

横向磁场磁通切换电励磁磁悬浮直线电机的研究

刘伯涛, 蓝益鹏

(沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

摘要: 在传统磁通切换直线电机的基础上, 提出了一种可用于轨道交通的横向磁场磁通切换电励磁磁悬浮直线电机(TMFFSEEMSLM)。研究 TMFFSEEMSLM 的结构与运行原理, 该电机的定子为 U 形磁极, 转子为双 H 形并通过横梁连接, 产生横向磁通进行导向, 电枢绕组和励磁绕组均位于电机短初级上实现磁通切换, 次级仅由导磁铁心构成, 电励磁实现气隙磁场调节, 极大地降低了远距离轨道交通的制造成本, 磁悬浮使电机的初级和次级实现无摩擦运动; 建立该磁悬浮直线电机的数学模型, 推导电压、磁链方程以及悬浮力、电磁推力和导向力的解析表达式; 建立电机的三维有限元模型, 分析电机的磁场分布及其电磁参数, 对电机的悬浮力、电磁推力、导向力进行仿真, 研究结果验证了电机结构的可行性, 可以实现牵引、悬浮与导向的一体化。

关键词: 直线电机; 横向磁通; 磁悬浮; 磁通切换; 三维有限元计算; 轨道交通

中图分类号: TM359.4 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2022)09-0037-07

doi: 10.12177/emca.2022.088

Research on Transverse Magnetic Field Flux Switching Electric Excited Magnetic Suspension Linear Motor

LIU Botao, LAN Yipeng

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

Abstract: Based on the traditional flux switched linear motor, a transverse magnetic field flux switched electric excited magnetic suspension linear motor (TMFFSEEMSLM) for rail transit is proposed. The structure and the operation principle of TMFFSEEMSLM are studied. The stator of the motor is U-shaped magnetic pole, the mover is double H-shaped and connected through a beam to generate transverse magnetic flux for guidance. The armature winding and excitation winding locate on the short primary of the motor to realize magnetic flux switching, and the secondary is only composed of magnetic core. Electrical excitation realizes air gap magnetic field regulation, greatly reduce the manufacturing cost of long-distance rail transit. Magnetic suspension enables frictionless motion at the primary and secondary levels of the motors. The mathematical model of magnetic suspension linear motor is established, and the voltage, flux linkage equations and the analytical expressions of suspension force, electromagnetic thrust and guidance force are derived. The three-dimensional finite element model of the motor is established, the magnetic field distribution and electromagnetic parameters of the motor are analyzed, and the suspension force, electromagnetic thrust and guidance force of the motor are simulated. The research results verify the practicability of the motor structure. The integration of traction, suspension and guidance is realized.

Key words: line motor; transverse magnetic flux; magnetic suspension; magnetic flux switching; 3D finite element calculation; rail transit

收稿日期: 2022-05-31; 收到修改稿日期: 2022-08-02

作者简介: 刘伯涛(1997—), 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, 研究方向为电机及其控制。

0 引言

在轨道交通领域内,直线电机作为其牵引系统相对于旋转电机具有特别的优势。直线电机省去了旋转电机正常工作所必须的滚珠、滑轮或者丝杆来进行运动形式转换的传动环节^[1]。同时,在地面运输系统中,由于粘着力和其他机械上的原因,当速度大于 250 km/h 时,选用旋转运动的电机是不理想的^[2]。由于其特有的优势,直线电机在国内外的轨道交通领域均得到了广泛的应用,如我国的湖南省长沙磁浮快线,韩国的龙仁 EverLine 等。但直线感应电机也存在功率因数低,日常维护困难等缺点^[3],如何设计电机结构以降低电机的成本,提高电机的性能,是目前国内外主要研究方向之一^[4]。

横向磁通电机的铁心磁场呈三维分布,磁路和电路在空间上解耦,且提高了电机的功率密度^[5]。基于这种优点,国内贾周等^[6]学者提出一种背靠背 Ω 形定子横向磁通永磁直线电机,通过改善电机结构提高了电机性能。颜建虎等^[7]提出了一种磁通切换型横向磁通永磁风力旋转发电机,通过改善定子空间利用率,提高了气隙的磁通密度。文献^[8]中报道了一种利用软磁材料制造的新型磁通切换型横向磁通直线电机,使电机的安装工艺得到简化。

