

定子齿开槽对屏蔽式永磁同步电机齿槽转矩的影响

陈子淋, 李明*, 王蓉, 伦淑娴

(渤海大学控制科学与工程学院, 辽宁锦州 121000)

Effect of Stator Tooth Slotting on Cogging Torque of Canned Permanent Magnet Synchronous Motor

CHEN Zilin, LI Ming*, WANG Rong, LUN Shuxian

(College of Control Science and Engineering, Bohai University, Jinzhou 121000, China)

Abstract: [Objective] Reducing cogging torque is a key issue in motor design. It is widely recognized that slotting the stator teeth of permanent magnet synchronous motor (PMSM) can effectively suppress cogging torque. However, the feasibility of using this method for canned permanent magnet synchronous motor (CPMSM) remains unclear. [Methods] This study investigated a 6-pole, 9-slot CPMSM. A motor model was developed using the finite element method, and stator tooth slotting was implemented. Based on the derivation of the cogging torque expression for the CPMSM, the influence of auxiliary stator tooth slots on cogging torque was analyzed. In addition, the effects of slot number, slot shape, slot position, slot opening width, and slot depth on cogging torque reduction were studied, along with a performance comparison before and after slotting. [Results] The research results showed that, compared with conventional PMSM, the presence of a shielding sleeve in CPMSM reduced the effectiveness of auxiliary slotting for cogging torque suppression. Furthermore, identified as two rectangular slots with a width of $w=2.6$ mm, a depth of $h=0.4$ mm, and an offset angle of $\theta=12.8^\circ$, which achieved the best suppression performance on the CPMSM's cogging torque. [Conclusion] The proposed method of slotting the stator teeth of CPMSM to suppress cogging torque is feasible. Additionally, auxiliary slotting reduces the amplitude of air gap flux density and shielding sleeve losses, thereby improving motor efficiency.

This study provides valuable insights for the optimization and design of CPMSM.

Key words: auxiliary slot; stator teeth; cogging torque; canned permanent magnet synchronous motor

摘要: [目的] 如何降低齿槽转矩是电机设计中的热点问题, 目前已知在永磁同步电机(PMSM)定子齿上开槽可以有效抑制电机齿槽转矩, 但在屏蔽式永磁同步电机(CPMSM)上开槽抑制齿槽转矩的可行性暂不明确。【方法】因此, 本文以一台6极9槽CPMSM为研究对象, 利用有限元法搭建了电机模型, 对电机定子齿部进行开槽设计。然后在推导CPMSM齿槽转矩表达式的基础上, 研究了定子齿开辅助槽对CPMSM齿槽转矩的影响。此外, 本文还研究了辅助槽的开槽个数、槽型、开槽位置、槽口宽度和深度对齿槽转矩的削弱效果以及开槽前后电机性能对比。【结果】研究表明, 与常规PMSM相比, CPMSM由于屏蔽套的存在使得开辅助槽抑制齿槽转矩效果不如常规PMSM。此外, 通过研究得出开2个槽口宽度 $w=2.6$ mm、槽口深度 $h=0.4$ mm的矩形槽, 辅助槽偏移角 $\theta=12.8^\circ$ 时对CPMSM齿槽转矩抑制效果最好。【结论】本文所提在CPMSM定子齿上开槽来抑制电机齿槽转矩的办法是可行的, 同时通过开辅助槽降低了气隙磁密幅值和屏蔽套损耗, 提高了CPMSM的效率。本文研究对CPMSM的优化与设计提供了参考。

关键词: 辅助槽; 定子齿; 齿槽转矩; 屏蔽式永磁同步电机

基金项目: 国家自然科学基金项目(62473061); 辽宁省教育厅一般项目(LJ212410167024)

National Natural Science Foundation of China(62473061);
General Project of Liaoning Provincial Department of Education
(LJ212410167024)

0 引言

真空泵在现代工业领域中扮演着不可或缺的角色, 其在工艺生产、科研实验及医疗器械等领域都起到了重要的作用, 是人们生产生活中的重要

设备^[1-2]。目前主要采用屏蔽式永磁同步电机 (Canned Permanent Magnet Synchronous Motor, CPMSM) 作为真空泵的驱动^[3], 与常规永磁同步电机 (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM) 相比, CPMSM 在结构上多了一对屏蔽套, 其中定子屏蔽套紧贴定子铁心内侧, 转子屏蔽套紧紧包裹着转子。同时, 屏蔽套具有高电阻率、不导磁、高强度和耐腐蚀等特点, 使其被广泛应用于制药、化工、石油和煤矿等领域^[4-5]。

在 PMSM 中永磁体和定子铁心相互作用, 不可避免产生齿槽转矩, 导致电磁转矩波动, 引起振动和噪声, 影响系统的控制精度, 因此降低齿槽转矩在 PMSM 设计过程中是十分重要的^[6-7]。

关于降低齿槽转矩, 国内外学者都进行了大量的研究。目前削弱齿槽转矩的主要方法有槽极配合^[8-9]、优化永磁体参数^[10-11]、定子斜槽^[12-13]、转子斜极^[14-15]和开辅助槽^[16-17]等。从电机工艺难易程度的角度来看, 开辅助槽相较其他的方法更加容易实现, 不需要改变电机原有的结构参数, 仅需在定子齿开槽即可, 还可以通过改变辅助槽的尺寸、形状等灵活地实现削弱电机齿槽转矩的目标。

文献[18]讨论将不规则的开槽区域利用微积分原理分割成较小的规则区域, 得出齿槽转矩与辅助槽参数关系, 验证了定子齿开辅助槽可以减小齿槽转矩。文献[19]通过对不同数量的辅助槽进行分析, 研究表明开两个槽可以同时削弱低阶电磁力波、齿槽转矩和转矩脉动。文献[20]将平行齿形与传统梯形齿形进行对比, 证明了开槽宽度和齿形能够减小轴向磁通永磁电动机的齿槽转矩。随着研究的不断发展, 文献[21-24]均通过研究表明辅助槽的开槽位置、槽口深度和宽度对电机齿槽转矩有显著的削弱效果。

