

基于非对称槽深的轴向磁通永磁电机 齿槽转矩抑制

李福荣^{1,2,3}, 林晓刚², 苏禁德^{2,3}, 林毅翕^{2,3}, 曾 铮², 解 伟^{2*}

(1. 福州大学 先进制造学院, 福建 泉州 362251;

2. 中国科学院福建物质结构研究所 泉州装备制造研究中心, 福建 泉州 362216;

3. 中国科学院大学 福建学院, 福建 福州 350108)

Cogging Torque Suppression of Axial Flux Permanent Magnet Motor based on Asymmetric Slot Depth

LI Furong^{1,2,3}, LIN Xiaogang², SU Jinde^{2,3}, LIN Yixi^{2,3}, ZENG Zheng², XIE Wei^{2*}

(1. School of Advanced Manufacturing, Fuzhou University, Quanzhou 362251, China;

2. Quanzhou Institute of Equipment Manufacturing, Fujian Institute of Research on the
Structure of Matter, Chinese Academy of Sciences, Quanzhou 362216, China;

3. Fujian College, University of Chinese Academy of Sciences, Fuzhou 350108, China)

Abstract: [Objective] To address the cogging torque suppression issue in axial flux permanent magnet synchronous motor (AFPMSM), this paper proposes an optimal design method based on an asymmetric slot depth structure, aiming to significantly suppress cogging torque and thus improve the operational stability and reliability of the motor. [Methods] Firstly, an analytical calculation model of cogging torque was established based on the energy method, and the general method for cogging torque suppression was theoretically derived. Then, taking a 20-pole 18-slot AFPMSM as the research object, a finite element simulation model was constructed, and a regulation method for the height dislocation difference of stator slot depth was proposed. By adjusting the height difference of adjacent stator teeth Δh , the variation laws of Δh on the harmonic distribution of air-gap magnetic flux density and cogging torque were systematically analyzed. Finally, the effectiveness and engineering feasibility of the proposed optimal design method were verified

through simulation. [Results] The simulation results showed that on the premise that the slot fill factor met the working condition requirements, compared with the conventional AFPMSM, the asymmetric slot depth structure achieved the optimal cogging torque suppression effect when $\Delta h=0.6$ mm, with a suppression rate of 79.18%. [Conclusion] This paper verifies the effectiveness and feasibility of the asymmetric slot depth structure for cogging torque suppression, reduces the torque ripple by means of this structure, and thus provides a technical approach and reference for the electromagnetic optimal design of AFPMSM.

Key words: axial flux permanent magnet synchronous motor; cogging torque; air-gap magnetic flux density; asymmetric slot depth

摘要: [目的] 针对轴向磁通永磁同步电机 (AFPMSM) 齿槽转矩抑制问题, 本文提出了一种基于非对称槽深结构的优化设计方法, 旨在显著抑制齿槽转矩, 从而提升电机运行稳定性与可靠性。[方法] 首先, 基于能量法构建齿槽转矩的解析计算模型, 理论推导齿槽转矩抑制的通用方法; 然后, 以一台 20 极 18 槽 AFPMSM 为研究对象构建有限元仿真模型, 提出定子齿槽深高度错位差调控方法, 通过调整相邻定子齿高差 Δh , 系统分析 Δh 对气隙磁密谐波分布与齿槽转矩的影响规律。最后, 通过仿真对所提优化设计方法的有效性与工程可行性进行验证。[结果] 仿真结果表明, 在槽满率满足工况要求的前提下,

基金项目: 国家自然科学基金 (52307072); 福建科技计划-STS 院省合作项目 (2023T3046, 2023T3015); 稀土新材料技术创新中心支持项目 (CXZX-D-202402-0013)

National Natural Science Foundation of China (52307072); Fujian Science and Technology Plan-STS Institute Provincial Cooperation Project (2023T3046, 2023T3015); Northern Rare Earth Advanced Materials Technology Innovation Co., Ltd. Project (CXZX-D-202402-0013)

与常规 AFPMSM 相比,当 $\Delta h = 0.6 \text{ mm}$ 时,非对称槽深结构对齿槽转矩的抑制效果最优,抑制率达 79.18%。【结论】本文验证了非对称槽深结构对抑制齿槽转矩的有效性和可行性,通过非对称槽深结构降低了转矩脉动,为 AFPMSM 的电磁优化设计提供了技术路径与参考。

关键词: 轴向磁通永磁同步电机;齿槽转矩;气隙磁密;非对称槽深

0 引言

机关节模组作为机器人、自动化装备的核心运动执行部件,对驱动电机的体积、动态响应速度及运行稳定性具有严苛的协同要求,轴向磁通永磁同步电机 (Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Motor, AFPMSM,) 因其高功率密度、高效率及紧凑结构,在机关节模组中展现出显著优势^[1-3]。

