

# 双 L 型导磁块对开关磁链电机最大调磁性能影响与分析

刘旭<sup>1,2</sup>, 段蓉<sup>1,2</sup>, 赵强<sup>1,2</sup>

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

**摘要:** 针对开关磁链永磁电机转速范围不易调节的问题, 本文在电机定子外围引入了利用端部效应的双 L 型导磁块, 利用漏磁削弱永磁磁链, 提高永磁磁链调节能力。分析了使用双 L 型导磁块后开关磁链电机的弱磁原理, 研究了双 L 型导磁块完全插入后开关磁链电机的电磁性能, 解释了电机最大调磁特性与永磁磁链以及直轴电感之间的关系。研究表明, 使用双 L 型导磁块不仅削弱永磁磁链, 而且增大电枢绕组直轴电感, 提高了开关磁链电机的最大调磁能力。与导磁块仅置于定子轭部的方案相比, 使用双 L 型导磁块后, 开关磁链电机具有更大的调速范围和恒功率范围。最后, 通过一台 12/10 开关磁链电机进行了实验验证。

**关键词:** 机械调磁; 有限元法; 双 L 型导磁块; 电磁性能

**DOI:** 10.12067/ATEEE2111008

**文章编号:** 1003-3076(2022)09-0001-09

**中图分类号:** TM351

## 1 引言

由于输出转矩大、运行效率高, 永磁电机<sup>[1-3]</sup>广泛应用于新能源汽车驱动系统。其中, 开关磁链永磁(Switched-Flux Permanent-Magnet, SFPM)电机作为一类定子型永磁电机<sup>[4]</sup>, 定子绕组与永磁体均位于定子上且永磁体内嵌于定子齿中, 运行时电枢磁链与永磁磁链并联使电机具有良好的抗退磁能力。与开关磁阻电机类似, SFPM 电机采用结构简单的凸极转子, 稳定性好、散热能力强<sup>[5]</sup>。然而, 由于电机采用永磁体励磁, 受恒定磁动势的影响气隙磁场不易调节。

目前, 大部分开关磁链电机采用弱磁控制来拓宽调速范围, 即控制直轴电流产生弱磁磁动势削弱电机永磁磁场, 但额外施加的直轴电流降低了电机效率, 最大转速受逆变器额定输出电压以及电流的限制, 调速范围有限<sup>[6-9]</sup>。

为进一步提高电机的调速能力, 国内外学者提出了一系列新型电机拓扑, 如混合励磁结构、变定子绕组结构、机械调磁结构以及记忆电机等。其中, 机械调磁电机通过改变电机的永磁磁链实现电机高速

弱磁<sup>[10-15]</sup>。文献[14]提出了一种利用离心力带动永磁体旋转实现电机内部磁场自动调节的机械弱磁装置, 但由于该装置位于电机转子上, 高速运行时电机的机械可靠性低。通过在 SFPM 电机定子径向外围增设导磁块, 文献[15]提出了磁通调节开关磁链永磁(Flux-Adjustable Switched-Flux Permanent-Magnet, FASFPMP)电机, 利用导磁块(Flux Adjuster, FA)在定子外侧建立漏磁路拓宽了电机的调速范围, 但该电机在恒功率区电磁转矩低, 同时 FA 径向厚度过大导致电机定子外径增加。

因此, 本文在 FASFPMP 电机的基础上提出一种双 L 型导磁块应用于 SFPM 电机, 通过在定子轭部和端部产生短路磁路, 从而实现调节永磁磁链的效果。通过分析双 L 型导磁块(L-Flux Adjuster, L-FA)放置时电机的机械弱磁原理, 建立双 L 型磁通可调开关磁链电机(Double L-Flux Adjuster Switched-Flux Permanent-Magnet, DL-FASFPMP)磁路模型研究电机最大转速与永磁磁链以及直轴电感之间的关系。利用 Maxwell 建立电机模型, 计算双 L 型导磁块放置前后电机永磁磁链、电感以及转矩转速曲线等电磁特性, 并进行实验验证双 L 型导磁块的有效性。

**收稿日期:** 2021-11-02

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(52077055)

**作者简介:** 刘旭(1984-), 男, 山西籍, 教授, 博士, 研究方向为新型永磁电机及其驱动控制、电机驱动集成技术;  
段蓉(1997-), 女, 山西籍, 硕士研究生, 研究方向为新型永磁电机。

## 2 DL-FASFPM 电机拓扑

使用双 L 型导磁块的 SFPM 电机拓扑如图 1 所示,由一组双 L 型导磁块和 12/10 SFPM 电机两部分构成,图 1(a)为 FASFPM 电机拓扑,导磁块仅位于电机定子轭部并与定子齿对齐。在 SFPM 电机的端部和轭部放置双 L 型导磁块构成 DL-FASFPM 电机,如图 1(b)所示。单个定子结构如图 1(c)所示, L 型导磁块从两端沿轴向插入,放置于电机定子上对电机永磁磁链进行调节。

