

# 基于裂比的非晶合金永磁电机设计技术\*

张超<sup>1</sup>, 朱建国<sup>1,2</sup>, 佟文明<sup>1</sup>, 韩雪岩<sup>1</sup>

(1. 沈阳工业大学 国家稀土永磁电机工程技术研究中心, 辽宁 沈阳 110870;

2. 悉尼理工大学, 悉尼 NSW2007)

**摘要:** 非晶合金材料电磁性能优异, 应用于电机领域能显著降低电机铁心损耗, 提高电机效率。针对非晶合金材料的特点, 基于永磁电机基本设计理论, 推导了非晶合金电机铜耗与铁心损耗的解析表达式。基于非晶合金永磁电机损耗的解析表达式对非晶合金永磁电机裂比(定子内外径之比)、磁密比值(气隙磁密与铁心磁密之比)的设计进行了研究, 得出了非晶合金永磁电机裂比、磁密比值的设计规律。在对非晶合金永磁电机设计规律研究的基础上完成了一台非晶合金永磁电机的设计并进行了试验。所做的研究对非晶合金电机设计及优化具有一定的参考价值。

**关键词:** 永磁同步电机; 非晶合金; 裂比; 气隙磁密

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2017)08-0048-06

## Design Technology of Amorphous Alloy Permanent Magnet Motor Based on Split Ratio\*

ZHANG Chao<sup>1</sup>, ZHU Jianguo<sup>1,2</sup>, TONG Wenming<sup>1</sup>, HAN Xueyan<sup>1</sup>

(1. National Engineering Research Center for REPM Machine, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;

2. Sydney University of Technology, Sydney NSW2007, Australia)

**Abstract:** Due to its excellent magnetic performance, amorphous metal offers the potential of reducing the core loss of motors dramatically and improve the motor efficiency. According to the characteristics of amorphous alloy materials, based on the basic design theory of permanent magnet motor, the analytical expression of copper loss and core loss was derived. Through the expression of loss, several key design variables were emphasized: the inner-to-external diameter, the flux density, that assumed a decisive role in the permanent magnet motor. The design rules of amorphous alloy motor were summarized. On the basis of design rules, an amorphous alloy permanent magnet motor was designed and tested. The study had certain reference value for design and optimization of amorphous alloy motor.

**Key words:** permanent magnet synchronous motor (PMSM); amorphous alloy; split ratio; air-gap flux density

## 0 引言

非晶合金带材厚度仅有 0.025 mm, 性能优异, 涡流损耗密度显著低于冷轧硅钢片, 能够显著减小电机中的铁心损耗。但其薄脆硬的物理特性使其难以加工成电机所需的形状。因此, 非晶合

金铁心结构多种多样, 旨在简化非晶合金铁心的加工工艺, 以充分利用非晶合金材料优异的电磁特性<sup>[1-3]</sup>。

目前非晶合金电机以轴向磁通拓扑结构为主, 但随着电机转速的升高, 高速轴向磁通电机的加工制造技术难度较大, 因此, 本文重点研究非晶

\* 基金项目: 国家自然科学基金(51307111); 国家科技支撑计划(2013BAE08B00); 辽宁省教育厅科学技术研究项目(L2013049)

作者简介: 张超(1988—), 男, 博士研究生, 研究方向为永磁电机及其控制。

朱建国(1958—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为永磁电机及其控制。

合金径向磁通永磁电机的设计技术。

与传统硅钢片相比,非晶合金带材饱和磁密低、损耗小,导致非晶合金电机设计参数与传统硅钢片电机不同。磁密大小对电机的损耗有直接的影响<sup>[4]</sup>,不合理的磁密设计不利于电机性能的提高。裂比是永磁电机几何参数中非常重要的参数,裂比的大小对永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)的转矩密度、损耗等有着直接的影响<sup>[5-6]</sup>。诸自强<sup>[7-10]</sup>等人就裂比对 PMSM 转矩密度的影响做了大量的研究工作,丰富了传统 PMSM 的设计研究。非晶合金作为一种新型材料,其在电机中的应用还较为少见,设计参数的取值无成熟经验可参考。