磁悬浮系统使电机的初级和次级不接触,实现了无摩擦运动,易于控制,而且绿色环保,符合当今经济发展的趋势^[9]。国内的王志涛^[10]研究了一种高温超导横向磁通磁悬浮直线电机,具有良好的导向能力,提高了电机的功率因数。从事研究磁悬浮列车的日、德专家称“21 世纪最理想的交通工具是磁悬浮列车”^[11]。日本 L0 型磁悬浮列车刷新了磁悬浮列车的世界记录,达到时速 603 公里的记录^[12]。

本文设计了一种横向磁场磁通切换电励磁磁悬浮直线电机(TMFFSEEMSLM),电机的定子为 U 形磁极,动子为双 H 形并通过横梁相连,该结构益于模块化生产,大大降低了电机的制造难度。同时, TMFFSEEMSLM 综合了横向磁通和磁悬浮系统的优势,可以实现牵引、悬浮与导向的一体化,绿色环保,且采用电励磁方式产生可调节的气隙磁场,有利于稳定悬浮 TMFFSEEMSLM 采用短

初级长次级结构,电枢绕组和励磁绕组只位于电机初级上,降低了电机的制造成本。通过建立电机的三维模型,并对其进行有限元计算,分析仿真结果,验证了电机结构的可行性。

1 TMFFSEEMSLM 结构与工作原理

1.1 TMFFSEEMSLM 结构

图 1 为 TMFFSEEMSLM 结构示意图,由于 TMFFSEEMSLM 各相之间相互独立,可通过其单相结构进行分析。

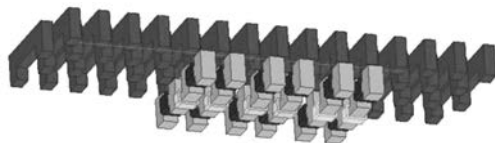


图 1 TMFFSEEMSLM 结构示意图

图 2 为 TMFFSEEMSLM 单相结构示意图,电机采用短初级、长次级的结构,初级运动部分作为动子,次级固定部分作为定子。初级铁心采用双 H 结构,中间通过一个横梁相连接,电枢绕组位于横梁上,通入正弦交流电,励磁绕组分别位于 2 个 H 中的横梁上,通入直流电,且电流方向相反,相当于 2 个充磁方向相反的永磁体。次级结构采用 U 型铁心,交错排列。

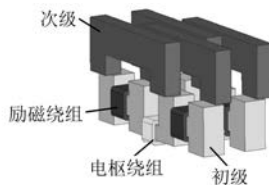


图 2 TMFFSEEMSLM 单相结构示意图

1.2 TMFFSEEMSLM 工作原理

TMFFSEEMSLM 的磁通路径与其初级运动方向垂直,励磁绕组产生的磁场经过初级铁心、气隙进入到次级铁心、气隙再回到初级铁心形成完整的磁通回路。

当 TMFFSEEMSLM 做空载运行时,电机在原动机拖动下做直线运动。图 3(a)~图 3(d) 分别给出了一个初级在不同电角度下的磁通回路方向。当电角度为 90° 时,第 1 个和第 3 个动子齿与其相对的定子齿完全对应,励磁绕组的磁通完全经过左侧的一个定子形成磁通回路,方向为逆时

针,此时另外 2 个动子齿并未对应其相应的定子齿,仅有部分漏磁;当电角度为 180° 时,励磁绕组产生的磁通分别经过左右两侧的定子,与左侧定子的接触面积较大,故整体磁通回路方向依旧为逆时针;当电角度为 270° 时,励磁绕组产生的磁通分别经过左右两侧的定子,但此时与右侧定子的接触面积较大,故整体磁通回路的方向变为顺时针;当电角度为 360° 时,励磁绕组的磁通完全经过右侧的一个定子,磁通回路方向为顺时针。在一个 360° 内,磁通回路的方向由逆时针转变成了顺时针,从而在电枢绕组中感生出了电动势。