然而,AFPMSM 开槽定子与永磁体间相互作用产生的齿槽转矩会增加电机的转矩脉动和振动噪声,严重影响电机在精密控制场景下的稳态及动态性能表现^[4]。尤其在轻载或低速工况下,齿槽转矩导致的转速脉动和位置误差是制约系统控制精度与可靠性的关键瓶颈^[5]。因此,有效削弱齿槽转矩是机关节模组用高性能 AFPMSM 亟需突破的技术难点。

针对传统径向磁通结构,学者们提出了多种抑制方法,包括极槽配合优化^[6-8]、磁极偏移^[9-11]、定子齿形修正^[12-14]和转子磁导调制^[15-18]等。然而,对于结构紧凑、功率密度高的轴向磁通电机,其永磁体通常为表贴式或表面嵌入式,通过转子侧结构设计抑制齿槽转矩的手段可行性偏低^[19-20]。文献[21]通过改变相邻槽口宽度调整径向磁通电机气隙磁导谐波相位,该思路虽在轴向电机中同样成立,但在 AFPMSM 中因三维磁路耦合,槽口宽度变化会同时引入额外的轴向漏磁,削弱效果对三维结构参数更为敏感。文献[22]提出相邻齿宽不同的不等齿宽配合策略,基于解析磁导模型确定最优齿宽比以重构磁导谐波,从而显著削弱齿槽转矩。除槽口宽度外,部分学者开始探索非对称定子结构的抑制潜力。文献[23]研究表明定子辅助槽口高度会影响反电动势正弦度、气隙磁密以及电磁力波各谐波含量,从而抑制齿槽转矩。文献[24]提出不等定子齿靴

宽度结构,通过调整相邻齿靴的扩张比例使上下侧齿槽转矩相互抵消,当扩张宽度比取 1.2 时齿槽转矩降低 71%。尽管非对称结构已展现出一定潜力,但现有研究多集中于辅助槽非对称、定子偏转等方案,对定子槽口高度非对称优化的系统研究仍较为缺乏。

基于此,本文以一台 20 极 18 槽 AFPMSM 为研究对象,提出一种基于非对称槽深的齿槽转矩抑制方法。首先,基于能量法建立计及不等齿高的非对称槽深齿槽转矩解析模型;然后,通过推导出理论上消除齿槽转矩的槽深错位方法,并通过有限元法进行验证分析,确定本设计电机的最优相邻定子齿高差;最后,对比分析优化前后三维有限元模型的空载及负载性能,验证所提非对称槽深方法的有效性与工程可行性。

1 AFPMSM 拓扑结构

AFPMSM 气隙为平面型,轴向长度短,整体呈薄盘状。与传统径向电机转子在内、定子在外同心嵌套结构不同,其定子与转子均为盘式,转子位于定子侧面而非内部,结构更为扁平,能够灵活适配有限的安装空间。AFPMSM 拓扑结构如图 1 所示。

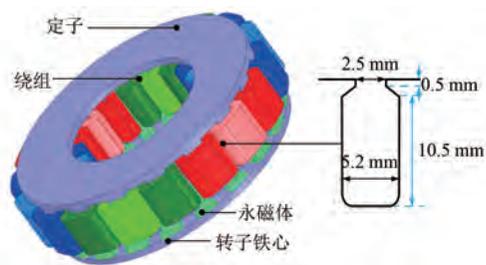


图 1 AFPMSM 拓扑结构

Fig. 1 AFPMSM topology

本文以一台 20 极 18 槽单定子单转子 AFPMSM 为研究对象,其主要参数如表 1 所示。

表 1 AFPMSM 主要参数

Tab. 1 Key parameters of AFPMSM

参数名称	参数值
额定功率/kW	0.15
定子外径/mm	55
定子内径/mm	30
气隙长度/mm	1
永磁体厚度/mm	1
电机厚度/mm	16.5
额定转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	5 000

2 非对称槽深电机齿槽转矩解析计算

电机结构简图如图 2 所示。齿槽转矩是由于永磁电机磁阻变化产生的,在电机转子旋转过程中,定子开槽引起气隙中磁共能发生变化,从而使永磁电机产生齿槽转矩^[25-26]。

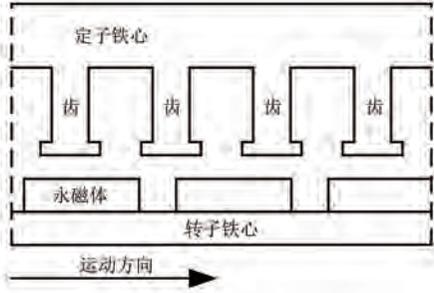


图 2 电机结构简图

Fig. 2 Schematic diagram of motor structure

2.1 齿槽转矩解析计算

为便于分析,本文做如下假设:(1)定转子铁心磁导率无穷大,磁场仅分布于气隙与永磁体;(2)永磁体回复磁导率 $\mu_r \approx \mu_0$, μ_0 为空气磁导率;(3)忽略漏磁,气隙磁密仅由永磁体剩磁与气隙磁导共同决定。

