

新型机械变漏磁永磁电机设计与电磁特性分析

邹永玲,刘细平,孙同泽

(江西理工大学 电气工程与自动化学院,江西 赣州 341000)

摘要:提出了一种新型机械变漏磁永磁(MVLF-PM)电机,该电机采用一个附加在转子侧的机械装置,能根据速度改变永磁体磁化方向相对 d 轴的角度,实现漏磁通的自动调节,有效拓宽了电机的调速范围。首先分析了该电机的工作原理并构建了数学模型,运用系统动力学方法探究了弹簧形变长度、永磁体旋转角度与转速的关系;然后运用有限元方法对该电机和传统三角型永磁(D-PM)电机的弱磁调速特性及机械强度进行了对比分析;最后,通过对一台1 kW样机的弱磁性能进行测试,验证了MVLF-PM电机设计理论与有限元分析结果的有效性 with 准确性。

关键词:永磁电机;机械装置;变漏磁;宽调速

中图分类号:TM351 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd22319

Design and Electromagnetic Characteristics Analysis of a Novel Mechanical Variable Leakage Flux Permanent Magnet Machine

ZOU Yongling, LIU Xiping, SUN Tongze

(School of Electrical Engineering and Automation, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 314000, Jiangxi, China)

Abstract: A novel mechanical variable leakage flux permanent magnet (MVLF-PM) motor was proposed. A mechanical device attached to the rotor side was adopted in this motor, which can change the angle of the PM magnetization direction relative to d -axis according to the speed, so as to adjust the leakage flux automatically and effectively broaden the speed range of motor. The working principle and the mathematical model of MVLF-PM motor were analyzed. Based on system dynamics method, the relationship between the deformation length of spring as well as the rotation angle of PMs and speed were studied. The speed regulation characteristics and mechanical strength of the MVLF-PM and delta permanent magnet (D-PM) motor were compared and analyzed by using finite element method. Finally, the flux-weakening performance of a prototype with 1 kW was tested, which verifies the validity and accuracy of the design theory and finite element analysis results of the MVLF-PM motor.

Key words: permanent magnet motor; mechanical device; variable leakage flux; wide-speed regulation

近年来,永磁电机由于具有高功率/转矩密度、高效率、转子结构简单可靠以及永磁体不易退磁等诸多优点,成为电动汽车驱动电机领域的主流类型^[1-2]。然而,传统永磁电机的永磁磁场不易调节、调速范围较窄,这在一定程度上限制了稀土永磁电机在电动汽车驱动电机领域的广泛应用。

传统的永磁电机通常通过持续注入负 d 轴电流产生电枢反应磁通来削弱永磁磁场^[3],但会产生较大的定子铜耗而影响效率。近年来,国内

外研究学者采用电励磁手段和机械调磁手段对如何灵活调节永磁磁场进行了深入研究。与电励磁电机^[4-7]相比,机械变漏磁电机^[8-11]更受关注,该类电机能消除磁通调节时的铜耗,可以通过改变漏磁通磁阻有效减小永磁磁链。文献[12]提出了一种自适应被动弱磁永磁同步电动机,该电机采用可移动的导磁环可以根据速度自动调节漏磁通,但其调速范围较窄。文献[13]提出一种可旋转永磁体的永磁同步电机,该电机可以使电机的气隙磁通减小至零,但只是进行了初步设计,

基金项目:国家自然科学基金(51767009);江西省教育厅科技计划项目(GJJ160598);江西理工大学清江青年英才计划资助

作者简介:邹永玲(1996—),女,硕士研究生,Email:935851308@qq.com

通讯作者:刘细平(1976—),男,博士,教授,Email:z18736085908@163.com

并未对电机的调速范围和机械强度进行分析,且该电机永磁体的利用率较低。尽管不同学者提出了不同类型的机械调磁装置结构,但都存在一定的局限性,如结构较复杂、耐受强度较低、调速范围较窄等。因此,机械变漏磁电机仍需朝着更简化的结构、更好的机械性能和更宽的调速范围方向发展。

