

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.10.018

# 新型多齿开关磁链永磁记忆电机设计与分析\*

刘岩岩<sup>1,2,3</sup>, 刘旭<sup>1,2,3\*</sup>, 张晨光<sup>1,2,3</sup>, 孙朝勇<sup>1,2,3</sup>

(1. 省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室, 天津市 300130; 2. 河北省电磁场与电器可靠性重点实验室, 天津市 300130; 3. 河北工业大学 电气工程学院, 天津市 300130)

**摘要:**针对传统多齿开关磁链永磁电机在弱磁区运行效率低的问题,设计了一种新型多齿开关磁链永磁记忆(MSFPMM)电机。在传统多齿开关磁链永磁电机中,使用了磁化水平和磁化方向可以在线改变的矫顽力永磁体;通过在该电机的励磁绕组中通入电流脉冲,改变了矫顽力永磁体的磁化水平和磁化方向,实现了高速区弱磁;利用有限元法分析了该电机中矫顽力永磁体处于不同磁化状态时,MSFPMM电机的气隙磁密、空载反电动势、转矩/转速特性以及运行效率;制作了MSFPMM样机,对MSFPMM电机的电磁特性进行实验验证。研究表明:当MSFPMM电机的气隙磁密减弱时,该电机的高效率区会向高转速、低转矩区移动;MSFPMM电机具有比传统多齿开关磁链永磁电机更高的弱磁区运行效率。

**关键词:**多齿开关磁链永磁记忆电机;记忆电机;效率

中图分类号:TM351

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2019)10-1099-06

## Design and analysis of novel multi-tooth switched flux permanent magnet memory machine

LIU Yan-yan<sup>1,2,3</sup>, LIU Xu<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Chen-guang<sup>1,2,3</sup>, SUN Chao-yong<sup>1,2,3</sup>

(1. State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment, Tianjin 300130, China; 2. Key Laboratory of Electromagnetic Field and Electrical Apparatus Reliability of Hebei Province, Tianjin 300130, China; 3. School of Electrical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of low efficiency of conventional multi-tooth switched flux permanent magnet machine in flux weakening region, a novel multi-tooth switched flux permanent magnet memory (MSFPMM) machine was developed. In the MSFPMM machine, the on-line magnetization and demagnetization can be achieved by using the permanent magnets with low coercive force. Thus, the air-gap flux density can be reduced by changing the magnetization state of low coercive force permanent magnet with current pulse in the DC field winding. The performance such as the air-gap flux density, back-EMF, torque-speed characteristics and efficiency in the MSFPMM machine with different magnetization states was investigated by finite element analysis. A prototype MSFPMM machine was built to verify the machine performance. The results indicate that in the MSFPMM machine the efficiency in high speed and low torque region increases when the air-gap flux density is reduced. Furthermore, the MSFPMM machine exhibits higher efficiency in flux weakening region compared with the conventional multi-tooth switched flux permanent magnet machine.

**Key words:** multi-tooth switched flux permanent magnet memory (MSFPMM) machine; memory machine; efficiency

收稿日期:2019-02-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51507045);天津市自然科学基金资助项目(16JCYBJC00)

作者简介:刘岩岩(1991-),男,河北邯郸人,硕士研究生,主要从事永磁同步电机设计方面的研究。E-mail:201621401083@stu.hebut.edu.cn

