DOI:10.12177/emca.2026.228 文章编号:1673-6540(2026)10-1085-10 中图分类号:TM 351 文献标志码:A

混合永磁型驱动电机转子优化

陈丽香, 肖 鹏*, 汪青锋, 柴 松
(沈阳工业大学 国家稀土永磁同步电机工程技术研究中心,辽宁 沈阳 110870)

Optimization of Rotor for Hybrid Permanent Magnet Drive Motor

Chen Lixiang, Xiao Peng*, Wang Qingfeng, Chai Song
(National Engineering Research Center for Rare Earth Permanent Magnet Synchronous Motors, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: **[Objective]** To address the problem of high costs in manufacturing new energy vehicle drive motors caused by the scarcity and high price of rare earth materials, this study aims to reduce manufacturing costs by using low-cost ferrite materials to replace some of the neodymium iron boron permanent magnets. **[Methods]** Taking the U-shaped interior permanent magnet drive motor of an electric bus as the research object, three types of hybrid permanent magnet rotor structures combining neodymium iron boron and ferrite were designed. The finite element method was used to analyze the influence of different permanent magnet arrangements on the motor's output torque, reluctance torque performance, and air-gap flux density distortion, and an asymmetric magnetic pole arrangement structure with obvious advantages in reluctance torque and output torque was selected. On the premise of unchanged permanent magnet usage, multi-parameter optimization was performed on the permanent magnet angle, distance, and magnetic bridge spacing. Finally, used an existing 110 kW neodymium iron boron prototype, the motor's back electromotive force and torque-current characteristics were tested, and the measured data were compared with the simulation data. **[Results]** Compared with other arrangements, the single-pole asymmetric and two-pole symmetric magnetic pole arrangement structure achieves higher reluctance torque and output torque. After multi-parameter optimization, the motor's output torque improved by 4.4% and the reluctance torque increased by 2.5%. The experimentally measured back-electromotive force and torque-current characteristics of the prototype shows a high degree of agreement with the finite element simulation values. **[Conclusion]** This solution partially replaces neodymium iron boron permanent magnets, which effectively reduces the manufacturing cost of the motor. At the same time, through multi-parameter optimization of various magnetic pole arrangement structures, such as single-pole asymmetric and two-pole symmetric structures, it achieves improved torque performance without increasing the amount of permanent magnet material used. Furthermore, experimental tests on an existing prototype verify the correctness and accuracy of the finite element simulation calculation method used in this paper.

Key words: ferrite; neodymium iron boron; magnetic pole arrangement; multi-parameter optimization

摘 要:**【目的】**针对稀土材料稀缺昂贵导致新能源汽车驱动电机成本高昂的问题,本研究旨在采用低成本的铁氧体材料替代部分钕铁硼永磁体以降低制造成本。**【方法】**以电动大巴车 U 型内置式驱动电机为研究对象,设计 3 种钕铁硼与铁氧体混合的永磁转子结构,采用有限元方法分析不同永磁体排布方式对电机输出转矩、磁阻转矩以及气隙磁密畸变的影响,选出磁阻转矩、输出转矩优势明显的非对称磁极排列结构。在永磁体用量不变的前提下,对永磁体角度、距离、磁桥间距进行多参数优化。最后,基于一台现有的 110 kW 钕铁硼样机测试电机反电动势与转矩-电流特性,并将实测数据与仿真数据对比分析。**【结果】**相较于其余排布方式,单极不对称两极对称的磁极排列结构可实现更高的磁阻转矩与输出转矩,经多参数优化后,电机输出转矩提升 4.4%,磁阻转矩提升 2.5%。样机实测的反电动势、转矩-电流特性与有限元仿真数值高度吻合。**【结论】**该方案通过部分替代钕铁硼永磁体,在有效降低电机制造成本的同时,借助对单极不对称及两极对称等多种磁极排列结构的多参数优化,实现了在不增加永磁材料用量前提下的转矩性能提升。此外,通过现有样机的试验测试,验证了本文所采用的有限元仿

基金项目:辽宁省科技厅联合基金项目面上资助计划项目(2023-MSLH-247)

General Program of Joint Fund Sponsorship Plan, Department of Science and Technology of Liaoning Province(2023-MSLH-247)

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

真计算方法的正确性与准确性。

关键词:铁氧体;钕铁硼;磁极排列;多参数优化

0 引言

在全球气候变化和能源结构转型的背景下,新能源汽车已成为实现碳中和目标的核心领域。作为重要角色的新能源汽车,必然受到国家的大力扶持[1]。目前,主流量产车型几乎清一色搭载内置式永磁同步电机(Interior Permanent Magment Synchronous Motor,IPMSM),其凭借高功率密度、全工况高效率牢牢占据技术主流,然而钕铁硼磁体价格高昂且高温易退磁。近年来,低成本化成为永磁电机研究的最热赛道之一:铁氧体因物美价廉被国内外团队纷纷尝试与钕铁硼相结合形成混合磁路,在保持高性能前提下,将磁体成本降低30%以上,让新能源汽车"心脏"跳动得更有力、更经济、更可持续。铁氧体和钕铁硼混合使用的永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor,PMSM),永磁体成本大幅度降低,且有效提升了凸极比及磁阻转矩利用率[2]。文献[3]提出不对称铁氧体转子结构,使永磁转矩增加,转矩脉动大幅度下降。文献[4]研究了钕铁硼和铁氧体两种永磁体厚度,使少稀土组合磁极 Halbach PMSM 具有更好的转矩性能和更低的材料成本。