本文针对一台额定功率 1.57 kW、转速 3 000 r/min 的永磁电机展开非晶合金 PMSM 设计技术的研究。从减小电机损耗的角度出发,推导出非晶合金 PMSM 损耗与磁密、定子裂比的解析表达式,研究其设计参数与损耗之间的关系,得到非晶合金 PMSM 参数设计规律,为非晶合金 PMSM 的优化设计提供一定的参考。

## 1 非晶合金 PMSM 参数的解析计算

从 PMSM 转矩出发推导 PMSM 铜耗、铁心损耗与裂比及磁密的关系。该解析式能够更加直观地反映电机几何参数对电机损耗的影响,便于后续的分析研究。电机参数如表 1 所示。

表 1 电机主要参数

| 参数                          | 数值    |
|-----------------------------|-------|
| 相数                          | 3     |
| 额定功率/W                      | 1 570 |
| 额定转速/(r·min <sup>-1</sup> ) | 3 000 |
| 极数                          | 8     |
| 槽数                          | 36    |

### 1.1 转矩与电流的关系

从转矩与电流的关系出发推导非晶合金表贴式 PMSM 转矩的解析表达式。表贴式 PMSM 采用  $i_d=0$  的控制方式,表贴式 PMSM 的相量图如图 1 所示。

考虑 PMSM 气隙磁场的端部效应,引入电枢计算长度  $L_{ef}$ 。由于电枢铁心的轴向长度  $L_1$  远大于气隙长度  $\delta$ ,因此在解析计算中电枢长度可近似取值  $L_{ef}=L_1+2\delta$ 。

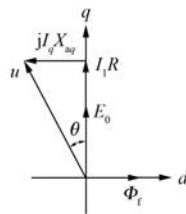


图 1 PMSM 相量图

根据图 1 所示的 PMSM 相量图可以求得 PMSM 的转矩如式(1)所示<sup>[11]</sup>。

$$T_{em} = \frac{mpE_0U}{\omega X_d} = \frac{\sqrt{2}}{4} \frac{\pi m N I_1 k_{dp} B_{\delta l} L_{ef} D_{il}^2}{p \tau_1} \quad (1)$$

式中:  $D_{il}$ ——PMSM 定子内径;

$B_{\delta l}$ ——气隙磁密基波幅值;

$k_{dp}$ ——绕组系数;

$N$ ——永磁电机每相串联匝数;

$m$ ——电机相数。

### 1.2 电机铜耗、铁心损耗的解析计算

着重推导铜耗、铁心损耗与电机裂比和磁密之间的关系,更直观地体现 PMSM 几何尺寸和磁密对电机损耗的影响,便于研究 PMSM 各参数间的内在联系。为了简化解析计算的表达式,使各参数间解析关系清晰明了,本文基于简化的定子槽型进行解析推导。简化槽型如图 2 所示。

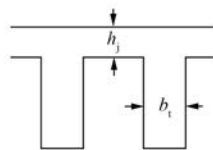


图 2 简化槽型

非晶合金定子槽型尺寸受电机铁心磁密的限制,因此,基于 PMSM 的铁心磁密可以求得非晶合金定子铁心的槽型尺寸<sup>[12]</sup>。PMSM 的气隙磁密、铁心磁密分别为  $B_{\delta}$ 、 $B_m$ 。理想情况下,一个齿距内的磁通全部进入齿中,则可求得非晶合金定子齿宽表达式如式(2)所示。

$$b_t = \frac{B_{\delta} \pi D_{il} L_{ef}}{L_1 k_{Fe} B_m Q} \quad (2)$$

式中:  $Q$ ——定子槽数;