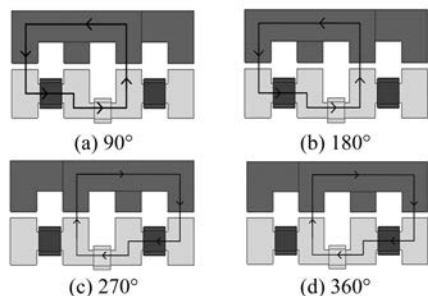


图3 不同电角度磁通回路方向

当 TMFFSEEMSLM 负载运行时,电枢绕组中通入电流。在电机的气隙中,励磁电流产生的等效磁动势为 F_m 、 F_n ,电枢电流产生的等效磁动势为 F_1 、 F_2 。当电机单相动子运动到图 4(a) 位置时,电枢电流为正向,合成磁动势满足 $F_1 + F_m > F_2 - F_n$,依据电机“最小磁阻原理”可知,电机动子有从铁心 1 向铁心 2 移动的趋势。

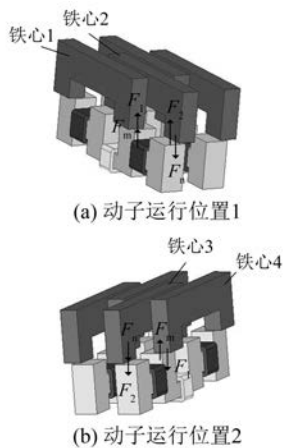


图4 动子运行位置

当电机的单相动子运行在如图 4(b) 所示的

位置时,电枢绕组中电流反向,气隙中产生的合成磁动势满足 $F_1 - F_m < F_2 + F_n$,同样依据“最小磁阻原理”,动子有从铁心 3 向铁心 4 移动的趋势。通过电枢电流产生的磁通和励磁电流产生的磁通相交链,电机可以获得直线运动的牵引力,且电枢电流的周期应该满足 $T = 2\pi/\nu$, τ 为电机的定子极距, ν 为电机运行的额定速度。

TMFFSEEMSLM 的悬浮力主要是由励磁绕组在气隙中产生的磁场与电机次级铁心的相互作用所产生的单边磁拉力形成的^[12-13],当磁悬浮列车重力与这个磁拉力大小相等时,即可实现悬浮,同时,可以通过改变励磁电流的大小使其在不同的重力下实现稳定悬浮。

TMFFSEEMSLM 的导向力产生原理如图 5 所示。如果电机在运行过程中动子部分发生横向偏移,根据最小磁阻原理,动子铁心在移动时,会产生一种使铁心的中轴线与磁场的中轴线重合的趋势。在这个过程中所产生的拉力便是 TMFFSEEMSLM 的导向力。

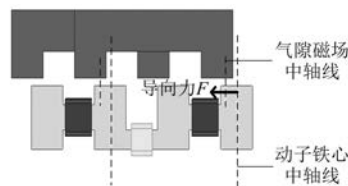


图5 导向力原理图

2 建立 TMFFSEEMSLM 的数学模型

为实现 TMFFSEEMSLM 牵引系统与悬浮系统之间的磁场解耦,取定子基波磁场方向为 d 轴,沿磁场方向逆时针转过 90° 为 q 轴,相互垂直, TMFFSEEMSLM 同步速度相当于 $d-q$ 轴系的旋转速度。

为了简化分析,建立 TMFFSEEMSLM 数学模型时如做下假设:

(1) 电机的电枢绕组中通入的电流为三相对称正弦电流。

(2) 电机铁心磁场不存在饱和情况,不考虑磁滞损耗、涡流损耗。

(3) 忽略电机磁场产生的高次谐波^[14]。

则 TMFFSEEMSLM 在 $d-q$ 坐标轴下的电压方程如下所示:

$$\begin{cases} U_d = i_d R_s - \omega_r \psi_q + \frac{d\psi_d}{dt} \\ U_q = i_q R_s + \omega_r \psi_d + \frac{d\psi_q}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