根据能量法,齿槽转矩 T_{cog} 本质为气隙磁共能 W_{gap} 对转子位置角 α 的偏导(负号表示转矩方向与磁共能增加方向相反), T_{cog} 表达式为

$$T_{\text{cog}} = - \frac{\partial W_{\text{gap}}}{\partial \alpha} \quad (1)$$

式中: α 为定子侧中心线和转子侧中心线之间的夹角。

W_{gap} 的计算需结合气隙磁密分布 $B_g(\theta, \alpha)$,其表达式为

$$W_{\text{gap}} = \frac{1}{2\mu_0} \int_{V_{\text{gap}}} B_g^2(\theta, \alpha) dV \quad (2)$$

式中: V_{gap} 为气隙体积。

在任意相对位置 α ,气隙磁密沿电枢表面的分布可表示为

$$B_g(\theta, \alpha) = B_r(\theta) \frac{h_m}{h_m + g(\theta, \alpha)} \quad (3)$$

式中: $B_r(\theta)$ 为永磁体剩磁密度; h_m 为永磁体充磁方向; $g(\theta, \alpha)$ 为有限气隙长度沿圆周方向的分布。

将式(3)代入式(2),并对气隙体积积分,可得:

$$W_{\text{gap}} = \frac{1}{2\mu_0} \int_{V_{\text{gap}}} B_r^2(\theta) \lambda^2(\theta, \alpha) dV \quad (4)$$

$$\lambda(\theta, \alpha) = \frac{h_m}{h_m + g(\theta, \alpha)} \quad (5)$$

若能得到 $B_r^2(\theta)$ 和 $\lambda(\theta, \alpha)$ 的具体数学表达式,就可以得到 W_{gap} ,进而得到 T_{cog} 。

2.2 $B_r^2(\theta)$ 的傅里叶分解

$B_r(\theta)$ 沿圆周的分布如图 3 所示。据此得到 $B_r^2(\theta)$ 的傅里叶分解为

$$B_r^2(\theta) = B_{r0} + \sum_{n=1}^{\infty} B_{rn} \cos(2np\theta) \quad (6)$$

$$\begin{cases} B_{r0} = \alpha_p B_r^2 \\ B_{rn} = \frac{2}{n\pi} B_r^2 \sin(n\alpha_p \pi) \end{cases} \quad (7)$$

式中: p 为极对数; α_p 为磁极的极弧系数。

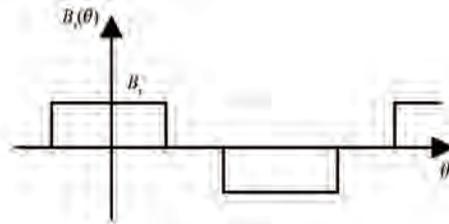


图 3 $B_r(\theta)$ 沿圆周的分布

Fig. 3 Distribution of $B_r(\theta)$ along the circumference

2.3 定子齿高错位下气隙磁导的解析函数

本文采用相邻定子齿高错位的方法来削弱齿槽转矩的影响,定子槽示意图如图 4 所示。

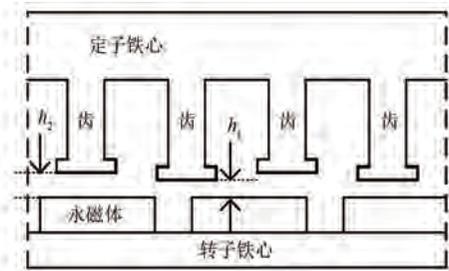


图 4 定子槽示意图

Fig. 4 Schematic diagram of stator slot

为简化定子槽,近似认为磁力线只通过齿部,而不通过槽部。因此,位于齿部时, $g(\theta) = g$;位于槽部时, $g(\theta) = \infty$,得到简化后模型如图 5 所示。图中, Q 为定子槽数; τ 为定子齿宽; Δh 为相邻定子齿高差。

定义齿高的中间值为基准齿高 h_0 ,则齿高函数表达式为

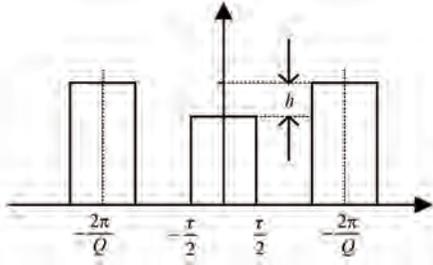


图5 定子槽简化模型

Fig. 5 Simplified model of stator slot

$$h(\theta) = h_0 + \frac{\Delta h}{2} \text{sgn} \left[\cos \left(\frac{Q\theta}{2} \right) \right] \quad (8)$$

