

DOI: 10.13382/j.jemi.B2002963

表贴式永磁同步电机新型偏心磁极优化设计*

齐晓东 高锋阳 李晓峰 李昭君 杨乔礼 袁成

(兰州交通大学 自动化与电气工程学院 兰州 730070)

摘要:针对高功率密度的轮毂式永磁同步电机涡流损耗大的问题,设计了一种新型偏心磁极结构的表贴式永磁同步电机,该电机磁极外圆弧偏心且内外圆弧具有不同的弧度。采用解析法分析了新型偏心磁极结构对气隙磁通密度和涡流损耗的影响。在有限元软件中对建立的10极12槽三维电机模型进行电磁及稳态温度场仿真分析。结果表明,在电机采用新型偏心磁极结构后,1 cm³的永磁体涡流损耗降低了17.20%,永磁体稳态温度降低了3℃,改善了轮毂式永磁同步电机的运行性能。

关键词: 轮毂式永磁同步电机;新型偏心磁极;涡流损耗;气隙磁通密度;稳态温度

中图分类号: TM351 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

Optimal design of new eccentric magnet pole for surface mounted permanent magnet synchronous motors

Qi Xiaodong Gao Fengyang Li Xiaofeng Li Zhaojun Yang Qiaoli Yuan Chen

(School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Aiming at the problem of high eddy current loss of in-wheel permanent magnet synchronous motor with high power density, a kind of surface mounted permanent magnet synchronous motor with novel magnetic pole structure is designed. The outer arcs of magnetic pole is eccentric and the inner and outer arcs have different arcs. The influence of the new eccentric magnetic pole structure on air gap flux density and eddy current loss is analyzed by analytical method. The 10-pole/12-slot three-dimensional motor model is built in the finite element software to simulate the electromagnetic and steady-state temperature fields. The results show that the eddy current loss of permanent magnet per cubic centimeter is reduced by 17.20% and the steady-state temperature of permanent magnet is reduced by 3℃, therefore, the structure improves the running performance of in-wheel permanent magnet synchronous motor.

Keywords: in-wheel permanent magnet synchronous motor; new eccentric pole; eddy current loss; air-gap flux density; the steady-state temperature

0 引言

轮毂电机直接驱动的电动车辆简化了机械传动结构,使得空间利用率更高、整车结构更加紧凑,便于采用各种新能源技术^[1-2]。然而轮毂内的永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)存在较大的永磁体涡流损耗,会使电机效率降低,并永磁体温度上升,甚至导致永磁体退磁^[3-4]。因此,对于处在空间狭小轮毂内的永磁同步电机,其涡流损耗的抑制十分重要。

国内外学者主要通过两个途径来降低涡流损耗。其一是对通过永磁体分段来增加涡流回路电阻。涡流损耗随永磁体分段数的增加而减小,但大于一定值后,涡流损耗又逐渐增大^[5]。当采用永磁体周向非均匀分段的结构时^[6-7],相比于均匀分段,减小了涡流损耗且每段永磁体涡流损耗均不相同。当采用永磁体部分分段的电机结构时,虽然减小了涡流损耗,但相比完全分段,涡流损耗没有显著下降^[8-9]。另一途径是优化气隙磁密波形。通过增加绕组层数减小绕组磁动势谐波,进而降低永磁体涡流损耗^[10],但多层绕组结构会使电机的恒功率运行能力

收稿日期: 2020-02-17 Received Date: 2020-02-17

* 基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1201602-06)、天津大学和兰州交通大学联合基金项目(2020056)资助

下降。也可采用不等匝齿线圈结构来优化分数槽集中绕组的磁动势波形^[11],但这种方法只有当齿线圈两边匝数比为 8/9 时才适用。文献[12-13]以 8 极 9 槽和 10 极 12 槽的 PMSM 为例,通过增加电机槽数的方法降低绕组的磁动势空间谐波,虽然降低了涡流损耗但改变了电机的绕组形式又使功率密度降低。文献[14]将两套互差 30° 电角度的三相绕组 Y-Δ 联接使绕组的磁动势谐波相互抵消,减小了永磁体涡流损耗,但只适用于含有 6 相绕组的 PMSM。采用分段永磁体结构减小涡流损耗是一种常用方法,但却未考虑分段后永磁体结构的稳定性和永磁体难以分割的问题。一些通过采用优化电机绕组磁动势波形的办法,具有特殊性和局限性,不适合用在高转矩密度的轮毂电机中。

文献[15]设计了一种表贴式偏心磁极 PMSM,分析了偏心距对空载气隙磁密的影响,推导了永磁体平行和径向充磁时偏心距和空载气隙磁密的表达式。文献[16]分析了表贴式 PMSM 偏心磁极对空载和负载气隙磁场的影响,推导了计及永磁体偏心时 PMSM 空载和负载气隙磁场的表达式。文献[17]设计了一种具有分段偏心磁极结构的表贴式 PMSM,通过优化偏心距和极弧系数,降低了气隙磁密和反电动势谐波,抑制了转矩波动。多数采用偏心磁极结构的文献均未考虑偏心磁极结构对涡流损耗的影响,只优化偏心距,优化变量较为单一。