本文提出了一种新型机械变漏磁永磁(mechanical variable leakage flux permanent magnet, MVLF-PM)电机,该电机与传统永磁电机的区别在于增加了一个附加在转子侧的机械装置,在高速下能自动调节永磁体的磁通方向,实现弱磁运行。首先分析该电机的拓扑结构、工作原理和数学模型。其次,运用ADMAS软件对机械装置进行动力学仿真分析,确定弹簧形变长度、永磁体旋转角度与速度之间的关系;采用有限元方法分析MVLF-PM电机不同永磁体旋转角度下的磁场分布,并与传统三角形永磁(delta permanent magnet, D-PM)电机的弱磁调速性能以及机械强度进行对比分析。最后,制作一台1 kW的样机,并对该样机在不同速度下的空载反电势进行测试,验证理论分析与仿真结果的准确性。

1 MVLF-PM电机拓扑结构、工作原理及数学模型

1.1 电机结构

MVLF-PM电机拓扑结构如图1所示,该电机由常规的三相定子和一侧带有机械装置的特殊转子结构组成。为了获得较好的弱磁特性,机械装置设有8个弱磁单元,每个弱磁单元包括一个带齿配合的滑块、一个弹簧、两个齿轮和两根连杆。机械装置的转盘与转子同轴安装,可与转子同步旋转,转盘上开有可让滑块直线运动的滑槽和齿轮自旋转的连杆槽,圆柱形永磁体通过采用非导磁材料的连杆与齿轮相连。该电机整体结

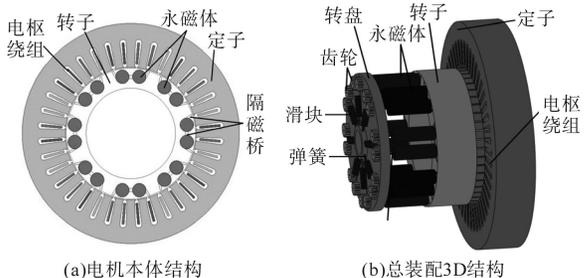


图1 MVLF-PM电机拓扑结构
Fig.1 Topology of the MVLF-PM motor

构可靠,不需要外加的控制,可以利用机械装置中滑块和齿轮的啮合运动,根据转速将滑块的径向运动转换为齿轮和永磁体的自旋转运动来实现磁通调节。

1.2 工作原理

转盘和滑块设为理想状态,滑块与转盘之间和齿轮与转盘之间的摩擦力是忽略不计的。为了简化,只考虑低速和高速两种特殊状态,设定基速(750 r/min)为低速和高速的分界点。滑块所受到的离心力与速度之间的关系为

$$F_c = m \left(\frac{2\pi n}{60} \right)^2 R_0 \quad (1)$$

式中: m 为滑块的质量; R_0 为滑块的质心到转盘中心的距离; F_c 为滑块所受到的离心力; n 为转子转速。

在不同速度下滑块与齿轮的位置如图2所示。在低速下,滑块所受到的离心力小于弹簧施加给滑块的弹力,滑块与齿轮不接触,滑块对齿轮没有切向推动力,齿轮和圆柱形永磁体不旋转,如图2a所示。在高速下,如式(1)所示,离心力与速度成正比增大,滑块所受到的离心力大于弹簧施加给滑块的弹力,滑块沿着滑槽向前直线运动,滑块与齿轮啮合后推动齿轮自旋转,齿轮通过连杆带动永磁体同步旋转,其中左边永磁体以逆时针方向旋转,右边永磁体以顺时针方向旋转,如图2b中箭头所示。当电机达到一定速度开始减速时,滑块所受到的离心力小于弹簧施加给滑块的弹力,滑块开始往回运动,最后返回到初始位置。