将齿高变化映射到等效气隙长度 g_{eff} , 可得:

$$g_{\text{eff}}(\theta) = g + h(\theta) = g_0 + \text{sgn} \left[\cos \left(\frac{Q\theta}{2} \right) \right] \quad (9)$$

式中: g 为原始气隙长度; g_0 为等效气隙基准值。

气隙磁导可写为

$$\lambda(\theta) = \frac{\mu_0}{g_{\text{eff}}(\theta)} \quad (10)$$

在 $\Delta h \ll g_0$ 条件下, 对式(10)进行傅里叶展开, 可得:

$$\lambda(\theta) \approx \frac{\mu_0}{g_0} \left\{ 1 - \frac{\Delta h}{2g_0} \text{sgn} \left[\cos \left(\frac{Q\theta}{2} \right) \right] \right\} \quad (11)$$

将 sgn 函数展开为傅里叶级数并代入式(11), 得到含 Δh 的气隙磁导表达式为

$$\lambda(\theta) = \frac{\mu_0}{g_0} - \frac{2\mu_0\Delta h}{\pi g_0^2} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{2k+1} \cos \left[(2k+1) \frac{Q\theta}{2} \right] \quad (12)$$

由式(12)可直接读出气隙磁导谐波幅值:

$$\lambda_n = \begin{cases} -\frac{2\mu_0\Delta h}{\pi g_0^2} \frac{(-1)^k}{2k+1}, & n = (2k+1) \frac{Q}{2}, k = 0, 1, 2, \dots \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (13)$$

对于本文的20极18槽电机, 主要耦合谐波阶次为 $n = Q/2 = 9$ ($k=0$), 将 $n=9$ 代入式(13), 得到:

$$\lambda_9(\Delta h) = -\frac{2\mu_0\Delta h}{\pi g_0^2} \quad (14)$$

3 基于非对称槽深的齿槽转矩抑制方法

式(14)即为 Δh 与气隙磁导9次谐波之间的

线性关系, 将式(2)、式(14)代入式(1)完成定量优化设计, 如式(15)所示:

$$T_{\text{cog},9}(\alpha) = \frac{\pi L}{4\mu_0} (R_o^2 - R_i^2) \cdot 9\lambda_9(\Delta h) B_{r,9} \sin(9\alpha) \quad (15)$$

式中: L 为电机轴向有效长度; R_i 为定子轭内径; R_o 为电机外径。

将式(14)代入式(15)可得齿槽转矩幅值为

$$T_{\text{cog},9}^{\text{amp}}(\Delta h) = -\frac{9LB_{r,9}}{2g_0^2} (R_o^2 - R_i^2) \Delta h \quad (16)$$

由此可以得出: (1) 齿槽转矩高次谐波中9次谐波幅值最大, 其谐波幅值与 Δh 成严格线性关系, 负号表示相位反转, 可用于相消设计; (2) 令9次谐波幅值大小相等, 符号相反, 即可求得理论上的完全抵消值, 得到最优 Δh 解析式; (3) Δh 选取过小, 削弱幅度可能不够, Δh 选取过大, 可能造成反向增加9次谐波转矩, 因此需合理选择 Δh 。

4 仿真分析

由RMxpert导出的AFPMSM三维模型采用默认剖分, 由于默认剖分网格过于稀疏, 会影响电磁场仿真精度。为提高仿真精度, 对AFPMSM模型进行手动剖分, 对定子不等齿高及运动域部分网格做加密处理, 控制自由度规模, 剖分结果如图6所示。

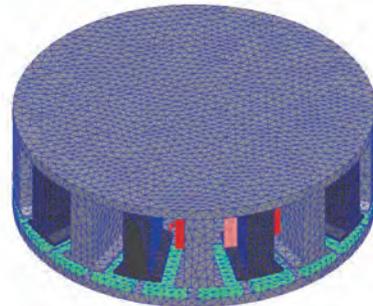


图6 电机网格剖分结果

Fig. 6 Meshing result of the motor

通过调整定子齿高可以达到抑制齿槽转矩的目的, 但定子齿部的不等高设计也会对电机空载和负载特性产生一定影响。本章以 Δh 作为分析变量, 结合空载及负载特性, 通过有限元法确定 Δh 的合理设计数值。

