

混合励磁磁通切换直线磁悬浮电动机 电磁力的有限元计算

艾春洋, 蓝益鹏

(沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

摘要: 研究了用于磁悬浮列车牵引系统的混合励磁磁通切换直线磁悬浮电动机(HEFSLMSM)。该电动机的永磁体、励磁绕组以及电枢绕组均位于初级短动子上,而次级长定子仅由导磁铁心构成,适合于长定子磁悬浮列车的应用场合,结构简单、价格低廉、坚固耐用,可大大降低系统成本。通过研究 HEFSLMSM 磁悬浮运行原理,建立 HEFSLMSM 的磁链方程、电压方程,并且根据磁链方程和电压方程推导出磁悬浮力和电磁推力的数学模型。对电动机静态特性以及电磁力进行有限元计算,结果验证了该电动机磁悬浮运行的可行性。

关键词: 直线电动机; 磁悬浮列车; 混合励磁; 磁通切换; 有限元计算

中图分类号: TM 359.4 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2021)03-0049-06

doi: 10.12177/emca.2020.209

Finite Element Calculation of Electromagnetic Force of Hybrid Excitation Flux Switching Linear Magnetic Suspension Motor

AI Chunyang, LAN Yipeng

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

Abstract: The hybrid excitation flux switching linear magnetic suspension motor (HEFSLMSM) used in the traction system of the maglev train is studied. The permanent magnets, excitation windings and armature windings of the motor are all located on the primary short rotor, while the secondary long stator is only composed of magnetic core, which is suitable for the application of the long stator maglev train. Moreover, the motor has a simple structure, low price, sturdiness and durability, which can greatly reduce the system cost. The magnetic levitation operation principle of HEFSLMSM is studied. By establishing the flux and voltage equations of HEFSLMSM, the mathematical models of magnetic levitation force and electromagnetic thrust are deduced. The static characteristics and electromagnetic force of the motor are analyzed by finite element method, and the results show the feasibility of the magnetic suspension operation of the motor.

Key words: linear motor; maglev train; hybrid excitation; magnetic flux switching; finite element calculation

0 引言

轨道交通的牵引系统所使用的电机主要为旋转电机和直线电机^[1]。与旋转电机相比,直线电机的驱动方式具有显著优点^[2]。无论在中国国内

还是国外,直线感应电机驱动在高速铁路运营系统中均得到了广泛的应用,如日本横滨市营地铁4号线、中国广州地铁6号线等。直线感应电机在轨道交通方面应用存在低效率、无功功率占比高等缺点^[3]。在长定子轨道交通领域,将永磁体

收稿日期: 2020-11-10; 收到修改稿日期: 2021-01-12

作者简介: 艾春洋(1995—),男,硕士研究生,研究方向为电机及其控制。

蓝益鹏(1962—),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为电机及其控制。

或绕组沿轨道铺设,大幅度增加预算成本,日常的维护也比较困难,这些技术难题亟待解决^[4]。

直线电机法向力较大,一般情况下,该法向力可能是电磁推力的数倍。通常主要研究直线电机的水平推力,一般不考虑法向力^[5-7],但是磁悬浮列车运行速度非常快,在竖直方向的法向力必须得到很好的控制,使列车能稳定运行。车身本身具有重力,重力的方向和磁悬浮力的方向相反,可以通过调节磁悬浮力的大小与自身车重达到平衡,此时的动子和定子间没有摩擦,达到了稳定运行的目的^[8]。在水平方向上,采用直线电机直接驱动方式,可以实现无磨损快速运动。

本文设计的混合励磁磁通切换直线磁悬浮电动机(HEFSLMSM)主要应用于磁悬浮列车牵引系统,该电动机的抱轨结构使动子结构更加复杂,永磁体、励磁绕组以及电枢绕组均位于短动子上,次级长定子仅由导磁铁心构成,用1台电动机能够实现直接驱动和稳定悬浮,同时还具有可调节的气隙磁场。该设计结构具有低成本、坚固耐用等优点,特别适合于长距离的轨道交通^[9-10]。

