

DOI: 10.7652/xjtuxb201605023

集成电机推进器用无刷直流电机 齿槽转矩削减新方法

宋保维^{1,2}, 李玉凯^{1,2}, 程博^{1,2}

(1. 西北工业大学航海学院, 710072, 西安; 2. 西北工业大学水下航行器研究所, 710072, 西安)

摘要: 为消减集成电机推进器用无刷直流电机存在的齿槽转矩以保证整个推进器的性能,综合考虑了推进器的性能要求、尺寸要求、加工工艺等实际情况,以消减齿槽转矩并尽可能减小其对电机输出转矩的影响为目标,提出了一种槽口倾斜综合优化方法。采用 Box-Behnken 设计了实验,并利用响应面法处理实验数据,得到了齿槽槽口倾斜角度、极弧系数和槽口宽度 3 个因素间关系的数学模型,从而计算出了使齿槽转矩最小的槽口倾斜角度、极弧系数和槽口宽度最优解组合。最后,用电磁场分析软件 infolytica/MagNet 求解了各个实验点的参数值,并验证了最优组合预测值。计算结果表明,对于所设计的功率为 2 kW 的集成电机推进器用无刷直流电机,优化后的槽口倾斜角度为 5°,极弧系数为 0.65,槽口宽度为 3 mm,采用此优化参数可使电机齿槽转矩减小 28.69%。

关键词: 集成电机推进器;齿槽转矩;槽口倾斜综合优化;响应面法

中图分类号: TM351 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2016)05-0151-06

A New Method for Reducing Cogging Torque of Brushless DC Motor in Integrated Motor Propulsor

SONG Baowei^{1,2}, LI Yukai^{1,2}, CHENG Bo^{1,2}

(1. School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Institute of Underwater Vehicle, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The cogging torque of brushless DC motor for integrated motor propulsor can seriously affect the performance of integrated motor propulsor. To deal with this problem, this paper considers the requirements of the propulsor's size, processing technology and performance, and presents a slot opening skew comprehensive optimization method to reduce the cogging torque and minimize its influence on the output torque. Using Box-Behnken to design experiments and response surface methodology (RSM) to process experimental data, a mathematical model about the relationship among the angle of slot opening skew, pole-arc coefficient and slot opening width is obtained. Moreover, the optimal combination of the slot opening skew angle, pole-arc coefficient and slot opening width is determined. The electromagnetic field analysis software infolytica/MagNet is used to solve the values at various experimental sites and verify the optimal combination forecast. The results show that for the 2 kW motor designed for this study, when the angle of slot opening skew is 5°, the pole-arc coefficient is 0.65 and the slot opening width is 3 mm, the cogging torque is reduced by about 28.69%.

收稿日期: 2015-10-16。 作者简介: 宋保维(1963—),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51179159)。

网络出版时间: 2016-03-02

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20160302.2014.010.html>

Keywords: integrated motor propulsor; cogging torque; slot opening skew comprehensive optimization; response surface methodology

随着永磁材料性能的不断提高,永磁电机已应用于越来越多的领域。集成电机推进器是一种综合了永磁电机和吊舱式推进器优点的机电一体化产品,使用永磁无刷直流电机驱动,具有体积小、重量轻、结构简单、控制方便等优势。但是,永磁无刷直流电机与一般吊舱式推进器所使用的励磁电机都存在转矩脉冲,不利于推进器的减振、降噪和总体性能的提升。

齿槽转矩是转矩脉冲产生的主要原因,是由转子磁体与定子齿之间的相互作用产生的^[1]。齿槽转矩的削弱可以从控制和电机设计2个角度采用多种方法实现^[2]。电机设计技术通过优化电机的结构参数来实现齿槽转矩的削弱,而控制技术需要准确的电流激励,极大地依赖于传感器的可靠性和精确度^[3]。因此,相比较而言,从电机设计角度来削弱齿槽转矩是更加有效和可靠的。国内外学者从电机设计的角度对齿槽转矩的削弱方法做了大量的研究工作,比较常用的方法有特殊绕组、极弧系数优化、定子斜槽、斜极、槽口宽度优化、槽口偏移、不等气隙、磁极分段错位、磁极偏移、齿顶辅助槽等。