通信联系人:刘旭,男,博士,教授。E-mail:liuxu@hebut.edu.cn

## 0 引言

电动汽车对电动机的转矩密度、转速范围及效率等具有较高的要求。永磁同步电机,特别是稀土永磁电机,具有体积小、质量轻、损耗小、效率高以及转矩密度高等优点<sup>[1-2]</sup>,可以满足电动汽车的应用要求。传统永磁同步电机将永磁体放在转子上,不利于永磁体的散热,增加了永磁体不可逆退磁的风险。文献[3]提出了一种将永磁体放置在定子上的开关磁链永磁电机(switched flux permanent magnet, SFPM, machine),其结构简单、利于散热;为了减少永磁体用量,又提出了使用多齿定子结构的开关磁链电机(multi-tooth switched flux permanent magnet, MSFPM, machine)<sup>[4]</sup>,该电机在恒转矩区具有较大转矩,可适用于直接驱动。但是 SFPM 电机与传统永磁同步电机类似,在高速运行时需要施加负  $d$  轴电流,降低了电机的运行效率<sup>[5]</sup>。

为了改善永磁同步电机的弱磁性能和运行效率,记忆电机应运而生<sup>[6]</sup>。记忆电机通过脉冲电流改变低矫顽力永磁体的磁化水平和磁化方向,实现了在线调磁,具有较好的弱磁性能<sup>[7-11]</sup>。由于脉冲电流持续时间很短,在调磁过程中的损耗几乎可以忽略,电机具有较高的运行效率<sup>[12]</sup>。但是记忆电机使用了低矫顽力(low coercive force, LCF)永磁体,其气隙磁密较低,输出功率欠佳。为了提高记忆电机的功率密度,国内外研究人员提出了开关磁链永磁记忆电机(switched flux permanent magnet memory, SFPM, machine)<sup>[13-16]</sup>,该电机将高矫顽力永磁体和 LCF 永磁体结合起来,实现了在线调磁和较高的功率输出。

本文将设计一种新型多齿开关磁链永磁记忆(MSFPM)电机,通过分析新型电机的电磁性能,并与传统 MSFPM 电机进行对比,以分析 MSFPM 电机高效运行的规律。

## 1 电机拓扑及运行原理分析

MSFPM 电机的拓扑结构及简化磁路模型如图 1 所示。

从图 1(a)中可以看出:MSFPM 电机使用多齿定子结构,减少了永磁体的用量。在新型电机的结构中,高矫顽力的永磁体(NdFeB)和 LCF 永磁体采用并行磁路结构,NdFeB 被嵌入定子中,LCF 永磁体按照极性交替排列放置在定子轭的外部。为了实现在线调磁,笔者在定子轭的外部增加了独立的励磁绕组。通过在励磁绕组中施加电流脉冲,可以对 LCF 永磁体进行在

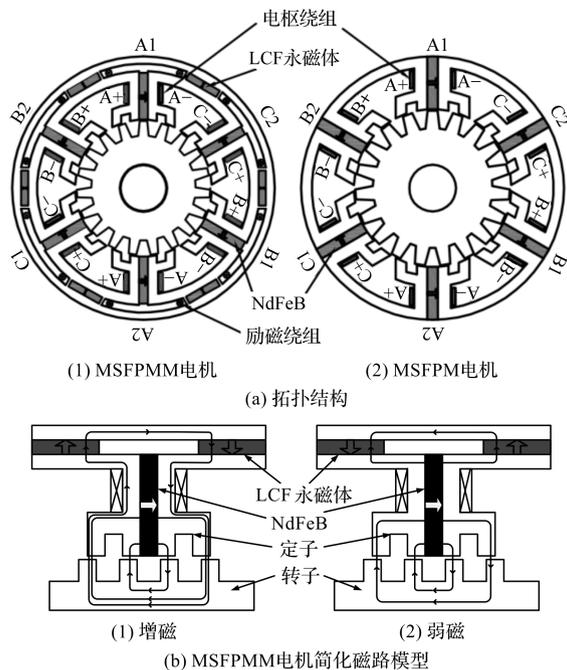


图 1 拓扑结构及简化磁路模型

线的充磁或去磁。

MSFPM 电机的运行原理与 SFPM 电机的运行原理相同。MSFPM 电机在线调磁时,通过在励磁绕组中施加短时电流脉冲来改变 LCF 的磁化水平和磁化方向,从而改变气隙磁密的大小。从图 1(b)中可以看出:增磁状态下两种永磁体产生的磁链同向穿过气隙,弱磁状态下只有 NdFeB 的一部分磁链穿过气隙,其余磁链被 LCF 永磁体短路。