同时,上述方法都没有考虑降低涡流损耗对永磁体温度的影响,忽略了对于表贴式 PMSM 最关键的问题。因此,设计一种具有新型偏心磁极结构的表贴式 PMSM 来降低永磁体涡流损耗和温升,相比于其他结构,降低了工艺难度。在有限元软件中,建立三维电机模型和稳态温度场模型,通过优化偏心磁极的 3 个变量验证新型偏心磁极结构的有效性和优越性,为 PMSM 新型偏心磁极结构的优化提供参考依据。

1 永磁体涡流损耗的理论分析

1.1 气隙磁通密度分析

假设定转子铁芯的磁导率无穷大,不计电机端部影响,永磁体被均匀磁化且退磁曲线是直线,电枢表面光滑,开槽用等效气隙考虑。

气隙中产生的气隙磁密 $B_1(x)$ ^[18-22] 如式(1)所示。

$$B_1(x) = \left[\frac{h_m}{\delta} + \frac{Z_1}{\pi} \cdot \frac{b_0}{D_c} \left(\frac{1}{1+h_0/\delta} - 1 \right) \right] \cdot \sum_{k_1=0}^{\infty} \frac{(-1)^{k_1}}{(2k_1+1)} \cdot \sin\left(\frac{(2k_1+1)\alpha_1\pi}{2}\right) \cdot \frac{4B_r}{\pi k_s \sigma_0} \sin((2k_1+1)p_1 x) \quad (1)$$

永磁体磁动势产生的齿谐波电动势对应的气隙磁密 $B_2(x)$,如式(2)所示。

$$B_2(x) = \sum_{k_1=0}^{\infty} \sum_{k_2=1}^{\infty} \frac{(-1)^{k_1+k_2} 4B_r}{(2k_1+1)k_2\pi^2 k_s \sigma_0} \cdot \frac{h_m}{\delta} \left(\frac{1}{1+h_0/\delta} - 1 \right) \cdot \sin\left(\frac{(2k_1+1)\alpha_1\pi}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{k_2 Z b_0}{D_c}\right) \sin(((2k_1+1)p_1 + k_2 Z)x) \quad (2)$$

式中: B_r 为永磁体剩磁; h_0 为槽深; Z 为定子槽数; D_c 为气隙直径; h_m 为永磁体磁化方向长度; b_0 为槽口宽度; σ_0 为漏磁系数; μ_r 为永磁体磁导率; k_s 为饱和系数; k_g 为气隙系数; δ 为气隙长度。

将 $B_1(x)$ 和 $B_2(x)$ 叠加可得气隙中的气隙磁密。由式(1)、(2)可知,气隙磁密的正弦性和谐波幅值受气隙长度、槽深、极弧系数、槽宽和磁极磁化方向长度的影响。因此,在其他条件一定时,仅改变磁极磁化方向长度,就可以降低负载气隙磁密谐波含量,改善负载气隙磁密波形。

1.2 涡流损耗分析

假设永磁材料为无限大薄片,外磁场随时间变化,沿 z 轴平行于表面,其内任意一点的涡流均由两个互相垂直的涡流分量组成。同时,任意一侧两点间的电位差相等,不计其厚度方向的电位降^[23]。涡流密度 J_e 、回路两端总电压差 $U(t)$ 及磁密 $B(t)$ 的关系如式(3)所示。

$$\begin{aligned} J_e &= \gamma U/L \\ 2U(t) &= \frac{d\phi(t)}{dt} = \frac{AdB(t)}{dt} \\ B(t) &= B_0 + B_a \\ B_a &= \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos k\omega t + b_k \sin k\omega t) \\ \frac{dB(t)}{dt} &= \frac{d(B_0 + B_a)}{dt} = \frac{dB_a}{dt} = \end{aligned} \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^{\infty} k\omega (b_k \cos k\omega t - a_k \sin k\omega t)$$

式中: γ 为永磁体电导率; A 为回路覆盖面积; U/L 分别为永磁体一侧两点间电压、距离; n 为谐波次数; B_0 为静态磁密; B_a 为电枢电流引起的动态磁密; a_k 和 b_k 为各次电流谐波分量在永磁体内产生动态磁密的幅值。

回路两端总电压差 $U(t)$ 的有效值及永磁体内的涡流密度 J_e 如式(4)、(5)所示。

$$U = \frac{\omega A}{2} \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} \frac{k^2(a_k^2 + b_k^2)}{2}} = A\pi f \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} \frac{k^2(a_k^2 + b_k^2)}{2}} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} J_e &= \frac{\pi A f \gamma}{L} \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} \frac{k^2(a_k^2 + b_k^2)}{2}} = \\ \pi f \gamma h_m &\sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} \frac{k^2(a_k^2 + b_k^2)}{2}} \end{aligned} \quad (5)$$

因此,涡流损耗功率密度 P_e 及涡流损耗密度 W_e 如

式(6)所示。

$$P_e = \frac{J_c^2}{\gamma} = \pi^2 f^2 \gamma h_m^2 \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} \frac{k^2 (a_k^2 + b_k^2)}{2}} \quad (6)$$

$$W_e = \pi^2 f \gamma h_m^2 \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} \frac{k^2 (a_k^2 + b_k^2)}{2}}$$

