

屏蔽套材料对屏蔽式永磁同步电机三相短路 电流和退磁的影响

苗绪世, 李明*, 伦淑娴

(渤海大学 控制科学与工程学院, 辽宁 锦州 121210)

Influence of Can Material on Three-Phase Short-Circuit Current and Demagnetization of Canned Permanent Magnet Synchronous Motor

Miao Xushi, Li Ming*, Lun Shuxian

(School of Control Science and Engineering, Bohai University, Jinzhou 121210, China)

Abstract: [Objective] This paper takes a 1.5 kW canned permanent magnet synchronous motor (CPMSM) as the research prototype to reveal the influence laws of can materials on the demagnetization characteristics and electromagnetic performance of CPMSM under three-phase short-circuit fault conditions. [Methods] First, the field-circuit coupling calculation method was adopted to comprehensively compare and analyze the key electromagnetic performance indices of CPMSM with SUS430, SUS316, and SUS304 can materials, including three-phase short-circuit current, permanent magnet demagnetization coefficient, air-gap flux density, induced electromotive force, and output torque. Subsequently, the anti-demagnetization mechanism of the motor was revealed by combining the no-load leakage flux coefficient and the operating point of permanent magnets. Finally, a prototype motor was manufactured, and experimental tests were conducted to verify the accuracy and reliability of the established finite element simulation model. [Results] Under three-phase short-circuit fault conditions, the CPMSM with SUS430 can exhibited significantly lower peak d -axis and q -axis currents and extremely slight demagnetization of permanent magnets. Its air-gap flux density, stator flux density, back electromotive force, and output torque remained basically stable before and after the short-circuit fault, with only a slight increase in torque

ripple. In contrast, CPMSMs adopting SUS304 and SUS316 cans suffered severe permanent magnet demagnetization. Specifically, the back electromotive force dropped by more than 64%, the average output torque decreased by 54.6%, and the torque ripple was drastically aggravated after the short-circuit fault. [Conclusion] The magnetic SUS430 can effectively improves the anti-demagnetization capability of the CPMSM during three-phase short-circuit faults. The can permeability is identified as the core parameter dominating the demagnetization characteristics of the CPMSM. The research results of this paper can provide a reliable reference for can material selection and anti-demagnetization design of CPMSMs applied in vacuum pumps and other relevant fields.

Key words: canned permanent magnet synchronous motor; can material; demagnetization characteristic; three-phase short-circuit

摘 要: [目的] 本文以一台 1.5 kW 的屏蔽式永磁同步电机 (CPMSM) 为研究对象, 旨在揭示三相短路故障下屏蔽套材料对 CPMSM 退磁特性与电磁性能的影响规律。[方法] 首先, 采用场路耦合计算方法, 对比分析屏蔽套材料为 SUS430、SUS316、SUS304 的 CPMSM 的三相短路电流、永磁体退磁系数、气隙磁密、感应电动势以及输出转矩等关键电磁性能指标。然后, 通过空载漏磁系数与永磁体工作点揭示抗退磁机理。最后, 制作样机并开展试验, 验证仿真模型准确性。[结果] 三相短路故障下, 屏蔽套材料为 SUS430 的 CPMSM 的 d 、 q 轴电流峰值明显更低, 永磁体退磁程度极轻, 短路前后气隙磁密、定子磁密、感应电动势与输出转矩基本保持稳定, 转矩波动小幅上升; 屏蔽套材料为 SUS304、SUS316 的 CPMSM 的永磁体严重退磁, 空载感应电动势降幅超 64%, 平均转

基金项目: 辽宁省博士科研启动基金 (2025-BS-0809); 国家自然科学基金 (62473061)

Doctoral Research Startup Foundation of Liaoning Province, China (2025-BS-0809); National Natural Science Foundation of China (62473061)

矩下降 54.6%, 转矩波动大幅加剧。【结论】SUS430 磁性不锈钢屏蔽套可有效提升 CPMSM 在三相短路下的抗退磁能力, 屏蔽套磁导率是影响 CPMSM 退磁特性的核心参数。本文研究结果可为真空泵等领域 CPMSM 的屏蔽套选材与抗退磁设计提供参考。

关键词: 屏蔽式永磁同步电机; 屏蔽套材料; 退磁特性; 三相短路

0 引言

目前, 真空泵系统的广泛使用对化工、芯片制造和核工业等领域产生了重大影响, 提高了安全性并促进了各行业的进步^[1]。将屏蔽式永磁同步电机 (Canned Permanent Magnet Synchronous Motor, CPMSM) 应用于真空泵系统, 能提高真空泵系统的效率、可靠性和安全性, 因此受到越来越多的关注^[2-3]。

永磁同步电机 (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM) 存在永磁体不可逆退磁的风险, 而不可逆退磁会导致电机性能下降、降低使用寿命且造成经济损失。修复不可逆退磁需对永磁体进行二次充磁或更换永磁体, 操作过程复杂。因此, 在设计永磁电机时通常要进行退磁校核。

三相短路是 PMSM 短路故障类型之一, 其短路电流比其他类型短路 (如相间短路和匝间短路) 的故障电流更大, 三相短路电流通常为额定电流的 3~4 倍^[4]。短路电流会产生与永磁体磁场方向相反的退磁磁场, 因此较大的短路电流是造成 PMSM 发生不可逆退磁的原因之一。此外, 对于一些严重故障情况, PMSM 会通过三相短路的方式, 保护或防止控制器的电气系统进一步损坏^[5]。因此, 研究三相短路条件下 PMSM 的退磁问题非常重要。

学者们针对三相短路条件下 PMSM 的退磁问题开展了大量研究。例如, 电机设计参数对退磁特性的影响、短路退磁后电机的性能以及通过优化设计提高抗退磁能力。文献[6]研究了尺寸参数对表贴式 PMSM 三相短路电流和退磁的影响, 提出合理选择设计参数可降低短路电流从而减轻去磁问题。文献[7]采用有限元方法研究了负载特性对表贴式 PMSM 三相短路和退磁的影响, 分析了在恒定速度和不同负载条件下电机的

