

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2211286

磁通屏障对潜油电机转矩特性的影响^{*}吴尧辉^{1,2} 刘书材^{1,2} 岳曦元^{1,2}

(1. 河南理工大学电气工程及其自动化学院 焦作 454000; 2. 直驱电机-河南省工程技术研究中心 焦作 454000)

摘要: 转矩脉动是影响内置式潜油电机的重要因素,通过对电机转子内部磁通屏障的设计,进而达到降低转矩脉动的目的。以10极12槽内置式“一”字型潜油电机为基础模型,使用有限元法对潜油电机转子进行了二维瞬态场分析。基于磁通屏障效应对潜油电机气隙径向磁密的影响,得出了潜油电机转子在各种运转工况条件下的径向电磁特性分布的状况,并分别比较研究电机的齿槽转矩和电磁转矩等转矩特性。优化后,潜油电机的转矩脉动有了显著的降低。最后,采用砵码法验证磁通屏障的设计对潜油电机齿槽转矩具有较好的抑制效果。由于潜油电机的定子结构被限制,磁通屏障的优化设计具有非常大的意义。

关键词: 潜油电机;转矩特性;磁通屏障;有限元分析;转矩脉动;齿槽转矩

中图分类号: TM351 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4024

Influence of magnetic flux barrier on the torque characteristics of oil submersible motor

Wu Yaohui^{1,2} Liu Shucui^{1,2} Yue Xiyuan^{1,2}

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;

2. Direct Drive Elevator-Engineering Technology Research Center of Henan Province, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: Torque ripple is an important factor affecting the torque characteristics of IPM oil submersible motor. The purpose of reducing torque ripple is achieved through the design of the magnetic flux barrier of the motor rotor. Taking the 10 pole 12 slot IPM "一" magnet type oil submersible motor as the basic model. The two-dimensional transient field of oil submersible motor rotor is analyzed by finite element method. Based on the influence of flux barrier effect on the radial flux density of air gap, the distribution of radial electromagnetic characteristics of oil submersible motor rotor under various operating conditions is obtained, and the torque characteristics such as cogging torque and electromagnetic torque are compared and studied respectively. After optimization, the torque ripple of oil submersible motor is significantly reduced. Finally, the results verify that the design of magnetic flux barrier has a good inhibitory effect on the cogging torque of oil submersible motor. Because the stator structure of submersible motor is limited, the optimal design of flux barrier is great significance.

Keywords: oil submersible motor; torque characteristics; magnetic flux barrier; finite element simulation; torque ripple; cogging torque

0 引言

近年来随着石油开采的需要,潜油螺杆泵抽油是水平井以及高粘稠、高含沙蜡油井等此类油井的有效手段。潜油螺杆泵的广泛应用对直驱潜油电机提出了迫切要求,而内置式永磁电机(interior permanent magnet, IPM)具有高转矩、高功率密度和高效率的优点适用于该抽油系统^[1-2]。

电机性能受到电磁特性的显著影响,其中潜油电机的

定子几何结构受可用空间、相数和绕组配置的限制,而采用分数槽集中绕组^[3-6]的方式。电机转子结构改善可参考以下文献:文献[7-13]分别采用新型偏心磁极、空间矢量脉宽调制、磁极分段法、转子结构数学模型参数化、转子斜极和磁极不对称等方法降低永磁磁场谐波分量,从而达到降低定子损耗和电机的转矩脉动。文献[14]在满足机械强度的要求下对内置切向式电机采用“T”和“L”型隔磁槽建立隔磁屏障降低转矩脉动。文献[15]基于田口法对隔磁槽结构

收稿日期:2022-09-06

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(61340015)、河南省教育厅自然科学基金(2009B70003)、河南省教育厅自然科学基金(2010A470003)项目资助

优化实现内置式“V”型电机低转矩脉动。文献[16]通过切割磁通屏障侧转子外表面减小转矩脉动。由于潜油电机受到定子空间的限制,其特殊的长径比对电机实际生产工艺要求过高。

磁通屏障可实现在不增大定子外径的情况下,对转子结构进行改进,降低潜油电机的损耗。磁通屏障是位于转子中的空隙,主要引导和调整转子磁极周围的磁场,防止相邻永磁体之间的磁通流动。适当的设计磁通屏障在不采用偏斜情况下显著的降低转矩脉动和齿槽转矩。

