

新型铁钴基组合磁极对轮毂电机 电磁性能影响研究

陶大军*, 王海祥, 周 杰, 席成通, 姜宏宇

(哈尔滨理工大学 大型电机电气与传热技术国家地方联合工程研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150080)

Study on the Influence of New Type of FeCo-Based Combined Magnetic Pole on the Electromagnetic Performance of In-Wheel Motors

TAO Dajun*, WANG Haixiang, ZHOU Jie, XI Chengtong, JIANG Hongyu

(National Engineering Research Center of Large Electric Machines and Heat Transfer Technique,
Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: [Objective] In-wheel motors have compact space and harsh heat dissipation conditions, and the interior permanent magnets are highly susceptible to irreversible demagnetization under high temperature and large armature current surges, which seriously threatens the reliability and performance of the motors. To address this issue, this study designs a new type of FeCo-based combined magnetic pole to improve the anti-demagnetization ability and comprehensive electromagnetic performance of in-wheel motors. [Methods] Firstly, the effects of different temperatures and armature currents on the demagnetization characteristics of motor permanent magnet were systematically analyzed, and the easily demagnetized area of permanent magnet was determined. Then, a new type of high coercivity FeCo-based material was used to replace the traditional NdFeB in the easily demagnetized area to form a combined magnetic pole. The effects of different combination ratios of FeCo-based and NdFeB in the combined magnetic pole on the electromagnetic performance were investigated through simulation, and the optimal combination ratio of FeCo-based and NdFeB was determined. Finally, the electromagnetic performance of single magnetic pole motor and combined magnetic pole motor was compared and analyzed. [Results] The motor with combined magnetic pole performed better in various aspects such as rated torque, peak torque and efficiency. At an operating temperature of 110 °C, the rated torque of the combined magnetic pole motor increased by 4 N·m, peak

torque increased by 7 N·m, and maximum efficiency increased by 0.4% compared to the single magnetic pole motor. At a high temperature of 160 °C, the rated torque of the combined magnetic pole motor increased by 8 N·m, torque fluctuation decreased by 0.8%, and peak torque increased by 14 N·m compared to the single magnetic pole motor. At peak conditions, the critical demagnetization temperature of the combined magnetic pole was 15 °C higher than that of the single pole motor. [Conclusion] The designed new type of FeCo-based combined magnetic pole effectively enhances the anti-demagnetization ability of the motor under high temperature and high current operating conditions, and significantly improves the comprehensive electromagnetic performance of the motor, providing an effective technical approach to solve the problem of easy demagnetization of in-wheel motors at high temperatures.

Key words: in-wheel motor; FeCo-based permanent magnet; combined magnetic pole; anti-demagnetization ability; electromagnetic performance

摘 要: 【目的】轮毂电机空间紧凑、散热条件严苛,其内置永磁体在高温和大电枢电流冲击下极易发生不可逆退磁,严重威胁电机的可靠性与性能。针对此问题,本文设计了一种新型铁钴基组合磁极,以提高轮毂电机的抗退磁能力和综合电磁性能。【方法】首先,系统分析了不同温度和电枢电流对电机永磁体退磁特性的影响,并确定了永磁体的易退磁位置。然后,在易退磁区采用新型高矫顽力铁钴基代替传统钕铁硼,形成组合磁极,通过仿真研究了组合磁极中铁钴基与钕铁硼的不同组合比例对其电磁性能的影响,确定了铁钴基与钕铁硼的最佳组合比例。最后,对单一磁极电机和组合磁极电机的电磁性能

基金项目: 黑龙江省自然科学基金(LH2023E084)

Natural Science Foundation of Heilongjiang Province, China
(LH2023E084)

进行对比分析。【结果】组合磁极电机在额定转矩、峰值扭矩以及效率等多方面的表现更优。在 110 ℃ 工作温度下,相较于单一磁极电机,组合磁极电机的额定转矩提升了 4 N·m,峰值扭矩提升了 7 N·m,最高效率提高了 0.4%;在 160 ℃ 高温状态下,相较于单一磁极电机,组合磁极电机的额定转矩提升了 8 N·m,转矩波动下降了 0.82%,峰值扭矩提升了 14 N·m;在峰值工况下,组合磁极的临界退磁温度相较于单一磁极提升了 15 ℃。【结论】所设计的新型铁钴基组合磁极有效提升了电机在高温及大电流工况下的抗退磁能力,并显著改善了电机的综合电磁性能,为解决轮毂电机高温易退磁问题提供了有效技术途径。

关键词: 轮毂电机;铁钴基永磁体;组合磁极;抗退磁能力;电磁性能

0 引言

在全球范围内,节能减排和绿色低碳已成为各国共同倡导的发展理念。在此背景下,电动汽车作为新能源汽车的代表,得到了快速发展和广泛应用^[1]。轮毂电机驱动系统,作为电动汽车的核心技术之一,被认为是未来电动汽车最理想的驱动形式。然而,轮毂电机的安装空间狭小,对电机结构和散热要求较高,这对电机设计提出了严峻挑战^[2-3]。扁线绕组因其高功率密度、高转矩密度等优点在轮毂电机中应用广泛,但这些性能的提升也使得电机发热量增加,加剧了永磁体退磁风险,从而影响电机的电磁性能^[4-7]。

近年来,国内外众多学者针对永磁体退磁特性及提高永磁体抗退磁能力开展了研究。文献[8-9]研究了一种应用于直线电机的组合磁极结构,组合磁极两侧采用低型号的钕铁硼,中间采用高型号的钕铁硼,但未对抗退磁能力进行研究。文献[10]通过使用钕铁硼和铁氧体的组合磁极,在提升电机抗退磁能力的同时优化了电磁性能。文献[11]通过在电机永磁体易退磁区域采用抗退磁能力强的铁氧体改善永磁体局部退磁,优化了电磁性能,也减少了稀土永磁材料的用量,进一步降低了电机成本,但存在改变电机其他结构的问题。文献[12]为了改善电机部分区域的抗退磁能力,探究了合理的重稀土渗入区域及渗入梯度,在不失电机性能的前提下,实现了重稀土元素的极限应用。文献[13-20]展示了混合励磁的当

