

电励磁磁通切换直线磁悬浮电动机的 电磁力分析

张欣悦*, 蓝益鹏

(沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

Electromagnetic Force Analysis of Electrically Excited Flux Switching Linear Magnetic Suspension Motor

ZHANG Xinyue*, LAN Yipeng

(School of Electric Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: The electrically excited flux switching linear magnetic suspension motor (EEFSLMSM) for rail transit traction systems is taken as the object of study. Firstly, the structure of EEFSLMSM is analyzed, its operating mechanism and the principle of electromagnetic thrust and levitation force generation are studied. Secondly, the mathematical model of EEFSLMSM is established, and the voltage and magnetic chain equations as well as the mathematical expressions of electromagnetic thrust and suspension force of the motor are derived. Then, the magnetic field distribution and no-load back electromotive force waveform of EEFSLMSM are analyzed by Ansys Maxwell, and the magnetic modulation ability of the motor is studied. Finally, the connection between electromagnetic thrust, levitation force and armature current as well as excitation current is obtained through Ansys finite element calculation and analysis. The results verify the feasibility of EEFSLMSM operation and provide a theoretical reference for the design of traction and suspension integration.

Key words: electric excitation; flux switching; linear magnetic suspension motor; finite element

关键词: 电励磁; 磁通切换; 直线磁悬浮电动机; 有限元

0 引言

轨道交通牵引系统的磁悬浮直线电机一直是磁悬浮轨道交通技术创新发展的方向。在轨道交通磁悬浮技术领域,德国扮演着开创性的角色。早在 1922 年,赫尔曼·肯佩尔就首次提出了电磁悬浮的原理,并在 1934 年获得了首个国际专利。随后,德国一直在推动磁悬浮技术的发展。除此之外,如日本、英国、加拿大、美国和中国等其他国家也纷纷加入磁悬浮技术研究和发展的行列。其中,一些具有显著影响力的项目如西南交通大学的高温超导磁悬浮技术、美国太空探索技术公司的超级环电动磁悬浮、美国磁动力公司的 M3 电磁磁悬浮以及加拿大的电动悬浮技术等研究和开展工作共同推动了磁悬浮技术的进步^[1]。

以上磁悬浮方案存在的共性问题所采用的直线电动机都需要沿整个轨道铺设绕组或永磁体,存在着绕组或永磁体用量大、成本高和维护困难等诸多问题。基于此,本文在传统磁通切换直线电机的基础上,提出了一种电励磁磁通切换直线磁悬浮电动机 (Electrically Excited Flux Switching Linear Magnetic Suspension Motor, EEFSLMSM)。该新型磁通切换直线电机可用于轨道交通磁悬浮列车,该电机的励磁绕组和电枢绕组都分布在动子上,降低了沿轨道铺设绕组的成本以及维修成本^[2-3],具有极高的性价比,并且该电机特别适合于长距离的轨道交通^[4-6]。本文

摘 要: 以用于轨道交通牵引系统的电励磁磁通切换直线磁悬浮同步电动机 (EEFSLMSM) 为研究对象。首先分析了 EEFSLMSM 的结构,并对该电机的运行原理及其电磁推力与悬浮力产生的原理进行了研究。其次,建立了 EEFSLMSM 的数学模型,推导了该电机的电压、磁链方程以及电磁推力、悬浮力的数学表达式。然后,通过 Ansys Maxwell 分析了 EEFSLMSM 的磁场分布和空载反电动势波形,并对电机的调磁能力进行了研究。最后,通过 Ansys 有限元计算分析,得出了电磁推力、悬浮力和电枢电流以及励磁电流之间的关系。研究结果验证了 EEFSLMSM 运行的可行性,为牵引及悬浮一体化的设计提供了理论参考。

分析了 EEFSLMSM 的结构及运行原理, 建立其数学模型, 通过有限元分析计算其电磁力, 验证了该电动机运行的可行性^[7-9]。

1 EEFSLMSM 的结构及运行原理

1.1 EEFSLMSM 结构及其参数

图 1 为 EEFSLMSM 的结构示意图。长定子采用导磁性能良好的铁心材料, 短定子采用型号为 DW310-35 的硅钢片。由铜线制成的励磁和电枢绕组全部分布在定子齿上, 双层电枢绕组缠绕在 2 个相邻的矩形铁心槽中, 通入直流的励磁绕组排布在矩形铁心上。