1 等效磁路原理

电机转向往定子外电路所提供输出的磁通量分为主磁通量(与电枢绕组交链)和漏磁通(不与电枢绕组交链)两部分。

1.1 等效磁路

内置式“一”字型电机中的永磁体极间漏磁占总漏磁量的主体部分,潜油电机的永磁体极间漏磁对结果影响较大。根据磁路等效法的基本原理^[17]可知等效磁路图如图1所示。

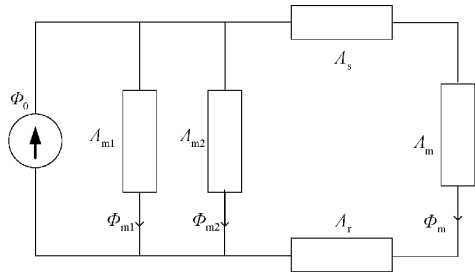


图1 等效磁路图

等效磁路图中 Φ_0 为源磁通, Φ_m 为永磁体产生的气隙磁通, Φ_{m1} 和 Φ_{m2} 为永磁体极间漏磁通, Λ_s 为定子磁导, Λ_r 为转子磁导。

1.2 等效磁导分析

永磁体磁导 Λ_m 的计算公式为:

$$\Lambda_m = \frac{\mu_0 \mu_r l_m l_{cl}}{h_m} \quad (1)$$

式中: μ_0 为空气磁导率; μ_r 为永磁体相对磁导率; l_m 为永磁体宽度; l_{cl} 为电枢计算长度; h_m 为永磁体平行充磁方向厚度。

气隙磁导 Λ_g 的计算公式为:

$$\Lambda_g = \frac{\mu_0 \tau l_{cl}}{2K_g \delta} \quad (2)$$

式中: τ 为极距; K_g 为气隙系数; δ 为气隙长度。

极间漏磁导 Λ_{m1} 和 Λ_{m2} 的计算公式为:

$$\Lambda_{m1} = K \left(\int_0^c \frac{\mu_0 \mu_r l_m}{3\pi x + 2b + d} dx // \int_0^c \frac{\mu_0 \mu_r l_m}{3\pi x + d} dx \right) \quad (3)$$

$$\Lambda_{m2} = K \frac{1}{2} \int_{\frac{b}{2}}^b \frac{\mu_0 l_{cl}}{x} dx \quad (4)$$

式中: K 为修正系数, b 、 c 和 d 如图2和3所示。修正系数 K 用于修正非均匀磁桥而引起的误差。

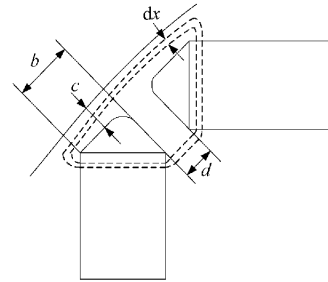


图2 经过磁桥的极间漏磁磁路图

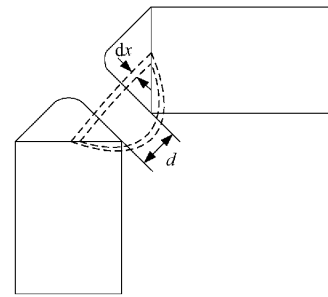


图3 经过极槽的极间漏磁磁路图

2 潜油电机的模型建立

电机的计算模型基于 MagNet 电磁仿真软件将电机端部参数加以修正后建立的二维暂态仿真模型。二维模型能够体现电机端部特征,弥补了三维方法计算量大、时间过长的不足^[18]。

2.1 电机结构参数

本文研究的电机是潜油螺杆泵用电机,其特殊的用途限制电机的定子外径,该电机具有较大的长径比,根据永磁电机的相关参数如表1所示,建立电机模型,在模型中附于材料属性建立 MagNet 电磁场。

表1 潜油电机的相关参数

名称	符号	数值
定子槽数	Q	12
转子极对数	p	5
定子外径/mm	R_{s1}	103.2
定子内径/mm	R_{s2}	68
转子外径/mm	R_{r1}	66.4
转子内径/mm	R_{r2}	30.4
气隙长度/mm	δ	0.8
轴向长度/mm	l_{cl}	4 900
额定功率/kW	P_N	12.5
额定转速/(r·min ⁻¹)	n_N	180
额定电压/V	U_N	380
永磁体厚度/mm	h_m	4
永磁体长度/mm	l_m	14.5

2.2 磁通屏障的设计

根据式(3)和(4)关于磁通屏障的相关参数 b 、 c 和 d 对漏磁导的影响以及实际生产中的工艺水平选取合适的 5 组参数如表 2 所示。

表 2 磁通屏障结构参数表

方案编号	b/mm	c/mm	d/mm
1	1.0	1	3
2	1.5	1	1
3	1.5	1	2
4	2.0	1	1
5	2.0	1	2

利用有限元仿真软件 MagNet 对电机基础模型进行剖分。为减少求解时间,提高求解效率,保证节点数充足的情况下对不同部位进行疏密不同的网格划分,其中气隙处的网格进行加密处理如图 4 所示。