前研究进展。

常用的永磁体材料包括铁氧体、钕铁硼和钕钴。钕铁硼因其磁性能较强而被广泛应用,但其在高温下易发生退磁;钕钴具有较高的矫顽力,抗退磁能力较强,被广泛应用于高温环境中^[21-25];铁钴基作为新型永磁体材料,对其研究尚少。徐吉元等^[26]向烧结钕铁硼磁体中复合添加 Co 和重稀土 Dy,以及 Al、Cu、Ga 和 Zr 等晶界改善元素,成功制备了铁钴基磁体,其力学性能优于钕钴磁体,温度稳定性优于钕铁硼磁体,能够满足兼顾高工作温度和高力学强度的应用场景。侯鹏等^[27]将铁钴基磁体应用于高速电机,对电机展开多物理场综合设计,并计算了转子表面风摩损耗。

从现有研究可以看出,针对铁钴基电机的研究具有重要科学价值,采用组合磁极的方式将铁钴基材料应用在轮毂电机中,可在不改变原有结构的前提下,增强轮毂电机在高温场景下的电磁性能和抗退磁能力。本文以永磁体采用普通钕铁硼材料、额定功率 40 kW、峰值功率 230 kW 的轮毂电机为研究对象,研究温度和电枢电流对永磁体易退磁位置的影响。在此基础上确定磁极的组合方案,并通过分析气隙磁密总谐波畸变率(Total Harmonic Distortion, THD)研究不同组合比例对磁极电磁性能的影响规律,结合极端工况退磁状态,确定合理的组合比例,分析优化前后的电磁性能。

1 轮毂电机模型

本文所研究的轮毂电机基本参数如表 1 所示,电机结构如图 1 所示。

表 1 电机基本参数

Tab. 1 Basic parameters of motor

参数名称	参数值
额定功率/kW	40
峰值功率/kW	230
额定转速/(r·min ⁻¹)	1 720
峰值转速/(r·min ⁻¹)	6 000
铁心长度/mm	60
定子槽数	144
电机极数	24
额定电流/A	96
峰值电流/A	240
永磁体厚度/mm	4.2
直流母线电压/V	920

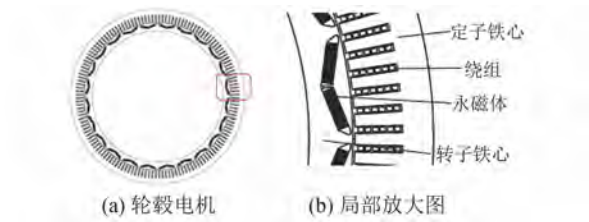


图 1 轮毂电机结构

Fig. 1 Structure of in-wheel motor

2 永磁材料温度特性分析

永磁材料作为电机行业的关键材料,依据其材质和功能特性,主要划分为铸造永磁材料、铁氧体永磁材料、稀土永磁材料以及其他永磁材料四大类别。其中,稀土永磁材料因其卓越的磁性能而备受青睐,尤其在混合动力汽车电机、风力发电机和精密仪表等高端应用领域中发挥着重要作用。随着对材料温度稳定性要求的日益提升,各行业对烧结钕铁硼永磁材料的性能标准亦日趋严格。铁钴基磁体作为一种新型永磁材料,通过显著增加钴的含量(超过 10 wt. %)以及添加重稀土元素,相较于传统的商业钕铁硼磁体,展现出更为优异的综合温度稳定性,具有更高的居里温度、更高的工作温度范围以及更低的温度系数。这些特性使得铁钴基磁体在高温环境下更具应用潜力。

本文分析的三台电机其永磁体分别选用不同的材料:钕铁硼、铁钴基和钕钴。三种材料在 25 ℃ 时的性能参数如表 2 所示。其中, α_{B_r} 为剩磁的可逆温度系数; $\beta_{H_{cj}}$ 为矫顽力的可逆温度系数。

表 2 25 ℃ 时永磁体材料性能参数对比

Tab. 2 Comparison of performance parameters of permanent magnet materials at 25 ℃

参数名称	钕铁硼	铁钴基	钕钴
$\alpha_{B_r}/(\% \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	0.13	0.08	0.04
$\beta_{H_{cj}}/(\% \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	0.5	0.45	0.22
电阻率/ $(\mu\Omega \cdot \text{m})$	1.33	1.34	0.75
导热系数/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	7	4.98	10
密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	7.6	7.3	8.4
最大磁能积/MGoe	35	32	25
矫顽力/koe	20	22	29

温度对永磁体磁性能的影响可以表示为

$$B_{r_1} = \left(1 - \frac{IL}{100}\right) \left[1 + (t_1 - t_0) \frac{\alpha_{B_r}}{100}\right] B_{r_0} \quad (1)$$

$$H_{cj_1} = \left(1 - \frac{IL}{100}\right) \left[1 + (t_1 - t_0) \frac{\beta_{H_{cj}}}{100}\right] H_{cj_0} \quad (2)$$

式中: B_r 为剩磁; t_0 为起始时刻温度; t_1 为永磁体工作温度; IL 为永磁体的不可逆损失率; H_{cj} 为矫顽力。

图 2(a) 和图 2(b) 分别为三种永磁材料的矫顽力和剩磁随温度的变化趋势。

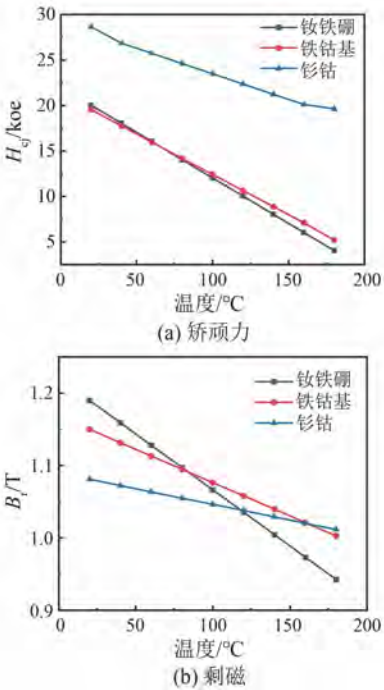


图 2 三种永磁材料的矫顽力与剩磁随温度的变化趋势

Fig. 2 Trends of coercivity and remanence with temperature for three permanent magnet materials

由图 2(a) 可知,钕钴的矫顽力远远大于铁钴基和钕铁硼,在常温下钕铁硼的矫顽力略大于铁钴基,但是温度超过 60 ℃ 后,铁钴基的矫顽力比钕铁硼大,且随着温度升高,铁钴基的优势更为明显。

