

文章编号 1004-924X(2015)04-1004-07

轴向磁通飞轮电机印刷电路板定子绕组设计

王 辉^{1,2}, 武俊峰¹, 李 胤¹, 吴一辉^{1*}

(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: 针对卫星姿态控制用反作用飞轮小型化的要求, 设计了采用印刷电路板(PCB)定子绕组形式的轴向磁通反作用飞轮系统, 并研究了 PCB 定子绕组的布线形式。根据系统设计方案和工艺的要求, 采用理论分析与有限元仿真相结合的方法, 研究了螺旋形绕组的反向转矩产生机理, 对比分析了螺旋形和波形 PCB 定子绕组对飞轮驱动电机性能的影响, 并分别对采用两种形式定子绕组的飞轮样机进行了地面性能测试。试验结果表明, 飞轮工作在额定转速 5 000 r/min 时, 采用波形定子绕组比采用螺旋形定子绕组时的电机功耗降低了 26.2%, 电磁效率降低了 0.8%。试验结果验证了理论分析与仿真结果的正确性, 为 PCB 定子绕组型轴向磁通永磁电机的工程化应用提供了参考。

关键词: 反作用飞轮; 印刷电路板定子绕组; 轴向磁通永磁电机; 有限元

中图分类号: V448.222; TM351 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152304.1004

PCB stator winding in axial flux permanent magnet motor for reaction flywheel system

WANG Hui^{1,2}, WU Jun-feng¹, LI Yin¹, WU Yi-hui^{1*}

(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: To meet the miniaturization requirements of a reaction flywheel for small satellites, a reaction flywheel system using the axial flux permanent magnet motor based on a Printed Circuit Board (PCB) stator was proposed and the winding layout form for the PCB stator winding was researched as well. According to the system design and manufacturing requirements, a combination of theoretical and finite element analysis was applied to the illustration of generating mechanism of the reverse torque in the spiral winding. The effects of spirally type and waveform type PCB stator windings on the flywheel system performance were also analyzed, respectively. Finally, the performance of flywheel system prototypes with two forms of stator windings was tested on the ground. The results indicate that the driven motor with the waveform PCB stator winding has reduced its power consumption by 26.2% than that with spirally winding when the flywheel works at a rated

收稿日期: 2013-11-20; **修订日期:** 2014-01-22.

基金项目: “十二五”装备预研基金资助项目(No. 61501020302); 国家自然科学基金资助项目(No. 51205381); 吉林省科技发展计划资助项目(No. 20140101057JC, No. 20130522185JH)

speed of 5 000 r/min, meanwhile its electromagnetic efficiency is also reduced by 0.8%. The experimental results verify the correctness of theoretical analysis and simulation results, and provides an important reference for the engineering applications of the axial flux permanent motors with PCB stator windings.

Key words: reaction flywheel; Printed Circuit Board (PCB) stator winding; axial flux permanent magnet motor; Finite Element Analysis (FEA)

1 引 言

为了保证微小卫星在轨道坐标系中相对于平衡点的稳定性,人们多采用主动姿态调整系统或被动姿态调整系统对其进行调整和控制。其中,以反作用飞轮为主的三轴主动姿态调整系统通过电机带动飞轮轮体的加速或制动来产生作用于卫星本体的反作用力矩,从而实现对卫星的姿态进行主动控制和调整,具有质量小、无污染、寿命长、可进行线性控制等优点,在现代卫星姿态控制系统中得到了广泛应用^[1-5]。

目前的飞轮电机多采用永磁无刷直流电机,其具有结构简单、体积小、效率高、运行特性优良等特点。随着航天技术的不断发展,基于传统的径向磁通电机(Radial Flux Permanent Magnet Motor, RFPM)已很难满足航天器有效载荷对机械结构尺寸的要求;而轴向磁通电机(Axial Flux Permanent Magnet Motor, AFPM)由于其扁平紧凑的结构特点,使得电机具有较大的转动惯量/质量比,特别适用于质量与体积受到严格限制的姿态控制飞轮系统。同时,为了提高工艺性并进一步缩小轴向结构尺寸,采用印刷电路板(Printed Circuit Board, PCB)工艺制造的定子绕组,可以有效地减小电机气隙长度,增加气隙磁通密度,提高电机效率和输出力矩的平稳性,在AFPM中已有较多应用。目前,该项研究多局限于对单一布线方式,如文献[6]为减小铜损,提高电机效率,采用端部连接长度较小的长菱形绕组设计了轴向磁通微电机;文献[7]采用波形绕组和MEMS工艺设计了一种多相高速微电机;文献[8]采用楔形PCB绕组设计了永磁发动机;文献[9]对螺旋形PCB绕组布线方式进行了深入研究;文献[10-11]设计了用于飞轮系统中的平面微电机;文献[12]采用数值计算方法对螺旋形PCB绕组反电动势和电机的电磁参数进行了预测和分