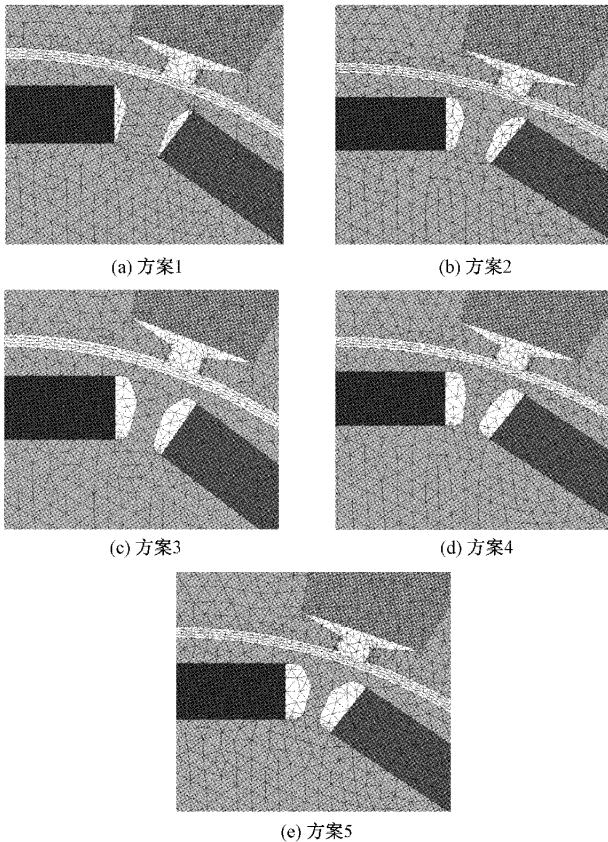


图 4 磁通屏障 5 种方案网格剖分图

对电机基础模型进行假设并分别求解电机的整个区域:

- 1) 不计硅钢材料的涡流效应,忽略磁滞效应;
- 2) 忽略除二维平面外的其他方向分量;
- 3) 定子铁心外表面和转轴部分均无漏磁;
- 4) 端部效应根据经验由常数值描述。

电机二维瞬态场边值公式为:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu_r} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu_r} \frac{\partial A}{\partial y} \right) = -J_s + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} (\Omega) \\ A = 0(\Gamma) \end{cases} \quad (5)$$

式中: J_s 为源电流密度; μ_r 为相对磁导率; σ 为电导率。 Γ 为封闭区域 Ω 的边界。

3 仿真实验与分析

影响电机磁场强度及分布的因素有永磁材料的选取、永磁体形状和磁通屏障,因此准确地附于电机永磁材料的特性参数及模型的边界条件是准确计算转矩特性的关键因素。

3.1 电机的电磁性能

对电机进行求解,得到基础模型(即无磁通屏障)空载情况下磁力线分布,如图 5 所示,可以清晰地看出通过气隙的磁力线垂直均匀分布,其由永磁体的一端出发经过气隙回到另一端,形成闭合回路。同时也发现少量磁力线未通过气隙直接在转子铁心内部形成闭合回路。

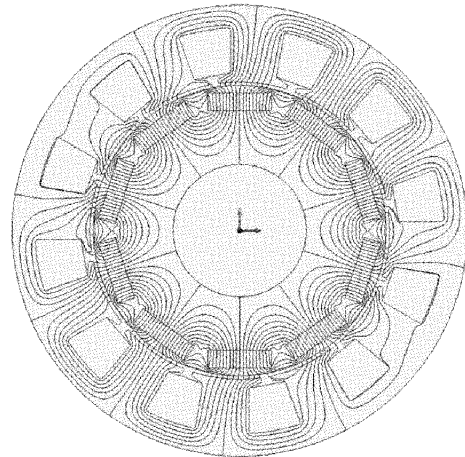


图 5 电机空载磁力线分布图

电机在不同工况下的磁密分布如图 6 和 7 所示。通过图 6 中的空载磁密云图观察到电机转子内部永磁体极间的漏磁密最高为 0.79 T,当电机负载运行到 0.33 s 时,由图 7 可知通过永磁体极间的漏磁密最高为 1.8 T。总体来看,电机的磁场强度在定子上成规律性变化,由于开口槽的影响,槽口处的磁密饱和程度较高。

