

文章编号 1004-924X(2014)11-2967-08

基于场路结合的姿控飞轮驱动电机

高庆嘉^{1,2}, 白越^{1*}, 赵柱³, 官勋¹, 孙强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, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 大陆汽车电子(连云港)有限公司 长春分公司, 吉林 长春 130033)

摘要:常规的姿控飞轮驱动电机的设计只能基于经验通过重复计算得到设计参数,且无法得到最优参数。本文以磁路法和有限元法(FEM)为基础,提出以驱动电机的有效径长比为核心的姿控飞轮驱动电机的设计方法。设计磁路时,首先基于电机的等效电路建立径长比与表征电机性能的参数之间的计算模型,然后采用拉普拉斯方程的有限元法计算气隙磁通密度和电感用于精确分析电机性能。采用该方法设计了一台 5 Nms 轮毂驱动型飞轮电机,仿真分析了电磁转矩脉动和机械特性曲线。结果显示其调节特性的理论计算值与试验值一致,电磁结构的最大设计误差为 2.9%。该方法适用于姿控飞轮驱动电机的设计,且具有准确、简洁和快速的特点。

关键词:小卫星;姿控飞轮;永磁无刷直流电机;场路结合;径长比

中图分类号:V448.222;TM35 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142211.2967

Driving motor for attitude control flywheel based on field-circuit method

GAO Qing-jia^{1,2}, BAI Yue^{1*}, ZHAO Zhu³, GONG Xun¹, SUN Qiang¹, WU Yi-hui¹

(1. 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;

3. Contionental Automotive corporation(Lianyungang) Co. Ltd.
Changchun Branch, Changchun 130033, China)

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

Abstract: Conventional design parameters of attitude control fly wheels' motor are calculated repeatedly based on experiences and the optimal parameters can not be acquired. On the basis of a circuit method and a Finite Element Method(FEM), this paper proposes a design method for the driving motor of an attitude control flywheel, in which the effective ratio of diameter to length is taken as a design core. The computing model for circuit design was established according to the relationship between the ratio of diameter to length and the parameters of the motor, then the air-gap flux density and the inductance were calculated by using FEM based on Laplace's equation. Finally, the calculated results were used

收稿日期:2013-10-26;修订日期:2014-01-05.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 11372309, No. 61304017);中国科学院预研基金资助项目(No. 61501.02.03.04)

for the accurate analysis of the performance of motor. Moreover, a hub driving motor in an attitude control flywheel with angular moment of 5 Nms was designed and its electromagnetics torque ripple and the mechanical characteristic were simulated. The results show that the regulating characteristics of theoretical calculation is in agreement with that of the experimental results well, and the maximum error of electromagnetic structure is 2.9%. It concludes that this method is suitable for the design of attitude control flywheel motors, and is characterized by higher speeds and good precises.

Key words: small satellite; attitude control flywheel; brushless permanent-magnet DC motor; field-circuit; ratio of diameter to length

1 引言

近年来,随着空间技术的迅速发展,功能密度高、成本低、质量小、体积小、研制周期短的小卫星受到普遍关注,并在国民经济发展中发挥了越来越重要的作用^[1]。姿控飞轮是小卫星姿态控制的关键执行元件,它利用自身角动量的变化对卫星进行姿态控制,并朝着体积更小、重量更轻、功耗更低、以及可靠性和控制精度更高的方向发展^[2-4]。永磁无刷直流电动机(Brushless Direct Current Motor, BLDCM)具有大力矩系数、高运行效率和可靠性,是姿控飞轮驱动电机的首选^[5-7]。飞轮电机主要包括轮缘驱动型和轮毂驱动型两种,往往具有比常规电机更大的径长比(电枢直径与电枢长度的比值),采用外转子结构,将电机转子与飞轮轮缘或轮毂一体化设计,使得电机转子的转动惯量有效附加到飞轮上,相比内转子式,飞轮系统的转动惯量/质量比更高,结构更紧凑。由于这种结构特点,对姿控飞轮的性能分析与设计实质上就是对驱动电机的分析与设计。传统电机以及内转子式飞轮电机在设计中往往忽略径长比的选取,但外转子飞轮电机尤其是轮缘驱动型飞轮电机的径长比变化对飞轮转动惯量的影响较大,所以应掌握径长比的计算方法和变化规律。

