

文章编号 1004-924X(2004)05-0525-06

新型圆筒直线电机推力的解析与数值方法研究

孔凡让,赵吉文,刘维来,张平,何清波

(中国科学技术大学 精密机械与精密仪器系,安徽 合肥 230027)

摘要:提出了一种新型圆筒直线电机结构。建立了适合其结构特征的轴对称涡流解析方程,给出了方程的解析解。并采用变分方法建立了该轴对称场的有限元模型。数值分析结果表明:两种方法的计算结果一致,验证了解析模型的正确性和可行性。基于分析结果,经选取合适的电机参数,制作了样机,并测试了该电机启动推力变化情况。实验结果和计算结果相符,表明解析模型满足了新型圆筒直线电机的计算要求,同时也验证该方法的可靠性。结果还表明该电机满足了动感雕塑隐蔽驱动的要求。进一步还研究了电机气隙大小、次级厚度等主要结构参数对电机推力等性能的影响,结果显示:气隙增大,推力减小;次级厚度为10 mm时,推力为198.51 N,达到最大。

关键词:动感雕塑;直线电机;电磁场;解析法;有限元法

中图分类号:O241 文献标识码:A

Push force analysis of a cylinder linear motor

KONG Fan-rang, ZHAO Ji-wen, LIU Wei-lai, ZHANG Ping, HE Qing-bo

(*Department of Precision Machinery and Instrumentation,
Univ. of Science and Technology of China, Hefei 230027, China*)

Abstract: The structure of a cylinder linear motor is presented. And the axial symmetric vortex analytical equation, which fits for its structure characters, is established and the solution is given. This axial symmetric FEM model is set up with the variation theory. Simulation results reveal that these two methods are consistent, and the analytical model is effective and efficient. Moreover, based on the analysis, a cylinder linear motor model was manufactured with appropriate structure parameters, and the change of the start pushing force measured. The test results and the calculations have the same tendency and approximate value. It proves that the analytical model meets the calculation of the cylinder linear motor. Therefore, it verifies the reliability of this method. Furthermore, the above research reveals that the cylinder linear motor meets the demand of driving the mobile sculpture shadily. The main structure parameters, such as the air gap, the thickness of the secondary end and those may affect the performances of the linear motor were also investigated. It is found that when the air gap increases, the pushing force decreases. When the thickness of the secondary is 10 mm, the pushing force reaches its maximal value of 198.5 N.

Key words: mobile sculpture; linear motor; electromagnetic field; analysis; FEM

收稿日期:2004-07-08;修订日期:2004-08-19.

基金项目:全国高校博士点基金项目(No. 20020358063)

1 引言

动感雕塑是一个全新的研究领域,其概念是作者从“艺术科学化,科学艺术化”的角度首次系统提出的。它是现代雕塑艺术理论和现代科学技术的最新研究动向相结合的产物。动感雕塑的隐蔽驱动问题是其中的一个重要研究内容。

直线驱动技术是近年来发展起来的一种新型驱动方式,它是一种将电能直接转化为直线运动或弧线运动的新型驱动技术,可以实现大位移、大功率的无摩擦驱动及微位移高频驱动等^[1-2]。同时具有启动推力大、传动刚度高,动态响应快,定位精度高,行程不受限制^[3],以及无须中间机构传递运动等优点,使其成为动感雕塑驱动部件的首选驱动技术。

本文以动感雕塑中的一种新型圆筒直线电机为研究对象,对该型电机进行电磁学分析,建立适合这种直线电机的数学模型,给出其磁场的解析解^[4-5],进而研究稳态时该种直线电机推力情况。而后基于变分法建立电机轴对称涡流场的有限元模型^[6],用数值方法进行验证,两种方法获得的结果的一致性,说明了所建立的解析模型是正确的。进一步制作样机并测试电机推力,试验结果表明:本文研究的分析计算方法一种有效的研究该种类型直线电机的方法,为研究该电机其他性能提供了很好的理论指导和铺垫。