电机内转子的永磁体在气隙中的分布可分解为一系列正弦波的叠加,即基波和随位置不断变化的空间谐波。在有限元二维模型中将电机的气隙分成 4 层,对内部两层气隙的中线处气隙磁密进行分析,通常取气隙处的径向磁密进行研究,根据式(6)求得电机的气隙径向磁密如图 8 所示,电机的气隙径向磁密为类似于正弦型的梯形,其中锯齿形的波动是由定子槽开口而导致气隙宽度不均匀造成的。电机气隙径向磁密的幅值约为 0.72 T。

$$B_r = B_x \cos\phi + B_y \sin\phi \quad (6)$$

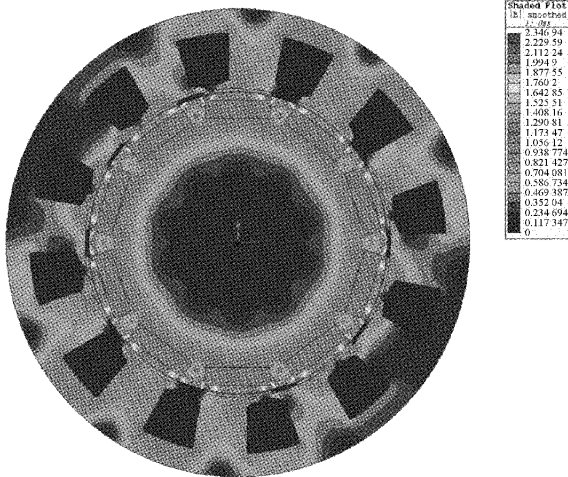


图6 电机空载磁密分布云图

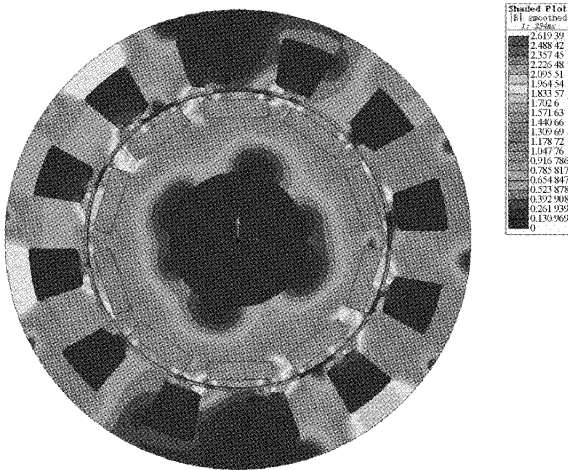


图7 电机负载磁密分布图

式中: B_r 为气隙径向磁密; φ 为坐轴标角度; B_x 和 B_y 分别表示磁通密度 X 轴和 Y 轴分量。

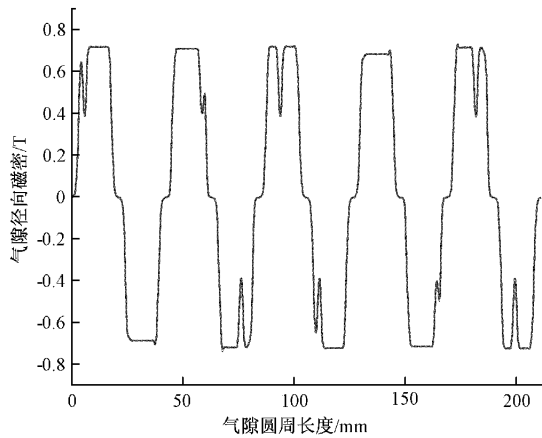


图8 电机空载气隙径向磁密

对气隙径向磁密进行傅里叶分解,得到 23 次以内谐波含量如图 9 所示。基波磁密幅值为 0.84 T,3 次、5 次、7 次

和 9 次谐波磁密幅值分别为 0.09、0.05、0.09 和 0.06 T, 3 次、5 次、7 次和 9 次谐波磁密幅值分别占基波幅值的 11%、6%、11%和 8%。再分别对 5 种方案的气隙径向磁密进行傅里叶分解,得到的基波及各次谐波的柱状图如图 10 所示。23 次以内的谐波磁密占基波磁密百分比如图 11 所示。