电机设计方法主要有磁路法、解析法和有限元法等,文献[8]提出的等效磁路法,算法简单,但许多设计系数需要依靠经验取值,精度不高;文献[9-11]提出的解析法,磁场模型建立较难,一般适用于边界形状规则且媒质线性的场合;有限元方法可以较准确地分析电机内电磁场,但建模复杂,分析过程繁琐,文献[12-14]提出了多种优化模型,却没有完全解决计算量大的问题。文献[15]以有限元方法获得样本数据,采用支持向量

机(Support Vector Machine, SVM)方法建立电机的非线性模型,可提高电机设计效率,但通过有限元方法获得一定的样本数据为基础增加了模型的复杂性;文献[16]将虚拟现实技术与传统的CAD技术相结合,实现了电机设计的可视化、交互性。文献[17]提出的综合设计平台以磁路法作为起点进行样机的最初设计,采用有限元法进行精确计算。文献[18]以电负荷和磁负荷为设计起点推导变频调速电机主要尺寸及其它电磁设计,方法简洁快速。

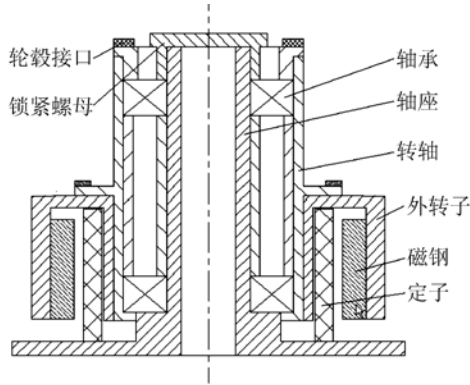
不论采用何种方法,常规姿控飞轮驱动电机的设计参数只能基于经验通过重复计算得到,且无法得到最优参数。本文以磁路法和有限元法(Finite Element Method, FEM)为基础,提出以驱动电机的有效径长比为核心的设计方法。磁路上基于电机的等效电路建立了径长比与表征电机性能的参数之间的计算模型,同时采用拉普拉斯方程的FEM计算气隙磁通密度和电感以便精确分析电机性能。整个设计过程以满足性能要求为前提,以最大有效径长比或永磁体用量最少为目标,对于提高姿控飞轮系统的角动量/质量比具有重要意义。另外,设计过程不受传统设计思路限制,方法简洁、快速。

2 姿控飞轮电机结构

2.1 电机结构

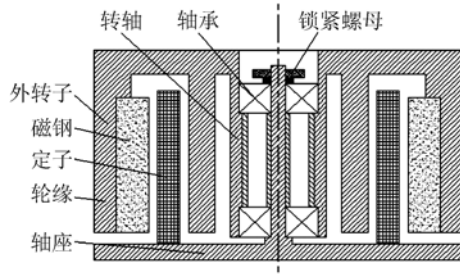
飞轮电机多采用大内孔盘式的轮毂驱动和轮缘驱动两种结构,轮毂驱动型电机结构如图1(a)所示,内转子为运动件,与转轴同轴联接,转轴与飞轮轮毂相连。磁钢采用烧结钕铁硼永磁体,并采用瓦片形结构。磁钢的外圆表面与转子的内圆表面靠磁力紧密吸合,与转子一起同轴转动。轮缘驱动型电机结构如图1(b)所示,飞轮轮缘既是提

供飞轮转动惯量的主体,也是电机的外磁轭,磁钢黏接在轮缘内侧,定子支架上缠绕绕组,并处于磁钢和飞轮轮体内磁轭之间,电机形成以导磁性能良好的低碳钢飞轮轮缘、磁钢、绕组和轮体内磁轭为主的磁路结构。



(a) 轮毂驱动型

(a) Hub driving motor



(b) 轮缘驱动型

(b) Rim driving motor

图 1 飞轮电机结构

Fig. 1 Structures of flywheel's motors

2.2 设计原则

由公式 $\mathbf{H} = \mathbf{J}\boldsymbol{\omega}$ 知,当飞轮的角动量 $\mathbf{H}$ 和角速度 $\boldsymbol{\omega}$ 一定时,飞轮的转动惯量 $\mathbf{J}$ 确定。在一定转动惯量条件下如何减小系统质量成为首要问题。美国 NASA 曾对成熟飞轮产品的质量、转动惯量和飞轮轮体半径进行了大量数据统计,可以表达为:

$$W = 26.8(0.74\mathbf{I})^{0.471}, \quad (1)$$

$$R = 337.8(0.74\mathbf{I})^{0.256}, \quad (2)$$

式中: W 为飞轮质量; R 为轮体半径; $\mathbf{I}$ 为飞轮转动惯量。

式(1)和(2)一方面给出了飞轮转动惯量与半径之间的关系,可用于指导飞轮设计;另一方面,假设通过合理的设计,增加 R 但保持 $\mathbf{I}$ 不变,飞

轮质量将明显减小,飞轮的角动量/质量比增加。对于轮缘驱动型飞轮,轮缘即电机的外磁轭,为获得更大的角动量/质量比,电机的径长比应尽量大。但受到如轴系结构、气隙磁场漏磁等各种因素的限制,径长比的选择范围有限。对于轮毂驱动型飞轮,由于轮缘对转动惯量的贡献更大,增大径长比对提高飞轮的角动量/质量比的作用不明显,这种情况下对永磁体进行优化设计,既能减轻电机质量,又能提高电机效率。

3 场路结合的设计方法

3.1 径长比计算模型

3.1.1 推导过程

为了方便分析做如下假设:

- (1) 忽略电感和互感的影响;
- (2) 不考虑电枢磁场对气隙磁场的影响;
- (3) 忽略开关电路压降;
- (4) 忽略理想空载电流。

根据电机的等效电路,在每一个状态角 θ_z 内电压平衡方程为:

$$U = E_{eq} + iR_{eq}, \quad (3)$$

其中: $E_{eq} = K_E \omega$, $K_E = k_{sum} K_e$, $K_e = W_\Phi B_\delta f(\theta) k_w L_a D_a$ 。式中: E_{eq} 为反电动势(V); K_E 为反电动势系数(V/rad/s); k_{sum} 为绕组合成转矩系数; K_e 为一相绕组的反电动势系数(V/rad/s); ω 为角速度(rad/s); $f(\theta)$ 为气隙磁通密度波形函数; L_a 为电枢长度(m); D_a 为电枢直径(m); k_w 为绕组平均半匝长度与电枢长度的比值; B_δ 为气隙磁通密度幅值(T)。

由能量守恒定律,在状态角 θ_z 内电机输出机械功率等于气隙电磁功率,即:

$$T_e \omega = Ei, \quad (4)$$

式中: T_e 为电磁转矩瞬时值。

计算在状态角内的电磁转矩平均值:

$$T_{em} = \frac{1}{\theta_z} \int_{\theta_1}^{\theta_2} k_{sum} K_e i d\theta. \quad (5)$$

假设气隙磁场为方波, $f(\theta) = 1$, 电机采用两相导通星形三相 6 状态的方波驱动方式,两相绕组产生的电磁转矩相差 120° , 因此 $k_{sum} = \sqrt{3}$, 上述数值结合上述各式,得:

$$T_{em} = \frac{\sqrt{3} W_\Phi B_\delta k_w L_a D_a U (1 - \eta_{EM})}{R_{eq}}, \quad (6)$$

$$\text{其中: } R_{eq} = \frac{\rho_l l}{S_c} = 2 \times \frac{\rho_l 2 W_\Phi (k_w L_a + \tau)}{S_c},$$

$$\eta_{\text{em}} = E_{\text{eq}}/U, \tau = \pi(D_a + \delta)/2p.$$

式中: ρ_l 为导线电阻率($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$); l 为导线实际长度(mm); S_c 为导线截面积(mm^2); η_{em} 为电磁效率; τ 为极距。

整理得:

$$\frac{k_w}{\lambda L_a + \delta} + \frac{\pi/2 p}{L_a} = K, \quad (7)$$

其中: I 为电流有效值(A); J 为电流密度(A/mm^2)。

$K = \frac{B_o UI(1 - \eta_{\text{em}})}{\sqrt{3} \rho_l J T_{\text{em}}}$ 是反应电机性能参数的常

量。可以看出,式(7)一方面建立了径长比、电枢尺寸、磁极数、气隙磁通密度和电机性能之间的关系,另一方面揭示了满足一定性能的电机具有多种结构参数组合。

对式(7)进一步整理可得:

$$\lambda = \frac{k_w}{L_a K - \frac{\pi}{2 p}} - \frac{\delta}{L_a}. \quad (8)$$