由图 2(b) 可知,在常温下钕铁硼剩磁最大,但曲线斜率绝对值最大,温度系数最大,磁性能随温度变化大;钕钴曲线斜率绝对值最小,温度系数最小,在高温下剩磁比钕铁硼大,温度超过 160 ℃ 以后,三者中钕钴剩磁最高;铁钴基的曲线斜率介于钕铁硼和钕钴之间,温度超过 80 ℃ 后,剩磁高于钕铁硼。由此可知,钕铁硼电机跨温度稳定性差,钕钴电机虽然跨温度稳定性好,但在温度低于 160 ℃ 时并无优势,铁钴基电机跨温度稳定性介

于两者之间,在 80~160 ℃ 温度下展现较优的磁性能。

3 组合磁极的设计与优化

3.1 温度对永磁体易退磁位置的影响

当电机以 6 000 r/min 运行在峰值工况时,随着温度的逐步升高,永磁体在 155 ℃ 时,V 型磁极内侧夹角端部靠近气隙侧开始发生退磁现象,且最高退磁率约为 0.26%,即电机在该工况下的临界退磁温度为 155 ℃。为了进一步揭示温度变化对永磁体退磁特性的影响,不断提升永磁体的工作温度,记录永磁体在 160 ℃、170 ℃ 及 180 ℃ 下的退磁云图,如图 3 所示。

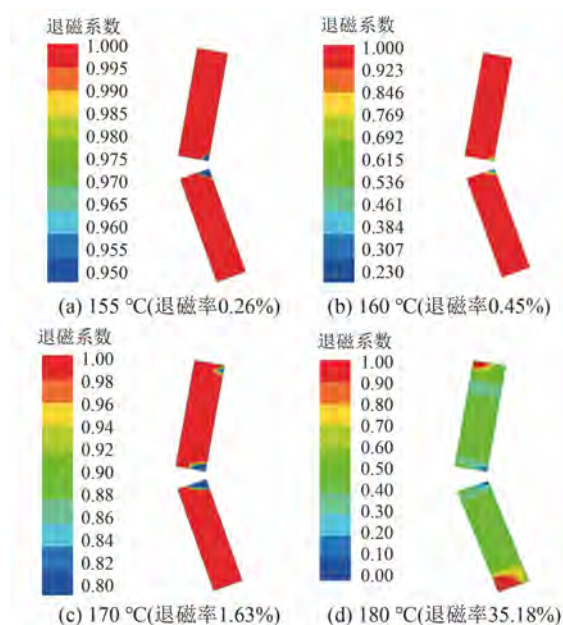


图 3 不同温度下的退磁云图

Fig. 3 Demagnetization cloud maps at different temperatures

由图 3 可知,温度低于 160 ℃ 时,永磁体退磁位置不变,退磁程度有所增加;当温度进一步升至 170 ℃ 时,退磁位置开始改变,V 型磁极外侧端部靠近气隙侧也开始出现退磁现象;随着温度继续升高至 180 ℃,退磁程度显著加剧,磁极中间部分也开始出现退磁现象。这是由温度升高引起永磁体内禀矫顽力不断下降,以及靠近气隙侧受到的电枢磁场更强而产生去磁作用共同导致的。

3.2 电枢电流幅值对永磁体易退磁位置的影响

导致永磁体退磁的关键因素还包括电枢电流

的急剧增加。因此将电机永磁体的温度设定为峰值工况临界退磁温度 155 ℃,并分别施加 1 倍、1.1 倍、1.2 倍以及 1.4 倍的峰值电流 I_{peak} ,深入分析电枢电流幅值对永磁体易退磁位置及其扩散规律的影响,退磁云图如图 4 所示。

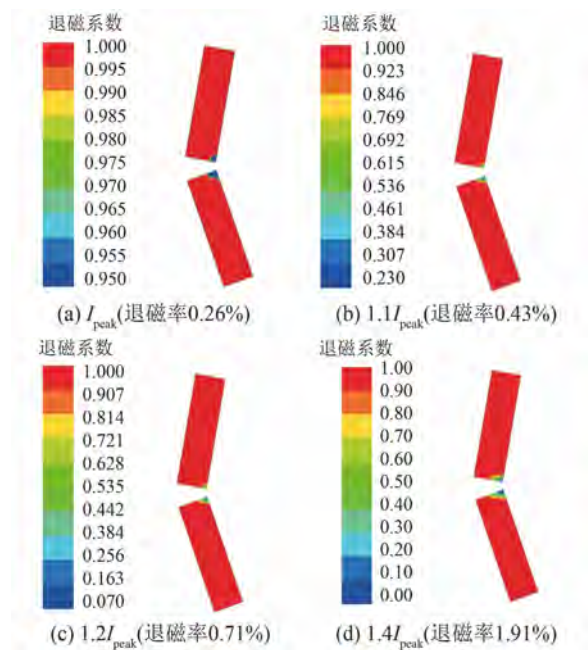


图 4 不同电枢电流幅值下的退磁云图

Fig. 4 Demagnetization cloud maps at different armature current amplitudes

由图 4 可知,随着电枢电流幅值的增加,永磁体的退磁程度逐渐加深,表现为退磁面积和退磁率的同步增加,这是因为电枢电流增加导致其对永磁体的去磁作用增强。

3.3 磁极组合比例对电磁性能的影响

根据前文对易退磁位置的深入研究发现,V 型磁极的内侧端部、外侧端部是退磁现象的主要发生区域。为了有效提升这些区域的抗退磁能力,本研究采用了等厚不等宽的组合磁极结构方案,将易退磁区域的钕铁硼永磁材料替换为抗退磁能力更强的铁钴基材料来提高该区域的内禀矫顽力。

组合磁极等效分析模型如图 5 所示。组合磁极的剩磁密度和气隙磁场波形如图 6 所示。

由图 6 可知,由于铁钴基与钕铁硼的磁性能参数存在差异,总气隙磁密呈现阶梯状分布特征,相较于矩形波更接近于正弦波形。考虑到合成磁感应强度对气隙磁场波形的决定性作用,本文在给定永磁体厚度的约束条件下,系统研究了铁钴

