

带式输送机用永磁电机齿槽转矩优化分析

李根¹, 张程^{2,3}, 李明¹, 赵立新^{2,3}, 郭敬¹, 郑立允^{3*}

¹河北新四达电机股份有限公司, 河北 石家庄

²河北工程大学机械与装备工程学院, 河北 邯郸

³河北省稀土永磁材料与应用工程研究中心, 河北 邯郸

收稿日期: 2025年11月3日; 录用日期: 2025年12月3日; 发布日期: 2025年12月11日

摘要

齿槽转矩会对电机产生噪声、振动等影响, 降低电机控制精度。为了保障带式输送机系统整体运行的安全性和平稳性, 本文以11 kW表贴式带式输送机用永磁直驱电机作为研究对象, 基于能量法分析了齿槽转矩的产生机理, 研究了磁体极弧系数、不等厚磁体以及磁体直极偏移对齿槽转矩的影响, 通过多目标优化得出最优设计方案, 并对优化后样机的反电动势波形及谐波含量进行分析。结果发现, 齿槽转矩随极弧系数呈周期性变化; 合理选择不等厚磁体的偏心距可以降低气隙磁密高次谐波分量, 改善气隙磁密波形, 从而有效地削弱齿槽转矩; 磁体直极偏移对降低齿槽转矩影响很大, 齿槽转矩随分段数的变化受齿槽转矩波形影响, 当磁体分2段时, 齿槽转矩得到了明显的削弱; 通过样机试验得出磁极参数优化能有效降低反电动势谐波含量, 降低齿槽转矩, 优化电机综合工作性能。

关键词

永磁同步电机, 齿槽转矩, 极弧系数, 不等厚, 直极偏移

Optimization Analysis of Cogging Torque of Permanent Magnet Motor for Belt Conveyor

Gen Li¹, Cheng Zhang^{2,3}, Ming Li¹, Lixin Zhao^{2,3}, Jing Guo¹, Liyun Zheng^{3*}

¹Hebei Xinsida Motor Co. Ltd., Shijiazhuang Hebei

²School of Mechanical and Equipment Engineering, Hebei University of Engineering, Handan Hebei

³Rare Earth Permanent Magnetic Materials and Application Hebei Engineering Research Center, Handan Hebei

Received: November 3, 2025; accepted: December 3, 2025; published: December 11, 2025

*通讯作者。

文章引用: 李根, 张程, 李明, 赵立新, 郭敬, 郑立允. 带式输送机用永磁电机齿槽转矩优化分析[J]. 电气工程, 2025, 13(4): 81-90. DOI: 10.12677/jee.2025.134009

Abstract

Cogging torque will affect the noise and vibration of the motor and reduce the control accuracy of the motor. In order to ensure the safety and stability of the overall operation of the belt conveyor system, this work takes the permanent magnet direct-drive motor for 11 kW surface-mounted belt conveyor as research object. The generation mechanism of the cogging torque has been analyzed using energy method. The influences of the pole arc coefficient, unequal thickness and straight pole offset of the magnets on the cogging torque have been investigated. The optimal design scheme is obtained through multi-objective optimization. The back electromotive force (EMF) waveform and harmonic content of the optimized prototype have been explored. The results show that the cogging torque varies periodically with the pole arc coefficient. Properly selecting the eccentricity of the unequal-thickness magnet can reduce the higher-order harmonic components of air-gap flux density, improve the waveform of air-gap flux density, and effectively weaken the cogging torque. The straight pole offset of the magnet has a significant impact on reducing cogging torque. The variation of cogging torque with the number of segments is influenced by the waveform of cogging torque. When the magnet is divided into two segments, the cogging torque is significantly reduced. Prototype tests have shown that optimizing the magnetic pole parameters can effectively reduce the harmonic content of the back EMF, reduce cogging torque, and optimize the working performance of the motor.