可以看出,增加磁极数,保持其他参数不变,径长比增大,有利于提高轮缘驱动型飞轮电机的角动量/质量比,但是,气隙磁场向端部扩散效应加强,漏磁系数增加。图 2 所示为漏磁系数与径长比的变化曲线^[8,19],可以看出,随着径长比增大,漏磁系数近似线性增长。因此,为了保证一定的气隙磁通密度,最大径长比受到限制。另外,保持角动量不变,适当提高飞轮的工作转速,所需转动惯量减小,电机的有效径长比和漏磁系数均减小。因此,更容易设计出高角动量/质量比的轮缘驱动型飞轮系统。

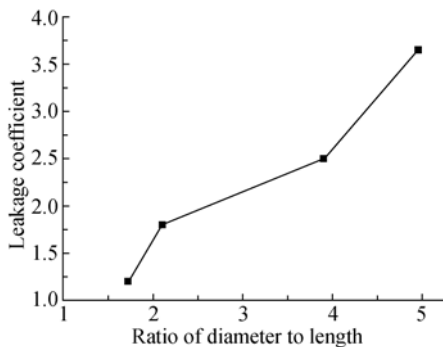


图 2 漏磁系数随径长比变化曲线

Fig. 2 Leakage coefficient change with ratio of diameter to length

3.1.2 永磁体用量最优计算方法

对永磁体用量进行合理的优化设计既能减轻

电机质量,又能提高永磁体的利用率和电机效率。由于 $D_a L_a$ 可以近似表征永磁体的截面,因此可作为优化永磁体用量的目标函数。

设目标函数

$$y = D_a L_a = \frac{k_w L_a^2}{K L_a - \frac{\pi}{2 p}} - L_a \delta,$$

令 $\frac{dy}{dL_a} = 0$, 可计算 y_{min} 条件下的 λ 和 L_a 。

3.2 电磁参数的计算与分析

电磁参数主要是采用基于有限元方法的电磁场分析获得气隙磁通密度和电感。电磁场分析实质上是求解给定边界条件下的麦克斯韦(Maxwell)方程组,将拉普拉斯方程与边界条件合并,构成稳定磁场的求解模型,从而计算磁场强度的各个分量。借助 ANSYS 软件的 APDL 语言(参数化设计)建立分析模型,计算气隙磁通密度,电感采用能量摄动法计算。

图 3~5 分别为气隙磁通密度与气隙大小、磁钢厚度和磁极数的关系。可以看出,气隙磁通密度幅值随气隙长度减小而增加,随磁钢厚度增加也会得到提高,但是这些变化均不是线性关系。随着气隙长度减小,气隙磁通密度增加得越来越快,并且波形逐渐趋于方波,漏磁系数越来越小;随着磁钢厚度增大,气隙磁通密度增大得越来越慢,最后基本不变,并且波形变得越来越差,漏磁系数也逐渐增大。气隙磁通密度随极数先增大后减小,8 极时气隙磁通密度幅值最大,且波形接近方波。图 6 所示为一个电角度范围内电感计算值与实测值,可以看出,电感在不同位置基本保持恒值。