4.1 槽深设计分析

不同 Δh 下的齿槽转矩波形和齿槽转矩幅值

分别如图 7、图 8 所示。

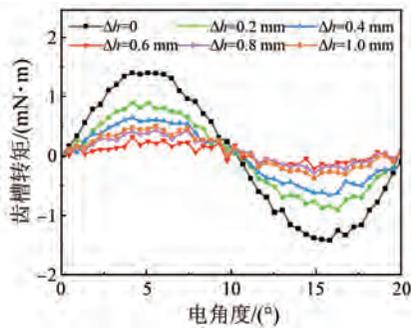


图 7 不同 Δh 下的齿槽转矩波形

Fig. 7 Cogging torque waveforms with different Δh

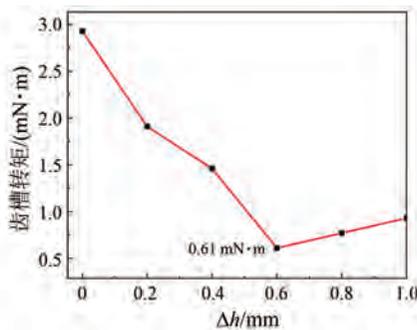


图 8 不同 Δh 下的齿槽转矩幅值

Fig. 8 Cogging torque amplitudes with different Δh

由图 8 可知,随着 Δh 的增加,齿槽转矩幅值先减小后增大,在 $\Delta h = 0.6 \text{ mm}$ 时达到最低,为 $0.61 \text{ mN}\cdot\text{m}$,相比等齿高 ($\Delta h = 0$) 时的 $2.93 \text{ mN}\cdot\text{m}$ 降低了 79.18%。

不同 Δh 下的槽型结构如图 9 所示。从工艺的角度分析,在绕组参数不变的情况下, $\Delta h = 0.6 \text{ mm}$ 时单侧槽满率为 80%,已经达到了单侧槽满率的最大限度。若 Δh 再增大,单侧槽面积易导致绝缘层破损,增加短路风险,同时会增大绕制工艺难度,降低生产效率。因此, $\Delta h = 0.6 \text{ mm}$ 可视最佳设计值。

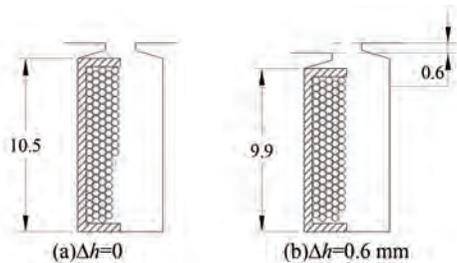


图 9 不同 Δh 下的槽型结构

Fig. 9 Slot structure with different Δh

$\Delta h = 0$ 和 0.6 mm 时的齿槽转矩谐波含量对比如图 10 所示。由图 10 可知,采用非对称槽深拓扑后,齿槽转矩频谱中的基波含量与 9 次谐波含量均得到抑制,两者的幅值分别由 $1.39 \text{ mN}\cdot\text{m}$ 与 $0.24 \text{ mN}\cdot\text{m}$ 降至 $0.19 \text{ mN}\cdot\text{m}$ 与 $0.07 \text{ mN}\cdot\text{m}$,对应抑制幅度 86.33% 与 70.83%,其余高阶谐波亦得到一定程度的削弱。该结果与理论解析模型所得结论一致,通过有限元分析进一步验证了所提方法能有效抑制特定阶次谐波和齿槽转矩。

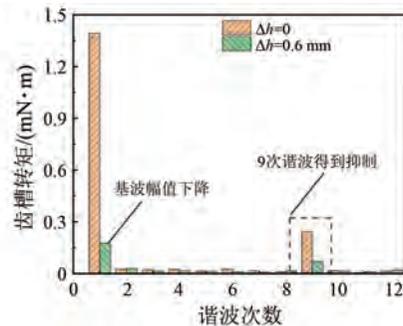


图 10 齿槽转矩谐波含量对比

Fig. 10 Cogging torque harmonic content comparison

4.2 电机空载性能分析

定子铁心磁密是电机设计过程中的一个重要参数。若磁密过高,定子铁耗增加,电机发热严重;若为降低磁密而增加定子铁心厚度,则电机重量增加,转矩密度降低。因此需合理设计定子铁心磁密。

优化后 AFPMSM 定子铁心磁密分布云图如图 11 所示。由于定子齿部在气隙部位发生漏磁现象,因此齿部磁密较大,齿部磁密最大值为 1.8 T ,轭部磁密最大值为 1.3 T ,可见定子齿部存在一定程度的磁场饱和,定子轭部未达到饱和,验证了电机设计的合理性。

优化前后气隙磁密对比如图 12 所示。由图 12 可知,优化前后气隙磁密曲线相似, $\Delta h = 0$ 时,气隙磁密幅值为 0.56 T ; $\Delta h = 0.6 \text{ mm}$ 时,气隙磁密为 0.51 T ,相差 8.93%。优化方案的气隙磁密虽有所下降,但其波形正弦度显著提升,这是因为优化方案有效抑制了气隙磁密中的高次谐波。

