

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.07.022

基于响应面法的定子永磁型轴向磁通 切换电机齿槽转矩优化设计*

王 晨^{1,2} 黄金霖¹

(1. 安徽机电职业技术学院 芜湖 241000; 2. 南京航空航天大学 南京 211106)

摘 要:针对聚磁反应造成定子永磁型轴向磁通切换电机(SPAFFSPM)的齿槽转矩偏大、噪声大等问题。以减小定子永磁型轴向磁通切换型电机的齿槽转矩,提高电机的输出性能为目标,利用能量摄动法推导出电机的齿槽转矩解析表达式,分析影响齿槽转矩的定转子结构参数。基于响应面法与有限元法构造出定子槽弧宽、转子齿倾斜角及永磁体形状系数与齿槽转矩之间的响应面数学模型,推导出使齿槽转矩最小的定子槽弧宽、转子齿倾斜角及永磁体形状系数最优组合。最后建立优化前后电机三维有限元分析模型,搭建样机的实验平台,验证优化方法的合理性及准确性。结果表明,优化后的电机齿槽转矩减小约82.5%,且电机的输出性能得到明显提高。

关键词: 磁通切换;齿槽转矩;响应面法;优化分析;三维有限元。

中图分类号: TM351 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470

Optimization design of cogging torque in stator permanent magnet type axial flux switching motor based on response surface method

Wang Chen^{1,2} Huang Jinlin¹

(1. Anhui Technical College of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhu 241000, China;

2. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: The cogging torque in stator permanent magnets of axial field flux-switching permanent magnet motor (SPAFFSPM) is too large and with high noise due to the flux focusing. In order to reduce the cogging torque and improve the motors output performance, an analytic expression of the cogging torque of motor is deduced by energy perturbation method to analyze the parameters of stator and rotor structure. Based on the response surface methodology (RSM) and FEM, the response surface numerical model about stator slot width, rotor tooth inclination angle and shape factor of permanent magnet with cogging torque is obtained, then the optimal combination of the cogging torque with stator slot width, rotor tooth inclination angle and shape factor of permanent magnet is deduced. The accuracy of the analysis is examined by the 3D finite element and prototype of the experimental platform.

Keywords: flux switching; cogging torque; RSM; optimization; 3D finite element

1 引 言

定子永磁型轴向磁通切换电机是一类定子永磁型磁通可控型永磁电机。该类电机为双凸极结构,其转子既无绕组,也无永磁体,电机的转子位置发生变化时,磁通

可自动的切换路径,从而产生转矩运行^[1-2]。为了提高新型电机的输出转矩,此类新型电机永磁体置于定子上,为聚磁形结构,但同时聚磁型结构造成该类电机的齿槽转矩偏大,较大的齿槽转矩会引起电机产生振动及噪声。因此,研究定子永磁型轴向磁通切换电机结构参数与齿槽转矩的关系,抑制电机的齿槽转矩,对于高性能电机的

收稿日期:2016-11 Received Date: 2016-11

* 基金项目:国家自然科学基金(51267006)、安徽省自然科学基金重点项目(KJ2016A128)、安徽机电职业技术学院院级重点自然科学基金项目(2016yjr019)资助

设计具有重要意义^[3-5]。

齿槽转矩是永磁电机特有的属性^[6],为了削弱混永磁电机的齿槽转矩,文献[7]基于傅里叶级数的方法分析永磁电机齿槽转矩的表达式,提出槽口偏移的方法减小电机齿槽转矩的方法;文献[8]对 Halbach 永磁电机的齿槽转矩进行解析计算,提出削弱电机齿槽转矩的一些基本方法;文献[9]分析了负载对分数槽永磁电机齿槽转矩的影响,提出合理选择磁钢分段斜极角可有效削弱电机的齿槽转矩。上述文献削弱永磁电机的齿槽转矩均为传统的永磁电机,对于磁通切换电机,此类方法实用度较低。针对混合励磁电机和磁通切换电机,文献[10]提出转子齿极倒角及转子分段斜极的方法削弱磁通切换永磁电机的齿槽转矩;文献[11]研究端部开槽位置对磁通切换电机齿槽转矩的影响,并对开槽的大小进行优化分析;文献[12-14]对定转子齿面开辅助槽的方法来削弱磁通切换电机的齿槽转矩,上述文献均针对径向磁场的磁通切换电机进行研究,对轴向磁场电机尚不多见。文献[15]利用转子齿开辅助槽的方法削弱轴向磁通切换永磁电机的齿槽转矩,并优化辅助槽的槽口宽度、槽深及槽口形状,但电机的加工难度更加复杂;文献[16]利用有限元分析的方法,在轴向磁通切换型混合励磁电机的定子铁芯加入隔磁桥,以此来削弱电机的齿槽转矩,但使得电机的电磁转矩也大大降低。因此,对于定子永磁型轴向磁通切换电机的齿槽转矩研究需要进一步深入研究。