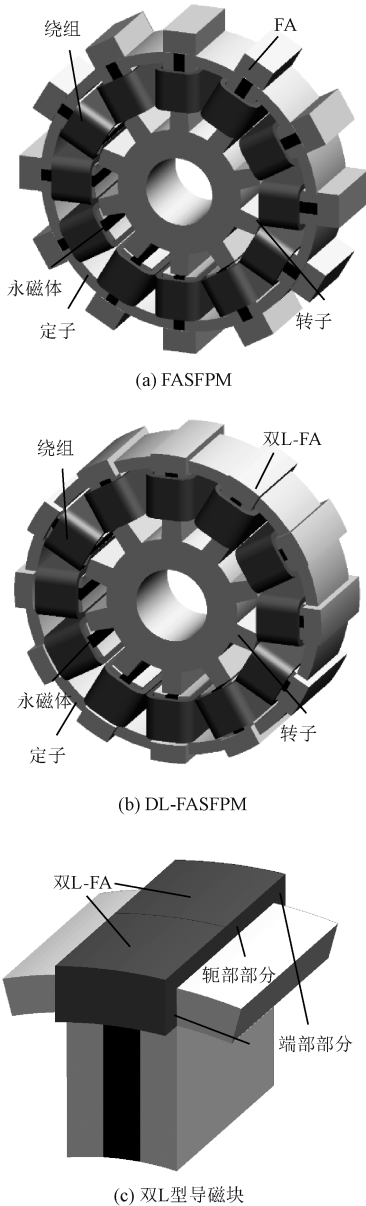


图 1 FASFPM 与 DL-FASFPM 电机拓扑

Fig.1 Topology of FASFPM and DL-FASFPM machine

分析双 L 型导磁块对 SFPM 电机磁场影响,使用三有限元建立电机模型。电机参数见表 1。

表 1 FASFPM、DL-FASFPM 电机参数

参 数	FASFPM	DL-FASFPM
定子外径 $D_s/\text{mm}$	93.6	93.6
转子外径 $D_r/\text{mm}$	52.32	54
定子外轭厚度 $W_{\text{yoke}}/\text{mm}$	3.49	3.6
每相电枢绕组匝数 $N_a$	36	36
轴向长度 $L_{\text{st}}/\text{mm}$	31	31
气隙厚度 $g/\text{mm}$	0.5	0.5
永磁体剩余磁感应强度 $B_r/\text{T}$	1.2	1.2
永磁体相对磁导率 $\mu_r$	1.05	1.05
定子极数 $N_s$	12	12
转子极数 $N_r$	10	10
导磁块长度/mm	10.46	10.8
导磁块宽度/mm	3.2	4.2
导磁块厚度/mm	31	31

## 3 DL-FASFPM 电机调速原理

忽略磁滞、涡流损耗以及饱和效应的情况下, SFPM 电机在 d-q 坐标系下的电压方程如下:

$$U_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e L_q i_q \quad (1)$$

$$U_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_e L_d i_d + \omega_e \psi_m \quad (2)$$

式中,  $U_d$ 、 $U_q$ 、 $i_d$ 、 $i_q$ 、 $L_d$ 、 $L_q$  分别为电机直轴与交轴下电压、电流和电感分量;  $\omega_e$ 、 $\psi_m$  分别为电机转速、永磁磁链;  $R_s$  为定子绕组电阻。当电机运行于恒转矩区时,电机输出电压随着电机转速的升高而增大,当转速达到额定转速时,电压升高到变频器最大输出电压  $U_{\text{max}}$ 。为继续提高转速,且保证电机的恒功率运行,电机将进入弱磁工作状态,电机最大转速由式(3)可得:

$$\omega_{\text{max}} = \frac{U_{\text{max}}}{N_r(\psi_m - L_d i_d)} \quad (3)$$

由式(3)可知,在满足电压与电流限制的同时,可通过减小永磁磁链、增大电机直轴电感的方式提高电机最大转速。

图 2 为开关磁链永磁电机中导磁块的调磁原理图。如图 2(a)所示,在电机外侧放置导磁块,永磁磁链通过定子外轭部流经导磁块构成径向自回路,这一部分磁通并不参与电机电磁能量转换,永磁磁链幅值降低。

由于 SFPM 电机轴长相对较短,且永磁体置于定子位置,使得该电机径向磁通密度沿轴向方向有明显衰减,端部效应显著<sup>[16]</sup>。如图 2(b)所示,与径