但以上文献都是针对 PMSM 进行研究, 对 CPMSM 定子齿开辅助槽抑制齿槽转矩的可行性研究较少。由于 CPMSM 特有的屏蔽套结构, 在定子齿上开的辅助槽口会被屏蔽套所遮盖, 形成闭口槽。这种设计是否会影响开槽后电机齿槽转矩的表现; 与常规 PMSM 相比, 其削弱效果是否相似, 目前尚无明确结论。因此, 本文以 CPMSM 为研究对象, 研究在定子齿部开辅助槽对电机齿槽转矩的影响。

1 齿槽转矩和电机模型

1.1 齿槽转矩表达式

电枢绕组不通电时, 永磁体产生的磁场与电枢铁心的齿槽作用在圆周方向产生的转矩称为齿槽转矩。因此, 根据能量差分法 CPMSM 齿槽转矩可表示为^[25]

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

式中: W 为电机中储存的能量; α 为定转子之间的相对位置角; T_{cog} 为电机齿槽转矩。

电机内储存能量可近似为气隙和磁场中能量之和, 储存在铁心中的能量近似不计, 表示为^[26]

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

式中: W_{airgap} 为气隙磁场能量; W_{PM} 为永磁体磁场能量; μ_0 为空气磁导率; V 为电机气隙磁密和永磁体的积分区域; $B(\theta, \alpha)$ 为气隙磁密的分布函数, 如式(3)所示:

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

式中: $B_r(\theta)$ 为永磁体剩磁; $h_m(\theta)$ 为永磁体充磁方向长度沿圆周方向的分布; $\delta(\theta, \alpha)$ 为有效气隙长度; $h_{\text{can}}(\theta)$ 为屏蔽套厚度。

将式(3)代入式(2)得:

$$W = \frac{1}{2\mu_0} \int B_r^2(\theta) \left[\frac{h_m(\theta)}{h_m(\theta) + \delta(\theta, \alpha) + h_m(\theta)} \right]^2 dV \quad (4)$$

在区间 $[0, 2\pi]$ 上对函数积分可以得到齿槽转矩的表达式为

$$W = \frac{\pi z L_a}{4\mu_0} (R_2^2 - R_1^2) \sum_{n=1}^{\infty} n G_n B_{r(nz/2p)} \sin(nz\alpha) \quad (5)$$

式中: z 为定子槽数; L_a 为定子铁心的轴向长度; R_1 为定子轭内半径; R_2 为电枢外半径; G_n 为相对气隙磁导平方的傅里叶分解系数; $B_{r(nz/2p)}$ 为永磁体产生的气隙磁密平方的傅里叶分解系数; n 为齿槽转矩的次数, 为定子槽数 z 和极数 p 的最小公倍数。

1 个槽距内齿槽转矩周期数为^[27]

$$N_p = \frac{\text{LCM}(z, 2p)}{z} \quad (6)$$

式中:LCM($z, 2p$)为定子槽数 z 与极数 $2p$ 的最小公倍数,则齿槽转矩一个周期的机械角度为 $\alpha_T = 2\pi/N_p$ 。

对于PMSM,齿槽转矩的谐波次数与电机槽数、磁极数密切相关^[28]。保持电机槽数和极数固定不变,可以通过在电机定转子上开辅助槽增加槽口数量,增大其最小公倍数,提高齿槽转矩谐波次数,降低齿槽转矩。当开 m 个辅助槽时,总槽数由 z 增加为 $(m+1)z$,即 $\text{LCM}[(m+1)z, 2p]/\text{LCM}(z, 2p) \neq 1$ 时,达到了降低齿槽转矩的目的。

1.2 电机模型

本文以一台6极9槽CPMSM为研究对象,其主要参数如表1所示。利用有限元法研究定子齿开槽对电机齿槽转矩的影响,电机有限元模型如图1所示。屏蔽套通常由具有高电阻率、不导磁、高强度及耐腐蚀等特点的硬质金属合金材料制作而成,本文选用SUS316,其电导率为 1.25×10^6 S/m,相对磁导率为1。此外,为保证仿真结果的准确性,本文在对齿槽转矩的仿真过程中将电机转速设置为1 r/min。

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	1.5
额定转速/(r·min ⁻¹)	9 000
气隙长度/mm	1
槽口宽度/mm	2
转子外径/mm	38.5
转子内径/mm	16.5
定子外径/mm	107
定子内径/mm	46.5
永磁体厚度/mm	4
屏蔽套厚度/mm	0.5

由文献[29]可知,在CPMSM的损耗中屏蔽套损耗占主要部分,因此本文利用有限元模型仿真得到屏蔽套损耗,仿真步骤如下。

- (1) 建立屏蔽套几何模型;
- (2) 设置屏蔽套材料参数;
- (3) 设置边界条件和零电流激励;
- (4) 划分网格;
- (5) 进行仿真和结果分析。

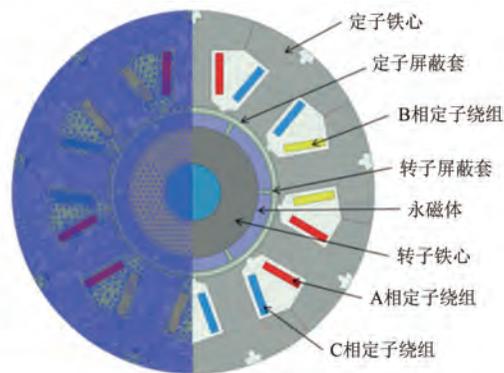


图1 电机有限元模型

Fig. 1 Finite element model of motor

2 定子齿开槽设计

为了使定子齿开辅助槽后电机不增加新的谐波,本文以电机定子齿中心线为对称轴开辅助槽。以矩形槽为例,当开单个辅助槽时本文将辅助槽设置在定子齿中心,其中槽口宽度为 w 、槽口深度为 h ,如图2所示。