Keywords

Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM), Cogging Torque, Polar Arc Coefficient, Unequal Thickness, Straight Pole Offset

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

带式输送机是煤矿行业中最主要的运输系统，随着“碳达峰、碳中和”行动方案的提出，工业驱动系统不断朝着高效节能的方向发展，低速大转矩永磁直驱电机的出现大大简化了带式输送机传统的驱动系统，能够实现低速直启和无极调速，大幅提高系统效率，降低系统能耗。但由于永磁直驱电机所固有结构引起的齿槽转矩，会引起电机产生噪声、振动，降低控制器对电机的控制精度，进而影响整个带式输送系统运行的安全性和稳定性。因此有必要对影响齿槽转矩的因素进行研究分析。

国内外学者在一些削弱齿槽转矩的方法上进行研究分析。洪涛等[1]采用磁极削极结构和组合磁极来改变磁体剩磁在气隙中分布情况，进而降低齿槽转矩。唐旭等[2]推导出改变定子齿宽、定子槽口宽配合时的齿槽转矩解析式，并利用有限元分析证明了该措施能够有效削弱齿槽转矩。郝雪弟[3]分析了不同极槽配合下的齿槽转矩，得出齿槽转矩幅值随周期数增大而减小，分数槽电机齿槽转矩要小于整数槽的结论。文献[4]通过磁体分段和定子齿开槽的方法降低齿槽转矩，并将解析法结果与有限元结果进行对比，验证了表贴式解析模型的有效性，并可推广于其它结构的永磁电机。Shah 等[5]建立了一种正弦永磁磁极形状的电机模型，使磁通分布呈正弦，产生正弦反电动势，从而消除大部分齿槽转矩。

本文基于齿槽转矩特性与磁极参数的关系，研究分析表贴式 PMSM 齿槽转矩的作用机理，以表 1 所示带式输送机用永磁直驱电机参数建立有限元模型，研究磁体极弧系数、不等厚磁体和磁体直极偏移等

对齿槽转矩的影响。

Table 1. Parameters of permanent magnet motor
表 1. 永磁电机参数

参数	数值
额定功率(kW)	11
额定电压(V)	380
额定转速(r·min ⁻¹)	40.2
磁体厚度(mm)	6
定子外径(mm)	740
定子内径(mm)	590
转子外径(mm)	587
连接方式	Y
绕组方式	双层绕组
气隙长度(mm)	1.5
铁心长度(mm)	240
定子槽数	48
极数	40
磁体厚度(mm)	6

2. 齿槽转矩解析模型

齿槽转矩指永磁同步电机在未接通电源时，克服磁体与定子齿槽相互作用产生的转矩[6]。定义为：

$$T_{cog} = -\frac{\partial W}{\partial \alpha} \quad (1)$$

式中 W 为磁场能量， α 为永磁体与电枢相对位置。

电机磁场能量近似为气隙能量和永磁体能量的总值。即：

$$W \approx W_{airgap+PM} = \frac{1}{2\mu_0} \int B^2 dV \quad (2)$$

气隙磁密的分布可以近似表示为：

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

式中 α 和 θ 如图 1 所示为永磁体与电枢相对位置角， B_r 为磁体剩磁， h_m 为磁体充磁长度， δ 为有效气隙长度。

综合上述公式，分别对 $[B_r(\theta)]^2$ 和 $[h_m(\theta)/(h_m(\theta) + \delta(\theta, \alpha))]^2$ 进行傅里叶展开，可以得到永磁电机的齿槽转矩解析式[7]：

$$T_{cog}(\alpha) = \frac{\pi z L_a}{4\mu_0} (R_2^2 - R_1^2) \sum_{n=1}^{\infty} n G_n B_m \sin nz\alpha \quad (4)$$

式中 z 为定子槽数， L_a 为铁芯长度， R_1 和 R_2 分别为电枢外径和定子内径， m 为使 $nz/2p$ 为整数的任意整

数值。

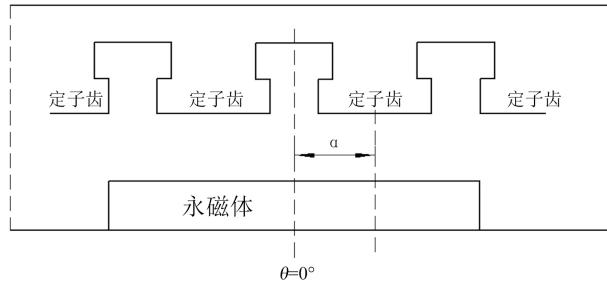


Figure 1. Schematic diagram of the relative position between the permanent magnet and the armature
图 1. 永磁体与电枢相对位置示意图

3. 齿槽转矩的影响因素分析

通过对齿槽转矩的分析，可以发现影响齿槽转矩的因素主要有磁极参数 B_m ，电枢参数 G_n 以及极槽配合[8]。本文主要从改变磁极参数入手，通过改变磁体极弧系数、采用不等厚磁体以及磁体直极偏移等方法对齿槽转矩进行优化分析。