向调磁类似,定子端部放置导磁块增大轴向上漏磁,扩大端部效应削弱电机永磁磁场。

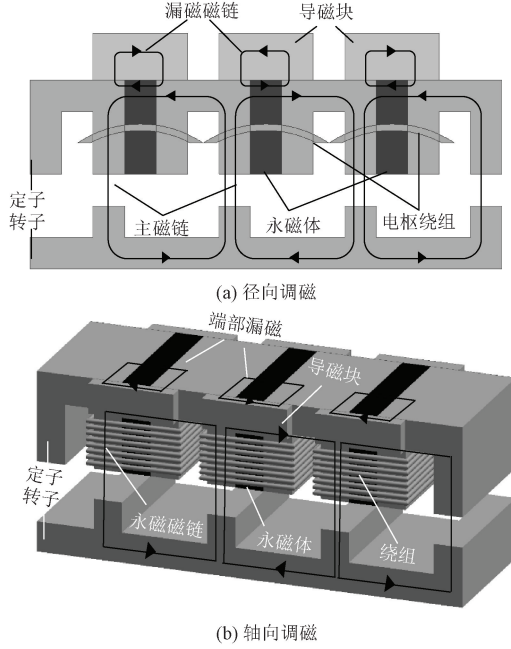


图2 导磁块调磁原理图

Fig.2 Principle of flux-adjusters

本文在径向与轴向上同时设置导磁块构成双L型导磁块,如图1(c)所示。当电机需要弱磁运行时,将两个L型导磁块从两端沿轴向插入,实现电机的机械弱磁。图3为永磁磁链随着双L型导磁块插入时的变化曲线。随着导磁块插入,电机永磁磁链减小,且双L型导磁块行程大于等于60%之后,永磁磁链变化率明显增加,这是因为端部部分开始参与机械弱磁。当导磁块完全插入时,电机的永磁磁链达到最小值,此时SFPM电机永磁磁链最小。

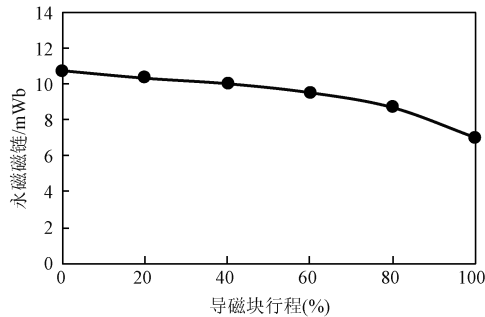


图3 不同导磁块位置下SFPM电机的永磁磁链

Fig.3 Permanent magnet flux-linkage at different positions of double L-FA

电机的弱磁能力<sup>[11]</sup>可由弱磁系数 $K_{fw}$ 表示为:

$$K_{fw} = \frac{L_d i_{\max}}{\psi_m} \quad (4)$$

式中, $i_{\max}$ 为逆变器所能输出的最大电流。由于电机弱磁系数与永磁磁链成反比,为研究双L型导磁块对SFPM电机最大调磁性能的影响,本文对双L型导磁块完全插入后的电机电磁性能进行分析。忽略电机饱和效应后得到的1/4电机磁路模型如图4所示。

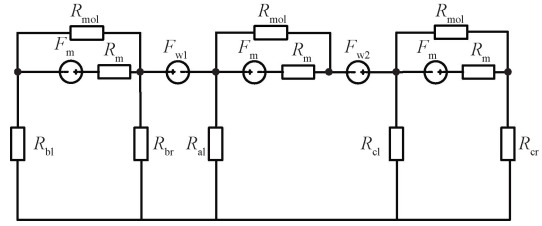


图4 机械调磁开关磁链永磁电机磁路图

Fig.4 Simplified circuit of mechanical variable flux SFPM machine

图4中, $F_m$ 、 $R_m$ 以及 $R_{mol}$ 分别为电机永磁磁动势、永磁磁阻以及漏磁阻; $F_{w1}$ 和 $F_{w2}$ 为电机相邻相的绕组磁动势; $R_{bl}$ 、 $R_{br}$ 、 $R_{al}$ 、 $R_{cl}$ 及 $R_{cr}$ 分别为三相定子齿部磁路的等效磁阻。通过对简化磁路模型进行分析,电机A相绕组磁链如式(5)所示, $N$ 为电机绕组匝数,电机磁链与漏磁磁阻呈正相关,即随漏磁磁阻减小,永磁磁链幅值降低。

$$\psi_A = \left[ 1 - \frac{R_m(R_{cl} + R_{al})}{R_m(R_{cl} + R_{al}) + R_{mol}(R_m + R_{cl} + R_{al})} \right] \cdot \frac{NF_m}{R_m + R_{cl} + R_{al}} \quad (5)$$

同理,如式(6)所示,电机d轴电感只与绕组匝数 $N$ 和各部分磁路磁阻有关,随着电机漏磁路磁阻减小,d轴电感增大。

$$L_d = \frac{N^2}{2} \left[ \frac{1}{(R'_m + R_{cr}) // R_{cl}} + \frac{3}{(R'_m + R_{bl}) // R_{br}} \right] \cdot \left\{ 1 - \frac{R_{al}}{[(R'_m + R_{cr}) // R_{cl} + R'_m] // [(R'_m + R_{bl}) // R_{br}] + R_{al}} \right\} \quad (6)$$

$R'_m = R_{mol} // R_m$

定子外侧与端部的漏磁磁阻可由导磁块径向和轴向磁阻近似表示,分别为 $R_{\sigma R}$ 、 $R_{\sigma A}$ 。对于使用双L型导磁块的SFPM电机,定子漏磁磁阻可由导磁块径向和轴向两并联磁阻近似表示为:

$$R_{mol} = \frac{R_{\sigma R} R_{\sigma A}}{R_{\sigma R} + R_{\sigma A}} \quad (7)$$

因此,在不计及磁路饱和的情况下,双L型导磁块同时增大了电机定子端部与径向的漏磁,在降低电机永磁磁链的同时增加了直轴电感,提高了电机的调磁性能。

#### 4 双L型导磁块对SFPM电机电磁性能影响

双L型导磁块的引入,在SFPM电机外围径向与轴向上均建立了短路磁路,减小了电机的永磁磁链。为进一步研究该模块对SFPM电机的影响,利用有限元软件对电机的部分电磁性能进行分析。