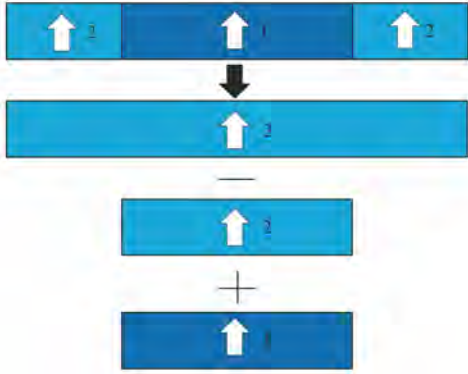


图 5 组合磁极等效分析模型

Fig. 5 Combined magnetic pole equivalent analysis model

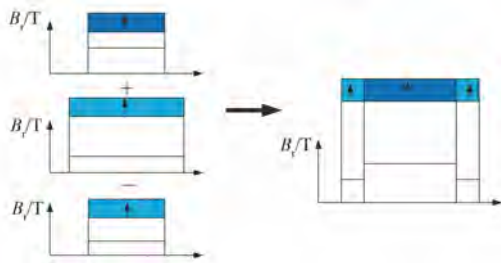


图 6 组合磁极剩磁密度和气隙磁场波形

Fig. 6 Remanence density and air-gap field waveform of combined magnetic pole

基与钕铁硼的组合比例对气隙磁密分布特性的影响规律。

在极坐标下,每个子磁块气隙中、永磁体中的标量磁位满足方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 \varphi_\delta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi_\delta}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \varphi_\delta}{\partial \theta^2} = 0 \\ \frac{\partial^2 \varphi_m}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi_m}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \varphi_m}{\partial \theta^2} = \frac{M_r}{r\mu_r} \end{cases} \quad (3)$$

$$M_r = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} M_n \cos(np\theta) \quad (4)$$

$$M_n = 2(B_r/\mu_0)\alpha_p \frac{\sin\left(\frac{n\pi\alpha_p}{2}\right)}{\frac{n\pi\alpha_p}{2}} \quad (5)$$

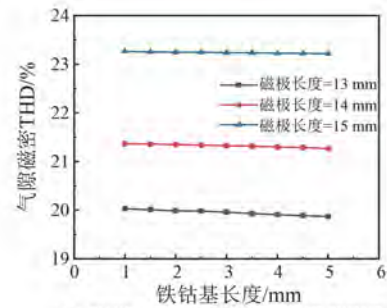
$$\begin{cases} B_r = -\mu_0\mu_r \frac{\partial \varphi}{\partial r} \\ B_\theta = -\mu_0\mu_r \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} \end{cases} \quad (6)$$

式中: p 为极对数; φ 为标量磁位; φ_δ 为气隙中的标量磁位; φ_m 为永磁体中的标量磁位; μ_0 为真空磁导率; μ_r 为相对磁导率; M_r 为永磁体的剩余磁

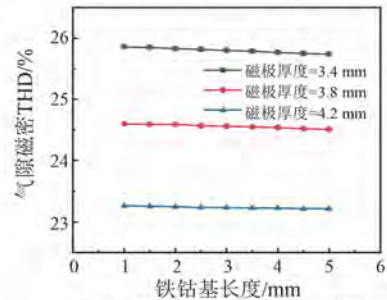
化强度; α_p 为永磁体的极弧系数; B_r 、 B_θ 分别为磁密的径向、切向分量。

由式(3)~式(5)可知,通过调整组合磁极中两种材料的比例,可以在一定程度上调整气隙磁密波形的正弦度,进而提高电机综合性能和能效。

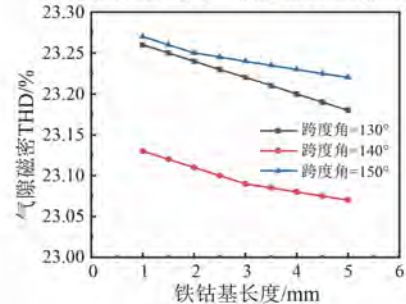
由于铁钴基和钕铁硼在剩磁感应强度和最大磁能积等磁性能方面存在差异,因此本文研究了不同磁极长度、不同磁极厚度和不同跨度角下,铁钴基长度变化对气隙磁密 THD 的影响。此外,考虑到轮毂电机结构设计的实际情况,选定铁钴基长度的变化范围为 1~5 mm。磁极组合比例对气隙磁密 THD 的影响如图 7 所示。



(a) 磁极长度对气隙磁密THD的影响



(b) 磁极厚度对气隙磁密THD的影响



(c) 跨度角对气隙磁密THD的影响

图 7 组合比例对气隙磁密 THD 的影响

Fig. 7 Effect of combination ratio on air-gap flux density THD

由图 7(a)可知,磁极厚度选定为 4 mm,当磁极长度不变时,随着铁钴基长度的增加,气隙磁密 THD 小幅下降,下降幅度小于 0.16%;当铁钴基长

度不变时,随着磁极长度增加,气隙磁密 THD 逐渐增加,变化幅度在 3.5% 左右。

由图 7(b)可知,磁极长度选定为 15 mm,当磁极厚度不变时,随着铁钴基长度的增加,气隙磁密 THD 小幅下降,下降幅度小于 0.09%;当铁钴基长度不变时,随着磁极厚度的增加,气隙磁密 THD 逐渐下降,变化幅度在 2.5% 左右。

由图 7(c)可知,磁极厚度选定为 4 mm,磁极长度选定为 15 mm,当磁极跨度角不变时,随着铁钴基长度的增加,气隙磁密 THD 小幅下降,下降幅度小于 0.08%;当铁钴基长度不变时,磁极跨度角在 140°时,气隙磁密 THD 最小。

综上,当磁极参数不变时,随着铁钴基长度的变化,气隙磁密 THD 的变化幅度均小于 1%,因此可忽略磁极组合比例对气隙磁密 THD 的影响。

3.4 极端工况下的退磁分析

当电机发生不可退磁故障时,电机往往运行在高温和大电流共同作用的极端工况下,所以同时设定高温和强外磁场模拟电机的极端工作工况。除了电枢电流会对磁场产生影响,电流超前角也会对磁场产生影响。当电流一定,随超前角增加,直流电流增大,从而退磁风险增大,所以选定电流超前角为 90°。由于提供的永磁材料其内禀退磁曲线最高温度为 180 °C,所以将此温度设定电机的工作温度,施加 2.7 倍额定电流,此时永磁体的退磁云图如图 8 所示。