短路和退磁情况。文献[8]针对逆变器供电的永磁电机局部不可逆退磁问题, 利用永磁体细分模型和子域法, 提出了一种快速计算不可逆退磁的方法, 同时提出了一个包含驱动控制方案且能够考虑退磁累积效应和磁饱和效应的多物理场耦合动态模型, 利用该模型确定了影响永磁电机局部不可逆退磁的关键因素。文献[9]结合解析法和有限元法, 分析了三相对称短路条件下的 V 型永磁转子风力发电机的永磁体退磁性能, 得出电机工作温度是决定短路期间是否发生不可逆退磁的关键因素, 此外转子结构对退磁性能也有显著影响。文献[10]对比分析了分布式绕组和集中式绕组内置式 PMSM 在发生三相绕组短路故障时电机的退磁风险, 结果表明分布式绕组电机的抗退磁能力更优。文献[11]发现转子位置和电流角度是影响永磁电机在三相短路条件下退磁的重要因素, 因此在进行退磁分析时要全面考虑这些因素。文献[12]研究表明对于旋转对称情况, 即使三相短路故障导致电机退磁后, 也不会产生不平衡磁力。文献[13]对分数槽表贴式永磁风力发电机在短路故障退磁后电机的齿槽转矩和转矩波动等性能进行了研究, 发现退磁会延长齿槽转矩的周期并增加其幅值, 此外还会导致额外的转矩波动分量。

上述研究为提高电机的可靠性和性能提供了理论和实践支持。上述研究多是针对 PMSM 开展的, 其研究结论同样适用于 CPMSM, 因为 CPMSM 与 PMSM 相比, 唯一区别是 CPMSM 的定子被一个薄的圆筒形高强度屏蔽套隔开, 以防止真空泄漏, 其结构如图 1 所示。目前, 屏蔽套常用材料有马氏体不锈钢、奥氏体不锈钢和铂铑合金等^[14]。

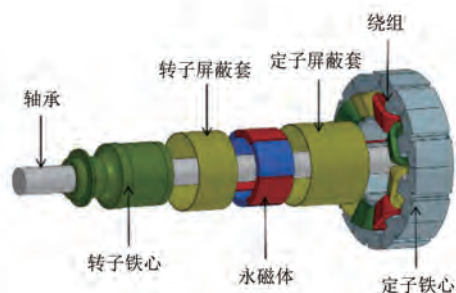


图 1 CPMSM 结构

Fig. 1 Structure of CPMSM

屏蔽套对 CPMSM 的性能有显著影响,屏蔽套参数的选取在电机设计中至关重要。文献[15]分析了屏蔽套厚度对 CPMSM 效率和功率因数的影响,结果表明屏蔽套厚度越薄,电机效率越高,但没有考虑屏蔽套强度问题。文献[16]研究了屏蔽套材料对电机性能的影响,结果表明当采用非磁性屏蔽套时电机效率较高,但功率因数较低。文献[17]提出使用磁性不锈钢屏蔽套可以显著提高电机的功率因数。文献[18]分析了不同屏蔽套材料下电机的电磁场和损耗。然而,目前关于屏蔽套参数对 CPMSM 在三相短路故障下永磁体退磁问题的影响还缺乏深入研究,屏蔽套材料属性如何影响退磁过程以及三相短路故障条件下 CPMSM 的电磁性能尚不清晰。

基于此,本文利用场路耦合计算模型获得了三种常见不锈钢材料屏蔽套的 CPMSM 发生三相短路故障时的电流波形,对比分析了短路电流特征。并利用获得的短路电流计算 CPMSM 永磁体的退磁系数。然后对比分析三种屏蔽套的 CPMSM 在发生三相短路前后的电磁性能,得出屏蔽套材料为 SUS430 的 CPMSM 具有较强的抗退磁能力。最后从永磁体工作点和磁通路径两个角度解释了屏蔽套材料影响 CPMSM 的退磁过程。本研究为 CPMSM 的优化设计及提高其安全性、可靠性提供了有意义的参考。

1 样机参数和有限元模型

利用场路耦合方法分析屏蔽套材料对 CPMSM 三相短路电流和退磁的影响。以一台额定功率为 1.5 kW,额定转速为 9 000 r/min 的 CPMSM 为研究对象,其主要参数如表 1 所示。

基于表 1 参数建立 CPMSM 的有限元模型,同时搭建外部控制电路用来设定电机在某一时刻发生三相短路故障。场路耦合计算模型如图 2 所示。

为提高计算效率,忽略位移电流对 CPMSM 电磁场的影响。瞬态电磁场模型的控制方程和边界条件^[19]如式(1)所示:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = -J_s + \sigma \frac{dA_z}{dt} \\ A_z|_{\Gamma} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

表 1 CPMSM 主要参数

Tab. 1 Main parameters of CPMSM

参数名称	参数值
额定功率/kW	1.5
额定电压/V	200
定子外径/mm	107
定子内径/mm	50.5
气隙长度/mm	0.5
轴向长度/cm	25
额定转速/(r · min ⁻¹)	9 000
槽数	9
永磁体材料	N38UH
屏蔽套厚度/mm	0.5
极对数	3

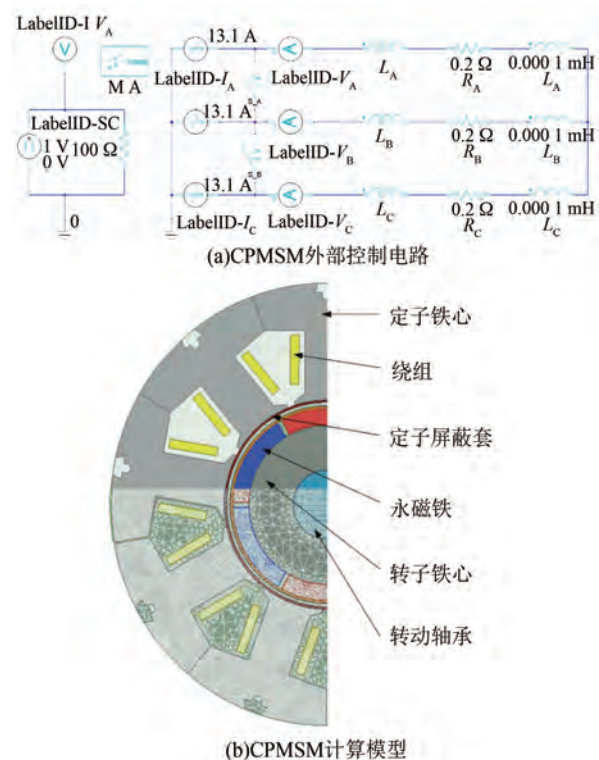


图 2 场路耦合计算模型

Fig. 2 Field-path coupling calculation model

式中: A_z 为磁矢量势; μ 为磁导率; σ 为电导率; J_s 为电流密度; Γ 为外边界域。

2 屏蔽套材料对 CPMSM 三相短路时电磁性能的影响

本文研究了屏蔽套材料为 SUS430、SUS316

和 SUS304 的 CPMSM 的三相短路故障电流特性和不可退磁行为。三种屏蔽套材料物性参数如表 2 所示。

表 2 三种屏蔽套材料物性参数

Tab. 2 Physical parameters of three can material

参数名称	SUS316	SUS430	SUS304
组织类型	奥氏体	铁素体	奥氏体
相对磁导率	1.1	200	1.0
GB 牌号	06Cr17Ni12Mo2	10Cr17	06Cr19Ni10
电导率/(S·m ⁻¹)	1.67×10 ⁶	1.33×10 ⁶	1.81×10 ⁶
密度/(g·cm ⁻³)	7.98	7.70	7.93
弹性模量/Gpa	193	200	193
屈服强度/MPa	≥205	≥205	≥205
抗拉强度/MPa	≥520	≥420	≥515

