

永磁同步电机转子拓扑结构优化与电磁性能分析

王俭朴, 赵裔海, 李 瑞

(南京工程学院 交通工程学院, 南京 211167)

摘要:为研究不同转子拓扑结构对永磁同步电机的电磁性能影响,采用多目标优化算法对双层永磁体永磁电机结构参数进行优化,深入分析了电机永磁体长度、永磁体宽度、磁桥宽度以及永磁体与轴心距离等结构参数对永磁同步电机电磁性能的影响,并通过 Maxwell 仿真分析优化前后电机的电磁性能。建立了传统单层 V 型永磁同步电机和优化后的双层永磁体内置 V 型永磁同步电机的二维模型,仿真结果表明:优化后的双层 V 型结构的永磁同步电机空转反电势幅值、输出转矩和输出功率均高于传统单层 V 型结构永磁电机,其转矩脉动下降了 10.99% 和谐波畸变率下降了 0.17%。详细分析了永磁同步电机不同结构参数对电磁性能的影响,可为设计优化永磁同步电机提供指导意义。

关键词: 永磁同步电机; 永磁体内置; 转子结构; 电磁性能

中图分类号: **文献标志码:** A

Optimization of Rotor Topology Structure and Electromagnetic Performance Analysis of Permanent Magnet Synchronous Motor

WANG Jianpu, ZHAO Yihai, LI Rui

(School of Traffic Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing, 211167, China)

Abstract: To study the influence of different rotor topologies on the electromagnetic performance of permanent magnet synchronous motor (PMSM), a multi-objective optimization algorithm was used to optimize the structural parameters of a double-layer PMSM. The influence of structural parameters such as the length, width, bridge width, and distance between the permanent magnet and the axis on the electromagnetic performance of the PMSM was analyzed in depth, and the motor performance before and after optimization was analyzed through Maxwell simulation. A two-dimensional model was established for the traditional single-layer V-shaped PMSM and the optimized double-layer permanent magnet built-in V-shaped PMSM. The simulation results showed that the optimized double-layer V-shaped structure of the PMSM had higher no-load back electromotive force amplitude, output torque, and output power than the traditional single-layer V-shaped structure PMSM. The torque ripple decreased by 10.99% and the harmonic distortion rate decreased by 0.17%. By analyzing the influence of different motor structural parameters on electromagnetic performance, guidance can be provided for designing and optimizing PMSM.

Key words: Permanent magnet synchronous motor; Permanent magnet internally installed; Rotor structure; Electromagnetic performance

随着轨道交通对节能减排的要求不断提高,永磁同步牵引技术也在快速发展当中^[1]。永磁同步电

机相比于异步电机具有体积小、效率高、重量轻、功率密度大、结构简单、过载能力强等优点,可实现无

齿轮箱传动。相较于表贴式永磁同步电机,内置 V 型永磁同步电机的凸极特性能够同时产生永磁转矩和磁阻转矩,有效提高了电机的转矩密度,永磁同步电机中的 d 轴和 q 轴电感差异较大,产生的磁阻转矩较高,能在高速弱磁区提供更大的转矩。基于以上特点,内置式永磁电机在轨道交通的应用中具有极大的优势,现在已成为轨道交通车辆电机的主流形式。但是,内置式 V 型永磁电机的转矩脉动和齿槽转矩较大,使电机产生较大振动和噪声。因此,需要合理的优化电机的转子拓扑结构降低转矩脉动和齿槽转矩。