图5为空载状态下A相绕组匝链的磁链波形。与常规SFPM电机相同,使用双L型导磁块后,电机相绕组匝链的磁链波形有很好的正弦度。与常规SFPM电机相比,磁链幅值下降为常规开关磁链电机幅值的64.6%,有效降低了电机绕组匝链磁链的幅值,实现了电机气隙磁场的削弱。

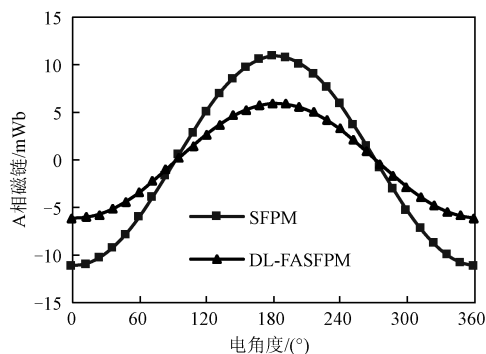
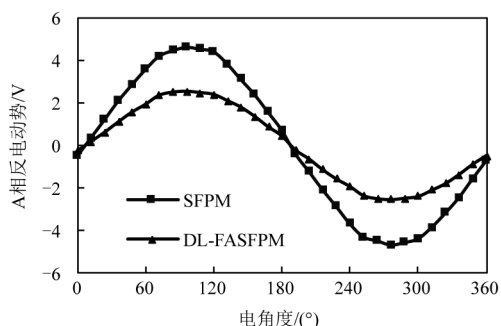


图5 DL-FASFPM、SFPM的A相空载永磁磁链  
( $n=400$  r/min)

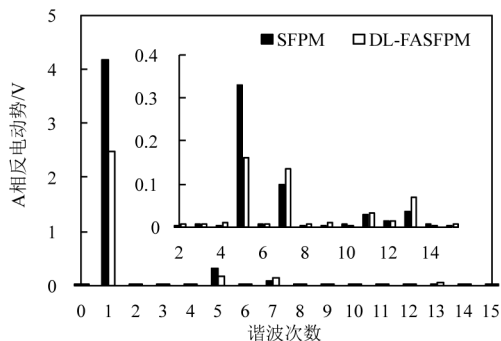
Fig.5 Flux-linkage of phase A in SFPM,DL-FASFPM machine ( $n=400$  r/min)

图6为电机A相空载反电动势及其傅里叶分析结果。由于使用双L型导磁块后永磁磁链减小,电机空载反电动势幅值为原SFPM电机的63.34%。此外,电机反电动势波形的正弦度变差,电机的总谐波含量为7.12%,高于常规SFPM电机的4.31%,其中,5次谐波含量最高,约占1.67%。

图7为施加额定电流时的电机齿槽及电磁转矩波形。相较于SFPM电机,由于双L型导磁块短路了大量永磁磁链,减小了电机径向气隙磁通密度,使用双L型导磁块后,电机的平均转矩与齿槽转矩均大幅下降,平均转矩约为原来的68%。在图6中,可以看到使用双L型导磁块后电机的空载反电动势中含有较大的高次谐波分量,使电机反电动势波形



(a) A相反电动势波形



(b) A相反电动势FFT分析结果

图6 DL-FASFPM、SFPM的A相空载反电动势与傅里叶分析结果( $n=400$  r/min)

Fig.6 Back electromotive force and result of FFT analysis of phase A in SFPM and DL-FASFPM machine ( $n=400$  r/min)

产生畸变,影响电机的输出转矩,电机转矩脉动增加了10.5%。

电机在负载运行时,电枢电流在周围空间中激发磁场,会对电机磁路产生影响。图8为计及饱和与交叉耦合情况下,电机的d、q轴电感随电枢绕组输入交轴电流 $I_q$ 与直轴电流 $I_d$ 的变化曲线,由于SFPM电机对饱和与交叉耦合均不敏感,图8(a)中电机电感随电流并没有明显变化。而使用双L型导磁块后,电机轴向上增加了端部部分,部分永磁磁链经过电机定子分别与导磁块端部与轭部形成轴向与径向回路。

如图9虚线所示,定子铁心端部与靠近永磁体的双L型导磁块部分局部磁场较强,易发生磁饱和。在图8(b)中,随着q轴电流的增加,使用双L型导磁块后电机d、q轴电感略有下降, $I_q=15$  A时电机的d轴电感约为空载时的98%,因此,尽管双L型导磁块的插入会对电机磁路产生影响,但影响程度相对有限。