2.1 屏蔽套材料对三相短路电流的影响

当相磁链达到峰值发生三相短路时,短路损害程度最严重,即短路电流最大^[6]。通过仿真电机负载相磁链,选择 2.43 ms 作为三相短路时刻。图 3 为三种屏蔽套材料的 CPMSM 在发生三相短路前后的三相绕组电流波形。

由图 3 可知,发生三相短路前,三相绕组电流对称,电流最大值为 13.1 A;发生三相短路后,三相绕组电流幅值都出现了不同程度的变化,三相电流不再对称。其中 C 相电流变化最严重,其电流最大值增加至 45.64 A,是原来电流峰值的 3.48 倍。此外,屏蔽套材料会影响三相短路电流的大小。以 C 相电流为例,发生三相短路时,屏蔽套材料为 SUS304、SUS316 和 SUS430 的 CPMSM 对应的 C 相电流最大值分别为 45.62 A、45.64 A 和 23.31 A,分别为原来电流峰值的 3.48 倍、3.48 倍和 1.78 倍。

由于 d 轴电流峰值是决定永磁体是否退磁的重要影响因素之一,因此基于场路耦合计算模型获得电机发生三相短路前后的 d、q 轴电流波形,如图 4 所示。

由图 4 可知,三相短路前,q 轴电流为 13.1 A,由于采用了 $i_d = 0$ 的控制方式,因此短路前电机 d 轴电流为 0;发生三相短路后,d、q 轴电流都发生了明显波动,对电机的转矩波动性能和永磁体的磁性能有较大影响。屏蔽套材料为 SUS304、SUS316 和 SUS430 的 CPMSM 的 d 轴电流

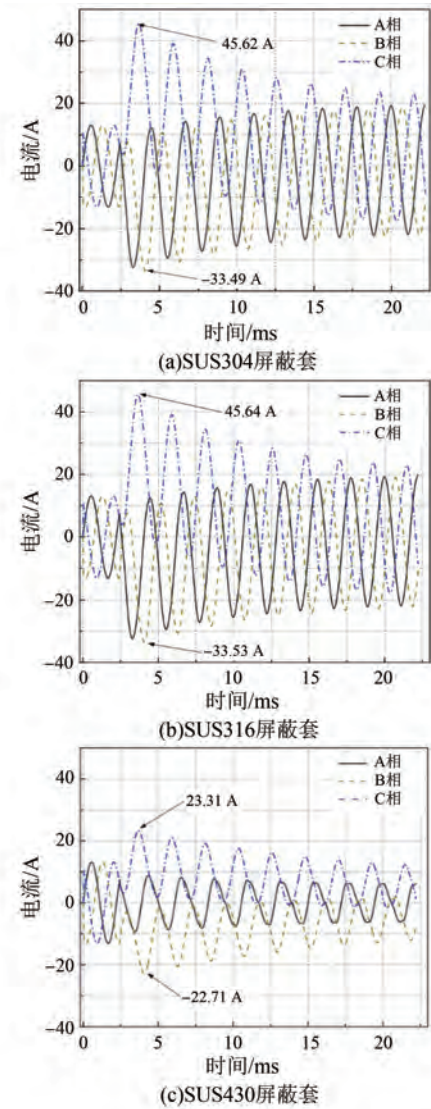


图 3 三种屏蔽套材料的 CPMSM 三相短路电流波形

Fig. 3 Three-phase short-circuit current waveforms of CPMSM with three can materials

峰值分别为-68.06 A、-68.08 A 和-36.98 A。q 轴电流峰值分别为 31.71 A、31.70 A 和 21.68 A。由此可得,磁性不锈钢 SUS430 与非磁性不锈钢 SUS304 和 SUS316 相比,不仅可以降低 CPMSM 三相短路 d 轴电流峰值,还可以降低 q 轴电流峰值。

2.2 屏蔽套材料对三相短路后永磁体退磁系数的影响

当前,随着有限元软件的发展,可以计算永磁体非线性退磁曲线和回复线的工作点。当退磁场将永磁体工作点移至拐点以下时,发生不可逆退磁。退磁场去除后,永磁体工作点沿回复线移动,该回复线平行于退磁曲线的线性部分^[13-15]。

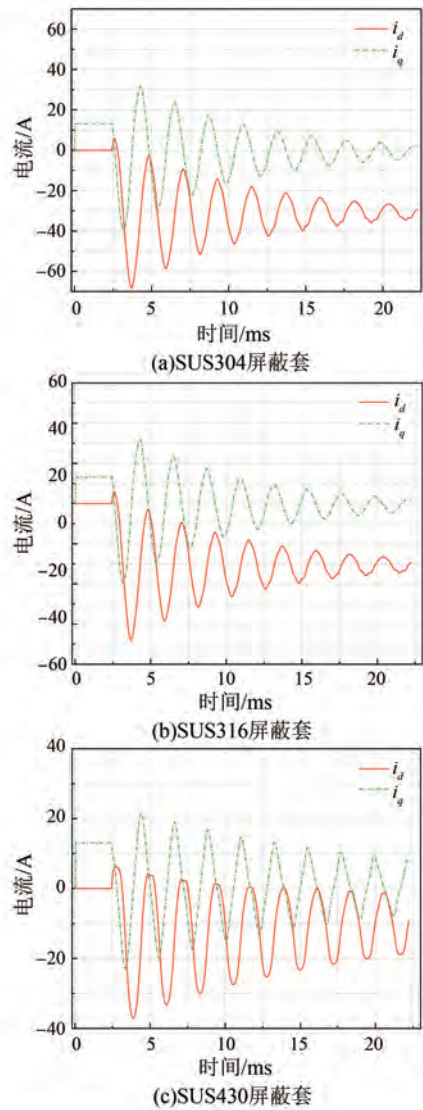


图 4 三种屏蔽套材料的 CPMSM 三相短路时 dq 轴电流波形

Fig. 4 d - q axis current waveforms of CPMSM with three can materials under three-phase short-circuit fault

