

实心转子铁心式永磁游标电机涡流损耗抑制研究

袁志东^{1,2}, 贾少锋^{1,2}, 梁得亮^{1,2}

(1. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 710049, 西安;

2. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对实心转子铁心式永磁游标电机在运行过程中, 转子铁心产生的涡流损耗远大于常规永磁电机的问题, 对实心钢转子铁心中的涡流损耗产生机理进行了研究, 并提出一种能够有效减小其涡流损耗的转子结构。首先, 从永磁游标电机(VPM)的磁场特性和涡流损耗产生机理出发, 对比了采用实心钢转子铁心的传统永磁电机和 VPM 电机, 得出 VPM 电机具有更大的转子涡流损耗, 并分析了其产生原因; 随后, 提出一种转子开槽的新型 VPM 电机结构, 该结构可以在保证电机转矩基本不变的情况下, 大幅减小转子涡流损耗; 最后, 通过三维有限元计算, 验证了所提结构的有效性。结果表明: 实心转子铁心式 VPM 电机的转子铁心涡流损耗是传统永磁电机的 26.85 倍; 采用文中所提的电机结构, 可以在输出转矩下降不到 5% 的情况下, 转子涡流损耗减小达到 67.2%。研究结果可为 VPM 电机的工业应用和推广提供参考。

关键词: 永磁游标电机; 实心钢转子铁心; 磁场调制; 涡流损耗; 转子开槽

中图分类号: TM351 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202310017 **文章编号:** 0253-987X(2023)10-0173-16

Research on Eddy Current Loss Reduction in Surface-Mounted Vernier Permanent Magnet Machine with Solid Rotor

YUAN Zhidong^{1,2}, JIA Shaofeng^{1,2}, LIANG Deliang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: During the operation of the vernier permanent magnet machine (VPM) with solid rotor, the eddy current loss generated by the rotor core is much greater than that of a conventional permanent magnet machine. To solve this problem, the research was conducted on the mechanism of the eddy current loss caused by the solid rotor core, and a new rotor structure that can effectively reduce eddy current loss was proposed. Firstly, based on the magnetic field characteristics of VPM machines and the generation mechanism of eddy current loss, the traditional permanent magnet machine and the VPM machine (both rotor cores are made of solid steel) were compared. The results show that the rotor eddy current loss of the VPM machine was larger, and the causes of this phenomenon were analyzed. Then, a new VPM machine topology with grooved rotor was proposed, which can greatly reduce the eddy current loss while ensuring that the output torque almost maintains unchanged. Finally, the validity of the proposed structure was verified

收稿日期: 2023-03-13。 作者简介: 袁志东(1998—), 男, 硕士生; 贾少锋(通信作者), 男, 副教授, 博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52277066)。

网络出版时间: 2023-05-25

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms2/detail/61.1069.T.20230524.1718.008.html>

through 3D finite element calculation. The results show that the eddy current loss of the rotor core in a VPM machine with solid rotor is 26.85 times higher than that of a traditional permanent magnet motor. By using the proposed VPM machine topology, the rotor eddy current loss can be reduced by 67.2% while the output torque decreases by less than 5%. The research results provide a reference for the industrial application and promotion of VPM machines.

Keywords: vernier permanent magnet machine; solid steel rotor core; field modulation; eddy current losses; grooved rotor

为减小运行过程中产生的涡流损耗,电机通常使用硅钢片叠压成的铁心为定转子提供磁通路径^[1]。而在一些实际工业应用中,为简化电机结构通常会省掉硅钢片叠压成的转子铁心,直接将转子永磁体固定在材质为实心钢的转子外壳上,由实心钢转子外壳为转子磁通提供磁路,同时实心钢转子外壳起到结构支撑的作用,比如无人机驱动电机、直驱风力发电机以及电动汽车用电机等。这种结构可以减小电机体积和质量,同时保证结构强度,但会导致转子铁心的电阻变小,电机运行过程中转子铁心将会感应产生较大的涡流,并产生较大的涡流损耗。

如何减小转子涡流损耗一直是电机领域的热点问题。一般而言,转子涡流损耗主要由电枢电流中的时间谐波、绕组分布引起的磁场空间谐波以及定子开槽引起的气隙磁导率谐波等引起^[2]。文献[3]通过调整绕组相数和层数,采用双三相四层绕组结构,实现对定子磁动势空间谐波的抑制,从而降低转子涡流损耗。文献[4-6]通过增加定子槽数、增设定子辅助槽或者在转子表面开槽等方式来抑制气隙磁导率谐波,从而减小转子涡流损耗。对转子沿轴向或者圆周向进行分段也是减小涡流损耗的有效方式,文献[2]研究和验证了高速电机中4种分段转子结构对转子涡流损耗的影响,得出通过对永磁体分段,可以切断涡流路径,有效降低转子涡流损耗。此外,也有学者研究直接改变转子铁心或者永磁体材料的电阻率来减小转子涡流损耗^[7-8]。

永磁游标电机(VPM)是一种基于磁场调制原理运行的电机,具有结构简单、转矩密度高、转矩脉动小等特性,在直驱风力发电等低速大转矩领域有着良好的应用前景^[9-11]。但是,相比于常规永磁电机,VPM电机的转子涡流损耗通常较大^[12]。文献[13]通过对比传统永磁电机和VPM电机的转子涡流损耗,得出VPM电机具有更大的涡流损耗,并分析了涡流产生机理以及对电机性能的影响。文献[14]针对表贴式VPM电机的转子涡流损耗进行了分析,主要研究了不同极比、槽极配合等对转子涡流

损耗的影响,并提出采用永磁体分段的方式减小永磁体的涡流损耗。尽管采用一定的方法可以减小VPM电机的涡流损耗,但相较于传统永磁电机的涡流损耗还是较大。

现有涡流损耗的研究多是针对转子永磁体或者转子护套,对于采用实心钢转子铁心的表贴式VPM电机实心转子中的涡流损耗及其减小方法有待进一步研究。本文首先对VPM电机的气隙磁场特性和转子涡流损耗机理进行了分析,然后设计和对比了采用实心钢转子铁心的常规表贴式永磁电机(SPM)和表贴式VPM电机;接着提出了一种能够减小表贴式VPM电机转子涡流损耗的电机结构,并对其性能进行了分析;最后通过三维有限元计算,验证了所提结构的有效性。