$k_{Fe}$ ——非晶合金铁心叠压系数。

由于一个极距内的气隙磁通进入齿部及轭部,考虑 PMSM 气隙磁场的分布,引入计算极弧

系数  $\alpha_i$ , 在适当简化的前提下可计算轭部高度如式(3)所示。

$$h_j = \frac{B_\delta \pi \alpha_i D_{il} L_{ef}}{4pL_1 k_{Fe} B_m} \quad (3)$$

根据定子内外径及式(3)可以确定非晶合金铁心定子齿高如式(4)所示。其中,  $D_1$  为 PMSM 定子外径。

$$h_t = \frac{D_1 - D_{il}}{2} - h_j \quad (4)$$

根据非晶合金电机定子槽的几何关系以及式(2)~式(4)进而求得非晶合金定子槽面积如式(5)所示。

$$S_{slot} = \frac{\pi}{4Q}(D_1 - 2h_j)^2 - \frac{\pi D_{il}^2}{4Q} - b_t h_t \quad (5)$$

定子槽通常被铜线、绝缘材料及槽楔填充, 为便于计算, 设  $S_f$  为定子槽内裸铜线占有率, 进而可求得每个槽中裸铜线的面积如式(6)所示。

$$S_{Cu} = S_f S_{slot} \quad (6)$$

利用电阻与铜线面积及长度的关系, PMSM 每相电阻的表达式如式(7)所示。

$$R = \rho \frac{4mL_{av} N^2}{S_{Cu} Q} \quad (7)$$

最终根据  $P_{Cu} = mI^2 R$  求得电机铜耗表达式如式(8)所示, 其中磁密比值  $\lambda = B_\delta/B_m$ , 裂比  $\gamma = D_{il}/D_1$ 。

$$P_{Cu} = k_1 / [(\lambda \gamma)^2 (1 + k_2^2 \lambda^2 \gamma^2 - 2k_2 \lambda \gamma - \gamma^2 - 2k_3 \lambda \gamma^2 + 2k_2 k_3 \lambda^2 \gamma^2)] \quad (8)$$

其中:  $k_1 = \frac{32T^2 \rho L_{av}}{\pi S_f (k_f B_m L_{ef} k_{dp} D_1^2)^2}$

$$k_2 = \frac{\alpha_i \pi L_{ef}}{2pL_1 k_{Fe}}$$

$$k_3 = \frac{L_{ef}}{L_1 k_{Fe}}$$

此外, 根据 PMSM 齿槽的几何关系, 求得非晶合金电机齿部体积表达式如式(9)所示。

$$V_t = QL_1 k_{Fe} h_t b_t \quad (9)$$

同理可求得 PMSM 的轭部体积表达式如式(10)所示。

$$V_j = \pi L_1 k_{Fe} h_j (D_1 - h_j) \quad (10)$$

将式(9)与式(10)表示为磁密比值与裂比的函数, 则可得到式(11)与式(12)。

$$V_t = \lambda \gamma \pi D_1^2 L_{ef} \left( \frac{1 - \gamma}{2} - \frac{1}{2} k_2 \lambda \gamma \right) \quad (11)$$

$$V_j = \frac{1}{2} \lambda \gamma \pi D_1^2 L_1 k_{Fe} k_2 \left( 1 - \frac{1}{2} k_2 \lambda \gamma \right) \quad (12)$$

进而可求得非晶合金铁心齿部及轭部的损耗为

$$P_t = G \rho_{Am} V_t \quad (13)$$

$$P_j = G \rho_{Am} V_j \quad (14)$$

式中:  $G$ ——非晶合金铁心损耗密度;

$\rho_{Am}$ ——非晶合金铁心质量密度。

则非晶合金电机的铁心损耗为

$$P_{Am} = G \rho_{Am} \lambda \gamma \pi D_1^2 L_{ef} \left( \frac{1 - \gamma}{2} - \frac{1}{2} k_2 \lambda \gamma \right) + \frac{1}{2} G \rho_{Am} \lambda \gamma \pi D_1^2 L_1 k_{Fe} k_2 \left( 1 - \frac{1}{2} k_2 \lambda \gamma \right) \quad (15)$$