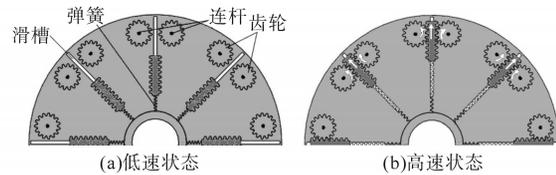


图2 不同速度下滑块和齿轮的位置
Fig.2 The positions of sliding block and gears under different speeds

永磁体自旋转会改变永磁体的磁化方向,将永磁体磁化方向相对定子 d 轴的角度定义为 β ,即永磁体的旋转角度,如图3所示。本文分析的两种特殊状态“最小漏磁”、“最大漏磁”分别指的是 $\beta=0^\circ$ 和 $\beta=60^\circ$,分别对应于图2a和图2b两种状态。

1.3 电机数学模型

传统内置式永磁电机在 $d-q$ 轴坐标系下的数学方程通常表达如下:

$$\begin{cases} u_d = R_1 i_d + \frac{d\Psi_d}{dt} - \omega \Psi_q \\ u_q = R_1 i_q + \frac{d\Psi_q}{dt} + \omega \Psi_d \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \Psi_d = \Psi_{pm} + L_d i_d \\ \Psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (3)$$

式中: i_d, i_q 分别为 d, q 轴等效电流; Ψ_d, Ψ_q 分别为 d, q 轴磁链; Ψ_{pm} 为永磁磁链; R_1 为等效电阻; ω 为转子电角速度; u_d, u_q 分别为电机 d, q 轴电压。然而, MVLF-PM电机的 Ψ_d 和 Ψ_q 不仅受 i_d 和 i_q 的影响,而且还受永磁体的自旋转角度 β 的影响。因此, Ψ_d 和 Ψ_q 必须表示成与 i_d, i_q, β 的关系式:

$$\begin{cases} \Psi_d = \Psi_d(i_d, i_q, \beta) \\ \Psi_q = \Psi_q(i_d, i_q, \beta) \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中 d, q 轴磁链对时间的导数可以写成:

$$\begin{cases} \frac{d\Psi_d}{dt} = \frac{\partial \Psi_d}{\partial i_d} \frac{di_d}{dt} + \frac{\partial \Psi_d}{\partial i_q} \frac{di_q}{dt} + \frac{\partial \Psi_d}{\partial \beta} \frac{d\beta}{dt} \\ \frac{d\Psi_q}{dt} = \frac{\partial \Psi_q}{\partial i_d} \frac{di_d}{dt} + \frac{\partial \Psi_q}{\partial i_q} \frac{di_q}{dt} + \frac{\partial \Psi_q}{\partial \beta} \frac{d\beta}{dt} \end{cases} \quad (5)$$

电机在电机弱磁区域往往处于高转速运行区间,因此可以忽略定子电阻压降。则式(2)可以表示为

$$\begin{cases} u_d = \frac{\partial \Psi_d}{\partial i_d} \frac{di_d}{dt} + \frac{\partial \Psi_d}{\partial \beta} \frac{d\beta}{dt} - \omega \Psi_q \\ u_q = \frac{\partial \Psi_q}{\partial i_q} \frac{di_q}{dt} + \frac{\partial \Psi_q}{\partial \beta} \frac{d\beta}{dt} + \omega \Psi_d \end{cases} \quad (6)$$

电磁转矩 T_{em} 可以表示为

$$T_{em} = p[\Psi_d(i_d, i_q, \beta)i_q - \Psi_q(i_d, i_q, \beta)i_d] \quad (7)$$