1 HEFSLMSM 结构与运行原理

1.1 HEFSLMSM 结构

图1为HEFSLMSM结构示意图。永磁体、励磁绕组以及电枢绕组位于初级短动子上。电枢绕组缠绕在2个相邻的U型铁心槽中;直流励磁绕组缠绕在U型铁心上;次级只有铁心材料。永磁体的充磁方向为横向交替充磁,即与运动方向相同或者相反。

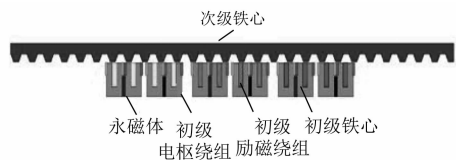


图1 HEFSLMSM 结构示意图

1.2 HEFSLMSM 的运行原理

1.2.1 磁通切换原理

A相电枢绕组中的磁链能够出现双极性,磁通能够正向穿过A相绕组又能过渡到反向穿过。动子处在4个不同位置时对应的磁通情况如图2所示,由正向最大位置过渡到第一平衡位置(磁通为0),负向磁通最大位置过渡到第二平衡位置

(磁通为0)。B、C相磁通变化同理,在此不作赘述。

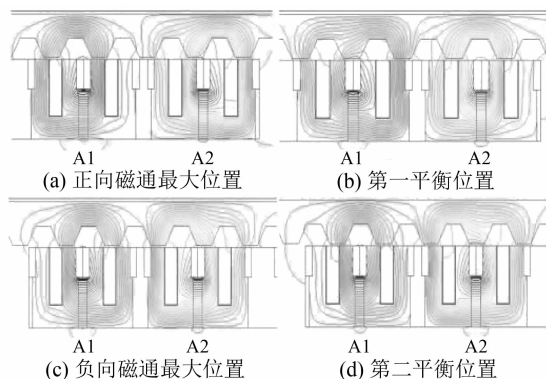


图2 磁场分布

1.2.2 电磁推力产生原理

图3(a)中的磁力线是由永磁体产生的,A1与A2模块处于正磁链的最大位置,也就是图3(b)中M1处,励磁电流产生的磁链和永磁体产生的磁链合成后为总磁链,按照磁通走磁阻最小路径原理,动子向右移动。随着动子的运动,动子齿和定子齿重合部分变大,当两者完全重合时,到达第一平衡位置(磁通为0)。这时A相关断,B相导通,图3(b)所示B相磁链到达最大位置M2处,向右的电磁推力产生原理和A相相同,动子继续向右运动,当B相磁链到达平衡位置时,B相关断,C相开始导通。通过控制电流的导通和关断从而保证动子朝一个方向运动。

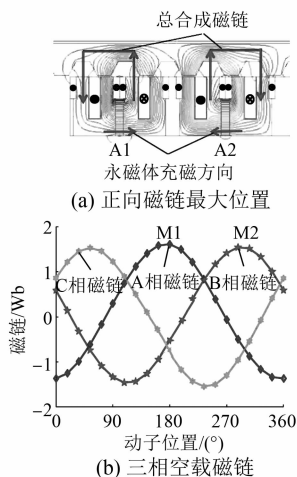


图3 电磁推力原理示意图

1.2.3 悬浮力产生原理

当电动机运行过程中,励磁绕组和永磁体均

会在气隙中产生磁场,此时气隙中的合成磁场和次级铁心相互作用使铁心被吸起,即悬浮力。当悬浮力与磁悬浮列车重力大小相等时,即可实现稳定悬浮。

2 建立 HEFSLMSM 的数学模型

模型的假设条件如下:

(1) 假设电机铁心材料不饱和,不考虑涡流和磁滞带来的影响;