根据非晶合金 PMSM 铜耗与铁心损耗的表达式, 即可求得二者之和与裂比、磁密比值的关系。

$$P_1 = P_{Cu} + P_{Am} \quad (16)$$

## 2 设计参数对非晶合金 PMSM 损耗的影响

基于前文的铜耗与铁心损耗的解析表达式展开设计参数对损耗影响的研究。从铜耗的表达式(8)可以看出铜耗主要跟裂比、铁心磁密有关, 式(15)所示的铁心损耗表达式显示铁心损耗主要受裂比、铁心磁密的影响。

### 2.1 定子裂比 $\gamma$ 对非晶合金 PMSM 损耗的影响

定子裂比  $\gamma$  不仅对 PMSM 的转矩密度产生影响, 而且对 PMSM 损耗的影响也较大。非晶合金材料的电磁性能与传统硅钢片电机有较大的区别, 非晶合金电机裂比  $\gamma$  对电机损耗的影响规律也不同于传统硅钢片电机。

基于前文推导的非晶合金永磁电机损耗的解析表达式, 分析了定子裂比  $\gamma$  对非晶合金 PMSM 损耗的影响, 分别分析了磁密比值  $\lambda$  在 0.2、0.4、0.6 情况下, 非晶合金 PMSM 损耗与定子裂比  $\gamma$  的关系。非晶合金 PMSM 铜耗  $P_{Cu}$ 、铁心损耗  $P_{Am}$ 、总损耗(铜耗与铁心损耗之和)  $P_1$  与定子裂比  $\gamma$  的关系如图 3~图 5 所示。

根据图 3 所示的非晶合金 PMSM 铜耗的计算结果, 在磁密比值  $\lambda$  一定的情况下, 随着定子裂

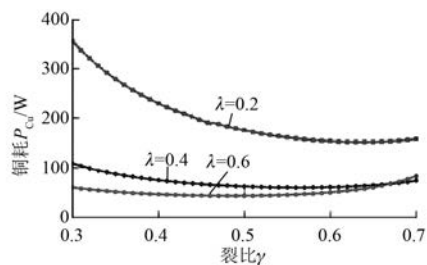


图3 不同磁密比值下,铜耗与裂比的关系

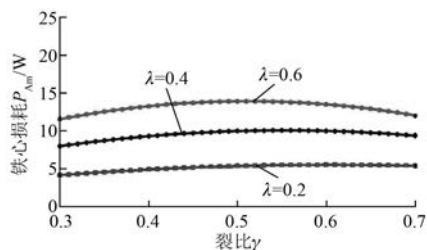


图4 不同磁密比值下,铁心损耗与裂比的关系

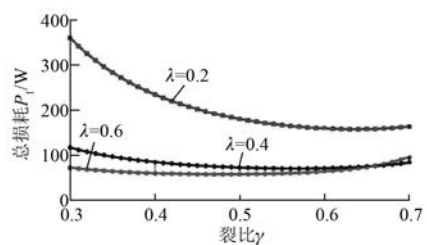


图5 不同磁密比值下,总损耗与裂比的关系

比  $\gamma$  的减小,铜耗  $P_{Cu}$  呈现先减小后增加的趋势,这是因为在反电动势一定的情况下,随着非晶合金 PMSM 定子裂比  $\gamma$  的增大,电机绕组匝数减小,从而导致铜耗降低,随着电机裂比  $\gamma$  的继续增加,定子槽面积大幅减小,导致绕组电阻增加,铜耗增大。在磁密比值  $\lambda$  较大的情况下,铜耗对电机裂比  $\gamma$  变化不敏感,裂比容许设计范围较宽,而在磁密比值  $\lambda$  较小的情况下,铜耗对电机裂比敏感,裂比容许设计范围较窄,这对非晶合金 PMSM 裂比的设计提出了较高要求。