式中: p 为极对数。

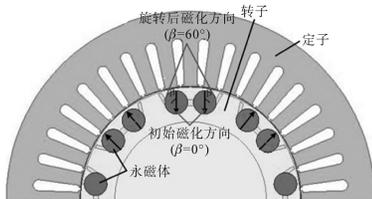


图3 永磁体的磁化方向

Fig.3 Magnetization direction of PMs

2 MVLF-PM 电机动力学仿真分析

利用 ADAMS 软件对机械装置进行动力学分析,可以确定滑块在不同转速下的位移、弹簧的形变长度和齿轮的自旋转角度之间的关系,从而进一步分析电机内部磁场随着永磁体旋转角度变化的关系。由于机械装置上的8个弱磁单元是等效的,为了简化模型,构建了1个弱磁单元的

3D 虚拟样机模型,如图4所示。

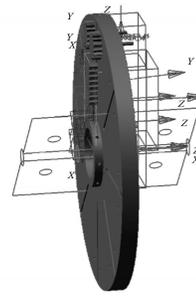


图4 机械装置的虚拟样机模型

Fig.4 The virtual prototype model of mechanical device

根据电机的实际运行工况,对机械装置的各部件设置合理的驱动,在转盘上施加变速驱动,速度与时间的关系如图5所示。在0~1 s内以加速度 $6\ 000^\circ/\text{s}^2$ 速度从0 r/min加速到1 000 r/min,在1~2 s内以 $-6\ 000^\circ/\text{s}^2$ 从1 000 r/min减速到0 r/min,在1 s时获得最大速度。

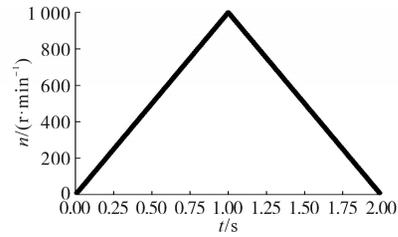


图5 速度与时间的关系

Fig.5 The relationship between speed and time

弹簧的形变长度、永磁体旋转角度与时间的关系如图6所示。在高速下,滑块的离心运动推动齿轮自旋转,永磁体通过连杆与齿轮同步旋转,因此永磁体的旋转角度等于齿轮的旋转角度。在低速下($t < 0.75$ s),弹簧形变长度随速度的增加而变大,此时滑块未与齿轮啮合,永磁体旋转角度 $\beta = 0^\circ$ 。在高速下($0.75 \text{ s} < t < 1$ s),弹簧继续被拉长,当弹簧形变长度大于7.7 mm,滑块与齿轮啮合,推动齿轮和永磁体开始旋转,永磁体旋转角度随着速度的增加而增大。机械装置中滑槽的总长度设计为50 mm,滑块的长度为25 mm。当电机运行在最大速度($t = 1$ s)时,弹簧的形变长度达到最大值15.27 mm,表明此时滑块未达到滑槽的底部,这可以有效避免滑块与滑槽底部的刚性碰撞,保证了机械装置的可靠运行。弹簧的形变长度达到最大时,对应于最大的永磁体旋转角度 $\beta = 60^\circ$ 。1~2 s时电机开始减速,离心力减小,弹簧形变长度减小,滑块开始往回运动,当电机速度减速到0 r/min时,弹簧恢复到初始位置,滑块也返回到初始位置。由图6表明, MVLF-PM电机可以根据转速的变化来使永磁体旋转不同的

角度,理论分析与仿真结果一致。

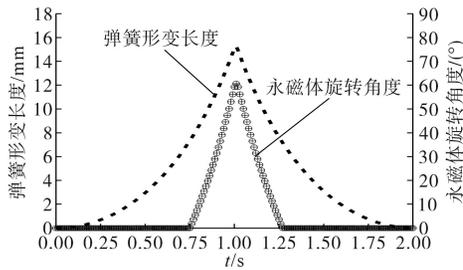


图6 弹簧形变长度、永磁体旋转角度与时间的关系
Fig.6 The relationship between deformation length of spring, rotation angle of PMs and time