(2) 永磁体与励磁绕组所产生的气隙磁场正弦分布,忽略高次谐波影响;

(3) 通入的电枢电流为三相对称。

在 d - q 坐标系下的磁链方程:

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + M_f i_f + \psi_{pm} \\ \psi_q = L_q i_q \\ \psi_f = L_f i_f + M_f i_q + \psi_{pm} \end{cases} \quad (1)$$

式中: L_d 、 L_q 、 L_f 分别为电枢绕组 d 轴自感、电枢绕组 q 轴自感及励磁绕组自感; M_f 为单相电枢绕组与励磁绕组之间互感的幅值; ψ_f 永磁体产生磁链。

在 d - q 坐标系下的电压方程:

$$\begin{cases} U_d = L_d \frac{di_d}{dt} + M_f \frac{di_f}{dt} + r_s i_d - \omega_e L_q i_q \\ U_q = L_q \frac{di_q}{dt} + r_s i_q - \omega_e L_d i_d - \omega_e M_f i_f - \omega_e \psi_{pm} \\ U_f = i_f r_f + \frac{d\psi_f}{dt} \end{cases} \quad (2)$$

式中: U_d 、 U_q 分别为电枢 d 轴电压及电枢 q 轴电压; L_d 、 L_q 分别为 d 、 q 轴电感; i_d 、 i_q 分别为 d 、 q 轴电流; i_f 为直流励磁电流; r_s 为电枢绕组的电阻; U_f 为励磁电压; ψ_f 、 ψ_{pm} 分别为励磁磁链和永磁磁链的幅值; r_f 为励磁绕组的电阻。

电磁推力:电机在运行过程中的功率主要由各项绕组的输入功率组成,当忽略铁耗影响时,该电机的输入功率可表示为

$$\begin{aligned} P_{in} &= \frac{3}{2} (u_d i_d + u_q i_q) + u_f i_f = \\ &\frac{3}{2} \left[\left(\frac{d\psi_d}{dt} - \omega_e \psi_q \right) i_d + r_s i_d^2 + \right. \\ &\left. \left(\frac{d\psi_q}{dt} + \omega_e \psi_d \right) i_q + r_s i_q^2 + r_f i_f^2 \right] \end{aligned} \quad (3)$$

将式(1)和式(2)代入式(3),可得电动机的电磁推力方程和悬浮力方程:

$$\begin{aligned} F_x &= \frac{3}{2} \frac{(i_q \psi_d - i_d \psi_q)}{v} = \\ &\frac{3}{2} \frac{[i_q \psi_{pm} + i_d i_q (L_d - L_q) + i_q M_f i_f]}{v} = \\ &\frac{3\pi}{\tau_s} [i_q \psi_{pm} + i_d i_q (L_d - L_q) + i_q M_f i_f] = \\ &F_{pm} + F_r + F_f \end{aligned} \quad (4)$$

悬浮力方程为

$$F_y = \frac{3}{2} \left[\frac{(M_f i_f + \psi_{pm})}{M_f g} + i_q^2 \frac{L_q}{g} \right] \quad (5)$$

式中: F_{pm} 为永磁体产生的推力; F_r 为磁阻推力; F_f 为电励磁推力分量; τ_s 为定子极距; g 为气隙长度。

3 电机静态特性的有限元分析

图1中的 HEFSLMSM 基本参数如表1所示^[11]。根据图1和表1在 ANSYS 软件中设计 Maxwell 2D 仿真模型。

表1 HEFSLMSM 基本参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
定子齿高/mm	36.0	气隙长度/mm	2
定子齿宽/mm	10.5	定子高度 h_m	50
额定速度 $v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	0.36	相数	3
定子极距 τ_m/mm	42	剩磁 B_r/T	1.2
定子轴向长度/mm	150	定子轴向长度/mm	135
永磁体尺寸/mm	30×7×135		