因此,永磁体涡流损耗为涡流损耗密度的体积积分。由式(6)可知,影响永磁体内涡流损耗密度的因素主要为磁极磁化方向长度 h_m 、电导率 γ 和谐波的次数及幅值。在电导率一定时,永磁体的磁极磁化方向长度 h_m 和负载气隙磁场中的谐波分量的减小,就可以降低涡流损耗。因此,通过改变磁极磁化方向长度可以改善永磁体的运行环境。

2 电机损耗分析

电机损耗会转化成热,既降低了电机的效率,又使电机内温度上升,降低设备的可靠性和安全性。尤其是体积小、不易散热且安装在轮毂内的 PMSM。除了永磁体涡流损耗,PMSM 的损耗还包括定子铁耗、转子损耗、绕组铜耗。

2.1 定子铁耗

电机的磁场是包括大量谐波的不规则椭圆形旋转磁场^[24],定子铁耗如式(7)所示。

$$P_{Fe} = P_h + P_c + P_e$$

$$P_h = K_h f \sum_{k=0}^{\infty} k (B_{kmax}^\alpha + B_{kmin}^\alpha)$$

$$P_c = K_c f^2 \sum_{k=0}^{\infty} k^2 (B_{kmax}^2 + B_{kmin}^2) \quad (7)$$

$$P_e = \frac{K_e}{(2\pi)^{3/2}} \frac{1}{T} \int_0^T \left(\left| \frac{dB_r(t)}{dt} \right|^{1.5} + \left| \frac{dB_\theta(t)}{dt} \right|^{1.5} \right) dt$$

式中: P_{Fe} 为定子总铁耗; P_h 为磁滞损耗; P_c 为涡流损耗; P_e 为附加损耗; α 为与材料有关的常数; K_h 为磁滞损耗系数; K_c 为涡流损耗系数; K_e 为附加损耗系数; B_{kmax} 和 B_{kmin} 为第 k 次谐波椭圆形磁场的长轴与短轴; $B_r(t)$ 和 $B_\theta(t)$ 分别为磁通密度的径向分量和切向分量。

2.2 绕组铜耗

定子绕组铜耗也是 PMSM 的主要热源,其计算公式如式(8)所示。电机的铜耗与温度有关,随着温度的升高,铜耗也会变大。

$$P_{Cu} = m I^2 R \quad (8)$$

$$R = \rho \frac{l}{s}$$

式中: m 为电机相数; l 为材料长度; ρ 为电阻率,随着温度的升高而增大; s 为材料截面积; I 为绕组相电流有效值; R 为每相绕组的有效电阻。

2.3 转子损耗

电机转子损耗主要分为风摩损耗和转子中的电磁损耗^[25-26]。高速电机的转子损耗一般只考虑风摩损耗。风摩损耗如式(9)所示。

$$P = k C_f \pi \rho \omega^3 r^4 l \quad (9)$$

式中: k 为转子表面粗糙度; C_f 为摩擦系数; ρ 为气体的密度; l 为转子的长度。

3 电磁仿真分析

图 1 所示为表贴式 PMSM 转子结构。传统偏心磁极结构仅通过改变永磁体偏心距来优化空载或负载气隙磁密,优化变量和优化目标较为单一,无法充分发挥偏心磁极结构的优越性,而新型偏心磁极结构通过优化磁极磁化方向长度 h_m 来优化负载气隙磁密波形、永磁体涡流损耗和温升。新型偏心磁极结构通过改变磁极中心厚度来改变磁极中心的磁化方向长度;通过改变磁极外圆弧度来进一步减小磁极两侧的磁化方向长度。外圆弧的圆心在坐标轴 y 上,其与圆心的距离即为偏心距 h ,图 2 所示为新型偏心磁极结构示意图。 $R_1(OA)$ 为转子外半径, h_{max} 为磁极中心最大厚度, O 为圆心, O_1 为偏心后圆心, $h(OO_1)$ 为偏心距。

