

本文全文线上首发由
上海电机系统节能工程技术
研究中心有限公司
支持

隋嘉庆,冯桂宏,张炳义.
基于不等磁极组合的外转子内置式永磁
同步电机转矩脉动抑制研究.
电机与控制应用,2022,49(3):61.



SEARI
上电科

NCMS
上科电机

www.nems.com.cn

掌握电机行业制造核心技术,
辐射智能制造产业发展



科技改变未来
智慧创造价值

· 业务范围 ·



异步电机装配线



永磁电机装配线



悬挂链电机喷漆线

上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司 www.nems.com.cn

地址: 上海市武宁路505号 手机: 18918357509 电话: 021-62574990-436

传真: 021-62163904 邮箱: wangcj@seari.com.cn

基于不等磁极组合的外转子内置式永磁同步电机转矩脉动抑制研究

隋嘉庆, 冯桂宏, 张炳义

(沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

摘要: 转矩脉动是影响电机性能的重要因素。针对常规的内置式永磁电机转矩脉动较大的问题, 提出了一种保持永磁体总量不变的不等磁极组合方法, 使某一磁极的极弧长度与其他磁极不同来抑制转矩脉动, 给出了详细推导过程和磁极参数确定方法, 并与斜槽结构做了性能对比。针对外转子内置式结构, 对比分析了隔磁桥和磁障两种隔磁措施, 建立了有限元模型对其进行仿真验证。最终研制了一台 55 kW, 2 500 r/min 的样机, 试验数据与仿真结果相吻合, 验证了所提方法对齿槽转矩和反电动势谐波有着显著削弱效果, 能够有效抑制转矩脉动, 提高电机性能, 具有一定工程实际意义。

关键词: 外转子; 内置式永磁电机; 转矩脉动; 齿槽转矩; 磁障

中图分类号: TM351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2022)03-0061-07

doi: 10.12177/emca.2021.205

Research on Torque Ripple Suppression of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor with Outer Rotor Based on Unequal Magnetic Pole Combination

SUI Jiaqing, FENG Guihong, ZHANG Bingyi

(School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: Torque ripple is an important factor affecting the performance of motor. Aiming at the problem of large torque ripple in normal interior permanent magnet motors, an unequal magnetic pole combination method keeping the total amount of permanent magnet unchanged is proposed. The method makes the pole-arc length of a magnetic pole different from other magnetic poles to suppress torque ripple. The detailed derivation process and the determination method of magnetic pole parameters are given, and the performance is compared with the skewed slot structure. Aiming at the interior structure of the outer rotor, two magnetic isolation measures of magnetic bridge and magnetic barrier are compared and analyzed, and the finite element modeling method is established for simulation and verification of the structure. Finally, a 55 kW, 2 500 r/min motor is developed, and the experimental data are consistent with the simulation results, verifying that the proposed method has a significant weakening effect on cogging torque and back electromotive force (EMF) harmonics. It can effectively suppress torque ripple and improve the motor performance and has practical engineering significance.

Key words: outer rotor; interior permanent magnet motor; torque ripple; cogging torque; magnetic barrier

收稿日期: 2021-12-10; 收到修改稿日期: 2022-02-18

作者简介: 隋嘉庆(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为特种电机及其控制。

冯桂宏(1963—), 女, 硕士, 教授, 研究方向为特种电机及其控制。

张炳义(1954—), 男, 博士, 教授, 研究方向为特种电机及其控制。

0 引言

永磁同步电动机因其具有高功率密度、节能效果好、易于调速等优点,已广泛应用于当今时代的各个领域。而外转子永磁同步电机与常规电机结构不同,是转子在外部、定子在内、工作时保持机轴固定不动、外部转子旋转的结构,同时该种结构可以直接将风叶和轮毂安装在外转子上,具有结构紧凑、重量小、转动惯量大等特点,因此备受风机等行业所青睐^[1]。

内置式永磁同步电机(IPMSM)比表贴式结构具有更高的功率密度以及对永磁体更好的保护效果,但IPMSM的转矩脉动较大会引起振动且噪声严重,影响了电机性能。引起转矩脉动的因素有很多,主要有齿槽转矩、反电动势谐波、定子电流谐波等^[2-3]。