式中: U_d 、 U_q 分别为 d 、 q 轴电压; i_d 、 i_q 分别为 d 、 q 轴电流; R_s 为电枢绕组阻值; ψ 为磁链; ω_r 为磁极角速度。

d - q 坐标轴下的磁链方程:

$$\begin{cases} \psi_d = i_d L_d + i_t L_{md} \\ \psi_q = i_q L_q \end{cases} \quad (2)$$

式中: L_d 、 L_q 分别为电枢绕组 d 轴、 q 轴电感; i_t 为励磁电流; L_{md} 为励磁绕组自感。

电枢绕组上输入总功率:

$$P_{in} = \frac{3}{2}(u_d i_d + u_q i_q) = \frac{3}{2} \left[r_s(i_d^2 + i_q^2) + \frac{d\psi_d}{dt} i_d + \frac{d\psi_q}{dt} i_q + \omega_r(\psi_d i_q - \psi_q i_d) \right] \quad (3)$$

将式(1)和式(2)代入式(3)得出电机的电磁推力输出功率为

$$P_z = F_z v_s = \frac{3}{2} \frac{\pi v_s}{\tau} (\psi_d i_q - \psi_q i_d) \quad (4)$$

故得出 TMFFSEEMSLM 在 d - q 坐标轴下的电磁推力方程:

$$F_z = \frac{3\pi}{2\tau} [i_d i_q (L_d - L_q) + i_q i_t L_{md}] \quad (5)$$

本文在推导 TMFFSEEMSLM 的悬浮力方程时采用虚位移法。假设在电磁力 F 的作用下,电机初级在悬浮方向产生一个位移 $d\delta$,则电磁力做功 $F \cdot d\delta$,这样会产生一个能量增量 dW ,根据能量守恒定律可知 $dW = F \cdot d\delta$,从而得出 TMFFSEEMSLM 的悬浮力方程为

$$F_y = \frac{\partial W}{\partial \delta} = \frac{3}{2} \left(\frac{\partial \psi_d}{\partial \delta} i_d + \frac{\partial \psi_q}{\partial \delta} i_q \right) \quad (6)$$

式中: $\frac{\partial \psi_d}{\partial \delta}$ 、 $\frac{\partial \psi_q}{\partial \delta}$ 分别为 d 轴和 q 轴的磁链对电机气隙长度的变化率; W 为电机悬浮方向做的功。

将式(2)代入式(6),得到电机在 d - q 坐标轴下的悬浮力方程:

$$F_y = \frac{3}{2} \left[i_d^2 \frac{\partial L_d}{\partial \delta} + i_d i_t \frac{\partial L_{md}}{\partial \delta} + i_q^2 \frac{\partial L_q}{\partial \delta} \right] \quad (7)$$

同理可由虚位移法得出 TMFFSEEMSLM 的

导向力方程:

$$F_x = \frac{3}{2} \left[i_d^2 \frac{\partial L_d}{\partial l} + i_d i_t \frac{\partial L_{md}}{\partial l} + i_q^2 \frac{\partial L_q}{\partial l} \right] \quad (8)$$

式中: l 为电机的横向偏移距离。

结合牛顿运动定律,得出 TMFFSEEMSLM 的运动方程为

$$\begin{cases} M \frac{d^2 s}{dt^2} = F_z - F_L \\ M \frac{d^2 \delta}{dt^2} = F_y - M \end{cases} \quad (9)$$

式中: M 为电机动子部分的总质量; s 为动子运动距离; F_L 为电机运行的阻力,主要为空气阻力; δ 为电机气隙长度,即悬浮高度。

3 TMFFSEEMSLM 三维有限元分析

单相结构的电机定位力较大,影响电机效率。三相结构由于各相间相互独立且各相相差 120° ,适合于持续直线运动,故电机设计为三相六极结构。且通过不同极距比仿真试验对比,当电机动子定子极距比接近 $5/2$ 时,定位力最小,空载反电动势最大。电机额定速度设为 1.6 m/s ,该速度可随电机尺寸变大而按比例变大。表 1 为 TMFFSEEMSLM 三维模型的基本参数表。根据表内尺寸在 ANSYS 软件中建立 Maxwell 仿真模型。