1 永磁游标电机转子涡流损耗分析

1.1 永磁游标电机气隙磁场分析

实心转子铁心式永磁电机的结构如图1所示,目前该种结构的应用和研究多为传统永磁电机。永磁游标电机与传统永磁电机所不同的是,其定子和转子产生磁场的转速和磁极对数并不相同,两者需要通过磁场调制单元的作用,实现相互耦合从而产生电磁转矩^[15]。磁场调制过程如图2所示^[16-17],在调制单元的作用下,永磁体产生的高阶磁动势可以形成低阶气隙磁通谐波,加上原有高阶磁通谐波,电机可以实现多个磁通谐波同时工作,产生多个转矩分量,最后相互叠加形成输出转矩。以12槽38极二分裂的分裂齿永磁游标电机为例,其空载气隙磁密谐波如图3所示,可以看到,除了永磁体产生的常规19对极磁场外,通过调制作用还产生了5、7、43等对极的谐波磁场,可知永磁游标电机具有丰富气隙磁通谐波。

为进一步分析气隙磁密谐波的磁极对数和转速,需要对气隙磁密的数学模型进行推导。对于表贴式永磁结构,永磁体产生的磁动势为

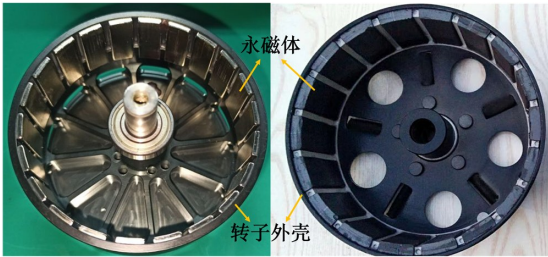


图 1 实心转子铁心式永磁电机

Fig. 1 Permanent magnet machine with solid rotor core

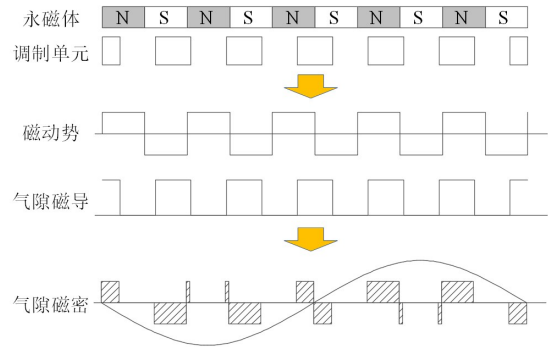


图 2 磁场调制过程示意图

Fig. 2 Field modulation process

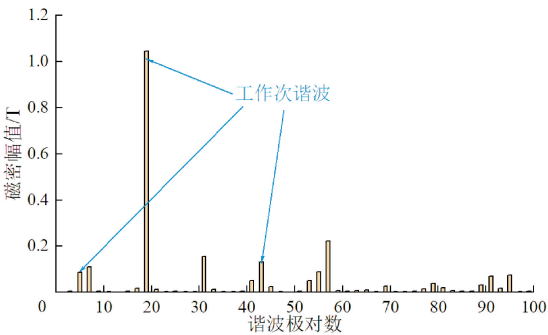


图 3 12 槽 38 极分裂齿 VPM 空载气隙磁密谐波

Fig. 3 No-load air-gap flux density harmonics of 12-slot 38-pole VPM

$$F_{PM}(\theta_s,t)=\sum_{i=1,3,5,\cdots}F_i\cos[iP_r(\theta_s-\omega_rt)]\quad(1)$$
$$\lambda(\theta_s)=\lambda_0+\lambda_1\cos(N_s\theta_s)\quad(2)$$

式中： θ_s 为定子机械角度； P_r 为永磁体磁极对数； F_i 为 iP_r 次谐波磁密的幅值，其中 i 为整数； ω_r 为转子转速^[18-19]。磁场调制单元对气隙磁密的影响可以用磁导函数来表示，当忽略高次谐波时，磁导函数可表示为

$$B_g(\theta_s,t)=F_{PM}(\theta_s,t)\lambda(\theta_s)\quad(3)$$

$$B_g(\theta_s,t)=\sum_{i=1,3,5,\cdots}\lambda_0F_i\cos(iP_r(\theta_s-\omega_rt))+\sum_{i=1,3,5,\cdots}\lambda_1\frac{F_i}{2}\cos[(iP_r-N_s)\theta_s-iP_r\omega_rt]+\sum_{i=1,3,5,\cdots}\lambda_1\frac{F_i}{2}\cos[(iP_r+N_s)\theta_s-iP_r\omega_rt]\quad(4)$$

式中： λ_0 为气隙磁导函数常数项； λ_1 为气隙磁导函数基波幅值； N_s 为定子调制单元数量^[20-23]。根据磁路原理，空载气隙磁密分布可通过式(3)计算得到。将式(1)、(2)代入式(3)，可得空载气隙磁密表达式(4)。由式(4)分析可知，当忽略磁导高次谐波时，空载气隙磁密谐波极对数有 iP_r 、 iP_r-N_s 、 iP_r+N_s ，同时可以得出各次谐波的转速和频率等特性，如表 1 所示。可知永磁游标电机各阶谐波磁场的转速和方向并不相同，在电机旋转过程中这些谐波磁场将与转子发生相对运动，从而在转子上感应产生涡流。

表 1 空载磁密谐波特性

Table 1 No-load flux harmonic characteristics

谐波磁极对数	速度	频率
iP_r	ω_r	$iP_r\omega_r$
iP_r-N_s	$\frac{iP_r\omega_r}{iP_r-N_s}$	$iP_r\omega_r$
iP_r+N_s	$\frac{iP_r\omega_r}{iP_r+N_s}$	$iP_r\omega_r$