析,并设计了适用于微纳卫星用的微飞轮系统。

本文从工程实际出发,设计了一种轴向磁通式小卫星用反作用飞轮系统,并对其中的PCB绕组布线方式加以研究。通过理论分析和有限元仿真,对比分析了螺旋形和波形PCB定子绕组对反作用飞轮性能的影响,并验证了样机的性能,为该类电机的工程化应用提供了参考。

2 飞轮系统方案设计

2.1 系统机械结构

轴向磁通飞轮系统利用AFPM驱动飞轮轮体旋转,通过电机加减速实现飞轮转子角动量的变化,从而产生反作用力矩来改变卫星姿态。飞轮轮体的实质为带有较大转动惯量的AFPM的外转子。飞轮系统结构如图1所示,主要由真空壳体、底座、飞轮轮体、永磁体磁钢、PCB绕组和轴系组件等组成。其中飞轮轮体采用上下轮体螺旋连接式结构,以便于电机安装,并使电机形成封闭式磁路,减小磁路漏磁。

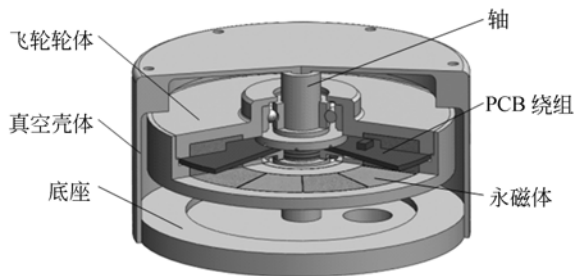


图1 飞轮系统结构

Fig. 1 Structure of flywheel system

2.2 驱动电机气隙磁通密度分析

AFPM通过气隙磁通密度的轴向分量与绕组间的电磁相互作用产生电磁力矩,为分析AFPM轴向气隙磁通密度,对电机模型进行三维有限元磁场分析,选取PCB绕组所处的中间气隙

平面为分析对象,该平面上电机的轴向气隙磁通密度分布如图 2 所示。轴向气隙磁通密度在径向方向上并非均匀分布,在靠近永磁体内径和外径处,由于边缘效应,气隙磁通密度逐渐减小,而在圆周方向上,可近似认为呈正弦分布,同时,由于采用 PCB 绕组,电机的气隙长度较小,从而有效地增大了电机的气隙磁通密度。

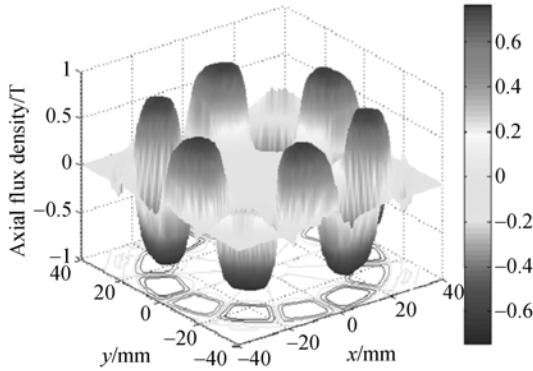
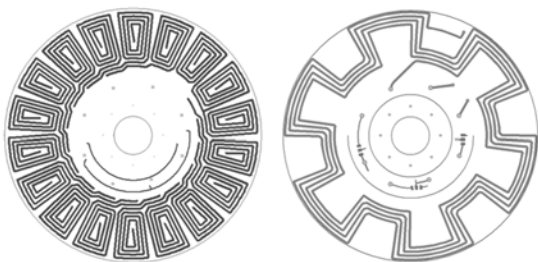