少稀土混合 PMSM 不仅保证了理想的输出转矩,减少了稀土钕铁硼永磁体的用量和永磁材料总成本,而且降低了永磁体涡流损耗及铜损耗,提高了电机效率。钕铁硼与铁氧体混合能够使电机具有较好的抗退磁能力,并且降低了电机的转矩脉动[5-11]。钕铁硼和铁氧体组成的非对称磁路混合永磁电机,提升了永磁磁场利用率、转矩输出性能及电机的转矩密度,降低了电机转矩脉动和成本,具有更低的机械应力和优异的弱磁调速性能[12-17]。

文献[18]构建响应曲面模型,并结合遗传算法对电机进行多参数多目标优化。优化定子、转子偏心距以及定子和转子齿弧长能明显削电机的齿槽转矩和转矩脉动。文献[19]采用樽海鞘群算法对电机的结构参数进行优化。优化后的电机平均转矩提高了2%,转矩脉动降低了16%,齿槽转矩显著降低了60.58%。文献[20]对 IPMSM 使用田口法进行优化,在保证输出转矩不变的前提下,径向电磁力和转矩脉动分别降低了34.1%和11.4%。文献[21]通过基于改进反向神经网络建模和改进鲸鱼算法多目标优化对电机进行优化设计,电机的平均转矩提升了9.67%、齿槽转矩峰值降低了37%、空载反电动势总谐波失真(Total Harmonic Distortion, THD)降低了39%。文献[22]在响应面方法的基础上,融合了多目标粒子群优化算法的设计策略,通过灵敏度分析将极弧系数、定子槽口宽度和槽底宽度三个变量作为优化参数,提高 IPMSM 的效率并降低齿槽转矩。文献[23]选择永磁体厚度、永磁体偏心距、极弧系数3个电机参数优化一台36槽8极表贴式 PMSM 的输出转矩,基于响应面法有效抑制转矩波动,提高输出转矩和起动转矩的幅值。

综上所述,针对如何提升混合永磁电机的磁阻转矩问题,尚且缺乏深入研究。至此,针对电动大巴车 U 型 IPMSM,提出一种钕铁硼和铁氧体的混合永磁型转子结构,通过有限元方法分析这2种永磁体材料的排布方式对输出转矩性能、磁阻转矩性能以及气隙磁密畸变的影响,最终提出一种具有高输出转矩、高磁阻转矩的非对称磁极排列方式。在保持永磁体宽度和厚度不变的前提下,对永磁体角度、距离、以及磁桥的大小进行多参数优化,使得电机获得更高的输出转矩和磁阻转矩。最后,利用现有样机进行测试,验证了本文仿真计算方法的正确性及准确性。

1 混合永磁型电机数学模型

混合永磁型同步电机,是指采用多种永磁材料实现混合励磁的 PMSM。钕铁硼永磁体虽具有较高磁能积,但成本高;铁氧体永磁体的磁能积虽略低,但其成本仅为钕铁硼的十分之一。通过合理调整两种永磁体的配比及位置摆放,可在保证较高转矩密度的同时,显著提升转矩性价比。PMSM 在 d-q 坐标系的电压方程为

$$u_d = R_s i_d - \omega L_q i_q + L_d \frac{\mathrm{d}i_d}{\mathrm{d}t} \tag{1}$$

$$u_q = R_s i_q + \omega L_d i_d + L_q \frac{\mathrm{d}i_q}{\mathrm{d}t} \tag{2}$$

式中:u_d、u_q、i_d、i_q 和 L_d、L_q 分别为 d、q 轴电压、电流和电感;R_s 为定子电阻;ω 为转子角速度。

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

磁链方程为

$$\psi_d = L_d i_d \tag{3}$$

$$\psi_q = L_q i_q \tag{4}$$

式中：ψ_d、ψ_q 分别为 d、q 轴磁链。

转矩方程为

$$T_e = p(\psi_d i_q - \psi_q i_d) = p(L_d - L_q) i_d i_q \tag{5}$$

式中：T_e 为电机电磁转矩；p 为电机极对数。

根据式(1)~(4)，可得混合 PMSM 在 d、q 坐标系的电压方程为

$$u_d = R_s i_d + L_d \frac{\mathrm{d}i_d}{\mathrm{d}t} - \omega L_q i_q - \omega(\psi_{d\mathrm{Fe}} + \psi_{d\mathrm{Nd}}) \tag{6}$$

$$u_q = R_s i_q + L_q \frac{\mathrm{d}i_q}{\mathrm{d}t} + \omega L_d i_d + \omega(\psi_{q\mathrm{Fe}} + \psi_{q\mathrm{Nd}}) \tag{7}$$

式中：$\psi_{d\mathrm{Fe}}$、$\psi_{q\mathrm{Fe}}$ 和 $\psi_{d\mathrm{Nd}}$、$\psi_{q\mathrm{Nd}}$ 分别为 d、q 轴铁氧体磁链和钕铁硼磁链。

磁链方程为

$$\psi_d = L_d i_d + \psi_{d\mathrm{Fe}} + \psi_{d\mathrm{Nd}} \tag{8}$$

$$\psi_q = L_q i_q + \psi_{q\mathrm{Fe}} + \psi_{q\mathrm{Nd}} \tag{9}$$

转矩方程为

$$T_e = p[(\psi_{d\mathrm{Fe}} + \psi_{d\mathrm{Nd}}) i_q + L_d i_d i_q - (\psi_{q\mathrm{Fe}} + \psi_{q\mathrm{Nd}}) i_d - L_q i_q i_d] \tag{10}$$