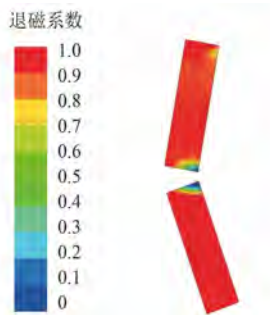


图 8 极端工况下的退磁云图

Fig. 8 Demagnetization cloud map at extreme operating condition

由图 8 可知,极端工况时退磁严重的部位主要集中在 V 型磁极内侧端部及外侧端部,经测量退磁严重区域的长度为 2.89 mm,因此最终确定铁钴基长度为 3 mm。组合磁极示意图如图 9 所示。

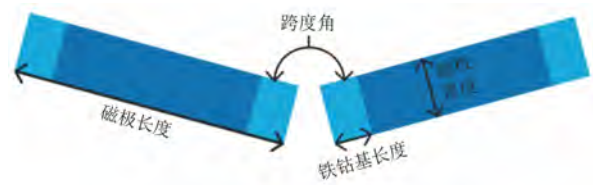


图 9 组合磁极示意图

Fig. 9 Schematic diagram of combined magnetic pole

4 优化前后电磁性能研究

4.1 工作温度下电机性能研究

对组合磁极电机与传统单一磁极电机的电磁性能进行对比分析。110 °C 工作温度下两种磁极电机的气隙磁密波形、额定转矩波形以及峰值转矩波形分别如图 10~图 12 所示。

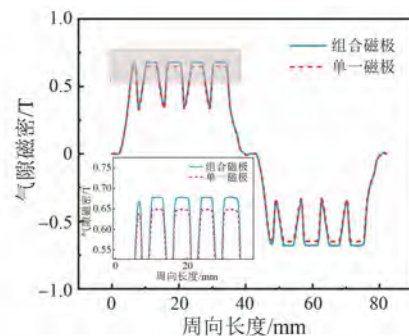


图 10 110 °C 时两种电机的气隙磁密波形

Fig. 10 Air-gap flux density waveforms of two motors at 110 °C

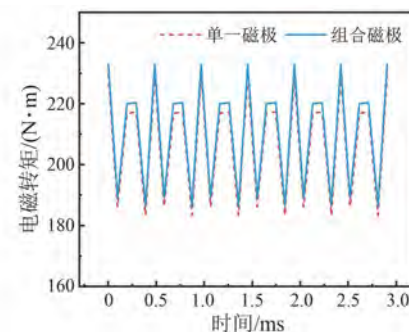


图 11 110 °C 时两种电机的电磁转矩波形

Fig. 11 Electromagnetic torque waveforms of two motors at 110 °C

由图 10~图 12 可知,在 110 °C 工作温度下,单一磁极电机气隙磁密基波幅值为 0.676 2 T,气隙磁密 THD 为 23.86%;组合磁极电机气隙磁密基波幅值为 0.707 4 T,气隙磁密 THD 为 23.13%,优化后气隙磁密 THD 减小了 0.73%。单一磁极

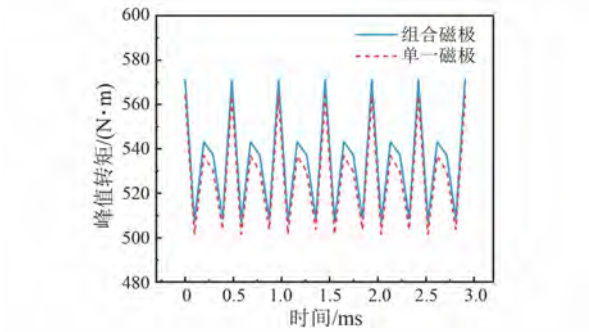


图 12 110 °C时两种电机的峰值转矩波形

Fig. 12 Peak torque waveforms of two motors at 110 °C

电机额定转矩为 207 N·m,组合磁极电机额定转矩为 211 N·m,优化后额定转矩提升了 4 N·m;但是转矩波动相差不大,均为 22.5%。单一磁极电机峰值转矩为 526 N·m,组合磁极电机峰值转矩为 533 N·m,优化后峰值转矩提升了 7 N·m。

在 110 °C工作温度下,两种电机详细性能对比如表 3 所示。可见,该工况下组合磁极电机在额定转矩、峰值转矩以及效率等多方面均优于单一磁极电机。

表 3 110 °C时的电磁性能参数

Tab. 3 Electromagnetic performance parameters at 110 °C

参数名称	组合磁极电机	单一磁极电机
空载反电势基波幅值/V	158	153
气隙磁密基波幅值/T	0.707 4	0.676 2
气隙磁密 THD/%	23.13	23.86
空载磁链幅值/Wb	0.073 2	0.070 6
额定转矩/(N·m)	211	207
转矩波动/%	22.5	22.5
峰值转矩/(N·m)	533	526
最高效率/%	95.6	95.2

4.2 高温状态下电机性能研究

由于铁钴基相较于钕铁硼具有更高的工作温度范围以及更低的温度系数,在温度持续升高后其电磁性能的下降幅度小于钕铁硼,所以将温度提升至 160 °C时,组合磁极电机的性能优势相较于 100 °C时会更加明显。160 °C高温状态下两种磁极电机的气隙磁密波形、额定转矩波形以及峰值转矩波形分别如图 13~图 15 所示。

由图 13~图 15 可知,160 °C高温状态下,单一磁极电机气隙磁密基波幅值为 0.601 4 T,气隙磁密 THD 为 25.2%;组合磁极电机气隙磁密基波