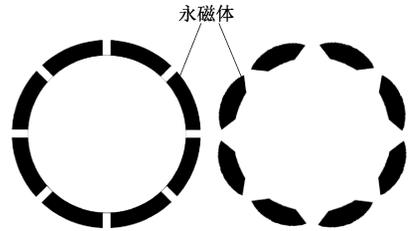


图 1 表贴式永磁同步电机转子结构
Fig. 1 Rotor structure of a surface-mounted PMSM

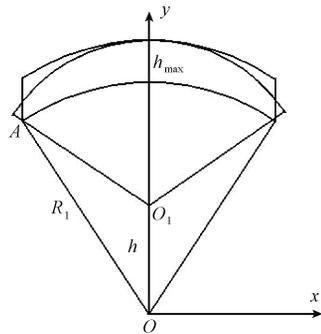


图 2 新型偏心磁极结构示意图
Fig. 2 Structure diagram of new eccentric magnetic pole

在 Maxwell 中进行参数化建模,建立三维 PMSM 模型,如图 3 所示。以 10 极 12 槽表贴式 PMSM 为例,电机

的主要参数如表 1 所示,先对两侧磁极磁化方向长度进行两变量优化缩小范围,求出外圆弧偏心距和圆心角的最优解,然后在最优解的范围内对外圆弧偏心距、圆心角以及磁极中心厚度进行三变量优化,求出外圆弧的最优偏心距、最优弧度以及磁极中心最优厚度,仿真分析了磁极不偏心及采用新型偏心磁极结构两种情况下的气隙磁密波形、电磁转矩波形、涡流损耗波形以及定子铁耗波形,验证改变磁极磁化方向长度可以提高 PMSM 电磁性能的理论,证明新型偏心磁极结构的有效性和优越性。

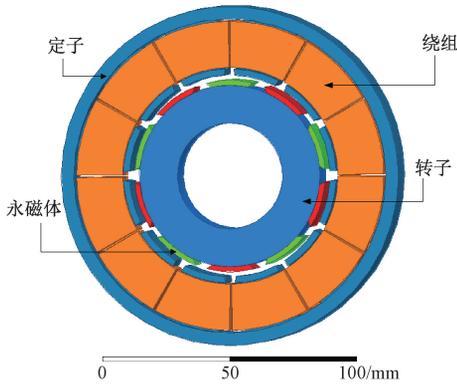


图 3 表贴式永磁同步电机新型偏心磁极结构
Fig. 3 A new type of eccentric pole structure of permanent magnet synchronous motor

表 1 电机模型参数
Table 1 Parameters of motor model

参数	数值
定子外半径/mm	67.31
定子内半径/mm	40
极对数	5
转子外半径/mm	36
定子槽数	12
气隙长度/mm	4
磁极中心厚度/mm	2
电机转速/(r · min ⁻¹)	12 000

改变有限元模型中的偏心距 h 以及外圆弧对应圆心角 θ ,使 h 在 1~8 mm、 θ 在 22°~36°,每隔 1 mm 以及 2°取一个偏心距值和角度值进行双变量优化并用傅里叶分析气隙磁密波形,得到不同偏心距和角度时的气隙磁密的谐波畸变率(THD)。由式(1)、(2)可知,改变 h 及 θ 的值可以使磁极两侧磁化方向长度减小,进而降低气隙内谐波含量,使气隙磁密曲线接近正弦。

图 4 所示为偏心距 h 在 1~5 mm 以及外圆弧对应圆心角 θ 为 26°、28°、30°、32°及 34°时气隙磁密的谐波畸变率,从图 4 可以看出,THD 随着 h 和 θ 的增加先减小再增大,在 $h = 2$ mm 及 $\theta = 30^\circ$ 时,谐波畸变率达到最小值 30.51%,此时波形最接近正弦分布,针对表 1 所示电机

样机,磁极最优偏心距为 2 mm,外圆弧对应最优圆心角为 30°。说明磁极两侧磁化方向长度的改变改善了负载气隙磁密波形,降低了负载气隙磁密。

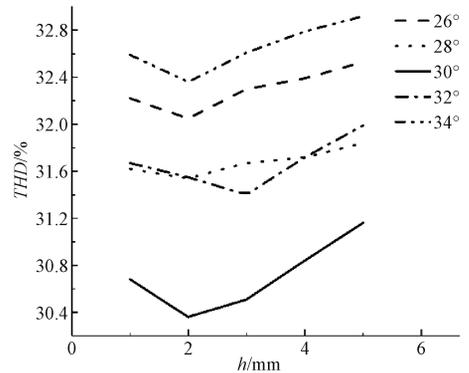


图 4 谐波畸变率变化曲线
Fig. 4 The rate curve of the harmonic distortion

为进一步验证改变磁极磁化方向长度对于负载气隙磁密和涡流损耗的影响,在双变量优化的基础上进行三变量优化,在改变磁极两侧磁化方向长度的同时,改变磁极中心的磁化方向长度即磁极中心厚度,寻求最优磁极参数。改变有限元模型中的偏心距 h 、外圆弧对应圆心角 θ 以及磁极中心厚度 h_m ,使 h 在 1~3 mm、 θ 在 29°~31°、 h_m 在 1.8~2.2 mm 内,使 h 每隔 1 mm、 θ 每隔 1°、 h_m 每隔 0.2 mm 取一个值进行三变量仿真。