双L型导磁块插入前后电机铁心损耗随转速变化的波形如图10所示。铁耗与电机频率呈正相关,随着转速的升高电机铁耗增加。在相同的运行



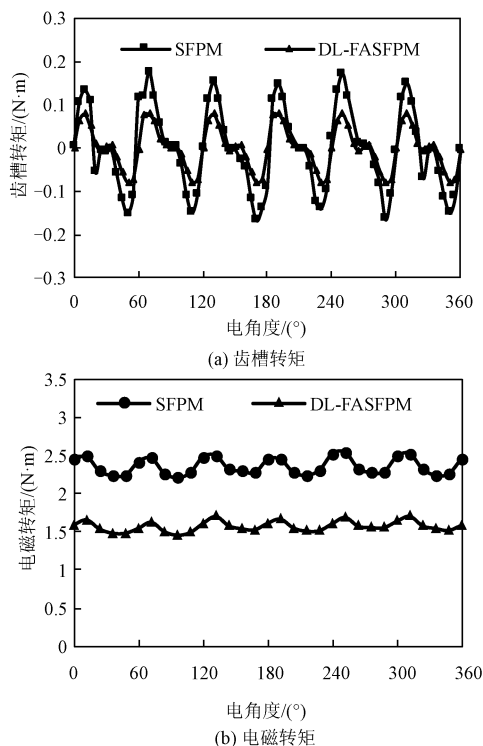


图7 DL-FASFPM、SFPM 的齿槽转矩与电磁转矩( $I_d=0$  A,  $I_q=15$  A)

Fig.7 Cogging torque and electromagnetic torque of SFPM and DL-FASFPM machine( $I_d=0$  A,  $I_q=15$  A)

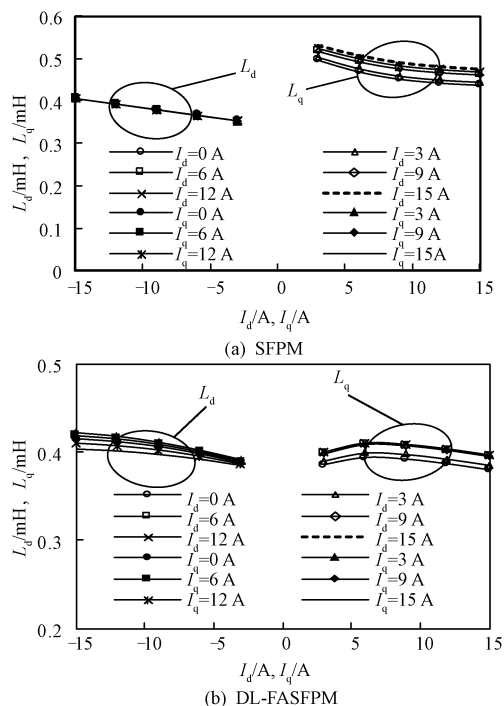


图8 d-q 轴电感随电流的变化情况( $n=400$  r/min)

Fig.8 d-q axis inductance changes with current( $n=400$  r/min)

环境下,电机磁通密度幅值越大,电机铁耗越大,由

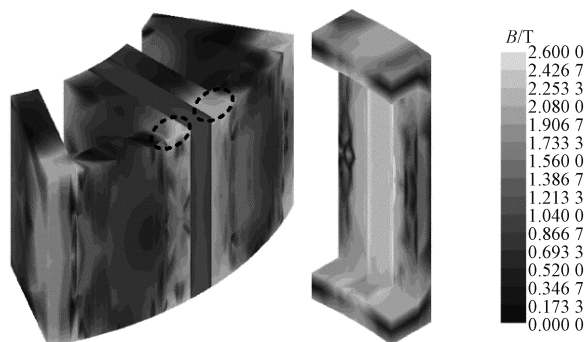


图9 DL-FASFPM 电机定子与双 L 型导磁块的磁饱和现象

Fig.9 Magnetic saturation at stator and double L-FA of DL-FASFPM machine

于双 L 型导磁块的插入,极大地削弱了气隙磁场,电机铁耗下降。

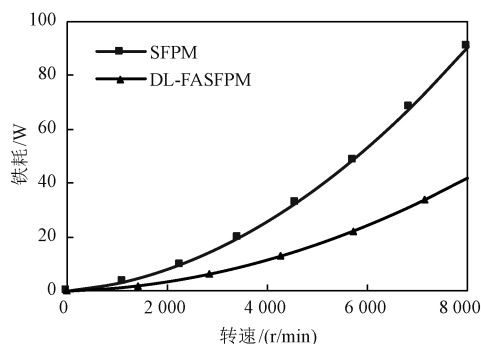


图10 SFPM 电机与 DL-FASFPM 电机的铁耗

Fig.10 Iron loss of SFPM and DL-FASFPM machine

## 5 电机弱磁性能比较

导磁块通过影响电机磁场分布,能够有效提高电机的弱磁能力,不同导磁块对电机永磁磁链以及 d 轴电感产生的影响不同,从而使机械调磁电机的弱磁效果存在差异。在定子外径与轴长一定的条件下,通过建立三维有限元模型,对 SFPM、FASFPM 及 DL-FASFPM 的永磁磁链、电感以及转矩转速曲线等进行对比分析。

电机永磁磁链与弱磁能力呈负相关,降低电机空载永磁磁链,可以有效拓宽电机的调速范围。图 11 为 SFPM、FASFPM 与 DL-FASFPM 电机的 A 相空载磁链波形图。导磁块配置后,开关磁链电机的磁链幅值下降,相较于 FASFPM 电机,DL-FASFPM 电机约有 35.8% 的 A 相磁链被双 L 型导磁块短路,在端部与径向同时扩大了电机的漏磁现象,弱磁能力更强。