表 1 TMFFSEEMSLM 基本参数表

参数名称	参数值
相数	3
动子铁心横向长度/mm	336
动子铁心纵向宽度/mm	48
动子铁心高度/mm	80
动子极距/mm	100
动子齿高/mm	24
定子铁心横向长度/mm	240
定子铁心纵向宽度/mm	30
定子铁心高度/mm	60
定子齿高/mm	32
定子极距/mm	40
额定速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	1.6
励磁绕组匝数	270
电枢绕组匝数	240
气隙/mm	3

利用 ANSYS 软件分析时,在电机模型外增加一个空气区域,减少与外界空气接触产生的漏磁情况^[13]。同时,为提高计算准确性和快速性,对电机初级运动部分的剖分较密,对次级的剖分则相对较疏。

3.1 磁场分布

图 6 为 TMFFSEEMSLM 的局部空载磁密矢量分布图,可以看出电机形成了完整的磁通回路,且动子齿和定子齿重合面积越大,矢量线越密集。

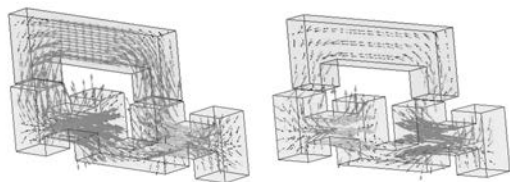


图 6 局部磁密矢量分布图

图 7 为 TMFFSEEMSLM 的空载磁密云图,从图 7 中可以得到各部分的磁密值,可见当电机运行位置到定子齿与动子铁心中心线重合位置时,进入定子铁心的磁通达到了最大值,定子轭补磁密达到 1.5 T 左右,此时在励磁绕组中通入电流较大,故在励磁绕组缠绕的铁心处,磁力线较密集,此处磁密达到最大值 2.1 T。当电机动子运行到 2 个定子模块中间位置时,磁通几乎不通过定子铁心,磁通接近于 0 T。电机的磁场各部分磁密分布合理。

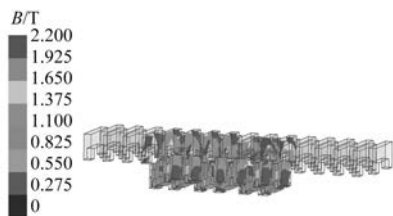


图 7 空载磁密云图

图 8 为 TMFFSEEMSLM 的三维空载气隙磁密波形图,可以看出电机的空载气隙磁密最大值约为 1.0 T,波形不是理想的正弦波,这是因为初级动子和次级定子的结构均是凸极,凸级结构的电机有齿槽,齿槽间会产生齿槽效应影响谐波分量^[15],使理想情况下的正弦波形发生畸变。

3.2 磁链与反电动势

当 TMFFSEEMSLM 以 1.6 m/s 的速度空载运

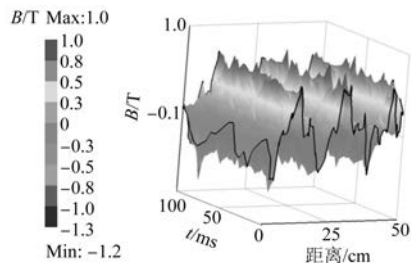


图 8 三维空载气隙磁密波形图

行时,电枢绕组中的磁链主要由励磁绕组产生的磁通形成。图 9(a)给出了在一个周期内的空载磁链波形,随动子位置的改变,其电枢绕组的磁链也随之改变,且呈正弦规律变化,峰值约为 0.21 Wb。

当 TMFFSEEMSLM 的电枢绕组中通入额定值为 8 A,周期为 50 Hz 的交流电时,电机进入负载运行状态。图 9(b)为电机的负载磁链波形,峰值约为 0.75 Wb。

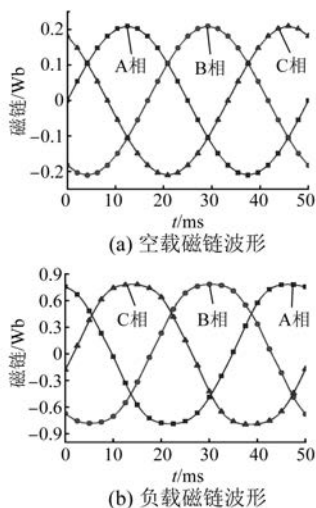


图 9 空载与负载磁链波形

图 10 为 TMFFSEEMSLM 在空载状态以及负载状态的三相反电动势波形,整体接近正弦波。其空载反电动势幅值约为 30 V,负载状态反电动势幅值得到明显提升,约为 125 V。空载状态和负载状态的反电动势波形含有一定比例的谐波。这是由于定子齿部难免存在边缘效应,造成磁场发生一定程度的畸变,但波形整体对称性还在。