图 5 所示为 h 在 1~3 mm、 θ 在 29°~31°,不同磁极中心厚度下谐波畸变率 THD 和单位体积涡流损耗的变化曲线。图 5(a)、(c)、(e) 分别为 $h_m = 1.8$ mm、 $h_m = 2$ mm、 $h_m = 2.2$ mm 时的谐波畸变率。图 5(b)、(d)、(f) 分别为 $h_m = 1.8$ mm、 $h_m = 2$ mm、 $h_m = 2.2$ mm 时的每立方厘米涡流损耗。因为永磁体体积的大幅度改变,所以同时采用谐波畸变率和单位体积下的涡流损耗来综合评估磁极性能,选取最优解。由图 5(a)、(c)、(e) 可以看出,THD 随着 h 和 θ 的增大,先减小再增大。但随着 h_m 的增大,THD 逐渐减小。由图 5(b)、(d)、(f) 可以看出,每立方厘米的涡流损耗随着 h 和 θ 的增大,先减小后增大。随着 h_m 的增大,虽然减小了 THD,但同时增大了 1 cm³ 的涡流损耗。因此,综合两者,在 $h_m = 2$ mm、 $h = 2$ mm、 $\theta = 30^\circ$ 时有最优性能,此时 THD 为 30.51%,每立方厘米的涡流损耗为 12.471 W。

图 6 所示为磁极不偏心和采用最优新型磁极结构时,负载气隙磁通密度 B 随气隙弧长变化的变化曲线,当磁极不偏心时,负载气隙磁密 THD 为 31.92%,而采用最优新型磁极结构时,负载气隙磁密 THD 为 30.51%,THD 减小了 1.41%,降低了负载气隙磁密总谐波含量,相对于磁极不偏心时,其波形更接近正弦,改善了 PMSM 的负载气隙磁密波形,抑制了负载气隙磁密的谐波。

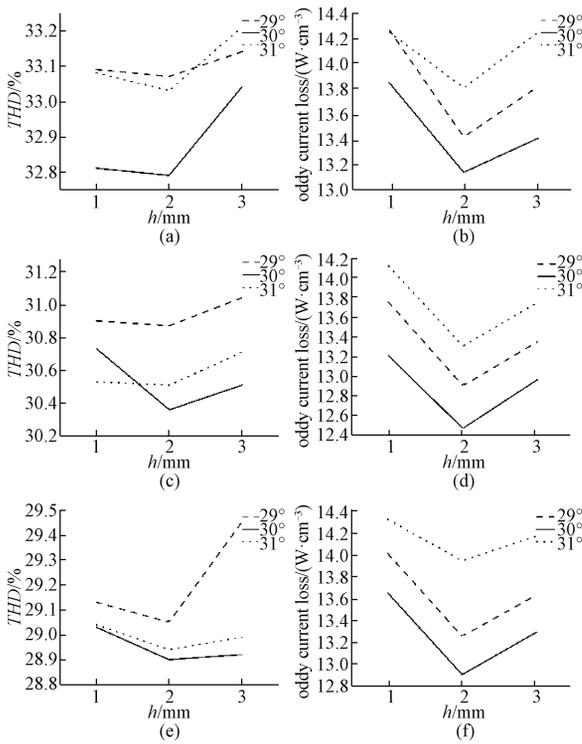


图 5 不同变量下谐波畸变率和单位体积涡流损耗变化曲线

Fig. 5 Variation curves of harmonic distortion rate and eddy current loss per unit volume under different variables

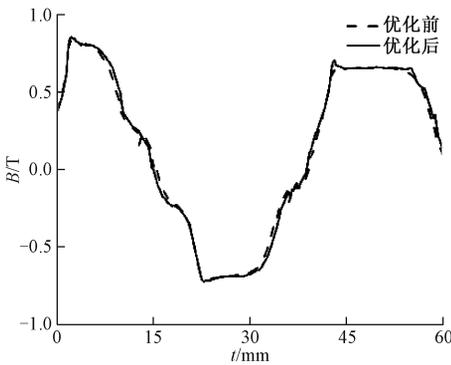


图 6 气隙磁密变化曲线

Fig. 6 The rate curve of air-gap flux density

图 7 所示为采用最优新型偏心磁极结构前后电磁转矩的变化曲线。当磁极不偏心时,电磁转矩稳定后为 8.35 N·m,而当采用最优新型偏心磁极结构时,电磁转矩稳定后为 8.11 N·m,在改变磁极结构后转矩降低了 2.87%,说明相比于表贴式 PMSM,采用新型偏心磁极结构对于电磁转矩的影响较小,不会引起电磁转矩的突变,符合实际工程对于电磁转矩的要求。

由图 7 可知,在改变磁极结构后,减小了磁极磁化方向长度、谐波含量及幅值,从而降低了涡流损耗。图 8 所示为采用最优新型偏心磁极结构前后永磁体涡流损耗变

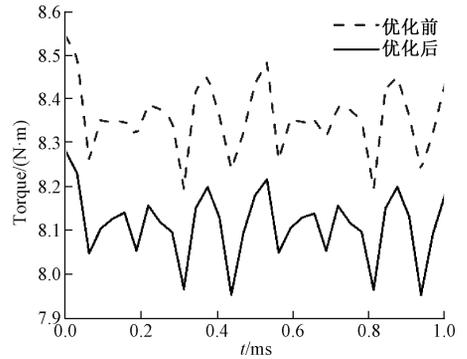


图 7 电磁转矩变化曲线

Fig. 7 The rate curve of electromagnetic torque

化曲线。在磁极不偏心时永磁体涡流损耗稳定后为 221.993 W,每立方厘米的涡流损耗为 15.062 W。而当采用最优新型偏心磁极结构后永磁体体积增大,永磁体涡流损耗稳定后为 191.187 W,每立方厘米的涡流损耗为 12.471 W。可见总的涡流损耗降低了 13.88%,每立方厘米的涡流损耗降低了 17.2%,说明相比于表贴式 PMSM,采用新型偏心磁极结构可以大幅降低永磁体涡流损耗,验证了改变磁极磁化方向长度可以降低涡流损耗的理论。