额定转速下 SFPM、FASFPM 与 DL-FASFPM 电机 d-q 轴电感随 d-q 轴电流的变化情况如图 12 所

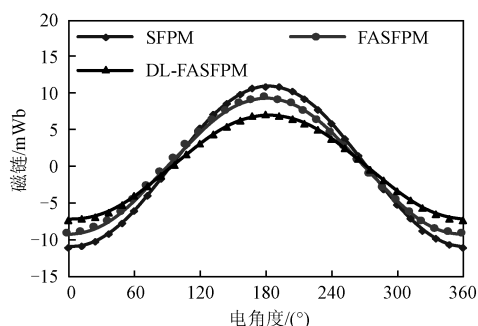


图11 SFPM、FASFP、DL-FASFP的A相空载永磁磁链( $n=1\,429\text{ r/min}$ )

Fig.11 Flux-linkage of phase A in SFPM, FASFP, DL-FASFP machine ( $n=1\,429\text{ r/min}$ )

示。由于导磁块插入后,电机漏磁路的磁阻被削弱,FASFP与DL-FASFP电机d轴与q轴电感相较于SFPM电机均升高,但随着导磁块磁阻减小,流经导磁块的短路磁链增加,此时,定子铁心的磁饱和现象不可以被忽略,电机电感下降。

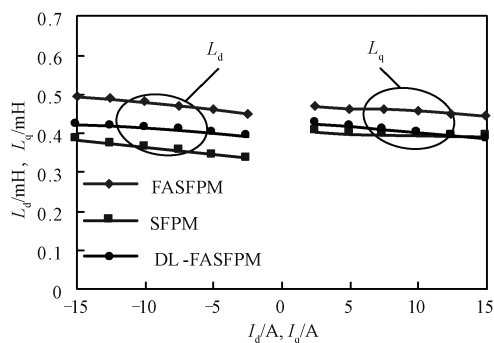


图12 d-q轴电感随电流的变化情况( $n=400\text{ r/min}$ )

Fig.12 d-q axis inductance changes with current( $n=400\text{ r/min}$ )

采用全耦合法计算SFPM、FASFP与DL-FASFP电机的转矩-转速和功率-转速特性如图13所示。增加机械调磁部分后,电机在恒功率区的最高转速均增加到每分钟10 000转以上,且DL-FASFP电机的调速范围更宽。与此同时,相比于FA导磁块方案,DL-FASFP电机恒功率区范围扩大的同时电磁转矩增大,电机功率密度提高。

表2为SFPM、FASFP与DL-FASFP电机的部分性能参数。相较于SFPM电机,DL-FASFP电机的永磁磁链降低了35.7%,电机的转速范围增加。与FA方案相比,在相同定子外径下,使用双L型导磁块后,SFPM弱磁系数增大13%。在10 000转时的DL-FASFP电机的电磁功率为FASFP电机的2.79倍。因此,如果要达到FASFP同样的弱磁效果,使用双L型导磁块的电机具有更小的定子外径。

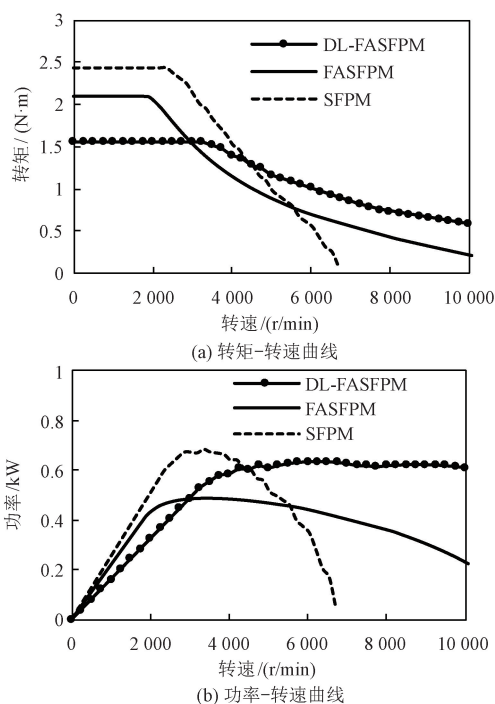


图13 SFPM、FASFP、DL-FASFP电机的转矩-转速及功率-转速特性

Fig.13 Torque- and power-speed characteristic in SFPM, FASFP and DL-FASFP machine

表2 SFPM、FASFP与DL-FASFP电机性能参数

Tab.2 Parameters of SFPM, FASFP and DL-FASFP machine

参数	DL-FASFP	FASFP	SFPM
永磁磁链/mWb	7.07	9.33	11.0
直轴电感/mH	0.423	0.474	0.377
弱磁系数	0.864	0.765	0.514
最大转速/(r/min)	35 590	11 783	6 707
恒转矩区转矩/(N·m)	1.56	2.09	2.43
恒功率区转矩( $n=10^4\text{ r/min}$ ) /(N·m)	0.585	0.211	—
恒功率区功率/W	640	480	670
FA径向厚度/mm	1.8	3.2	0

## 6 12/10 SFPM样机与实验

为验证双L型导磁块机械调磁方案的可行性,本文试制了一台样机进行实验,如图14所示。如图14(b)为可以实现L型导磁块拔插的机械调磁模块,当电机需要弱磁时,将该模块从电机两端插入参与调磁。由于尚未考虑工程应用,双L型导磁块可以连续移动但难以实现所有模块的同步控制。

