

改进型 Halbach 永磁阵列的设计与分析

梁家凡, 吴强

(上海电力学院 电气工程学院, 上海 200090)

摘要:针对 Halbach 永磁阵列提出了 2 种改进型 Halbach 永磁阵列, 通过改变 Halbach 阵列的结构提高永磁同步电机的电磁性能, 增加气隙磁通密度基波幅值和改善磁通密度波形的正弦性。设计了 2 台永磁同步电机模型, 运用有限元分析比较两种新型双层 Halbach 阵列对气隙磁通密度、反电动势、转矩脉动、效率的影响, 通过仿真结果与实验对比验证所提结构的合理性和正确性。

关键词: Halbach 永磁阵列; 电磁性能; 有限元分析

中图分类号: TM351 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed19216

Design and Analysis of Improved Halbach Permanent Magnet Array

LIANG Jiafan, WU Qiang

(School of Electric Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: Two modified Halbach permanent magnet arrays were proposed for Halbach permanent magnet arrays. The electromagnetic performance of the permanent magnet synchronous motor was improved by changing the structure of the Halbach array, the amplitude of the fundamental flux of the air gap and the sine of the flux density waveform were improved. By designing two permanent magnet synchronous motor models, the effects of two new double-layer Halbach arrays on air gap magnetic flux density, back EMF, torque ripple, and efficiency were compared using finite element analysis. The rationality and correctness of the proposed structure were verified by simulation results and experiments

Key words: Halbach magnet array; electromagnetic performance; finite element analysis

永磁同步电机具有高效率、高功率密度和转矩密度、调速范围广等特点, 在工业领域被广泛应用, 特别是在电动汽车和轨道交通行业。永磁同步牵引电机已经成为了研究的热点, 由于永磁同步牵引电机对功率因素和转矩脉动、效率提出了较高的要求, 所以电机设计开发时气隙磁通密度和反电动势是重要考虑因素, 因此研究 Halbach 阵列永磁电机很有必要。

Halbach 阵列能够提供较大的气隙磁通密度基波幅值和较低的气隙磁通密度波形的畸变率, 降低了转矩脉动, 减少高次谐波损耗, 更适合对精度控制要求较高的场合。国内外对 Halbach 永磁阵列做了许多相关的研究, 设计了不同形式 Halbach 阵列的组结构。

文献[1-3]提出了双层 Halbach 结构, 采用双层 Halbach 来增强 Halbach 永磁同步电机的电磁

性能, 提高气隙磁通密度基波幅值和改善气隙磁场的正弦性, 但是永磁体利用率降低了; 文献[3-5]对分块式极间隔断 Halbach 磁钢永磁同步电机磁场的解析计算, 通过参数优化, 得到了较好的气隙磁通密度波形, 但连续 3 段充磁导致加工复杂; 文献[6-7]通过全局解析法和有限元验证相结合, 分析了气隙磁场分布与电机性能的关系; 文献[8-9]使用保角变换方法解析计算永磁同步电机齿槽转矩和电磁转矩。

本文提出了一种改进型 Halbach 永磁阵列, 由单层的 Halbach 阵列和径向充磁的辅助磁钢堆砌组成, 即每极三块永磁体, 也可以看成是 L 型永磁体和单块辅助磁钢组成; 该阵列结构简单, 加工工艺简单, 组装方便, 通过改变 Halbach 阵列永磁的结构和布置方式得到了两种改进型 Halbach 阵列: 改进型 Halbach A 阵列和改进型 Halbach B

基金项目: 上海绿色能源并网工程技术研究中心 (13DZ2251900)