3.1. 磁体极弧系数对齿槽转矩的影响

由齿槽转矩的解析式可以看出， B_m 即 $[B_r(\theta)]^2$ 的 $nz/2p$ 次傅里叶分解系数对齿槽转矩有很大影响。若极槽配合确定，可以通过选取合理的极弧系数，使其对应 B_m 较小的傅里叶分解系数，达到削弱齿槽转矩的作用[9]。本文研究对象为 40 极 48 槽电机，齿槽转矩与 B_{6k} ($k = 1, 2, 3, \dots, m$) 有关。图 2 为 B_m 和齿槽转矩随极弧系数的变化曲线，可以看出当 B_6 较小的极弧系数对应的 B_{12} ， B_{18} 和 B_{24} 都较小。当 B_m 为 0 时所对应的齿槽转矩较最大值明显减少，但并未取得齿槽转矩最小值。齿槽转矩随极弧系数近似呈周期性变化， $\alpha_p = 0.70$ 和 0.86 时齿槽转矩最小为 $24.13 \text{ N}\cdot\text{m}$ 和 $23.91 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。

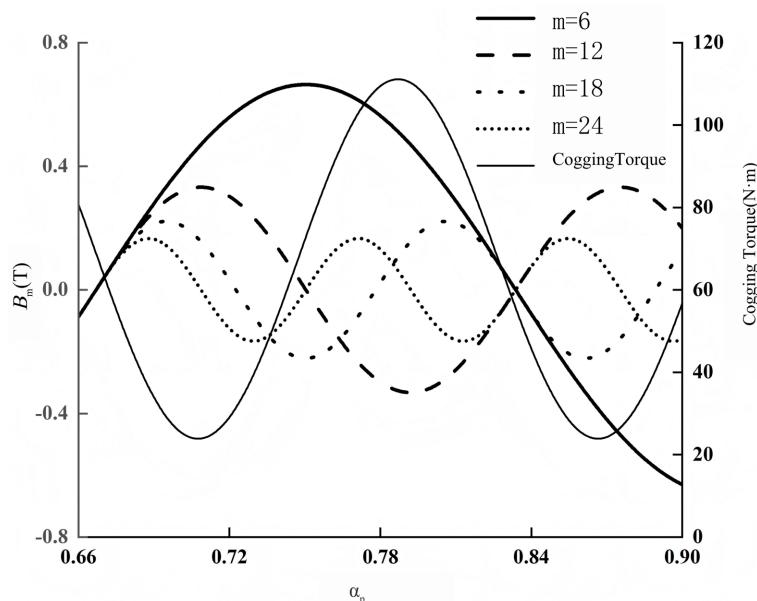


Figure 2. The variation curve of B_m and cogging torque with pole pitch coefficient α_p
图 2. B_m 和齿槽转矩随极弧系数的变化曲线

3.2. 不等厚磁体对齿槽转矩的影响

气隙磁密的高次谐波会对齿槽转矩产生影响,通过对磁体进行偏心处理可以削弱气隙磁密的高次谐波从而达到优化齿槽转矩的效果[10]。图3(a)所示为不等厚磁体结构,偏心距发生变化时,电机的气隙长度随转子转动而发生变化,影响径向气隙磁密的分布情况。本文选择偏心距分别为220 mm、240 mm和260 mm的不等厚磁体进行分析。