样机运行于额定转速400 r/min时的空载反电动势波形如图15所示,SFPM电机反电动势波形正

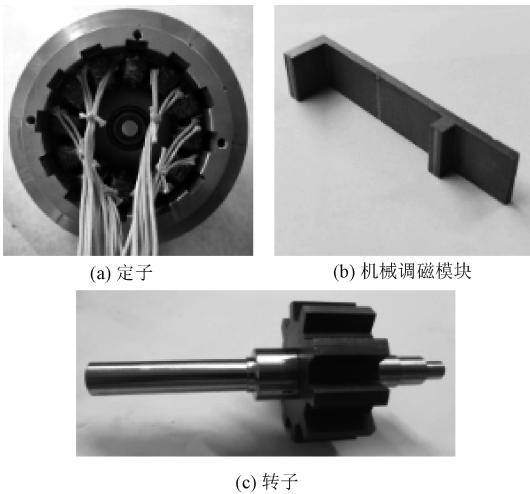


图 14 SFPM 电机及 DL-FASFPM 电机拓扑  
Fig.14 Topology of FASFPM,DL-FASFPM machine

弦且表现出较好的三相对称性,双 L 型导磁块安装前后电机反电动势实验值与三维有限元仿真值基本相等。导磁块安装后,电机反电动势下降了 59.3%,略大于三维仿真值,电机磁场被有效削弱。

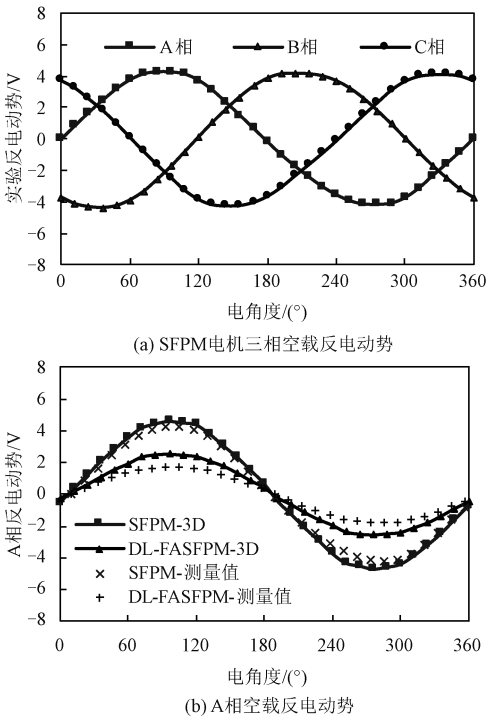


图 15 电机的空载反电动势  
Fig.15 Back-electromotive force in SFPM and DL-FASFPM

SFPM 与 DL-FASFPM 电机的电磁转矩随 q 轴电流的变化曲线如图 16 所示,电机电磁转矩随气隙磁场的削弱而降低,实验结果与仿真结果表现出较好的一致性。

电机的弱磁系数可以反映电机的转速调节范

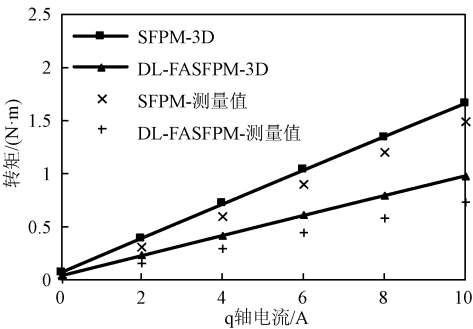


图 16 SFPM 与 DL-FASFPM 电机的电磁转矩  
Fig.16 Torque in SFPM and DL-FASFPM machine

围,通过测量双 L 型导磁块插入前后电机的永磁磁链与 d 轴电感,计算得到电机弱磁系数见表 3。DL-FASFPM 电机的弱磁系数为 0.812,高于常规 SFPM 电机。

表 3 SFPM 与 DL-FASFPM 电机参数

Tab.3 Parameters of SFPM and DL-FASFPM machine		
参数	DL-FASFPM	SFPM
$\psi_m$ 实测值/mWb	4.86	10.1
$L_d$ 实测值/mH	0.263	0.352
$K_{fw}$	0.812	0.523

7 结论

为拓宽 SFPM 电机的调速范围,本文提出了利用端部效应参与机械调磁的 DL-FASFPM 电机。通过在定子外围设置双 L 型导磁块,扩大电机端部与外侧的漏磁,削弱了永磁磁链,有效拓宽了 SFPM 电机的调速范围。与导磁块仅置于定子轭部的方案相比,双 L 型导磁块提高了电机的最大调磁能力,SFPM 弱磁系数增大 13%。与 FASFPM 相比,在弱磁区使用双 L 型导磁块后,SFPM 具有更高的功率。最后通过一台 12/10 SFPM 样机,验证了双 L 型导磁块对 SFPM 电机调磁的有效性。

参考文献 (References):

[ 1 ] Zhu Z Q. Switched flux permanent magnet machines — Innovation continues [ A ]. 2011 International Conference on Electrical Machines and Systems [ C ]. Beijing, China, 2011. 1-10.

[ 2 ] 赵宇,柴建云 (Zhao Yu, Chai Jianyun). 电动汽车用宽调速范围永磁磁阻电机优化设计研究 (Optimal design research of the CPMR for EV with extended speed range) [ J ]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2007, 26 ( 1 ): 43-46, 63.