空载反电动势直接影响电机性能,优化后空载三相反电动势如图 13 所示。可以看出,优化后电机三相反电动势对称,接近理想正弦波,证明了电机定子槽型设计的合理性。

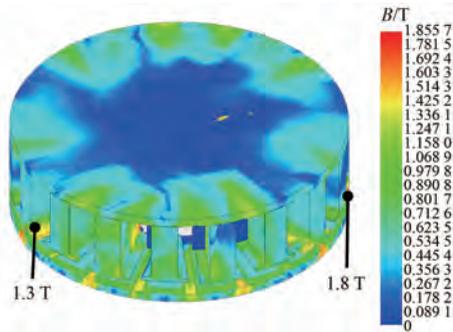
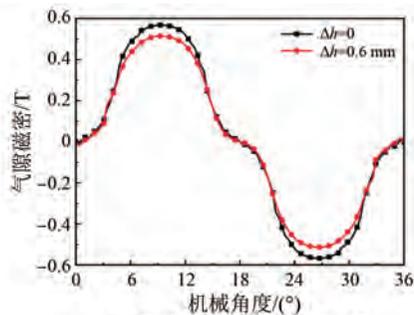
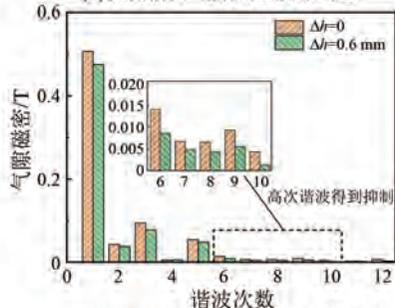


图 11 AFPMSM 定子铁心磁密分布云图

Fig. 11 Magnetic flux density distribution cloud map of AFPMSM stator core



(a)优化前后气隙磁密波形对比



(b)优化前后气隙磁密谐波幅值对比

图 12 优化前后气隙磁密对比

Fig. 12 Comparison of air-gap magnetic flux density before and after optimization

4.3 电机负载性能分析

电机定子齿产生错位差后,电机气隙磁密主磁通量降低,从而减小输出转矩,且会影响电机损耗和效率。优化前后电机输出转矩对比如图 14 所示,电机损耗和效率对比如表 2 所示。

表 2 优化前后电机损耗和效率对比

Tab. 2 Comparison of motor losses and efficiency before and after optimization

参数名称	$\Delta h=0$	$\Delta h=0.6 \text{ mm}$
铜耗/W	9.5	11.1
铁耗/W	5.0	3.7
效率/%	91.40	90.25

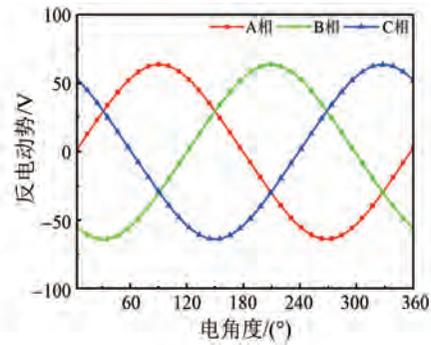


图 13 优化后的空载三相反电动势

Fig. 13 No-load three-phase back electromotive force after optimization

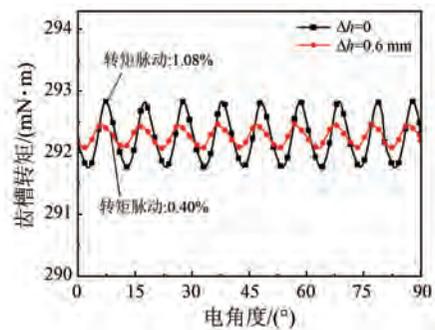


图 14 优化前后输出转矩对比

Fig. 14 Comparison of output torque before and after optimization

由图 14 可知,在保证优化前后输出功率一致的情况下,增大电流激励,定子齿高错位改善了电机的转矩脉动,转矩脉动从 1.08% 降至 0.40%,更符合电机高性能驱动的应用场合。

由表 2 可知,由于铜耗与电流相关,所以增大电流激励使得铜耗从 9.5 W 增至 11.1 W,增大了 27%。由于非对称结构会降低铁心材料中因磁密交变频率过高产生的涡流损耗和磁滞损耗,从而铁耗降低^[27],从 5.0 W 降至 3.7 W,降低了 26%。电机效率从 91.40% 降至 90.25%,降低了 1.15%。因此在保持输出功率不变的情况下使用非对称槽深结构对电机效率的影响可忽略不计。