作者简介: 梁家凡 (1993—), 男, 硕士研究生, Email: 2578855619@qq.com

阵列,提高了气隙磁通密度幅值和正弦度、反电动势,使得转矩脉动更小和效率更高。

1 电机结构

Halbach 型磁钢 PMSM 的优点主要体现在气隙磁场与反电动势波形正弦性更好、转矩脉动小、定子或者转子的额部铁心材料较少、动态性能优越、电机功率密度与转矩密度更大等方面^[1]。图 1 为传统的 Halbach 永磁阵列,每块磁钢有特定的充磁方向, Halbach 阵列磁钢有整体式和分块式之分,分块式磁钢相对整体式而言,工艺更简单,成型率高^[10-12]。图 2 为在与图 1 相同永磁体用量的前提下对 Halbach 进行分层改进的 Halbach 阵列,它是在 Halbach 的基础上增加了径向充磁的辅助磁钢,减小定子额部的漏磁,改变径向磁通密度基波幅值和波形的正弦度。图 2a 中,上层径向充磁的永磁体作为辅助磁钢;图 2b 中,下层径向充磁的永磁体作为辅助磁钢; Halbach 永磁阵列采用平行充磁,每极 2 块磁钢,相邻 2 块磁钢充磁角度相差 90° ,对于分块式磁钢而言,单极磁钢分块数为 m ,单块磁钢机械角度为 α ,每极相邻两块磁钢充磁夹角为 γ ,则

$$\begin{cases} \alpha = \frac{\pi}{mp} \\ \gamma = \frac{(p-1)\pi}{mp} \end{cases}$$

式中: p 为极对数^[13]。

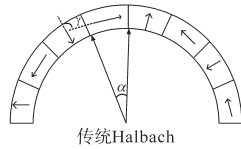


图 1 Halbach 磁钢图

Fig.1 Halbach permanent magnet arrays

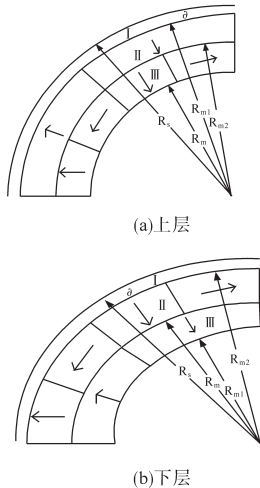


图 2 改进型 Halbach 磁钢图

Fig.2 Halbach permanent magnet arrays modified

2 磁场解析

在图 2b 中,气隙长度为 δ , R_s 为定子内半径, R_{m1} 为转子外径, R_{m2} 为 Halbach 磁钢的底层边, R_m 为径向充磁磁钢的底边,假设: 1) 铁心磁导率为无穷大; 2) 永磁体均匀磁化,且 Halbach 阵列和辅助永磁体的磁化强度相同并恒定不变。

通过等效磁化强度法分析永磁体的磁场,将永磁体等效为电流面, Halbach 阵列中永磁体的等效磁化强度空间分布函数为^[14]

$$\mathbf{M}_0 = \mathbf{M}_r r + \mathbf{M}_\theta \theta \quad (1)$$

其中

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_r &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4B_r}{(2n-1)\pi\mu_0} \sin \frac{(2n-1)\pi\alpha_p}{2} \cos \frac{(2n-1)\pi\theta}{\tau} \\ \mathbf{M}_\theta &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4B_r}{(2n-1)\pi\mu_0} \cos \frac{(2n-1)\pi\alpha_p}{2} \sin \frac{(2n-1)\pi\theta}{\tau} \\ \alpha_p &= \frac{b_{m1}}{\tau} \end{aligned}$$

式中: $\mathbf{M}_r$ 为 $\mathbf{M}_0$ 的径向向量; $\mathbf{M}_\theta$ 为 $\mathbf{M}_0$ 的切向向量; B_r 为永磁体剩余磁化强度; μ_0 为空气磁导; α_p 为极弧系数; τ 为永磁体阵列极距; b_{m1} 为径向充磁磁钢的宽度。

永磁体的等效面电流密度可以用 $\mathbf{M}$ 的旋度来表示:

$$\mathbf{J}_{M_0} = \nabla \times \mathbf{M} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{M}$ 为永磁体剩余磁化强度。