图 1 电励磁通切换直线磁悬浮电动机结构
Fig. 1 Structure of EEFSLMSM

1.2 EEFSLMSM 运行原理

图 2 到图 5 展示了 EEFSLMSM 电机定子中 A 相结构在一个周期内不同位置时磁通的变化情况。磁通切换是指电枢绕组中能够出现双极性电流, 从而使磁场能够从正向穿过后又能反向穿过, 随着转子移动而周期循环。这是靠定子齿槽和定子极中心相对位置变化来实现的。

(1) 在图 2 中, A1 模块和 A2 模块位于正向磁通达到最大值的空间位置。通过叠加, A 相的总磁通在正向呈现最大值。



图 2 磁通正向最大位置
Fig. 2 Forward maximum position of magnetic flux

(2) 在图 3 中, 定子运动到 1/4 周期后, 此时可以观察到一些磁力线没有穿过电枢绕组, 另外一些磁力线穿过电枢绕组后再次穿出。因此, 叠加后的磁通为 0, 这个位置被称为第一平衡位置。

(3) 图 4 展示了定子水平位移半个周期后的空间位置。磁力线逆时针流动并穿过电枢绕组, 在经过两个模块后产生的总磁通呈现负向最大值。这种磁链的双极性变换反映了切换过程。

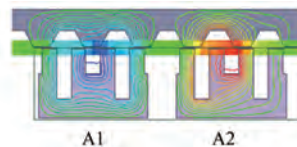


图 3 磁通达到第一平衡位置

Fig. 3 Magnetic flux reaches the first equilibrium position



图 4 磁通负向最大位置

Fig. 4 Negative maximum position of magnetic flux

(4) 图 5 中定子的空间位置和上述分析的第一平衡位置情况有些类似, 磁力线也没有穿过电枢绕组, 此时的空间位置可以称为第二平衡位置。定子完整运动一个周期后, 磁场分布出现了四个特殊的位置, 这个过程被称为磁通切换。



图 5 磁通达到第二平衡位置

Fig. 5 Magnetic flux reaches the second equilibrium position

1.3 电磁推力产生原理

图 6(a) 中的磁力线是由励磁绕组产生的, A1 与 A2 模块处于正磁链的最大位置, 对应图 6(b) 的 M1 处。按照磁通走磁阻最小路径原理, 定子向右移动。随着定子的空间位置变化, 定子齿与定子齿耦合的部分越来越大。当两部分完全耦合时, 空间位置为第一平衡位置 (磁通为 0), 此刻 A1、A2 模块的磁链断开, B 相 B1、B2 模块的磁链开始导通。由图 6(b) 可知, 磁链在 M2 处呈现最大位置, 运动方向上电磁推力产生的原理与 A 模块产生的原理一样。定子继续向前进行空间移动, 在 B 相磁链空间位置到达平衡位置时, B 模块呈现的磁链断开, C 模块呈现的磁链开始导通。因此通过对电流的导通与断开进行控制, 就可以实现定子朝指定方向位移。

1.4 悬浮力产生原理

当 EEFSLMSM 运行时, 励磁绕组中通入直流

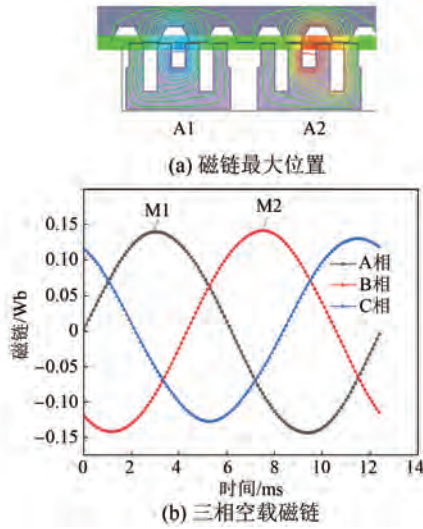


图6 电磁推力产生原理

Fig. 6 Principle of electromagnetic thrust generation

电流,故在气隙中形成磁场。这个磁场与定子铁心之间相互作用,产生悬浮力。该力能使动子被抬起,当产生的悬浮力的大小与磁悬浮列车本身的重力相同时,磁悬浮列车才能够保持平衡状态,实现稳定的悬浮效果。