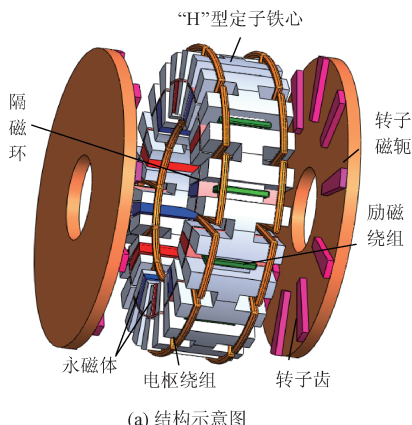
本文利用解析偏微分方程的方法推导出定子永磁型轴向磁通切换电机齿槽转矩的解析表达式,在理论分析的基础上,研究转子齿倾斜角、定子槽口弧宽、永磁体形状系数对电机齿槽转矩的影响,采用响应面法优化定转子结构参数,得到该类电机齿槽转矩最小的转子齿倾斜角、定子槽口弧宽和永磁体形状系数最优组合参数,并利用有限元与实验相结合的方法进行验证,为此类电机齿槽转矩的优化奠定一定的基础。

2 电机结构

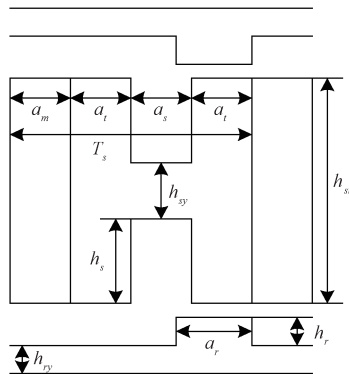
定子永磁型轴向磁通切换电机的定转子结构示意图与样机如图1所示。图1(a)为电机的三维结构示意图;图1(b)为定转子结构参数,其中, α_m 为永磁体极弧宽度, α_r 为定子齿极弧宽度, α_s 为定子槽弧宽, T_s 为两相邻永磁体之间的宽度, α_r 为转子弧宽, h_{st} 为定子轭厚度, h_s 为定子槽深度, h_{st} 为定子厚度, h_r 为转子齿厚度, h_{rv} 为转子轭厚度。

新型电机采用三相12/10极结构,采用双转子的结构,转子既无绕组,也无永磁体,结构简单、可靠,有效的避免了单边磁拉力的现象;定子结构较复杂,永磁体、电

枢绕组及励磁绕组均放置于定子上,定子铁芯由12个单元“H”型铁芯拼接而成,两相邻的定子铁心之间引入隔磁块,将电机的磁路分割成并联的两部分,可有效避免了漏磁,提高了电机的功率密度。



(a) 结构示意图
(a) Schematic diagram of structure



(b) 定转子参数示意图
(b) Schematic diagram of stator and rotor parameters

图1 电机结构

Fig. 1 Structure of motor

3 齿槽转矩表达式

解析表达式只是为了分析电机结构参数与齿槽转矩的关系,并非为了准确计算。因此,可假设定子铁芯的磁导率无穷大;永磁体磁导率接近空气。齿槽转矩为永磁电机特有的属性,其产生的机理是转子位置发生变化时,永磁体与定子铁芯相互作用产生的转矩^[7,10],即:

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

由于永磁体置于电机的定子上,其磁场能量可近似为气隙和永磁体能量之和。因此,定子永磁型轴向磁通切换电机的磁场能量可表示为:

$$W = \frac{1}{2\mu_0} \int_V B^2 dV = \frac{1}{2\mu_0} \int_V B_r^2(\theta) \left(\frac{h_m}{h_m + g(\theta, \alpha)} \right) dV \quad (2)$$

根据式(1)、(2)可知,将 $Br^2(\theta)$ 和 $[h_m/h_m + g(\theta, \alpha)]^2$ 进行傅里叶分解,即可得到定子永磁型轴向磁通切换电机的齿槽转矩解析表达式。

$B_r(\theta)$ 为电机平均半径处的气隙磁通密度,故 $B_r^2(\theta)$ 的傅里叶展开形式与普通的永磁体电机类似,其值为:

$$B_r^2(\theta) = B_{\theta 0} + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \cos nQ_s \tag{3}$$

根据文献[15]的推导方法, $[h_m/h_m + g(\theta, \alpha)]^2$ 的傅里叶变化公式近似表达为:

$$\left[\frac{h_m}{h_m + g(\theta, \alpha)}\right]^2 = 1 - 1.646 \frac{g(\theta, \alpha)}{h_m} + \left[\frac{g(\theta, \alpha)}{h_m}\right]^2 \tag{4}$$