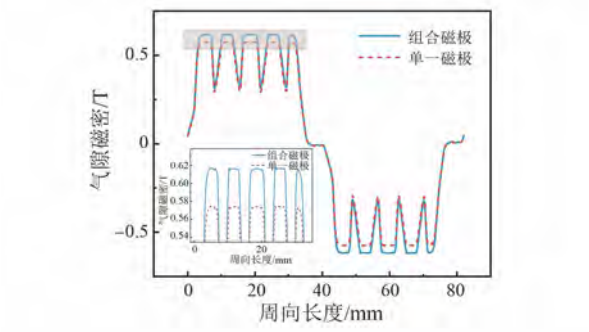


图 13 160 °C时的两种电机的气隙磁密波形

Fig. 13 Air-gap flux density waveforms of two motors at 160 °C

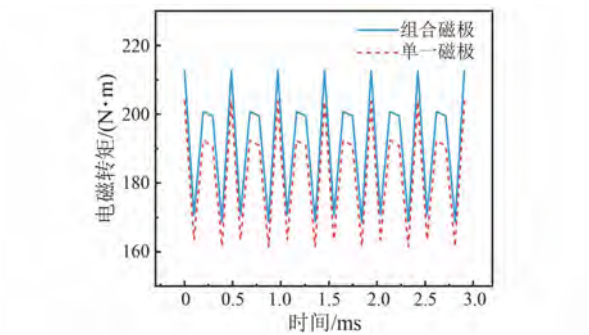


图 14 160 °C时的两种电机的电磁转矩波形图

Fig. 14 Electromagnetic torque waveforms of two motors at 160 °C

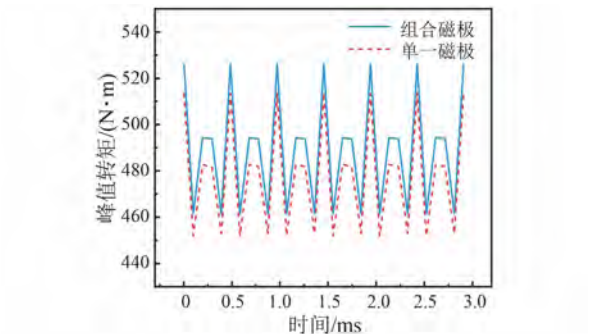


图 15 160 °C时的两种电机的峰值转矩波形图

Fig. 15 Peak torque waveforms of two motors at 160 °C

幅值为 0.684 T,气隙磁密 THD 为 23.6%,优化后气隙磁密 THD 减小了 1.6%。单一磁极电机额定转矩为 182 N·m,转矩波动为 23.5%;组合磁极电机额定转矩为 190 N·m,转矩波动为 22.68%,优化后转矩提升了 8 N·m,转矩波动下降了 0.82%。单一磁极电机峰值转矩为 474 N·m,组合磁极电机峰值转矩为 488 N·m,优化后峰值转矩提升了 14 N·m。

160 °C高温状态下,两种电机详细性能对比

如表4所示。可见,该工况下组合磁极电机在额定转矩、峰值转矩和转矩波动等多方面均优于单一磁极电机。

表4 160℃时的电磁性能参数

Tab.4 Electromagnetic performance parameters at 160℃

参数名称	组合磁极电机	单一磁极电机
空载反电势基波幅值/V	147	137
气隙磁密基波幅值/T	0.684	0.601 4
空载磁链幅值/Wb	0.069	0.063 6
额定转矩/(N·m)	190	182
转矩波动/%	22.68	23.5
峰值转矩/(N·m)	488	474

4.3 峰值工况抗退磁能力研究

在峰值工况下,电机的电流为峰值电流,电角度为最大功率输出角,转速为6 000 r/min。其他参数均设为定值仅考虑温度升高一种因素导致的退磁故障,研究两种磁极电机在峰值工况下的临界退磁温度。峰值工况下的退磁云图如图16所示。

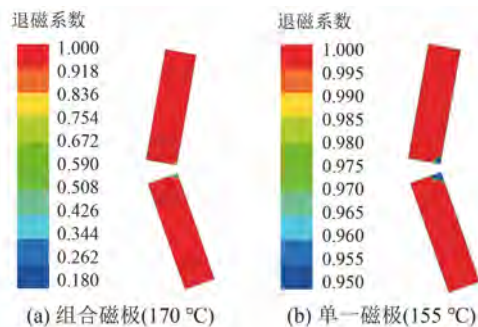


图16 峰值工况下的退磁云图

Fig. 16 Demagnetization cloud maps at peak operating condition

由图16(a)可知,在永磁体温度达到170℃时,组合磁极的V型磁极夹角区域首次发生了不可逆退磁,此时退磁率为0.25%。由图16(b)可知,在永磁体温度达到155℃时,单一磁极的V型磁极夹角区域首次发生了不可逆退磁,此时退磁率为0.25%。由此可见,在峰值工况下组合磁极的临界退磁温度相较于单一磁极提升了15℃。

4.4 短路故障瞬间抗退磁能力研究

由于电机发生短路故障的瞬间,外磁场突然增大,温度上升时间较短,所以在短路瞬间不考虑

温度升高对退磁的影响。选定电流超前角为90°,永磁体内禀退磁曲线为100℃,仅考虑电流增大单一因素导致的退磁故障,研究电机在短路故障瞬间的临界退磁电流倍数。短路故障瞬间的退磁云图如图17所示。

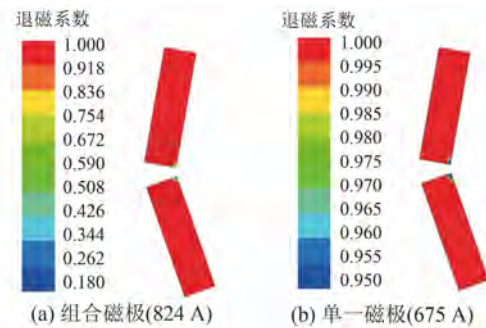


图17 短路故障瞬间的退磁云图

Fig. 17 Demagnetization cloud maps at the moment of short circuit failure

由图17(a)可知,在外施电流达到6.1倍额定电流时,组合磁极的V型磁极夹角区域首次发生了不可逆退磁,此时退磁率为0.5%,因此组合磁极的临界退磁电流倍数为6.1倍。由图17(b)可知,在外施电流达到5倍额定电流时,单一磁极的V型磁极夹角区域首次发生了不可逆退磁,此时退磁率为0.5%,因此单一磁极的临界退磁电流倍数为5倍。由此可见,组合磁极电机将临界退磁电流提升了149 A。

4.5 不同交直流电流作用下抗退磁能力研究

为了验证组合磁极在高温下的抗退磁能力,将两种电机在高温下的退磁结果进行对比。以退磁风险最大的V型磁极内侧端部为考察对象,退磁特征点A的位置示意图如图18所示。



图18 退磁特征点示意图

Fig. 18 Schematic diagram of demagnetization feature point

将永磁体温度设定为160℃,直流电流变化范围为-600~0 A,交轴电流变化范围为0~600 A。组合磁极和单一磁极退磁特征点磁密分布图分别如图19和图20所示。

由图19和图20可知,组合磁极退磁特征点

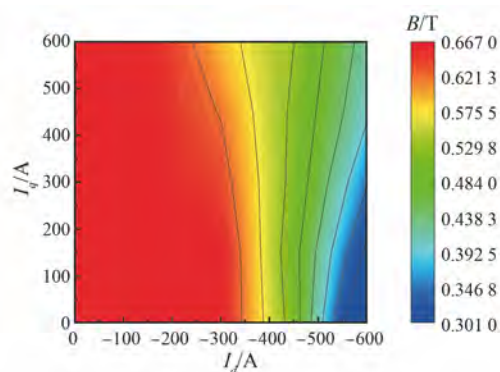


图 19 组合磁极退磁特征点磁密分布图

Fig. 19 Magnetic flux density distribution of demagnetization feature point of the combined magnetic pole