2 建立 EEFSLMSM 数学模型

2.1 电压方程与磁链方程

为了便于推导计算,假设电机模型的条件如下^[10-11]:

- (1) 电机铁心磁导系数为无穷大,忽略磁场饱和、磁滞和涡流的影响,假定磁路是线性的;
- (2) 忽略边端效应,假设气隙是恒定的;
- (3) 不考虑频率和温度变化对绕组电阻的影响;
- (4) 只考虑磁场基波,忽略谐波的影响。

根据交流电机矢量控制原理,在 $d-q-0$ 坐标系中,电励磁磁通切换直线磁悬浮电动机的电压方程为

$$U_d = i_d R_a - \frac{\pi v_s}{\tau_1} \psi_q + \frac{d\psi_d}{dt} \quad (1)$$

$$U_q = i_q R_a + \frac{\pi v_s}{\tau_1} \psi_d + \frac{d\psi_q}{dt} \quad (2)$$

$$U_0 = i_0 R_a + \frac{d\psi_0}{dt} \quad (3)$$

$$U_f = i_f R_f + \frac{d\psi_f}{dt} \quad (4)$$

式中: U_d 、 U_q 、 U_0 为电枢绕组在 $d-q-0$ 坐标系中的外施电压分量; R_a 为电枢绕组的电阻; R_f 为励磁绕组的电阻; U_f 为励磁绕组外施电压值; i_d 、 i_q 、 i_0 为电枢绕组在 $d-q-0$ 坐标系下的电流分量; i_f 为励磁直轴电流; v_s 为电枢磁极的运动速度; ψ_d 、 ψ_q 、 ψ_0 为电枢绕组在 $d-q-0$ 坐标系下的磁链分量; ψ_f 为励磁磁链分量; τ_1 为定子极距。

磁链方程为

$$\psi_q = i_q (L_\sigma + L_{mq}) \quad (5)$$

$$\psi_d = i_d (L_\sigma + L_{md}) + i_f L_{md} \quad (6)$$

$$\psi_0 = i_0 L_\sigma \quad (7)$$

$$\psi_f = i_f (L_{\sigma f} + L_{md}) + i_d L_{md} \quad (8)$$

式中: L_σ 为电枢绕组漏感; $L_{\sigma f}$ 为励磁绕组漏感,包括主漏电感、槽漏感、谐波漏感和端部漏感等; L_{md} 为电机直轴主电感; L_{mq} 为电机交轴主电感。

2.2 电磁推力与悬浮力推导

电励磁磁通切换直线磁悬浮电机的瞬间输出功率为^[12]

$$P = \frac{3}{2} (U_d I_d + U_q I_q) \quad (9)$$

将式(1)代入式(9)可以得到动子传到定子的电磁功率为

$$P_e = \frac{3}{2} \frac{\pi v}{\tau_1} (\psi_d i_q - \psi_q i_d) \quad (10)$$

将式(5)~式(8)代入式(10)可得电磁推力为

$$F_x = \frac{P_e}{v} = \frac{3\pi}{2\tau_1} (\psi_d i_q - \psi_q i_d) = \frac{3\pi}{2\tau_1} [(L_d - L_q) i_d i_q + L_{md} i_f i_q] \quad (11)$$

式中: $L_d = L_\sigma + L_{md}$; $L_q = L_\sigma + L_{mq}$ 。

另由虚位移法可知当电流保持不变时,悬浮力可描述为

$$F_y = \frac{\partial W}{\partial \delta} = \frac{3\partial (i_d \psi_d + i_q \psi_q + i_f \psi_f)}{2\partial \delta} \quad (12)$$

式中: $\partial \delta$ 为电机定子竖直方向产生的一个位移; δ 为气隙。

将式(5)~式(8)代入式(12),忽略电动机漏感,可得悬浮力解析式为

$$F_y = \frac{3}{2} (i_d + i_q)^2 \frac{L_{md}}{\delta} + i_q^2 \frac{L_{mq}}{\delta} \quad (13)$$