MSFPM 电机的主要尺寸参数如表 1 所示。

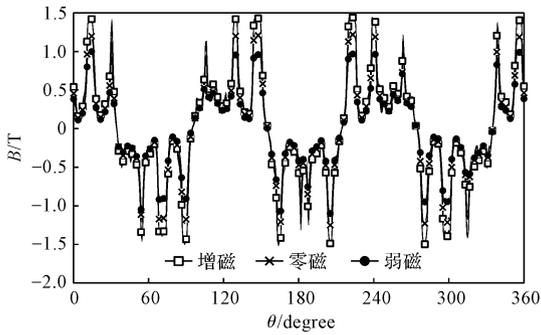
表 1 MSFPM 电机主要设计参数

参数名称	数值	参数名称	数值
定子外径/mm	45	NdFeB 尺寸/mm	13.4 × 3.4
转子外径/mm	25.5	LCF 永磁体尺寸/mm	12 × 3
定子极数	6	定子槽深/mm	2.5
转子极数	19	每相绕组匝数	72
定子齿宽/mm	5	轴长/mm	25
转子极弧系数	1/3	气隙/mm	0.5
NdFeB 剩磁/T	1.2	LCF 永磁体剩磁/T	0.72
NdFeB 矫顽力/ (kA · m <sup>-1</sup> )	910	LCF 永磁体矫顽力/ (kA · m <sup>-1</sup> )	360

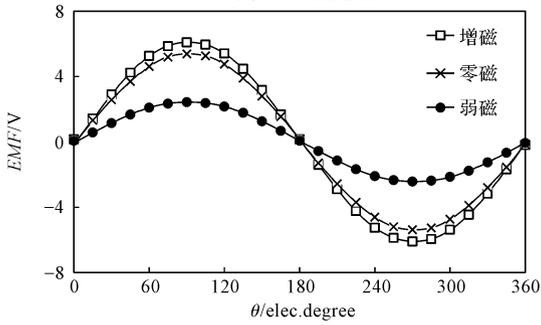
## 2 电磁性能分析

### 2.1 空载特性

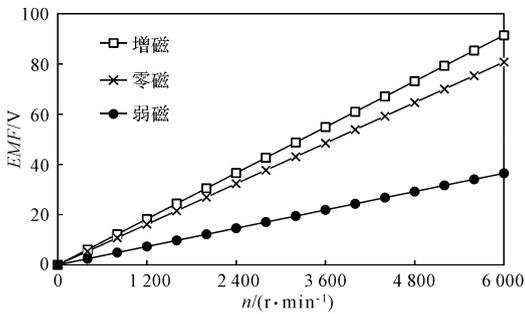
本研究在空载情况下计算 MSFPM 电机的电磁特性,如图 2 所示。



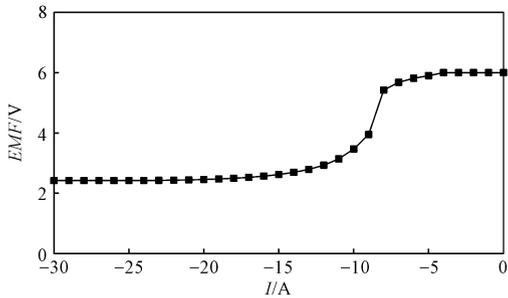
(a) 气隙磁通密度



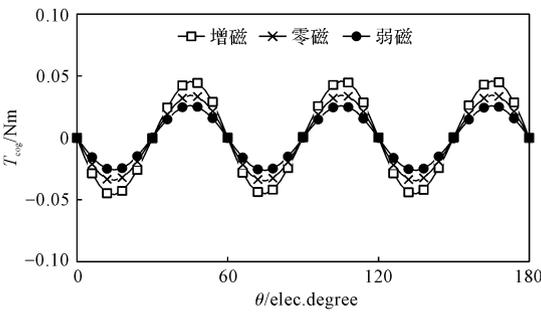
(b) 空载反电动势( $n=400 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ )



(c) 电机反电动势



(d) 反电动势幅值随脉冲电流幅值变化情况( $n=400 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ )



(e) 齿槽转矩

图 2 MSFPMM 电机空载时电磁特性

由图 2 可知:当在 MSFPMM 电机的励磁绕组中施加不同幅值的电流脉冲时,LCF 永磁体的磁化水平以及磁化方向将发生改变,MSFPMM 电机的气隙磁密

( $B$ )将随之变化,从而改变 MSFPMM 电机的反电动势( $EMF$ )。气隙磁密随转子位置( $\theta$ )变化情况如图 2(a)所示。在增磁状态、弱磁状态和低矫顽力永磁体完全去磁(零磁)3 种情况下的空载反电动势如图 2(b)所示。由图 2(b)可以看出:MSFPMM 电机具有正弦反电动势。MSFPMM 电机在不同磁化状态下相对于不同转速的空载反电动势如图 2(c)所示。多齿记忆电机在弱磁状态下,施加不同幅值的电流脉冲时,其反电动势幅值的变化情况如图 2(d)所示。由图 2(d)可知:随着去磁电流脉冲幅值的增大,LCF 永磁体的去磁程度不断增大,电机反电动势幅值可降低 60.1%。MSFPMM 电机在增磁、零磁以及弱磁状态下的齿槽转矩( $T_{\text{cog}}$ )如图 2(e)所示。

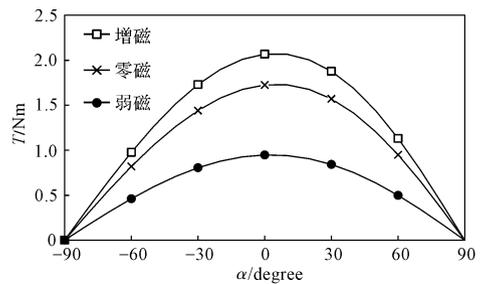
### 2.2 转矩特性

MSFPMM 电机在线调磁过程中,励磁绕组中的脉冲电流持续时间很短,所以脉冲电流对电机运行的影响基本可以忽略。MSFPMM 电机的转矩( $T$ )可以表示为:

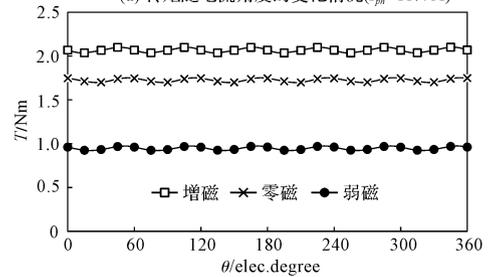
$$T = \frac{3}{2}p[\psi_{\text{pm}}I_q + (L_d - L_q)I_dI_q] \quad (1)$$

式中: $p$ —极对数; $\psi_{\text{pm}}$ —永磁磁链; $I_d$ — $d$ 轴电流; $I_q$ — $q$ 轴电流; $L_d$ — $d$ 轴电感; $L_q$ — $q$ 轴电感。

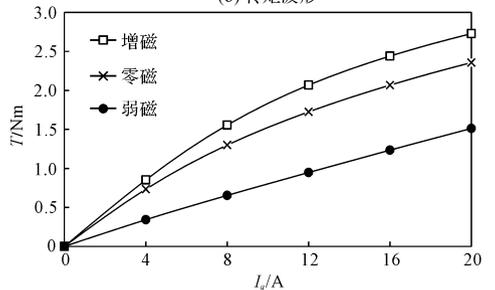
MSFPMM 电机的转矩特性如图 3 所示。



(a) 转矩随电流角度的变化情况( $I_{\text{pm}}=11.4 \text{ A}$ )