1.2 涡流损耗产生机理分析

对于传统电机，运行过程中由于气隙磁导不均匀、定子绕电流非正弦以及定子绕组分布的空间谐波等，不可避免地存在一定的谐波磁场^[21]。这些谐波磁场的转速通常与转子转速不同，会在转子上感应产生涡流，形成涡流损耗^[22]。由上节分析可知，磁场调制效应使永磁游标电机具有更加丰富的谐波磁场，一方面这使 VPM 电机拥有更高的转矩密度，另一方面大量的谐波也会造成巨大的转子涡流损耗^[24]。

根据欧姆定律，导电材料中的涡流损耗计算式^[25]为

$$P_E=L\iint_S\frac{J_z^2}{\sigma}dS\quad(5)$$

式中： L 为电机轴向长度； S 为导电材料轴向截面积； J_z 为导电材料的轴向电流密度； σ 为材料电导率。为进一步寻找涡流损耗的变化规律，将 J_z 进行估算表示。由电磁感应定律可知，感应电动势 E_z 、 J_z 有如下关系

$$E_z\propto-\frac{d\Phi(x,y)}{dt}\quad(6)$$

$$J_z = \frac{E_z}{R_z} \tag{7}$$

式中： $\Phi(x,y)$ 为计算回路所包含的磁通; R_z 为回路电阻。将式(6)、(7)代入式(5),可得

$$P_E \propto J_z^2 \propto \left(\frac{d\Phi(x,y)}{dt}\right)^2 \frac{1}{R_z^2} \tag{8}$$

可知涡流损耗与磁通变化率的平方成正比,与材料电阻的平方成反比。从磁场变化幅值来看,相同时间内磁通波动幅值越大,则磁通变化率越大,更容易产生大的涡流损耗;从磁场速度角度来看,磁场转速与转子转速相差越大,则磁通变化越快,越容易产生涡流损耗。对于采用实心钢转子铁心的永磁游标电机,由于永磁体和转子铁心的电阻较小,加上电机运行过程中会产生丰富的谐波磁场,永磁体和转子铁心中将感应产生较大的涡流损耗。

2 SPM 与 VPM 涡流损耗对比

2.1 参数设计

本节设计并对比了使用实心钢转子铁心的 SPM、VPM 拓扑,并研究它们的涡流损耗。设计过程中,保持两种电机的电负荷、热负荷、槽满率、定子内径、输出转矩、材料等参数一致,然后通过智能优化算法对其他参数进行优化,使两种电机的转矩密度均达到最大。

两种电机的关键参数如表 2 所示,电机模型如图 4 所示。其中两种电机的转子铁心都采用 steel_1010 实心钢材料。从表 2 中可以看到,VPM 的铁心长度小于 SPM,这表明游标电机具有更高的转矩密度,当两种电机定子内径相同且输出相同转矩时,VPM 电机的轴向长度会更短。

表 2 两种电机 SPM、VPM 的关键参数

Table 2 Machine key data

参数	数值和材料	
	SPM	VPM
定子槽数	24	12
定子电枢绕组极对数	11	5
定子调制齿数	0	24
转子磁极对数	11	19
调制比	1.0	3.8
定子内径/mm	43	43
气隙长度/mm	0.4	0.4
轴向长度/mm	23.00	15.18
实心转子材料	steel_1010	
永磁体材料	N42UH	

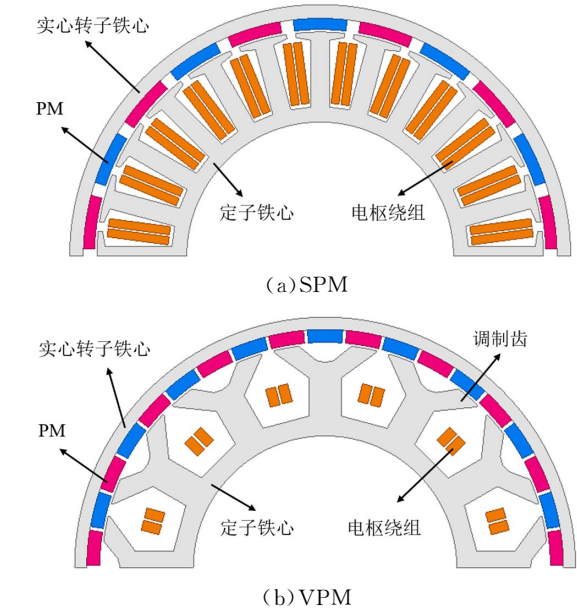


图 4 两种电机 SPM、VPM 的模型

Fig. 4 Machine model

2.2 电磁性能对比

忽略电机的端部效应,并假设铁磁材料各向同性的前提下,利用二维有限元仿真软件可以计算得到电机的电磁性能。SPM、VPM 的电磁性能仿真数据对比如表 3 所示,表中比例为 VPM 列的数值除以 SPM 列的数值,图 5 展示了两两种电机的损耗对比。

表 3 SPM 与 VPM 的电磁性能对比表

Table 3 Performance comparison of SPM and VPM

参数	数值		比例
	SPM	VPM	
槽满率	0.39	0.39	1
电枢电流密度/(A·mm ⁻²)	26.54	26.54	1
转速/(r·min ⁻¹)	813.9	813.9	1
输出转矩/(N·m)	5.95	5.95	1
输出转矩波动/%	4.41	1.69	0.38
转矩密度/(N·m·kg ⁻¹)	10.74	14.06	1.31
输出功率/W	498.4	498.4	1
PM 涡流损耗/W	0.169	0.953	5.64
转子铁心涡流损耗/W	0.664	17.831	26.85
定子铁心损耗/W	2.026	2.087	1.03

由表 3 可以看到,两种电机在相同负载、相同转速情况下,定子铁心损耗几乎相同,而 VPM 的涡流损耗远大于 SPM。其中 VPM 的永磁体涡流损耗是 SPM 的 5.64 倍,实心转子铁心涡流损耗是 SPM 的 26.85 倍。此外,表中列出了两种电机只考虑电磁部分质量的转矩密度对比,可以看到 VPM 的转矩密度是 SPM 的 1.31 倍,意味着 VPM 的质量更小。