利用获得的 d 轴电流峰值,结合有限元模型对不同屏蔽套材料的 CPMSM 的永磁体退磁系数进行了计算,结果如图 5 所示。永磁体最大去磁时退磁系数如表 3 所示。

退磁系数定义为

$$\text{Demag_Coef} = B_{r1}/B_{r0} \tag{2}$$

式中: B_{r0} 为永磁体的固有剩磁; B_{r1} 为退磁后剩磁。

$\text{Demag_Coef} = 1$ 代表永磁体所在位置没有退磁; $\text{Demag_Coef} = 0$ 代表永磁体所在位置已经

完全退磁。

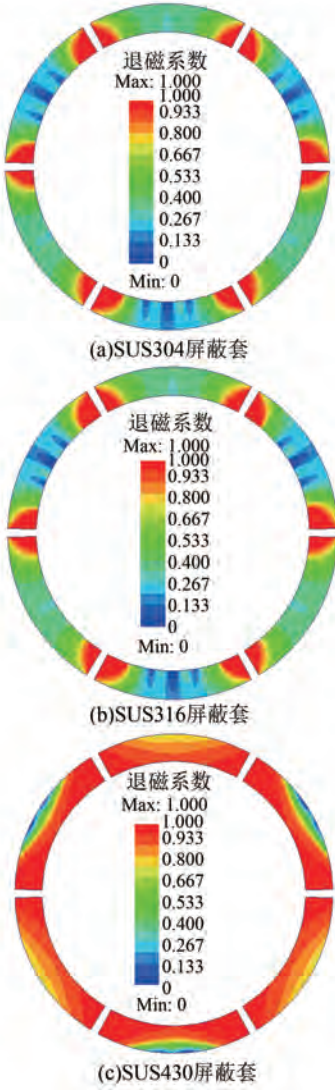


图 5 三相短路后三种屏蔽套材料的 CPMSM 永磁体退磁系数

Fig. 5 Demagnetization coefficient of CPMSM permanent magnet with three can materials after three-phase short-circuit

表 3 永磁体最大去磁时退磁系数

Tab. 3 Demagnetization coefficient of permanent magnet under maximum demagnetization condition

屏蔽套材料	最大去磁时退磁系数
SUS304	0
SUS316	0
SUS430	0.964

由图 5 可知,发生三相短路后,永磁体出现了不同程度的退磁,永磁体的退磁系数以成对形式

在圆周方向上呈周期性分布。对于任意一块永磁体,在圆周方向上磁极中心的退磁系数小于磁极两端的退磁系数,表明永磁体的退磁过程是由中心向两端逐渐形成的,这与文献[4]的研究结论一致。

由表 3 可知,发生三相短路后,屏蔽套材料为 SUS304 和 SUS316 的 CPMSM 部分永磁体已经完全退磁,而屏蔽套材料为 SUS430 的 CPMSM 永磁体没有完全退磁,表明 SUS430 作为屏蔽套材料可以提高 CPMSM 三相短路后的抗退磁能力。这与屏蔽套材料为 SUS430 的电机具有较小的 d 轴电流峰值存在一定关系。

2.3 屏蔽套材料对三相短路前后气隙磁密的影响

CPMSM 发生三相短路后,较大的短路电流可能引起永磁体部分退磁,对电机的电磁场分布、电磁参数和性能指标产生影响。发生三相短路前后,3 种屏蔽套材料的 CPMSM 的气隙磁密波形及其谐波成分如图 6、图 7 所示。

由图 6 和图 7 可知,与短路前相比,发生三相短路后屏蔽套材料为 SUS304 和 SUS316 的 CPMSM 的气隙磁密基波幅值下降明显,但也有一些谐波幅值增加,如 2 次、3 次和 5 次。气隙磁密基波幅值下降是因为短路后永磁体发生了退磁,谐波幅值增加可能是因为短路导致了三相不对称。

三相短路前后,屏蔽套材料为 SUS430 的 CPMSM 的气隙磁密无明显变化,且气隙磁密波形的正弦度要优于其他两种屏蔽套材料的 CPMSM。短路前,屏蔽套材料为 SUS430 的 CPMSM 气隙磁密波形畸变率为 15.11%,而屏蔽套材料为 SUS304 和 SUS316 的 CPMSM 气隙磁密波形畸变率皆为 26.79%。较小的气隙磁密波形畸变率有利于提高电机的品质参数。

2.4 屏蔽套材料对三相短路前后定子齿部磁密的影响

由于电机定子齿部磁密关系到电机磁场分布的均匀性和产生电磁力的大小,合理设计和保证电机定子齿部的磁密分布对于提高电机的机电能量转换效率、性能和稳定性至关重要。因此对三相短路前后 CPMSM 的定子齿部磁密分布进行了分析,如图 8 所示。

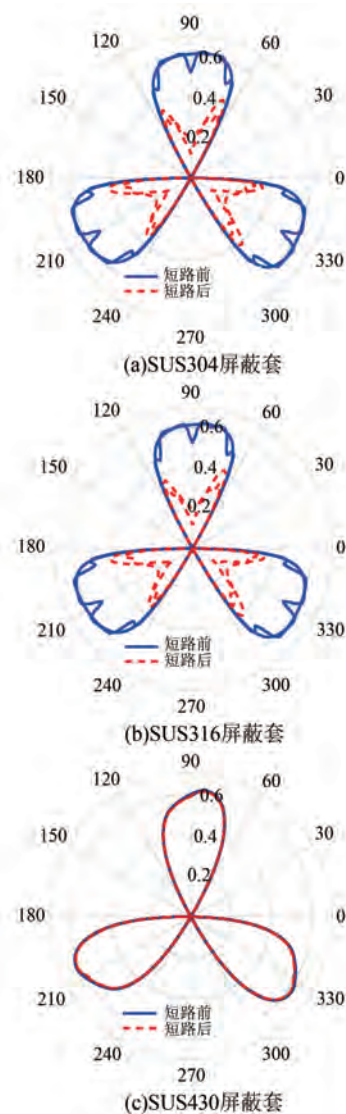


图 6 三相短路前后 CPMSM 气隙磁密波形对比
Fig. 6 Comparison of air-gap flux density waveforms of CPMSM before and after three-phase short circuit

由图 8 可知,三相短路后,屏蔽套材料为 SUS304 和 SUS316 的 CPMSM 定子齿部和轭部磁密均有所降低,削弱电机的转矩输出能力。对于屏蔽套材料为 SUS430 的 CPMSM,短路前后定子磁密并未发生明显变化,定子磁密的分布也较为一致。此外,短路前 CPMSM 的定子齿部和轭部磁密都设计得较低,其目的是降低定子屏蔽套损耗,提高电机的运行效率。