现有的方法多数是从电机本体设计角度来对转矩脉动进行削弱。文献[4-5]采用了不等极系数组合的方法,通过调整磁极的张开角度使每个磁极产生的齿槽转矩具有相位差,从而降低总的齿槽转矩,但对于外转子内置式结构,改变磁极张开角度易产生较大漏磁,导致电机性能降低。文献[6-7]研究了一种不等齿(槽)宽组合结构,该结构可以有效降低齿槽转矩,并能避免不等磁拉力。文献[8]采用田口法对磁障的位置与形状进行优化设计,新转子结构提高了气隙磁密幅值,降低了谐波畸变率。文献[9]采用了转子分段斜极结构,可以大幅度减小齿槽转矩、抑制转矩脉动,但对于IPMSM,该方法会给永磁体安装、转子冲片叠压带来极大的困难。文献[10]通过定子斜槽来削弱齿槽转矩,对比分析了不同斜槽角度下的电机性能,但斜槽方法加工工艺困难,并且会产生轴向不等磁拉力,缩短轴承使用寿命。文献[11-12]中通过优化隔磁桥和辅助槽的形状,对外转子IPMSM的转矩脉动进行抑制。

斜槽与斜极是应用广泛且行之有效的削弱齿槽转矩、抑制转矩脉动的方法,理论上可以完全消除齿槽转矩,但带来了加工工艺困难、增加生产成本等问题。本文以一台6极36槽的外转子IPMSM为例,研究了一种工艺简单、经济适用的斜槽替代方法,采用不等磁极组合结构,使某一磁极与其他磁极的极弧长度不同,对齿槽转矩和空

载反电动势谐波进行削弱,给出了详细推导过程和磁极参数的计算方法,并与斜槽结构进行了性能对比。同时本文分析了隔磁桥和磁障两种不同的隔磁结构,通过有限元建模仿真,给出了不同结构下的性能结果。最终研制了一台55 kW风机用外转子IPMSM,来验证本文方法的准确性。

1 不等磁极组合结构

本文样机是一台55 kW,2 500 r/min的外转子IPMSM,采用6极36槽的极槽配合,内置式V字型的转子磁路结构,节距为5的分布式双层叠绕组,初始电机参数如表1所示。该电机存在一个磁极与其他磁极不同,定义唯一不同磁极极弧长度为 θ_1 ,其余 $2p-1$ 个磁极的极弧长度为 θ_2 ,两磁极之间的极弧长度为 θ_3 ,因此在圆周方向转子磁极具有不相等的极弧长度分布,其中电机结构如图1所示。当定转子发生相对位移时,影响齿槽转矩的磁极边缘位置磁导变化不同,造成不等磁极之间的齿槽转矩具有相位差,使部分齿槽转矩可相互抵消,达到削弱总齿槽转矩的效果。同时由于磁极极弧长度分布不同,每相每极下槽数为分数,使得反电动势中齿谐波次数为分数,减少了主磁极中奇次谐波含量,从而降低了转矩脉动。

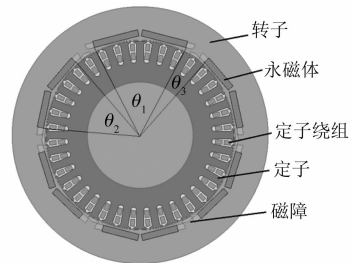


图1 不等磁极组合电机结构图

表1 初始电机参数

参数名称	参数值
额定功率/kW	55
额定电压/V	1 140
额定转速/(r·min ⁻¹)	2 500
极/槽数	6/36
转子内径/mm	296
永磁体牌号	N38SH
永磁体宽度/mm	120
永磁体厚度/mm	10

2 转矩脉动分析

2.1 齿槽转矩分析与计算

齿槽转矩,又名定位转矩,是永磁电机的一种固有属性,是指电机在未加激励时转子磁极产生的磁场与定子齿槽相互作用产生的转矩,齿槽转矩可定义为

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

式中: W 为绕组未加激励时磁场储存的能量; α 为定转子相对位置角度。

假设永磁体的磁导率与空气近似相等、忽略铁心饱和以及磁滞损耗的影响,在未采用斜极和斜槽的情况下,则齿槽转矩的表达式为

$$T_{\text{cog}}(\alpha) = -\frac{\pi z L}{4\mu_0} (R_2^2 - R_1^2) \sum_{n=1}^{\infty} n G_m B_m \sin n z \alpha \quad (2)$$