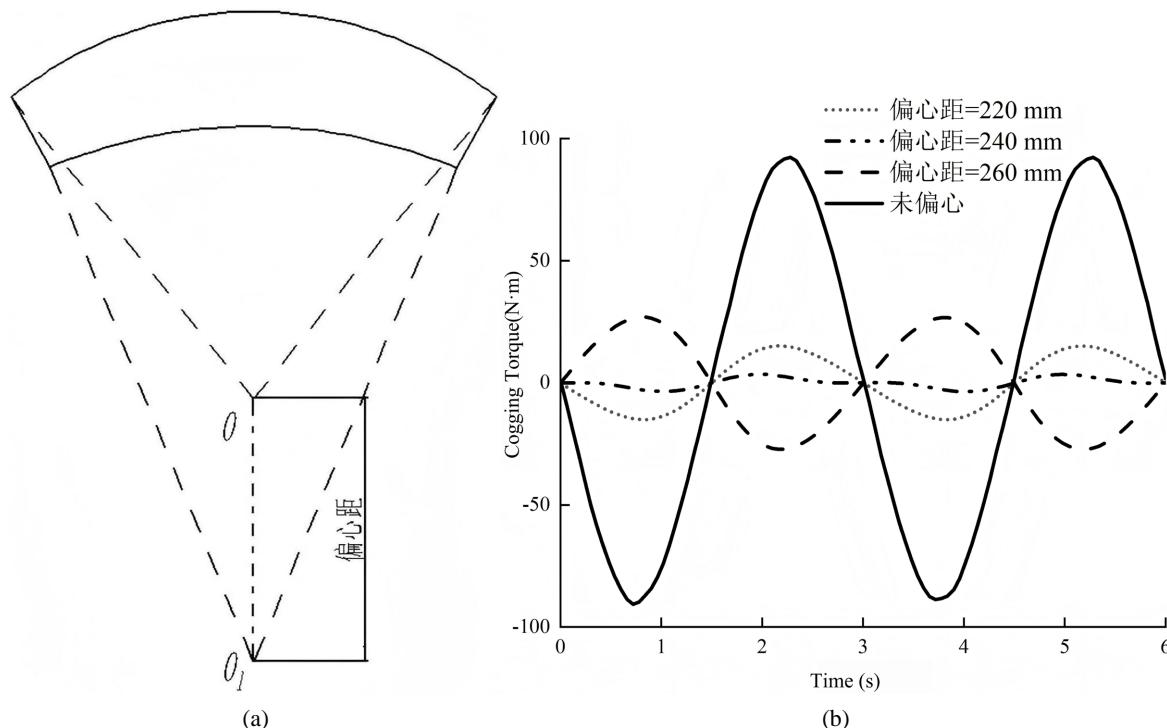


Figure 3. (a) Schematic diagram of magnet with unequal thickness and (b) cogging torque at different eccentricities
图3. 不等厚磁体示意图(a)和不同偏心距下的齿槽转矩(b)

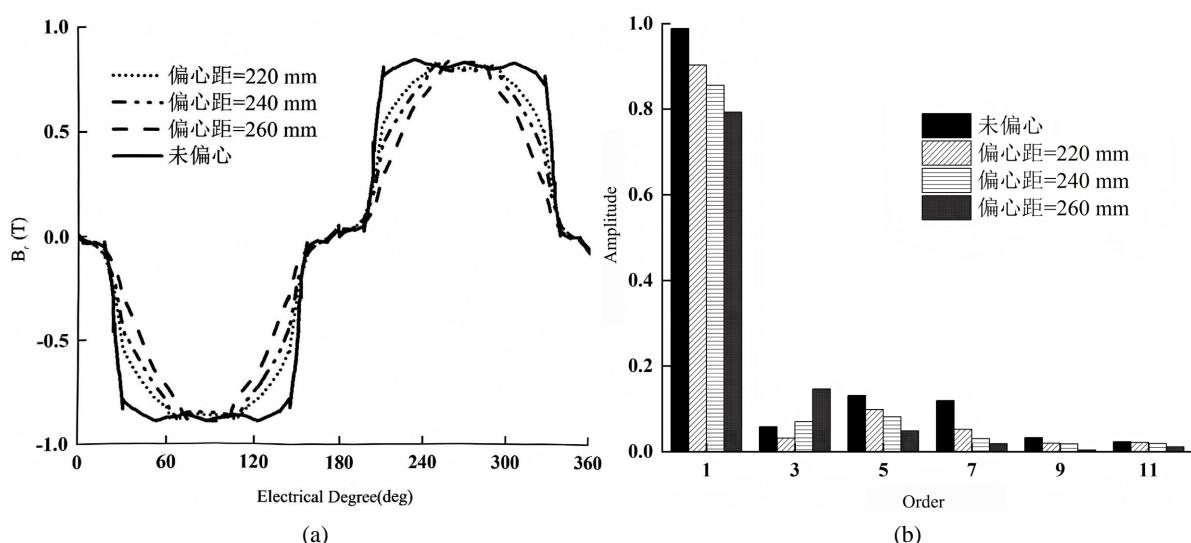


Figure 4. (a) Air gap magnetic density and (b) harmonic amplitude waveform diagram at different eccentricities
图4. 不同偏心距下气隙磁密(a)和谐波幅值波形图(b)

通过有限元仿真求解齿槽转矩，结果如图 3(b)所示，可以看出磁体偏心能够明显降低齿槽转矩，偏心距为 240 mm 时齿槽转矩峰值为 3.47 N·m，比其他两种偏心距下的齿槽转矩还要低，这是因为磁体偏心结构使径向气隙磁密波形更加正弦化，有效的降低了高次谐波分量，从而使齿槽转矩幅值降低。随着偏心距的增加，齿槽转矩会出现一个最低值，即气隙磁密正弦度最好的取值点。