2 新型圆筒直线电机结构分析

圆筒型直线电机是直线电机的基本结构之一,常见的圆筒型直线电机结构如图 1,电机的初级套在次级的外部,可以做动圈式,也可以做成定圈式。在采用动圈式的结构时,初级的能量供给有 2 种:电缆直接连接初级和采用电刷,这使得电机的驱动行程和结构受到了一定的限制。动感雕塑要求隐蔽驱动,初级或次级的行程较大,传统圆筒直线电机能量供给方式显然不能满足要求。因此,论文提出了一种新型的圆筒型直线电机结构,如图 2。该圆筒直线电机的初级套在次级的里面,利用初级的外围磁场驱动次级,电机采用定圈式,因此运动部件不用拖着电缆,驱动行程不受限制,初级和次级的结构更简洁,非常适合动感雕

塑的隐蔽驱动的要求。对这种电机开展研究,从机理上分析该新型电机的性能,是很有理论价值和实际意义的。

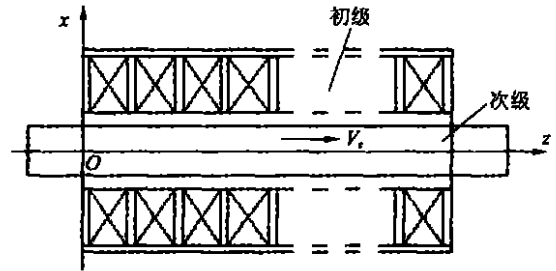


图 1 传统圆筒型直线电机结构

Fig. 1 Construction of the traditional cylinder linear motor

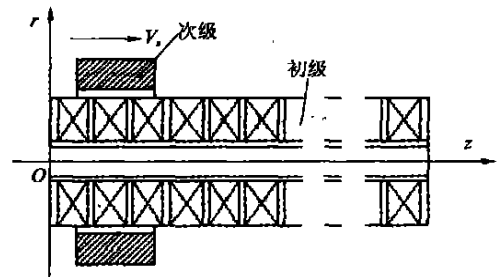


图 2 新型圆筒型直线电机结构

Fig. 2 Construction of the new cylinder linear motor

3 数学模型和解析解

电磁场问题的一般求解方法有解析法和数值法^[7-8]。解析法是通过经典数学方法建立描述电磁场特征的偏微分或积分方程,然后用经典的分离变量法等方法直接求解^[9]。数值解可以在一定范围内用来验证解析模型的结论。

3.1 数学模型

圆筒型直线电机是通过初级线圈产生的行波磁场来推动处于该气隙磁场中的次级导体产生相对运动的。圆筒型直线电机是一种典型的轴对称结构,其特点是在任何一个对称轴的平面上,磁场都是相同的。采用圆柱坐标系(如图 3),对称轴为 z 轴,则得到一个与 θ 坐标无关的 $z-r$ 平面场,据此建立数学模型。

首先对模型作一下假设:各层介质的物理参数是匀质的,各向同性的,线性的;铁磁材料没有

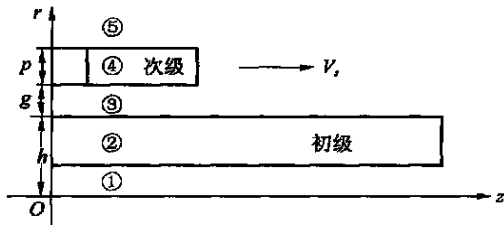


图 3 新型圆筒型直线电机模型
Fig.3 Analysis model of the new cylinder Linear motor

饱和;时间量和空间量按正弦规律变化等^[3]。

用 Maxwell 方程(1)和运动介质欧姆定律(2)描述这种电机的主要电磁方程如下^[9-10]:

$$\begin{cases} \nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \\ \nabla \times B = 0 \\ \nabla \times E = - \frac{\partial B}{\partial t} \end{cases}, \quad (1)$$

$$J = (E + V_z \times B). \quad (2)$$

式中, $B = \mu H, D = E$;

B ——磁通密度; H ——磁场强度;

J ——电流密度; E ——电场强度;

D ——电通密度; μ ——磁导率;

——电导率; V_z ——次级速度。

引入矢量磁位 A 及其约束条件,

$$\begin{cases} \nabla \times A = B \\ \nabla \times A = 0 \end{cases}, \quad (3)$$