因此,对于采用实心转子铁心的两种电机来说,VPM 电机虽然具有更高的转矩密度,但是实心钢转子铁心会带来更大的涡流损耗,这会导致 VPM 电机的效率下降、运行温度升高。

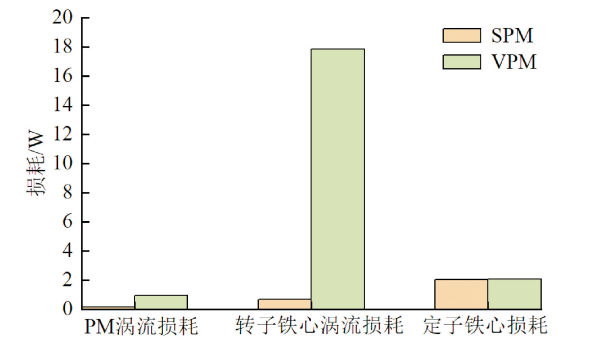


图 5 相同转速及转矩下的损耗对比图
Fig. 5 Comparison of losses at the same speed and torque

2.3 负载磁场分析

实心转子铁心以及永磁体中的涡流损耗,主要是转子中不同步于转子转速的磁场谐波引起的,而永磁游标电机就是一种磁场谐波含量丰富的电机。图 6 展示了 SPM、VPM 在负载条件下的径向气隙磁密波形及其谐波,可知 VPM 是一种多个谐波磁场同时工作的电机,除了转子永磁体产生的常规 19 对极磁场外,通过定子齿的调制作用还产生了 5 对极、7 对极、43 对极等谐波磁场,相比 SPM 具有更多的谐波磁场含量。

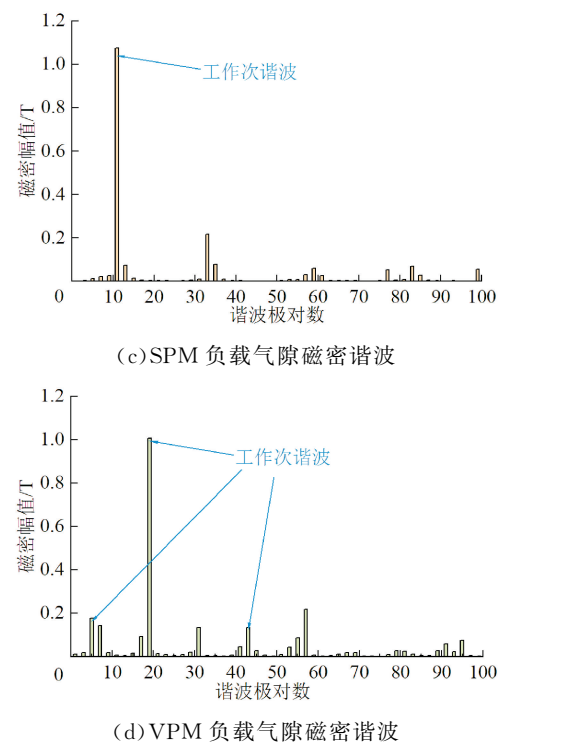
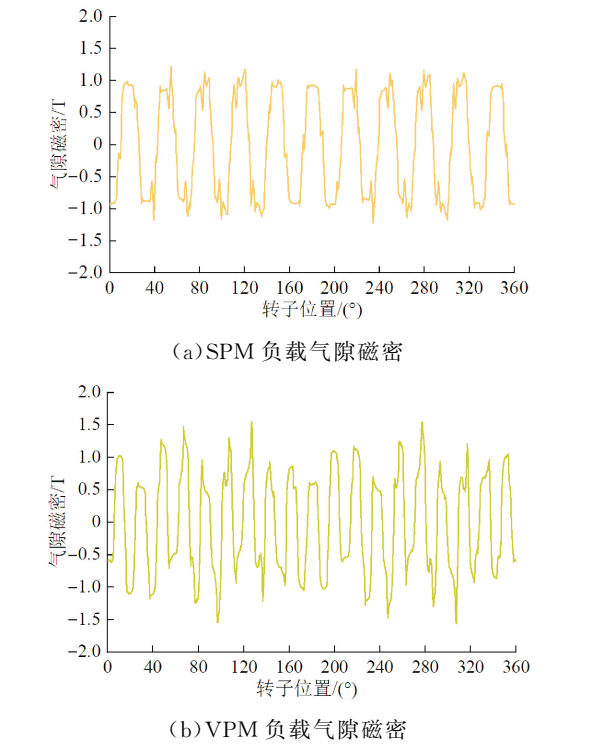


图 6 负载气隙磁密及其谐波对比图
Fig. 6 Comparison of air-gap flux density and its harmonics under load

此外,根据式(4)和表 1 可以计算出 VPM 电机主要工作谐波的转速及频率,如表 4 所示,表中 ω_r 为转子的旋转速度。可知除了 19 对极的谐波磁场外,其他谐波的转速均与转子的转速不同,且极对数越低的谐波磁场转速越高,与转子的速度差也越大。这些谐波在旋转过程中,导致转子铁心、转子永磁体中的磁场发生交变,从而感应产生涡流。由式(8)可知,电机的涡流损耗与磁场变化速率的平方正相关,所以转速差越大的磁场谐波越容易感应产生大的涡流。因此,丰富的谐波磁场是 VPM 转子涡流损耗大于 SPM 的主要原因。

表 4 VPM 主要工作谐波
Table 4 Main working harmonics of VPM

谐波极对数	速度	频率
5 对极	$-\frac{19}{5}\omega_r$	$19\omega_r$
19 对极	ω_r	$19\omega_r$
43 对极	$\frac{19}{43}\omega_r$	$19\omega_r$

两种电机转子运动到不同位置时的磁力线分布图如图 7 所示,通过对比转子铁心中同一位置的磁力线变化可以看到,在转子转动过程中,SPM 转子铁心上的磁通量和永磁体中的磁通量变化较小,而