3 MVLF-PM 电机电磁性能分析与比较

3.1 磁场分布

MVLF-PM 电机在 $\beta=0^\circ$ 和 $\beta=60^\circ$ 下的空载磁场分布如图7所示。在 $\beta=0^\circ$ 时,与电枢绕组匝链的永磁磁链最大,漏磁通很少,此时MVLF-PM电机的气隙磁通密度最大。在低速状态下MVLF-PM电机相当于传统D-PM电机能获得较高的输出转矩。在 $\beta=60^\circ$ 时,与电枢绕组匝链的永磁磁链最小,由永磁体相邻两极之间及两侧磁桥形成的漏磁通远远大于传统D-PM电机,此时MVLF-PM电机的气隙磁通密度最小。从图7可以看出,在高速状态下,MVLF-PM电机可以使永磁体自旋转不同的角度来调节漏磁通的大小,从而有效减小电机的气隙磁通密度,实现弱磁运行的目的。

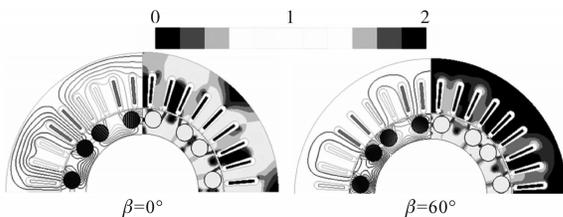


图7 不同永磁体旋转角度下的磁场分布
Fig.7 Magnetic flux distribution under different rotation angle of PMs

3.2 弱磁能力和调速范围分析与比较

当电动机端电压和电流达到最大值,电流全部为负 d 轴电流分量,并且忽略定子电阻的影响时,电动机可以达到的理想最高转速为

$$\Omega_m = \frac{U_{max}}{p(\Psi_m - L_d I_{max})} \quad (8)$$

式中: U_{max} , I_{max} 分别为最大相电压和相电流; L_d , Ψ_m 分别为 d 轴电感和永磁磁链。

由式(8)可知,如果电压极限值相同,则影响弱磁能力的因素主要为永磁磁链和 d 轴电感。

为进一步分析MVLF-PM电机的弱磁能力,定义弱磁系数 K_{fw} 的表达式如下:

$$K_{fw} = \frac{L_d I_{max}}{\Psi_m} \quad (9)$$

由式(9)可知,电机在高速下运行时,较小的 Ψ_m 和较大的 L_d 有利于提高弱磁能力。当 K_{fw} 尽可能接近于1时,电机能获得最宽的调速范围。

为了验证MVLF-PM电机的弱磁性能,与传统D-PM电机结构(如图8所示)进行比较,其中MVLF-PM和传统D-PM电机采用相同的定转子结构尺寸和绕组类型,且永磁体总耗量几乎相同。

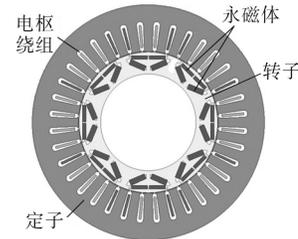


图8 传统D-PM电机拓扑结构
Fig.8 The topology of conventional D-PM motor

运用有限元仿真可得到传统D-PM电机和MVLF-PM电机的弱磁能力参数如表1所示。可以看出,在各种工作状态下传统D-PM电机的 K_{fw} 都小于MVLF-PM电机。在MVLF-PM电机中,随着 β 增大,漏磁通不断增大, Ψ_m 数值不断减小。当 $\beta=60^\circ$ 时, Ψ_m 获得最小值, Ψ_m 相比于 $\beta=0^\circ$ 时减少了70%,此时的 K_{fw} 最大且最接近于1,说明MVLF-PM电机在 $\beta=60^\circ$ 时可以获得较宽的调速范围。

表1 传统D-PM电机和MVLF-PM电机的弱磁能力参数比较
Tab.1 Comparison is the flux-weakening ability parameters of the conventional D-PM motor and MVLF-PM motor