式中: z 为定子槽数; L 为电枢铁心轴向长度; μ_0 为真空磁导率; R_1 和 R_2 分别为电枢外半径和定子内半径; B_m 和 G_m 分别为受转子磁极和齿槽结构所影响的傅里叶展开系数; n 为让 $nz/2p$ 是整数的整数。

由式(2)可知,齿槽转矩的大小与 $B_r^2(\theta)$ 的傅里叶展开系数 B_m 有着密切关系,而本文采用的不等磁极组合方法,使 $B_r^2(\theta)$ 分布与常规电机存在不同。假设电机内部每极磁通相等,则 $B_r^2(\theta)$ 沿圆周分布如图2所示。

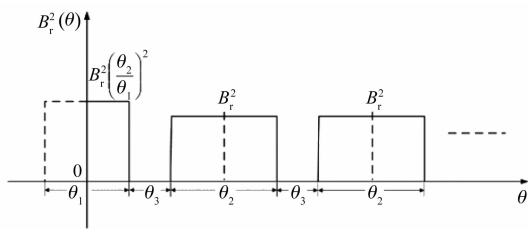


图2 $B_r^2(\theta)$ 沿圆周方向的分布

此时 B_m 的表达式为

$$B_m = \frac{2B_r^2}{m\pi} \cdot$$

$$\left\{ k_1^2 \sin \left[m \frac{\pi - p\theta_3}{1 + (2p - 1) k_1} \right] + 2 \sin \left[m k_1 \frac{\pi - p\theta_3}{1 + (2p - 1) k_1} \right] \right\} \cdot \sum_{i=1}^{p-1} \cos m \left[\frac{2\pi - 2p\theta_3}{1 + (2p - 1) k_1} \left[\frac{1}{2} + \left(i - \frac{1}{2} \right) k_1 \right] + i\theta_3 \right] +$$

$$2 \sin \left[\frac{m k_1}{2} \frac{\pi - p\theta_3}{1 + (2p - 1) k_1} \right] \cdot \cos \left[m \pi - \frac{m k_1}{2} \frac{\pi - p\theta_3}{1 + (2p - 1) k_1} \right] \quad (3)$$

式中: B_r 为永磁体剩磁; k_1 被定义为 θ_2 与 θ_1 的比值。 k_1 表达式为

$$k_1 = \frac{\theta_2}{\theta_1} \quad (4)$$

当定转子发生相对位移,各磁极边缘磁导变化不同,使每个磁极产生的齿槽转矩存在相位差,通过改变 k_1 可调整相位差值,从而对总的齿槽转矩进行削弱。而经过相互抵消后最终只有 B_m 的 mz ($m = 1, 2, 3, \dots$) 次系数对齿槽转矩有影响,以本文6极36槽电机为例,只需减小 B_m ($B_{r36}, B_{r72}, B_{r108}, B_{r144} \dots$) 的幅值即可降低齿槽转矩,由式(3)可得到 B_m 随 k_1 变化曲线,如图3所示。

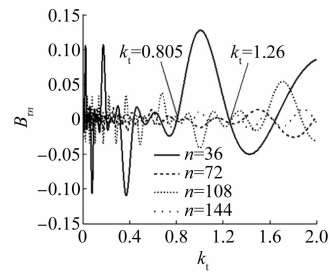


图3 B_m 随 k_1 变化曲线

由图3可知,当 $k_1 = 0.805$ 和 $k_1 = 1.26$ 时, B_m 的 mz 次系数幅值趋近于零点,也就意味着,当选取合适的 k_1 值时,可以大幅度降低 B_m 的幅值,从而有效削弱齿槽转矩。