综上，电机的输出转矩由永磁转矩和磁阻转矩两部分组成。通过合理配置铁氧体永磁体的用量与位置摆放，可以有效增强磁阻转矩占比，从而提高电机的整体输出转矩。

2 混合 IPMSM 转子结构分析

2.1 混合 IPMSM 的性能参数

本文以一台额定功率 110 kW、额定转速 1 250 r/min 的电动大巴车用 U 型混合 IPMSM 为研究对象，具体参数如表 1 所示。

2.2 混合 IPMSM 的转子结构

采用铁氧体与钕铁硼混合励磁方案，为获取更优的转矩性能，需对永磁体的排列方式进行分析。如图 1 所示，针对 U 型混合 IPMSM 设置了电机 1、电机 2、电机 3 三种排列方式，图中已标出铁氧体与钕铁硼材料分布。其中，U 型两个外臂永磁体分别为 L_1、L_2，尺寸相同，宽度 8.5 mm、厚度 2.7 mm；L_3 永磁体宽度 35 mm、厚度 2.9 mm。为准确研究混合排列对磁阻转矩的影响，仅 U 型外臂采用铁氧体，且三台电机铁氧体与钕铁硼用量相同。

表 1 电机主要参数

Tab. 1 Main parameters of motor

参数名称	参数值
额定功率/kW	110
额定电压/V	400
定子外径/mm	380
定子内径/mm	270
额定转速/(r·min^{-1})	1 250
槽数	54
永磁体材料 1(钕铁硼)	N38UH
永磁体材料 2(铁氧体)	Y34
极对数	6

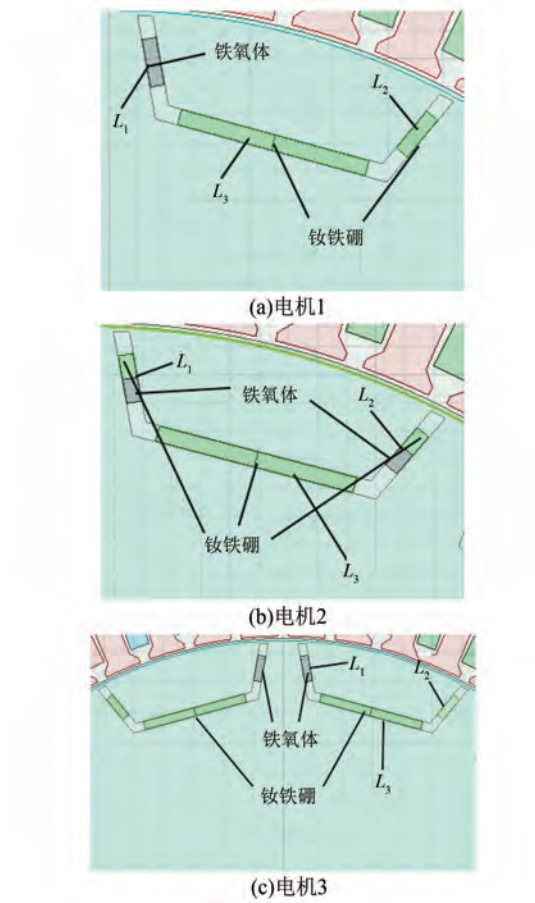


图 1 永磁体的 3 种排列方式

Fig. 1 Three arrangements of permanent magnets

结构上，电机 1 与电机 3 为不对称磁极排列。电机 1 的单极不对称导致两臂磁路磁导率不一致，拉大了 d、q 轴电感差值，利于提升磁阻转矩；电机 3 在单极不对称的基础上，相邻两极呈对称排列，

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

即相邻两极的相邻外臂采用相同永磁材料,这种不对称放置可形成非对称磁链,从而获得更大的磁阻转矩并提升输出转矩。电机 2 则为常见的对称排列。

2.3 混合 IPMSM 的转矩性能

分别对 3 台电机进行有限元分析。3 台电机的电磁转矩与磁阻转矩特性分别如图 2、3 所示,具体数值对比如表 2 所示。

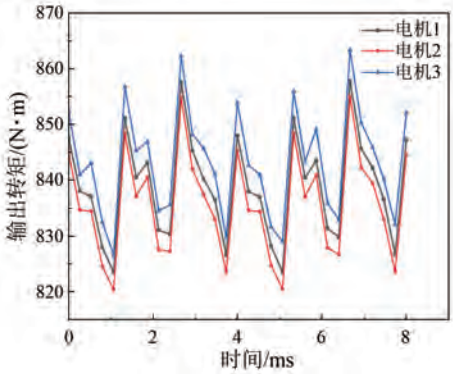


图 2 输出转矩示意图

Fig. 2 Schematic diagram of output torque

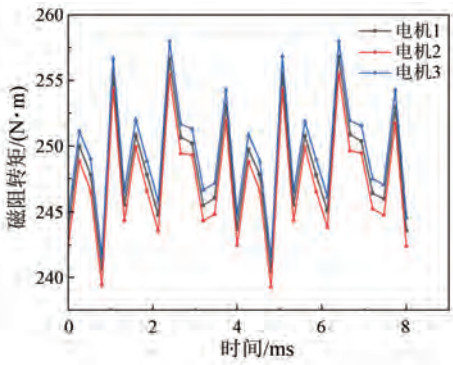


图 3 磁阻转矩示意图

Fig. 3 Schematic diagram of reluctance torque

表 2 各电机输出转矩和磁阻转矩具体数值

Tab. 2 Specific values of output torque and reluctance torque for each motor

电机型号	输出转矩/(N·m)	磁阻转矩/(N·m)
电机 1	838.52	246.60
电机 2	835.44	244.44
电机 3	843.00	249.70