图 2 轴向气隙磁通密度分布
Fig. 2 Axial air-gap magnetic flux distribution

3 PCB 定子绕组设计与分析

3.1 PCB 绕组设计

由于印制板上布线空间的限制,轴向磁通电机的 PCB 定子绕组可划分为螺旋形绕组 (Spirally Winding) 和波形绕组 (Wave Winding), 分别如图 3(a)、(b) 所示,其中图 3(b) 给出了其中一相绕组的分布。



(a) 螺旋形绕组 (b) 波形绕组
(a) Spirally winding (b) Wave winding

图 3 飞轮驱动电机 PCB 绕组布线方式
Fig. 3 Different winding shapes for AFPM

图 3(a) 所示的螺旋形绕组在每对磁极下均匀分布着 3 个线圈,三相绕组能够分布于一层 PCB 板上,在布线和连接上更加方便。图 3(b) 中

的波形绕组采用了 RFPM 中的分布式波形绕组的方法,各相绕组相距 120° 电角度,并沿圆周方向均匀分布于 PCB 基板上。由于平面空间的限制,三相绕组须分布于三层板上,从而增加了 PCB 制作的成本。同时,由于绕组端部跨距较大,各个线圈间的连接长度较长,导致绕组铜损较大,利用率较低。

3.2 绕组性能分析

螺旋形绕组各相间的连接方式如图 4 所示,三相绕组采用全桥驱动的 Y 型连接方式。为了分析线圈在导通间的受力状态,以一对磁极下的 3 个线圈为例,分析电机在转动过程中电磁力矩随磁极位置的变化。假设绕组静止不动,磁极随飞轮轮体逆时针旋转,三相绕组处于 AB 两相导通状态。以该状态内电角度 α_{em} 为绕组相对于永磁体的位置参考点,当 α_{em} 在 $0 \sim 60^\circ$ 变化时, AB 两相绕组产生的安培力如图 3 所示,图中空心粗箭头显示该状态下各个线圈中电流的流动方向,实心细箭头代表绕组产生的安培力方向。

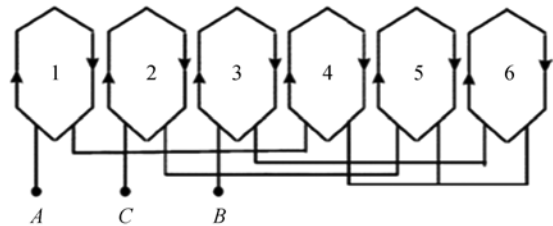
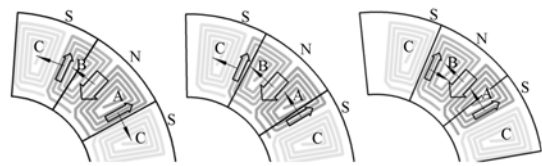


图 4 螺旋形 PCB 绕组连接模型
Fig. 4 Spirally winding connections



(a) $\alpha_{em} = 0^\circ$ (b) $\alpha_{em} = 30^\circ$ (c) $\alpha_{em} = 60^\circ$

图 5 AB 相导通时刻电流流向

Fig. 5 Current direction of spirally winding

由图 5 可知,由于螺旋形绕组单个线圈跨距小于单个磁极圆周长度,在 AB 相导通时,绕组产生的安培力形成的转矩方向并不完全一致,部分线圈形成的电磁转矩将会阻碍转子的运转。为了方便分析,将该部分转矩定义为反向转矩。如图 5(a) 所示位置, B 相左右各半线圈产生的电磁力

矩方向相同,为逆时针方向,但此时 A 相线圈由于完全分布于 N 极磁钢下,右半部分线圈产生的电磁转矩为顺时针方向,从而形成反向转矩。当 $\alpha_{em} = 30^\circ$ 时,左右各半线圈分别分布于 N、S 极下,此时电机输出力矩最大。此后,由于 B 相线圈将会逐渐完全分布于 N 极磁钢下,反向转矩会再次产生,如图 5(c) 所示。