取空气和 Halbach 阵列为求解区域^[1,14]。在求解区域 I, II 内,如图 2b 所示,根据 Maxwell 方程组,建立矢量磁位方程组:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 \Psi_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Psi_1}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Psi_1}{\partial \theta^2} = 0 & \text{区域 I} \\ \frac{\partial^2 \Psi_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Psi_2}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Psi_2}{\partial \theta^2} = -\mu_0 \mathbf{J}_{M_0} & \text{区域 II} \end{cases} \quad (3)$$

式中: Ψ 为永磁磁链; r 为求解区域所在位置半径; θ 为极坐标下的位置角。

边界条件为

$$\begin{cases} H_{\theta 1}(r, \theta)|_{r=R_s} = 0 \\ H_{\theta 2}(r, \theta)|_{r=R_{m2}} = 0 \\ B_{r1}(r, \theta)|_{r=R_{m1}} = B_{r2}(r, \theta)|_{r=R_{m1}} \\ H_{\theta 2}(r, \theta)|_{r=R_m} = \mathbf{M}_\theta \end{cases} \quad (4)$$

在图 2b 区域 I、区域 II、区域 III 中,区域 III 是径向充磁的辅助磁钢;同样根据 Maxwell 方程组

可得各区域矢量磁位方程组如下:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 \Psi_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Psi_1}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Psi_1}{\partial \theta^2} = 0 & \text{区域 I} \\ \frac{\partial^2 \Psi_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Psi_2}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Psi_2}{\partial \theta^2} = 0 & \text{区域 II} \\ H_{\theta 2}|_{r=R_{m2}} - H_{\theta 1}|_{r=R_{m2}} = M_{\theta} & \text{区域 III} \end{cases} \quad (5)$$

边界条件为

$$\begin{cases} B_{r1}|_{r=R_s} = 0 \\ B_{r2}|_{r=R_{m1}} = B_{r3}|_{r=R_{m1}} = M_{\theta} \\ H_{\theta 3}|_{r=R_{m1}} - H_{\theta 2}|_{r=R_{m1}} = M_{\theta} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} B_{r2}|_{r=R_{m2}} = B_{r3}|_{r=R_{m2}} \\ H_{\theta 3}|_{r=R_{m2}} - H_{\theta 2}|_{r=R_{m2}} = M_{\theta} \\ H_{\theta 2}|_{r=R_{m1}} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

因此, Halbach 磁钢对气隙中的磁通密度分布为

$$\begin{aligned} B_{r1}(r, \theta) = & \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{u_0 M_n}{u_r} \frac{np}{(np)^2 - 1} \left[\left(\frac{r}{R_{m1}} \right)^{np-1} + \right. \\ & \left. \left(\frac{R_s}{r} \right)^{np+1} \left(\frac{R_s}{R_{m1}} \right)^{np-1} \right] \times \\ & \{ \left[\left(np - \frac{1}{np} \right) \frac{M_{rn}}{M_n} + \frac{1}{np} - 1 \right] + \\ & 2 \left(\frac{R_{m2}}{R_{m1}} \right)^{np+1} - \left[\left(np - \frac{1}{np} \right) \frac{M_{rn}}{M_n} + \frac{1}{np} + 1 \right] \cdot \\ & \left(\frac{R_{m2}}{R_{m1}} \right)^{2np} \} / \left\{ \frac{u_r + 1}{u_r} \left[\left(\frac{R_s}{R_{m1}} \right)^{2np} - \left(\frac{R_{m2}}{R_{m1}} \right)^{2np} \right] - \right. \\ & \left. \frac{u_r - 1}{u_r} \left[1 - \left(\frac{R_s R_{m2}}{R_{m1}^{4np}} \right)^{2np} \right] \right\} \cos(np\theta) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} B_{r2}(r, \theta) = & \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{u_0 M_n}{u_r} \frac{np}{(np)^2 - 1} \left[\left(\frac{r}{R_{m2}} \right)^{np-1} + \right. \\ & \left. \left(\frac{R_s}{r} \right)^{np+1} \left(\frac{R_s}{R_{m2}} \right)^{np-1} \right] \times \\ & \{ \left[\left(np - \frac{1}{np} \right) \frac{M_{rn}}{M_n} + \frac{1}{np} - 1 \right] + \\ & 2 \left(\frac{R_m}{R_{m2}} \right)^{np+1} - \left[\left(np - \frac{1}{np} \right) \frac{M_{rn}}{M_n} + \frac{1}{np} + 1 \right] \cdot \\ & \left(\frac{R_{m2}}{R_{m1}} \right)^{2np} \} / \left\{ \frac{u_r + 1}{u_r} \left[\left(\frac{R_s}{R_{m2}} \right)^{2np} - \left(\frac{R_m}{R_{m2}} \right)^{2np} \right] - \right. \\ & \left. \frac{u_r - 1}{u_r} \left[1 - \left(\frac{R_s R_m}{R_{m2}^{4np}} \right)^{2np} \right] \right\} \cos(np\theta) \end{aligned} \quad (9)$$