为进一步探究气隙磁密对齿槽转矩的影响，图 4 分别将不同偏心距下的气隙磁密波形以及谐波幅值进行对比。可以看出随着偏心距的增加，磁体体积减小导致磁体所提供基波磁密有所下降，但也削弱了高次谐波，气隙磁密波形更加正弦化，有效降低了齿槽转矩。

3.3. 磁极直极偏移对齿槽转矩的影响

削弱齿槽转矩可以采用转子斜极措施，如果采用的磁体为黏结钕铁硼，比较容易进行斜充磁，实现转子斜极。但目前永磁电机多采用烧结钕铁硼，做成斜极工艺复杂，成本较高。通过对磁体进行分段直极错位处理可以替代转子斜极[11]。对于矿用大型电机而言，为了减少磁体涡流，也需要对磁体进行分段处理，因此在转子装配过程中，实现多段直极偏移就容易的多。

电机最小齿槽转矩相邻错位角度为：

$$\theta_{ss} = \frac{\theta_{sk}}{N_s} = \frac{360^\circ}{N_c N_s} \quad (5)$$

式中： θ_{sk} 为磁体总错位角度； N_c 为电机极数和槽数的最小公倍数； N_s 为分段数。

磁体直极偏移如图 5 所示，通过确定样机不同分段下的错位角度，把一块单块斜极磁体分成两份，并摆正成直极，形成两段直极偏移，以此类推，当不分段时，根据式(5)可算出相邻磁体中心错位角度为 1.5°，分 2、3、4 段时错位角度分别为 0.75°、0.5°、0.375°。本文通过 MotorCAD 软件建立 3D 模型，通过设置转子分段数分别对同心磁体和偏心磁体分段直极错位下的齿槽转矩进行了分析对比。从图 6 和图 7 可以看出偏心直极偏移下的齿槽转矩随着错位段数的增加而减小。而同心直极偏移下齿槽转矩分两段时最小，随着分段数的增加，齿槽转矩反而增大。这是由于分段直极偏移的计算是通过各段齿槽转矩波形合成得到的，因此齿槽转矩的大小与波形的形状有关[12]。可以看出在不同的齿槽转矩波形下，磁极直极偏移都可以有效的降低齿槽转矩。