2.5 屏蔽套材料对三相短路前后感应电动势的影响

对 CPMSM 三相短路前后的空载感应电动势

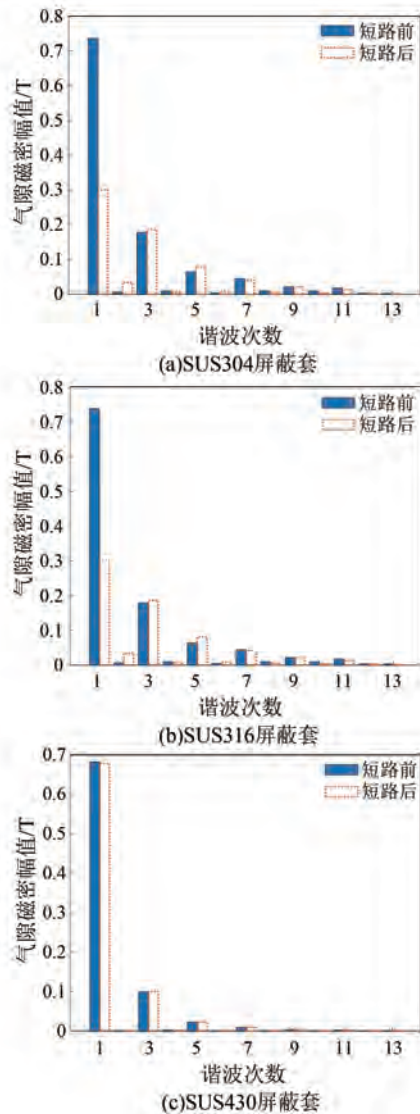


图7 三相短路前后 CPMSM 气隙磁密谐波成分对比
Fig.7 Harmonic components comparison of air-gap flux density of CPMSM before and after three-phase short-circuit

进行了对比分析,结果如图9所示。

由图9可知,发生三相短路后,屏蔽套材料为 SUS304 和 SUS316 的 CPMSM 的空载感应电动势峰值由原来的 94.51 V 分别下降至 33.88 V 和 33.94 V,分别下降了 64.15% 和 64.09%,可见永磁体发生了较为严重的退磁;而屏蔽套材料为 SUS430 的 CPMSM 的空载感应电动势几乎无变化,表明其具有优异的抗退磁能力。

2.6 屏蔽套材料对三相短路前后电机输出转矩的影响

对三种屏蔽套材料的 CPMSM 在发生三相短

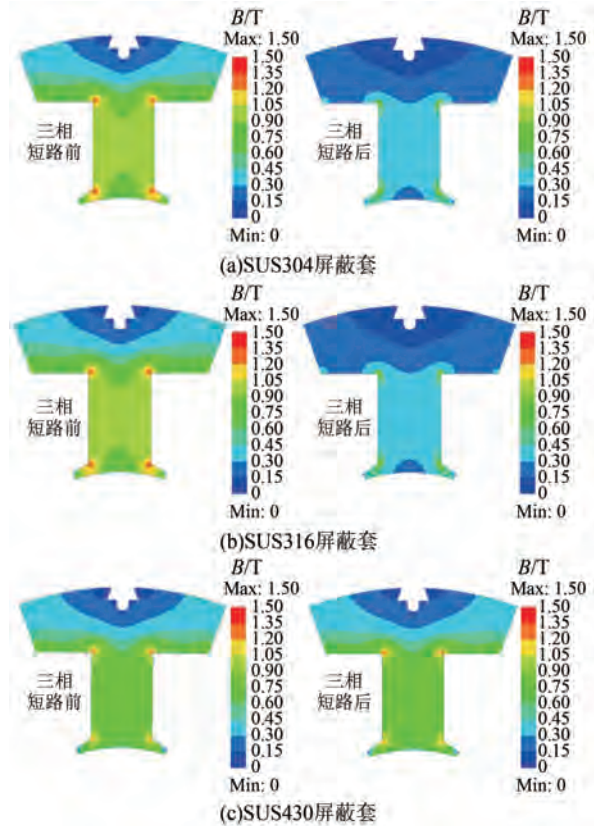


图8 三相短路前后 CPMSM 定子齿部磁密对比

Fig.8 Comparison of stator tooth flux density of CPMSM before and after three-phase short circuit

路前后的输出转矩进行了分析,结果如图10所示。

由图10(a)可知,对于屏蔽套材料为 SUS304 的 CPMSM,三相短路前平均转矩为 $1.63 \text{ N}\cdot\text{m}$,短路后平均转矩降至 $0.74 \text{ N}\cdot\text{m}$,降低了 54.60%;短路前转矩波动为 8.57%,短路后转矩波动增加至 23.25%。由图10(b)可知,对于屏蔽套材料为 SUS316 的 CPMSM,三相短路前平均转矩为 $1.65 \text{ N}\cdot\text{m}$,短路后平均转矩降至 $0.75 \text{ N}\cdot\text{m}$,降低了 54.55%;短路前转矩波动为 8.25%,短路后转矩波动增加至 23.17%。对于屏蔽套材料为 SUS430 的 CPMSM,三相短路前平均转矩为 $1.42 \text{ N}\cdot\text{m}$,短路后平均转矩为 $1.41 \text{ N}\cdot\text{m}$;短路前转矩波动为 7.56%,短路后转矩波动为 7.59%,短路前后的平均转矩和转矩波动基本不变。

可见,SUS430 屏蔽套可以保证 CPMSM 在发生三相短路后的转矩输出能力和转矩波动性能,但在相同电流激励条件下,屏蔽套材料为 SUS430 的 CPMSM 的转矩输出能力要逊色于屏蔽套材料

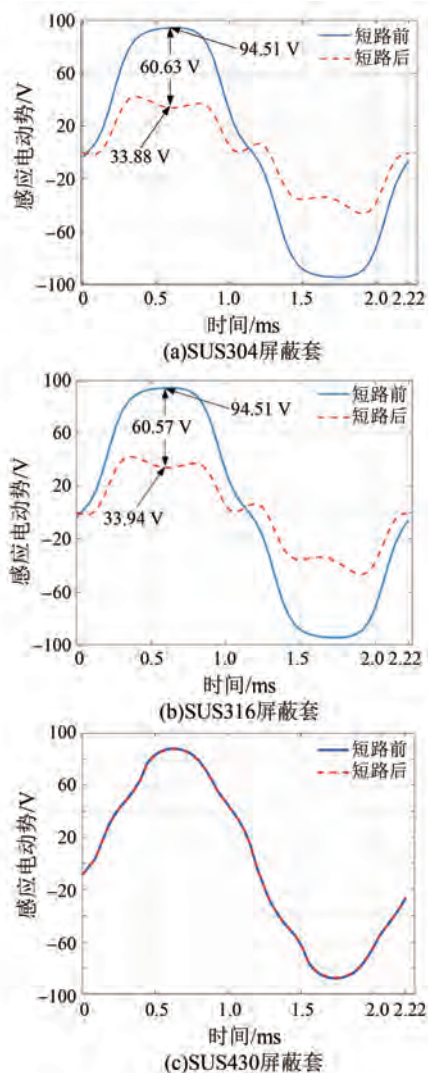


图 9 三相短路前后 CPMSM 空载感应电动势对比

Fig. 9 Comparison of no-load induced electromotive force of CPMSM before and after three-phase short circuit for SUS304 and SUS316 of CPMSM.