因此可以将 Halbach 阵列和辅助磁钢产生的气隙磁通密度线性叠加来表示气隙磁通密度:

$$B_r(r, \theta) = B'_{r1}(r, \theta) + B'_{r2}(r, \theta) \quad (10)$$

3 磁极参数对电机性能影响和优化

3.1 气隙磁场

利用 Ansoft 软件设计了 2 台改进型 Halbach 永磁阵列同步电机模型^[15], 电机的主要参数为: 功率 8 kW, 额定转速 1 200 r/min, 额定电压 300 V, 极对数 5, 铁心长度 50 mm, 定子槽数 48, 转子内径 60 mm, 转子外径 158 mm, 定子内径 160 mm, 定子外径 300 mm, 相数 3, 永磁体厚度 6 mm, 气隙 1 mm, 极弧系数 0.9。图 3 为有限元仿真模型^[16]。

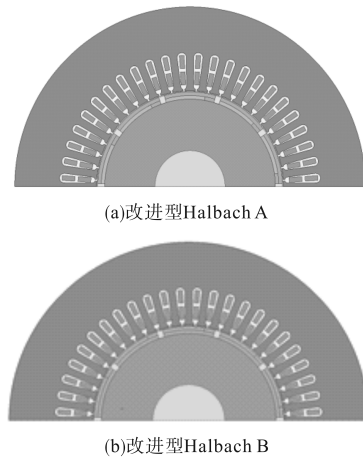


图3 有限元仿真模型

Fig.3 The simulate model of finite element

根据电机参数计算得到 $\alpha = 12^\circ$, $\gamma = 48^\circ$, 两种改进型 Halbach 阵列如图 4 所示, 充磁方向和具体尺寸都已标注, 定义传统的 Halbach 阵列的径向充磁的磁钢长度占每极两块磁钢总长度的比例为磁钢分布系数 $\beta = a/b$, 其中, a 为径向充磁磁钢的长度, b 为每极两块磁钢的长度; 在 $\beta = 0.8$ 时通过有限元对两种改进型的 Halbach 永磁电机进行分析得到了两者的气隙磁通密度波形, 并对上述气隙磁场的解析表达式通过 Matlab 编程计算得到解析解的波形图。