电磁推力是由电枢磁场和励磁磁场相互作用

的结果,定义两者之间的夹角为 θ 。将 $i_d = i \cos \theta$, $i_q = i \sin \theta$ 代入式(11)与式(13)可得:

$$F_x = \frac{3\pi}{2\tau_1} i [(L_d - L_q) i \cos \theta + L_d i_f \sin \theta] \quad (14)$$

$$F_y = \frac{3}{2} \left[(i \cos \theta + i_f)^2 \frac{L_{md}}{\delta} + (i \sin \theta)^2 \frac{L_{mq}}{\delta} \right] \quad (15)$$

式(14)表明电机的电磁推力由两部分组成,第一部分是定、转子磁极气隙不均匀引起的磁阻力;第二部分是由定子励磁磁场与转子电流相互作用产生的推力。式(15)中,当 $\theta = 0^\circ$ 时,定、转子之间的悬浮力最大;在 $\theta = 180^\circ$ 时,定、转子之间的悬浮力最小;当 $\theta = 90^\circ$ 时,定、转子之间的悬浮力介于两者之间,而此时的电磁推力基本接近最大值。故电动机正常运行时采用转子直轴 $i_d = 0$ 的控制方式,忽略电机漏感,式(11)与式(13)可写成:

$$F_x = \frac{3\pi}{2\tau_1} i_q i_f L_{md} \quad (16)$$

$$F_y = \frac{3}{2} \left[i_f^2 \frac{L_{md}}{\delta} + i_q^2 \frac{L_{mq}}{\delta} \right] \quad (17)$$

3 EEFSLMSM 有限元分析

EEFSLMSM 参数如表 1 所示,在有限元软件中设计 Maxwell 2D 的仿真模型^[13]。

表 1 EEFSLMSM 基本参数

Tab. 1 Basic parameters of EEFSLMSM

参数名称	参数值
定子齿高/mm	36.0
定子齿宽/mm	10.5
额定速度 $v/(m \cdot s^{-1})$	2.88
定子极距 τ_m/mm	36
定子轴向长度/mm	135
气隙长度/mm	3
定子高度 h_m/mm	50
相数	3
定子轴向长度/mm	135
励磁绕组匝数	240
电枢绕组匝数	120

3.1 磁场分布

EEFSLMSM 在空载情况下的磁场分布如图 7 所示。在使用 Ansys 软件进行分析时,会发现存在一定的漏磁情况。为了解决这个问题,在该电机仿真模型的外部添加一个空气域。由图 7 可

知,在运动时,定子齿与转子齿重合的面积渐渐变大,通过的磁力线也随之增多,磁通也变得更大。因此漏磁通随之减小,电动机效率更高。同时,EEFSLMSM 在空载状态时的磁密云图如图 8(a)所示,图 8(b)则为局部磁密云图^[14],方便进一步的分析。



图 7 空载磁力线分布图

Fig. 7 Empty magnetic field line distribution diagram



(a) 气隙磁密云图



(b) 局部磁密云图

图 8 气隙磁密云图

Fig. 8 Air gap magnetic density cloud diagram

EEFSLMSM 的气隙磁密约为 0.4 T。然而,由于定子和转子均为凸极结构,在运转时会产生齿槽力,从而影响谐波分量的产生^[15-17]。

3.2 空载反电动势

由图 10 可以看出 EEFSLMSM 的空载三相反电动势的波形基本上接近于正弦波。由图 11 可知,当每个模块通入大小相同的电流,就会产生大小相等的负载反电动势。但由于相位角不同,高次谐波的分量也会受到其影响。当相邻两个模块中的空载反电动势串联叠加时,高次谐波分量将

