吴一辉(1965—),女,浙江温州人,博士,研究员,博士生导师,1986年于天津科技大学获得学士学位,1991年、1996年于中科院长春光机所获得硕士、博士学位。主要从事微光机电系统(MEMS)和精密机电系统方面的研究。E-mail: yihuiwu@ciomp.ac.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)