3.1 磁场分布

图4为 HEFSLMSM 在空载情况下的磁场分布。利用 ANSYS 软件分析时,会有一定漏磁的情况,为了不让永磁体与外界空气有接触,可以在电动机模型外增加一个空气区域。由图4可以看出,定子的齿在运动时与定子齿重合的面积越大,说明通过的磁力线越多,磁通越大,漏磁通越小,则电动机效率越高。

图5(a)为电动机处在空载状态时的磁密云图,可以得到各部分的磁密值;图5(b)为局部磁密云图^[12]。

从图6可以看出,HEFSLMSM 的气隙磁密约为 1.3 T,气隙磁场不是理想的正弦波,原因是初

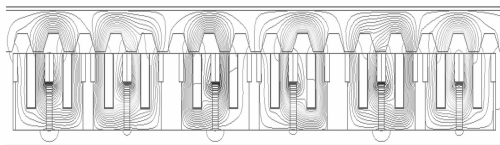


图4 HEFSLMSM 空载磁力线分布图

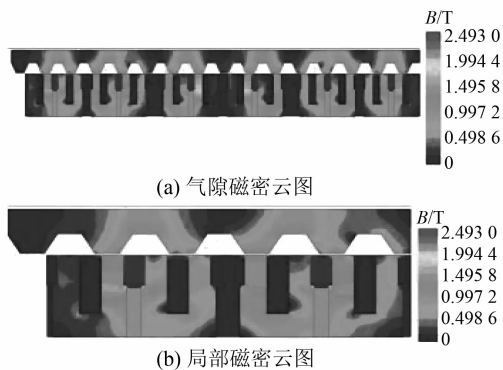


图5 气隙磁密云图

级动子和次级定子均是凸极结构,会产生齿槽效应影响谐波分量,使理想情况下的正弦波发生畸变^[13-14]。

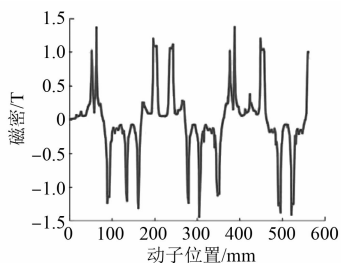


图6 气隙磁密

3.2 空载反电动势

图7为HEFSLMSM的三相反电动势波形,接近正弦波。气隙磁密谐波分析如图8所示。由图8可知,由于每相的2个模块通入相同幅值电流,会产生相同幅值的反电动势,相位角的不同影响高次谐波的分量,当相邻2个模块线圈中的反电动势串联叠加后,反电动势波形中的高次谐波分量被抵消掉,只剩下基波分量以及一些幅值非常小的高次谐波分量,从而使得波形更接近正弦波^[15-16]。

3.3 空载磁链

图9为在HEFSLMSM空载状态下的三相磁

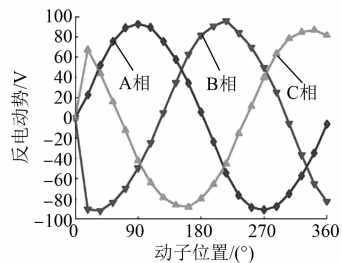


图7 三相反电动势

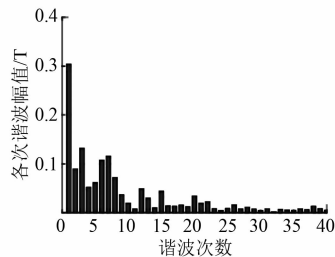


图8 气隙磁密谐波分析

链图。由图9可知,磁链正弦,每相磁链的幅值相同,相位相差120°。

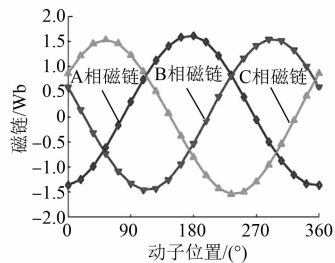


图9 三相空载磁链

3.4 调磁能力

图10和图11所示为电机的调磁性能。图10为在不同直流励磁电流下的A相磁链;图11为在不同直流励磁电流下的A相反电动势。从图10、图11可以看出,励磁电流变化影响磁链和电动势峰值和相位。因此,励磁电流的大小影响磁链和反电动势波形正弦度。