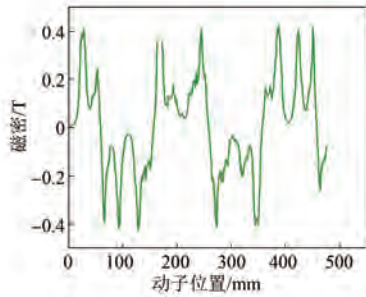


图 9 气隙磁密

Fig. 9 Air gap magnetic density

会被抵消掉,只剩下基波分量以及一些幅值非常小的高次谐波分量,使得该电机反电动势的波形更加趋近于正弦波^[18-20]。

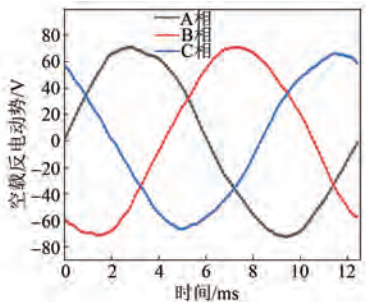


图 10 空载反电动势

Fig. 10 No-load back electromotive force

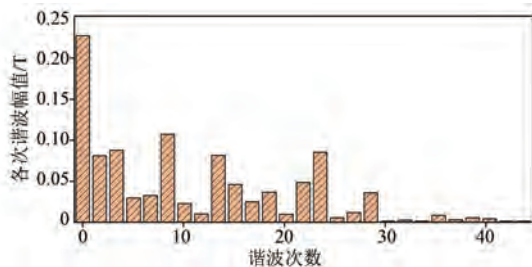


图 11 气隙磁密谐波分析

Fig. 11 Harmonic analysis of air gap magnetic density

3.3 调磁能力

图 12 和图 13 为 EEFSLMSM 调磁性能曲线图。图 12 为在直流励磁电流不同情况下,两个模块中磁链的改变;图 13 为不同直流励磁电流下模块反电动势波形的变化。由图 12 和 13 可知,励磁电流的改变会引起磁链和电动势波形的峰值和相位发生变化,所以励磁电流的大小会影响磁链和反电动势波形的正弦性及位置^[21-22]。

4 电磁力有限元计算

利用 Ansys 有限元软件分析了 EEFSLMSM 模

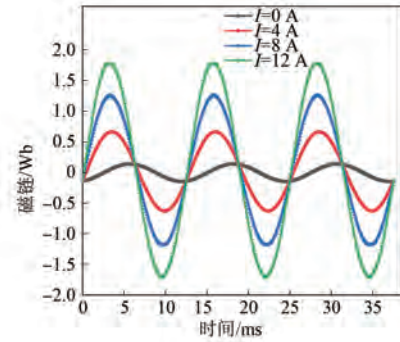


图 12 模块三相负载磁链

Fig. 12 Module three-phase load flux linkage

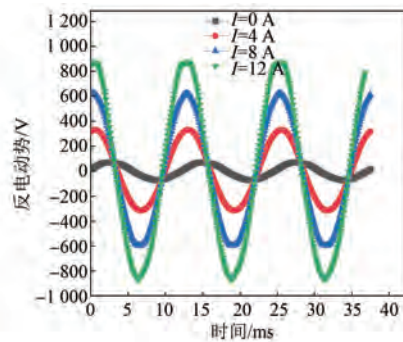


图 13 模块反电动势

Fig. 13 Module back electromotive force

型在不同励磁电流和电枢电流下的电磁推力和悬浮力。

励磁电流为 0 A 时,电机悬浮力为零。当励磁电流为 4 A 时,图 14、图 15 为电磁推力和悬浮力随时间变化的曲线。结果表明,电磁推力随电枢电流线性增加,而悬浮力变化较小。在稳定的气隙磁场下,增加电枢电流可提高电磁推力。