(b) 转矩波形



(c) 转矩随 $q$ 轴电流的变化情况( $I_d=0 \text{ A}$ )

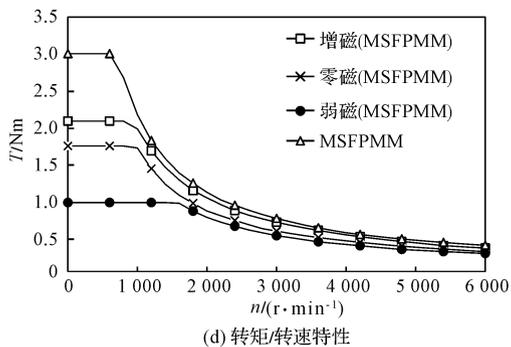


图 3 MSFPMM 电机转矩特性

由图 3 可知:由于 MSFPMM 电机的磁阻转矩较小,当永磁磁链变化时,转矩会产生明显的变化,在弱磁状态下平均转矩的幅值为增磁状态下平均转矩幅值的 45.15%。MSFPMM 电机在额定电流下平均转矩相对于电流初始相位角( $\alpha$ )变化的情况如图 3(a)所示。由图 3(a)可知:当电流初始相位角为零时,MSFPMM 电机获得最大转矩。当额定电流初始相位角为  $0^\circ$  时,一个电周期内 MSFPMM 电机的转矩波形如图 3(b)所示。由图 3(b)可以看出:MSFPMM 电机的转矩波形较平稳,转矩脉动较小,有利于电机的稳定运行。当  $d$  轴电流为 0 时,平均转矩相对于不同  $q$  轴电流( $I_q$ )的变化情况如图 3(c)所示。最大直流母线电压为 48 V 时,MSFPMM 电机转矩/转速特性如图 3(d)所示。由图 3(d)可知:MSFPMM 电机继承了 MSFPM 电机低速大转矩的特点。

对比 MSFPMM 电机和 MSFPM 电机的转矩/转速特性可知,MSFPMM 电机虽然损失了一定的输出转矩,但是获得了更好的弱磁性能。

弱磁系数可以表示开关磁链电机弱磁性能的强弱,其定义如下:

$$K_{fw} = \frac{L_d I_{\max}}{\psi_{pm}} \quad (2)$$

式中: $I_{\max}$ —最大电枢电流; $L_d$ — $d$  轴电感; $\psi_{pm}$ —永磁磁链。

MSFPMM 电机和 MSFPM 电机的永磁磁链、 $d$  轴电感和弱磁系数如表 2 所示。

表 2 永磁磁链、 $d$  轴电感、弱磁系数对比

	MSFPMM			MSFPM
	增磁	零磁	弱磁	
$\psi_{pm}/\text{Wb}$	0.007 70	0.006 79	0.003 07	0.008 26
$L_d/\text{mH}$	1.652	1.607	0.856	1.625
$K_{fw}$	2.445 1	2.697 0	3.181 0	2.754 2

由表 2 可知:在增磁、零磁和弱磁状态下,MSFPMM 电机的弱磁系数均大于 1,理论上均可以达到无限转速。

### 3 效率对比分析

#### 3.1 效率计算

为了对 MSFPMM 电机和 MSFPM 电机运行效率进行对比分析,本研究在有限元计算的过程中将两个电机的定子外径、轴长、气隙和每相绕组匝数保持相同,两个电机的电枢电流密度和最大直流母线电压均为  $6.3 \text{ A}/\text{mm}^2$  和 48 V。

电枢电流为 10 A 时,MSFPMM 电机的铜耗为 12.51 W,相比于 MSFPM 电机(8.70 W),MSFPMM 电机增加了额外的励磁绕组和定子外轭,导致其槽面积减小。因此,MSFPMM 电机的铜耗要比 MSFPM 电机稍大。