由表 2 可知,电机 3 的综合性能最优,其输出转矩与磁阻转矩均为三者之最,其中输出转矩达 843 N·m,磁阻转矩达 249.7 N·m。

3 台电机空载径向磁密示意图如图 4 所示,

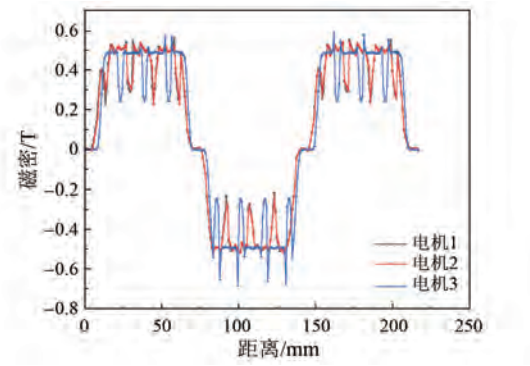


图 4 空载径向磁密示意图

Fig. 4 No-load radial flux density diagram

气隙磁密畸变率如表 3 所示。其中,电机 3 的气隙磁密幅值高于电机 1 和电机 2,其空载气隙磁密畸变率达 25.57%,较电机 1 高出 0.71%,较电机 2 高出 1.36%。

表 3 各电机气隙磁密 THD

Tab. 3 Air-gap flux density THD rate of each motor

电机型号	THD/%
电机 1	24.86
电机 2	24.21
电机 3	25.57

综上所述,电机 3 兼具最大的气隙磁密幅值与最高的 THD,同时磁阻转矩性能最优,表明单极不对称两极对称排列拓扑更有利于提升磁阻转矩。该结构以小幅牺牲气隙磁场正弦度为代价,拉大了 d、q 轴电感差值,从而实现磁阻转矩的提升。综合输出转矩、磁阻性能及气隙磁密畸变率分析,优选电机 3 的永磁体排列方式作为大巴车用混合永磁型驱动电机的转子结构。

3 混合 IPMSM 的转子优化

3.1 响应面法优化设计

基于 Ansys Maxwell 进行有限元建模,考虑到电机各参数对性能的影响并非独立,本文通过 Workbench 平台采用响应面优化算法对转子结构进行参数化寻优。选取的参数化变量包括:内永磁体距离圆心的距离 d、外永磁体与竖直方向的夹角 α 以及相邻外永磁体间磁桥的距离 w,如图 5 所示。由于输出转矩由永磁转矩与磁阻转矩叠加而成,其中磁阻转矩 T_{cz} 表达式为

$$T_{cz} = 1.5p(L_d - L_q)i_d i_q \tag{11}$$

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

永磁转矩 T_m 方程为

$$T_m = 1.5p\psi i_q \tag{12}$$

若要使磁阻转矩最大，其核心就是使 d、q 轴电感的差值 $|L_d - L_q|$ 最大。为稳定维持较大的 d、q 轴电感差值，保证磁阻转矩显著提升，a 取[-13，-8]，d 取[220，226]，w 取[8，13]。各个优化因子的取值范围如表 4 所示。电机的优化目标为最大输出转矩、最大磁阻转矩，电机的优化模型为

$$\max T_{av}(x_1, x_2, \cdots, x_n) \tag{13}$$

$$\max T_{cz}(x_1, x_2, \cdots, x_m) \tag{14}$$

式中：T_{av} 为输出转矩的平均值。

考虑到不规则的永磁体制造成本相对较高，本文电机采用规则的永磁体块。

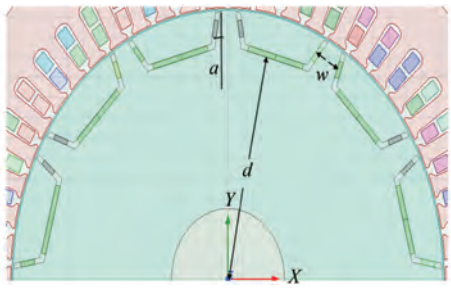


图 5　混合 IPMSM 转子优化示意图

Fig. 5　Optimization schematic diagram of hybrid IPMSM rotor

表 4　优化因子及取值范围

Tab. 4　Optimization factors and their value ranges

参数名称	取值范围
a/(°)	[-13，-8]
d/mm	[220，226]
w/mm	[8，13]

采用响应面优化算法构建设计变量与响应值之间的拟合模型。其中，拉丁超立方抽样设计适用于多变量系统，能够在较少样本点下实现对设计空间的全面覆盖，提高采样效率，其输出转矩与磁阻转矩的抽样计算结果如表 5 所示。响应面模型选用 Kriging 模型，该模型能够在较少样本点下获得较高拟合精度，准确预测未知点响应值，尤其适用于非线性问题。

d、a、w 对输出转矩性能影响的三维响应面示意图如图 6~8 所示。其中，d 对输出转矩整体呈正向促进作用，转矩随 d 增大整体呈上升趋势，但存在明显的饱和效应，当 d 超过一定阈值后，转矩的提升速率显著放缓。参数 a 与 w 对转矩的影响表现出明显的“拮抗特征”：当二者与 d 耦合时，均对转矩表现为正向促进；但当二者相互耦合时，对转矩表现为显著的抑制作用；输出转矩的最优工况出现在 d 偏大、a 偏大、w 偏小的参数组合区域，该区域内参数间的协同效应可实现转矩的最大化。

表 5　试验设计点及计算结果

Tab. 5　Design points and calculated results

名称	d/mm	w/mm	a/(°)	输出转矩/(N·m)	磁阻转矩/(N·m)
1	223.4	11.83	-10.17	865.64	253.7
2	224.6	10.5	-9.8	864.97	255.7
3	220.2	10.83	-12.17	850.60	251.6
4	224.2	8.17	-8.5	845.93	248.9
5	220.6	8.33	-11.83	839.41	251.1
6	225.8	8.5	-12.5	862.91	256.2
7	223.8	12.5	-8.33	866.23	247.1
8	224.5	11.5	-9.17	871.69	251.6
9	221.8	9.17	-10.5	846.90	251.8
10	221.4	11.17	-8.17	848.87	251.3
11	222.6	9.83	-11.17	854.70	253.5
12	225	10	-10	864.25	254.6
13	223	10.17	-10.83	859.06	254.3
14	225	12.83	-12.83	880.00	255.9
15	222.2	9.5	-9.5	849.08	252.5