- [3] 李春艳, 寇宝泉, 程树康 (Li Chunyan, Kou Baoquan, Cheng Shukang). 永磁同步电动机弱磁扩速概况 (Outline for flux weakening of permanent magnet synchronous motor) [J]. 微特电机 (Small & Special Electrical Machines), 2008, 58 (1): 58-60.
- [4] 费伟中, 沈建新 (Fei Weizhong, Shen Jianxin). 新型永磁开关磁链电机 (Novel permanent magnet flux switching motors) [J]. 微特电机 (Small & Special Electrical Machines), 2006, 56 (8): 1-3, 7.
- [5] 花为, 程明, Howe D (Hua Wei, Cheng Ming, Howe D). 新型磁通切换型双凸极永磁电机的静态特性研究 (Study on characteristics of novel flux-switching doubly-salient PM machine) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2006, 26 (13): 129-134.
- [6] 霍现旭, 胡书举, 吕佃顺, 等 (Huo Xianxu, Hu Shuju, Lv Dianshun, et al.). 永磁直驱风电系统弱磁控制研究 (Research on field weakening control of PMSG for direct-drive WECS) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2015, 34 (3): 1-6, 60.
- [7] 李涛, 谷鑫, 李新旻, 等 (Li Tao, Gu Xin, Li Xinmin, et al.). 内置式永磁同步电机电流相角自适应弱磁控制 (Optimal-efficiency direct torque control of interior permanent magnet synchronous motors) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2019, 38 (10): 38-45.
- [8] 黄志文, 沈建新, 方宗喜, 等 (Huang Zhiwen, Shen Jianxin, Fang Zongxi, et al.). 用于弱磁扩速运行的三相6/5极永磁开关磁链电机的分析与优化设计 (Analysis and optimal design of a 3-phase 6/5-pole PM flux-switching motor for flux-weakening application) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2008, 28 (30): 61-66.
- [9] 黄志文, 沈建新, 汪昱, 等 (Huang Zhiwen, Shen Jianxin, Wang Yu, et al.). 永磁开关磁链电机弱磁运行的结构与性能 (Configuration and performance of permanent magnet flux-switching motors with consideration of flux-weakening operation) [J]. 浙江大学学报 (工学版) (Journal of Zhejiang University (Engineering Science)), 2009, 43 (3): 578-583.
- [10] Federico C, Fabio C, Fabio G, et al. Permanent-magnet, direct-drive, starter/alternator machine with weakened flux linkage for constant-power operation over extremely wide speed range [A]. 36th Industry Applications Conference IAS Annual Meeting [C]. Chicago, USA, 2001. 1626-1633.
- [11] Ferraro L D, Capponi F G, Terrigi R, et al. Ironless axial flux PM machine with active mechanical flux weakening for automotive applications [A]. 41st Industry Applications Conference IAS Annual Meeting [C]. Tampa, USA, 2006. 1-7.
- [12] Lei M, Sanada M, Morimoto S, et al. Advantages of IPMSM with adjustable PM armature flux linkage in efficiency improvement and operating range extension [A]. Proceedings of the Power Conversion Conference [C]. Osaka, Japan, 2002. 136-141.
- [13] Kou B, Li C, Cheng S. Flux-weakening-characteristic analysis of a new permanent-magnet motor synchronous motor used for electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2010, 39 (1): 511-515.
- [14] 刘细平, 肖娟娟, 徐慧, 等 (Liu Xiping, Xiao Juanjuan, Xu Hui, et al.). 磁极旋转式新型变磁通永磁同步电机弱磁性能分析 (Analysis of flux weakening performance of a novel variable flux permanent magnet synchronous machine with rotating magnetic pole) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2020, 35 (15): 3182-3190.
- [15] Zhu Z Q, Al-Ani M M J, Liu X, et al. A mechanical flux weakening method for switched flux permanent magnet machines [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2015, 30 (2): 806-815.
- [16] 花为, 程明, 朱孝勇, 等 (Hua Wei, Cheng Ming, Zhu Xiaoyong, et al.). 端部效应对新型定子永磁型双凸极电机反电势的影响研究 (Investigation of end-effect in novel doubly-salient machines with PM in stator) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2007, 27 (24): 63-67.



## Research on maximum flux-regulation characteristics considering end-effect of switched flux permanent magnet machine

LIU Xu<sup>1, 2</sup>, DUAN Rong<sup>1, 2</sup>, ZHAO Qiang<sup>1, 2</sup>

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

**Abstract:** To solve the problem that the speed range of the SFPM machine is hard to adjust, the double L-FA using the end effect is proposed. By increasing the flux leakage at the end of the machine, the maximum flux-regulation capacity of the motor is improved. In this paper, the mechanical flux-weakening principle of the double L-FA was studied, and the electromagnetic performance of SFPM with double L-FA was analysed. The results show that the maximum flux-weakening capacity of the motor can be improved by weakening the flux and increasing the inductance of d-axis. Compared with the FA placed on the outside of the stator, the double L-FA has better flux-weakening capability and constant power range. Finally, a 12/10 SFPM machine is manufactured to verify the results.

**Key words:** mechanical flux adjustment; finite element method; double L flux adjuster; electromagnetic performance