反向转矩的产生不仅降低了电机的输出力矩,增加了系统功耗,同时也影响到电机的动态特性。对螺旋形绕组电机进行有限元仿真分析,绕组反电动势 (Back Electromotive Force, Back EMF) 波形分别如图 6 所示,由于存在同极下同一线圈左右各半部分绕组反电动势的相互抵消,反电动势波形发生畸变。由于绕组中通入方波电流,畸变的波形将降低电机输出力矩的平稳性。

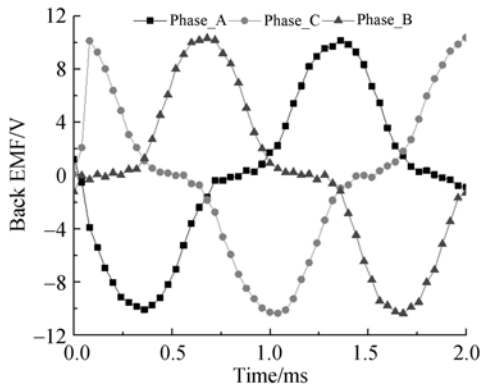


图 6 螺旋形绕组反电动势
Fig. 6 Back EMF waveforms of spirally winding

为了减小反向转矩产生的力矩削减作用,同时改善反电动势波形的畸变程度,在 PCB 绕组布线中采用波形绕组,使同一相绕组在通电时刻中所有线圈位于同一磁极下,且三相绕组呈 120° 电角度圆周均匀分布,AB 导通状态时电流流向及产生的电磁力方向如图 7 所示。

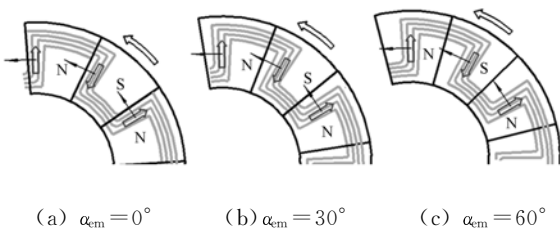


图 7 波形绕组导通时电流流向
Fig. 7 Current direction of wave winding

为了表达需要,仅给出了该状态下 A 相电流的流动方向,从图中可知,在 AB 相导通的 60° 电角度内,相同电流流向的绕组导体均分布于同一磁极下,反向转矩得到了消除,图 8 所示为气隙磁密为正弦分布时,波形分布式绕组反电动势仿真波形图,三相反电动势呈现较好的正弦波形。为分析绕组反电动势中的谐波成分,对两种形式绕组的反电动势进行快速傅里叶变换 (FFT) 分解,对比结果如图 9 所示。

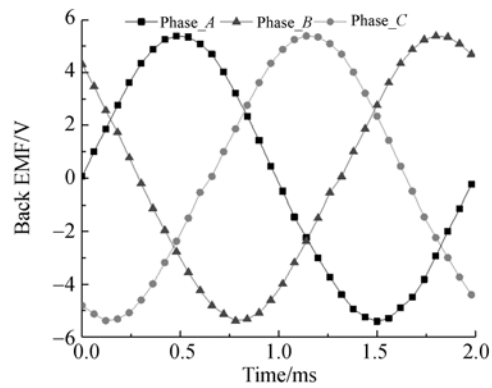


图 8 波形绕组反电动势
Fig. 8 Back EMF waveforms of wave winding

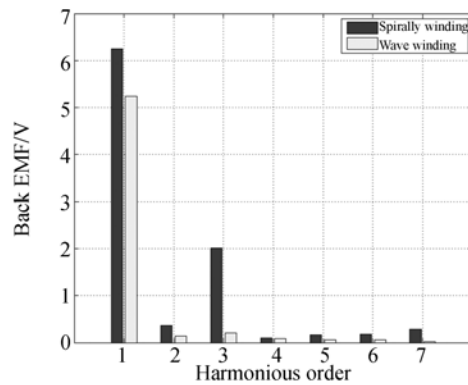


图 9 绕组反电动势 FFT 分解
Fig. 9 FFT analysis of back EMF

由图 9 可知,波形绕组反电动势中基波占有主要成分,高次谐波较少,而螺旋形绕组形成的反电动势中却存在着较高含量的 3 次谐波。由于无刷直流电机的定子绕组电流为含有谐波电流的方波,当电机转动时,谐波磁动势与永磁体磁场发生相互作用产生谐波转矩,引起转矩波动^[13],这将对飞轮性能产生不利影响。