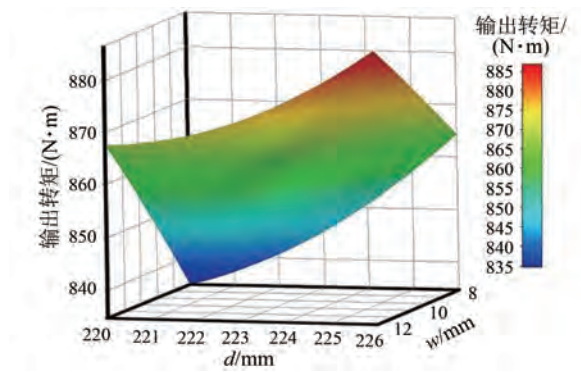


图 6　d 和 w 对输出转矩的影响

Fig. 6　Effects of d and w on output torque

d、w、a 对磁阻转矩影响的三维响应面示意图如图 9~11 所示。图中，磁阻转矩随 w、a 的变化呈单峰分布：转矩随参数增大先快速上升，在中等取值区域达到峰值，继续增大参数则转矩逐渐下

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

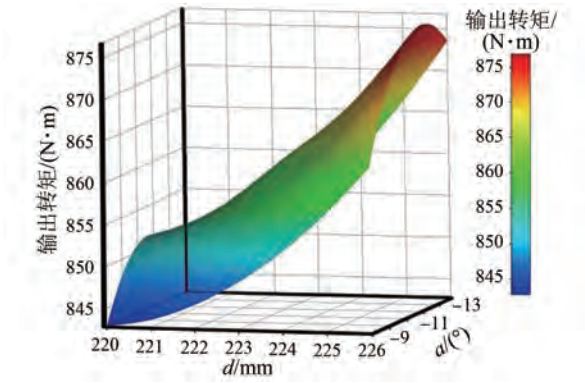


图 7 d 和 a 对输出转矩的影响

Fig. 7 Effects of d and a on output torque

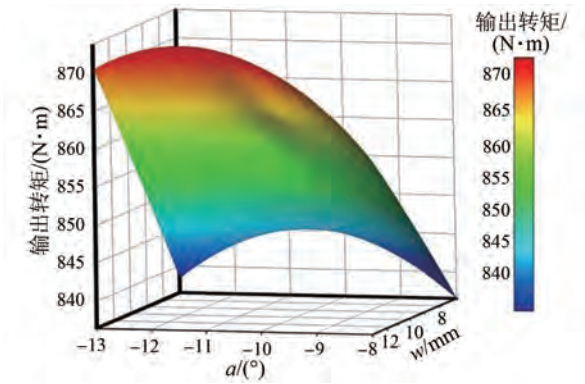


图 8 a 和 w 对输出转矩的影响

Fig. 8 Effects of a and w on output torque

降,只有在特定的 w、a 组合下,磁阻转矩才能达到最优水平。磁阻转矩随 d、w 的变化呈 U 型分布:在 d 与 w 均为中等取值的区域,磁阻转矩处于谷值水平;当任一参数向极小或极大值方向调整时,转矩均呈上升趋势。这说明中等参数组合对磁阻转矩存在显著的抑制效应,向参数两极调整可有效规避该抑制作用,提升磁阻转矩。