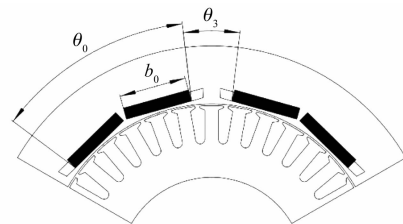


图4 初始电机结构

图4和图5两种结构的区别仅仅是磁极宽度发生改变,而磁极厚度、磁极张开角度、两磁极间极弧长度等均保持不变,在使用该方法时两种结构之间的参数需满足式(5)所示关系:

$$2p\theta_0 = \theta_1 + (2p - 1)\theta_2 \quad (5)$$

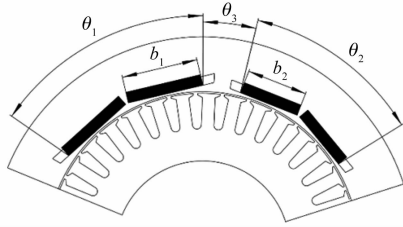


图5 新型电机结构

因此,在通过图3确定 k_t 后,即可以根据式(4)和式(5)来算出 θ_1 与 θ_2 的值,以本文电机为例可得出新型磁极结构参数,如表2所示。

表2 磁极结构参数对比

参数	$k_t=1$	$k_t=0.805$	$k_t=1.26$
$\theta_1/(\circ)$	46.4	55.50	38.15
$\theta_2/(\circ)$	46.4	44.58	48.05
$\theta_3/(\circ)$	13.6	13.60	13.60
b_1/mm	60	72.38	49.05
b_2/mm	60	57.57	62.22
磁极宽度总长/mm	720	720.46	720.30

其中, $k_t=1$ 即为初始电机参数,由于新旧两种电机磁极的厚度与轴向长度完全一样,而磁极宽度总长又近乎相同,所以可认为采用本文方法并不会增加额外的经济成本。

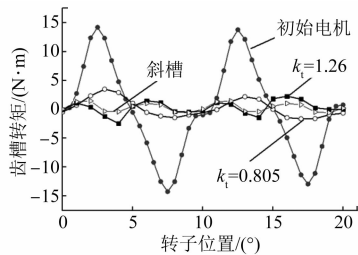


图6 齿槽转矩波形对比

图6是基于有限元建模仿真得到的不同 k_t 下和斜槽结构的齿槽转矩波形,可以看出选取合适的 k_t 后齿槽转矩幅值有着大幅度的减小,同时当 $k_t=1.26$ 时,齿槽转矩的削弱效果已与斜槽方式基本相同,具体参数如表3所示。

表3 不同 k_t 下齿槽转矩参数

电机结构	齿槽转矩峰值/(N·m)	占额定转矩比例/%
$k_t=1$	14.38	6.8
$k_t=0.805$	3.62	1.7
$k_t=1.26$	2.38	1.13
斜槽	2.06	0.98

2.2 反电动势谐波分析

对于部分永磁电机来说,齿槽转矩占额定转矩比例并不高,仅仅削弱齿槽转矩并不一定会使转矩脉动得到抑制。对于整数槽电机,反电动势里的齿谐波是产生电机转矩脉动的另一主要来源。在本文所用的方法中,由于采用了不等磁极组合结构,每极下槽数的分布与常规整数槽电机存在不同,如图7所示,该结构每极每相下槽数为分数,使得产生的齿谐波次数为分数,而主极磁场中仅含有奇数次谐波,从而降低反电动势中的谐波含量。

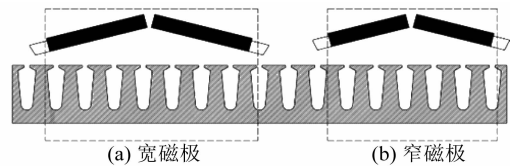


图7 不等磁极组合极槽分布

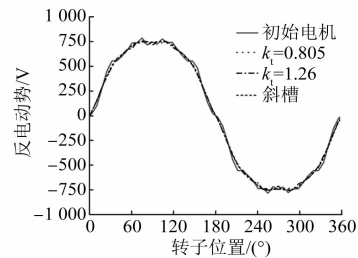


图8 空载反电动势波形对比

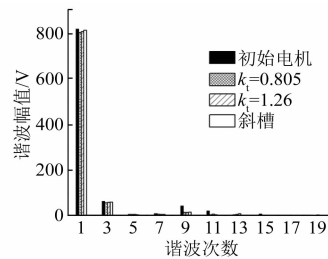


图9 空载反电动势谐波含量分析

从图8、图9可看出,新型电机结构中反电动势谐波含量较少,波形比较平滑,正弦度较好,反电动势参数如表4所示。

表4 反电动势参数对比

电机结构	有效值/V	谐波畸变率/%
初始电机	581	9.48
$k_t=0.805$	570	7.15
$k_t=1.26$	573	7.37
斜槽	577	7.44