栗大林等^[2]以电机的功率密度和永磁体利用率作为优化目标,基于 NSGA-II 算法对三种转子拓扑结构进行优化得出最佳结构设计的具体参数,通过仿真得出表嵌式磁极偏移结构谐波含量最小。这里针对表嵌式永磁转子结构,但不足之处在于该结构永磁体固定的机械强度设计难度大,丰富的谐波磁场会加剧永磁体的退磁风险,弱磁升速能力较弱。荆建宁等^[3-5]采用非对称 V 型内置式转子结构,基于对称 V 型结构建立新的数学模型,得出非对称磁极结构能够有效的降低永磁同步电机的转矩脉动和齿槽转矩。通过采用新型转子磁障结构(NRS-PM SM),在转子上打孔形成辅助槽,利用多目标敏感度分析方法选择关键结构参数,并使用遗传算法优化目标筛选出最优参数。然而非对称 V 型内置式转子增加了加工难度。李吉程等^[6-8]建立了单层无隔磁桥、单层有隔磁桥、双层无隔磁桥和双层有隔磁桥四种转子拓扑结构 IPMSM 有限元模型。得出双层有隔磁桥的转子结构具有良好的电磁性能以及噪声削弱效果。这样会造成电机等效气隙的增加。Abunike 等^[9-12]提出少稀土组合磁极 Halbach PMSM,其主磁极为双层结构。仿真结果验证了少稀土组合磁极 Halbach 永磁同步电机的电磁性能和结构的合理性。提出一种双并列转子结构的永磁同步电机可以有效地降低齿槽转矩从而提高电机的性能,通过有限元模型验证理论分析的正确性,并提出了抑制转矩脉动的方法。没有考虑转子结构优化后对永磁同步电机空载的反电势影响。李世奇等^[13-15]设计一种并轴式双转子永磁同步电机,使用田口法以气隙尺寸、永磁体尺寸及定子槽体宽度为优化变量,分析电机的齿槽效应。然而未分析对永磁同步电机输出转矩和输出功率的影响。

本文以输出转矩、输出功率、齿槽转矩和空载的反电势为优化目标,建立 8 极 48 槽内置式永磁同步

电机的有限元模型,采用多目标优化方法,优化双层永磁体结构,分析对比优化前后电机的电磁性能。通过分析内置式单层 V 型永磁体和双层 V 型永磁体两种转子结构的输出功率和额定转矩,双层永磁体的转子结构有明显的电磁性能优势。

1 永磁同步电机的数学模型

本文探究永磁同步电机双层转子拓扑结构下的电磁性能,电磁转矩是衡量电机性能的一个重要指标,通过建立电机的转矩方程了解电机复杂的电磁相互作用,进而优化永磁同步电机的设计、提升电机性能。以永磁同步电机为例,将电机的磁场模型转变为基于同步转子定义的交直轴模型,图 1 为永磁同步电机的矢量图^[5]。

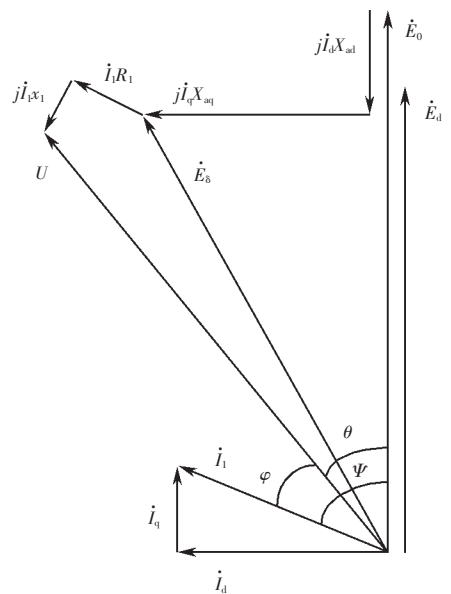


图 1 永磁同步电机矢量图

Fig. 1 Vector diagram of PMSM

由图 1 可以推导出永磁同步电机基本的电磁关系式为

$$\begin{cases} \Psi = \arctan \frac{I_d}{I_q} \\ \varphi = \theta - \Psi \\ U \sin \theta = I_q X_{aq} + I_d R_1 \\ U \cos \theta = E_0 - I_d X_{ad} + I_q R_1 \end{cases} \quad (1)$$

式中: \$\Psi\$ 为内功率因数角; \$\theta\$ 为功率角; \$\varphi\$ 为负载功率因数角; \$E_0\$ 为空载的反电势; \$U\$ 为相电压; \$I_1\$ 为定子相电流; \$R_1\$ 为定子绕组相电阻; \$I_d\$、\$I_q\$ 分别为直、交轴的电枢电流; \$X_{ad}\$、\$X_{aq}\$ 分别为直、交轴的同步电抗。