VPM 转子铁心和转子永磁体中的磁通量变化很大,因此 VPM 电机的转子涡流损耗更大。

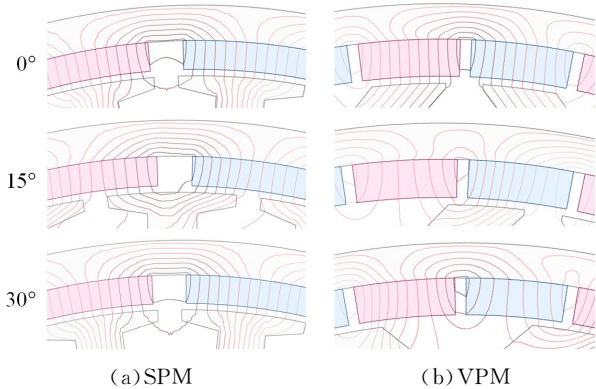


图 7 转子运动到不同位置的磁力线分布
Fig. 7 Distribution of flux lines on the rotor at different positions

3 一种转子开槽的表贴式永磁游标电机

3.1 电机结构及性能对比

上节分析可得,采用实心转子铁心的 VPM 电机的涡流损耗远大于常规的 SPM 电机。本节提出一种转子开槽的 VPM 电机结构,通过在转子 Q 轴开槽,改变转子的磁路分布,能够在保证电机输出转矩基本不降低的情况下,大幅减小转子感应产生的涡流,减小涡流损耗,提高电机效率。转子开槽的 VPM 电机结构如图 8 所示,其中转子开槽参数 H 表示槽深, L 表示槽宽。

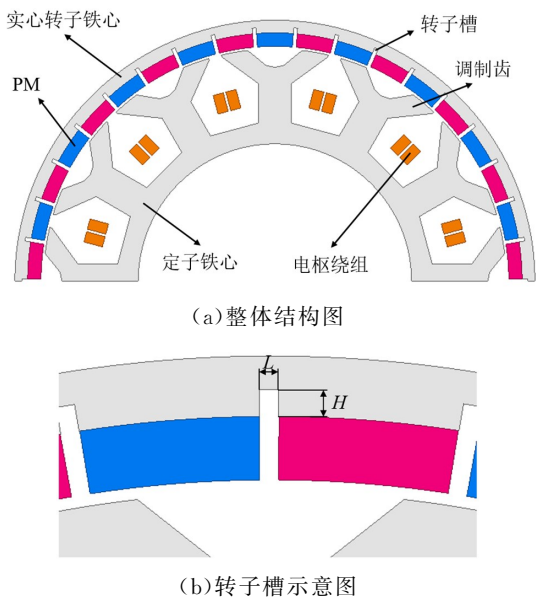


图 8 转子开槽的表贴式永磁游标电机结构
Fig. 8 Topology of surface-mounted VPM machine with grooved rotor

当转子开槽参数 $H=0.9\text{ mm}$ 、 $L=0.6\text{ mm}$ 时,在相同转速以及电负荷情况下,电机的转矩对比如图 9 所示,涡流损耗对比如图 10 所示,电磁性能对比如表 5 所示。

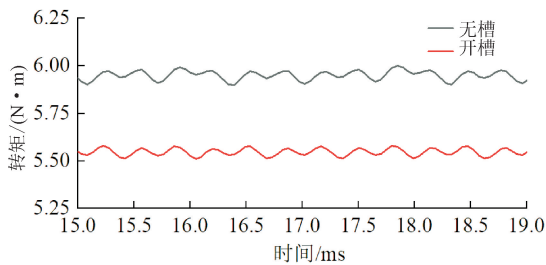


图 9 相同转速及电负荷下的转矩对比图
Fig. 9 Comparison of torque at the same speed and electrical load

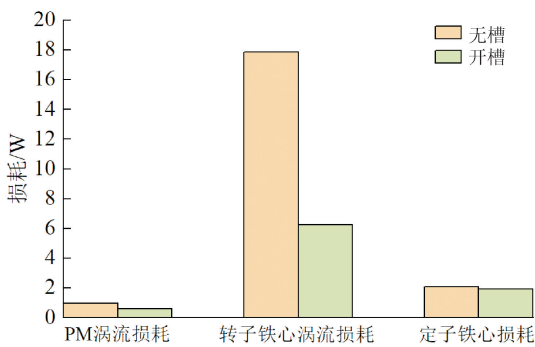


图 10 相同转速及电负荷下的损耗对比图
Fig. 10 Comparison of losses at the same speed and electrical load

表 5 转子开槽与不开槽的电磁性能对比表

Table 5 Comparison of performance between non-grooved and grooved rotors

参数	数值		比值
	无槽	开槽	
电枢电流密度/($\text{A} \cdot \text{mm}^{-2}$)	26.54	26.54	1
转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	813.9	813.9	1
输出转矩/($\text{N} \cdot \text{m}$)	5.95	5.55	0.933
输出转矩波动/%	1.69	1.92	1.136
转矩密度/($\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{kg}^{-1}$)	14.06	13.19	0.938
输出功率/W	498.4	464.9	0.932
PM 涡流损耗/W	0.953	0.584	0.613
转子铁心涡流损耗/W	17.831	6.234	0.350
定子铁心损耗/W	2.087	1.918	0.919

表 5 中比例为开槽列的数值除以无槽列的数

值。可以看到,开槽后的 VPM 转矩有所下降,下降了 6.7%,转矩密度也下降了 6.2%,但转矩密度仍然高于 SPM。同时转子的各项损耗明显减小,其中永磁体涡流损耗减小了 38.7%,转子铁心涡流损耗减小了 65%。可知转子经过开槽后,转矩会有略微降低,但是转子的涡流损耗可得到大幅度的减小。因此,对于采用实心钢转子铁心的表贴式 VPM 电机,转子开槽是一种能够有效降低转子涡流损耗的结构。

3.2 场分布对比

转子开槽与不开槽 VPM 的涡流密度分布如图 11 所示。由图 11 可以看出:涡流峰值集中出现在转子铁心上,且在转子铁心上呈现交替的 10 极分布,与定子磁场的磁极数相对同;开槽后转子铁心上的涡流幅值明显减小,高幅值区域变小,因此产生的涡流损耗得到有效降低。