经过上文对齿槽转矩和反电动势谐波的分析,设计出了两种新型电机结构,最终与斜槽结构进行性能对比,得到如图 10 所示的负载转矩波形。

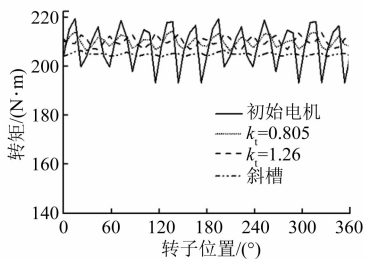


图 10 负载转矩波形

其中,负载转矩的具体参数如表 5 所示。

表 5 负载转矩参数

电机结构	平均值/(N·m)	峰峰值/(N·m)	转矩脉动/%
初始电机	210.0	26.30	12.6
$k_t = 0.805$	211.0	8.10	3.8
$k_t = 1.26$	211.0	7.50	3.6
斜槽	204.9	2.55	1.2

从以上结果可看出,本文所设计的不等磁极组合方法,对于转矩脉动具有良好的抑制效果,同时加工工艺简单,不会增加额外成本,可以作为一种经济适用的斜槽替代方法。然而,由于该方法改变了磁极结构,造成两磁极边缘间的漏磁增大,导致反电动势一定程度地降低,接下来本文设计出两种不同隔磁结构,并对其相关性能进行了对比分析。

3 隔磁结构分析

传统的内转子 IPMSM,普遍采用空气隔磁桥与气隙相互配合的方法以起到隔磁的效果,而外转子电机由于转子位于气隙外圆,磁极呈外包围状,使得每极下的磁通量较大,但也导致了气隙隔磁效果不明显。同时为了满足电机性能,磁极需要达到一定的极弧长度,又考虑到经济成本,永磁体用料不宜过多,最终导致 V 型磁极张开角度较大,造成磁极边缘漏磁明显。

针对以上问题本文设计了两种不同的隔磁结构。第一种采用空气桥隔磁结构,在保证转子整体强度的前提下,利用磁密局部饱和和空气桥来

进行隔磁。第二种采用隔磁桥配合空气磁障的结构。该结构在两隔磁桥之间存在一个过渡平滑的三角形空气磁障,该磁障不仅起到隔磁效果,同时还能改善气隙磁密波形,达到抑制转矩脉动的效果。空气磁障的选择应该在满足转子机械强度的前提下尽可能大一些,磁障过小则隔磁效果不明显,而磁障过大则易出现转子变形现象,造成电机故障。由于本文样机额定转矩较小,选择了距离两隔磁桥和转子内径各 1 mm 的三角形磁障,并对角边缘做了过渡处理,使磁力线经过更加平滑,具体结构如图 11 所示。