5 结语

本文针对 AFPMSM 齿槽转矩抑制问题,提出了一种非对称槽深结构,并建立解析模型进行有限元验证,主要结论如下。

(1) 基于能量法与傅里叶分解构建的齿槽转矩解析模型表明,非对称槽深可通过调整定子结

构,改变气隙磁导分布,削弱与永磁磁场谐波的耦合作用,从而降低齿槽转矩幅值。

(2)仿真结果表明,当 $\Delta h = 0.6$ mm 时,非对称槽深结构对电机齿槽转矩的抑制效果最好,抑制率为 79.18%。使用非对称槽深结构提高了气隙磁密的正弦度,降低了转矩脉动,为 AFPMSM 的设计与优化提供了参考。

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

李福荣进行了方案设计、内容总结与论文撰写,李福荣、苏禁德和林毅翕进行了仿真,林晓刚、解伟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 conducted by Li Furong. The simulation was conducted by Li Furong, Su Jinde, and Lin Yixi. The manuscript was reviewed and revised by Lin Xiaogang and Xie Wei. All authors have read and approved the final version of the manuscript for submission.

参考文献

- [1] 黄允凯,周涛,董剑宁,等. 轴向永磁电机及其研究发展综述[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(1): 192-205.
Huang Y K, Zhou T, Dong J N, et al. An overview on developments and researches of axial flux permanent magnet machines [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(1): 192-205.
- [2] 李涛,梁玉秀,杨业,等. 轴向磁通开关磁阻电机研究进展综述[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(2): 115-135.
Li T, Liang Y X, Yang Y, et al. Review of research progress on axial flux switched reluctance motors [J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(2): 115-135.
- [3] 张嘉伟,刘建勇,马丽梅,等. 四足机器人电驱关节用轴向磁通永磁电机设计[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(3): 1069-1075.
Zhang J W, Liu J Y, Ma L M, et al. Design of axial flux permanent magnet motor for quadruped robot electric drive joint [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(3): 1069-1075.
- [4] 冯魏,郭凯凯. 低转矩脉动永磁辅助同步磁阻电机转子结构优化设计[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(9): 70-79.
Feng W, Guo K K. Optimized rotor design for permanent magnet assisted synchronous reluctance motor with low torque ripple [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(9): 70-79.
- [5] 宋成龙,陆艳君,安辉,等. 轴向分段式双爪极永磁电机设计与分析[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(6): 107-116.
Song C L, Lu Y J, An H, et al. Design and analysis of axially segmented double claw pole permanent magnet motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(6): 107-116.
- [6] 刘卫星,常端. 基于极槽配合选取对内置式永磁电机齿槽转矩削弱研究[J]. 防爆电机, 2025, 60(4): 1-4.
Liu W X, Chang D. Research on cogging torque reduction of built-in permanent magnet motor based on selection of pole-slot matching [J]. Explosion-Proof Electric Machine, 2025, 60(4): 1-4.
- [7] 孙文龙,雷家帅,包智勇. 极槽配合对表贴式交流永磁同步电机齿槽转矩的影响分析[J]. 内燃机与配件, 2024(6): 16-18.
Sun W L, Lei J S, Bao Z Y. Analysis of groove slot of AC permanent magnet synchronous motor [J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2024(6): 16-18.
- [8] 王金平,刘林波,周晓燕. 基于解析法的直驱型永磁风力发电机的设计[J]. 电机与控制应用, 2014, 41(12): 35-38+42.
Wang J P, Liu L B, Zhou X Y. Design of direct-drive permanent magnet machine for wind generator based on analytical method [J]. Electric Machines & Control Application, 2014, 41(12): 35-38+42.
- [9] 刘世强,张学义,朱辉,等. 磁极偏移的内置永磁同步电机优化分析[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2025, 39(4): 91-98.
Liu S Q, Zhang X Y, Zhu H, et al. Optimization analysis of a built-in PMSM with pole shift [J]. Journal of Chongqing University of Technology