由于电机的定子电阻远小于 \$X_{ad}\$ 和 \$X_{aq}\$,在计算时可以忽略定子电阻。电机功率方程的表达式为

$$P_e = \frac{mE_0U}{X_{ad}} + \frac{mU^2}{2} \left(\frac{1}{X_{aq}} - \frac{1}{X_{ad}} \right) \sin(2\theta) \quad (2)$$

式中, m 为电机相数。

电机电磁转矩方程的表达式为

$$T = \frac{P_e}{\Omega} \approx \frac{mpE_0U}{\omega X_{ad}} + \frac{mpU^2}{2\omega} \left(\frac{1}{X_{aq}} - \frac{1}{X_{ad}} \right) \sin(2\theta) \quad (3)$$

式中: p 为电机极对数; Ω 为电机机械角速度; ω 为电角速度。

2 永磁同步电机结构

本文以 30 kW 的内置式永磁同步电机作为参考,其永磁体嵌入转子铁芯内部,当定子绕组通入三相交流电时,会产生旋转磁场,在旋转磁场的作用下推动转子旋转,从而实现高效率能量传递^[16-17]。永磁同步电机的基本参数如表 1 所示。

表 1 永磁同步电机基本参数

Tab. 1 PMSM basic parameters

参数	数值	参数	数值
额定功率/kW	30	极对数	4
额定转矩/(N·m)	95.5	槽数	48
额定转速/(r/min)	3 000	定子外径/mm	190
母线电压/V	336	定子内径/mm	125
转子外径/mm	123.8	转子内径/mm	70

2.1 基于多目标优化遗传算法的电机优化

非支配多目标遗传算法(NSGA-II)通过对初始种群个体的非支配排序,区分优劣关系并划分不同非支配层级^[18-19]。在进化过程中,NSGA-II 进行选择、交叉和变异操作,对参数子代种群和父代种群集合进行非支配排序和拥挤度计算,得出最优解集。

本文从永磁同步电机的整体性能考虑,提出一种双层 V 型永磁体的转子结构,以输出功率、转矩脉动、齿槽转矩和反电势谐波为优化目标。考虑到本文提出的双层永磁体结构可能会破坏永磁电机的磁路,导致永磁同步电机的整体性能下降。因此,需要对第二层永磁体结构参数进行局部设计,提高优化后永磁同步电机的整体性能。为了能够快速精确的得出双层永磁体结构参数,本文对设计参数和目标进行多目标敏感分析筛选出关键参数,再使用非支配多目标遗传算法(NSGA-II)对关键参数进行优化,得出最优解集,最后,通过有限元仿真对比得出双层永磁体结构参数。双层永磁体结构的电机设计流程图如图 2 所示。