本文从集成电机推进器设计的角度出发,综合考虑推进器的性能要求、尺寸要求、加工工艺等实际情况,提出了一种利用槽口倾斜组合优化削弱电机齿槽转矩的实用方法,采用响应面法求解参数的最优组合值,并用有限元法对优化结果进行了验证。

1 永磁电机模型和齿槽转矩解析分析

1.1 永磁电机模型

集成电机推进器主要由导管、电机、螺旋桨叶片和支撑结构四大部分组成,如图1所示。为研究齿槽转矩的消减方法,笔者设计了一款额定功率为2 kW的集成电机推进器用无刷直流电机,其三维模型见图2,主要参数如下:额定电压为50 V;额定功率为2 kW;额定转速为600 r/min;额定转矩为32 N·m;定子外径为280 mm;定子内径为240 mm;转子外径为236 mm;转子内径为198 mm;轴向长度为72 mm;永磁体厚度为4 mm;极对数为8;定子槽数为48。

使用电磁场仿真分析软件 infolytica/MagNet 对电机进行分析。要分析槽口倾斜对电机齿槽转矩的影响,比较方便的方法是先在 UG(Unigraphics



图1 集成电机推进器模型

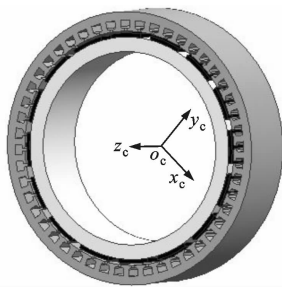
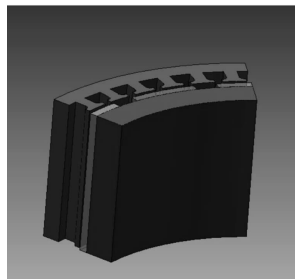
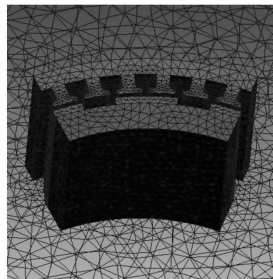


图2 无刷直流电机模型

NX)内建立电机模型,然后导入 infolytica/MagNet 中设定参数求解。由于对电机的整体模型进行三维求解的时间和空间复杂度很高,所以通常选择对电机进行切分,如图3所示。



(a) 无刷直流电机 1/8 模型



(b) 网格剖分图

图3 无刷直流电机的计算模型

然后,在 infolytica/MagNet 中对电机计算模型进行求解,通过部分电机模型的求解结果来反映电机的总体性能。

1.2 齿槽转矩的解析分析

1.2.1 能量变化率 齿槽转矩 T_{cog} 可以用电机内部磁场能量 W 随转子位置角 α 的变化率来表示,即

$$T_{\text{cog}} = -\partial W / \partial \alpha \quad (1)$$

计算时通常将电枢铁心的磁导率视为无穷大,从而使电枢铁心部分的能量损失可以忽略不计,所以只有气隙部分的磁能变化对齿槽转矩的产生起作用。电机磁能可以表示为

$$W \approx \frac{1}{2\mu_0} \int_V B^2 dV \quad (2)$$

式中: B 为气隙磁通密度; μ_0 为真空磁导率; V 为气隙体积。气隙磁通密度与转子位置有关,其沿电枢表面的周向分布可表示为

$$B(\theta, \alpha) = B_r(\theta) \frac{h_m}{h_m + \delta(\theta, \alpha)} \quad (3)$$

式中: h_m 为永磁体充磁方向的长度; $B_r(\theta)$ 和 $\delta(\theta, \alpha)$

分别为永磁体剩磁和有效气隙长度沿圆周方向的分布。因此,气隙磁能可以表示为

$$W_1 = \frac{1}{2\mu_0} \int_v B_r^2(\theta) \left(\frac{h_m}{h_m + \delta(\theta, \alpha)} \right)^2 dV \quad (4)$$