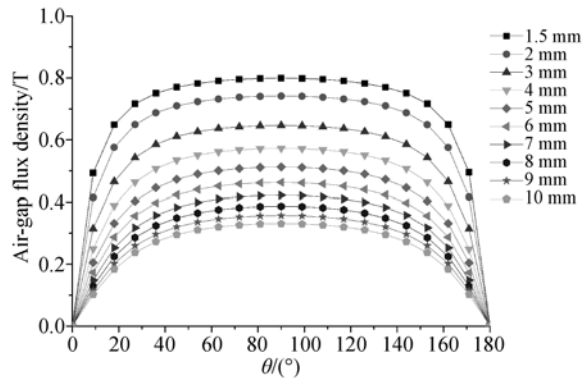


图 3 气隙长度不同的气隙磁通密度波形图

Fig. 3 Air-gap flux density waveforms with different air-gap lengths

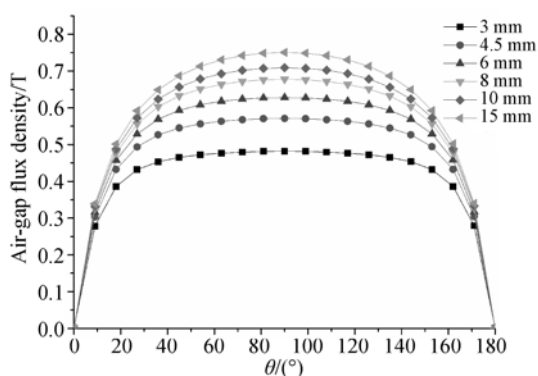


图 4 磁钢厚度不同的气隙磁通密度波形图

Fig. 4 Air-gap flux density waveforms with different PM thicknesses

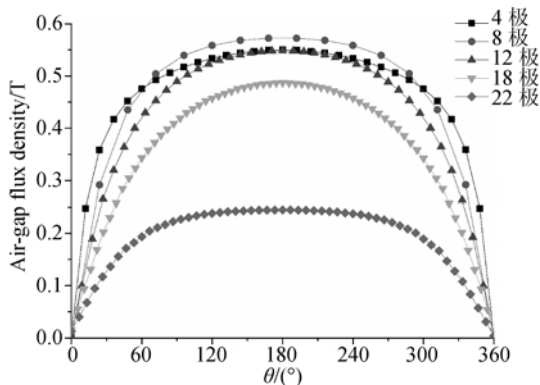


图 5 极数不同时磁通密度波形图

Fig. 5 Air-gap flux density waveforms with different poles

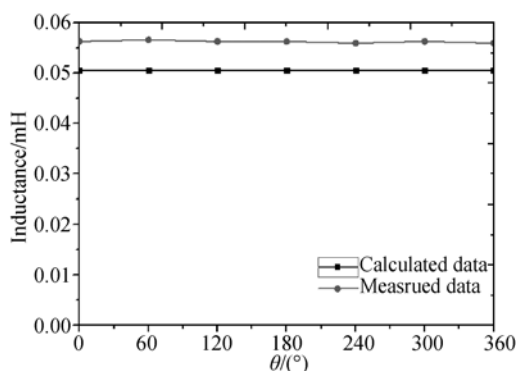


图 6 电感的计算值与实测值

Fig. 6 Comparison of calculated data with measured data of inductance

3.3 设计流程

以磁路法和有限元法为基础,以驱动电机的有效径长比为核心的设计方法如图 7 所示。首先根据飞轮角动量和转速等指标确定转动惯量,根据式(2)初步确定飞轮半径,选择飞轮结构形式,轮缘驱动型和轮毂驱动型分别依据最大有效径长

比和永磁体用量最优原则设计,然后根据给定的电机性能参数,设置好约束条件,利用径长比计算模型进行初步设计,建立电机 FEM 分析模型,分析磁路法中不易准确计算的参数,其他性能参数如转速、转矩、损耗和效率等采用磁路的方法^[20],判断是否满足约束条件,最后输出设计结果。为了提高设计的效率和人机交互,利用 MATLAB 编写设计软件。

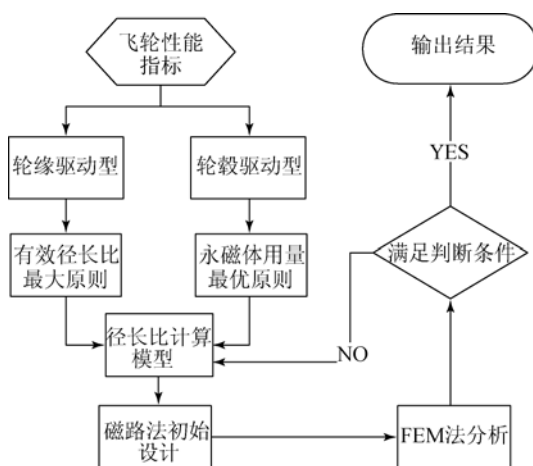


图 7 流程图

Fig. 7 Design process

4 结果与试验

制作的角动量为 5 Nms 的姿控飞轮原理样机如图 8 所示,该样机采用轮毂驱动结构,钕钴永磁制作瓦形磁钢,采用环氧树脂胶结合虚拟槽技术制作无铁心无齿槽电枢和多股并绕的分数槽整距集中绕组缠绕线圈,可有效减小甚至消除齿槽转矩波动。控制器基于 FPGA 的 SOPC 嵌入式系统设计,采用变结构积分分离的 PI 控制算法,可减小控制器的体积,提高系统的抗干扰性和稳定性。