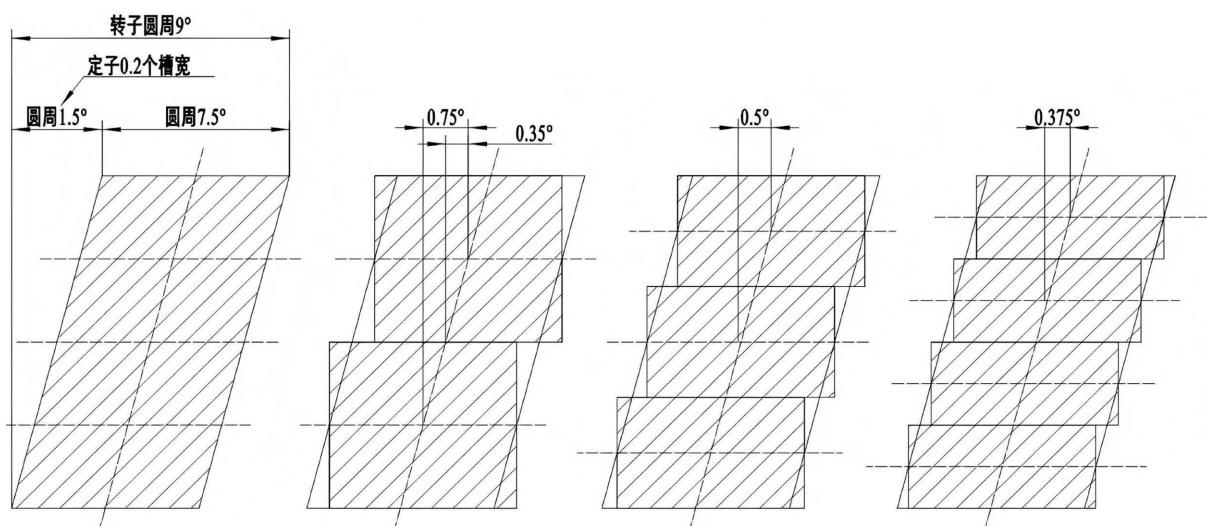


Figure 5. Schematic diagram of straight pole offset of the magnet

图 5. 磁体直极偏移平面示意图

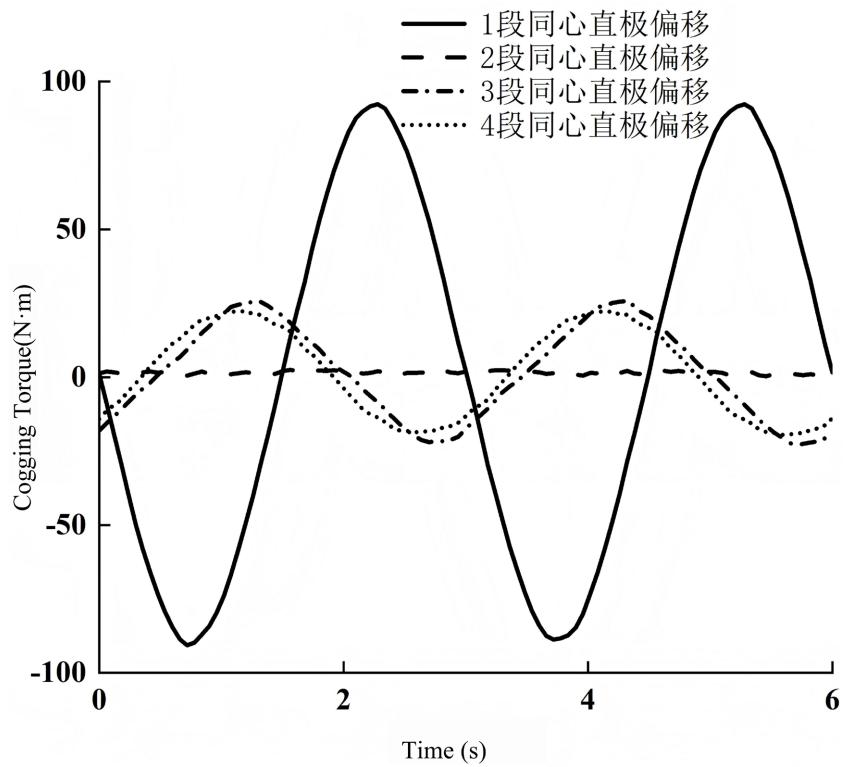


Figure 6. Concentric straight pole offset cogging torque with different segment numbers
图 6. 不同分段数下同心直极偏移齿槽转矩

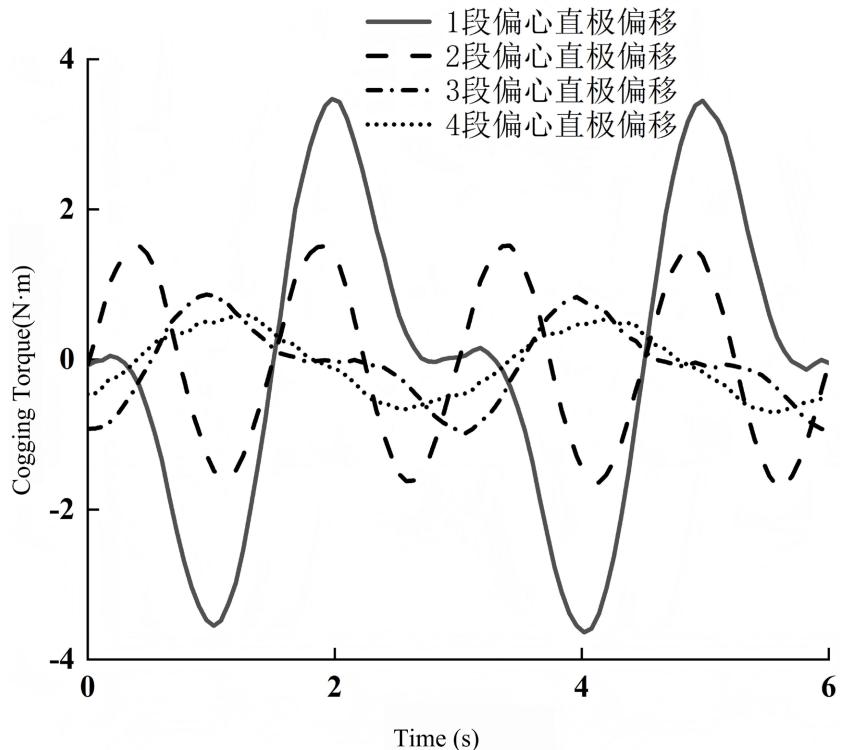


Figure 7. Eccentric straight pole offset cogging torque with different segment numbers
图 7. 不同分段数下偏心直极偏移齿槽转矩