进一步分析参数主效应及交互作用可知,d

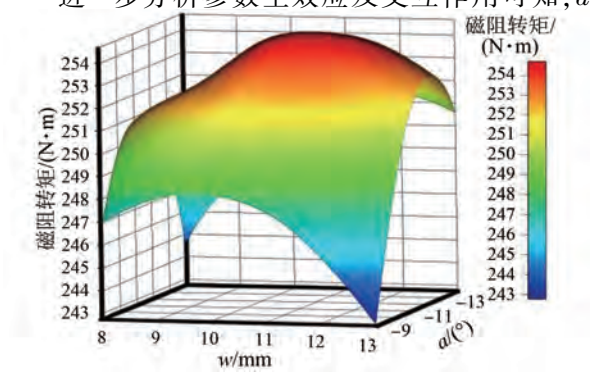


图 9 w 和 a 对磁阻转矩的影响

Fig. 9 Effects of w and a on reluctance torque

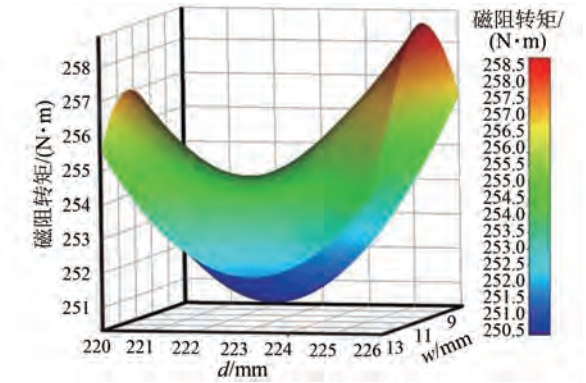


图 10 d 和 w 对磁阻转矩的影响

Fig. 10 Effects of d and w on reluctance torque

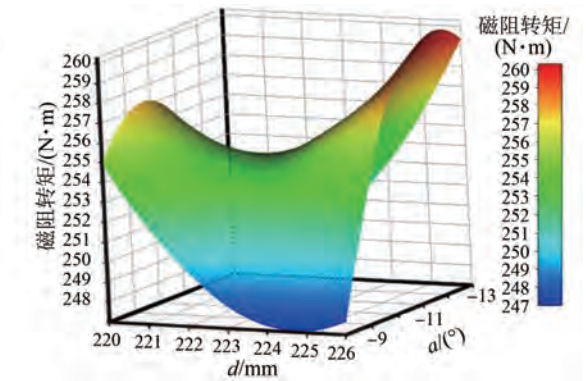


图 11 d 和 a 对磁阻转矩的影响

Fig. 11 Effects of d and a on reluctance torque

对磁阻转矩表现为持续抑制作用,随 d 增大逐渐降低;a 则表现为显著促进作用,随 a 增大快速上升。二者存在明显交互效应:低 d 水平下 a 的提升效果尤为突出,高 d 会削弱 a 的促进作用,故低 d、高 a 组合可实现磁阻转矩最大化。综合来看,a 为核心正向参数,d 为主要抑制参数,w 的作用随耦合参数变化呈双向特征。

3.2 有限元仿真分析

参数优化前后尺寸对比结果如表 6 所示。由表 6 最终得出,a 为 −12.83°、w 为 12.83 mm、d 为 225 mm 的时候输出转矩最大。将优化后的参数代入有限元模型进行仿真分析,得到优化前后的输出转矩、磁阻转矩如图 12、13 所示,具体数值对比如表 7 所示。

由图 12 可知,优化后的输出转矩为 880 N·m,较优化前增加了 37 N·m,增幅为 4.4%。其中,磁阻转矩增加了 6.2 N·m 导致总输出转矩增加,此外 d 的增大导致永磁磁链 ψ 变大,进而导致永磁转矩增大。由图 13 可知,优化后的磁阻转

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

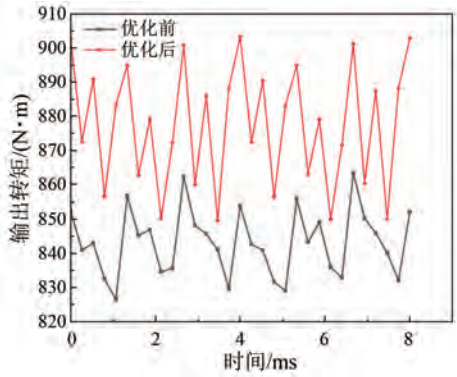


图 12　优化前后的输出转矩

Fig. 12　Output torque before and after optimization

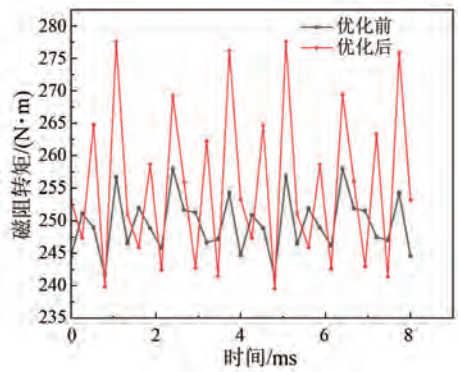


图 13　优化前后磁阻转矩

Fig. 13　Reluctance torque before and after optimization

矩为 255.9 N·m，较优化前增加了 6.2 N·m，增幅为 2.5%。该增益主要源于 d 的增大，使得铁心路径缩短，使 L_d 变小。a 从 −8° 增大至 −12.83°、w 从 10 mm 增大到 12.83 mm 可进一步改善磁阻转矩的输出能力。

表 6　参数优化前后尺寸对比

Tab. 6　Comparison of dimensions before and after optimization

参数名称	优化前	优化后
a/(°)	−8	−12.83
w/mm	10	12.83
d/mm	220	225

表 7　优化前后电机性能对比

Tab. 7　Comparison of motor performance before and after optimization

参数名称	优化前	优化后	性能提升百分比/%
输出转矩/(N·m)	843	880	4.4
磁阻转矩/(N·m)	249.7	255.9	2.5

4　试验验证

为验证仿真分析方法的正确性，基于现有的一台 110 kW、转速 1 250 r/min 的 12 极 54 槽 V 型全钕铁硼 IPMSM 样机开展验证工作。样机及试验平台如图 14 所示。



图 14　样机及试验平台

Fig. 14　Prototype and experimental platform

样机及其有限元模型的线反电动势波形分别如图 15、16 所示，具体数据对比如表 8 所示。由表 8 可知，样机的线反电动势有效值为 265.2 V，有限元模型的有效值为 268.8 V，误差仅为 1.2%，满足工程设计要求范围。



图 15　样机线反电动势

Fig. 15　Line back electromotive force of the prototype

基于现有 110 kW 样机，测试了额定转速下的转矩-电流特性，并与有限元模型计算结果进行对比，结果如图 17、表 9 所示。由表 9 可知，电流小于 324 A 时，试验值与有限元值吻合度较高，误差基本控制在 3.3% 以内，多数工况误差低于 2%，曲线趋势高度重合；随着电流增大，定子磁密饱和，磁导率下降，转矩无法线性上升，转矩增幅放缓。当电流为 461.82 A 时，误差达到最大值 4.72%，仍处于合理工程误差范围内。整体来看，试验与仿真曲线的变化趋势一致，样机有限元模型能较好地反映输出转矩随电流的线性增长规律，精度满足工程设计要