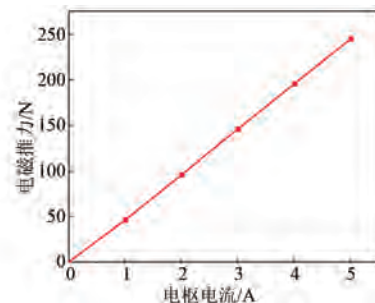


图 14 电磁推力与电枢电流变化曲线

Fig. 14 The curve of electromagnetic thrust and armature current variation

图 16 展示了电枢电流为 0 A 时,即空载状态,电磁推力为零。只观察悬浮力随励磁电流变化的曲线,结果显示,随着励磁电流增大,悬浮力

增加^[23]。

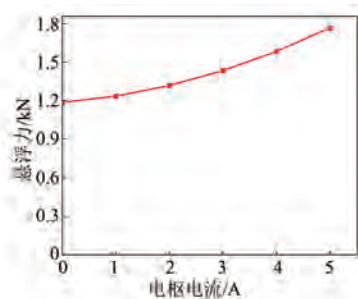


图 15 悬浮力随电枢电流变化的曲线

Fig. 15 The curve of suspension force changing with armature current

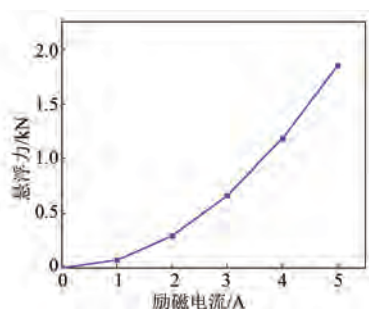


图 16 悬浮力随励磁电流变化的曲线

Fig. 16 The curve of levitation force changing with excitation current

当电枢电流为 5 A 时,图 17、图 18 为励磁电流变化对电磁力均值和悬浮力均值的影响曲线。分析得出,电磁推力随励磁电流增加而增大,并且变化量要远大于悬浮力的变化量。当电枢电流一定时,悬浮力主要受到励磁电流的影响。这些计算结果对后续 EEFSLSM 性能优化和建立控制系统提供了重要参考^[24]。

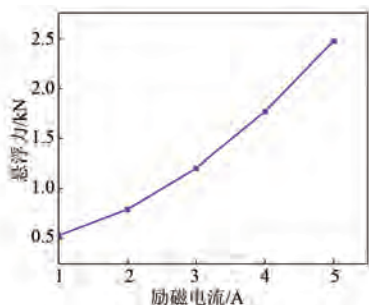


图 17 悬浮力随励磁电流变化的曲线

Fig. 17 The curve of levitation force changing with excitation current

5 结语

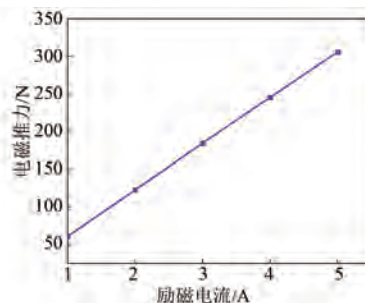


图 18 电磁推力随励磁电流变化的曲线

Fig. 18 The curve of electromagnetic thrust changing with excitation current

(1) EEFSLSM 励磁与电枢绕组全部排布在定子铁心,双层电枢绕组排布在矩形铁心槽中,励磁绕组设置在小矩形铁心槽中。该电机结构简单,且能够有效降低制造成本。

(2) 分析论述了 EEFSLSM 的运行原理,并且建立了其在 $d-q-0$ 轴的数学模型,对 EEFSLSM 的电压、磁链、功率方程、悬浮力和电磁推力的解析表达式进行了推导。

(3) 通过对该电机进行有限元计算,明确电动机的电磁推力主要受电枢电流影响,而励磁电流主要对悬浮力产生影响。该结论为后续研究提供了一定的理论参考。

参考文献

- [1] 徐飞, 罗世辉, 邓自刚. 磁悬浮轨道交通关键技术及全速度域应用研究[J]. 铁道学报, 2019, 41(3): 40-49.
XU F, LUO S H, DENG Z G. Study on key technologies and whole speed range application of maglev rail transport [J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(3): 40-49.
- [2] 张明利. 电梯用磁通切换永磁直线电机的驱动控制系统研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
ZHANG M L. Research on control system of linear flux-switching permanent magnet motor for elevator [D]. Nanjing: Southeast University, 2018.
- [3] 唐文冰, 肖立业, 王粟, 等. 磁悬浮轨道交通中的磁悬浮导向方式研究综述[J]. 电工电能新技术, 2022, 41(5): 45-60.
TANG W B, XIAO L Y, WANG S, et al. Summary of research on levitation-guidance modes in maglev rail transportation technology [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy,