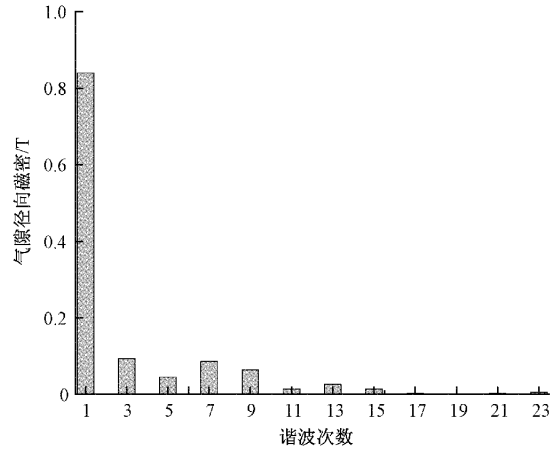


图9 气隙径向磁密基波及谐波幅值

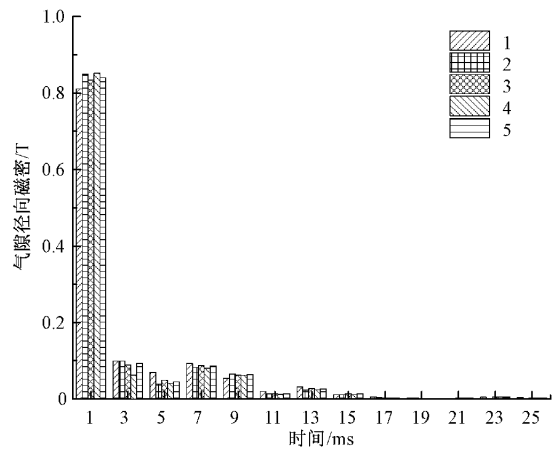


图10 气隙径向磁密傅里叶分解对比图

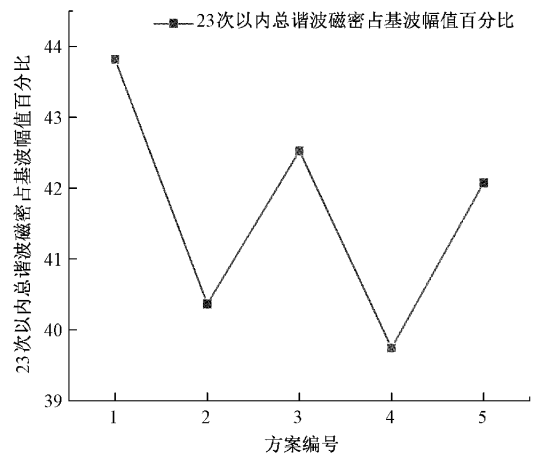


图11 谐波占基波幅值百分比

5 种方案的气隙径向磁密基波幅值分别为 0.81、0.85、0.83、0.85 和 0.84 T,相对于图 9 电机基础模型的基波及谐波分布均有明显的提高。其中方案 4 的基波磁密幅值提高了 0.078 T,3 次谐波降低了 0.047 T,5 次谐波降低了 0.034 T。图 11 中 5 种方案的百分比数值分别为 43.82%、40.36%、42.53%、39.75%和 42.08%。其中方案 4 磁通屏障的设计使电机气隙中 23 次以内谐波占比最少,其中 3 次谐波和 5 次谐波的含量较为明显。

3.2 电机的反电动势

电机(无磁通屏障)的反电动势如图 12 所示,可以看出电机空载时 A 相、B 相和 C 相的反电动势幅值为 218 V,有效值为 154 V。由于潜油电机特殊的长径比,以现阶段的工艺水平对电机定子槽内进行工艺穿线较为困难,便造成定子槽内的槽满率大大低于普通电机,导致潜油电机的反电动势较低。在求得电机 A 相反电动势的基础上对其进行傅里叶分解,并根据求得 A 相电压正弦波畸变率为 4.7%。对 5 种不同磁通屏障下 A 相反电动势的求解结果如图 13 所示,5 种电机模型的反电动势都呈正弦波形且波形较为相似,求解的 A 相反电动势有效值分别为 159、162、161、162 和 158 V。

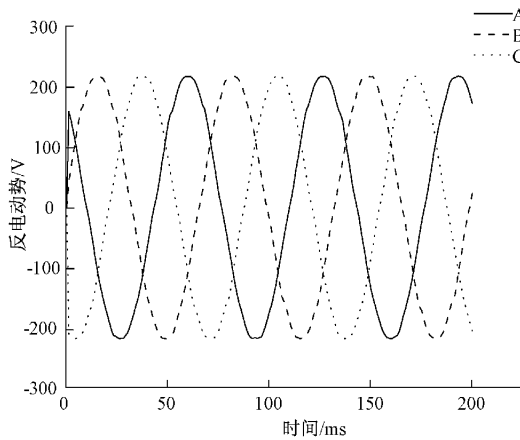


图 12 空载反电动势

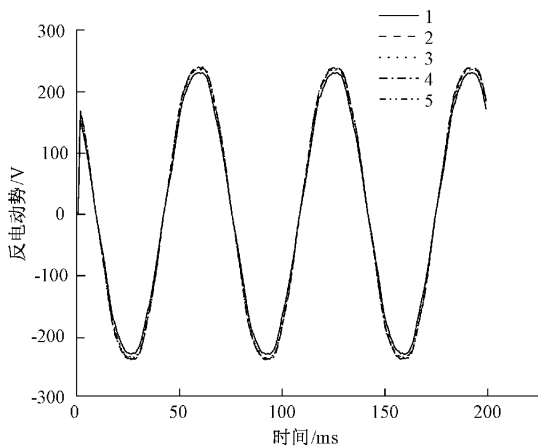


图 13 空载反电动势对比图

3.3 电机的转矩特性

1) 电磁转矩

电机在额定电压下起动时的电磁转矩如图 14 所示,转矩峰值为 399 N·m,电机在 0.5 s 后就达到转矩稳定,电机稳定后的最大电磁转矩峰值为 371 N·m,最小电磁转矩峰值为 287 N·m。