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

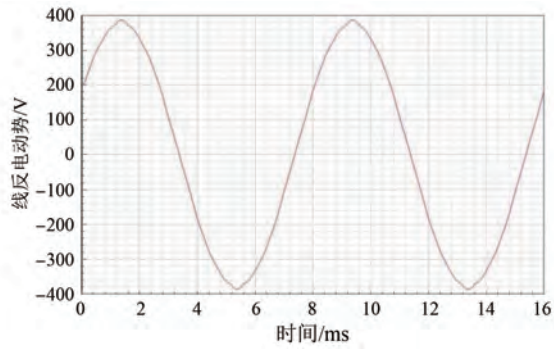


图 16 有限元模型线反电动势

Fig. 16 Line back electromotive force of the finite element model

求,从而验证了有限元模型的有效性。

表 8 线反电动势对比

Tab. 8 Line back electromotive force comparison

模型	线反电动势有效值/V	THD/%
试验值	265.2	1.03
有限元值	268.8	1.97

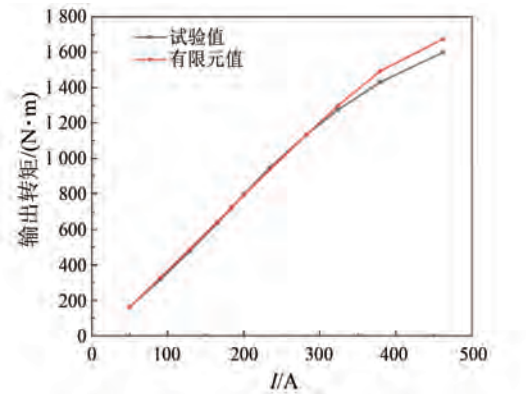


图 17 转矩-电流特性曲线

Fig. 17 Torque-current characteristic curves

表 9 转矩-电流特性对比

Tab. 9 Comparison of torque-current characteristics

电流/A	试验值/(N·m)	有限元值/(N·m)	误差/%
49.93	161.17	160.14	0.64
90.37	317.70	328.06	3.26
129.11	477.40	489.53	2.54
165.089	635.69	643.84	1.28
183.65	719.00	723.00	0.56
200.00	794.00	792.00	0.03
234.10	947.54	936.00	1.21
282.66	1 134.30	1 134.00	0.02
323.79	1 275.00	1 298.60	1.85
379.00	1 430.90	1 492.80	4.39
461.82	1 599.80	1 674.47	4.72

综上所述,样机的有限元线反电动势有效值大小及 THD 以及转矩-电流特性仿真结果与试验值对比分析均在合理的误差范围内,从而验证了有限元方法的正确性及准确性。

5 结语

首先,针对电动大巴用混合永磁 U 型 IPMSM,提出了三种永磁体排布方案,并对其输出转矩、磁阻转矩及气隙磁密畸变率进行了分析。结果表明,单极不对称两极对称结构在转矩性能上具有明显优势,因此被选中作为最优排布方式。其次,在保持永磁体用量不变的前提下,对该结构的永磁体角度、距离及相邻磁桥间距进行了多参数优化。优化后,电机的输出转矩提升了 4.4%,磁阻转矩提升了 2.5%。最后,利用现有的一台 110 kW 钕铁硼电机样机,将反电动势有效值、THD 及转矩-电流特性的仿真结果与试验数据进行对比。两者均在合理误差范围内吻合良好,验证了有限元分析方法的正确性与准确性。

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

陈丽香、肖鹏进行了方案设计,肖鹏参与了试验研究、内容总结与论文撰写,陈丽香、汪青锋和柴松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。

Chen Lixiang, XiaoPeng completed the scheme design. Xiao Peng participated in experimental research, content summary and paper writing. Chen Lixiang, Wang Qingfeng and Chai Song took part in the review and revision of the paper. All authors have read and approved the final version of the paper for submission.

参 考 文 献

[1] 符梁铭. 新能源汽车发展前景及分析建议[J]. 时代汽车, 2025(13): 80-82.
Fu L M. Development prospects and analysis

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

suggestions for new energy vehicles [J]. Times Automobile，2025(13)：80-82

[2] 江龙顺，杨雷，陈亮，等. 工业机器人用少稀土混合磁钢永磁同步电机研究[J]. 微特电机，2025，53(5)：21-26.
Jiang L S，Yang L，Chen L，et al. Research on less-rare-earth hybrid permanent magnet synchronous motor for industrial robots [J]. Small & Special Electrical Machines，2025，53(5)：21-26.

[3] 赵晓坤，黄梓旭，郭启超，等. 不对称转子永磁辅助同步磁阻电机转矩比例系数对转矩提升能力的影响研究[J]. 电机与控制应用，2025，52(8)：879-887.
Zhao X K，Huang Z X，Guo Q C，et al. Investigation of torque proportion coefficient impact on torque enhancement in the asymmetric rotor PMa-SynRM [J]. Electric Machines & Control Application，2025，52(8)：879-887.

[4] 李宗耀，初秋，车爽，等. 少稀土组合磁极 Halbach 永磁同步电机性能和材料成本研究[J]. 电机与控制应用，2023，50(12)：74-82
Li Z Y，Chu Q，Che S，et al. Research on performance and material cost of Halbach permanent magnet synchronous motor with less rare earth combined magnet poles [J]. Electric Machines & Control Application，2023，50(12)：74-82.

[5] 王晓光，周晟，李新华，等. 混合动力汽车 ISG 用混合永磁同步电机转子研究[J]. 电机与控制应用，2019，46(5)：107-112.
Wang X G，Zhou S，Li X H，et al. Research on rotor of hybrid permanent magnet synchronous motor for hybrid electric vehicle integrated starter generator [J]. Electric Machines & Control Application，2019，46(5)：107-112.

[6] 陈子淋，李明，王蓉，等. 定子齿开槽对屏蔽式永磁同步电机齿槽转矩的影响[J]. 电机与控制应用，2025，52(4)：432-441.
Chen Z L，Li M，Wang R，et al. Effect of stator tooth slotting on cogging torque of canned permanent magnet synchronous motor [J]. Electric Machines & Control Application，2025，52(4)：432-441.