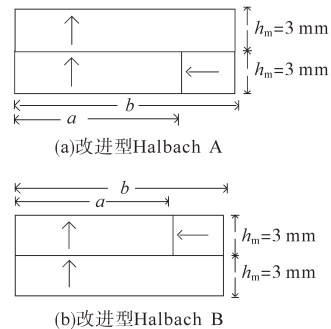


图4 改进型 Halbach 阵列

Fig.4 The Halbach permanent magnet arrays modified

图5为有限元对A,B两种改进型 Halbach 模型仿真分析和解析法对比分析图,由图5可以看出,解析法与有限元法得到的气隙磁通密度波形基本吻合。

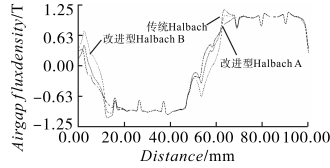


图5 气隙磁通密度波形

Fig.5 The waveforms of air gap flux density

气隙磁场是由 Halbach 阵列磁钢产生的磁场和辅助磁钢产生的磁场形成的合成磁场,将气隙磁场进行傅里叶分析,得到磁通密度的基波幅值与各次主要谐波磁场幅值,如表1所示。

表1 磁通密度谐波幅值对比

	谐波幅值/T									
	1次	3次	5次	7次	9次	11次	13次	15次	17次	
传统 Halbach	1.105	0.212	0.084	0.096	0.063	0.008	0.052	0.056	0.037	
改进型 Halbach A	1.098	0.219	0.056	0.032	0.022	0.012	0.024	0.025	0.023	
改进型 Halbach B	1.115	0.23	0.025	0.071	0.058	0.023	0.013	0.006	0.027	

利用式(10)气隙磁通密度正弦性畸变率 THD_B来表示磁密波形的正弦性:

$$\text{THD}_B = \frac{\sqrt{B_{m2}^2 + B_{m3}^2 + \dots + B_{mk}^2}}{B_{m1}} \times 100\% \quad (11)$$

分析得到传统 Halbach 的 THD_B=24.4%,改进型 Halbach A 的 THD_B=21.2%,改进型 Halbach B 的 THD_B=22.6%,从中可知改进型 Halbach A 波形畸变率最小,与传统的 Halbach 阵列相比降低了 3.2%,在降低高次谐波时效果明显,但是气隙磁通密度基波幅值略微降低;而改进型 Halbach B 与传统的 Halbach 阵列相比也降低了谐波畸变率为 1.8%,但是气隙磁通密度的基波幅值提高了 0.9%。因此,针对不同的需求选择不同的改进型 Halbach 阵列来改善气隙磁通密度基波幅值和波形的正弦性。

改进型的 Halbach 阵列的气隙磁通密度的谐波畸变率降低,减小了纹波转矩,降低了表面损耗;反电动势的提高,减小了电枢绕组的热损耗,提高了永磁同步电机的效率。由于定子是分数槽,气隙磁场中含有少量的偶次谐波,偶次谐波幅值低于基波含量的 3%,偶次谐波是由于分数槽固有的特性决定,可以通过设计合理的极槽配合、极弧系数、槽口宽度等降低各次谐波幅值和

谐波畸变率。

3.2 空载反电动势

永磁同步电机的电枢绕组采用的是短距双层绕组,转子旋转时,导体切割磁场产生反电动势,只要将每相绕组所有导体的感应反电动势相加,即可求出该相绕组的反电动势,即空载反电动势。

设每个线圈节距为 α_y 的机械角度,每相绕组串联线圈数为 N ,以改进型 Halbach 阵列 L 型磁钢的中心线与 A 相绕组轴线重合时刻为相绕组感应电动势的计时起点,即 $t=0$ 时刻,则任意时刻 A 相绕组感应电动势为^[16]

$$\begin{aligned} e &= - \sum_{k=1}^N \frac{d\phi_k}{dt} = - \sum_{k=1}^N \frac{N_s d\phi_k}{dy} \cdot \frac{dy}{dt} \\ &= -\omega \sum_{k=1}^N \frac{N_s d\phi_k}{dy} \\ &= -\omega \sum_{k=1}^N \frac{N_s R_s L_{ef} \left[\int_{\alpha_k}^{\alpha_k + \alpha_y} B(R_s, \alpha - \gamma) d\alpha \right]}{dy} \\ &= -\omega N_s R_s L_{ef} \sum_{k=1}^N \int_{\alpha_k}^{\alpha_k + \alpha_y} B_\gamma(R_s, \alpha - \gamma) d\alpha \\ &= -\omega N_s R_s L_{ef} \sum_{k=1}^N \int_{\alpha_k}^{\alpha_k + \alpha_y} [B_{r2}'(r, \theta) + B_{r2}''(r, \theta)] d\alpha \\ &= e' + e'' \end{aligned} \quad (12)$$