图4所示的非晶合金铁心损耗  $P_{Am}$  与裂比  $\gamma$  的关系。由于非晶合金铁心高频低损耗的特性,裂比  $\gamma$  对非晶合金 PMSM 铁心损耗的影响非常有限,在裂比变化范围内,铁心损耗变化不大。

从图5所示的总损耗与裂比  $\gamma$  的关系曲线可以看出,非晶合金 PMSM 的裂比设计要注意绕组铜耗对电机性能的影响。

非晶合金 PMSM 裂比的设计可以在铜耗最小点附近取值。根据铜耗的表达式(8),令其对  $\gamma$  的偏导数为零,即可求得最小铜耗时的裂比  $\gamma$  值,如式(17)所示。

$$\gamma = \frac{-b_2 - \sqrt{b_2^2 - 4a_2c_2}}{2a_2} \quad (17)$$

其中:  $a_2 = 2k_2^2\lambda^3 - 2\lambda - 4k_3\lambda^2 + 4k_2k_3\lambda^3$

$$b_2 = 3k_2\lambda^2$$

$$c_2 = \lambda$$

## 2.2 磁密比值 $\lambda$ 对非晶合金电机损耗的影响

基于非晶合金高频低损耗的特点,气隙磁密与铁心齿磁密的比值  $\lambda$  对损耗的影响规律也不同于传统硅钢片电机。根据非晶合金 PMSM 损耗与磁密比值  $\lambda$  的解析表达式,不同裂比  $\gamma$  下,非晶合金 PMSM 损耗与磁密的关系如图6~图8所示。

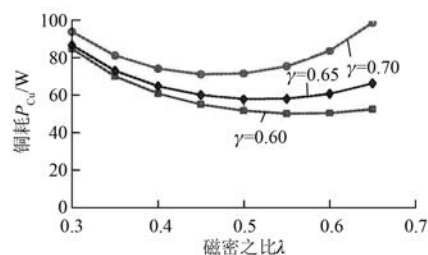


图6 不同裂比下,铜耗与磁密比值的关系

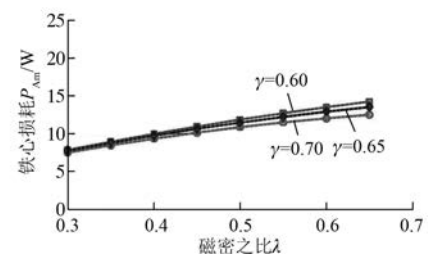


图7 不同裂比下,铁心损耗与磁密比值的关系

图6为非晶合金 PMSM 绕组铜耗  $P_{Cu}$  与磁密比值  $\lambda$  之间的关系。随着磁密比值  $\lambda$  的增加,非晶合金 PMSM 绕组铜耗呈先减小后增加的趋势,与铜耗和裂比的关系相比,绕组铜耗对磁密比值敏感,磁密比值容许设计范围有限。在反电动势不变的情况下,随着磁密比值的增加,绕组串联匝数减少,铜耗降低,随着磁密比值的进一步增加,非晶合金永磁电机槽面积减小,导致绕组电阻增大,铜耗增加。

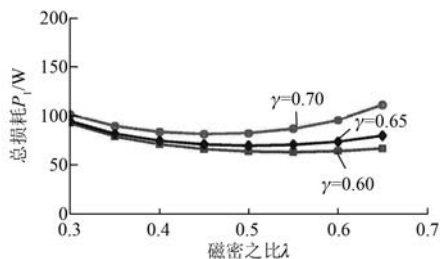


图8 不同裂比下,总损耗与磁密比值的关系

图7所示为非晶合金铁心损耗 $P_{Am}$ 与磁密比值 $\lambda$ 之间的关系,与裂比对非晶合金铁心损耗的影响相比,磁密比值对非晶合金铁心损耗的影响较大。但是,由于非晶合金铁心本身的低损耗特性,从图8所示总损耗与磁密比值之间的关系可以看出,非晶合金铁心损耗对总损耗影响较小。因此,磁密比值的设计可以着重考虑磁密比值对铜耗的影响,因为铜耗对磁密比值 $\lambda$ 敏感,容许设计范围窄。