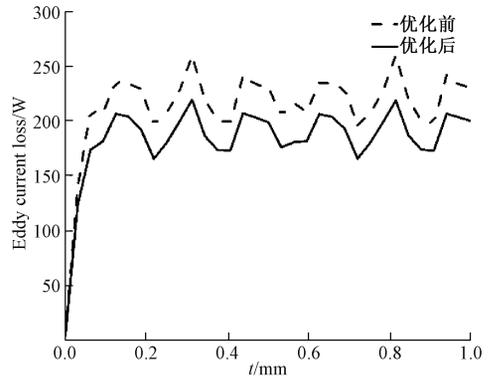


图 8 永磁体涡流损耗变化曲线

Fig. 8 The rate curve of eddy current loss of permanent magnet

图 9 所示为采用最优新型偏心磁极结构前后定子铁耗变化曲线,当磁极不偏心时,定子铁耗稳定后为 179.83 W,而当采用最优新型偏心磁极结构时,定子铁耗稳定后为 175.29 W,铁耗降低了 2.52%。

4 温度场仿真分析

采用单向耦合法在有限元软件中进行温度场仿真分析^[27]。在电机温度场求解域中,存在定转子铁芯、永磁体、定子绕组及气隙这几种基本结构,表 2 为电机各结构的导热系数,各个结构的导热系数差别较大,可在稳态温度场中建立三维 PMSM 模型进行仿真分析。

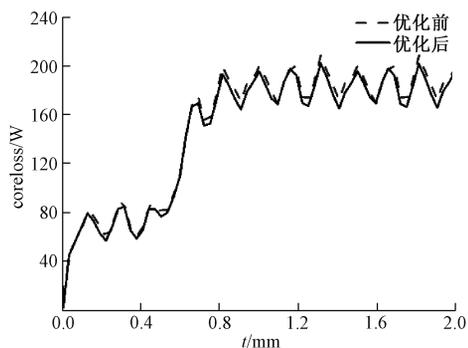


图 9 定子铁耗变化曲线

Fig. 9 The rate curve of iron loss of stator

表 2 电机各结构导热系数

Table 2 Heat conductivity coefficient of each structure of the motor

结构	导热系数/(W·m ⁻² /℃)
气隙	0.025 7
定转子铁芯	74
永磁体	8
绕组用铜	394

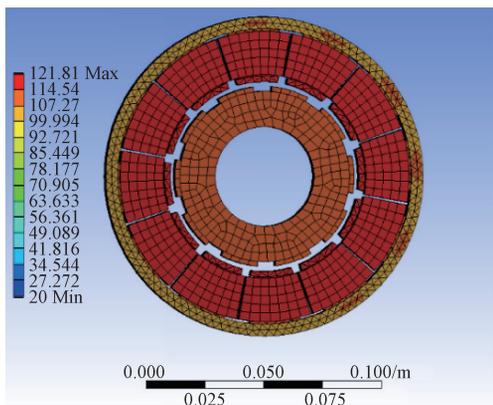


图 10 磁极不偏心时电机稳态温度分布

Fig. 10 Steady-state temperature distribution of motor with non-eccentric magnetic poles

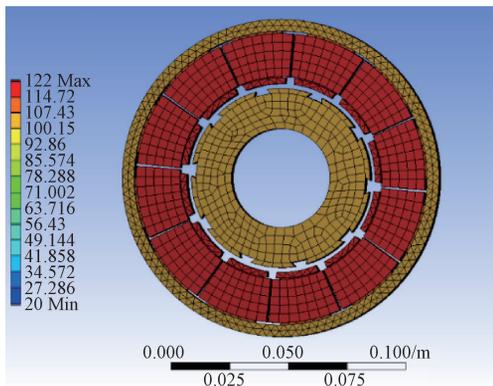


图 11 最优偏心磁极时电机稳态温度分布

Fig. 11 Steady-state temperature distribution of motor with optimal eccentric magnetic pole

图 10 和 11 所示为定子绕组温度为 120 ℃,电机外表面散热为 100 W·m⁻²/℃时,稳态温度场中采用最优新型偏心磁极结构前后电机各部分温度分布,从图 10 可以看出,采用磁极不偏心结构时,转子和永磁体的温度均约为 109 ℃,定子温度大约为 105 ℃,且定子外表面会出现局部温度过高的现象。由图 11 可知,当采用最优偏心距结构时,转子和永磁体的温度均约为 106 ℃,定子温度大约为 105 ℃,解决了定子外表面出现的局部温度过高的问题。新型偏心磁极结构降低了永磁体和转子温度,均约为 3 ℃,说明新型偏心磁极结构对于永磁体和转子温升具有改善作用,对于实际工程应用具有重要意义。