对于定子永磁型轴向磁通切换电机的等效气隙长度 $g(\theta, \alpha)$ 的傅里叶展开式为:

$$g(\theta, \alpha) = g + \frac{3P_s\alpha_s + 2l_r(2\pi - 2\alpha_r p_r)}{8\pi} + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{12 \times (-1)^i \cos(iP_s\theta)}{\pi i^2 \alpha_s} + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{g(p_r - \pi)}{l_r p_r \pi} \sin l_r \alpha_r p_r \cos m p_r (\theta - \alpha) + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2[(-1)^m - \cos l_r \alpha_r p_r]}{l_r p_r (\pi - \alpha_r p_r)} \cos m p_r (\theta - \alpha) \tag{5}$$

结合图 1(b),式(5)中 α_s 、 α_r 分别为定子槽弧宽、转子齿宽度, p_r 为转子齿数, l_r 为转子的轴向长度, g 为气隙长度, P_s 为定子齿数。

根据式(1)~(4),利用能量摄动法,得到定子永磁型轴向磁通切换电机的齿槽转矩表达式如下:

$$T_{\text{cog}} = -\frac{g}{4\mu_0} (R_2^2 - R_1^2) \times \int_0^{2\pi} \sum_{n=0}^{\infty} B_n \frac{2g(\theta, \alpha) - 1.646}{h_m} \frac{\partial g(\theta, \alpha)}{\partial \alpha} \cos(nP_s\theta) d\theta \tag{6}$$

结合式(5)、(6)可知,定子永磁型轴向磁通切换电机的齿槽转矩大小与定子槽弧宽度、转子齿形状及齿宽以及永磁体的尺寸相关,优化电机定转子的相关结构参数可有效削弱电机的齿槽转矩。

本文以一台 500 W,12/10 极定子永磁型轴向磁通切换电机为研究对象,研究定转子相关结构参数对电机齿槽转矩的影响,寻求其最优的组合结构。电机的主要参数如表 1 所示。

表 1 样机的主要参数

Table 1 The specifications of the prototype

参数	数值	参数	数值
相数	3	额定转速/(r·min ⁻¹)	400
定子槽弧宽度/(°)	7.5	定子外径/mm	153
转子齿斜角/(°)	0	转子齿宽度/(°)	10
永磁体形状系数	0.75	气隙长度/mm	1

4 响应面法(RSM)

4.1 RSM 分析

RSM 是应用于工程和化工领域的一种常见算法,当目标函数的自变量较少时,利用响应面法可较快的寻求出最优解^[17]。根据式(6),定子永磁型轴向磁通切换电机的齿槽转矩与定转子结构参数相关,文献[3]定义轴向磁通混合励磁电机的外弧长与内弧长之比为永磁体形状系数,且对转子的相关参数进行了优化,本文选用定子槽口宽度 α_s 、转子齿斜角 γ 及永磁体形状系数 ξ ^[3] 为自变量,选取电机的齿槽转矩 T_{cog} 为响应值。通过改变自变量的值,来寻求最佳响应面,可表示为:

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \cdots, x_k) \tag{7}$$

式中: y 表示响应值, x 表示自变量, k 表示自变量的个数。

根据式(7)可知,自变量与响应值之间关系复杂,难以寻找最佳的组合,选取一个近似函数,利用最小二乘法,拟合近似函数,得到精确的二阶响应面模型来代替自变量与响应值之间的真实函数关系。选取的二阶响应面模型为:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \tag{8}$$

式中: β_0 为回归系数, ε 为误差, k 为自变量个数。

为了响应模型的精确计算,在寻求最佳回归系数的过程中,需将自变量的真实值进行代码换算,将自变量所取的低水平设定为 -1,高水平设定为 1,中心水平取为 0。因此,其真实值与代码值之间的换算关系为:

$$x_{\text{icode}} = \frac{x_i - [x_{\text{imax}} + x_{\text{imin}}]/2}{[x_{\text{imax}} - x_{\text{imin}}]/2} \tag{9}$$

式中: x_{icode} 为代码值, x_i 分别表示定子槽弧宽、转子齿斜角及永磁体形状系数。

利用最小二乘法估算回归方程的回归系数,根据式,得到二阶响应面模型的矩阵方程为:

$$Y = X\beta + \varepsilon \tag{10}$$

其最小二乘的表达式为:

$$Q(\beta) = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = (Y - X\beta)'(Y - X\beta) \tag{11}$$