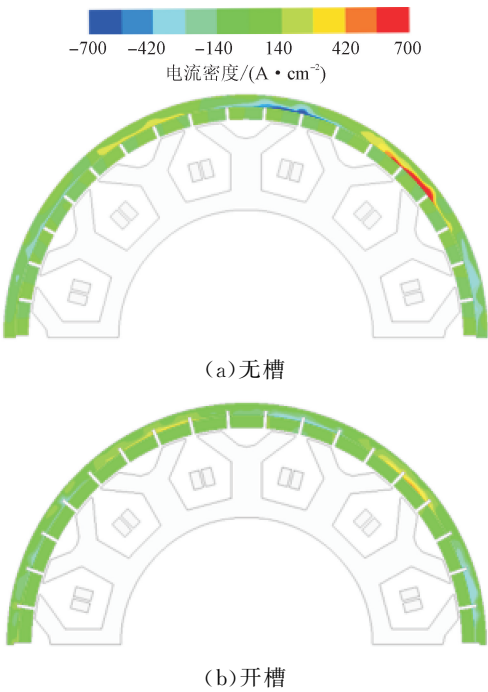


图 11 VPM 涡流密度分布
Fig. 11 Eddy-current density distribution of VPM

图 12 对比了转子轭部 Q 轴处的磁通和磁通变化率,可知转子开槽后,转子轭部 Q 轴处的磁通波动幅值明显减小,并且磁通变化率也明显下降。这主要是由于开槽后测量线位置的磁密更容易饱和,导致磁密的变化幅值减小,因此磁通变化会减小。该仿真结果与式(8)的理论分析一致,即涡流损耗正比于磁通变化率的平方,因此转子开槽后涡流损耗得以大幅减小。

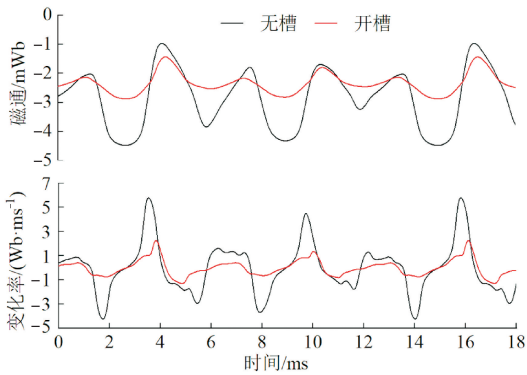


图 12 转子轭部 Q 轴处的磁通及磁通变化率对比
Fig. 12 Comparison of magnetic flux and its derivative

3.3 槽参数对电机性能的影响

当开槽参数变化时,对电机涡流和转矩的影响也随之变化。图 13、图 14 展示了开槽深度 H 、开槽宽度 L 变化时,转矩和涡流损耗的变化情况,其中涡流损耗包括转子铁心涡流损耗和永磁体涡流损耗,转子轭部的厚度为 2 mm。可知随着 H 、 L 的增加,转矩和涡流损耗都呈现下降趋势,但是涡流的下降速度明显高于转矩下降速度,并且在开槽参数 H 较小或者 L 较小的时候,转矩的下降幅值较小。因此,合理的选取开槽参数可有效减小涡流损耗,同时维持输出转矩在较好的水平。

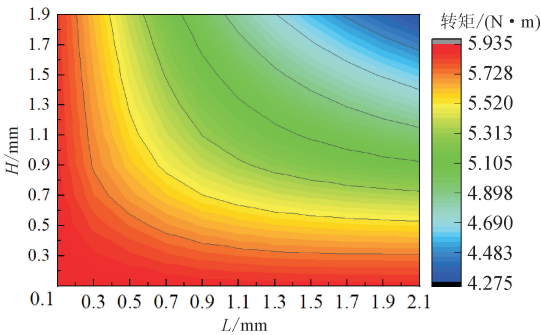


图 13 开槽参数对转矩的影响
Fig. 13 Effect of slot parameters on torque

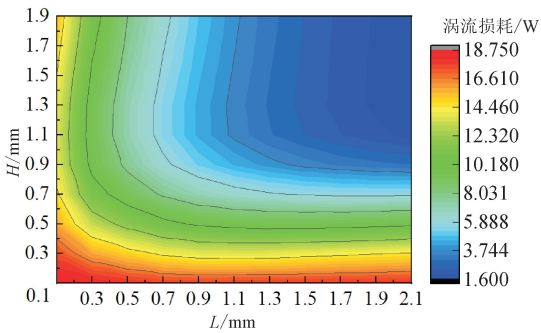


图 14 开槽参数对涡流损耗的影响
Fig. 14 Effect of slot parameters on eddy-current losses

3.4 槽型优化

当转子开槽的槽型不同时,对电机转矩和涡流的影响也不同。槽型可以有多种变化,例如矩形槽、圆形槽、三角形槽、T 形槽以及不规则槽型等,为得到最优的槽型,使用遗传算法对槽型进行自动寻优设计。寻优过程中,将转子槽型设置为由 18 条边组成的形状,如图 15 所示。为使电机结构对称,这 18 条边关于槽的轴线对称设置,且每条边的端点都可以在图示的 X、Y 方向自由移动。此外,为使各条边不出现重叠交叉,增加限制条件为同一条边的端点在 Y 方向的上下顺序不能变化。

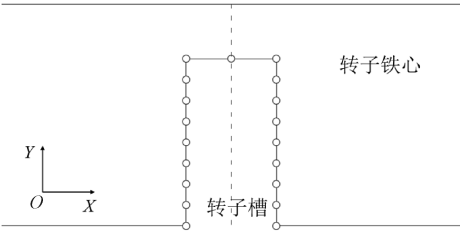


图 15 本文优化模型用转子槽结构

Fig. 15 Rotor groove structure for optimization model

在设置优化目标时,使用前文的矩形槽模型作为参考。在矩形槽模型中,当输出转矩为 $5.55\text{ N}\cdot\text{m}$ 时,转子涡流损耗为 6.818 W ,因此将优化目标设计为:输出转矩大于 $5.55\text{ N}\cdot\text{m}$,且涡流损耗达到最小。优化结果如图 16 所示。可知当输出转矩增加时,转子涡流损耗呈现增大趋势,且每一个转矩值都有一个对应的最小涡流损耗值,与优化目标符合度最高的模型如图中红色点所示,其输出转矩为 $5.547\text{ N}\cdot\text{m}$,涡流损耗为 6.231 W 。而且该点对应的模型与矩形槽模型相比,输出转矩基本相同,转子涡流损耗下降了 8.61% ,可见其抑制涡流损耗的效果优于矩形槽模型,因此将该点对应的槽型作为最优槽型优化结果,其结构如图 17 所示。该槽型的结