4. 样机试验

4.1. 样机参数

为使在改变磁极参数的条件下不影响反电动势的幅值大小，采用 Maxwell 中的 Optimetrics 模块进行参数扫描，将磁体极弧系数和偏心距设定为扫描参数，求解不同组仿真结果，选择反电动势幅值不变，且齿槽转矩最小的组合。确定样机磁极参数为极弧系数 0.86，偏心距 220 mm，2 段直极偏移。样机及试验装置如图 8 所示。



Figure 8. Test device for permanent magnetic motor
图 8. 永磁电机试验装置

4.2. 齿槽转矩试验

被试样机通过转矩传感器与磁粉制动器相连，通过磁粉制动器加载使被测样机达到稳速运转，转矩测试仪测量结果如图 9 中试验值曲线所示，幅值为 9.3 N·m。此种测试方法测得的转矩包含了被测电机齿槽转矩、控制器控制引起的脉动转矩和负载引起的脉动转矩[13]，会使得测量值较真实值偏大。但可以看出此时转矩值已经有明显的改善效果，且与有限元仿真得到的数据值相近，证明磁极组合优化对齿槽转矩抑制效果明显。

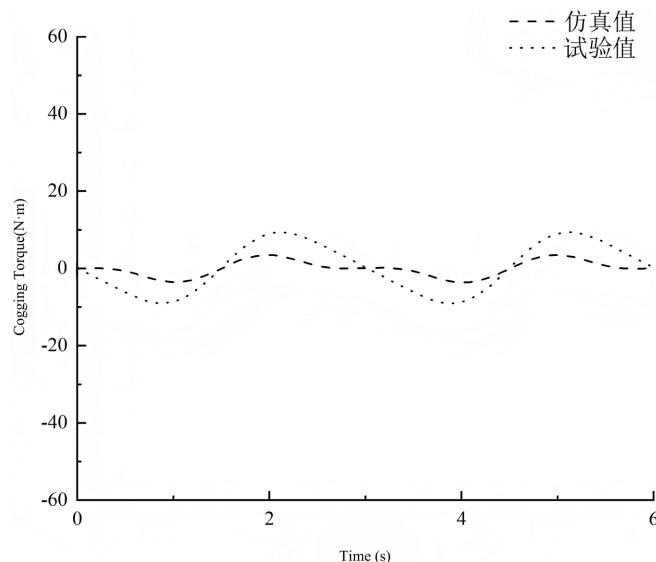
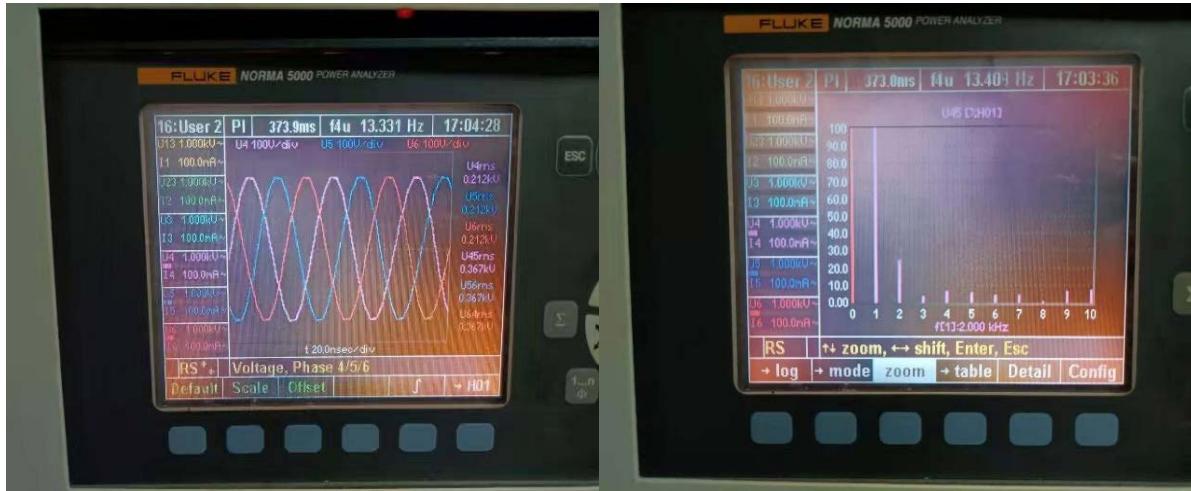