3.3 电磁力

图 11 为 TMFFSEEMSLM 在电枢电流恒定为 6 A 时,励磁电流分别 2、4、6、8、10 A 下的悬浮力变化曲线,悬浮力的大小依次约为 690、1 720、

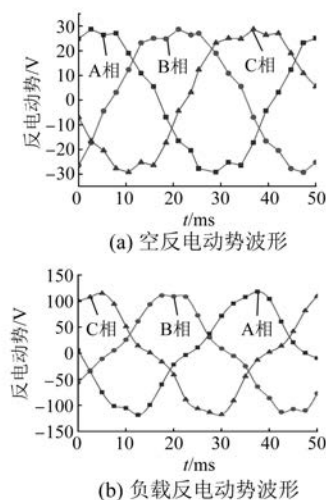


图10 空载和负载反电动势波形

2 680、3 810、4 750 N。可以看出在电枢电流恒定时,悬浮力的大小随着励磁电流的增加而变大,且变化幅度较大。

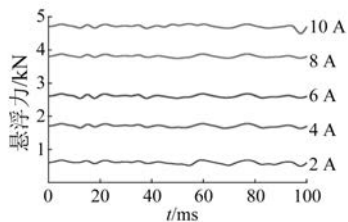


图11 电枢电流恒定为6 A时悬浮力随励磁电流变化曲线

图12为TMFFSEEMSLM在励磁电流恒定为8 A时,电枢电流分别2、4、6、8、10 A下的悬浮力变化曲线,悬浮力的大小依次约为3 250、3 440、3 630、3 810、3 990 N。可以看出,在励磁电流恒定时,悬浮力的大小随着电枢电流的增加而变大,变化幅度较小。

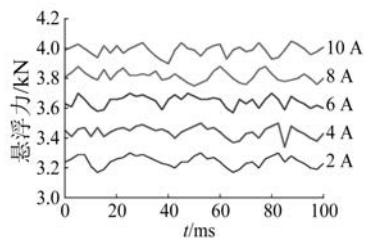


图12 励磁电流恒定为8 A时悬浮力随电枢电流变化曲线

图13为TMFFSEEMSLM在励磁电流恒定为8 A时,电枢电流分别2、4、6、8、10 A下的牵引力

变化曲线,牵引力的大小依次约为28、66、108、150、192 N。可以看出在励磁电流恒定时,牵引力的大小随着电枢电流的增加而变大,且变化幅度较大。

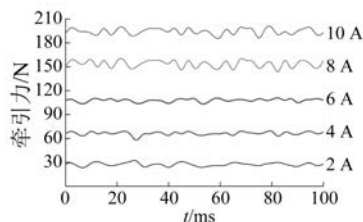


图13 励磁电流恒定为8 A时牵引力随电枢电流的变化曲线

图14为TMFFSEEMSLM在电枢电流恒定为6 A时,励磁电流分别2、4、6、8、10 A下的牵引力变化曲线,牵引力的大小依次约为88、95、102、108、116 N。可以看出在电枢电流恒定时,牵引力的大小随着励磁电流的增加而变大,但变化幅度较小。

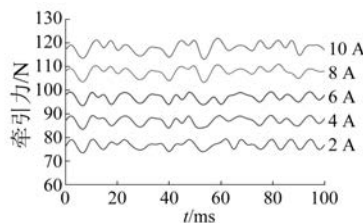


图14 电枢电流恒定为6 A时牵引力随励磁电流的变化曲线

为了验证TMFFSEEMSLM的导向性能,图15给出在偏移距离分别为-6、-3、0、+3、+6 mm下TMFFSEEMSLM的导向力变化,其大小依次约为72、36、-2、-42、-82 N,说明该电机在发生偏移时,会产生1个反方向的拉力使其回到正轨,且偏移距离越大,产生的导向力也越大,证明了该电机具有良好的导向性能。当偏移距离为0 mm时,由于电机本身结构上单个动子比单个定子多2个齿,当磁通通过对应的齿形成完整的回路时,再非