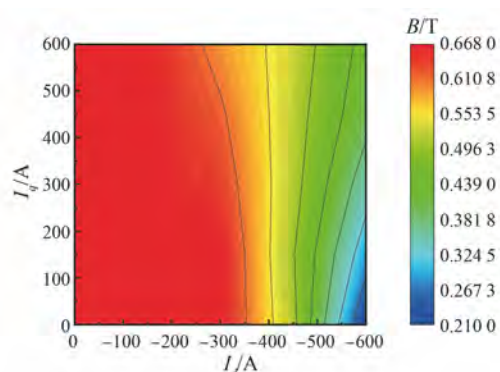


图 20 单一磁极退磁特征点磁密分布图

Fig. 20 Magnetic flux density distribution of demagnetization feature point of the single magnetic pole

的磁密普遍高于单一磁极退磁特征点;随着直轴电流的增加,特征点的磁密呈现出迅速下降的趋势。这一现象表明,在高温运行条件下,靠近直轴部分的单一磁极电机退磁风险更高。通过在组合磁极中引入铁钴基,可以显著提升电机在高温环境下的局部抗退磁性能。另外由两种材料的不同特性可知,常温环境中钕铁硼的矫顽力略高于铁钴基,但是温度超过 80 °C 之后,铁钴基的矫顽力比钕铁硼大,且随着温度升高,铁钴基的优势更为明显。由于轮毂电机散热难,额定工况运行时温度在 100 °C 以上,因此组合磁极电机的抗退磁能力更加优秀,且在不同温度、不同交直流电流作用的复杂工况下的适应能力更强。

5 结语

本文以一台额定功率 40 kW、峰值功率 230 kW 的轮毂电机为研究对象,研究了温度、电

枢电流幅值对永磁体退磁特性的影响。在此基础上采用组合磁极的方式将铁钴基与钕铁硼相结合,通过优化两者组合比例,显著提升了电机在高温环境下的抗退磁能力,并优化了其电磁性能。

(1)在温度和电枢电流幅值的影响下,永磁体 V 型磁极内侧夹角端部靠近气隙侧和外侧端部靠近气隙侧相继发生退磁。

(2)仿真结果表明,相较于单一磁极电机,在 110 °C 工作温度下,组合磁极电机的额定转矩提升了 4 N·m,峰值转矩提升了 7 N·m,最高效率提高了 0.4%;在 160 °C 高温状态下,组合磁极电机的额定转矩提升了 8 N·m,转矩波动下降了 0.82%,峰值转矩提升了 14 N·m;在峰值工况下,组合磁极的临界退磁温度提升了 15 °C。

(3)通过对电磁性能和抗退磁能力的研究,验证了所提方案的可行性,所设计的组合磁极为永磁同步电机在高温状态下散热困难的问题提供了合理的解决方案和参考。

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

王海祥进行了文献查询、内容总结与论文撰写,陶大军进行了框架和写作指导及文章润色,周杰、席成通、姜宏宇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 literature search, content summary and paper writing were conducted by Wang Haixiang. The framework and writing guidance, and paper polishing were conducted by Tao Dajun. The manuscript was reviewed and revised by Zhou Jie, Xi Chengtong and Jiang Hongyu. All authors have read and approved the final version of the manuscript for submission.

参考文献

- [1] 张希良, 黄晓丹, 张达, 等. 碳中和目标下的能源经济转型路径与政策研究[J]. 管理世界, 2022, 38(1): 35-66.

- ZHANG X L, HUANG X D, ZHANG D, et al. Research on the pathway and policies for China's energy and economy transformation toward carbon neutrality [J]. *Journal of Management World*, 2022, 38(1): 35-66.
- [2] 严蓓兰. 新能源汽车电机发展趋势及测试评价研究[J]. *电机与控制应用*, 2018, 45(6): 109-116.
- YAN B L. Development trend and test evaluation research of new energy vehicle motor [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2018, 45(6): 109-116.
- [3] 谢颖, 何自豪, 蔡蔚, 等. 车用发卡式绕组永磁同步电机的设计与优化[J]. *电机与控制学报*, 2021, 25(12): 36-45.
- XE Y, HE Z H, CAI W, et al. Design and optimization of hairpin winding permanent magnet synchronous motors for vehicle [J]. *Electric Machines and Control*, 2021, 25(12): 36-45.
- [4] 陶大军, 潘博, 戈宝军, 等. 石墨烯复合绝缘结构的轮毂电机定子散热能力研究[J]. *电机与控制学报*, 2021, 25(6): 91-100.
- TAO D J, PAN B, GE B J, et al. Research on heat dissipation capacity of hub motor stator with graphene composite insulation structure [J]. *Electric Machines and Control*, 2021, 25(6): 91-100.
- [5] 唐勇斌, 郝晓宇, 揭军, 等. 耐高温永磁电机发展现状与关键技术[J]. *导航定位与授时*, 2016, 3(2): 65-70.
- TANG Y B, HAO X Y, JIE J, et al. Development and key technology of heat-resisting permanent magnet motors [J]. *Navigation Positioning & Timing*, 2016, 3(2): 65-70.
- [6] 崔刚, 熊斌, 黄康杰, 等. 电动汽车用永磁电机的失磁空间分布特性及影响因素[J]. *电工技术学报*, 2023, 38(22): 595-597.
- CUI G, XIONG B, HUANG K J, et al. Spatial distribution characteristics and influencing factors of demagnetization of permanent magnet motor for electric vehicle [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2023, 38(22): 595-597.
- [7] 林展汐, 郭守仑, 王金昊, 等. 新能源汽车驱动永磁电机退磁特性分析[C]//2018 中国汽车工程学会年会, 上海, 2018.
- LIN Z X, GUO S L, WANG J H, et al. The demagnetization analysis of electric vehicle drive motor [C]//2018 China-SAE Congress & Exhibition, Shanghai, 2018.
- [8] 胡士雄, 胡弼, 王伟, 等. 高密度永磁同步电机永磁体失磁特征量分析[J]. *电气工程学报*, 2019, 14(2): 121-126.
- HU T X, HU B, WANG W, et al. Analysis of demagnetization characteristics of permanent magnets in high density permanent magnet synchronous motor [J]. *Journal of Electrical Engineering*, 2019, 14(2): 121-126.
- [9] ISFAHANI A H, WAEZ-ZADEH S, RAHMAN M A. Performance improvement of permanent magnet machines by modular poles [J]. *IET Electric Power Applications*, 2009, 3(4): 343-351.
- [10] ISFAHANI A H, WAEZ-ZADEH S, RAHMAN M A. Using modular poles for shape optimization of flux density distribution in permanent-magnet machines [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2008, 44(8): 2009-2015.
- [11] PING Z, LIN Z, SUI Y. Research on combined pole interior permanent-magnet machine [C]//2015 IEEE International Magnetics Conference, Beijing, 2015.
- [12] 谢颖, 姜佳宁, 蔡蔚, 等. 表贴式高速永磁同步电机失磁故障及磁体选区渗重稀土研究[J]. *电机与控制学报*, 2024, 28(2): 44-53.
- XIE Y, JIANG J N, CAI W, et al. Demagnetization failure of surface mount high speed permanent magnet synchronous motor and local infiltration of heavy rare earth [J]. *Electric Machines and Control*, 2024, 28(2): 44-53.
- [13] 戴冀, 张卓然, 沐杨, 等. 转子磁分路混合励磁同步电机电枢反应磁场与电感特性研究[J]. *电工技术学报*, 2015, 30(12): 276-283.
- DAI J, ZHANG Z R, MU Y, et al. Armature reaction field and inductance feature analysis of a hybrid excitation synchronous machine with magnetic shunting rotor [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2015, 30(12): 276-283.
- [14] 汪奇, 杜恽, 卢伟, 等. 双定子混合励磁磁通切换电机及其电磁性能分析[J]. *电机与控制应用*, 2018, 45(8): 68-73.
- WANG Q, DU Y, LU W, et al. Electromagnetic performance analysis of dual stator hybrid excitation flux switching motor [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2018, 45(8): 68-73.
- [15] 华邦杰. 新型磁路串联混合励磁复合电机的设计与研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2019.