通过研究影响 $B_r^2(\theta)$ 和 $\left(\frac{h_m}{h_m + \delta(\theta, \alpha)} \right)^2$ 的因素,可以找到减小电机齿槽转矩的方法。

1. 2. 2 作用力和 齿槽转矩还可以简单地用各转子磁极与各定子槽相互作用力的和来表示。假设各磁极与各定子槽的作用力相互独立,那么齿槽转矩可以表示为

$$T_{\text{cog}} = \sum_{k=1}^{\infty} T_{\text{km}} \sin(km \chi) \quad (5)$$

式中: m 是定子槽数与磁极数的最小公倍数; χ 是电机磁极和电枢的相对位置; T_{km} 是齿槽转矩的第 k 阶谐波分量的幅值。只要能减小或消除部分齿槽转矩分量,就可以减小电机的齿槽转矩。

2 集成电机推进器电机齿槽转矩消减方法的选择

如前文所述,从设计角度消减永磁电机齿槽转矩有许多方法,在设计时应根据电机用途的不同选择适合其应用场合的方法。定子斜槽是目前应用最为广泛的减小齿槽转矩的措施之一,但是这种方法存在明显的缺点。文献[4]指出,采用定子斜槽、磁极偏移和特殊绕组等措施可降低电机的平均转矩。文献[3]指出,定子斜槽会使电机的结构变得复杂,漏磁通增加,输出转矩降低,特别是对每极齿数较少的电机。文献[5]指出,采用斜槽、斜极、分数槽绕组等方法通过消去特定谐波来减小齿槽转矩,往往会使用无刷直流电机的反电动势偏离梯形波而接近正弦波,对于按方波驱动方式驱动无刷直流电机来说,接近正弦波的反电动势会引起明显的转矩脉冲。

为了消减齿槽转矩,并保证集成电机推进器的输出转矩不会明显下降,同时考虑集成电机推进器加工的工艺性,本文提出了一种优化槽口倾斜角、极弧系数和槽口宽度的方法,其中槽口倾斜是一种较新颖的方法,与定子斜槽不同,它只有槽口倾斜,而定子槽和槽内绕组并没有倾斜。

2. 1 槽口倾斜对电机齿槽转矩的影响

槽口倾斜与定子斜槽不同,如图 4 所示。

文献[3]重点研究了槽口倾斜方法,并将电机总的齿槽转矩等效成定子各层所受转矩的和。将每个磁极及其对应的定子槽看作一个单元,每个单元所

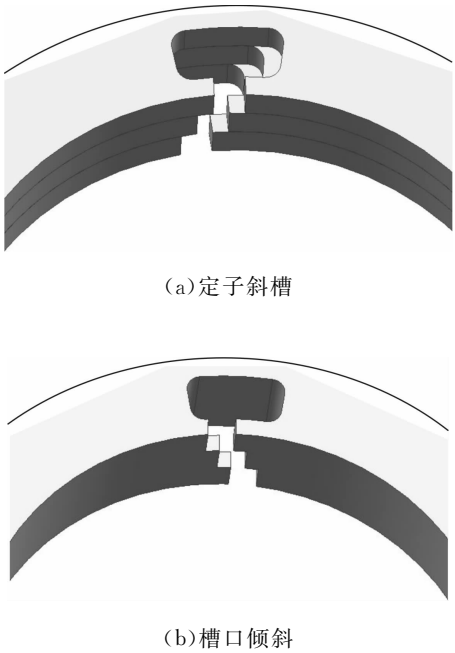


图 4 定子斜槽与槽口倾斜的结构

受的转矩是相似的,所以总齿槽转矩^[3]可以表示为

$$T_{\text{cog}} = P \sum_{l=1}^N \sum_{h=0}^{\infty} T_{hl} \sin(mh(\gamma + \beta_{hl}))$$

式中: T_{hl} 为每个单元磁极的第 l 层定子对应的齿槽转矩的傅里叶系数; N 为定子层数; P 为磁极对数; γ 为转子位置; β_{hl} 为第 l 层定子对应齿槽转矩的第 h 次谐波的相移。