4 试验结果与比较

基于轴向磁通电机的反作用飞轮系统电磁设计参数如表 1 所示,图 10 所示为飞轮系统样机及 PCB 绕组实物。

表 1 PCB 绕组实测电磁参数
Tab. 1 Parameters of PCB winding

绕组布线方式	两相电阻 $2R/\Omega$	极对数 p	力矩系数 K_e
螺旋形绕组	0.45	6	0.020 5
波形绕组	0.40		0.0187

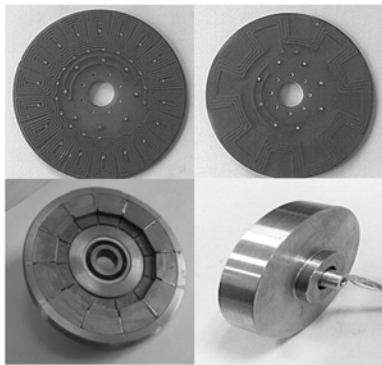


图 10 飞轮系统样机
Fig. 10 Prototype of flywheel system

为检验理论与仿真分析的正确性,分别对两种 PCB 绕组飞轮样机进行地面性能测试,通过自然停机实测单相反电动势波形分别如图 11 和 12 所示。由于反向转矩的影响,螺旋形绕组单相反电动势波形的确发生了畸变,而波形绕组则保持了较好的正弦特性,仿真结果与实测波形具有较高的一致性。

为了验证两种 PCB 绕组对电机功耗性能的影响,测定两种形式绕组的电机应用于飞轮地面实际工况时不同转速下的功耗与电磁效率,如图 13 所示。波形绕组可有效地减小反向转矩形成的功率损耗,并且随着转速升高,减小作用更加显著,但由于波形绕组端部连接长度较长,铜损较大,降低了电机的电磁效率。对比飞轮工作在额定转速 5 000 r/min 时的性能,当电机采用波形定子绕组比采用螺旋形定子绕组时功耗降低了