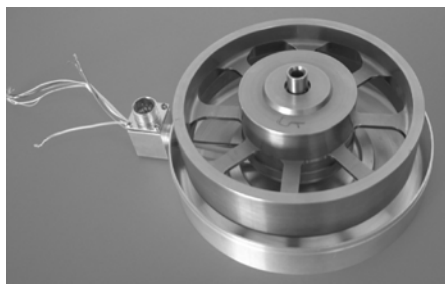


图 8 原理样机实物图

Fig. 8 Figure of prototype entity

姿控飞轮工作电压为 28 V,电磁转矩为 0.017 Nm,电磁效率为 0.995。根据样机性能参数,选择相同的绕组系数、导线线径和气隙磁通密度进行设计与性能分析。表 1 所示为电磁参数设计结果,可以看出,电枢直径、电枢长度和永磁体设计误差分别为 0.7%、1%和 2.9%。图 9 所示为满足性能要求的一系列电枢尺寸理论设计点与实测值的关系曲线,可以看出,样机尺寸非常靠近根据永磁体最优原则设计的设计点。图 10 所示为电机在 0~28 V 电压下的稳态转速曲线,可以看出,28 V 时空载转速为 5 217 r/min,此时,姿

控飞轮最大输出角动量 5.2 Nms,满足设计要求。图 11 为飞轮中心转速 2 610 r/min 时 360°的电磁转矩稳态曲线,可以看出,在续流二极管导通区域出现最大脉动量,约为 50%,总体上看,转矩脉动量较小,说明采用无齿槽电枢和分数槽整距集中绕组能有效地抑制转矩脉动。图 12 为中心工作电压为 14 V 时姿控飞轮驱动电机的机械特性曲线,可以看出,在空载转速 2 621 r/min 时,电磁效率 99.5%;在转速 2 400 r/min 时,工作效率达到最大值 80%,输出扭矩 72 mN·m;在转速 1 300 r/min 时,输出功率达到最大值 65 W。

表 1 电磁参数设计结果

Tab. 1 Design results of electromagnetic parameters

参数	电枢直径/mm	电枢长度/mm	磁钢厚度/mm	气隙/mm	径长比	极数	转矩系数/(Nm·A ⁻¹)
实测	44	21	4.5	4.2	2.1	6	0.051
计算	43.7	20.8	4.63	4.2	2.1	6	0.051