图 5 和图 6 分别是当定子分为 3 层时采用槽口倾斜法的槽口位置示意图和等效结构图^[3]。可以看出,在理想情况下槽口倾斜可以等效为槽口偏移,槽口距分别为 L_1 和 L_2 。槽口偏移法能有效地消除齿槽转矩的某次或几次谐波,且不会引进新的低次谐波^[6]。与槽口偏移相比,槽口倾斜可以更好地保持电机的对称性,更有利于防止由于电机不对称导致的径向电磁力增加。

N极	S极	N极	S极	N极	S极

图 5 槽口倾斜法的每层开槽位置

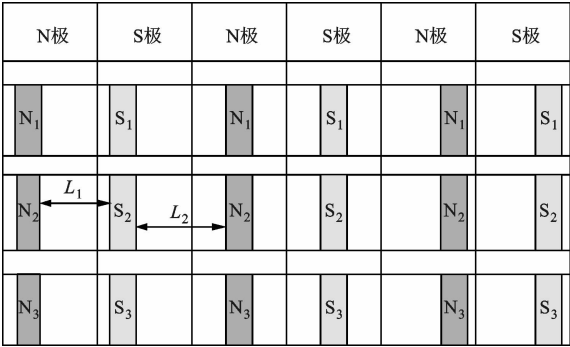


图 6 槽口倾斜法的等效结构

2.2 极弧系数和槽口宽度对齿槽转矩的影响

极弧系数影响电机气隙磁场的分布和磁通密度的大小,进而影响电机齿槽转矩的波形和幅值。文献[7]对极弧系数与齿槽转矩的关系进行了数学推导,发现极弧系数对 $B_{\tau}^2(\theta)$ 的傅里叶分解系数产生影响。对应于不同的极弧系数值,总会有一些特定阶次的 $B_{\tau}^2(\theta)$ 傅里叶分解系数的值很小,并且这些分解系数的分布有一定的规律性^[7]。所以,通过改变极弧系数可以改变齿槽转矩的大小。

直观地看,齿槽转矩产生的原因就是槽口与磁极的相互作用,因此槽口宽度是影响齿槽转矩的重要因素之一。文献[8]重点研究了槽口宽度对齿槽转矩的影响,指出通过改变槽口宽度可以改变一个槽对应的齿槽转矩波形的波峰宽度,而这将改变叠加效果,从而影响总齿槽转矩的大小。

3 利用响应面法获得最优槽口倾斜角、极弧系数和槽口宽度组合

响应面法最初应用于化学和生物学领域,后来逐渐推广到其他领域。响应面法的实质是通过对一定数量实验数据的处理,得出自变量与响应量之间近似的多项式关系。

选择齿槽转矩 T_{cog} 作为响应量,槽口倾斜角 β 、极弧系数 μ 和槽口宽度 λ 作为自变量。目标函数定义为

$$T_{\text{cog}} = f(\beta, \mu, \lambda)$$

根据电机尺寸约束和实际要求,各自变量的取值范围设定为: $0^{\circ} \leq \beta \leq 5^{\circ}$; $0.65 \leq \mu \leq 0.85$; $3 \text{ mm} \leq \lambda \leq 4 \text{ mm}$ 。

Box-Behnken 设计和中心复合设计是常用的拟合响应曲面的实验设计方法,本文采用 Box-Behnken 设计。Box-Behnken 设计的设计点通常较少,所以在相同设计条件下其运行成本比具有相同数量影响因子的中心复合设计的运行成本低。使用

Design-Expert 软件中的 Box-Behnken 设计模块得出实验设计方案,利用有限元软件建立各设计点对应的有限元模型求得齿槽转矩的实际值,将齿槽转矩的峰值填入实际响应值栏。设计方案及响应值如表 1 所示,可见采用 Box-Behnken 设计方法需要 17 个设计点的响应值,相应地需要 17 个计算模型。由于部分设计点的参数相同,所以实际需要建立 14 个电机齿槽转矩分析模型,并对这 14 个电机模型进行求解。将 14 个电机模型按照 $\beta=0^{\circ}$ 、 $\beta=2.5^{\circ}$ 、 $\beta=5^{\circ}$ 分为 a、b、c 三组,对应的齿槽转矩波形图如图 7 所示。将各设计点对应模型的齿槽转矩波形图中的第一个峰值填入表 1 中,便完成了实验设计。