[7] Zhao W L，Yang Z S，Liu Y，et al. Analysis of a novel surface-mounted permanent magnet motor with hybrid magnets for low cost and low torque pulsation [J]. IEEE Transactions on Magnetics，2021，57(6)：8104804.

[8] Mishra S，Nayak B K，Fernandes B G. Ferrite PM-assisted synchronous reluctance motor for EV application [C]// 2021 IEEE 18th India Council International Conference，Guwahati，India，2021：1-6.

[9] Jeong C L，Kim Y K，Hur J. Optimized design of PMSM with hybrid-type permanent magnet for improving performance and reliability [J]. IEEE Transactions on Industry Applications，2019，55(5)：4692-4701.

[10] Jeong C L，Hur J. Optimization design of PMSM with hybrid-type permanent magnet considering irreversible demagnetization [J]. IEEE Transactions on Magnetics，2017，53(11)：8110904.

[11] Liu K W，Shi L W，Liu Z W，et al. Analysis and optimization of asymmetric hybrid permanent magnet motor for electric vehicle [J]. Journal of Electrical Engineering & Technology，2023，18(5)：3555-3567.

[12] 王鑫颖，佟文明. 混合辅助同步磁阻电机转子拓扑分析与优化[J]. 微特电机，2024，52(10)：6-10.
Wang X Y，Tong W M. Rotor topology analysis and optimization of hybrid auxiliary synchronous reluctance motor [J]. Small & Special Electrical Machines，2024，52(10)：6-10.

[13] 安忠良，韩毓泽. 永磁辅助磁阻电机转矩性能研究[J]. 微电机，2026，59(2)：1-5+25.
An Z L，Han Y Z. Research on torque performance of permanent magnet assisted reluctance motor [J]. Micromotors，2026，59(2)：1-5+25.

[14] 刘栋良，李阿强，刘伟，等. 电动汽车用永磁辅助同步磁阻电机转子优化[J]. 电机与控制学报，2022，26(9)：119-129.
Liu D L，Li A Q，Liu W，et al. Rotor optimization of permanent magnet-assisted synchronous reluctance motor for electric vehicles [J]. Electric Machines and Control，2022，26(9)：119-129.

[15] 刘楷文，史立伟，王文强，等. 电动汽车非对称混合磁极永磁电机优化与分析[J]. 河北科技大学学报，2022，43(4)：355-364.
Liu K W，Shi L W，Wang W Q，et al. Optimization and analysis of asymmetrical hybrid permanent magnetmotor for electric vehicle [J]. Journal of Hebei University of Science and Technology，2022，43(4)：355-364.

[16] Jiang G W，Zhou H W，Ye C，et al. Comparative

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

analysis of hybrid dual permanent magnet machines with different asymmetric stator-pole topologies [J]. Journal of Electrical Engineering and Technology, 2025, 20(7): 4627-4642.

[17] Li Y, Lin H, Lin H Y, et al. A novel magnet-axis-shifted hybrid permanent magnet machine for electric vehicle applications [J]. Energies, 2019, 12(4): 641.

[18] 李智明, 赵桂书, 丁树业, 等. 轮辐式永磁同步电机齿槽转矩优化设计[J]. 微特电机, 2025, 53(9):27-32.
Li Z M, Zhao G S, Ding S Y, et al. Cogging torque optimization in spoke-type PMSM [J]. Small & Special Electrical Machines, 2025, 53(9): 27-32.

[19] 张宏, 周大伟, 陆丽, 等. 基于改进的樽海鞘群算法的永磁同步电机多目标优化设计[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(2): 221-230.
Zhang H, Zhou D W, Lu L, et al. Multi-objective optimization design of permanent magnet synchronous motor based on improved salp swarm algorithm [J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(2): 221-230.

[20] 刘津成, 金阳洋, 林井福, 等. 工业机械行业用内嵌式永磁同步电机优化设计[J]. 微特电机, 2025, 53(3): 14-18.
Liu J C, Jin Y Y, Lin J F, et al. Optimization design of interior permanent magnet synchronous motor for industry machinery [J]. Small & Special Electrical Machines, 2025, 53(3): 14-18.

[21] 张宏, 周大伟, 陆丽, 等. 基于改进鲸鱼算法的永磁同步伺服电机多目标优化设计[J]. 微电机, 2024, 57(12): 18-23.
Zhang H, Zhou D W, Lu L, et al. Multi-objective optimization design of permanent magnet synchronous servo motor based on improved whale algorithm [J]. Micromotors, 2024, 57(12): 18-23.

[22] 卢庆轩, 周晓燕, 贾海涛, 等. 基于粒子群算法的内置式永磁同步发电机多目标优化[J]. 微特电机, 2024, 52(11): 8-13+19.
Lu Q X, Zhou X Y, Jia H T, et al. Multi-objective optimization of interior permanent magnet synchronous generator based on particle swarm optimization [J]. Small & Special Electrical Machines, 2024, 52(11): 8-13+19.

[23] 杜晓彬, 黄开胜, 谭耿锐, 等. 基于响应面法的永磁电机转矩多目标优化[J]. 微特电机, 2019, 47(6): 20-23.
Du X B, Huang K S, Tan G R, et al. Multi-objective optimization of torque for permanent magnet motor based on response surface method [J]. Small & Special Electrical Machines, 2019, 47(6): 20-23.

收稿日期:2026-06-10
收到修改稿日期:2026-07-05

作者简介:

陈丽香(1973—),女,教授级高级工程师,研究方向为永磁电机及其关键技术的研究,chen_lx47@aliyun.com;

*通信作者:肖 鹏(2002—),男,硕士研究生,研究方向为永磁电机及其关键技术的研究,3110615984@qq.com。

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.