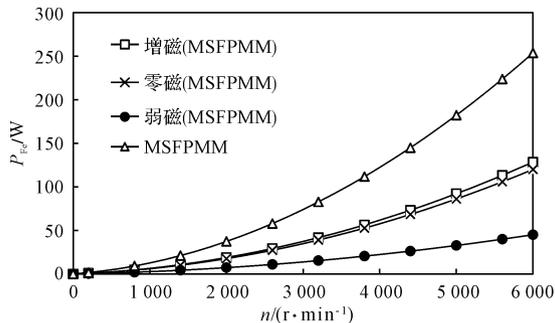
在高速区时,铁耗( $P_{Fe}$ )是电机的主要损耗。MSFPMM 电机的铁耗为:

$$P_{Fe} = K_h f (B_m)^2 + K_c (f B_m)^2 + K_e (f B_m)^{1.5} \quad (3)$$

式中: $B_m$ —气隙磁密的基波幅值,T; $f$ —频率,Hz; $K_h$ —磁滞损耗系数; $K_c$ —涡流损耗系数; $K_e$ —附加损耗系数。

从式(3)可以看出:当减小气隙磁密时,电机的铁耗会减小。

MSFPMM 电机在不同磁化状态下的铁耗对比如图 4 所示。

图 4 不同磁化状态下铁耗对比( $J=6.3 \text{ A}/\text{mm}^2$ )

由图 4 可知:在高速区时,MSFPMM 电机通过改变 LCF 永磁体的磁化水平减少了气隙磁密,相对于 MSFPM 电机,其铁耗大大减少。虽然气隙磁密被减小时,电机的输出功率也会减小,但是通过对比式(1,3)可知,相对于输出功率的减小,铁耗的减小幅度更大。