表 1 实验设计方案及实际响应值

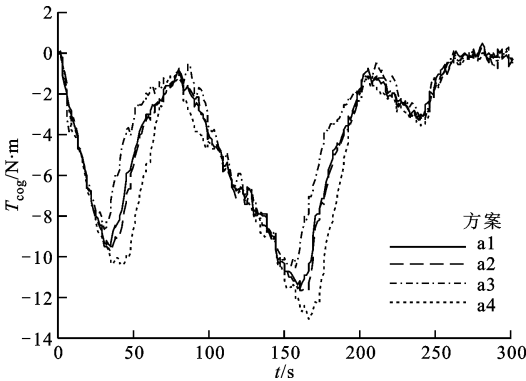
方案编号	$\beta/(^{\circ})$	μ	λ/mm	$T_{\text{cog}}/\text{N} \cdot \text{m}$
a1	0.0	0.75	4.0	9.48
a2	0.0	0.75	3.0	9.74
a3	0.0	0.65	3.5	8.57
a4	0.0	0.85	3.5	10.32
b1	2.5	0.75	3.5	9.35
b2	2.5	0.75	3.5	9.35
b3	2.5	0.75	3.5	9.35
b4	2.5	0.75	3.5	9.35
b5	2.5	0.75	3.5	9.35
b6	2.5	0.85	4.0	9.73
b7	2.5	0.85	3.0	10.47
b8	2.5	0.65	3.0	7.90
b9	2.5	0.65	4.0	7.50
c1	5.0	0.75	4.0	8.75
c2	5.0	0.75	3.0	8.87
c3	5.0	0.65	3.5	7.29
c4	5.0	0.85	3.5	9.89

选择三阶多项式来表示响应量与自变量之间的关系,最终得到的数学模型为

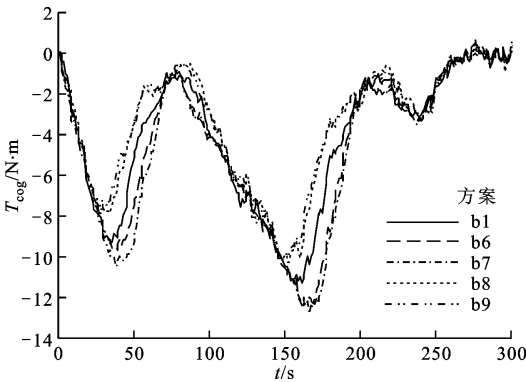
$$\begin{aligned} T_{\text{cog}} = & 51.604 - 2.18\beta - 140.738\alpha - \\ & 16.755\lambda + 3.4\beta\alpha + 0.028\beta\lambda + 55.3\alpha\lambda + \\ & 0.133\beta^2 + 103.625\alpha^2 - 0.515\lambda^2 - \\ & 0.18\beta^2\alpha - 1.1\beta\alpha^2 - 38\alpha^2\lambda \end{aligned}$$

用一个多项式模型在自变量的整个空间上对真实函数关系作合理的近似是不可能的,但在一个相对小的区域内通常是可行的。由这个多项式模型可以求出齿槽转矩最小值与所对应的 3 个自变量的值,从而可实现本文实验设计的目的,即在限定的范围内优化槽口倾斜角、极弧系数和槽口宽度,使得电机的齿槽转矩最小。