2.2 变量设计与 NSGA-II 算法优化结果

利用 Maxwell 建立永磁同步电机的二维模型,并将第二层永磁体尺寸进行参数化,其参数化模型如图 3 所示。

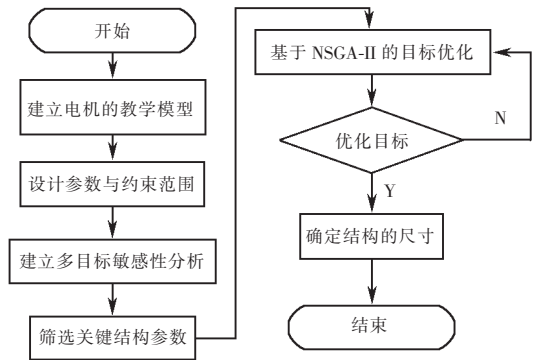


图 2 双层永磁体结构的电机设计流程图

Fig. 2 Flowchart of motor design for double-layer permanent magnet structure

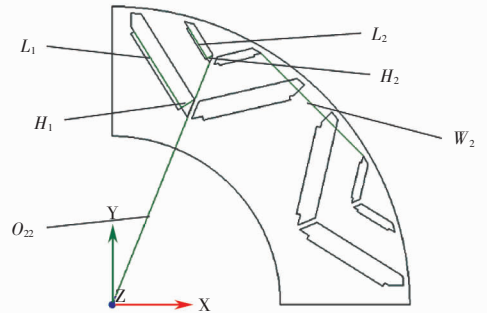


图 3 参数化模型

Fig. 3 Parametric model

根据永磁同步电机的基本参数,通过 ANSYS 自带的 optislang 插件输入参数初值后会生成约束范围,参数设计与约束范围见表 2。

表 2 参数设计与约束范围

Tab. 2 Parameters design and constraint range

参数	约束范围/mm
第一层永磁体长度 L_1	13.3~18.6
第一层永磁体宽度 H_1	3.8~4.2
第二层永磁体长度 L_2	7.1~8.9
第二层永磁体宽度 H_2	1.6~3.2
第二层磁桥宽度 W_2	24.8~30.2
第二层永磁体与轴心距离 O_{22}	53.2~55.4

通过敏感度分析结果,在 cop 矩阵中 L_2 、 W_2 、 O_{22} 和 H_2 等 4 个主要参数对优化目标的影响权重分别是 18.9%、21.7%、46.8% 和 10.8%,是影响优

化目标的 4 个主要参数,因此,确定结构优化参数为 L_2 、 W_2 、 O_{22} 和 H_2 。因此本文采用 NSGA-II 算法对 L_2 、 H_2 、 O_{22} 和 W_2 等 4 个主要参数进行优化。为确保优化效果的精确性和效率,通过多次试验,明确双层永磁体结构优化设计步骤^[3]。其它参数不变,约束表达式为

$$\begin{cases} T_{\text{avg}} \geq 90 \\ T_{\text{rip}} \leq 10\% \\ T_{\text{cogging}} \leq 9.55 \end{cases} \quad (4)$$

式中: T_{avg} 为输出转矩; T_{rip} 为转矩脉动; T_{cogging} 为齿槽转矩。

基于 NSGA-II 算法的永磁同步电机参数优化表如表 3 所示。

表 3 基于 NSGA-II 算法的永磁同步电机参数优化

Tab. 3 Parameters optimization of PMSM Based on NSGA-II algorithm

转子拓扑结构	双层永磁体
优化目标	(1)输出转矩 (2)齿槽转矩 (3)转矩脉动 (4)谐波畸变
优化变量	L_2 、 H_2 、 O_{22} 、 W_2
初始种群	20
遗传代数	25
变量交叉概率	90%
变量突变概率	1%

经过算法优化后的关键参数能够搜寻 L_2 、 H_2 、 O_{22} 、 W_2 的最优解集合。通过遗传算法优化后的参数,通过 Maxwell 仿真,最终确定本文永磁同步电机的第二层永磁体关键参数,表 4 是第二层永磁体主要参数优化前后对比,表 5 是优化前后永磁同步电机性能参数的对比。

表 4 第二层永磁体主要参数优化前后对比

Tab. 4 Comparison of main parameters of secondary permanent magnet before and after optimization

主要参数	优化前/mm	优化后/mm
第二层永磁体长度 L_2	8.6	7.5
第二层永磁体宽度 H_2	2.00	1.80
第二层磁桥宽度 W_2	25.60	30.12
第二层永磁体与轴心距离 O_{22}	53.50	54.20