根据铜耗的表达式(10),令 $P_{Cu}$ 对 $\lambda$ 的导数为零,即可求得铜耗最小时的磁密比值 $\lambda$ 的大小,如式(18)所示。

$$\lambda = \frac{-b_1 - \sqrt{b_1^2 - 4a_1c_1}}{2a_1} \quad (18)$$

其中:  $a_1 = 2k_2^2\gamma^2 + 4k_2k_3\gamma^2$

$b_1 = 3k_3^2\gamma^2 - 3k_2\gamma - 3k_3\gamma$

$c_1 = 1 - \gamma^2$

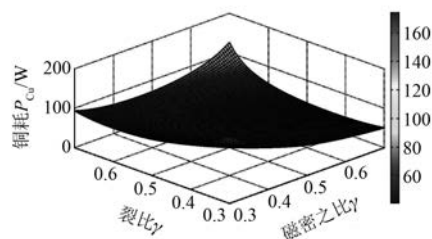
### 2.3 裂比 $\gamma$ 与磁密比值 $\lambda$ 对绕组铜耗的综合影响

基于以上分析,可以看出,由于非晶合金的高频低损耗特性,裂比 $\gamma$ 及磁密比值 $\lambda$ 对非晶合金电机铁心损耗的影响有限,非晶合金PMSM铁心损耗对裂比与磁密比值不敏感。但是,裂比及磁密比值对非晶合金电机铜耗的影响较大,不合理的取值将导致非晶合金电机铜耗急剧增加。根据式(19)综合考虑裂比以及磁密的比值对非晶合金电机铜耗的影响。

$$\begin{cases} \frac{\partial P_{Cu}}{\partial \lambda} = 0 \\ \frac{\partial P_{Cu}}{\partial \gamma} = 0 \end{cases} \quad (19)$$

图9为非晶合金电机铜耗与裂比及磁密比值的规律。随着裂比 $\gamma$ 的逐渐增加,最小铜耗

对应的磁密比值 $\lambda$ 逐渐减小,而且铜耗对磁密比值的敏感性增加;随着裂比 $\gamma$ 的逐渐减小,虽然铜耗对磁密比值 $\lambda$ 的敏感性减小,但是如果磁密比值 $\lambda$ 设计过低将导致铜耗的显著增大。随着磁密比值 $\lambda$ 的逐渐增加,最小铜耗对应的裂比也逐渐减小,铜耗对裂比 $\gamma$ 的敏感性减小;随着磁密比值 $\lambda$ 的逐渐减小,铜耗对裂比的敏感性增加,裂比 $\gamma$ 的容许设计范围缩小。从磁密比值 $\lambda$ 以及裂比 $\gamma$ 的全局优化出发,非晶合金电机铜耗最小值集中在磁密比值 $\lambda$ 大、裂比 $\gamma$ 小的范围内,但是在电机设计中,裂比 $\gamma$ 越小、磁密比值 $\lambda$ 越大,对永磁体性能也提出了更高要求。

图9 铜耗随 $\gamma$ 、 $\lambda$ 的变化

## 3 样机与试验验证

基于上述裂比、磁密比值对非晶合金电机损耗影响的分析,设计制造了一台裂比 $\gamma = 0.66$ 、磁密比值 $\lambda = 0.5$ 的非晶合金PMSM,并搭建了样机试验平台,如图10所示。