3 磁性屏蔽套电机永磁体抗退磁能力影响因素分析

屏蔽套材料为 SUS430 的 CPMSM 在发生三相短路后具有较强的抗退磁能力, 对其进行原因分析。永磁体退磁的影响因素主要包括 d 轴去磁电流大小、永磁体的工作点、磁通路径以及永磁体工作温度。本文假定永磁体具有相同的工作温度。由图 4 可知, 与屏蔽套材料为 SUS304、SUS316 的 CPMSM 相比, 屏蔽套材料为 SUS430 的 CPMSM 的 d 轴电流较小, 这是其具有较强抗

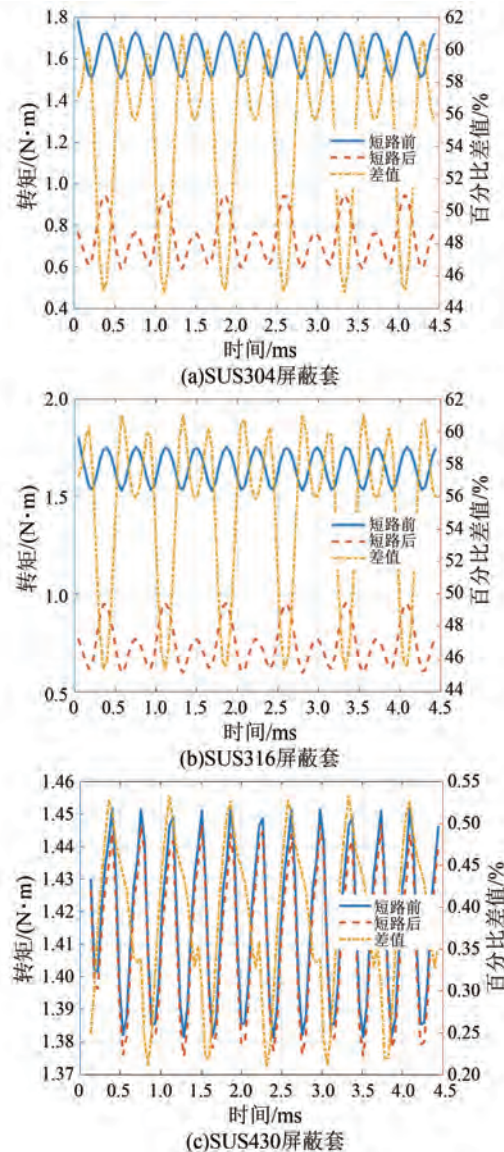


图 10 三相短路前后 CPMSM 输出转矩对比

Fig. 10 Comparison of output torque of CPMSM before and after three-phase short circuit

退磁能力的原因之一。但永磁体工作点和磁通路径是否也是提高其抗退磁能力的原因尚不清楚。因此对三种屏蔽套材料的 CPMSM 的磁通路径和永磁体工作点进行对比分析。

3.1 空载漏磁系数分析

空载漏磁系数是空载时的总磁通与主磁通之比, 其大小不仅反映空载时永磁体向外磁路提供的总磁通的有效利用程度, 还影响电动机中永磁体抗退磁能力^[20]。本文基于有限元模型, 利用磁密积分法对三种屏蔽套材料的 CPMSM 在发生三相短路前后的空载漏磁系数进行了计算, 结果如

表4所示。表4中,总磁通为永磁体提供的磁通,主磁通为电机定子齿部磁通。

表 4 三种屏蔽套材料的 CPMSM 空载漏磁系数对比

Tab. 4 Comparison of no-load magnetic leakage coefficients of CPMSM with three can materials

参数名称	SUS304	SUS316	SUS430
短路前总磁通/Wb	93.32	93.33	112.97
短路前主磁通/Wb	60.19	60.20	53.60
短路前空载漏磁系数	1.55	1.55	2.11
短路后总磁通/Wb	50.16	50.24	112.52
短路后主磁通/Wb	24.88	24.93	53.25
短路后空载漏磁系数	2.02	2.02	2.11

由表4可知,短路前屏蔽套材料为SUS304和SUS316的CPMSM的漏磁系数相同,且低于屏蔽套材料为SUS430的CPMSM的漏磁系数。SUS304和SUS316均为非磁性不锈钢,二者磁导率相同,电导率不同;SUS430为磁性不锈钢,与SUS316相比,二者电导率相近,磁导率不同。对比分析可知,屏蔽套材料的电导率对电机的漏磁系数影响较小,而磁导率影响较大,且屏蔽套材料的磁导率越大,漏磁系数越大。较大的漏磁系数转移了部分退磁磁场,因此抗退磁能力更优。此外,从表4还可看出,短路发生前,虽然屏蔽套材料为SUS430的CPMSM比屏蔽套材料为SUS304和SUS316的CPMSM能够提供更多的总磁通,但由于漏磁较多,其主磁通更低。因此,在相同电流条件下,屏蔽套材料为SUS430的CPMSM的转矩输出能力更低。

发生三相短路后,对于屏蔽套材料为SUS304和SUS316的CPMSM,较大的短路电流导致总磁通和主磁通都下降。由于主磁通下降程度更严重,因此与短路前相比,漏磁系数变大。对于屏蔽套材料为SUS430的CPMSM,短路后磁通变化较小,因此漏磁系数基本未变,但仍大于SUS304和SUS316的漏磁系数。

3.2 永磁体空载工作点分析

基于有限元模型计算三种屏蔽套的CPMSM的空载永磁体工作点,结果如表5所示。永磁体工作点定义为 (b_m, h_m) , $b_m = B_m/B_r$, $h_m = H_m/H_r$ 。其中, B_m 为永磁体实际磁密; B_r 为永磁体剩磁, $B_r = 1.02\text{ T}$; H_m 为永磁体实际矫顽力; H_c 为永磁