其中

$$\gamma = \omega t \quad B_\gamma(R_s, \alpha - \gamma) = B_{r2}(r, \theta) = \frac{dB_{r2}(r, \theta)}{dy}$$

式中: L_{ef} 为铁心有效长度; α_k 为第 k 个线圈的首边相对于绕组轴线的空间位置角; ω 为转子的机械角速度; N_s 为单个线圈的并绕根数。

通过有限元仿真比较得到了改进型 Halbach 阵列和传统 Halbach 阵列的 A 相空载反电动势波形图,如图 6 所示。

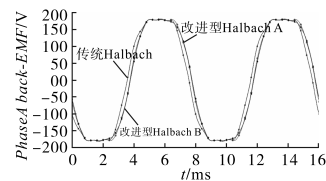


图6 改进型 Halbach 和传统 Halbach 永磁电机的反电动势对比图

Fig.6 Comparison of the back-EMF of modified Halbach and regular Halbach permanent magnet motor

图6中,改进型 Halbach B 和传统 Halbach、改进型 Halbach A 阵列的反电动势有效值分别为 147.77 V, 146.27 V 和 145.94 V,相比传统型 Halbach 阵列,改进型 Halbach B 阵列的反电动势有

了一定的提高,减小了电枢电流的在定子绕组上的损耗。表2为3种Halbach阵列的空载反电动势谐波幅值对比表。

表2 空载反电动势谐波幅值对比
Tab.2 Comparison of harmonic amplitude of back-EMF under no load

	空载反电动势/V				
	1次	3次	5次	7次	9次
传统Halbach	204.88	27.95	3.00	2.53	3.71
改进型Halbach A	204.35	28.79	2.29	0.81	1.39
改进型Halbach B	206.83	29.63	1.68	1.44	3.47

由表3可以看出,改进型Halbach B相比传统型Halbach阵列,永磁同步电机空载反电动势的基波幅值更大,两种改进型Halbach阵列对反电动势的高次谐波的削弱作用更强,反电动势的波形更加正弦性。

3.3 转矩特性

由于Halbach阵列能提高气隙磁通密度的基波幅值和改善气隙磁通密度波形的正弦性,能大幅降低转矩的脉动^[15],根据Maxwell应力张量法的定义可知:

$$\oint_S T dS = \oint_S F dS = \oint_S [(B \cdot n)H - \frac{1}{2}BHn] ds \quad (13)$$

式中: B 为气隙磁通密度; n 为平面 S 的法向量的单位向量; H 为磁场强度; F 为作用在单元平面上的磁应力向量。

由 $H = B/u_0$,得到:

$$F = (B \cdot n) \frac{B}{u_0} - \frac{1}{2} \frac{B^2}{u_0} n \quad (14)$$

其中 $n = r_1$ $B = B_r r_1 + B_\theta \theta_1$

式中: r_1 为单位径向向量; θ_1 为单位切向量。

所以得到:

$$\begin{aligned} F &= \frac{1}{u_0} [(B_r r_1 + B_\theta \theta_1)(B_r r_1 + B_\theta \theta_1) - \frac{1}{2} \frac{B^2}{u_0} r_1] \\ &= \frac{1}{u_0} B_r (B_r r_1 + B_\theta \theta_1) - \frac{1}{2} \frac{B^2}{u_0} r_1 \\ &= \frac{1}{u_0} (B_r^2 - \frac{1}{2} B^2) r_1 + \frac{1}{u_0} B_r B_\theta \theta_1 \\ &= F_r + F_\theta \end{aligned} \quad (15)$$