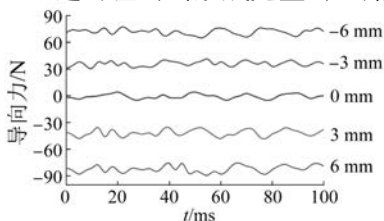


图15 导向力随偏移距离变化曲线

对应的齿上会产生部分漏磁,会出现 1 个微小的导向力。在运行到下一个相邻定子时,可抵消此效果,由于力极小,不影响电机正常运行。

4 结 语

(1) 研究了 TMFFSEEMSLM 的结构及其运行原理,建立了其在 $d-q$ 坐标系中的数学模型。推导了 TMFFSEEMSLM 的电压、磁链方程以及悬浮力、电磁推力和导向力的解析表达式。

(2) 根据 TMFFSEEMSLM 的基本结构尺寸,建立了 TMFFSEEMSLM 的 3D 模型,通过有限元方法计算了电机的相关电磁参数,分析了在不同电枢电流,不同励磁电流的情况下 TMFFSEEMSLM 的牵引力、悬浮力的变化,以及在不同偏移距离下的导向力的变化。得出结论: TMFFSEEMSLM 的电磁推力主要与电枢电流的大小有关,悬浮力大小主要与励磁电流有关,导向力主要受电机横向偏移距离的影响。证明了该电机可以实现牵引、悬浮与导向的一体化。

(3) TMFFSEEMSLM 的定子为 U 形磁极,转子为双 H 形并通过横梁连接,采用模块化结构,降低了电机的制造难度。电枢绕组和励磁绕组均位于电机短初级上,次级仅由导磁铁心构成,极大地降低了远距离轨道交通的制造成本,电励磁实现可调节的气隙磁场,磁悬浮使电机的初级和次级实现了无摩擦运动,绿色环保,适用于远距离轨道交通场所。

【参 考 文 献】

- [1] 吕刚. 直线电机在轨道交通中的应用与关键技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(17): 5665.
- [2] 王会永, 周保华, 李向男, 等. 直线电机的应用现状及发展趋势研究[J]. 微电机, 2016, 49(9): 86.
- [3] BOLDEA I. Linear electric machines, drives, and maglevs handbook [M]. Boca Raton: CRC Press, 2013.
- [4] 卢琴芬, 沈燚明, 叶云岳, 等. 永磁直线电动机结构及研究发展综述[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(9): 2575.
- [5] 赵玫, 左思承, 魏尧, 等. 横向磁通永磁直线电机结构及其关键问题综述[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(22): 7806.
- [6] 贾周, 杨卫平, 贺伟, 等. 背靠背 Ω 定子横向磁通永磁直线电机[J/OL]. 中国电机工程学报, 2021. doi:10.13334/j.0258-8013.pcsee.211226.
- [7] 颜建虎, 林鹤云, 冯奕. 磁通切换型横向磁通永磁风力发电机[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(21): 67.
- [8] LIU C, WANG S, WANG Y, et al. Development of a new flux switching transverse flux machine with the ability of linear motion [J]. CES Transactions on Electrical Machines and Systems, 2018, 2(4): 384.
- [9] 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.
- [10] 王志涛. 高温超导横向磁通磁悬浮直线电机仿真与实验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- [11] MIZUNO K, SUGINO M, TANAKA M, et al. Experimental production of a real-scale REBCO magnet aimed at its application to maglev [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2017, 27(4): 16606885.
- [12] 刘春芳, 胡雨薇. 磁悬浮平台电磁悬浮系统的模糊滑模控制[J]. 沈阳工业大学学报, 2015, 37(6): 607.
- [13] 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.
- [14] 陈永波, 燕延, 王伟明, 等. 磁悬浮直线电机三维有限元分析及优化设计研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2017(1): 31.
- [15] 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.