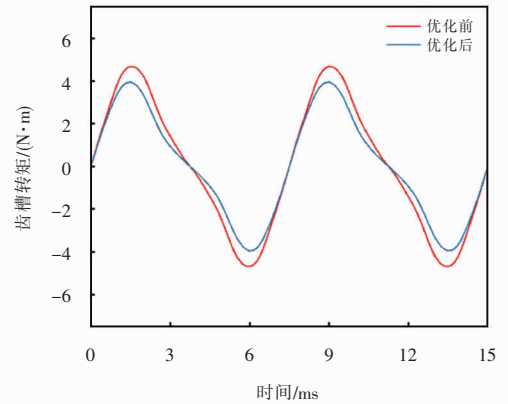
从表 5 可以看出,通过算法优化后的双层永磁体电机,其输出转矩提升了 $1.75 \text{ N} \cdot \text{m}$,转矩脉动下降了 3.79% ,齿槽转矩减少了 $0.74 \text{ N} \cdot \text{m}$,谐波畸变率下降了 1.12% ,反电势幅值下降了 5.32 V ,验证了优化后的永磁同步电机性能要优于优化前的

永磁同步电机性能。优化前后齿槽转矩和反电势谐波参数对比如图 4 所示。

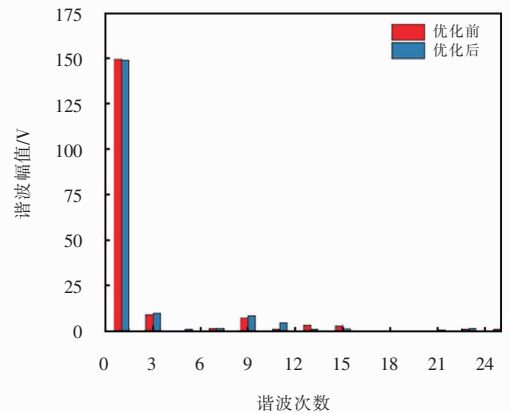
表 5 优化前后永磁同步电机性能参数

Tab. 5 Performance parameters of PMSM before and after optimization

参数	优化前	优化后
转矩脉动/%	12.80	9.01
齿槽转矩/ $\text{N} \cdot \text{m}$	4.69	3.95
输出转矩/ $\text{N} \cdot \text{m}$	93.17	94.92
谐波畸变率/%	9.32	8.20
反电势幅值/V	265.68	260.36



(a) 齿槽转矩



(b) 反电势谐波

图 4 优化前后参数对比

Fig. 4 Comparison of parameters before and after optimization

3 两种结构永磁同步电机的电磁性能分析

因永磁同步电机定子与转子之间磁路的复杂性,转子旋转时会产生齿槽转矩,导致输出转矩波动,会影响电机的性能^[20]。为了验证双层 V 型永磁体拓扑结构的合理性,本文采用有限元的方法进行电机性能分析,并与传统单层 V 型永磁体拓扑结构

电机的性能作对比。为保证仿真实验的合理性,两次实验所使用的电机模型在定子结构相关参数和运行环境均相同,转子拓扑结构不同的条件下进行,建立两种结构的永磁体电机模型如图 5 和图 6 所示。