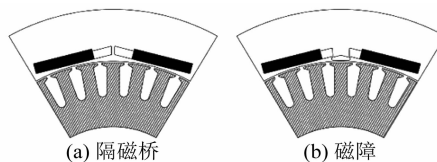


图 11 隔磁桥和磁障结构对比

本文以 $k_t = 0.805$ 的不等磁极组合结构的为例,通过有限元建模仿真,对两种不同的隔磁结构进行对比分析,其性能结果如图 12 所示。

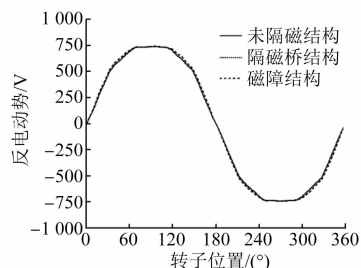


图 12 不同隔磁结构下相反电动势波形

仿真结果结果表明,磁障配合隔磁桥的结构具有较好的隔磁效果,同时能够改善反电动势波形,降低谐波畸变率。而单独的隔磁桥结构,隔磁效果不明显,具体参数如表 6 所示。

表 6 不同隔磁结构性能参数对比

参数名称	未隔磁	隔磁桥	磁障
齿槽转矩/(N·m)	3.62	3.50	3.05
反电动势/V	570	567	580
谐波畸变率/%	7.15	6.94	6.73
转矩平均值/(N·m)	210	193.2	200
转矩峰峰值/(N·m)	8.10	7.78	3.90
转矩脉动/%	3.86	3.70	1.86

由图 13 可以看出,磁障配合隔磁桥结构的负载转矩曲线十分平滑,转矩脉动抑制效果明显,但平均转矩略有下降。隔磁桥结构对转矩脉动有一定抑制效果,但平均转矩下降较多,综合考虑各项性能,磁障配合隔磁桥结构无论在隔磁效果,还是转矩脉动抑制方面都明显优于单独隔磁桥结构。

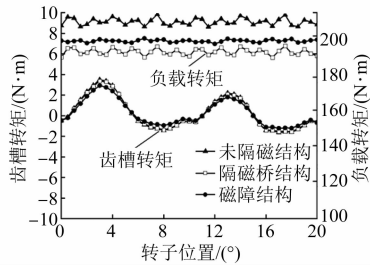


图 13 不同隔磁结构下齿槽转矩和负载转矩波形

初始电机在采用本文的不等磁极组合配合磁障的结构后,电机性能获得了明显提高,其中转矩脉动由 12.6% 减小到 1.86%,降低幅度为 85.2%,而单独采用斜槽的方法时,初始电机的转矩脉动由 12.6% 下降到 1.2%,降低幅度为 90.5%,可见本文的方法对转矩脉动的抑制效果已接近于斜槽结构。

4 试验验证

本文样机基于实际项目矿山鼓风机用外转子 IPMSM 研制而成,根据表 1 和表 2 的数据制作了一台 55 kW、2 500 r/min 的原型机,鼓风机在原型机的基础上添加风叶、轮毂、风筒等结构,如图 14 所示。

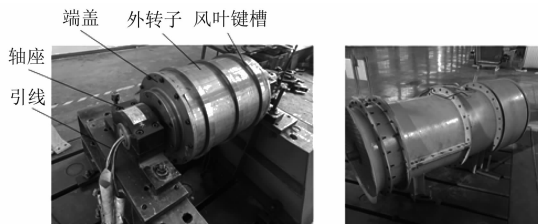


图 14 鼓风机用外转子 IPMSM

为验证本文方法的合理性,将原型机作为试验样机,采用英威腾 Goodrive 3000 系列三电平变频器作为驱动,控制方式为矢量控制,通过电机对拖试验和加载试验,如图 15 所示,最终得到了空载反电动势和负载转矩的试验数据,如表 7 所示。



图 15 试验测试平台

表 7 电机试验与仿真数据对比

性能参数	仿真值	试验值
空载反电动势/V	580	576
负载转矩最大值/(N·m)	201.3	202.4
负载转矩最小值/(N·m)	197.4	196.5
转矩脉动/%	1.86	2.8

由表 7 可知,各项性能数据均在合理误差范围内,由于加工工艺和叠压系数等因素影响,空载反电动势有着轻微的降低;同时仿真过程中采用的是理想激励源,而现实中变频器输出的三相电流中含有一定谐波,因此转矩脉动实测值出现相对偏高现象。

5 结语

本文针对常规 IPMSM 转矩脉动较大的问题,研究了一种保持永磁体用量不变的不等磁极组合方法来抑制转矩脉动。该方法可以大幅度降低齿槽转矩、改善反电动势波形、抑制转矩脉动,同时加工工艺简单,不会增加额外成本,可以作为一种经济适用的斜槽替代方法,经仿真计算和样机试验验证,得出以下结论:

(1) 通过合理选取不等磁极参数,可以显著削弱齿槽转矩,降低反电动势谐波含量,进而抑制转矩脉动。

(2) 新型的磁障配合隔磁桥结构,具有良好的隔磁效果,能够有效提高反电动势幅值、降低谐波畸变率。

【参考文献】

[1] 杨国龙,黄开胜,肖庆优,等. 风机用外转子永磁同步电动机的优化分析[J]. 微电机,2016,49(2): 18.
 [2] 吴长江. 永磁同步电机转矩脉动抑制及其相关性优化研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2018.