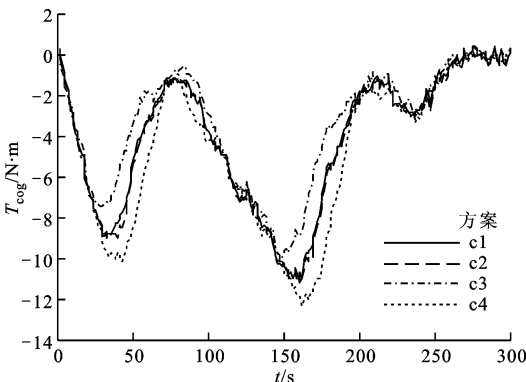
在槽口宽度一定时,齿槽转矩关于极弧系数和槽口倾斜角的响应面如图 8 所示。最优槽口倾斜角、极弧系数与槽口宽度的组合为:倾斜角度 $\beta=5^\circ$;极弧系数 $\mu=0.65$;槽口宽度 $\lambda=3\text{ mm}$ 。此时齿槽转矩 $T_{\text{cog}}=7.136\text{ N}\cdot\text{m}$ 。



(a)a 组电机模型



(b)b 组电机模型



(c)c 组电机模型

图 7 a、b、c 三组电机模型的齿槽转矩波形

4 优化结果分析

取槽口倾斜角为 5° 、极弧系数为 0.65、槽口宽度为 3 mm,建立永磁无刷直流电机三维模型进行有限元分析,得到齿轮转矩的预测结果为 $7.139\text{ N}\cdot\text{m}$;再用电磁场分析软件 infolytica/MagNet 进

行求解,得到的齿槽转矩波形如图 9 所示,可见第一个齿槽转矩峰值 $T_{\text{cog}1}=7.36\text{ N}\cdot\text{m}$,与利用响应面法得到的预测值之间的误差仅为 3.139%。

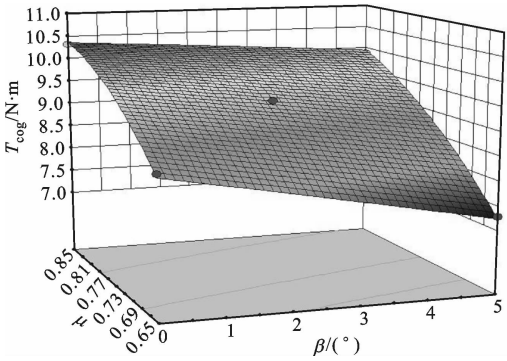


图 8 齿槽转矩关于槽口倾斜角和极弧系数的响应面

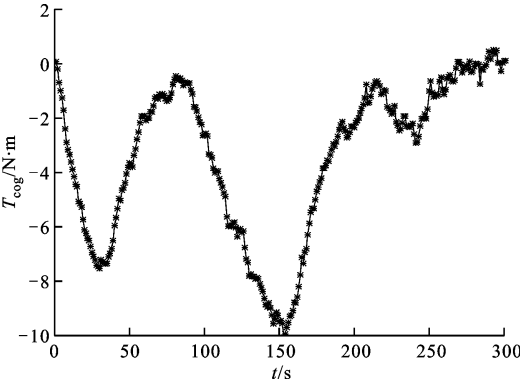


图 9 优化后模型的齿槽转矩

在实际工程中,槽口宽度通常要受导线直径等因素的影响。本文设计的集成电机推进器用电机的槽口宽度可以在 3 到 4 mm 之间选择。在进行响应面分析时发现,当槽口倾斜角度为 5° 、极弧系数为 0.65 时,槽口宽度在 3 到 4 mm 之间变化对齿槽转矩峰值的影响很小,但随着槽口宽度增加,峰值的出现时间提前,如图 10 所示。