5 结 论

以降低轮毂式永磁同步电机的涡流损耗为目标,提出了一种新型偏心磁极结构,在电磁场和温度场中对 PMSM 进行了仿真分析,对磁极磁化方向长度即永磁体偏心距、外圆弧的弧度以及磁极中心厚度进行三变量优化,得出如下结论。

- 1) 新型偏心磁极结构相比于传统表贴式永磁同步电机,降低了负载气隙磁密 THD、电磁转矩以及每立方厘米的涡流损耗,提高了表贴式 PMSM 的电磁性能。
- 2) 采用新型偏心磁极结构,增加了永磁体体积,降低了定子的铁耗、永磁体和转子的稳态温度,解决了定子表面局部温度和永磁体温度过高的问题,改善了轮毂式永磁同步电机的运行性能,对于实际工程应用具有重要意义。
- 3) 相比于其他改变磁极来降低涡流损耗的结构,新型偏心磁极结构在降低涡流损耗的同时,也保持了永磁体的完整性,降低了工艺难度和成本,适合应用于实际工程中。
- 4) 新型偏心磁极结构适用于表贴式永磁同步电机,尤其是空间受限的轮毂式永磁同步电机,而对于新型偏心磁极结构的永磁同步电机的齿槽转矩的抑制,后续有待进一步研究。

参考文献

[1] 李勇,徐兴,孙晓东,等. 轮毂电机驱动技术研究概况及发展综述 [J]. 电机与控制应用, 2017, 44 (6): 1-7, 18.
 LI Y, XU X, SUN X D, et al. Review and future development of in-wheel motor drive technology [J]. Electric Machines and Control Applications, 2017, 44 (6): 1-7, 18.

[2] 褚文强,辜承林. 电动车用轮毂电机研究现状与发展趋势 [J]. 电机与控制应用, 2007, 34 (4): 1-5.

- ZHAI W Q, QI CH L. Application status and developing trend of in-wheelmotors used for electric automobile[J]. *Electric Machines and Control Applications*, 2007, 34(4):1-5.
- [3] 陈萍,唐任远,佟文明,等. 高功率密度永磁同步电机永磁体涡流损耗分布规律及其影响[J]. *电工技术学报*, 2015, 30(6):1-9.
- CHEN P, TANG R Y, YAN W M, et al. Permanent magnet eddy current loss and its influence of high power density permanent magnet synchronous motor [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2015, 30(6):1-9.
- [4] 任庆,桂祈祯. 基于永磁体温度对车用电机性能影响分析[J]. *机械制造与自动化*, 2018, 47(2): 213-217.
- REN Q, GUI Q ZH. Influence analysis of temperature of permanent magnet on performance of vehicle motor [J]. *Mechanical Engineering & Automation*, 2018, 47(2): 213-217.
- [5] 张磊,高春侠. 永磁同步电机磁钢涡流损耗模型及其衡量指标[J]. *电机与控制学报*, 2013, 17(7): 46-53.
- ZHANG L, GAO CH X. Eddy-current loss model and index for magnets of permanent magnet synchronous motors [J]. *Journal of Electric Machines and Control*, 2013, 17(7): 46-53.
- [6] MADINA P, POZA J, UGALDE G, et al. Analysis of non-uniform circumferential segmentation of magnets to reduce eddy-current losses in SPMSM machines[C]. *Xth International Conference on Electrical Machines*. IEEE, 2012.
- [7] WANG J, ATALLAH K, CHIN R, et al. Rotor eddy-current loss in permanent-magnet brushless AC machines[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2010, 46(7): 2701-2707.
- [8] WILLS D A, KAMPER M J. Reducing PM eddy current rotor losses by partial magnet and rotor yoke segmentation [C]. *XIX International Conference on Electrical Machines*, IEEE, 2010.
- [9] ZOUBIDA B, MEKIDECHE M R. Investigation of magnet segmentation techniques for eddy current losses reduction in permanent magnets electrical machines[J]. *Compel International Journal for Computation & Mathematics in Electrical & Electronic Engineering*, 2015, 34(1): 46-60.
- [10] WANG Y, QU R, LI J. Multilayer windings effect on interior PM machines for EV applications [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2015, 51(3): 2208-2215.
- [11] DAJAKU G, GERLING D. Eddy current loss minimization in rotor magnets of PM machines using high-efficiency 12-teeth/10-slots winding topology [C]. *International Conference on Electrical Machines Systems*, IEEE, 2011.
- [12] WANG J, PATEL V I, WANG W. Fractional-slot permanent magnet brushless machines with low space harmonic contents[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2014, 50(1):1-9.
- [13] DAJAKU G, GERLING D. A novel 24-Slots/10-poles W-inding topology for electric machines [C]. *Electric Machines & Drives Conference*, IEEE, 2011.
- [14] ABDEL-KHALIK A S, AHMED S, MASSOUD A M. Low space harmonics cancelation in double-layer fractional slot winding using dual multiphase winding [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2015, 51(5):1-10.
- [15] 徐媛媛,葛红娟,荆岩. 永磁同步电机偏心磁极优化设计[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2013, 34(7): 873-877.
- XU Y Y, GE H J, JING Y. Optimal design of eccentric poles for permanent magnet synchronous motors [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2013, 34(7): 873-877.
- [16] 金永星,王爱元,孙健,等. 表贴式永磁同步电机永磁体偏心气隙磁场解析[J]. *电机与控制应用*, 2019, 46(4):77-81,91.
- JIN Y X, WANG AI Y, SUN J, et al. Analysis of eccentric air gap magnetic field of permanent magnet for surface mount permanent magnet synchronous motor [J]. *Motors & Control Applications*, 2019, 46(4): 77-81, 91.
- [17] 罗正豪,井立兵,高起兴. 分段偏心磁极表贴式永磁电机优化设计[J]. *微特电机*, 2018, 46(10): 25-27, 37.
- LUO ZH H, JING L B, GAO Q X. Optimized design of segmented eccentric pole surface mount permanent magnet motor [J]. *Weite Motors*, 2018, 46(10): 25-27, 37.
- [18] 于吉坤,李立毅,张江鹏,等. 定子开槽永磁同步电机气隙比磁导解析计算[J]. *电工技术学报*, 2016, 31(S1):51-58.
- YU J K, LI L Y, ZHANG J P, et al. Analytical calculation of air gap relative permeance in slotted permanent magnet synchronous motor [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2016, 31(S1):51-58.
- [19] 丁鸿昌,刘鲁伟,吕楠,等. 表贴式永磁同步电机气隙磁密的计算与分析[J]. *计算机仿真*, 2018, 35(4): 184-188.
- DING H CH, LIU L W, LU N, et al. Calculation and analysis of air gap flux density for surface permanent magnet synchronous motor [J]. *Computer Simulation*,