4 电磁力的有限元计算

利用ANSYS软件计算出HEFSLMSM模型在不同的励磁电流和电枢电流下的电磁推力和悬浮力^[17-20]。

图12为励磁电流为0 A时,电枢电流变化对

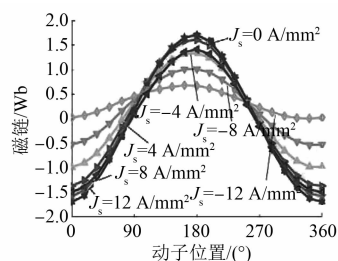


图 10 A 相磁链

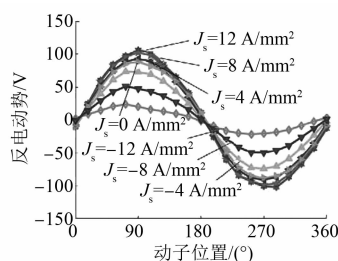


图 11 A 相反电动势

电磁推力和悬浮力均值变化的曲线。可以看出,电磁推力随电枢电流呈线性增加;悬浮力随电枢电流的变化量较小,当气隙磁场稳定时,电枢电流主要影响 HEFSLMSM 的电磁推力。

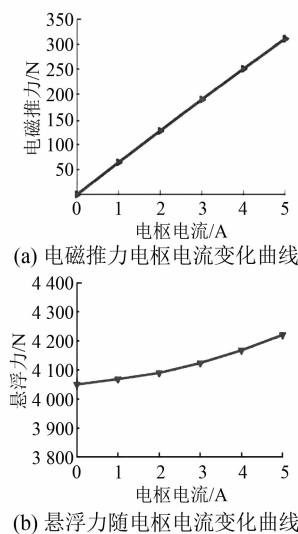


图 12 励磁电流为 0 A 时,电磁力均值随电枢电流的变化曲线

当电枢电流为 0 A,电磁推力近乎为零,悬浮力均值随励磁电流变化的曲线如图 13 所示。HEFSLMSM 的悬浮力随励磁电流近似呈线性递增趋势。

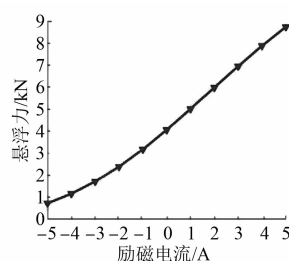


图 13 电枢电流为 0 A,悬浮力均值随励磁电流变化的曲线

电枢电流为 5 A 时,励磁电流变化对电磁力均值和悬浮力均值变化的曲线如图 14 所示。可以看出,电磁推力随励磁电流呈线性递增;悬浮力随励磁电流呈线性递增,并且变化量要远大于电磁推力的变化量。当电枢电流一定时,励磁电流主要影响 HEFSLMSM 的悬浮力。

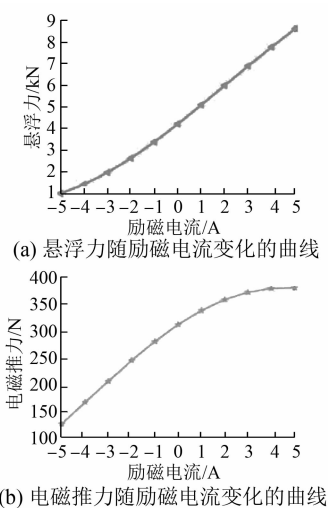


图 14 电枢电流为 5 A,励磁电流变化对电磁力均值和悬浮力均值变化的曲线

5 结 语

(1) 研究了 HEFSLMSM 的基本结构,并对其运行原理进行论述,推导出 HEFSLMSM 在 $d-q$ 坐标系中的电压方程、磁链方程、电磁推力和悬浮力的解析表达式。