电机的电磁转矩等于磁场应力张量切向分量的积分与铁心长 L_a 、气隙平均半径 r_g 的二次方的乘积:

$$T = \frac{1}{u_0} L_a r_g^2 \int_0^{2\pi} B_r(r, \theta) B_\theta(r, \theta) d\theta \quad (16)$$

式中: $B_r(r, \theta)$ 为 r_g 处的径向磁通密度; $B_\theta(r, \theta)$ 为 r_g 处的切向磁通密度。

当 B_r 和 B_θ 为空载的气隙磁场的径向和切向磁通密度分量时,得到齿槽转矩;当 B_r 和 B_θ 为空载磁场和电枢反应磁场的合成磁场的径向和切向磁通密度分量时,得到输出电磁转矩。

图7为Halbach阵列电磁转矩的波形对比图,传统Halbach阵列的转矩的均方根值为57.38 N·m,改进型Halbach A阵列的转矩的均方根值为56.78 N·m,改进型Halbach B阵列的转矩均方根值为57.69 N·m。可以看出,改进型Halbach B阵列的电磁转矩略高于传统Halbach阵列,对电磁转矩进行傅里叶分析,得到改进型Halbach阵列和传统Halbach阵列的电磁转矩谐波畸变率对比图,如图8所示,其中改进型Halbach A阵列转矩畸变率为3.05%,改进型Halbach B阵列转矩畸变率为2.37%,而传统Halbach的转矩畸变率为3.54%。其中的2次谐波是因为极槽配合的原因导致,可以通过合理选择定子槽数和永磁体极对数来抑制电磁转矩谐波次数。

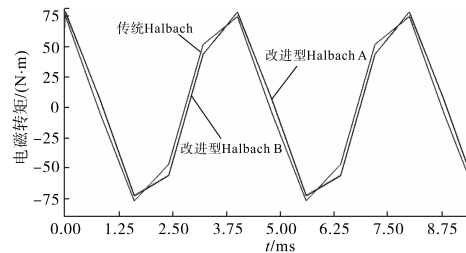


图7 改进型Halbach和传统Halbach的电磁转矩对比图

Fig.7 Comparison of electronic torque among modified Halbachs and regular Halbach permanent magnet arrays

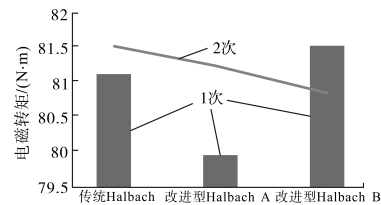


图8 改进型Halbach和传统Halbach电磁转矩FFT对比图

Fig.8 The electronic torque FFT comparison of modified Halbachs and regular Halbach permanent magnet arrays

图9为电机实验装置图,其中,上、下图分别为样机的实验平台和两台样机,通过对样机的调试,在额定转速下测得改进型Halbach A和改进型Halbach B样机的转矩均方根值分别为54.63 N·m和55.82 N·m,与有限元仿真结果相差3.8%和3.2%,由于样机的制造工艺方面的原因,气隙磁场存在一定的差别,导致转矩出现较小的偏

差,在实验允许的误差范围内,满足实际工程需求。由于气隙磁场的正弦度高,在正弦波电流驱动下,电机的输出转矩平稳。



图9 电机实验装置图

Fig.9 Experiment device of the motor

4 结论

1)改进型的 Halbach 阵列是由 L 型磁钢和瓦片型磁钢组成,L 型磁钢是 Halbach 阵列主磁钢,瓦片行磁钢为辅助磁钢,容易对三个独立尺寸变量进行优化设计得到更好的正弦磁通密度波形。