拟合的回归方程为:

$$\hat{y} = X\hat{\beta} \tag{12}$$

当拟合完成后,为了计算结果的精确性,需对拟合方程的精确度进行判定。通常采用方差的形式进行判定。

4.2 响应模型的建立

在响应面设计中,Box-Behnken 设计和 CCD 设计(中心复合设计)是常见的两种拟合曲面方法,本文中自变量的个数仅仅为 3 个(永磁体形状系数、定子槽口弧宽以及转子齿斜角),为了计算的快速性,采用 Box-Behnken 设

计的方法,利用 Design-Expert 软件,得到本文的实验设计方案如表 2 所示。试验中,软件自动生成了 17 个样本点,利用有限元分析软件 ANSYS,建立每个点的三维有限元计算模型^[18],计算每个实验点的齿槽转矩,将其幅值计为实际的响应值。结合电机的设计方法,电机的定子槽口弧宽、转子齿斜角以及永磁体形状系数的变化量分别取为 $7.5^{\circ}\leq\alpha_s\leq10^{\circ}$, $2^{\circ}\leq\gamma\leq8^{\circ}$, $0.75\leq\xi\leq1$ 。其中 x_1 为转子齿斜角, x_2 为定子槽弧宽度, x_3 为永磁体形状系数。

表 2 BBF 设计试验点齿槽转矩计算值
Table 2 The computation value of cogging torque of BBF design points

序号	转子齿斜角 $\gamma/(^{\circ})$	定子槽弧宽 $\alpha_s/(^{\circ})$	永磁体形状 系数 ξ	齿槽转矩/ (N·m)
1	5	8.75	0.88	0.121
2	2	8.75	1	0.205
3	8	7.5	0.88	0.435
4	2	10	0.88	0.315
5	5	7.5	0.75	0.417
6	8	10	0.88	0.326
7	8	8.75	1	0.264
8	2	8.75	0.75	0.145
9	5	8.75	0.88	0.121
10	8	8.75	0.75	0.143
11	2	7.5	0.88	0.248
12	5	10	0.75	0.524
13	5	10	1	0.455
14	5	8.75	0.88	0.121
15	5	8.75	0.88	0.121
16	5	8.75	0.88	0.132
17	5	7.5	1	0.241

根据有限元分析软件的计算结果,计算各估计参数的回归系数,得到定子永磁型轴向磁通切换电机的齿槽转矩拟合模型如下所示:

$$\begin{aligned} T_{\text{cog}} = & 14.85679 + 0.084486x_1 - 2.45891x_2 - 9.84613x_3 \\ & - 0.011733x_1x_2 + 0.040667x_1x_3 + 0.17120x_2x_3 \\ & - 0.006778x_1^2 + 0.13690x_2^2 + 4.61760x_3^2 \end{aligned} \quad (13)$$

根据齿槽转矩的拟合参数,得到拟合模型的相关判定系数如表 3 所示。

表 3 响应面法齿槽转矩分析结果
Table 3 The cogging torque analysis results using RSM

判定系数	数值	判定系数	数值
R-Squared	0.958 1	PRESS	0.97
AdjR-Squared	0.917 9	Adeq Precisor	5.736

表 3 中,R-Squared 代表总的判定系数,该系数为 0 ~ 1 取值,越接近 1 代表曲面的拟合程度越高,本文中为

0.958 1,拟合程度较高;AdjR-Squared 为 R-Squared 的平方值,该值越接近 1 表示拟合程度越高;Adeq Precisor 的取值一般>4 即可,模型中为 5.736,较为合理。

根据响应面的拟合模型,得到电机齿槽转矩与定子槽弧宽 $\alpha_s(x_2)$ 、转子齿斜角 $\gamma(x_1)$ 以及永磁体形状系数 $\xi(x_3)$ 的响应面如图 2 所示。