(2) 该电机采用混合励磁的方式,在有效减小永磁体用量,降低电机成本的同时,引入了电励磁,使得电机具有可调的气隙磁场,通过控制直流励磁电流控制电机的悬浮力,使其稳定悬浮。

(3) 对电磁力和悬浮力进行有限元计算并进行对比,得出电枢电流主要影响电动机的电磁推

力,励磁电流主要影响悬浮力。本文所提的新型电动机,因为不需要在导轨上铺设绕组,大幅度减少了成本,所以非常适用于长定子磁悬浮列车场合。

【参考文献】

- [1] 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.
- [2] 肖锋. 城市轨道交通直线电机车辆段设计与研究[J]. 华东交通大学学报,2017,34(5): 29.
- [3] STUMBERGER G, ZARKO D, AYDEMIR M T, et al. Design and comparison of linear synchronous motor and linear induction motor for electromagnetic aircraft launch system [C] // IEEE International Electric Machines and Drives Conference,2003.
- [4] 王欣,程明,花为,等. 轨道交通用磁通切换永磁直线电机空间矢量脉宽控制[J]. 微电机,2013,46(4): 35.
- [5] 万尚军,钱金根,倪光正,等. 电动悬浮型磁悬浮列车悬浮与导向技术剖析[J]. 中国电机工程学报,2000,20(9): 22.
- [6] 金志颖,杨仕友,倪光正,等. EMS 型磁悬浮列车电磁系统动态电磁场的有限元分析及其悬浮与牵引力特性的研究[J]. 中国电机工程学报,2004,24(10): 133.
- [7] WANG S, WANG X, XU X, et al. Study on minimizing the detent force of PM linear brushless DC motors [C] // 2008 International Conference on Electrical Machines and Systems,2008.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] CAO R, CHENG M, MI C, et al. A hybrid excitation flux-switching permanent magnet linear motor for urban rail transit [C] // 2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference,2011.
- [12] 夏加宽,沈丽,彭兵,等. 齿槽效应对永磁直线伺服电机法向力波动的影响[J]. 中国电机工程学报,2015,35(11): 2847.
- [13] OUAGUED S, AMARA Y, BARAKAT G. Logging force analysis of linear permanent magnet machines using a hybrid analytical model [J]. IEEE Transactions on Magnetics,2016,52(7): 8202704.
- [14] 刘壮. 新型混合励磁直线同步电机的研究与设计[D]. 杭州:浙江大学,2008.
- [15] 朱孝勇,程明,赵文祥,等. 混合励磁电机技术综述与发展展望[J]. 电工技术学报,2008,23(1): 30.
- [16] FULFORD C, MAGGIORE M, APKARIAN J. Control of a 5DOF magnetically levitated positioning stage [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology,2009,17(4): 844.
- [17] 卢琴芬,叶云岳. 混合励磁直线同步电机的磁场与推力[J]. 中国电机工程学报,2005,35(10): 127.
- [18] 杜玉梅. 可控永磁直线同步电机磁力的研究[C] // 2006 年全国直线电机学术年会会议论文集,2006.
- [19] 寇宝泉,金银锡,张赫,等. 混合励磁直线电磁阻尼器的特性分析[J]. 中国电机工程学报,2013,33(24): 143.
- [20] 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.

[主要栏目]

- | | | |
|--------------|-----------|-------------|
| · 控制与应用技术 | · 研究与设计 | · 故障诊断与保护 |
| · 新能源发电与局域电网 | · 新能源汽车技术 | · 发电机组及其控制 |
| · 测试技术与测控系统 | · 材料与工艺 | · 电机生产及质量管理 |
| · 电力电子变流器技术 | · 智能制造 | · 节能应用 |
| · 实用技术成果 | | |