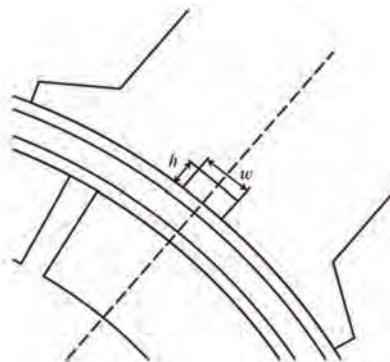


图2 辅助槽口宽度和深度

Fig. 2 Width and depth of auxiliary slot

当定子齿开多个辅助槽时,辅助槽沿定子齿中心线对称,其中辅助槽中心线与定子齿中心线夹角为偏移角 θ ,如图3所示。

3 定子齿开槽对电机齿槽转矩的影响

3.1 开槽数对电机齿槽转矩的影响

定子齿上开辅助槽可以增加齿槽转矩基波的周期数,从而降低齿槽转矩的幅值。但并不是在定子齿上开辅助槽的数量越多,电机齿槽转矩幅值降低的效果越好。开槽数量过多会削弱气隙磁密的幅值,同时也要根据电机结构和制造工艺选择开槽数。对于常规PMSM,基于定子齿部的大

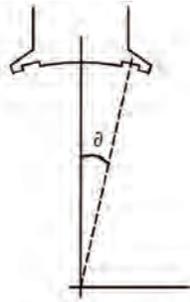


图 3 辅助槽偏移角 δ

Fig. 3 Auxiliary slot offset angle δ

小,辅助槽一般取 1 或 2,这与定转子的极槽配合有关,否则开槽会增加齿槽转矩。对于单元电机槽数 Z_0 为奇数的电机,可用最小辅助槽数为 2; Z_0 为偶数时,可用辅助槽数为 1^[30]。但该结论是否也适用于 CPMSM 仍不明确。

因此,对 6 极 9 槽结构的常规 PMSM 和 CPMSM 定子齿开 1~3 个宽度 $w=2\text{ mm}$ 、深度 $h=0.5\text{ mm}$ 的矩形槽,研究开槽数对电机齿槽转矩的影响。此处,为了避免不同偏移角对研究结果产生影响,开多个辅助槽时保持一定定子齿上的各矩形槽之间的齿距相等。开槽后定子齿模型如图 4 所示,常规 PMSM 不同开槽数的电机齿槽转矩如图 5 所示,CPMSM 不同开槽数的电机齿槽转矩如图 6 所示。

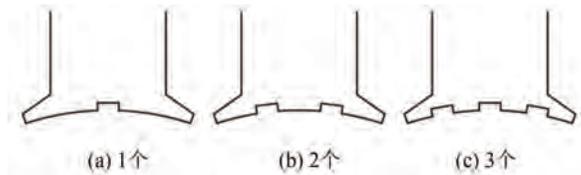


图 4 开槽后定子齿模型

Fig. 4 Stator tooth model after slotting

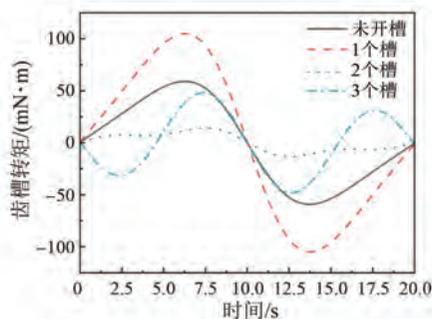


图 5 常规 PMSM 不同开槽数的齿槽转矩

Fig. 5 Cogging torque of conventional PMSM with different slot numbers

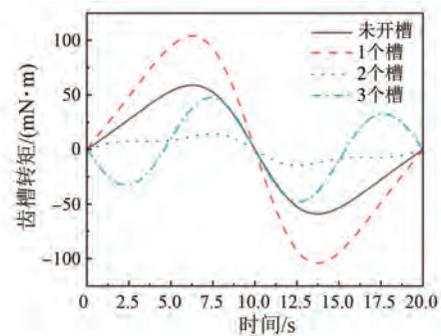


图 6 CPMSM 不同开槽数的齿槽转矩

Fig. 6 Cogging torque of CPMSM with different slot numbers

由图 5 和图 6 可知,电机定子齿开 1 个槽后电机齿槽转矩幅值均不减反增,开 2 个槽后齿槽转矩幅值降低。这是因为定子齿开 1 个槽后,电机总槽数由 9 槽变为 18 槽,而电机的基本齿槽转矩仍为 18 次;电机开 2 个和 3 个槽后,总槽数由 9 槽变为 27 槽和 36 槽,电机的基本齿槽转矩由原来的 18 次提高到 54 次和 36 次,同时转矩周期的机械角度也从 20° 变为 10° ,减小了一半。此外,电机开 2 个辅助槽时对电机齿槽转矩的削弱效果明显强于开 3 个辅助槽,文献[30]的结论也适用于 CPMSM。因此在本文后续的研究中均对电机定子齿开 2 个辅助槽。