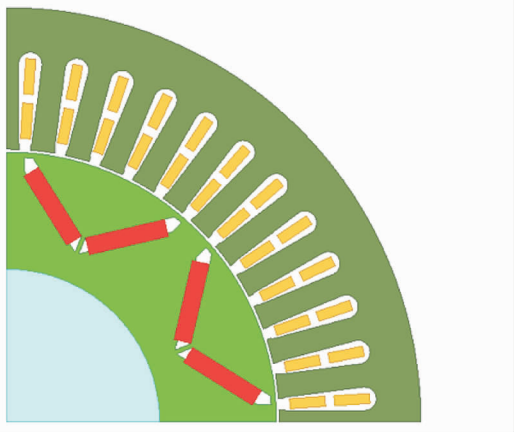


图 5 单层永磁体结构

Fig. 5 Single-layer permanent magnet structure

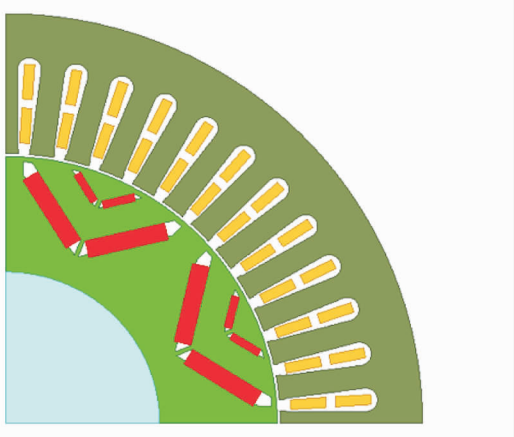


图 6 双层永磁体结构

Fig. 6 Double-layer permanent magnet structure

3.1 空载的反电势分析

永磁同步电机的反电势是联系牵引电机和逆变器之间的桥梁,它对永磁电机的性能和轨道交通牵引系统参数的选择影响较大^[21]。空载的反电势幅值大小以及波形的好坏是验证电机设计合理性的重要指标,永磁同步电机运行时电机铁芯受交变磁场的影响,导致铁芯磁化特性的非线性响应,从而使反电势产生谐波分量。这些谐波分量会导致电机运行时产生铁损耗、铜损耗和振动噪声,降低电机的性能和效率。

图 7 中是单层永磁体和双层永磁体两种模型的反电势谐波。

图 7 中两种模型空载的反电势经过傅里叶变换

得到反电势谐波。谐波畸变率是波形畸变程度的一个重要性能指标^[22]。谐波畸变率计算公式为

$$THD = \sqrt{\frac{Q^2 - Q_0^2}{Q_0^2}} \times 100\% \quad (5)$$

式中: THD 为谐波畸变率; Q 为总谐波有效值; Q_0 为基波有效值。

谐波畸变率越高,电机的转矩脉动会越大,电机会产生振动和噪声;反之,谐波畸变率越低,电机运行的越平稳^[23]。单层与双层结构电机谐波畸变率见表 6。从表 6 中可知,双层 V 型结构的永磁同步电机空转反电势幅值高于单层 V 型结构,上升了 3.56V,其谐波畸变率下降了 0.17%,本文设计的双层永磁体结构较单层永磁体结构电机性能得到了有效提升。

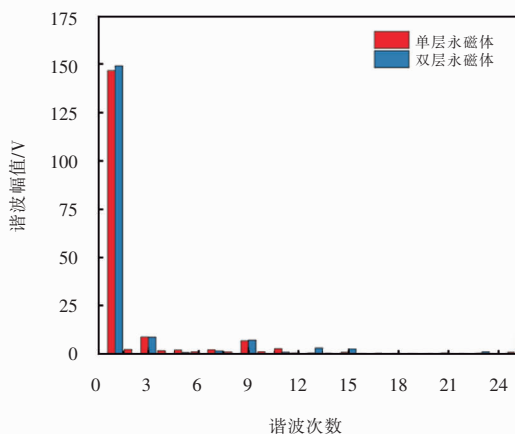


图 7 反电势谐波

Fig. 7 Back potential harmonic wave

表 6 两种永磁同步电机反电势幅值和谐波畸变率对比

Tab. 6 Comparison of back electromotive force amplitude and harmonic distortion rate between two types of PMSM

参数	单层	双层
反电势幅值/V	256.80	260.36
谐波畸变率/%	8.37	8.20

3.2 输出性能分析

转矩脉动是电机运行中的一个重要特性^[24]。转矩脉动的存在可能导致电机运行不平稳,引起振动与噪声,影响机器运行的精度和可靠性^[25]。分析电机输出性能可以为后续优化电机控制、电磁设计以及电机齿槽效应作基础。相同的运行条件下,当电机运行到平稳状态时,常规永磁电机与双层永磁体结构的电机输出转矩对比如图 8 所示。

从图 8 可以看出,双层永磁体结构的电机的最大输出转矩要略高于常规永磁电机。从转矩波动性方面看,双层永磁体结构的电机稳定性明显优于常规永

磁同步电机。因此,双层永磁体结构的电机转矩脉动更小,在相同运行条件下,其运行更平稳。仿真结果表明,双层转子结构的电机输出转矩较常规永磁电机提高 $4.15 \text{ N} \cdot \text{m}$,转矩脉动下降了 10.99% ,且输出功率提高了 4.5% ,双层永磁体结构有效减小了转矩脉动。表7为两种永磁体结构永磁同步电机输出转矩、转矩脉动和输出功率对比。