电机类型	状态	L_d/mH	Ψ_m/Wb	K_{fw}
传统D-PM电机	-	1.083	0.120	0.217
MVLF-PM电机	$\beta=0^\circ$	1.031	0.094	0.265
	$\beta=60^\circ$	1.031	0.028	0.884

两台电机均采用最大转矩/电流比控制,在 $I_{max} = 24 A$, $U_{rms} = 38 V$ 下的转矩—速度曲线和功率—速度曲线如图9所示。由图9a可见MVLF-PM电机的输出转矩略低于传统D-PM电机,主要是由于MVLF-PM电机相对传统D-PM电机存在较大的漏磁通。MVLF-PM电机在 $\beta=60^\circ$ 时的最大速度可以达到10 000 r/min,速度范围约为传统D-PM电机的10倍,从而验证了MVLF-PM电机可以通过永磁体旋转一定的角度有效拓宽电机的调速范围。由图9b可见,传统D-PM电机在基速以上输出功率持续下降,电机无法保持恒功率运行,而MVLF-PM电机在一定速度区间内具有相对较宽的恒功率运行范围。

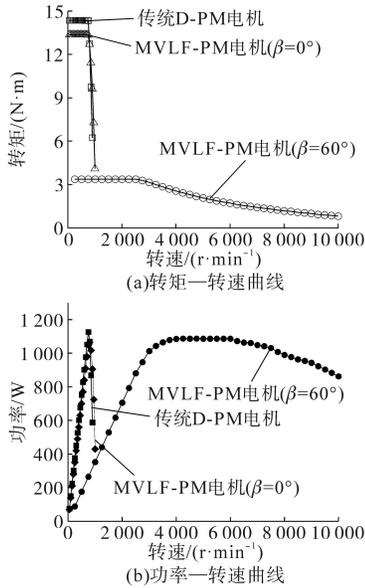


图9 传统D-PM电机和MVLF-PM电机的性能比较
Fig.9 Performance comparisons of the conventional D-PM motor and MVLF-PM motor

3.3 转子机械强度分析与比较

为了减小漏磁通,在恒转矩运行时能获得较高的输出转矩,MVLF-PM电机和传统D-PM电机的转子隔磁桥处设计较薄,为避免转子隔磁桥处在最高转速下发生变形和断裂,运用ANSYS Workbench软件对两台电机的机械强度进行验证。

在转子温度设为环境温度22℃、转速为10 000 r/min下,得到两台电机的机械应力分布如图10所示,D-PM电机的最大应力出现在中间隔磁桥的位置,数值为37.6 MPa,而MVLF-PM电机的最大应力出现在靠近转轴的位置,数值为18.9 MPa。两台电机的机械应力与转速的变化关系如图11所示,可以看到,两台电机的机械应力都随着速度的增加而显著增大,但MVLF-PM电机的最大应力总是小于传统D-PM电机,且MVLF-PM电机的最大应力比传统D-PM电机减小了49.7%。

除此之外,得到两台电机在10 000 r/min下的变形云图如图12所示,可以看到,两台电机的最大变形区均出现在靠近转子铁心边缘的隔磁桥

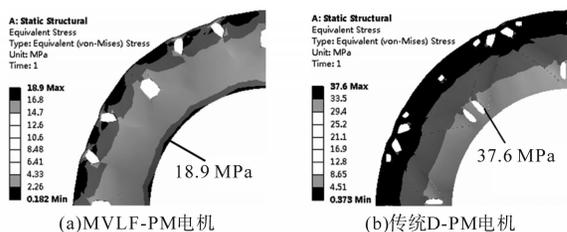


图10 传统D-PM电机和MVLF-PM电机的应力云图
Fig.10 Stress nephogram of the conventional D-PM motor and MVLF-PM motor