因此,MSFPMM 电机通过减小气隙磁密进行调速,可提高高速区运行时的效率。

#### 3.2 效率对比

根据电机的铁耗、永磁体损耗、铜耗和输出功率,可以计算电机的运行效率。

MSFPM 电机和 MSFPMM 电机的效率图如图 5 所示。

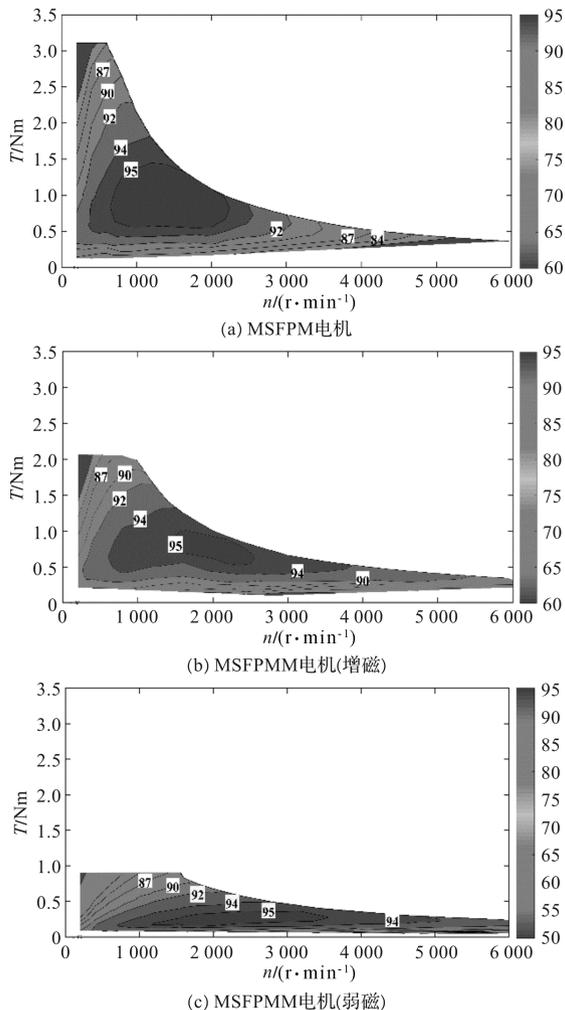


图 5 MSFPM 电机和 MSFPMM 电机的效率图

由图 5 可知:由于在低速区时电机的损耗主要是铜耗,此时 MSFPMM 电机和 MSFPM 电机均可保持较高的效率运行。在高速区时,电机的铜耗减小,但 MSFPM 电机的铁耗增加的更多,导致其运行效率降低;而 MSFPMM 电机通过减少气隙磁通密度达到弱磁效果,降低了铁耗,所以在高速区仍然可以保持高效率运行。

从图 5 中也可以看出:弱磁状态时,MSFPMM 电机的高效率( $>95\%$ )区域向高速区移动。因此,如果将 MSFPMM 电机在每个磁化状态时的高效率区域组合起来,可以使电机在较宽的调速范围内保持高效运行。

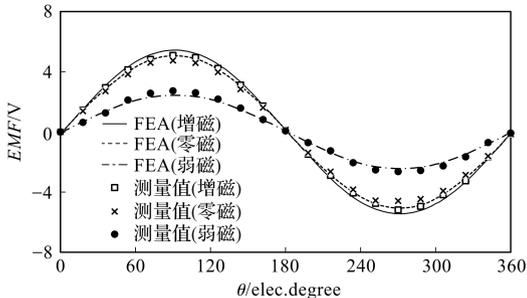
### 4 实验验证

为了对以上分析进行验证,本研究使用  $\text{AlNiCo}$  作为低矫顽力永磁体,制作了原理样机,测量了不同磁化状态下 MSFPMM 电机的空载反电动势、齿槽转矩、静态转矩。

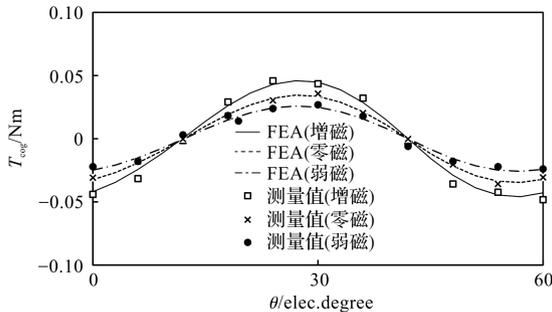
样机及实验结果如图 6 所示。



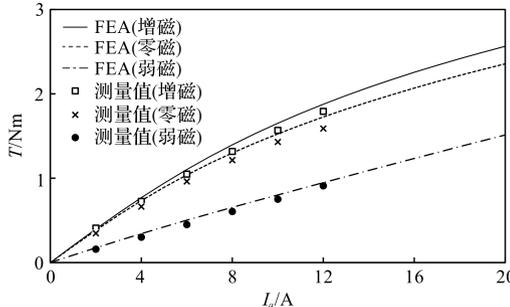
(a) 定子 (b) 转子



(c) MSFPMM 电机的反电动势测试结果



(d) MSFPMM 电机的齿槽转矩测试结果



(e) MSFPMM 电机的静态转矩测试结果

图 6 样机及实验结果

由图 6 可知:计算结果与实验结果基本吻合;计算结果与实验结果之间的误差,主要是因为二维有限元计算中没有考虑电机的端部效应。

### 5 结束语

针对永磁同步电机弱磁区运行效率低的问题,本研究以 MSFPM 电机为基础设计了一种新型 MSFPMM 电机;基于有限元分析了电机的电磁特性,计算了在增磁、弱磁状态下 MSFPMM 电机的运行效率,并进行了实验验证。