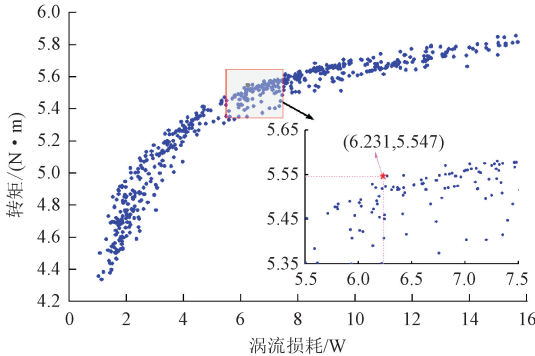


图 16 本文转子槽型优化结果

Fig. 16 The optimization results of rotor groove

构相对复杂,且涡流损耗的抑制能力相较于矩形槽增加并不明显,因此实际使用中推荐结构简单的矩形槽模型。

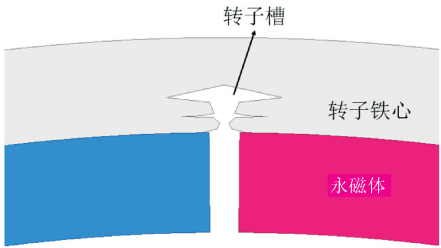


图 17 本文最优转子槽型的结构

Fig. 17 Optimal rotor groove structure

3.5 三维有限元计算验证

为进一步验证所提模型的有效性,建立三维模型并进行有限元分析。此处使用结构简单的矩形槽模型进行验证,转子无槽与开槽的三维模型如图 18 所示,两种电机的输出转矩如图 19 所示,损耗对比如图 20 所示。可知在三维有限元计算中,两种电机的输出转矩均低于二维有限元计算的结果,这主要是由于该电机轴向长度较短,三维模型中端部效应占比较大,因此转矩会出现下降。但是,相比于无槽结构,转子开槽的 VPM 电机转矩下降比例较小,仅下降了 4.06% 。由图 20 可知,转子开槽后永磁体和实心转子铁心的涡流损耗均明显减小,其中永磁体涡流损耗下降 59.5% ,转子铁心涡流损耗下降 71.4% ,永磁体与转子铁心总的涡流损耗下降 67.2% ,定子铁心损耗基本不变。此结果与二维有限元分析结论一致,即通过在转子特定位置开槽,可

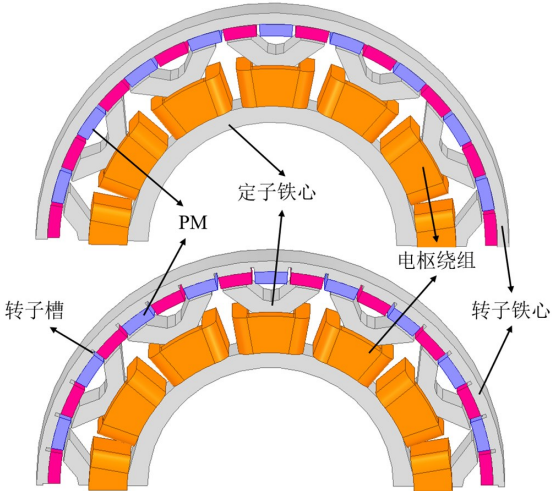


图 18 无槽 VPM 和开槽 VPM 三维验证模型

Fig. 18 3D verification model: non-grooved VPM and grooved VPM

在转矩基本不变的情况下,使转子涡流损耗大幅减小。因此,对于采用实心钢转子铁心的表贴式永磁游标电机,转子开槽拓扑是一种能够有效降低转子涡流损耗的结构。

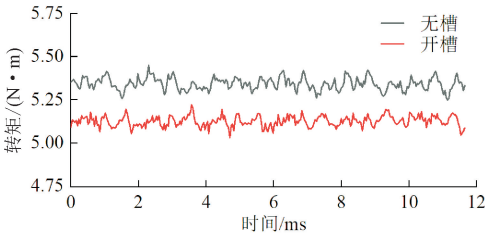


图 19 两种电机的输出转矩对比

Fig. 19 Torque comparison of 3D model

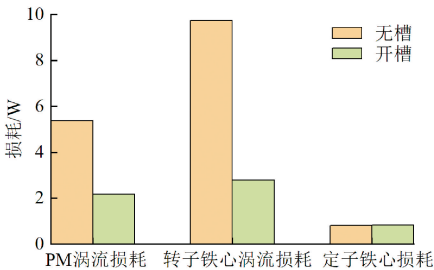


图 20 两种电机损耗对比

Fig. 20 Losses comparison of 3D model

4 结 论

本文从永磁游标电机磁场特性和涡流损耗机理的角度出发,研究了采用实心钢转子铁心的 VPM 电机转子涡流损耗,并提出一种能够有效减小其涡流损耗的结构,为 VPM 电机的工业应用提供参考。可得如下主要结论。

(1) 通过对比采用实心钢转子铁心的传统 SPM 电机和 VPM 电机,得出 VPM 电机转子涡流损耗更大,本文中 VPM 电机的转子铁心涡流损耗是 SPM 电机的 26.85 倍。

(2) 针对采用实心钢转子铁心的 VPM 电机,提出一种转子开槽的 VPM 电机结构,该结构可以在保证电机输出转矩基本不变的情况下,大幅减小转子涡流损耗。同时,分析了该结构减小涡流损耗的机理,并研究了不同开槽参数和槽型对涡流损耗和转矩的影响。

(3) 通过三维有限元计算,验证了所提转子开槽 VPM 电机结构能够减小转子涡流损耗的有效性,本文中电机的输出转矩在减小不到 5% 的情况下,转子涡流损耗下降达到 67.2%。

参考文献:

[1] 陈世坤. 电机设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.