- 2018, 35(4): 184-188.
- [20] 刘珂, 让余奇. 表贴式永磁同步电动机永磁体气隙磁场解析计算[J]. 舰船电子工程, 2014, 34(6): 147-151.
LIU K, RANG Y Q. Analytical calculation of permanent magnet's air gap magnetic field of surface permanent magnet synchronous motor[J]. Ship Electronic Engineering, 2014, 34(6): 147-151.
- [21] 王巍, 宋志环, 于慎波, 等. 分数槽永磁同步电机气隙磁场的分析与噪声抑制[J]. 微电机, 2010, 43(6): 1-6.
WANG W, SONG ZH H, YU SH B, et al. Analysis of air gap magnetic field and noise suppression of permanent magnet synchronous machine with fractional slot [J]. Micromotors, 2010, 43(6): 1-6.
- [22] 卢晓慧, 梁加红. 表面式永磁电机气隙磁场分析[J]. 电机与控制学报, 2011, 15(7): 14-20.
LU X H, LIANG J H. Air gap magnetic field analysis of surface-mounted permanent magnet motors[J]. Journal of Electric Machines and Control, 2011, 15(7): 14-20.
- [23] 王晓远, 李娟, 齐利晓, 等. 永磁同步电机转子永磁体内涡流损耗密度的计算[J]. 沈阳工业大学学报, 2007, 29(1): 48-51.
WANG X Y, LI J, QI L X, et al. Calculation of eddy current loss density distribution in permanent magnet of PMSM [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2007, 29(1): 48-51.
- [24] 孔晓光, 王凤翔, 徐云龙, 等. 高速永磁电机铁耗的分析和计算[J]. 电机与控制学报, 2010(9): 29-33.
KONG X G, WANG F X, XU Y L, et al. Analysis and calculation of iron loss of high-speed permanent magnet motors [J]. Journal of Motors and Control, 2010(9): 29-33.
- [25] 邢军强, 王凤翔, 张殿海, 等. 高速永磁电机转子空气摩擦损耗研究[J]. 中国电机工程学报, 2010(27): 14-19.
XING J Q, WANG F X, ZHANG D H, et al. Research on air friction loss of high speed permanent magnet motor rotor [J]. Proceedings of the CSEE, 2010 (27): 14-19.
- [26] 王要强, 冯玉涛, 马小勇, 等. 永磁同步电机转子位置复合检测及起动运行策略[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(8): 230-238.
WANG Y Q, FENG Y T, MA X Y, et al. Composite detection and starting operation strategy for rotor position of permanent magnet synchronous motor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(8): 230-238.
- [27] 刘莘, 张小平, 匡斯建, 等. 电机温度场分析中三维有限元模型网格划分方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(8): 173-178.
LIU P, ZHANG X P, KUANG S J, et al. Meshing method of three-dimensional finite element model in motor temperature field analysis [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2019, 33(8): 173-178.

作者简介



齐晓东, 2017 年于大连交通大学获得学士学位, 现为兰州交通大学硕士研究生, 主要研究方向为永磁同步电机的优化设计和永磁同步电机的损耗计算。

E-mail: 782311500@qq.com

Qi Xiaodong received his B. Sc. degree from Dalian Jiaotong University in 2017. Now he is a M. Sc candidate at Lanzhou Jiaotong University. His main research interests include optimization design and loss calculation of permanent magnet synchronous motors.