实验结果表明:MSFPMM 电机的磁链和反电动势随 LCF 永磁体的磁化状态不同而改变;MSFSMM 电机的反电动势可通过弱磁降低 60.1%,与相同尺寸的传

统 MSFPM 电机相比, MSFPMM 电机在弱磁区运行时的铁耗可以显著降低, 从而提高了其在弱磁区的运行效率; 结合 LCF 永磁体的不同的磁化状态可知, MSFPMM 电机可以在较宽的调速范围内保持高效运行。

### 参考文献 (References):

- [1] 唐任远. 稀土永磁电机发展综述[J]. 电气技术, 2005, 20(4): 1-6.
- [2] 郭有权, 司纪凯, 刘群坡, 等. 机器人用直驱永磁电机研究与发展综述[J]. 微特电机, 2018, 46(7): 81-85.
- [3] ZHU Z Q, CHEN J T. Advanced flux-switching permanent magnet brushless machines [J]. **IEEE Transactions on Magnetics**, 2010, 46(6): 1447-1453.
- [4] SHI J T, ZHU Z Q. Analysis of novel multi-tooth variable flux reluctance machines with different stator and rotor pole combinations [J]. **IEEE Transactions on Magnetics**, 2015, 51(5): 1-11.
- [5] 康劲松, 蒋 飞, 钟再敏, 等. 电动汽车用永磁同步电机弱磁控制策略综述[J]. 电源学报, 2017, 15(1): 15-22.
- [6] OSTOVIC V. Memory motors-a new class of controllable flux PM machines for a true wide speed operation[C]. Conference Record of the 2001 IEEE Industry Applications Conference, Chicago: IEEE, 2001.
- [7] 林鹤云, 阳 辉, 黄允凯, 等. 记忆电机的研究综述及最新进展[J]. 中国电机工程学报, 2013(33): 57-67, 8.
- [8] HUANG Jia, WANG Xin-jian, SUN Ze-chang. Variable flux memory motors: a review [C]. 2014 IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), Beijing: IEEE, 2014.
- [9] 林明耀, 杨公德, 李 念. 混合永磁记忆电机系统及其关键技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(4): 1187-1202, 1296.
- [10] YANG H, LIN H, ZHU Z Q. Recent advances in variable flux memory machines for traction applications: a review [J]. **CES Transactions on Electrical Machines and Systems**, 2018, 2(1): 34-50.
- [11] 刘恒川, 林鹤云, 黄明明, 等. 可变磁通永磁记忆电机调磁特性[J]. 电工技术学报, 2010, 25(11): 42-47, 55.
- [12] LIU X, WU D, ZHU Z Q, et al. Efficiency improvement of switched flux PM memory machine over interior PM machine for EV/HEV applications [J]. **IEEE Transactions on Magnetics**, 2014, 50(11): 1-4.
- [13] YANG H, LIN H, ZHU Z Q, et al. A variable-flux hybrid-PM switched-flux memory machine for EV/HEV applications [J]. **IEEE Transactions on Industry Applications**, 2016, 52(13): 2203-2214.
- [14] WU D, LIU X, ZHU Z Q, et al. Novel switched flux hybrid magnet memory motor [C]. 7th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2014), Manchester: IEEE, 2014.
- [15] 姜春辉, 田玉冬. 一种混合励磁开关磁通永磁记忆电机设计与调磁性能分析[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(5): 70-76.
- [16] YANG H, ZHU Z Q, LIN H, et al. Design synthesis of switched flux hybrid-permanent magnet memory machines [J]. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, 2017, 32(1): 65-79.

[编辑: 方越婷]

### 本文引用格式:

刘岩岩, 刘 旭, 张晨光, 等. 新型多齿开关磁链永磁记忆电机设计与分析[J]. 机电工程, 2019, 36(10): 1099-1104.

LIU Yan-yan, LIU Xu, ZHANG Chen-guang, et al. Design and analysis of novel multi-tooth switched flux permanent magnet memory machine [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2019, 36(10): 1099-1104.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>