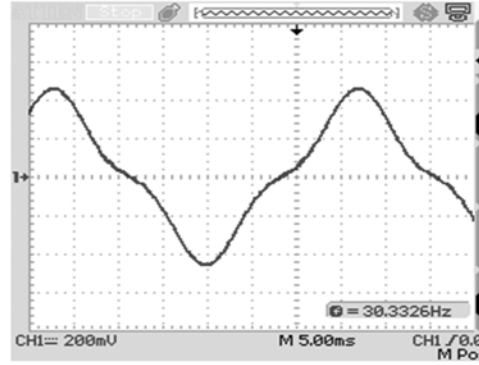


图 11 螺旋形绕组单相反电动势波形
Fig. 11 Back EMF waveform resulted from spirally winding

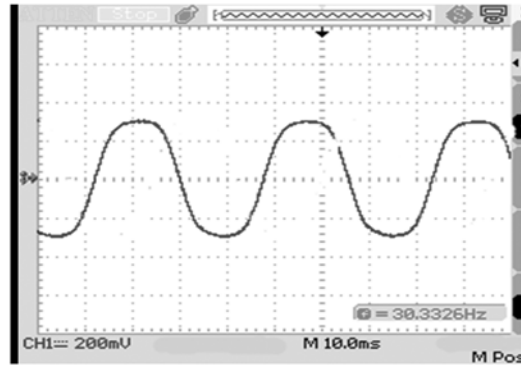


图 12 波形绕组单相反电动势波形
Fig. 12 Back EMF waveform resulted from the wave winding

26.2%,但由于铜损的影响,电磁效率降低了 0.8%。

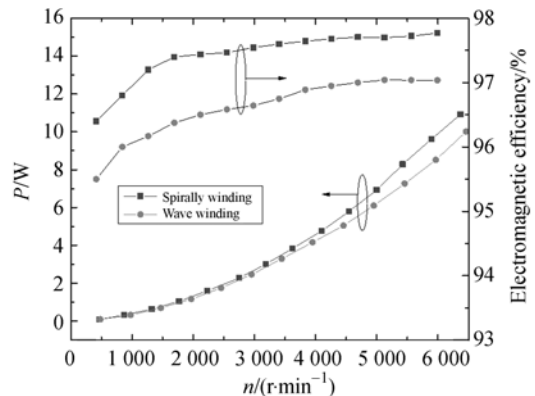


图 13 样机性能实测值
Fig. 13 Performance of flywheel system

5 结 论

本文通过对一种轴向磁通飞轮电机 PCB 定子绕组的设计,对比分析了螺旋形绕组和波形绕组对驱动电机性能的影响,进而得出螺旋形绕组由于其布线方式的特殊性,在驱动电机运转过程中将会产生反向转矩,形成力矩损耗,而波形绕组

可以有效地消除这种附加力矩损耗,但由于端部连接长度较长,增加了电机的铜损,从而降低了电机的电磁效率,最后对采用两种形式定子绕组的飞轮样机进行了地面性能测试。试验结果表明,飞轮工作在额定转速 5 000 r/min 时,采用波形定子绕组比采用螺旋形定子绕组时的电机功耗降低了 26.2%,但电磁效率降低了 0.8%。试验结果验证了理论分析与仿真结果的正确性。

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] 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)
- [3] 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)
- [4] 薛旭成,傅瑶,韩诚山. TDI CCD 相机的卫星姿态稳定度确定[J].*中国光学*,2013,6(5):767-772.
XUE X CH, FU Y, HAN CH SH. Confirmation of satellite attitude stabilization for TDI CCD camera [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(5): 767-772. (in Chinese)
- [5] 杨秀彬,常琳,金光.单框架控制力矩陀螺转子动不平衡对遥感卫星成像的影响[J].*中国光学*,2012,5(4):358-365.
YANG X B, CHANG L, JIN G. Influence of dynamic imbalance of SGCMG rotor on remote sensing satellite imaging [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(4):358-365. (in Chinese)
- [6] TSAI M C, HSU L Y. Design of a miniature axial-flux spindle motor with rhomboidal PCB winding [J]. *IEEE Transactions on magnetics*, 2006, 42(10):3488-3490.
- [7] FLORIAN H, PRESTON G, MARK G. High speed axial flux permanent magnet micro motors with electroplated windings [C]. *Solid-State Sensors, Actuators, and Microsystems Workshop, South Carolina*, 2010:404-407.
- [8] MOURY S, IQBAL M T. A permanent magnet generator with PCB stator for low speed marine current applications [C]. *2009 1st International Conference on the Developments in Renewable Energy Technology (ICDRET)*, 2009:17-19.
- [9] GAMBETTA D. *New design methodologies for printed circuit axial field brushless DC motors* [D]. The University of Southern Queensland, 2009.
- [10] 吕允春,白越,吴一辉.用于微飞轮的永磁平面微电机过目标优化设计[J].*微特电机*,2009,(4):4-5.
LV Y CH, BAI Y, WU Y H. Multi-objective optimization design of permanent magnet planar micro motor used for micro flywheel [J]. *Small & Special Electrical Machines*, 2009, (4): 4-5. (in Chinese)
- [11] 张磊,王辉,武俊峰,等.用于卫星姿控的动量飞轮盘式电机设计[J].*现代制造工程*,2013,(2):110-115.
ZHANG L, WANG H, WU J F, et al.. Design of momentum flywheel disk motor used for satellite attitude control [J]. *Modern Manufacturing*

- Engineering*, 2013, (2): 110-115. (in Chinese)
- [12] WU J F. Design of a miniature axial flux flywheel motor with PCB winding for nanosatellites [J]. 2012 *International Conference on Optoelectronics and Microelectronics (ICOM)*, Los Alamitos, 2012: 544-548.
- [13] 刘章. 永磁无刷直流电机绕组导通方式及磁势谐波研究[D]. 长沙:长沙理工大学, 2012.
- LIU ZH. *Permanent brushless DC motor winding way and the magnetic potential harmonic analysis* [D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2012. (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总体设计、仿真与优化等方面的研究。
E-mail: wanghuihb@126.com

导师简介:

吴一辉(1965-),女,浙江温州人,工学博士,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)