未开槽时常规 PMSM 齿槽转矩幅值为 $59.05\text{ mN}\cdot\text{m}$,而 CPMSM 齿槽转矩幅值为 $58.99\text{ mN}\cdot\text{m}$,可知屏蔽套这一结构的存在对于电机齿槽转矩也存在较小的削弱效果。当常规 PMSM 开 2 个槽时齿槽转矩幅值由 $59.05\text{ mN}\cdot\text{m}$ 降低为 $14.20\text{ mN}\cdot\text{m}$,降低了 75.95%;CPMSM 开 2 个槽时齿槽转矩幅值由 $58.99\text{ mN}\cdot\text{m}$ 降低为 $14.42\text{ mN}\cdot\text{m}$,降低了 75.56%,与常规 PMSM 相比削弱效果减小了 0.39%,可知由于定子齿外包裹着屏蔽套导致开辅助槽对于 CPMSM 齿槽转矩削弱效果略逊于常规 PMSM。

3.2 开槽位置对电机齿槽转矩的影响

为研究开槽位置对电机齿槽转矩的影响,本文对定子齿开 2 个辅助槽,保持辅助槽口宽度 $w=2\text{ mm}$ 和深度 $h=0.5\text{ mm}$ 不变,仅改变槽口偏移角 δ ,偏移角范围为 $2.5^\circ\sim 14.5^\circ$,所得电机齿槽转矩幅值随偏移角变化的结果如图 7 所示。

由图 7 可知,随着偏移角的增大,矩形槽的齿

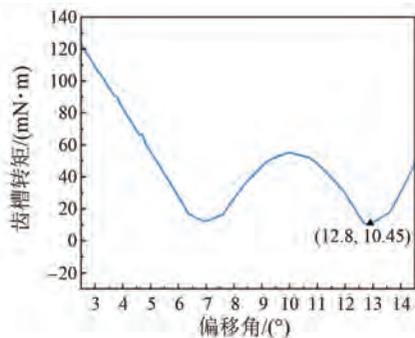


图7 不同偏移角下的齿槽转矩

Fig. 7 Cogging torque at different offset angles

槽转矩先减小后增大、再减小再增大;最佳偏移角为 12.8° ,此时齿槽转矩为 $10.45 \text{ mN}\cdot\text{m}$,比未开槽时降低了 82.29% 。这可能是因为,当电机的 $2p/z$ 为分数时,转子与每个槽口相对位置不同,每个槽所产生的齿槽转矩相位也不同,电机总的齿槽转矩不是简单地由单个齿槽转矩叠加而成,而是由不同相位的齿槽转矩正负两部分叠加^[31]。随着辅助槽偏移角度的改变,相邻槽口与转子的相对位置都发生了变化,削弱了不同相的齿槽转矩叠加抵消谐波的效果,从而使得总的齿槽转矩幅值并不是一直减小。当偏移角为 $2.5^\circ \sim 7^\circ$ 时,电机齿槽转矩的叠加使得谐波减小,所以齿槽转矩先减小;当偏移角为 $7^\circ \sim 10^\circ$ 时,由于相对位置的改变,对齿槽转矩谐波削弱效果减弱,谐波增大,使得齿槽转矩增大;同理可知当偏移角为 $10^\circ \sim 12.8^\circ$ 时,谐波减小使得齿槽转矩减小,偏移角为 $12.8^\circ \sim 14.5^\circ$ 时谐波增大,使得齿槽转矩又增大。

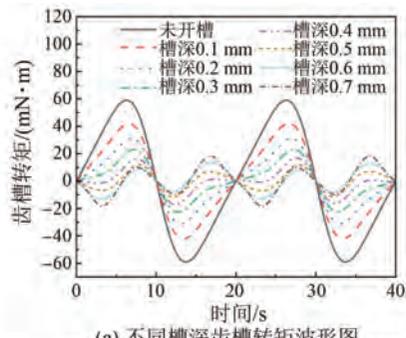
3.3 辅助槽的槽深、槽宽对电机齿槽转矩的影响

为了研究辅助槽宽度和深度对电机齿槽转矩的影响,本文保持辅助槽的偏移角 $\theta = 12.8^\circ$ 不变,仅改变辅助槽的宽度和深度。

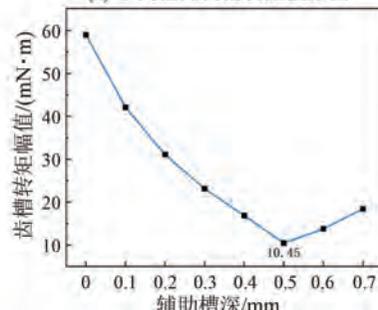
研究辅助槽深度对电机齿槽转矩的影响时,取辅助槽宽与电机槽口宽度一致,即 $w = 2 \text{ mm}$,分析了槽深 h 为 $0 \sim 0.7 \text{ mm}$ 时电机的齿槽转矩,所得齿槽转矩如图8所示。

由图8(b)可知,随着辅助槽深度的增加,齿槽转矩先减小后增大,在槽深为 0.5 mm 达到最低,此时齿槽转矩为 $10.45 \text{ mN}\cdot\text{m}$,比未开槽时降低了 82.29% 。

已知当辅助槽深度为 0.5 mm 时,齿槽转矩达到最小值,所以研究辅助槽宽度对齿槽转矩影响



(a) 不同槽深齿槽转矩波形图



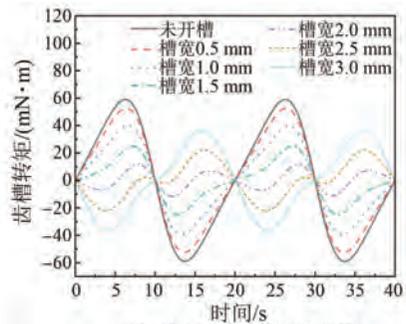
(b) 不同槽深齿槽转矩幅值

图8 不同槽深下的齿槽转矩

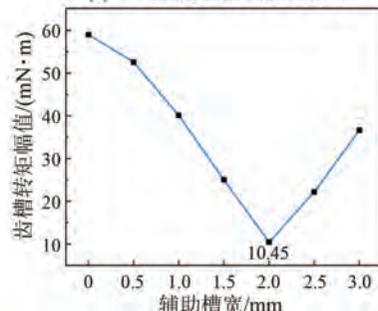
Fig. 8 Cogging torque at different slot depths