[2] TONG Wenming, HOU Mingjun, SUN Lu, et al. Analysis and experimental verification of segmented rotor structure on rotor eddy current loss of high-speed surface-mounted permanent magnet machine [C]//2021 IEEE International Magnetic Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2021: 1-5.

[3] CHEN Qixu, LIANG Deliang, JIA Shaofeng, et al. Analysis of multi-phase and multi-layer fractional-slot concentrated-winding on PM eddy current loss considering axial segmentation and load operation [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2018, 54(11): 1-6.

[4] ZHANG Yue, MCLOONE S, CAO Wenping. Electromagnetic loss modeling and demagnetization analysis for high speed permanent magnet machine [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2018, 54(3): 1-5.

[5] 王威海, 华华, 孔建会, 等. 表贴式永磁交流伺服电机永磁体涡流损耗降耗方法 [J]. 东华大学学报(自然科学版), 2022, 48(6): 97-102.

WANG Weihai, HUA Hua, KONG Jianhui, et al. A method for decreasing the eddy current loss in surface-mounted permanent magnet of AC servo motor [J]. Journal of Donghua University (Natural Science), 2022, 48(6): 97-102.

[6] CHAITHONGSUK S, TAKORABET N, KREUAWAN S. Reduction of eddy-current losses in fractional-slot concentrated-winding synchronous PM motors [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(3): 1-4.

[7] 沈建新, 郝鹤, 袁承. 高速永磁无刷电机转子护套周向开槽的有限元分析 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(36): 53-60.

SHEN Jianxin, HAO He, YUAN Cheng. FEA study on circumferential grooves on rotor retaining sleeve of high-speed PM brushless motors [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(36): 53-60.

[8] 沈建新, 韩婷, 尧磊, 等. 提高永磁体电阻率对降低高速永磁交流电机转子涡流损耗的有效性分析 [J]. 电工技术学报, 2020, 35(9): 2074-2078.

SHEN Jianxin, HAN Ting, YAO Lei, et al. Is higher resistivity of magnet beneficial to reduce rotor eddy current loss in High-Speed permanent magnets AC machines [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(9): 2074-2078.

[9] 程明, 文宏辉, 花为, 等. 电机气隙磁场调制统一理论及其典型应用 [J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(24): 8261-8282.

CHENG Ming, WEN Honghui, HUA Wei, et al.

- General airgap field modulation theory for electrical machines and its typical applications [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(24):8261-8282.
- [10] TLALI P M, WANG Rongjie, GERBER S, et al. Design and performance comparison of vernier and conventional PM synchronous wind generators [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(3): 2570-2579.
- [11] ZHAO Xing, NIU Shuangxia, ZHANG Xiaodong, et al. A new relieving-DC-saturation hybrid excitation vernier machine for HEV starter generator application [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(8): 6342-6353.
- [12] 鲍晓华, 刘侑炜, 孙跃, 等. 低速大转矩永磁直驱电机研究综述与展望 [J]. 电工技术学报, 2019, 34(6): 1148-1160.
- BAO Xiaohua, LIU Jiwei, SUN Yue, et al. Review and prospect of low-speed high-torque permanent magnet machines [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(6): 1148-1160.
- [13] KWON H S, RO J S, JUNG H K. Influence of a rotor eddy current on performance of a vernier permanent-magnet machine [C]//The 21st International Conference on Electrical Machines and Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2018: 2822-2825.
- [14] WU Leilei, QU Ronghai, LI Dawei. Analysis of eddy current losses in surface-mounted permanent magnet vernier machines [C]//IEEE International Electric Machines and Drives Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2017: 1-6.
- [15] 林鹤云, 张洋, 阳辉, 等. 永磁游标电机的研究现状与最新进展 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(18): 5021-5034.
- LIN Heyun, ZHANG Yang, YANG Hui, et al. Overview and recent developments of permanent magnet vernier machines [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(18): 5021-5034.
- [16] LI Dawei, QU Ronghai, LI Jian. Topologies and analysis of flux-modulation machines [C]//2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2015: 2153-2160.
- [17] YUAN Zhidong, JIA Shaofeng, LIANG Deliang, et al. Research on slot-pole combination in high-power direct-drive PM vernier generator for fractional frequency transmission system [J]. CES Transactions on Electrical Machines and Systems, 2022, 6(4): 445-453.
- [18] JIA Shaofeng, LIANG Deliang, ZHU Ziqiang. Enhanced flux modulation of FSCW consequent Pole PM machine employing stator slot Halbach PM [C]//2020 International Conference on Electrical Machines. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2020: 1985-1991.
- [19] 李大伟. 磁场调制永磁电机研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
- [20] 杜康康. 分裂齿永磁容错游标电机的磁场调制设计研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2020.
- [21] FORNASIERO E, BIANCHI N, BOLOGNANI S. Slot harmonic impact on rotor losses in fractional-slot permanent-magnet machines [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(6): 2557-2564.
- [22] ZHANG Yue, WANG Huijun, GERADA C. Rotor eddy current loss and multiphysics fields analysis for a high-speed permanent magnet machine [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(6): 5100-5111.
- [23] XU Liang, ZHAO Wenxiang, LI Rende, et al. Analysis of rotor losses in permanent magnet vernier machines [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(2): 1224-1234.
- [24] 李仁德. 永磁游标电机转子损耗特性分析及抑制研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2021.
- [25] 安忠良, 朱利伟. 表贴式永磁发电机永磁体涡流损耗研究 [J]. 微特电机, 2017, 45(12): 18-21.
- AN Zhongliang, ZHU Liwei. Research on eddy-current loss of permanent magnet in surface-mounted permanent magnet generator [J]. Small & Special Electrical Machines, 2017, 45(12): 18-21.

(编辑 赵炜)