2)通过深入对比分析传统 Halbach 和改进型 Halbach 阵列永磁电机的电磁性能,得到了改进型 Halbach 永磁阵列,改善了气隙磁场磁通密度波形的正弦性和提高了气隙磁通密度基波幅值,转矩脉动更小,铁心表面损耗和永磁体涡流损耗更小,电机效率、电磁转矩得到了一定提高。

3)改进型 Halbach A 阵列的气隙磁通密度波形正弦性畸变率比传统 Halbach 阵列降低了 3.2%,抑制了反电动势的高次谐波;改进型 Halbach B 阵列相对传统 Halbach 阵列而言,气隙磁通密度基波幅值提高了 0.9%,波形畸变率降低了 1.8%,反电动势提高了 0.95%。因此针对不同的场合可以选择不同的改进型 Halbach 阵列来提高反电动势或者降低转矩脉动,对表贴式牵引电机设计具有较高的参考价值。

参考文献

[1] 张鲁,寇宝泉,赵斌超,等.新型 Halbach 次级结构永磁同步

直线电机[J].电工技术学报,2013,28(7):39-45.

- [2] 寇宝泉,曹海川.新型双层 Halbach 永磁阵列解析分析[J].电工技术学报,2015,30(10):68-76.
- [3] Jiao Z X, Yan L, Wang T Y. Design of a Tubular Linear Oscillating Motor with a Novel Compound Halbach Magnet Array[J]. IEEE/ASME Transactions on mechatronics ,2017, 22(1):498-508.
- [4] 范坚坚,吴建华,李创平.分块式 Halbach 型磁钢的永磁同步电机解析[J].电工技术学报,2013,28(3):35-42.
- [5] 范坚坚,吴建华,沈磊,等.极间隔断 Halbach 型磁钢的永磁同步电机多目标优化解析[J].电工技术学报,2009,24(9):53-58.
- [6] 范坚坚,吴建华.极间隔断 Halbach 型磁钢的永磁同步电机气隙磁场解析计算及参数分析[J].电工技术学报,2010,25(12):40-47.
- [7] 李深,章跃进,井立兵,等. Halbach 阵列半闭口槽永磁电机全局解析法研究 [J]. 中国电机工程学报,2013,33(33):85-94.
- [8] 井立兵,章跃进,李深,等. Halbach 阵列同心式磁力齿轮磁场分析与优化设计 [J]. 中国电机工程学报,2013,33(21):163-169.
- [9] 范坚坚,吴建华.计及齿槽极间隔断 Halbach 型磁钢的 PMSM 气隙磁场解析分析[J].中国电机工程学报,2010,30(12):98-105.
- [10] 罗玲,薛利昆,吴先宇,等. Halbach 永磁阵列无刷直流电机转矩的解析计算和分析[J].电工技术学报,2017,32(16):124-135.
- [11] 夏长亮,李洪凤,宋鹏,等.基于 Halbach 阵列的永磁球形电动机磁场[J].电工技术学报,2007,22(7):126-130.
- [12] Li D W, Qu R H, Li J, et al. Analysis of Torque Capability and Quality in Vernier Permanent-magnet Machines[J]. IEEE Transactions on Industry,2016,52(1):125-134.
- [13] 高鹏.电动汽车用永磁轮毂电机的设计研究[D].天津:天津大学,2015.
- [14] 郭思源,周理兵,曲荣海,等.基于精确子域模型的游标永磁电机解析磁场计算[J].中国电机工程学报,2013,33(30):71-80.
- [15] Xia Z P, Zhu Z Q. Analytical Magnetic Field Analysis of Halbach Magnetized Permanent-magnet Machines[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2004, 40(4):1864-1872.
- [16] Tiang T L, Ishak D, Lim C P, et al. A Comprehensive Analytical Subdomain Model and Its Field Solutions for Surface-mounted Permanent Magnet Machines[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(4): 1-14.
- [17] 王秀和.永磁电机[M].北京:中国电力出版社,2007.

收稿日期:2018-06-25

修改稿日期:2018-08-08