时取槽口深度 h 为 0.5 mm ,分析槽宽 w 为 $0 \sim 3.0 \text{ mm}$ 时电机的齿槽转矩,结果如图9所示。

由图9(b)可知,随着辅助槽宽的增大,齿槽转矩先减小后增大,在槽宽为 2.0 mm 处齿槽转矩



(a) 不同槽宽齿槽转矩波形图



(b) 不同槽宽齿槽转矩幅值

图9 不同槽宽下的齿槽转矩

Fig. 9 Cogging torque at different slot widths

达到最小值, 此时矩形槽齿槽转矩为 $10.45 \text{ mN}\cdot\text{m}$, 比未开槽时降低了 82.29% , 可知辅助槽宽和电机槽口宽度相等时, 可达到削弱齿槽转矩最好的效果。

为了更深入了解辅助槽尺寸对电机齿槽转矩的削弱效果, 本文也研究了辅助槽深度和宽度同时作用对电机齿槽转矩的影响, 取槽深 h 为 $0\sim 1 \text{ mm}$ 、槽宽 w 为 $0\sim 3.0 \text{ mm}$, 保持辅助槽偏移角 $\theta=12.8^\circ$ 不变, 所得齿槽转矩幅值分布如图 10 所示。

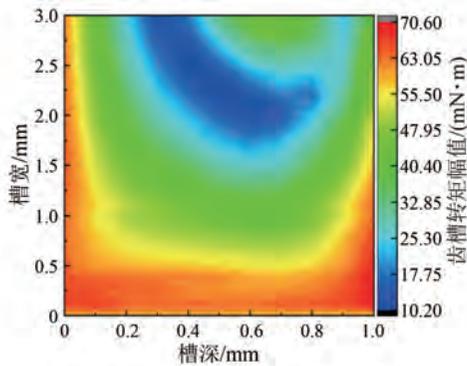


图 10 不同槽宽和槽深下的齿槽转矩

Fig. 10 Cogging torque at different slot widths and depths

由图 10 可知, 当槽宽小于 0.5 mm 时, 递增槽深对电机齿槽转矩的削弱效果较差; 当电机槽宽超过 1.5 mm 后, 改变槽深对齿槽转矩的削弱效果才逐渐超过槽宽削弱齿槽转矩的作用; 当槽宽为 $0.2\sim 0.8 \text{ mm}$ 时, 改变槽宽能显著削弱电机齿槽转矩。此外, 当宽度 $w=2.6 \text{ mm}$ 、深度 $h=0.4 \text{ mm}$ 时, 齿槽转矩最小, 其值为 $10.36 \text{ mN}\cdot\text{m}$ 。

3.4 辅助槽型对电机齿槽转矩的影响

为了研究辅助槽型对 CPMSM 齿槽转矩的影响, 本文采用矩形槽、三角槽和弧形槽 3 种不同辅助槽进行研究, 图 11 为不同辅助槽定子齿模型。分别对定子齿开两个 $w=2.6 \text{ mm}$ 、深度 $h=0.4 \text{ mm}$ 的矩形槽、三角槽和弧形槽, 保持辅助槽偏移角 $\theta=12.8^\circ$ 不变, 所得电机齿槽转矩如图 12 所示。

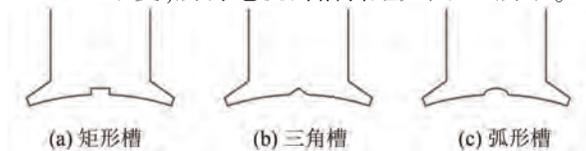


图 11 不同辅助槽定子齿模型

Fig. 11 Stator tooth models with different auxiliary slots

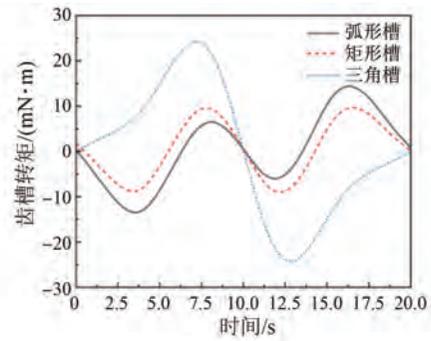


图 12 不同槽型下的 CPMSM 齿槽转矩

Fig. 12 Cogging torque of CPMSM with different slot types

由图 12 可知, 三种辅助槽型均显著降低了电机齿槽转矩, 未开槽时齿槽转矩为 $58.99 \text{ mN}\cdot\text{m}$, 矩形槽齿槽转矩为 $10.36 \text{ mN}\cdot\text{m}$, 相较于未开槽时降低了 82.44% ; 弧形槽齿槽转矩为 $14.45 \text{ mN}\cdot\text{m}$, 相较于未开槽时降低了 75.50% ; 三角槽齿槽转矩为 $24.40 \text{ mN}\cdot\text{m}$, 相较于未开槽时降低了 58.64% 。可见开矩形槽对电机齿槽转矩的抑制的效果最好, 其次是弧形槽, 最后是三角槽。这是因为不同形状的辅助槽会对齿槽磁导率产生不同的影响, 改变相对气隙磁导的分解系数, 从而影响齿槽转矩^[32]。