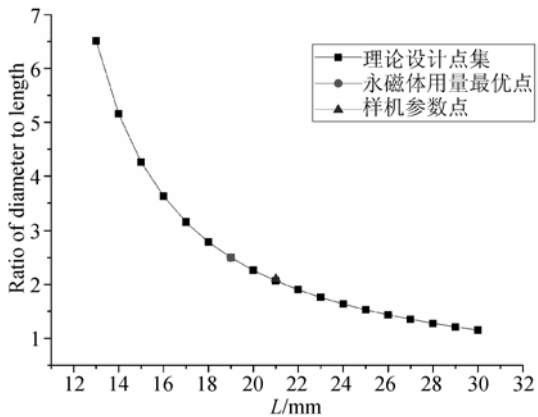


图 9 理论设计点与实测值对比

Fig. 9 Comparison of theoretical design data with measured data

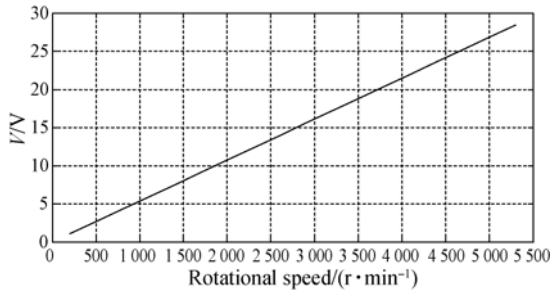


图 10 稳态转速曲线

Fig. 10 Speed curve at steady status

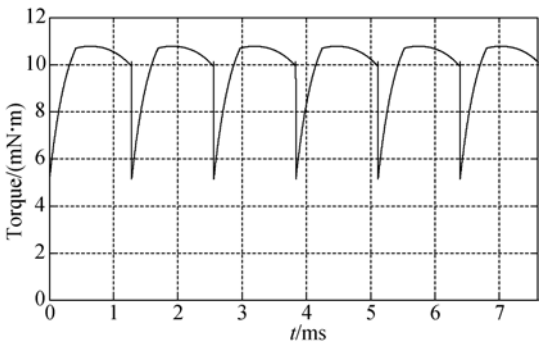


图 11 电磁转矩稳态曲线

Fig. 11 Steady curve of electromagnetic torque

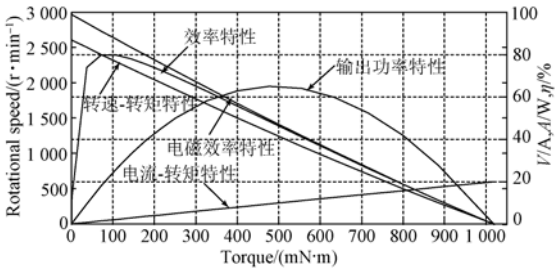


图 12 飞轮电机机械特性图

Fig. 12 Mechanical characteristic figure of flywheel motor



图 13 飞轮性能测试系统

Fig. 13 Test system of the flywheel performance

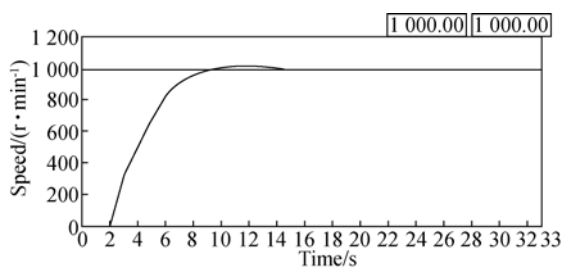


图 14 转速 1 000 r/min 的稳态特性

Fig. 14 Steady status at 1 000 r/min

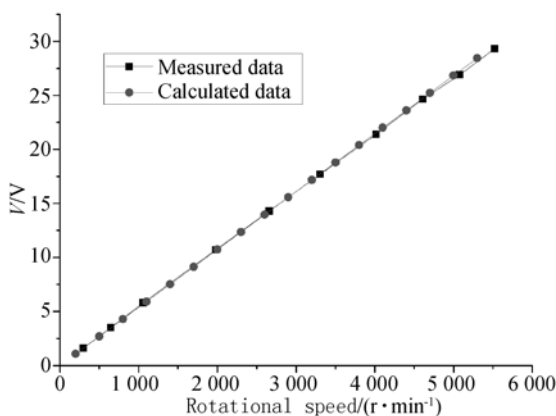


图 15 电压-转速试验与计算值

Fig. 15 Experimental and calculated values of voltage and speed

参考文献:

- [1] 徐伟,朴永杰.从Pleiades剖析新一代高性能小卫星技术发展[J].中国光学,2013,6(1):9-19.
XU W,PIAO Y J. Analysis of new generation high-performance small satellite technology based on the pleiades [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(1): 9-19. (in Chinese)
- [2] 王辉,武俊峰,吴一辉,等.小卫星用反作用飞轮系统设计[J].光学精密工程,2014,22(3):331-337.
WANG H, WU J F, WU Y H, et al.. Micro/Nano technology and fine mechanics design of reaction fly-wheel systems for small satellites [J]. 2014, 22(3):

将飞轮系统置于真空罐内进行性能测试,如图 13 所示,采用 Agilent 53131A 频率计采集速度,ZDF-5227 真空计记录气压值,保持真空环境在 50~60 Pa。图 14 为转速 1 000 r/min 时稳态特性曲线,可以看出,经过 16 s 后转速达到稳态值,波动量为+1 r/min。图 15 所示为飞轮的电压-转速变化曲线,可以看出,计算值与试验值比较一致。

5 结 论

本文利用径长比计算模型将电机的电磁效率、电磁力矩、径长比有机结合起来,实现了以转动惯量、效率和质量为优化目标的设计方法,得出如下结论:(1)采用以磁路法和有限元法(FEM)为基础,以驱动电机的有效径长比为核心的方法对飞轮电机进行设计,调节特性的理论值与试验值一致,电磁结构的最大设计误差为 2.9%。(2)采用径长比计算模型进行飞轮电机的初步设计,获得了满足电机性能要求的一系列设计尺寸组合,设计更加灵活。(3)轮缘驱动型和轮毂驱动型飞轮电机分别依据最大有效径长比和永磁体用量最少原则设计。(4)8 极结构具有更高的气隙磁密密度幅值和更接近方波的波形,是飞轮电机理想的极数选择。(5)提高姿控飞轮的工作转速,更容易设计出高角动量/质量比的轮缘驱动型飞轮系统。

331-337. (in Chinese)