- 2022, 41(5): 45-60.
- [4] 艾春洋, 蓝益鹏. 混合励磁通切换直线磁悬浮电动机电磁力的有限元计算[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(3): 49-54.
- AI C Y, LAN Y P. Finite element calculation of electromagnetic force of hybrid excitation flux switching linear magnetic suspension motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2021, 48(3): 49-54.
- [5] 刘成. 轨道交通用混合励磁直线电机的设计与研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2018.
- LIU C. Design and research of hybrid excitation linear motor for rail transit [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2018.
- [6] 寇宝泉, 金银锡, 张赫, 等. 新型串联磁路混合励磁直线涡流制动器特性分析[J]. 电工技术学报, 2016, 31(15): 62-72.
- KOU B Q, JIN Y X, ZHANG H, et al. Characteristic analysis of a novel linear eddy current brake with serial magnetic circuit and hybrid excitation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(15): 62-72.
- [7] ZHANG B, CHENG M, ZHANG M, et al. Comparison of modular linear flux-switching permanent magnet motors with different mover and stator pole pitch [C] // 2017 20th International Conference on Electrical Machines and Systems, Sydney, 2017.
- [8] 刘伯涛, 蓝益鹏. 横向磁场磁通切换电励磁磁悬浮直线电机的研究[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(9): 37-43.
- LIU B T, LAN Y P. Research on transverse magnetic field flux switching electric excited magnetic suspension linear motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2022, 49(9): 37-43.
- [9] 张宗庆, 马树元, 宋宁冉. 线切割平面线圈 Halbach 永磁直线电动机电磁分析[J]. 微特电机, 2018, 46(10): 10-14.
- ZHANG Z Q, MA S Y, SONG N R. Analysis of the Halbach magnetic levitation motor with wire-electrode cutting planer coil [J]. Small & Special Electrical Machines, 2018, 46(10): 10-14.
- [10] 逯卓林. 六相轴向磁通切换永磁电机设计、分析与优化[D]. 西安: 西安理工大学, 2023.
- LU Z L. Design, analysis and optimization of a six-phase axial switched-flux permanent magnet machine [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2023.
- [11] ZHU H Q, WU M C. Direct control of bearingless permanent magnet synchronous motor based on prediction model [J]. Progress in Electromagnetics Research M, 2021, 101: 127-138.
- [12] 蓝益鹏, 胡学成, 陈其林, 等. 可控励磁磁悬浮进给平台电磁特性的有限元分析[J]. 机械工程学报, 2017, 53(4): 184-189.
- LAN Y P, HU X C, CHEN Q L, et al. Finite element analysis of electromagnetic characteristics of controllable excitation magnetic suspension feed platform [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(4): 184-189.
- [13] 曹瑞武, 程明, 花为, 等. 磁路互补型模块化磁通切换永磁直线电机[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(6): 58-65.
- CAO R W, CHENG M, HUA W, et al. Novel modularized flux-switching permanent magnet linear machine with complementary magnetic circuits [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(6): 58-65.
- [14] ZHANG W, ZHU H Q, XU Y, et al. Direct control of bearingless permanent magnet slice motor based on active disturbance rejection control [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2020, 30(4): 1-5.
- [15] OUAGUED S, AMARA Y, BARAKAT G. Cogging force analysis of linear permanent magnet machines using a hybrid analytical model [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2016, 52(7): 1-4.
- [16] 付东山, 吴康伊, 郑萍, 等. 磁路互补型横向磁通切换直线电机电磁推力计算与特性分析[J]. 电工技术学报, 2022, 37(22): 5717-5727.
- FU D S, WU K Y, ZHENG P, et al. Analysis of electromagnetic thrust characteristics of magnetic circuit complementary transverse flux switching linear motor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(22): 5717-5727.
- [17] 苏鹏, 夏玉佳, 花为, 等. 模块化多单元磁通切换电机设计与特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(19): 7669-7683.
- SU P, XIA Y J, HUA W, et al. Design and characteristics analysis of a modular elementary flux switching permanent magnet machines [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(19): 7669-7683.
- [18] 常九健, 马文礼, 攀彦恩. 弧形永磁同步电机设