体矫顽力, $H_c = -5.06 \times 10^5\text{ A/m}$ 。

表 5 三种屏蔽套材料的 CPMSM 空载永磁体工作点对比

Tab. 5 Comparison of no-load permanent magnet working points of CPMSM with three can materials

屏蔽套材料		B_m/T	$H_m/(\text{A} \cdot \text{m}^{-1})$	空载永磁体工作点
SUS430	短路前	0.693	-2.53×10^5	(0.678, 0.499)
	短路后	0.201	-1.06×10^5	(0.196, 0.209)
SUS316	短路前	0.693	-2.53×10^5	(0.678, 0.499)
	短路后	0.201	-1.06×10^5	(0.196, 0.209)
SUS430	短路前	0.849	-1.35×10^5	(0.831, 0.267)
	短路后	0.833	-1.34×10^5	(0.816, 0.266)

由表5可知,无论是短路前还是短路后,屏蔽套材料为SUS304和SUS316的CPMSM空载永磁体工作点相同;但短路后永磁体工作点下降明显,由0.678下降至0.196,降低了71.09%。然而,对于屏蔽套材料为SUS430的CPMSM,永磁体工作点在三相短路前后变化很小,由0.831下降至0.816,仅降低了1.81%。

4 试验验证

为了验证理论分析的正确性,本文研制了一台9槽6极内转子表贴式CPMSM样机,如图11所示。样机的屏蔽套材料为SUS304。同时搭建了如图12所示的样机测试平台。

按照GB/T 22669—2008《三相永磁同步电动机试验方法》,采用反拖法对样机空载反电动势进行测定,即对原动机与被测样机进行机械连接,原动机拖动被测样机在同步转速下作为发电机空载运行,分别测量被测样机的出线端电压 U_{ab} 、

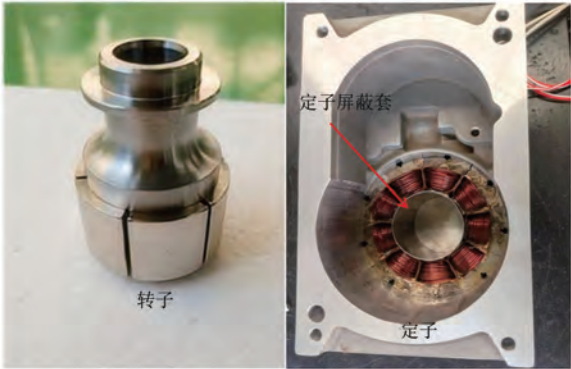


图 11 CPMSM 样机

Fig. 11 CPMSM prototype

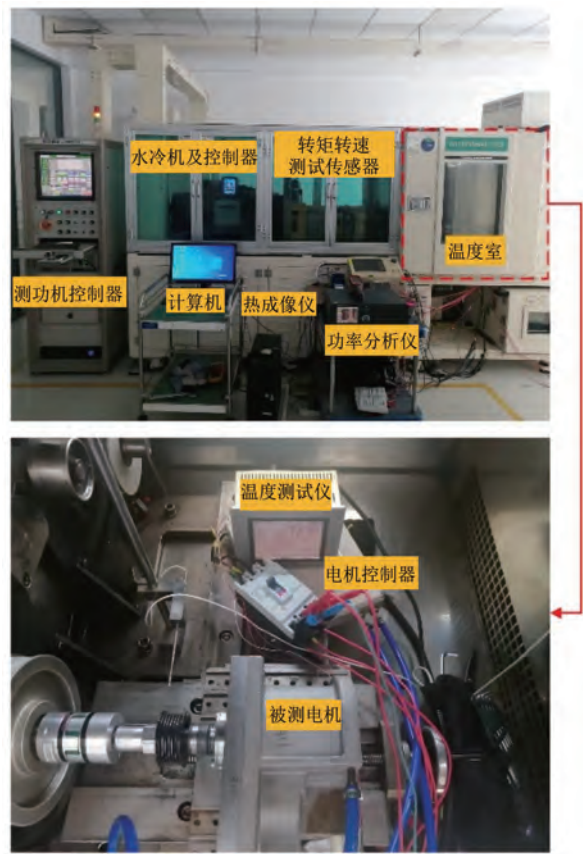


图 12 样机测试平台

Fig. 12 Prototype test platform

U_{bc} 、 U_{ac} ,取其平均值作为空载反电动势。测量结果与仿真结果对比如图 13 所示。

由图 13 可知,样机空载反电动势试验波形与仿真波形具有较好的一致性。实测样机空载反电动势有效值为 91.7 V,仿真计算值为 89.6 V,仅相差 2.29%,验证了有限元模型的准确性。

5 结语

为了研究屏蔽套材料对 CPMSM 三相短路电流及退磁特性的影响规律,本文采用场路耦合计算方法对比分析了 3 种常见屏蔽套材料的 CPMSM 的三相短路后特性,结论如下。

(1) 发生三相短路后,与屏蔽套材料为 SUS304 和 SUS316 的 CPMSM 相比,屏蔽套材料为 SUS430 的 CPMSM 的输出转矩变化更小,具有较强的抗退磁能力。