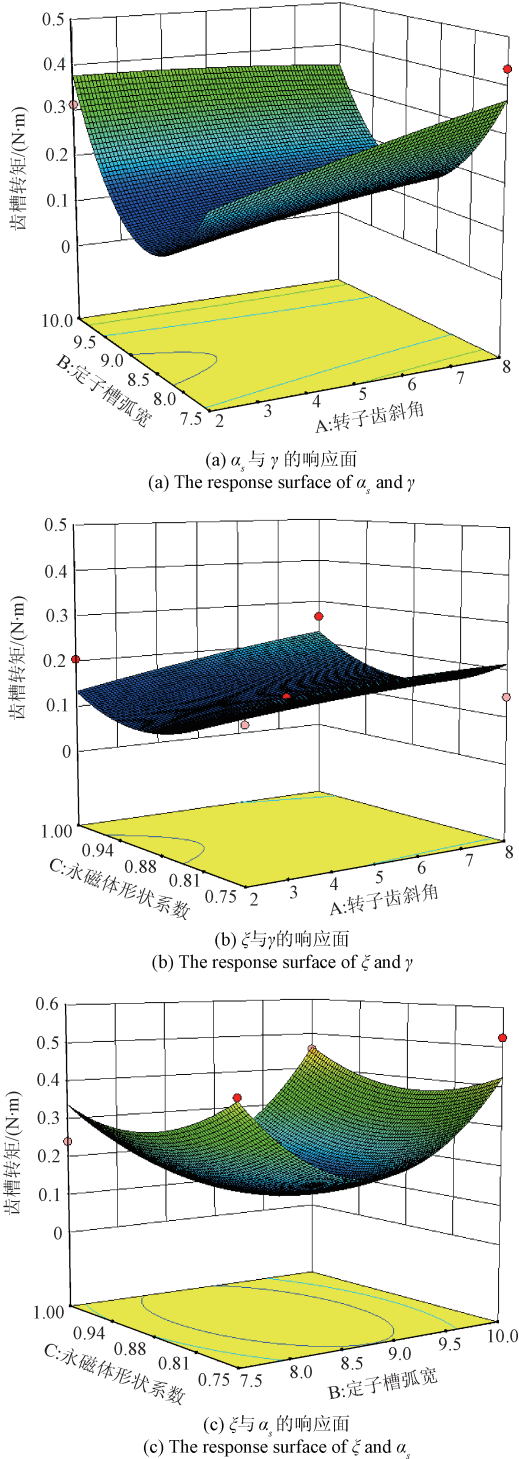


图 2 齿槽转矩与变量之间的响应面图
Fig. 2 Response surface of cogging torque with variable

由图 2 可知,定子槽弧宽与永磁体形状系数对齿槽转矩的影响较大,而转子齿斜角对齿槽转矩的影响较小,根据定子永磁型轴向磁通切换电机齿槽转矩的响应面计算数学模型,寻求使得电机齿槽转矩最小的定子槽弧宽、转子齿斜角及永磁体形状系数的最优组合,当定子槽弧宽为 8.75° ,转子齿斜角为 6.54° ,永磁体形状系数为 0.96,计算得到电机的最小齿槽转矩幅值大约为 $0.12\text{ N}\cdot\text{m}$ 。

5 优化结果验证

5.1 仿真结果验证

为了验证优化算法的正确性与有效性,取定子永磁型轴向磁通切换电机的定子槽弧宽为 8.75° ,转子齿斜角为 6.54° ,永磁体形状系数为 0.96,利用有限元分析软件 ANSYS,建立优化前后电机的三维有限元分析模型。优化前后电机的主要尺寸如表 4 所示。对比优化前后的电机相关尺寸,永磁体形状系数发生改变,永磁体的高度和宽度得到不同程度的增加。

表 4 优化前后电机的部分尺寸
Table 4 Partial size of motor before and after optimization

参数	优化前	优化后
永磁体形状系数	0.75	0.96
永磁体高度/mm	15	17.52
转子齿斜角/ $^{\circ}$	1.5	6.54
定子槽弧宽/ $^{\circ}$	7.5	8.75
永磁体宽度	5.5	6.54

选取优化前后电机的转子齿形状与永磁体形状如图 3 所示。由图 3 可知,优化后转子齿底部变宽,底部的增加使得转子齿与定子齿之间的接触面增加,整个电机磁

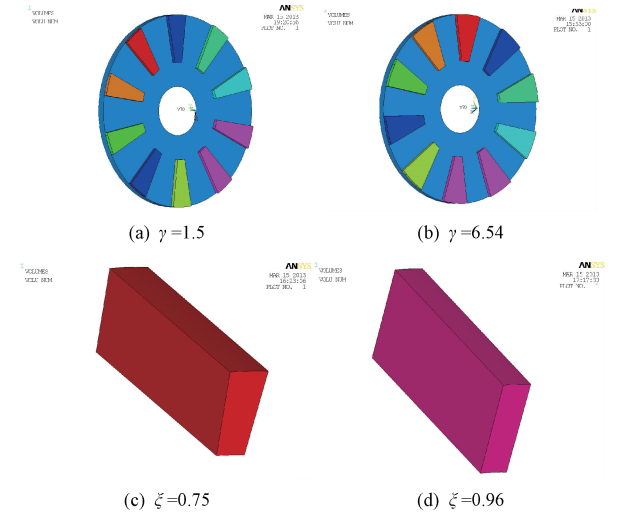


图 3 优化前后电机部分尺寸
Fig. 3 Partial size of motor before and after optimization

路的磁阻减小,当磁动势不变时,电机的空载反电势将得到一定的增加,同时,气隙中的谐波含量将会减小;优化后,永磁体的厚度减小,宽度变大,永磁体的利用率得到一定程度的提高,提高了电机的运行效率。