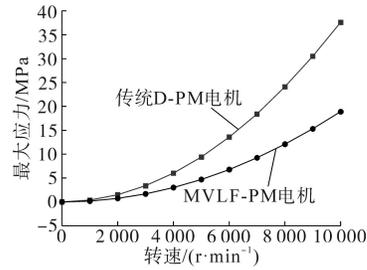


图11 传统D-PM电机和MVLF-PM电机的转子最大应力随转速的变化曲线

Fig.11 Maximum stress curves of the rotor change with the speed of the conventional D-PM motor and MVLF-PM motor

位置,传统D-PM电机的最大变形点为1.15 μm,而MVLF-PM电机的最大变形点为1.05 μm。如图13所示,两台电机的最大变形都随着转速的增加而剧烈增大,相比于传统D-PM电机,MVLF-PM电机的最大变形量减小了8.7%。以上仿真结果表明,两台电机的转子铁心均能承受在最高转速10 000 r/min下所受离心力产生的最大应力,都不会产生塑性变形,但MVLF-PM电机比传统D-PM电机具有更好的机械强度,更适合在电动汽车复杂的运行工况下高速运行。

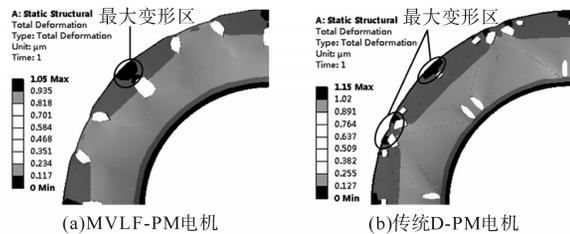


图12 传统D-PM电机和MVLF-PM电机的变形云图
Fig.12 Deformation nephogram of the conventional D-PM motor and MVLF-PM motor

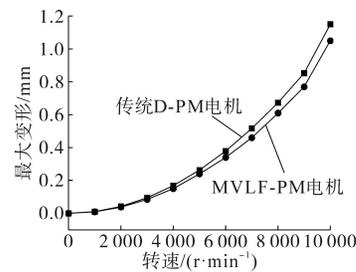


图13 传统D-PM电机和MVLF-PM电机的最大变形随转速的变化曲线

Fig.13 Maximum deformation curves change with the speed of the conventional D-PM motor and MVLF-PM motor

4 MVLF-PM电机样机性能测试

为了验证上述理论分析与有限元仿真结果的准确性,制作了一台1 kW的实验样机并进行测试,样机的主要设计参数为:额定功率1 kW,定

子槽数/转子极数为 36/8,额定转速 750 r/min,额定转矩 12.73 N·m,定子外径/内径为 255/161.9 mm,转子外径/内径为 160.4/110.64 mm,每槽导体数 12。其中转子硅钢片、机械装置、装配的转子部件如图 14 所示。

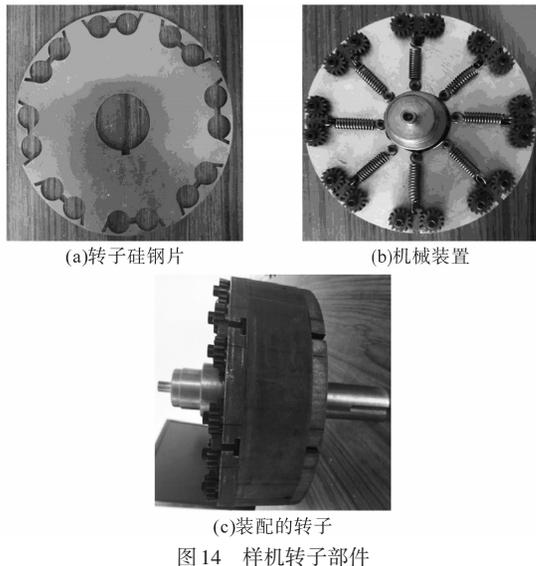


图 14 样机转子部件

当转速为 750 r/min 和 890 r/min (即 $\beta=0^\circ$ 和 $\beta=30^\circ$) 时, MVLF-PM 电机的空载反电势仿真值与实验值比较如图 15 所示。由图 15a 可见, MVLF-PM 电机的空载反电势实验值略小于仿真值, 这主要是因为有限元仿真中忽略了磁场的涡流效应以及电机制造工艺的限制。由图 15b 可见, $\beta=30^\circ$ 相比于 $\beta=0^\circ$ 时反电势幅值显著减小, 说明 MVLF-PM 电机的弱磁能力随着 β 的增大而不断增强。