4 定子齿开槽前后的电机性能分析

开槽会导致电机定子齿部的磁阻发生变化, 进而对电机气隙磁密的分布产生影响^[33]。因此, 根据分析可知辅助槽型的深度和宽度对电机齿槽转矩的抑制效果不同, 现以矩形槽为例, 选取宽度 $w=2.6 \text{ mm}$ 、深度 $h=0.4 \text{ mm}$ 、偏移角 $\theta=12.8^\circ$ 抑制效果最好的开槽结构进行分析, 开槽前后气隙磁密及各谐波含量如图 13 所示。

由图 13(a) 可知, 开槽前后气隙磁密波形有所变化且开槽后气隙磁密波动增加, 这是由电机定子齿开辅助槽后的齿槽效应引起的。由图 13(b) 可知, 对定子齿开辅助槽会导致气隙磁密大部分谐波的幅值都有所降低, 其中基波由 0.884 T 变为 0.866 T , 降低了 2.03% ; 7 次谐波由 0.058 T 变为 0.046 T , 降低了 20.69% ; 3 次、9 次、11 次和 13 次谐波变化较小; 但是 5 次谐波却有所增大, 由 0.0755 T 变为 0.0763 T , 增大了 1.05% 。气隙磁密幅值的改变会引起 CPMSM 的电磁转矩、损

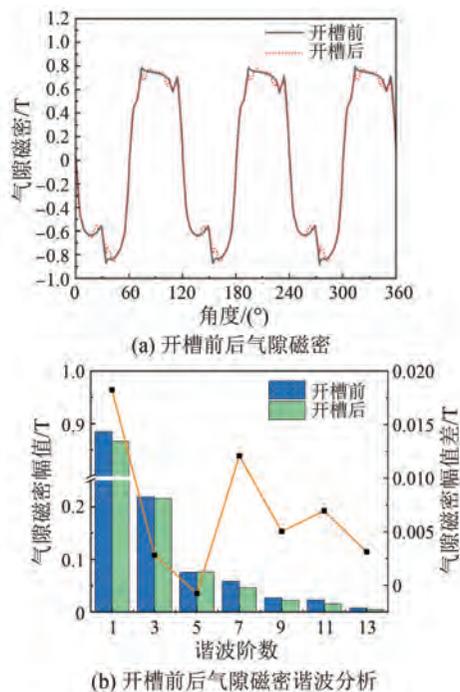


图 13 开槽前后气隙磁密对比

Fig. 13 Comparison of air gap flux density before and after slotting

耗分布和效率等性能发生变化,所以本文进一步研究对定子齿开槽后电机输出转矩的变化情况,结果如图 14 所示。

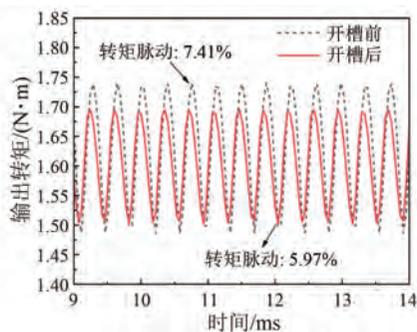


图 14 开槽前后输出转矩对比

Fig. 14 Comparison of output torque before and after slotting

由图 14 可知,定子齿开槽改善了电机的转矩脉动,未开槽时输出转矩最大值为 $1.73 \text{ N}\cdot\text{m}$,最小值为 $1.49 \text{ N}\cdot\text{m}$,平均转矩为 $1.62 \text{ N}\cdot\text{m}$;开槽后输出转矩最大值为 $1.69 \text{ N}\cdot\text{m}$,最小值为 $1.50 \text{ N}\cdot\text{m}$,平均转矩为 $1.59 \text{ N}\cdot\text{m}$,电机转矩脉动由 7.41% 降低到了 5.97% 。可见电机定子齿开槽不仅降低了电机的平均转矩,而且也降低了电机转矩脉动。

电机定子齿开槽后电机气隙磁密幅值和输出转矩有所减小,必定会对电机损耗和效率有所影响。因此,在保证开槽前后输出功率一致的情况下,研究开槽前后的损耗和效率变化情况,所得结果如表 2 所示。

表 2 开槽前后损耗和效率对比

Tab. 2 Comparison of losses and efficiency before and after slotting

参数名称	开槽前	开槽后
铜耗/W	36.43	37.05
铁耗/W	34.23	31.95
屏蔽套损耗/W	567.46	542.56
效率/%	69.33	70.16

定子齿开辅助槽后因齿槽转矩降低导致气隙磁密幅值降低,从而影响了磁通量,在保证输出功率不变的情况下,增大电流激励,使得铜耗从 36.43 W 变为 37.05 W ,增大了 1.7% 。而电机铁损由 34.23 W 变为 31.95 W ,减小了 6.67% ,这是因为铁心损耗包括磁滞损耗和涡流损耗,两者均与磁通密度的平方成正比,通过增加电流激励并不一定使得磁通密度增大。屏蔽套损耗由 567.46 W 变为 542.56 W ,降低了 4.38% 。开辅助槽后的电机效率略高于未开槽,故在保持输出功率不变的情况下对定子齿开辅助槽可以略微提高电机效率。

5 结语

本文通过对定子齿开辅助槽研究了 CPMSM 齿槽转矩的变化情况,分别讨论了开槽数、开槽位置、辅助槽的槽宽和槽深以及辅助槽型对电机齿槽转矩的影响,还对比了电机开辅助槽前后的性能参数,可以得出以下结论。

(1) CPMSM 的屏蔽套结构对电机的齿槽转矩也存在削弱效果。未开槽时 CPMSM 的齿槽转矩幅值比常规 PMSM 的幅值小 0.1% 。同时屏蔽套的存在也使得 CPMSM 开辅助槽后对齿槽转矩的削弱效果略逊于常规 PMSM。

(2) 当 CPMSM 开 2 个偏移角 $\theta = 12.8^\circ$ 、槽宽 $w = 2.6 \text{ mm}$ 和槽深 $h = 0.4 \text{ mm}$ 的矩形槽时对电机齿槽转矩抑制效果最好。此外,结果表明电机定子齿通过开辅助槽降低了气隙磁密幅值,降低了

屏蔽套损耗,提高了 CPMSM 效率,为 CPMSM 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

陈子淋、李明进行了方案设计、内容总结与论文撰写,陈子淋、王蓉进行了试验研究,陈子淋、李明和伦淑娴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 carried out by Chen Zilin and Li Ming. The experiment was conducted by Chen Zilin and Wang Rong. The manuscript was reviewed and revised by Chen Zilin, Li Ming, and Lun Shuxian. All authors have read and approved the final version of the paper for submission.