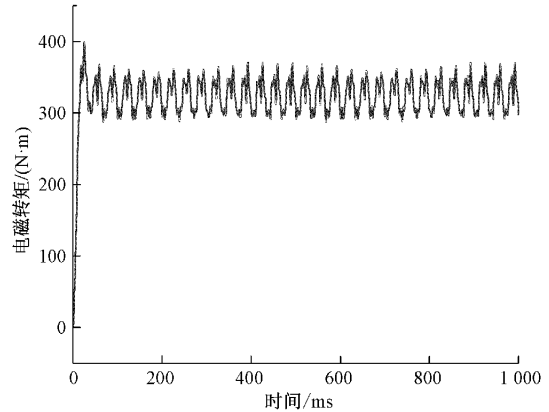


图 14 电机电磁转矩

5 种不同磁通屏障的电磁转矩求解结果如图 15 所示。根据表 3 分析可知,5 种不同的方案都改善了电磁性能和转矩脉动。根据电机电磁转矩的仿真结果可知,潜油电机的电磁性能对磁通屏障几何形状的细节高度敏感。在这 5 种情况下,尽管磁通屏障具有相似的位置、大小和一般形状,但它们对转矩脉动影响显著不同。

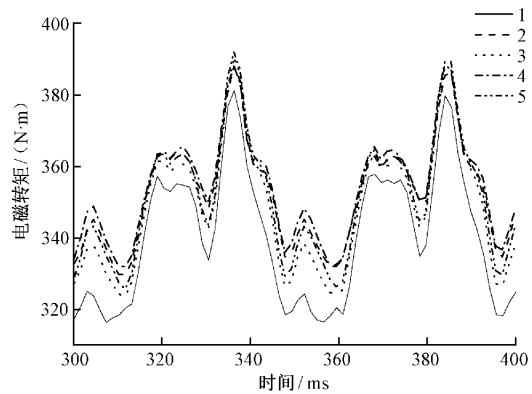


图 15 电机电磁转矩对比图

表 3 电机的电磁转矩特性

方案编号	电磁转矩/N·m	转矩脉动/%
无磁通屏障	325	12.62
1	344	9.80
2	360	8.07
3	354	9.46
4	360	7.63
5	357	9.10

2) 齿槽转矩

齿槽转矩是电机转子永磁体与其相对定子齿槽间相互作用力的切向电磁力分量而引起的。齿槽转矩作为永磁电机的固有特性,为保证电机在低速运行时仿真,设置仿真软件的速度为1°/s。根据式(7)求得空载时电机的齿槽转矩如图16所示,电机无磁通屏障时的齿槽转矩峰值如图17所示,其分布呈现周期性变化。

$$T_{\text{cog}}(\alpha) = -\frac{\partial W}{\partial \alpha} \quad (7)$$

对式(7)进行傅里叶分解得:

$$T_{\text{cog}}(\alpha) = \frac{\pi Q l_{\text{ct}}}{4\mu_0} (R_{\text{s2}}^2 - R_{\text{r1}}^2) \times$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} n N_p G_{nN_p} B_{rN_p} \sin(n N_p Q \alpha) \quad (8)$$

式中:W为电机内储存的磁场能量;α为定转子相对位置角度, G_{nN_p} 和 B_{rN_p} 分别为相对气隙径向磁密和永磁体气隙径向磁密的傅里叶分解系数; N_p 为Q和2p的最小公倍数。