- HUA B J. Design and research of series magnetic circuit hybrid excitation compound motor [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2019.
- [16] 宁银行, 赵朝会, 刘闯. 混合励磁电机的技术现状及新进展[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(5): 1-12+26.
- NING Y H, ZHAO C H, LIU C. Overview and new process of hybrid excitation motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2017, 44(5): 1-12+26.
- [17] 宁银行, 鲁为华, 赵朝会, 等. 一种混合励磁同步发电机的气隙磁密分析及其电压谐波抑制[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(1): 15-20.
- NING Y H, LU W H, ZHAO C H, et al. Analysis on the air-gap flux density and voltage harmonic suppression of a hybrid excitation synchronous generator [J]. Electric Machines & Control Application, 2019, 46(1): 15-20.
- [18] 宁杰, 王晓宇, 贾建国, 等. 混合励磁永磁发电机电抗参数研究[J]. 电机与控制应用, 2018, 45(6): 72-75+116.
- NING J, WANG X Y, JIA J G, et al. Research on reactance parameters of hybrid excitation permanent magnet generator [J]. Electric Machines & Control Application, 2018, 45(6): 72-75+116.
- [19] 朱孝勇, 程明, 花为. 新型混合励磁双凸极永磁电机磁场调节特性分析及实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(3): 90-95.
- ZHU X Y, CHENG M, HUA W. Investigation of flux regulation performance and experimental validation for a novel hybrid excited doubly salient permanent magnet machine [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(3): 90-95.
- [20] 王宇婷, 蓝益鹏. 混合励磁磁通切换直线磁悬浮电动机的温升特性分析[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(12): 60-66+73.
- WANG Y T, LAN Y P. Analysis of temperature rise characteristics of hybrid excitation flux switching linear magnetic suspension motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2022, 49(12): 60-66+73.
- [21] 李建, 程星华, 周磊, 等. 晶界扩散 Dy 钕铁硼的高温磁性能研究[J]. 金属功能材料, 2018, 25(2): 20-25.
- LI J, CHENG X H, ZHOU L, et al. High temperature magnetic properties of Dy grain boundary diffused Nd-Fe-B sintered magnet [J]. Metallic Functional Materials, 2018, 25(2): 20-25.
- [22] 闫阿儒, 刘壮, 郭帅, 等. 稀土永磁材料的最新研究进展[J]. 金属功能材料, 2017, 24(5): 6-16.
- YAN A R, LIU Z, GUO S, et al. Recent research development of rare-earth permanent magnetic materials [J]. Metallic Functional Materials, 2017, 24(5): 6-16.
- [23] 秦万忠. 注射成形粘结钕铁硼磁体复合粉研究[J]. 粉末冶金工业, 2016, 26(2): 12-16.
- QIN W Z. Research on composite powder of bonded NdFeB magnets by injection molding [J]. Powder Metallurgy Industry, 2016, 26(2): 12-16.
- [24] 李安华, 张月明. 烧结 Nd-Fe-B 磁体的力学性能研究进展及前景展望[J]. 金属功能材料, 2016, 23(2): 1-9.
- LI A H, ZHANG Y M. Research progress and development tendency of mechanical properties of sintered Nd-Fe-B magnets [J]. Metallic Functional Materials, 2016, 23(2): 1-9.
- [25] HOU P, GE B J, TAO D J, et al. Multi physical comprehensive design of a new type of FeCo based high speed permanent magnet motor [J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2023, 72(4): 409-431.
- [26] XU J Y, MENG R Y, LIU J, et al. Thermal stability improvement and microstructure optimization of high cobalt content Nd-Fe-B magnets via terbium grain boundary diffusion [J]. Journal of Rare Earths, 2024, 42(8): 1531-1538.
- [27] HOU P, GE B J, TAO D J, et al. Study on fluid friction loss on rotor surface of FeCo based high speed permanent magnet motor [J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2023, 73(2): 97-110.

收稿日期:2025-03-16

收到修改稿日期:2025-05-23

作者简介:

陶大军(1982-),男,博士,教授,研究方向为新型特种电机理论、设计与分析,tao.dj@163.com;

*通信作者:陶大军(1982-),男,博士,教授,研究方向为新型特种电机理论、设计与分析,tao.dj@163.com。