对电机的三维有限元模型进行网格剖分、施加零电流源、细分气隙网格,对输出的齿槽转矩结果进行后处理,得到优化前后电机的齿槽转矩随转子位置变化如图 4 所示。

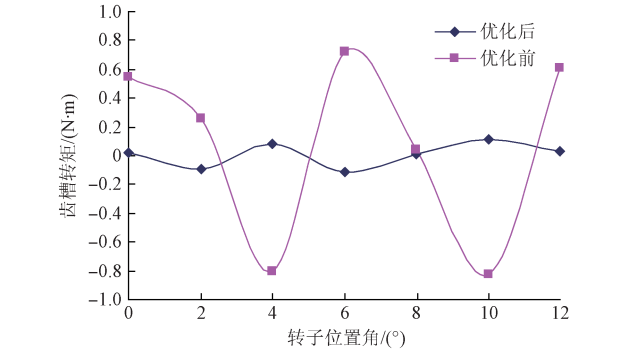


图 4 优化前后齿槽转矩对比
Fig. 4 Comparison of cogging torque before and after optimization

由图 4 可知,优化后齿槽转矩的幅值大约为 $0.126\text{ N}\cdot\text{m}$,而响应面的计算结果大约为 $0.12\text{ N}\cdot\text{m}$,响应面法与有限元的计算结果误差比为 4.8% 左右,误差在合理范围之内,验证了响应面法优化此类电机齿槽转矩的准确性,而优化的时间大大缩短,寻求的优化参数更加精确。同时,从优化前后对比来看,优化前电机的齿槽转矩幅值大约为 $0.72\text{ N}\cdot\text{m}$,优化后,齿槽转矩大约降低了 82.5%。因此,合理优化定子永磁型轴向磁通切换电机的转子齿形状、永磁体形状系数等定转子结构参数,可有效的削弱电机的齿槽转矩,提高电机的输出性能,降低电机的振动及噪声。

5.2 实验结果验证

对于此类电机,当电机的定转子形状及尺寸发生变化时,一定程度上影响电机的空载反电势波形变化,对电机的输出性能及调磁效果将产生一定的影响,齿槽转矩不能作为此类电机的唯一衡量标准。因此,在验证齿槽转矩的基础上,对电机的输出性能及调磁性进行仿真、实验验证。样机的实验平台如图 5 所示。优化前后的样机分别如图 5(a)、(b) 所示,图 5(c) 为优化后样机的实验平台,优化前的样机实验平台类似,伺服电机通过联轴器拖动样机,直流电源供给励磁绕组直流电流。

在有限元仿真的基础上,对电机的空载特性进行试验研究,直流电源不施加励磁电流,通过伺服驱动器改变

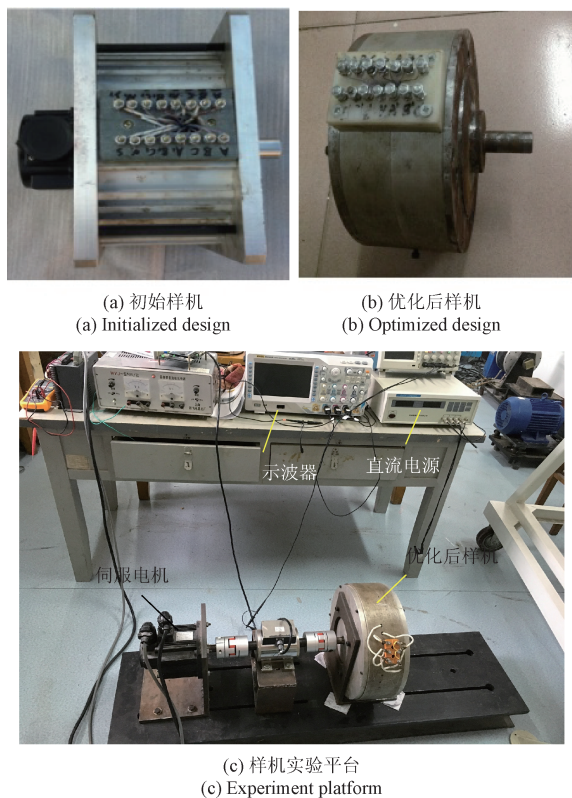


图5 样机及实验平台

Fig. 5 The prototype and experiment platform

伺服电机的转速,使样机的转子在 $0 \sim 600 \text{ r/min}$ 变化,转速每隔 50 r/min 记录电机的空载反电势幅值,得到优化前后,空载反电势随转速变化曲线的有限元仿真、实测变化曲线如图6所示。