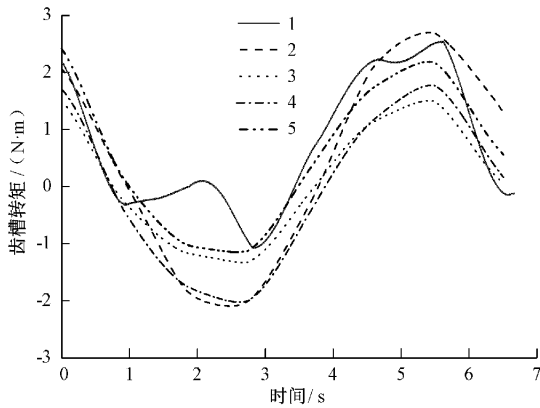


图16 电机空载齿槽转矩

根据上图对5种不同磁通屏障下的齿槽转矩分析得到的齿槽转矩如表4所示。磁通屏障的设计能够有效降低齿槽转矩,降低后的齿槽转矩不到基础模型的50%。

表4 电机的齿槽转矩

方案编号	齿槽转矩峰值/N·m
无磁通屏障	6.16
1	2.47
2	2.58
3	2.02
4	2.10
5	2.53

3) 齿槽转矩对电磁转矩的影响

对仿真求得的电磁转矩和齿槽转矩分析可知,齿槽转矩是影响转矩脉动的重要因素之一。以电机基础模型为例,电机齿槽转矩波形与稳定后的电磁转矩波形变化趋势

一致。如图17和18所示,永磁体与定子齿槽作用产生的齿槽转矩呈现周期性的波动,即齿槽转矩波动越大的位置,电磁转矩的波动越大。

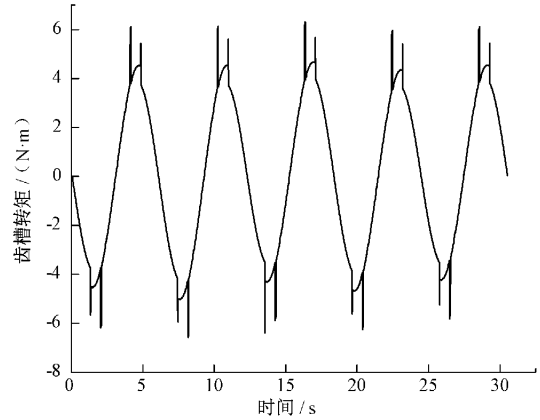


图17 齿槽转矩波形图

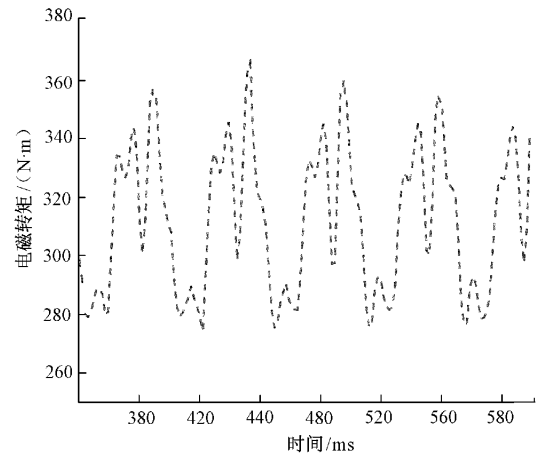


图18 电磁转矩波形图

4 实验结果对比

利用砝码法对试验样机进行测试^[19],样机转子结构如图19所示,齿槽转矩测试系统如图20所示。

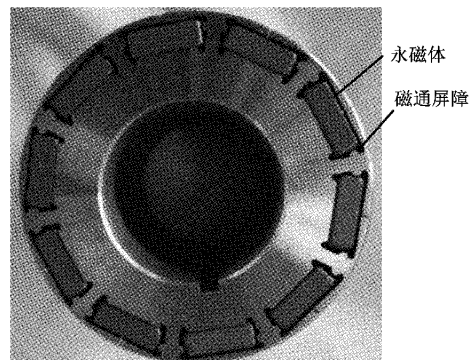


图19 样机转子结构

在测试系统中选择合适的圆盘和砝码,然后轻轻将砝码挂在轻绳上,编码器每转动0.5°进行一次采集(其中 I_1

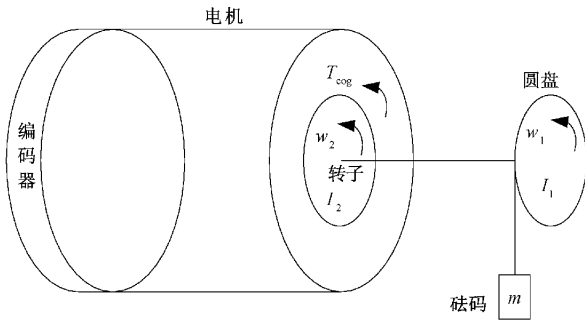


图 20 齿槽转矩测试系统

和 I_2 为转动惯量, w_1 和 w_2 为转速, m 为砝码质量)。10 极 12 槽电机一个齿距内有 5 个周期的齿槽转矩, 将编码器采集的点绘制成曲线图与齿槽转矩仿真结果进行对比, 如图 21 所示。磁通屏障效应对样机齿槽转矩的抑制与仿真结果相吻合, 其中仿真求解时未计算气隙中的摩擦力, 导致仿真的齿槽转矩曲线下移。仿真计算的齿槽转矩峰值为 $2.10 \text{ N}\cdot\text{m}$, 实验测得样机齿槽转矩峰值为 $2.41 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。