图10 测试系统实物图

电机转速3000 r/min时,绕组铜耗与铁心损耗大小随转矩变化如图11所示。从测试结果可以看出,转矩大于1.6 N·m的情况下,绕组铜耗大于铁心损耗,在非晶合金PMSM设计中基于铜耗最小值的设计准则是可行的。非晶合金应用于PMSM中能显著减小电机铁心损耗,有利于提高PMSM效率。

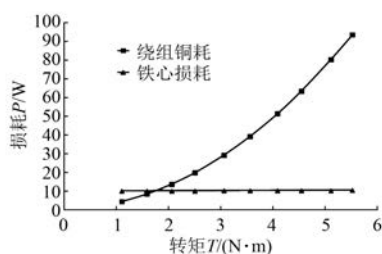


图 11 损耗测量值

## 4 结 语

本文推导了非晶合金 PMSM 损耗与设计参数裂比、磁密比值的解析表达式,在该表达式的基础上研究了磁密比值以及裂比对非晶合金 PMSM 损耗的影响,得到了非晶合金电机裂比、磁密比值的设计规律。非晶合金 PMSM 的铜耗对磁密比值、裂比等设计参数敏感。非晶合金 PMSM 的磁密比值、裂比基于最小铜耗值进行设计,有利于充分发挥非晶合金材料优异的电磁特性。基于最小铜耗的设计方法,本文给出了最小铜耗下裂比、磁密比值的解析表达式,为高效非晶合金 PMSM 的优化设计提供参考。

### 【参考文献】

- [1] LIEW G S, SOONG W L, ERTUGRUL N, et al. Analysis and performance investigation of an axial-field PM motor utilising cut amorphous magnetic material [C] // Universities Power Engineering Conference (AUPEC), Christchurch, 2010: 1-6.
- [2] WANG Z, ENOMOTO Y, ITO M, et al. Development of a permanent magnet motor utilizing amorphous wound cores [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2010, 46(2): 570-573.
- [3] WANG Z, ENOMOTO Y, MASAKI R, et al. Development of a high speed motor using amorphous metal cores [C] // 2011 IEEE 8th International

- Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE & ECCE), Jeju, 2011: 1940-1945.
- [4] DEMS M, KOMEZA K. Performance characteristics of a high-speed energy-saving induction motor with an amorphous stator core [C] // 2012 International Conference on Electrical Machines (ICEM), Marseille, 2012: 2454-2461.
- [5] BIANCHI N, BOLOGNANI S, LUISE F. Analysis and design of a PM brushless motor for high-speed operations [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2005, 20(3): 629-637.
- [6] BIANCHI N, BOLOGNANI S, LUISE F. High speed drive using a slotless PM motor [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2006, 21(4): 1083-1090.
- [7] EDE J D, ZHU Z Q, HOWE D. Optimal split ratio for high-speed permanent magnet brushless DC motors [C] // Electrical Machines and Systems, 2001, Shenyang, 2001: 909-912.
- [8] WU L J, ZHU Z Q, CHEN J T, et al. Optimal split ratio in fractional-slot interior permanent-magnet machines with non-overlapping windings [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2010, 46(5): 1235-1242.
- [9] SHEN Y, ZHU Z Q. Analytical prediction of optimal split ratio for fractional-slot external rotor PM brushless machines [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47(10): 4187-4190.
- [10] CHU W Q, ZHU Z Q, CHEN J T. Simplified analytical optimization and comparison of torque densities between electrically excited and permanent-magnet machines [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(9): 5000-5011.
- [11] 唐任远.现代永磁电机理论与设计[M].北京:机械工业出版社,2008.
- [12] 陈世坤.电机设计[M].2版.北京:机械工业出版社,2000.

收稿日期: 2016-12-19

### 【期刊订阅】

在邮局漏订的读者,可直接从邮局汇款至我杂志社发行部补订

地址:上海市武宁路505号《电机与控制应用》发行部

邮编:200063 电话:021-62574990-745 传真:021-62576377

国内邮发代号:4-199 每册定价:12.00元 全年定价:144.00元