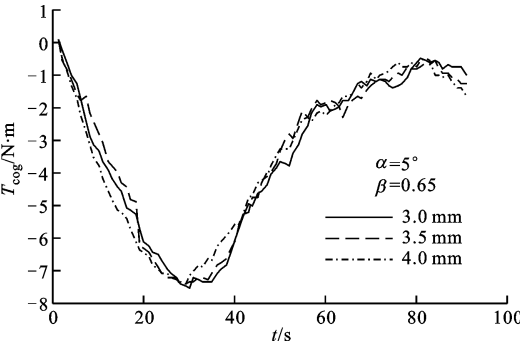


图 10 齿槽转矩随槽口宽度的变化

5 结 论

本文以集成电机推进器用永磁无刷直流电机作

为研究对象,根据电机应用场合提出了一种合适的、在工艺上可实现的消减齿槽转矩的方法,并指出:对于集成电机推进器用无刷直流电机,槽口倾斜法与常用的定子斜槽法相比,可以在消减齿槽转矩的同时不影响反电动势的波形,也不会导致输出转矩的减小。与众多其他方法相比,改变极弧系数和槽口宽度在工艺上更易于实现。通过响应面法设计了实验,并求出了槽口倾斜角、极弧系数和槽口宽度的最优组合: $\beta=5^\circ$; $\mu=0.65$; $\lambda=3\text{ mm}$ 。与槽口不倾斜、极弧系数为0.85、槽口宽度为3.5 mm的基本模型相比,优化后电机的齿槽转矩消减了28.69%,在不影响输出转矩的情况下达到了较好的消减齿槽转矩的效果。

参考文献:

- [1] ABBASZADEH K, REZAEE ALAM F, SAIED S A. Cogging torque optimization in surface-mounted permanent-magnet motors by using design of experiment [J]. *Energy Conversion and Management*, 2011, 52(10): 3075-3082.
- [2] JIA Hongyun, CHENG Ming, HUA Wei, et al. Torque ripple suppression in flux-switching PM motor by harmonic current injection based on voltage space-vector modulation [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2010, 46(6): 1527-1530.
- [3] ABBASZADEH K, REZAEE ALAM F, TESHNEHLAB M. Slot opening optimization of surface mounted permanent magnet motor for cogging torque reduction [J]. *Energy Conversion and Management*, 2012, 55: 108-115.
- [4] GRCAR B, CAFUTA P, STUMBERGER G, et al.

Control-based reduction of pulsating torque for PMAC machines [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2002, 46(6): 169-175.

- [5] 王晓远, 贾旭. 基于槽口优化的电动汽车用大功率无刷直流电机齿槽转矩削弱方法 [J]. *电工技术学报*, 2013, 28(6): 40-45.
WANG Xiaoyuan, JIA Xu. Optimization for the slot opening to reduce cogging torque in high-power BLDC in electric vehicles [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2013, 28(6): 40-45.
- [6] 黄守道, 刘婷, 欧阳红林, 等. 基于槽口偏移的永磁电机齿槽转矩削弱方法 [J]. *电工技术学报*, 2013, 28(3): 99-106.
HUANG Shoudao, LIU Ting, OUYANG Honglin, et al. A method for reducing cogging torque by slot-opening shift in permanent magnet motors [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2013, 28(3): 99-106.
- [7] 王秀和, 杨玉波, 丁婷婷, 等. 基于极弧系数选择的实心转子永磁同步电动机齿槽转矩削弱方法研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2005, 25(15): 146-149.
WANG Xiuhe, YANG Yubo, DING Tingting, et al. The method for reducing cogging torque by suitable selection of pole-arc coefficient in solid-rotor PM synchronous motors [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2005, 25(15): 146-149.
- [8] 董仕镇, 马隽, 沈建新. 减小齿槽转矩的永磁电动机槽口优化设计 [J]. *微电机*, 2007, 40(12): 1-3.
DONG Shizhen, MA Jun, SHEN Jianxin. Optimal slot opening design for cogging torque reduction of PM motor [J]. *Micromotors*, 2007, 40(12): 1-3.

(编辑 葛赵青)

(上接第150页)

- [7] TABUADA P. Event-triggered real-time scheduling of stabilizing control tasks [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2007, 52(9): 1680-1685.
- [8] WANG X, LEMMON M D. Event-triggering in distributed networked systems with data dropouts and delays [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2011, 56(3): 586-601.
- [9] GOEBEL R, SANFELICE R, TEEL A R. Hybrid dynamical systems [J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2009, 29(2): 28-93.

- [10] TEEL A R. Stability theory for hybrid dynamical systems [J]. *Encyclopedia of Systems & Control*, 2013, 43(4): 1-9.
- [11] DONKERS M C F, HEEMELS W P M H. Output-based event-triggered control with guaranteed L_∞ -gain and improved and decentralized event-triggering [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2012, 57(6): 1362-1376.

(编辑 葛赵青)