参考文献

- [1] 穆海琦,周舒昊,于添昊,等. 真空泵用屏蔽式永磁同步电机电磁场-温度场互相迭代计算方法[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(2): 113-122.
MU H Q, ZHOU S H, YU T H, et al. Electromagnetic field-temperature field iterative calculation method of canned permanent magnet synchronous motor for vacuum pump [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(2): 113-122.
- [2] 田士强,安辉,陆艳君,等. 真空泵用反凸极永磁同步电机设计与性能分析[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(5): 72-80.
TIAN S Q, AN H, LU Y J, et al. Design and performance analysis of negative salient pole permanent magnet synchronous motor for vacuum pump [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(5): 72-80.
- [3] 宿泽达,安跃军,安辉,等. 真空泵用定子永磁型与转子永磁型电机热性能对比[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(4): 58-64.
SU Z D, AN Y J, AN H, et al. Comparison of

thermal performance of stator permanent magnet motor and rotor permanent magnet motor for vacuum pumps [J]. Electric Machines & Control Application, 2021, 48(4): 58-64.

- [4] 毕晓舜,安跃军,杨维国,等. 真空干泵用屏蔽电机温度场仿真分析与试验[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(5): 64-69.
BI X S, AN Y J, YANG W G, et al. Simulation and experiment of temperature field of canned motor for vacuum dry pump [J]. Electric Machines & Control Application, 2020, 47(5): 64-69.
- [5] 董传友,金鹏飞,杨子豪,等. 低温高速永磁同步电机转子屏蔽套的设计及强度分析[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(7): 111-121.
DONG C Y, JIN P F, YANG Z H, et al. Design and strength analysis of rotor shielding sleeve of low temperature and high speed permanent magnet motor [J]. Electric Machines and Control, 2023, 27(7): 111-121.
- [6] 王秀和. 永磁电机[M]. 2 版. 北京: 中国电力出版社, 2011.
WANG X H. Permanent-Magnet Machine [M]. 2th ed. Beijing: China Electric Power Press, 2011.
- [7] 郭培遥,梁建伟,王昕华,等. 辐条式磁齿轮电机齿槽转矩抑制[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(7): 66-73+80.
GUO P Y, LIANG J W, WANG X H, et al. Cogging torque suppression of spoke magnetic gear motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(7): 66-73+80.
- [8] 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.
- [9] WANG X, FAN Y. Investigation on the performance of N-S consequent pole permanent magnet synchronous machines with different slot/pole combinations [J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2023, 19(4): 2283-2293.
- [10] 洪涛,鲍晓华,刘估炜,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.
HONG T, BAO X H, LIU J W, et al. Research on

- cogging torque of surface permanent magnet synchronous motor based on magnetic pole parameters [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2021, 48(1): 53-60.
- [11] 刘娜, 钟成堡, 陈飞龙, 等. 极弧系数对永磁同步电机齿槽转矩影响的分析[J]. *微特电机*, 2022, 50(8): 15-18.
- LIU N, ZHONG C B, CHEN F L, et al. Analysis of influence of pole arc coefficient on cogging torque of permanent magnet synchronous motor [J]. *Small & Special Electrical Machines*, 2022, 50(8): 15-18.
- [12] 杨志豪, 杨梦雪, 王思诺, 等. 定子斜槽对永磁同步电动机性能的影响[J]. *电气工程学报*, 2019, 14(3): 97-102.
- YANG Z H, YANG M X, WANG S N, et al. Effect of stator skewed slot on performance of permanent magnet synchronous motor [J]. *Journal of Electrical Engineering*, 2019, 14(3): 97-102.
- [13] SHI Z, SUN X D, CAI Y F, et al. Torque analysis and dynamic performance improvement of a PMSM for EVs by skew angle optimization [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2019, 29(2): 1-5.
- [14] 李博, 朱建国, 刘成成, 等. 集成压缩机用双定子磁通切换电机的设计及优化[J]. *电机与控制学报*, 2023, 27(1): 101-109.
- LI B, ZHU J G, LIU C C, et al. Design and optimization of dual-stator FSPMM for integrated compressor [J]. *Electric Machines and Control*, 2023, 27(1): 101-109.
- [15] WANG S, LI H F. Effects of rotor skewing on the vibration of permanent magnet synchronous motors with elastic-plastic stator [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2022, 37(1): 87-96.
- [16] 颜世龙, 张学义, 高艳红, 等. 转子内部开槽对分段永磁同步电机齿槽转矩的影响[J]. *西安理工大学学报*, 2022, 38(3): 433-441.
- YAN S L, ZHANG X Y, GAO Y H, et al. Influence of internal slotting of rotor on cogging torque of segmented permanent magnet synchronous motor [J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2022, 38(3): 433-441.
- [17] 庞亮, 赵朝会, 申合彪, 等. 双V型IPMSM辅助槽对齿槽转矩的影响[J]. *噪声与振动控制*, 2022, 42(5): 49-53.
- PENG L, ZHAO C H, SHEN H B, et al. Effect of double V-type auxiliary groove on the cogging torque of IPMSM [J]. *Noise and Vibration Control*, 2022, 42(5): 49-53.
- [18] 倪有源, 崔征山, 王群京. 转子有辅助槽的表贴式永磁同步电机解析法建模与优化[J]. *电机与控制学报*, 2021, 25(2): 65-71.
- NI Y Y, CUI Z S, WANG Q J. Analytical modeling and optimization of a surface-mounted permanent magnet machine with auxiliary slots in rotor [J]. *Electric Machines and Control*, 2021(2): 65-71.
- [19] XING Z Z, WANG X H, ZHAO W L. Research on weakening measure of radial electromagnetic force waves in permanent magnet synchronous motors by inserting auxiliary slots [J]. *The Institution of Engineering and Technology Electric Power Applications*, 2020, 14(8): 1381-1395.
- [20] WANJIKU J, KHAN M A, BARENDSE P S, et al. Influence of slot openings and tooth profile on cogging torque in axial-flux PM machines [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 62(12): 7578-7589.
- [21] 古海江, 黄文美, 王超, 等. 定子齿开槽对内置式永磁同步电机齿槽转矩的影响[J]. *电机与控制应用*, 2016, 43(8): 40-45.
- GU H J, HUANG W M, WANG C, et al. Influence of stator teeth notching on cogging torque of interior permanent magnet motor [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2016, 43(8): 40-45.
- [22] 张衍军, 叶乾杰, 赵新超, 等. 基于定子结构优化的永磁同步电机齿槽转矩抑制方法[J]. *微电机*, 2024, 57(4): 6-9+17.
- ZHANG Y J, YE Q J, ZHAO X C, et al. Cogging torque reduction method of permanent magnet motor based on optimization of stator structure [J]. *Micromotors*, 2024, 57(4): 6-9+17.
- [23] 闫宏亮, 武亚斌, 杨泽心, 等. 定转子双开槽对永磁同步电机齿槽转矩的影响[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2023, (7): 166-170.
- YAN H L, WU Y B, YANG Z X, et al. Effect of double slotting of the stator and rotor on the tooth torque of permanent magnet synchronous motors [J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2023, (7): 166-170.
- [24] 梁建伟, 刘欢, 刘细平, 等. 定子齿开槽对六相电机齿槽转矩的影响[J]. *机床与液压*, 2023, 51(9): 169-173.