- 计与优化[J]. 电机与控制学报, 2015, 19(7): 106-110.
- CHANG J J, MA W L, PAN Y E. Design and optimization of arc permanent magnet synchronous motor [J]. Electric Machines and Control, 2015, 19(7): 106-110.
- [19] 刘畅, 朱孝勇, 杜恽, 等. 基于电-热双向耦合的磁场调制型磁通切换电机设计与性能分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(21): 6237-6245.
- LIU C, ZHU X Y, DU Y, et al. Design and performance analysis of magnetic field modulated flux-switching permanent magnet machine based on electrical-thermal bi-directional coupling design method [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(21): 6237-6245.
- [20] 李瑞妮. 高速磁悬浮列车用直线同步电机特性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
- LI R N. Research on characteristics of linear synchronous motor for high-speed maglev train [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
- [21] 刘博, 张东, 杨本康, 等. 高速磁浮车用高温超导直线电动机的研究综述[J]. 低温与超导, 2021, 49(4): 31-35+84.
- LIU B, ZHANG D, YANG B K, et al. Development status of HTS linear motor for high speed maglev vehicle [J]. Cryogenics & Superconductivity, 2021, 49(4): 31-35+84.
- [22] 李增乐. 混合励磁直线磁悬浮同步电动机的设计[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2020.
- LI Z L. Design of hybrid excitation linear maglev synchronous motor [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2020.
- [23] 蓝益鹏, 李增乐. 混合励磁直线磁悬浮同步电动机磁极结构研究[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(10): 1-8.
- LAN Y P, LI Z L. Magnetic pole structure of hybrid excitation linear maglev synchronous motor [J]. Electric Machines and Control, 2020, 24(10): 1-8.
- [24] 梁锦涛, 卢亮, 王丁磊. 实现高速精密成形的电磁悬浮直线驱动新方式[J]. 锻压装备与制造技术, 2022, 57(6): 7-14.
- LIANG J T, LU L, WANG D L. The new linear driven mode of electromagnetic levitation for high-speed precision forming [J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2022, 57(6): 7-14.

收稿日期:2023-08-29

收到修改稿日期:2024-01-02

作者简介:

张欣悦(1998-),女,硕士研究生,研究方向为电机设计,3499892239@qq.com;

*通信作者:张欣悦(1998-),女,硕士研究生,研究方向为电机设计,3499892239@qq.com。

Electromagnetic Force Analysis of Electrically Excited Flux Switching Linear Magnetic Suspension Motor

ZHANG Xinyue^{*}, LAN Yipeng

(School of Electric Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Key words: electric excitation; flux switching; linear magnetic suspension motor; finite element

Electrically excited flux switching linear magnetic suspension motor (EEFSLMSM) operates with a innovative structural configuration, which not only streamlines the manufacturing process, but also significantly reduces overall production costs, marking a paradigm shift in cost-effective motor design and production methodologies.

A complex mathematical model is designed by precisely outlining its functionalities within the $d-q$ axis. The rigorous derivation and elucidation of intricate analytical expressions governing various facets such as voltage, magnetic flux, power equations, and the complex aspects associated with suspension force and electromagnetic thrust for the EEFSLMSM are exhaustively outlined. These insights delve deeply into the profound intricacies, unveiling interrelations and complexities inherent in the motor's operational dynamics.

This article delves deeply into the electromagnetic performance of the motor, employing advanced finite element calculation methods. Through meticulous comparison of controlled current values, it reveals that electromagnetic thrust is predominantly governed by the armature current,

while suspension force is intricately linked to the excitation current, exhibiting a clear proportional relationship. Moreover, the magnitude of suspension force escalates exponentially with the square of the excitation current, while load thrust mirrors a similar proportional trend with armature current. These theoretical insights provide a reference for optimizing the design and control strategies for EEFSLMSM, promising significant improvements in performance and efficiency.

From an industrial standpoint, the structural layout simplifies the overall construction process and reduces manufacturing costs. A notable feature of this layout is the integration of excitation and armature windings within the rotor core, offering both theoretical frameworks and practical guidance for future advancements in electric motor engineering. This integration enhances the motor's reliability and enables more compact designs, contributing to the development of innovative solutions in various industrial applications. In conclusion, this research advances our understanding of electromagnetic systems and paves the way for further advancements in magnetic levitation linear motor technology.