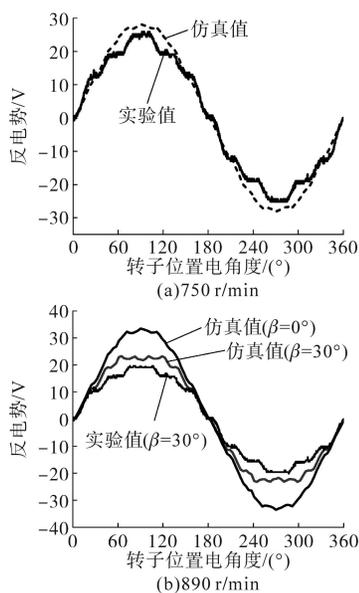


图 15 不同速度下 MVLF-PM 电机的实验值与仿真值比较
Fig.15 Comparison of experimental and simulation values of the MVLF-PM motor at different speeds

MVLF-PM 电机在有无机械弱磁时的转矩—转速特性测试如图 16 所示。可以看到, MVLF-PM 电机在无机机械弱磁时的调速范围很窄, 而在有机机械弱磁 ($\beta=30^\circ$) 时的调速范围可达无机机械弱磁 ($\beta=0^\circ$) 时的 2 倍, 说明通过使机械装置上的永磁体旋转一定的角度可明显拓宽其调速范围, 验证了 MVLF-PM 电机弱磁扩速的可行性。

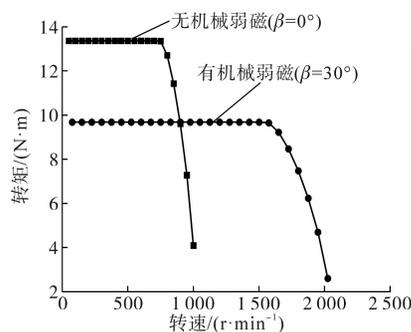


图 16 MVLF-PM 电机有无机械弱磁时的转矩—转速特性测试
Fig.16 Torque—speed characteristic test of the MVLF-PM motor with and without mechanical flux-weakening

5 结论

本文提出了一种新型 MVLF-PM 电机, 该电机一侧带有机械装置的特殊转子结构, 可以根据速度使永磁体旋转不同的角度来自动调节漏磁通的大小, 实现弱磁扩速的目的。主要结论如下:

1) 分析了该电机的结构特点和工作原理, 利用 ADAMS 软件探究了电机的机械—电磁耦合特性, 确定了永磁体旋转角度与转速之间的关系。

2) 对 MVLF-PM 电机与传统 D-PM 电机的弱磁调速特性以及机械强度进行了仿真分析, 表明 MVLF-PM 电机在 $\beta=60^\circ$ 时的最高转速可达传统 D-PM 电机最高转速的近 10 倍, 且 MVLF-PM 电机具有更好的机械强度, 适合在电动汽车驱动电机领域高速运行。

3) 制造了一台 1 kW 样机并进行相关测试, 结果表明 MVLF-PM 电机具有较好弱磁性能和宽调速范围的特点, 验证了设计方法的有效性和可行性。

参考文献

[1] 唐任远. 现代永磁电机理论与设计[M]. 北京:机械工业出版社, 2010.
Tang Renyuan. Theory and design of modern permanent magnet machines[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2010.

(下转第 55 页)