- LIANG J W, LIU H, LIU X P, et al. Effect of stator tooth slotting on cogging torque of six-phase motor [J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2023, 51(9): 169-173
- [25] 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.
- GE B J, JIANG H, LIN P, et al. Cogging torque analysis of parallel shaft double rotor permanent magnet synchronous motor [J]. *Electric Machines and Control*, 2023, 27(8): 80-90.
- [26] 刘家琦, 白金刚, 郑萍, 等. 基于磁场调制原理的齿槽转矩研究[J]. *电工技术学报*, 2020, 35(5): 931-941.
- LIU J Q, BAI J G, ZHENG P, et al. Investigation of cogging torque based on magnetic field modulation principle [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(5): 931-941.
- [27] 李天元, 夏加宽, 龙宇航, 等. 不同转子辅助槽对内置式永磁同步电机齿槽转矩的影响[J]. *微特电机*, 2019, 47(5): 17-20+28.
- LI Y T, XIA J K, LONG Y H, et al. Influence of different rotor's auxiliary slots on cogging torque of IPM motor [J]. *Small & Special Electrical Machines*, 2019, 47(5): 17-20+28.
- [28] 吴昊. 永磁电机齿槽转矩的谐波分析[J]. *现代制造技术与装备*, 2023, 59(1): 136-138.
- WU H. Harmonic analysis of cogging torque of permanent magnet motor [J]. *Modern Manufacturing Technology and Equipment*, 2023, 59(1): 136-138.
- [29] 于添昊, 李明, 伦淑娴. 屏蔽套材料对屏蔽式永磁同步电机电磁场和温度场的影响研究[J]. *电机与控制应用*, 2024, 51(4): 90-101.
- YU T H, LI M, LUN S X. Study on the influence of can sleeve material on the electromagnetic field and temperature field of canned permanent magnet synchronous motor [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2024, 51(4): 90-101.
- [30] 王轶楠, 唐冲, 颜钢锋. 定子齿冠开辅助凹槽抑制永磁电机齿槽转矩[J]. *微电机*, 2014, 47(10): 20-23.
- WANG Y N, TANG C, YAN G F. Reducing cogging torque of permanent magnet motors by notching auxiliary slot in top of stator teeth [J]. *Micromotors*, 2014, 47(10): 20-23.
- [31] 黄守道, 刘婷, 欧阳红林, 等. 基于槽口偏移的永磁电机齿槽转矩削弱方法[J]. *电工技术学报*, 2013, 28(3): 99-106.
- HUANG S D, LIU T, OUYANG H L, et al. A method for reducing cogging torque by slot-opening shift in permanent magnet motors [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2013, 28(3): 99-106.
- [32] 陶彩霞, 付名禄, 高锋阳, 等. 辅助槽对内置式永磁同步电机齿槽转矩的影响[J]. *重庆大学学报*, 2021, 44(4): 64-76.
- TAO C X, FU M L, GAO F Y, et al. Effects of auxiliary slots on the cogging torque of an interior permanent-magnet synchronous motor [J]. *Journal of Chongqing University*, 2021, 44(4): 64-76.
- [33] 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.

收稿日期:2024-12-06

收到修改稿日期:2025-01-07

作者简介:

陈子淋(2002-),女,硕士研究生,研究方向为特种电机设计及多物理场研究,czl2023008018@bhu.edu.cn;

*通信作者:李明(1987-),男,博士,副教授,研究方向为特种电机设计及控制技术,liming1@qmail.bhu.edu.cn。