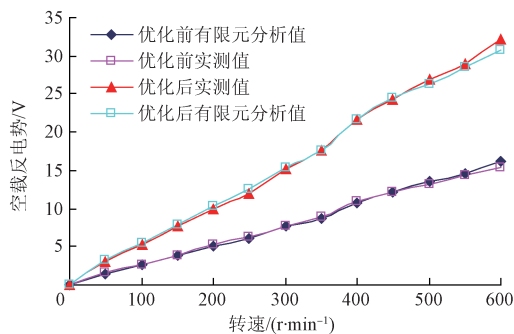


图6 空载反电势随转速变化曲线

Fig. 6 The curve of EMF with speed

由图6可知,空载反电势随着电机转速的升高而升高,当电机的转速为 600 r/min 时,优化前,电机的空载反电势大约为 16.5 V ,优化后,电机的空载反电势提升至 32 V ,优化后电机的空载反电势得到一定程度的升高。当转速升高时,优化后的变化幅度越大。而实测结果与有限元仿真结果基本吻合,验证了仿真结果的正确性和

合理性。

保持电机的转速为额定转速 400 r/min 不变,使电机的励磁电流大小在 $-6 \sim 8 \text{ A}$ 变化,得到空载反电势随励磁电流大小变化的曲线仿真值及实测值如图7所示。由图7可知,随着励磁电流的增大,优化前,电机的空载反电势在 $5 \sim 22 \text{ V}$ 变化;优化后,电机的空载反电势在 $6 \sim 27 \text{ V}$ 变化。调节电机的励磁电流,其电压输出值可得到有效的调节,优化前后,调磁性能基本保持一致。而有限元的仿真结果与实测结果也基本吻合。

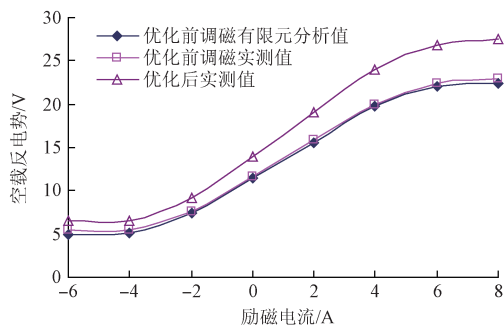


图7 优化前后调磁特性分析

Fig. 7 Analysis of magnetic properties before and after optimization

6 结论

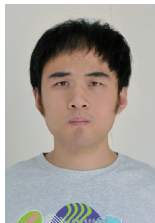
本文以一台三相 $12/10$ 极, 500 W 定子永磁型轴向磁通切换电机为例,推导出该类电机的齿槽转矩解析表达式,研究定转子结构参数对电机齿槽转矩的影响,分析定子槽弧宽、转子齿倾斜角及永磁体形状系数对齿槽转矩的影响,并采用响应面法优化定转子结构参数,得到使得齿槽转矩最小的定子槽弧宽、转子齿倾斜角及永磁体形状系数的最优组合,利用三维有限元分析与实验相结合的方法进行验证。仿真与实验结果表明,合理的选择定子永磁型轴向磁通切换电机的定转子结构参数可有效削弱齿槽转矩,当定子槽弧宽、转子齿倾斜角及永磁体形状系数分别为 8.75° 、 6.54° 和 0.96 时,电机的齿槽转矩最小,大约为 $0.126 \text{ N} \cdot \text{m}$,并且电机的空载反电势得到一定程度的升高,调磁特性基本不变,验证了该优化设计方法的合理性,为此类电机的优化分析与应用奠定一定的基础。

参考文献

- [1] CHENG M, HUA W, ZHANG J, et al. Overview of stator permanent magnet brushless machines [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58 (11): 5087-5101.