- (Natural Science), 2025, 39(4): 91-98.
- [10] 高锋阳, 李晓峰, 齐晓东, 等. 非对称V型磁极偏移内置式永磁同步电机转矩脉动分析[J]. 电机与控制学报, 2021, 25(9): 112-120.
Gao F Y, Li X F, Qi X D, et al. Analysis of torque ripple of the interior permanent magnet synchronous motor with asymmetric V-pole offset [J]. Electric Machines and Control, 2021, 25(9): 112-120.
- [11] 王艾萌, 马德军, 舒思婉. 基于磁极偏移的新型永磁同步电机性能研究[J]. 电机与控制应用, 2014, 41(11): 33-36+40.
Wang A M, Ma D J, Shu S W. Performance research on pole shifted permanent magnet synchronous motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2014, 41(11): 33-36+40.
- [12] 李节宝, 章跃进. 永磁无刷电机转矩脉动分析及削弱方法[J]. 电机与控制应用, 2011, 38(4): 6-12+36.
Li J B, Zhang Y J. Analysis and reducing techniques review of torque ripple for permanent magnet brushless motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2011, 38(4): 6-12+36.
- [13] 王艾萌, 李姗姗, 李大双. 不同定子模块化结构对分数槽永磁电机性能的影响[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(2): 54-59+66.
Wang A M, Li S S, Li D S. Influence of different stator modular structures on performance of fractional slot permanent magnet motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2022, 49(2): 54-59+66.
- [14] 路文开, 张卫, 赵先锋. 装配间隙对定子模块化永磁电机齿槽转矩的影响[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2019(3): 143-145+148.
Lu W K, Zhang W, Zhao X F. Analysis of cogging torque in permanent magnet machines with modular stators [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2019(3): 143-145+148.
- [15] 姚叔春. 辅助发电单元双凸极混合励磁发电机关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
Yao S C. Research on the key techniques of doubly salient hybrid excitation generator for auxiliary power unit [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.
- [16] 吴兆鹏. 非等宽磁导调制磁场调制永磁电机转矩特性研究与优化设计[D]. 镇江: 江苏大学, 2023.
Wu Z P. Research and optimization design of flux modulated permanent magnet motor with unequal width permeability modulation on torque performances [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2023.
- [17] Li J, Chau K T. Design and analysis of a HTS vernier PM machine [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2010, 20(3): 1055-1059.
- [18] Xu L, Liu G H, Zhao W X, et al. Quantitative comparison of integral and fractional slot permanent magnet vernier motors [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2015, 30(4): 1483-1495.
- [19] 汪波, 赵文俊, 戴尚建, 等. 考虑磁导空间衰减特性的永磁游标电机转矩建模与分析[J/OL]. 中国电机工程学报, 2025-11-15. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.250638>.
Wang B, Zhao W J, Dai S J, et al. Torque modeling and analysis of permanent magnet vernier motor based on the spatial attenuation characteristics of permeance [J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2025-11-15. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.250638>.
- [20] 赵纪龙, 逯卓林, 韩青峰, 等. 轴向磁通永磁电机系统及关键技术前沿发展综述[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(7): 2744-2765.
Zhao J L, Lu Z L, Han Q F, et al. An overview on development of axial flux permanent magnet motor system and the key technology [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(7): 2744-2765.
- [21] 杨玉波, 王秀和, 陈谢杰, 等. 基于不等槽口宽配合的永磁电动机齿槽转矩削弱方法[J]. 电工技术学报, 2005, 20(3): 40-44.
Yang Y B, Wang X H, Chen X J, et al. A method for reducing cogging torque by different slot widths in permanent magnet motors [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(3): 40-44.
- [22] 石松宁, 王大志, 张瑞红, 等. 不等齿宽削弱永磁驱动器齿槽转矩的研究[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(6): 235-240.
Shi S N, Wang D Z, Zhang R H, et al. Research on the nonuniformly distributed teeth for reducing the cogging torque of permanent magnet drive [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(6): 235-240.
- [23] 张发. 轴向永磁电机电磁特性与振动噪声研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2022.
Zhang F. Research on electromagnetic characteristics and vibration noise of axial permanent magnet motor

- [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022.
- [24] 岳明强, 刘城, 王晓光. 定子结构优化对盘式电机齿槽转矩的影响分析[J]. 制造技术与机床, 2024(4): 13-18.
- Yue M Q, Liu C, Wang X G. Research on cogging torque of disk motor based on stator structure optimization [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2024(4): 13-18.
- [25] 龚鹏成. 电磁主动悬架用轴向磁通永磁电机电磁设计与转矩波动抑制[D]. 重庆: 重庆大学, 2021.
- Gong P C. Electromagnetic design and torque fluctuation suppression of axial flux permanent magnet motor for electromagnetic active suspension [D]. Chongqing: Chongqing University, 2021.
- [26] 刘婷. 表贴式永磁同步电机齿槽转矩削弱方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
- Liu T. The study for reducing cogging torque in surface mounted permanent magnet synchronous machine [D]. Changsha: Hu'nan University, 2013.
- [27] 田文立. 涡流盘开槽的双层非对称盘式永磁涡流联轴器的转矩特性分析[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2022.
- Tian W L. Analysis of torque characteristics of double-layer asymmetric disc permanent magnet eddy current coupling with slotted eddy current plate [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2022.

收稿日期:2025-11-25

收到修改稿日期:2025-12-22

作者简介:

李福荣(1999—),女,硕士研究生,研究方向为电机本体设计,2392210024@qq.com;

* 通信作者:解伟(1982—),男,博士,研究员,研究方向为电动汽车主驱系统、工业伺服系统等,wei.xie@fjirsm.ac.com。