(2) 屏蔽套材料为 SUS430 的 CPMSM 具有较强的抗退磁能力不仅是因为其具有较小的三相短路电流,还因为其具有较高的永磁体工作点及较

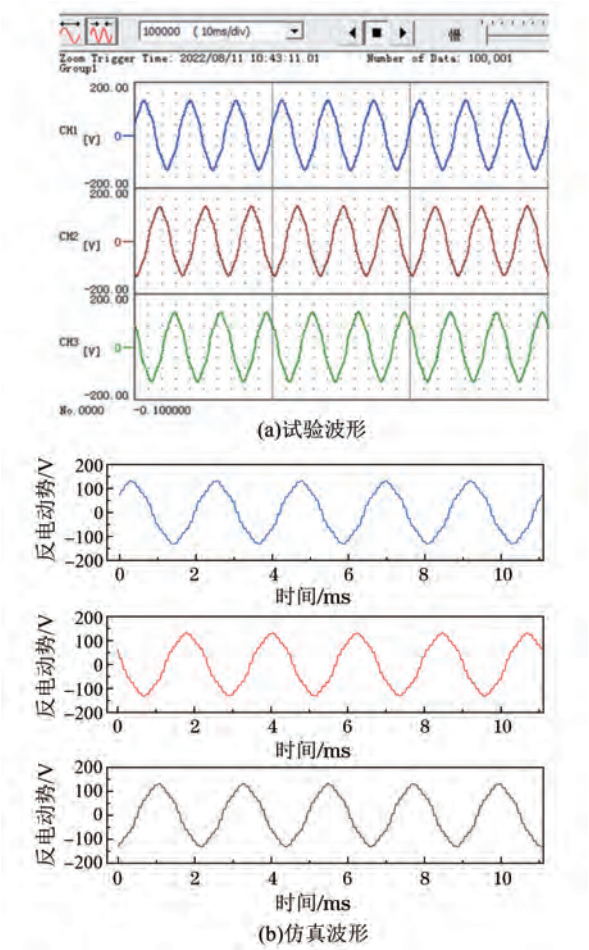


图 13 样机空载反电动势波形

Fig. 13 The no-load back electromotive waveforms of the prototype

大的漏磁系数。

(3) 屏蔽套材料的电导率对 CPMSM 抗退磁能力影响较小,磁导率是抗退磁能力的决定性因素。

利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献

李明、苗绪世进行了方案设计、内容总结与论文撰写,李明进行了试验研究,李明、苗绪世、伦淑娴参与了论文的审核与修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

The scheme design, content summary and

paper writing were carried out by Li Ming, Miao Xushi. The experiment was conducted by Li Ming. The manuscript was reviewed and revised by Li Ming, Miao Xushi and Lun Shuxian. All authors have read the last version of the paper and consented for submission.

参考文献

- [1] 田士强, 安辉, 陆艳君, 等. 真空泵用反凸极永磁同步电机设计与性能分析[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(5): 72-80.
Tian S Q, An H, Lu Y J, et al. Design and performance analysis of reverse salient permanent magnet synchronous motor for vacuum pump [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(5): 72-80.
- [2] 郑继鑫, 李明, 段卫川, 等. 批量生产永磁体性能差异对屏蔽式永磁同步电机的影响[J]. 电机与控制应用, 2026, 53(2): 188-198.
Zheng J X, Li M, Duan W C, et al. Impact of batch-produced permanent magnet performance variations on canned permanent magnet synchronous motors [J]. Electric Machines & Control Application, 2026, 53(2): 188-198.
- [3] Zhang Z, An Y, Li M, et al. Influence of asymmetrical stator axes on the performance and multi-physical field of canned permanent magnet machine for vacuum dry pump with vector converter supply [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2020, 35(4): 2129-2140.
- [4] Liu L, Wang K, Guo L L, et al. Analysis of inter-turn short circuit faults in dual three-phase PMSM for electromechanical actuator [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2023, 9(3): 4059-4070.
- [5] 张鹏, 赵国新, 崔效源, 等. 匝间短路故障对永磁同步电机定子侧电流影响分析[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(6): 78-87.
Zhang P, Zhao G X, Cui X Y, et al. Analysis of the effect of inter-turn short-circuit fault on the stator current of permanent magnet synchronous motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(6): 78-87.
- [6] Du Y D, Wu L J, Zhan H L, et al. Influence of dimensional parameters on three-phase short circuit

- and demagnetization in surface-mounted PM machines [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36(3): 2514-2523.
- [7] Wu L J, Du Y D, Chen Z K, et al. Influence of load characteristics on three-phase short circuit and demagnetization of surface-mounted PM synchronous motor [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(3): 2427-2440.
- [8] Liao C D, Zhang Z R, Gu X P, et al. A hybrid demagnetization performance prediction model for Halbach array PMSM under symmetry short circuit fault [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(10): 12846-12857.
- [9] Guo Y J, Ding Y, Jin P. Demagnetization analysis of a V-shape PM salient pole wind generator under sudden short-circuits after rated load condition [C]//2020 12th IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, Nanjing, China, 2020: 1-5.
- [10] Mynarek P, Kołodziej J, Młot A, et al. Influence of a winding short-circuit fault on demagnetization risk and local magnetic forces in V-shaped interior PMSM with distributed and concentrated winding [J]. Energies, 2021, 14(16): 5125.
- [11] Peng W, Kun W, Meng F. Demagnetization study of permanent magnet machine under three phase short circuit [C]//2023 IEEE 6th International Electrical and Energy Conference, Hefei, China, 2023: 2705-2710.
- [12] Du Y D, Wu L J, Zhan H L, et al. Investigation of postdemagnetization unbalanced magnetic force in PM machines considering short-circuit faults [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2021, 7(4): 2728-2742.
- [13] Du Y D, Dong Z L, Zhan H L, et al. Investigation of post-demagnetization torque ripple in fractional-slot surface-mounted PM wind power generators after short circuit faults [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2023, 60(1): 215-228.
- [14] Li M, Lun S X, Dang C T, et al. Influence of laminated stainless steel composite can sleeve on electromagnetic field and performance of canned induction motor [J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2023, 71(3): 273-285.
- [15] Wu Q S, Li W, Li J, et al. Electromagnetic-thermal analysis of high-temperature direct drive electric-

- actuated valve canned permanent magnet synchronous motor [J]. IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2023, 18(1): 105-119.
- [16] Gao L L, Wei J W, Li C X, et al. Analyses on performances of megawatt double-canned induction motors with different can materials [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(2): 667-674.
- [17] An Y J, Liu G M, Wen H L, et al. Analysis and experiment of the eddy current losses for canned motor [J]. Advanced Materials Research, 2012, 383-390: 7521-7525.
- [18] 苗绪世, 李明, 伦淑娴. 新型陶瓷屏蔽套材料对屏蔽式永磁同步电机电磁热性能的影响研究[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(12): 1317-1326.
- Miao X S, Li M, Lun S X. Study on the effect of new ceramic shielding material on the electromagnetic thermal properties of shielded permanent magnet synchronous motors [J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(12): 1317-1326.
- [19] Yan B, Li X L, Wang X H, et al. An improved 2-D subdomain method towards electromagnetic performance analysis of line-start permanent magnet synchronous motor [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2023, 9(3): 4339-4351.
- [20] 赵晓坤, 张程, 朱良宽. 无定子轭轴向磁通永磁同步电机弱磁扩速能力研究[J]. 电机与控制应用, 2026, 53(2): 139-147.
- Zhao X K, Zhang C, Zhu L K. Research on flux-weakening speed expansion methods for yokeless-stator axial-flux permanent magnet synchronous motors [J]. Electric Machines & Control Application, 2026, 53(2): 139-147.

收稿日期:2026-05-13

收到修改稿日期:2026-06-23

作者简介:

苗绪世(2001—),男,硕士研究生,研究方向为特种电机设计及多物理场研究,2024008020@bhu.edu.cn;

*通信作者:李明(1987—),男,博士,副教授,研究方向为特种电机设计及控制技术,liming1@qymail.bhu.edu.cn。