- [3] 王秀和. 永磁电机[M]. 2 版. 北京:中国电力出版社,2011.
- [4] 王道涵,彭晨,王柄东,等. 电动汽车新型转子内置式永磁同步电动机转矩脉动与电磁振动抑制研究[J]. 中国电机工程学报, DOI: 10. 13334/j. 0258-8013. pcsee. 210537.
- [5] PENG C, WANG D, FENG Z, et al. A new segmented rotor to mitigate torque ripple and electromagnetic vibration of interior permanent magnet machine [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(2): 1367.
- [6] 薛东辉. 新能源汽车用不均匀齿(槽)距永磁同步电动机不平衡磁拉力、转矩脉动和电磁振动抑制研究[D]. 济南:山东大学,2020.
- [7] WANG D, PENG C, WANG B. Permanent magnet synchronous machines with non-uniformly distributed teeth [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, DOI: 10. 1109/TIE. 2021. 3116586.
- [8] 赵玫,陈江岸,张云亮,等. 转子斜极对永磁轮毂电机性能影响的研究[J]. 微特电机, 2019, 47(2): 39.
- [9] 杨志豪,杨梦雪,鲍晓华,等. 定子斜槽对永磁同步电动机性能的影响[J]. 电气工程学报, 2019, 14(3): 97.
- [10] 赵晨,赵世伟. 采用磁障转子的内置式永磁同步电机优化设计[J]. 微电机, 2018, 51(4): 5.
- [11] CAO Z, LIU J. Cogging torque reduction for outer rotor interior permanent magnet synchronous motor [C] // 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2020.
- [12] FAN Y, CHEN S, TAN C, et al. Design and investigation of a new outer-rotor IPM motor for EV and HEV in-wheel propulsion [C] // 2016 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2016.

(上接第 54 页)

- [5] 王小飞,代颖,罗建. 基于流固耦合的车用永磁同步电机水道设计与温度场分析[J]. 电工技术学报, 2019, 34(S1): 22.
- [6] 陈进华,刘威,张驰,等. 基于丁胞水冷结构的高速永磁电机温度场分析[J]. 电机与控制学报, 2019, 23(9): 35.
- [7] FAN X, LI D, QU R, et al. Water cold plates for efficient cooling: verified on a permanent-magnet machine with concentrated winding [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(7): 5325.
- [8] 丁树业,申淑锋,杨智,等. 高速永磁同步电机流固耦合仿真与性能分析[J]. 电机与控制学报, 2021, 25(10): 112.
- [9] ZHU G, LIU X, LI L, et al. Cooling system design of a high-speed PMSM based on a coupled fluidic-thermal model [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2019, 29(2): 0601405.
- [10] 鞠宇宁. 全封闭永磁同步电机温度场分析及冷却结构设计[D]. 天津:天津大学,2018.
- [11] 陶文铨. 数值传热学[M]. 2 版. 西安:西安交通大学出版社,2001.
- [12] 王福军. 计算流体力学分析[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [13] 丁树业,夏之慧,李海玲,等. 径向通风电机流体流动及传热特性分析[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2019, 24(1): 34.
- [14] KAHOURZADE S, ERTUGRUL N, SOONG W L. Loss analysis and efficiency improvement of an axial-flux PM amorphous magnetic material machine [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(7): 5376.
- [15] UZHEGOV N, KURVINEN E, NERG J, et al. Multidisciplinary design process of a 6-slot 2-pole high-speed permanent magnet synchronous machine [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(2): 784.
- [16] 陈丽香,王雪斌,程文. 水冷永磁伺服电机温升关键问题的研究[J]. 微电机, 2016, 49(1): 1.
- [17] 陈世坤. 电机设计[M]. 2 版. 北京:机械工业出版社,2004.