- [3] CHRISTOPHER D A, BEACH R. Flywheel technology development program for aerospace application [J]. *IEEE Aerospace and Electronic System Magazine*, 1998, 13(6):9-14.
- [4] 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 reaction wheel's driving motor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(6):1319-1325. (in Chinese)
- [5] 张琛.直流无刷电动机原理及应用[M].北京:机械

- 工业出版社, 2006.
- ZHANG T. *Brushless DC Motor Principle and Application* [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2006. (in Chinese)
- [6] ALEKSANDR S, NAGORNY, NARAJAN V, *et al.*. Design aspects of a high speed permanent magnet synchronous motor/generator for flywheel applications [J]. *NASA/TM*, 2005.
- [7] HWANG C C, CHANG J J. Design and analysis of a high power density and high efficiency permanent magnet DC motor [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2000, 209: 234-236.
- [8] 唐任远. 现代永磁电机理论与设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- TANG R Y. *Modern Permanent Magnet Machines Theory and Design* [M]. Beijing: China Machine Press, 1997.
- [9] GU Q S, GAO H Z. Air gap field for PM electric machines [J]. *Electric Machines and Power Systems*, 1985(10): 459-470.
- [10] DAN N, CRAIU D. 2D-Finite Element Analysis of Magnetic Field Coupled with heat Transfer Analysis in PM Brushless Motors [S]. ICEM'94.
- [11] ZHU Z Q, JEWELL G W, HOWE D. Finite element analysis in the design of permanent magnet machines *Current Trends in the Use of Finite Elements (FE) in Electromechanical Design and Analysis* [S]. IEE Seminar on, 2000, 1: 1-1/7.
- [12] ALHAMADI M A. Coupled vector-scalar potential method for 3D magneto static field computations using hexahedral finite elements [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1996(5): 4347-4349.
- [13] WANG R, DEMERDASH N A. A combined vector potential-scalar potential method for FE computation of 3D magnetic fields in electrical devices with iron cores [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1991, 27(5): 3971-3977.
- [14] ERICH SCHMIDT. Application of domain decomposition algorithm in the 3D finite element analysis of a transverse flux machine [J]. *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, 2002: 156-161.
- [15] 赵吉文, 刘永斌, 苏亚辉, 等. 新型直线电机支持向量机非线性建模研究 [J]. *光学 精密工程*, 2006, 14(3): 450-455.
- ZHAO J W, LIU Y B, SU Y H, *et al.*. Research on SVM model of a novel cylinder linear motor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(3): 450-455. (in Chinese)
- [16] SCHONING M, HAMEYER K. Virtual product development for electrical motors [C]. *Proceedings of IEEE International Electric Machines and Drives Conference*, 2007: 949-952.
- [17] PARAG R UPADHYAY, RAJAGOPAL K R. FE analysis and CAD of radial-flux surface mounted permanent magnet brushless DC motors [J]. *IEEE Trans on Magnetics*, 2005, 41(10): 3952-3954.
- [18] 郭向东, 赵争鸣, 孟朔, 等. 大中型变频调速高效电动机的优化电磁设计 [J]. *电工技术学报*, 2003(3): 42-45.
- WU X D, ZHAO ZH M, MENG SH, *et al.*. Electromagnetic design optimization of sized frequency-conversion motors [J]. *Transactions of China Electro Technical Society*, 2003(3): 42-45. (in Chinese)
- [19] 刘刚, 王志强, 房建成. 永磁无刷直流电机控制技术与应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- LIU G, WANG ZH Q, FANG J CH. *Brushless DC motor control and application* [M]. Beijing: China Machine Press, 2008.
- [20] 高庆嘉, 白越, 王鹤. 无刷直流电动机线电流的解析计算 [J]. *微特电机*, 2011, 7: 1-5.
- GAO Q J, BAI Y, WANG H. Analytical calculation of line current for brushless DC motor [J]. *Micro Motor*, 2011, 7: 1-5. (in Chinese)

作者简介:



高庆嘉(1983—),男,辽宁东港人,博士研究生,助理研究员,2010年于中科院长春光机所获得硕士学位,主要从事特种电机设计和低雷诺数旋翼动力学研究。E-mail: gaoqj@ciomp.ac.cn



白越(1979—),男,辽宁北漂人,博士,副研究员,2001年于厦门大学获得学士学位,2006年于中科院长春光机所获博士学位,主要从事飞行器、空间摩擦及润滑学研究。E-mail: baiy@ciomp.ac.cn