Figure 9. Cogging torque simulation values and experimental values
图 9. 齿槽转矩仿真值与试验值

4.3. 反电动势试验

通过陪试机反拖被试机至同步转速，由功率分析仪采集分析得到反电动势波形及谐波分解如图 10 所示。可以看出样机的高阶奇次谐波较小，因此反电动势波形更加正弦化，从而减小电机的纹波转矩，提高电机整体服役性能。图 11 为优化前后对比图，可以看出谐波含量明显减弱，证明磁极优化对齿槽转矩及电机整体性能都有很好的改善效果。



和影响因素，分析了磁体极弧系数、不等厚磁体以及磁体直极偏移对齿槽转矩的影响，通过多目标优化磁极参数得出最优设计方案，对优化后样机的反电动势波形及谐波含量进行分析，得出以下结论：

- 1) 通过选择对齿槽转矩起作用的 B_m 最小值对应的极弧系数，来降低齿槽转矩幅值，发现齿槽转矩随极弧系数呈周期性变化；
- 2) 合理选择不等厚磁体的偏心距可以降低气隙磁密高次谐波分量，改善气隙磁密波形，从而有效地削弱齿槽转矩；
- 3) 磁体直极偏移对降低齿槽转矩影响很大，齿槽转矩随分段数的变化受齿槽转矩波形影响，因此并非所有电机都遵循齿槽转矩随磁体分段数的增加而减小的规律，当磁体分 2 段时，齿槽转矩已经得到明显的削弱。在实际应用中，分段数的选取需结合齿槽转矩的波形来确定；
- 4) 通过样机试验发现磁极参数优化能有效降低反电动势谐波含量，降低齿槽转矩，优化电机整体运行性能。

基金项目

感谢国家重点研发计划项目(2022YFB3505600)对本研究工作的支持。

参考文献

- [1] 洪涛, 鲍晓华, 刘佶炜, 等. 基于磁极参数的表贴式永磁同步电机齿槽转矩研究[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(1): 53-60.
- [2] 唐旭, 王秀和, 田蒙蒙, 等. 基于改变定子齿槽参数的异步起动永磁同步电动机齿槽转矩削弱措施研究[J]. 电工技术学报, 2016, 31(23): 1-8.
- [3] 郝雪弟, 李宇航, 周国昊, 等. 矿用潜水泵高功率密度永磁同步电机极槽配合选择分析[J]. 煤炭工程, 2021, 53(2): 170-174.
- [4] Yazdanpanah, R. and Farjah, E. (2021) Analytical Study on the Cogging Torque in Surface-Mounted PM Machines; Effect of Armature Notches and PM Segments. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, **65**, 487-500. <https://doi.org/10.3233/jae-190162>
- [5] Shah, S.Q.A., Lipo, T.A. and Kwon, B. (2012) Modeling of Novel Permanent Magnet Pole Shape SPM Motor for Reducing Torque Pulsation. *IEEE Transactions on Magnetics*, **48**, 4626-4629. <https://doi.org/10.1109/tmag.2012.2197188>
- [6] 张微, 万彦辉, 王卿, 等. 表贴式永磁同步电机齿槽转矩抑制技术及新进展[J]. 导航与控制, 2015, 14(4): 2-7.
- [7] 陈丽香, 王灿, 张超, 等. 一种内置 V 型永磁同步电机齿槽转矩的削弱方法[J]. 微电机, 2021, 54(5): 1-4.
- [8] 张羽丰, 张学义, 孟祥玉. 基于永磁电机齿槽转矩的磁极参数优化[J]. 农业装备与车辆工程, 2020, 58(8): 9-11.
- [9] 王本礼. 低速直驱永磁同步电动机的研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2008.
- [10] 张学成, 杨向宇, 曹江华. 不等厚磁极对永磁无刷直流电动机性能分析[J]. 微特电机, 2014, 42(2): 9-13.
- [11] 刘婷, 黄志文, 邓秋玲. 永磁直驱风力发电机齿槽转矩削弱方法应用研究[J]. 湖南工程学院学报(自然科学版), 2018, 28(3): 13-16.
- [12] 邱国平, 丁旭红, 王秋平, 等. 永磁同步电机实用设计及应用技术[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2020: 174-181.
- [13] 冯兆冰, 吴孔圣, 丁云飞, 等. 几种简单的齿槽转矩测量方法[J]. 制造技术与机床, 2012(5): 102-110.