- [2] 程明,张淦,花为. 定子永磁型无刷电机系统及其关键技术综述[J]. 中国电机工程学报,2014,34(29):5204-5220.
CHENG M, ZHANG G, HUA W. Overview of stator permanent magnet brushless machine systems and their key technologies[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29):5204-5220.
- [3] 刘细平,郑爱华,王晨. 定子分割式轴向磁通切换混合励磁同步电机三维有限元分析与实验研究[J]. 电工技术学报,2012,27(10):110-113.
LIU X P, ZHENG AI H, WANG CH. 3-D Finite element analysis and experiment study of a stator-separated axial flux-switching hybrid excitation synchronous machine[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(10):110-113.
- [4] ZULU A, MECROW B, ARMSTRONG M. A wound-field three-phase flux-switching synchronous motor with all excitation sources on the stator[J]. IEEE Transactions On Industry Applications, 2010, 46(6):2363-2371.
- [5] LIN M Y, HAO L, LI X, et al. A novel axial field flux-switching permanent magnet wind power generator[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47(10):4457-4460.
- [6] 肖儿良,陈朱杰,莫康,等. 基于 TSMC 永磁方波电机转矩脉动抑制的研究[J]. 电子测量技术, 2016, 39(5):27-35.
XIAO ER L, CHEN ZH J, MO K, et al. Research in torque ripple reduction in permanent magnet square-wave motor based on two stage matrix converter[J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(5):27-35.
- [7] 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, 32(12):120-125.
HUANG SH 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, 32(12):120-125.
- [8] 柳霖,井立兵. Halbach 阵列永磁电机齿槽转矩分析与计算[J]. 磁性材料及器件, 2016, 47(2):48-52.
LIU L, JING L B. Analysis and calculation of the cogging torque of Halbach array permanent magnet machine[J]. Journal of Magnetic Materials and Devices, 2016, 47(2):48-52.
- [9] 于圣龙,白瑞林,李新. 负载对分数槽永磁电机转矩波动的影响[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(12):1781-1789.
YU SH L, BAI R L, LI X. Influence of electric load on torque ripple of permanent-magnet machine with fractional slot windings[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(12):1781-1789.
- [10] 李健,王爱元. 磁通切换永磁电动机的齿槽转矩削弱研究[J]. 上海电机学院学报, 2015, 18(2):82-88.
LI J, WANG AI Y. Cogging torque weakening of flux-switching permanent magnet machine[J]. Journal of Shanghai Dianji University, 2015, 18(2):82-88.
- [11] ABBASZADEH K, REZAAE A F, TESHNEHLAB M. Slot opening optimization of surface mounted permanent magnet motor for cogging torque reduction[J]. Energy Conversion and Management, 2012, 55(3):108-115.
- [12] WANG D H, WANG X H, JUNG S Y. Reduction on cogging torque in flux-switching permanent magnet machine by teeth notching schemes[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2012, 48(11):4228-4231.
- [13] JIANG X T, XING X W, LING Y, et al. Theoretical and simulation analysis of influences of stator tooth width on cogging torque of BLDC motors[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(10):4601-4604.
- [14] FEI W ZH, LUK P CH, SHEN J X. Torque analysis of permanent-magnet flux switching machines with rotor step skewing[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2012, 48(10):2664-2673.
- [15] 郝立,林明耀,徐姐,等. 轴向磁场磁通切换型永磁电机齿槽转矩抑制[J]. 电工技术学报, 2015, 30(2):21-26.
HAO L, LIN M Y, XU D, et al. Cogging torque reduction in axial field flux-switching permanent magnet machines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(2):21-26.
- [16] HAO L, LIN M Y, XU D, et al. Cogging torque reduction of axial field flux-switching permanent magnet machine by adding magnetic bridge in stator tooth[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2014, 24(3):503-506.
- [17] 王莉莉,陈德运,于晓洋,等. 电容层析成像系统传感器优化设计[J]. 仪器与仪表学报, 2015, 36(3):515-522.
WANG L L, CHEN D Y, YU X Y, et al. Sensor optimization design in electrical capacitance tomography system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(3):515-522.
- [18] 胡钉,蒋映. 分段初级直线感应电动机的建模与仿真[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(5):29-33.
HU D, JIANG Y. Modeling and simulation of segmented primary linear induction motor[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2016, 35(5):29-33.

作者简介



王晨,2010 年于西安电子科技大学获得学士学位,2013 年于江西理工大学获得硕士学位,现为南京航空航天大学在读博士,安徽机电职业技术学院讲师,主要研究方向为新型永磁电机的优化分析。

E-mail:wangchen1071@163.com

Wang Chen received B. Sc. from Xidian University in 2010 and M. Sc. from Jiangxi University of Science and Technology in 2013, respectively. Now he is Ph. D. candidate in Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, lecturer in Anhui Technical College of Mechanical and Electrical Engineering. His main research interest includes optimization and analysis of new

permanent magnet motor.



黄金霖,2010 年于江西理工大学获得学士学位,2013 年于江西理工大学获得硕士学位,现为安徽机电职业技术学院讲师,主要研究方向为新型永磁电机及其设计。

E-mail:huangjinlin0797@163.com

Huang Jinlin received B. Sc. from Jiangxi University of Science and Technology in 2010 and M. Sc. from Jiangxi University of Science and Technology in 2013, respectively. Now she is lecturer in Anhui Technical College of Mechanical and Electrical Engineering. His main research interest includes design and analysis of new permanent magnet motor.