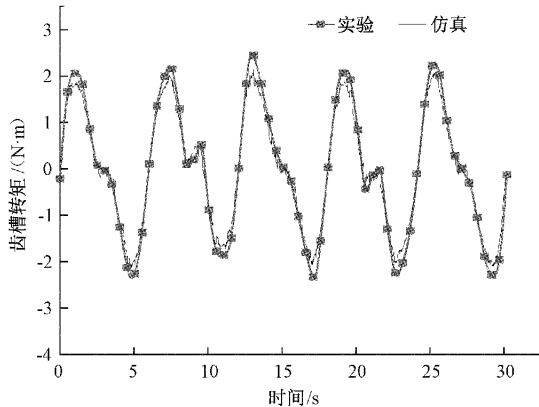


图 21 齿槽转矩对比图

5 结 论

本文利用有限元仿真软件 MagNet 对 10 极 12 槽内置式“一”字型潜油永磁电机进行二维瞬态场分析, 得到潜油电机的磁场分布。根据转子内部磁通屏障的结构参数进行优化设计, 优化后的潜油电机在提高转矩能力的同时, 有效的降低了转矩脉动和齿槽转矩。通过对比磁通屏障设计前后的数据, 有力地证明了磁通屏障的存在适用于潜油电机。文中还需进一步研究整个抽油系统对潜油电机综合性能的影响。

参考文献

- [1] 潘雅滨, 温嘉斌, 徐永明. 六极永磁式潜油电机技术问题及 CAD 软件开发[J]. 防爆电机, 2011, 46(5): 10-12, 19.
- [2] 孟大伟, 刘智慧, 徐永明, 等. 双分数槽集中绕组低速潜油电机的设计分析[J]. 电机与控制报, 2014, 18(1):

44-49.

- [3] DAJAKU G, GERING D. A novel 24-slots/10-poles winding topology for electric machines[C]. 2011 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC). Canada: Niagara Falls, ON, 2011: 65-70.
- [4] 谭建成. 永磁无刷直流电机技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011: 77-81.
- [5] DE DONATO G, CAPPONI F G, CARICCHI F. Fractional-slot concentrated-winding axial-flux permanent magnet machine with core-wound coils[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48(2): 630-641.
- [6] 宋守许, 李诺楠, 杜毅, 等. 抑制永磁同步电机转矩脉动的转子再设计方法[J]. 中国机械工程, 2019, 30(17): 2084-2090, 2134.
- [7] 齐晓东, 高锋阳, 李晓峰, 等. 表贴式永磁同步电机新型偏心磁极优化设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(8): 93-100.
- [8] 贾宁, 程瑶, 田又源. 基于电流前馈的电动汽车永磁同步电机矢量控制[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(12): 61-66.
- [9] 罗晓祎. 低转矩脉动永磁同步电机设计及转矩谐波分析[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2021.
- [10] 安跃军, 温宏亮, 安辉, 等. 磁极调制式永磁电机的磁场分析与实验[J]. 电工技术学报, 2012, 27(11): 111-117.
- [11] 王光晨, 夏加宽. 转子分段斜极对内置式永磁同步电机性能的影响[J]. 微电机, 2018, 51(12): 14-17.
- [12] 刘国海, 王艳阳, 陈前. 非对称 V 型内置式永磁同步电机的多目标优化设计[J]. 电工技术学报, 2018, 33(S2): 385-392.
- [13] CHEN Q, XU G H, LIU G, et al. Torque ripple reduction in five-phase interior permanent magnet motors by lowering interactional MMF [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(11): 8520-8531.
- [14] 王睿, 冯智海. 内置式永磁电机空气隔磁结构研究[J]. 防爆电机, 2013, 48(3): 17-19, 41.
- [15] 王慧敏, 钟赛潮, 张威, 等. 减小转矩波动的内置式永磁同步电机空气隔磁槽优化设计[J]. 微电机, 2021, 54(6): 18-22.
- [16] SEO U J, CHUN Y D, CHOI J H, et al. A technique of torque ripple reduction interior permanent magnet synchronous motor [J]. IEEE Transaction on Magnetics, 2011, 47(10): 3240-3243.
- [17] 唐陈威, 吴桂初, 方攸同. 基于绕组分布函数理论和动态磁网络的两种内置式永磁牵引电机解析建模方法[J]. 电工技术学报, 2020, 35(S2): 377-382.
- [18] 艾永乐, 许增渊. 电动汽车用高功永磁同步电机设计与

特性分析[J]. 电子测量技术, 2017, 40(2): 138-143.

- [19] 杨志坚, 张雨国, 喻桂华. 一种永磁电机齿槽转矩测量方法[J]. 电机与控制学报, 2022, 26(5): 76-85.

作者简介

吴尧辉, 硕士研究生导师, 高级工程师, 主要研究方向为电机与电器、电力系统继电保护、电器智能化技术等。

E-mail: wyh@hpu.edu.cn

刘书材(通信作者), 硕士研究生, 主要研究方向为永磁同步电机的设计与优化。

E-mail: 976500129@qq.com

岳曦元, 硕士研究生, 主要研究方向为电机与电器。

E-mail: 375005495@qq.com