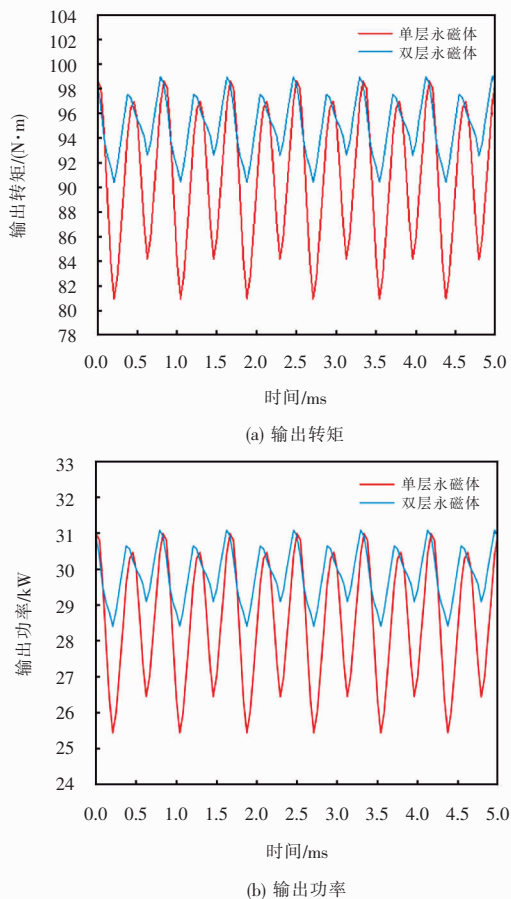


图8 额定输出转矩和功率波形

Fig. 8 Rated output torque and power waveform

表7 两种结构永磁同步电机性能参数对比

Tab. 7 Comparison of two structures PMSM performance parameters

参数	单层	双层
输出转矩/ $\text{N} \cdot \text{m}$	90.77	94.92
转矩脉动/ $\%$	20.00	9.01
输出功率/ kW	28.54	29.83

4 结论

本文设计了一台内置式双层V型永磁同步电机,通过对转子结构进行优化,采用有限元对比分析了单层V型和双层V型永磁电机的电磁性能分析,

得到以下结论:

1) 为避免双层永磁体结构可能会造成永磁同步电机的整体性能下降。可以通过对第二层永磁体结构参数进行局部设计来提高永磁同步电机的整体性能。

2) 通过遗传算法优化后的双层转子结构的永磁同步电机,其输出转矩提升了 $1.75 \text{ N} \cdot \text{m}$,转矩脉动下降了 3.79% ,齿槽转矩减少了 $0.74 \text{ N} \cdot \text{m}$,谐波畸变率下降了 1.12% ,验证了优化后的永磁同步电机电磁性能要优于优化前的永磁同步电机。

3) 优化后的双层V型永磁同步电机与传统单层V型永磁同步电机相比,其输出转矩和输出功率都得到了提高,转矩脉动和谐波畸变率均下降,说明本文设计的双层V型永磁体的转子结构有明显的电磁性能优势。

参考文献:

- [1] 钱曙杰. 轨道交通新型永磁同步牵引电机的设计与比较[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(07): 110-114.
- [2] 栗大林, 华浩, 李然, 等. 高功率密度表嵌式磁极偏移永磁电机转矩性能提升[J/OL]. 上海交通大学学报, 1-22 [2024-02-20]. <https://xuebao.sjtu.edu.cn/CN/10.16183/j.cnki.jsjtu.2023.545>. DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2023.545.
- [3] 荆建宁, 史立伟, 李法成, 等. 非对称V形内置式永磁同步电机电磁特性分析[J]. 机床与液压, 2023, 51(21): 180-184.
- [4] 陈德海, 李志远, 赖正贵, 等. 内置V型永磁同步电机性能优化设计与研究[J]. 制造技术与机床, 2023, (11): 23-28.
- [5] 谢颖, 王泽兵, 蔡蔚, 等. 1.1 MW 高速内置式永磁同步电机新型转子拓扑设计与强度优化[J]. 电机与控制学报, 2024, 28(6): 66-75.
- [6] 李吉程, 王爱元, 王成敏, 等. 内置式永磁同步电机不同转子拓扑结构对电机性能的影响分析[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(2): 103-112.
- [7] 戈宝军, 姜汉, 林鹏, 等. 并轴式双转子永磁同步电机齿槽转矩分析[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(8): 80-90.
- [8] 初秋, 车爽, 李春艳. 少稀土组合磁极 Halbach 永磁同步电机优化设计[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(3): 22-28.
- [9] ABUNIKE C E, OKORO O, APHALE S S. Intelligent optimization of switched reluctance motor using genetic aggregation response surface and multi-objective genetic algorithm for improved performance[J]. Energies,

- 2022(15):6086-6099.
- [10] 陈阳,陶大军,王立坤,等.双并列转子永磁同步电机转矩脉动产生机理及抑制[J].电工技术学报,2024,39(20):6357-6370.
- [11] 刘佳伟,狄冲,李仕豪,等.基于不同绕组形式双定子低速大转矩永磁直驱电机转矩脉动的分析与抑制[J].电工技术学报,2024,39(12):3646-3657.
- [12] 吕品,马浩天,苏勋文,等.非均匀 Halbach 阵列外转子永磁同步电机分析与优化[J/OL].哈尔滨理工大学学报,1-13[2024-11-27].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1404.N.20240624.1551.004.html>.
- [13] 李世奇,佟文明,贾建国,等.考虑磁桥非线性的内置式永磁同步电机空载电磁性能通用解析模型[J].电工技术学报,2023,38(6):1421-1432.
- [14] 王明杰,贾宛英,张志艳,等.永磁直线同步电机空载反电动势和推力的解析计算[J].电工技术学报,2021,36(5):954-963.
- [15] 杨勇,孙彦,汪旭东,等.转子结构优化的内置 V 型永磁电机齿槽转矩研究[J].组合机床与自动化加工技术,2023(3):140-142.
- [16] 鲍玉志,程远雄,田京坤.车用高速永磁同步电机电磁结构多目标优化[J].机床与液压,2024,52(20):42-47.
- [17] 吴润秋,徐磊,朱孝勇,等.基于多变运行工况的漏磁可控型永磁电机变参数最大转矩电流比控制[J/OL].中国电机工程学报,1-13[2024-3-19].<https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.231845>. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.231845.
- [18] 巫远昆,马昌喜.基于多目标遗传算法的机场巴士发车时刻表优化[J].兰州交通大学学报,2022,41(4):35-41.
- [19] 赵璇,缪仲翠,毛元.分布式四驱电动汽车多目标优化转矩分配策略[J].兰州交通大学学报,2023,42(4):73-79.
- [20] 刘细平,伏结盛,杜隆鑫,等.电动汽车用双层永磁体 IPMSM 解析与优化设计[J].汽车工程,2021,43(8):1128-1135.
- [21] 杨磊,黄金霖.电动汽车用双层内置式永磁电机的设计与分析[J].西昌学院学报(自然科学版),2020,34(1):67-70.
- [22] 孙承旭,李琦,范涛,等.车用双层内嵌式永磁同步电机转矩脉动抑制方法[J].兵工学报,2021,42(10):2251-2259.
- [23] 张丽君,段刚,张凯斌.海洋垃圾回收船舶路径多目标优化[J].兰州交通大学学报,2024,43(2):41-50.
- [24] 柳海科,袁忠于,曹奔,等.基于 RBF 神经网络的永磁同步电机预测控制[J].兰州交通大学学报,2019,38(5):90-95.
- [25] 乔路宽,张炳义,李岩,等.基于改进粒子群优化算法的外转子永磁同步电机的多目标优化设计[J].电机与控制应用,2023,50(3):81-87.

(责任编辑:侯世中)