将式(3)代入式(1)、(2)可得:

$$\nabla^2 A = \mu \left(\frac{\partial A}{\partial t} - V_z \times \nabla \times A \right), \quad (4)$$

直线电机的次级速度 V_z 、转差率 s 及同步速度 V_s 的关系如式(5)

$$V_z = (1 - s) V_s, \quad (5)$$

直线电机初级在气隙中的行波磁场为,

$$B_r = B_m e^{j(\omega t - z)}, \quad (6)$$

式中 B_m ——磁通密度幅值; $\omega = 2\pi f, \lambda = 2\pi / k, f$ 为频率, λ 为波长(即两倍的极距)。

将式(5)及(6)代入式(4),结合轴对称问题的特征,得出复数形式轴对称涡流方程,

$$\frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial (rA)}{\partial r} \right] + \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} + k^2 A = 0, \quad (7)$$

式中 A ——沿圆周方向的矢量磁位;

$$k^2 = j s V_s \mu$$

根据分离变量法^[9],解得:

$$A = C_1 \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^m (ar/2)^{2m+1}}{m!(m+2)!} \times (C_2 \cos hbz + C_3 \sin hbz), \quad (8)$$

式中 a, b 为分离常数,且满足 $a^2 = k^2 + b^2, C_1, C_2, C_3$ 为待定系数, $m = (1, 2, \dots)$ 。

引入边界条件:

$$r = h \text{ 时}, B_r = B_m e^{j(\omega t - z)}$$

$$r = h + g \text{ 时}, B_{r3} = B_{r4} \text{ 和 } H_{r3} = H_{r4}$$

$$r \rightarrow \infty \text{ 时}, A_5 = 0$$

确定 C_1, C_2, C_3 的取值,可以得到 A 和 B_r 的解析表达式。

3.2 推力计算

启动推力的大小及其变化是圆筒型直线电机最重要的性能指标之一。基于上述数学模型,进一步研究直线电机的启动推力。由洛仑兹力方程^[2],

$$F = J \times B, \quad (9)$$

计算出单位波长上轴对称面上的力密度 F 。由于力只能在次级导体区域产生,故以模型中区域 4 为研究对象,其推力矢量为,

$$F_4 = (E_4 \times B_4 + V_z \times B_4 \times B_4), \quad (10)$$

圆筒型直线电机径向合力为 0,故启动推力为轴向合力,轴向力密度为,

$$F_{z4} = (E_4 B_{r4} + V_z B_{r4} B_{r4}), \quad (11)$$

由于 $E_4 = \partial(rA_4) / \partial t = -j r A_4$,

$B_4 = \partial(rA_4) / \partial z = j r A_4$,所以力密度标量为,

$$F_{z4} = [(\omega^2 r^2 s V_s) \text{Re}(A_4 A_4^*)] / 2, \quad (12)$$

式中,星号表示共轭复数。

将力密度沿圆周方向积分,即得到直线电机推力的数值解,

$$F_z = \int_0^{h+g+p} \frac{(\omega^2 s V_s)^2}{2} r^2 \text{Re}(A_4 A_4^*) dr, \quad (13)$$

在次级运动方向上取不同 z 值,即可得出不同位置上的推力值。

4 有限元法验证

4.1 建立有限元模型

本文采用有限元法对所研究电机模型进行验证性计算。将直线电机数学模型涡流场的边值问题转化为等价的条件变分问题^[11-12],用单元剖分方法和单元节点线性插值方法,对整个求解场域

进行变分问题的离散化,导出涡流场的有限元方程。方程的整体矩阵为稀疏矩阵,可以简化或加快求解过程。将各单元的结果综合起来,便可以得到用整体矩阵表达的整个区域的解^[13]。有限元方程的求解方法很多,对于轴对称涡流场问题,本文采用 frontal 法求解。近似解出矢量磁位 A 后,根据矢量磁位和磁场强度的关系,得出该种类型直线电机的磁场分布。进一步得出电机次级所受的时间平均 Maxwell 力和平均虚功力。

考虑直线电机的边端效应,将电机两端的空气以及次级周围的空气也作为模型的一部分来研究^[14-15]。为了和解析解相对应,取次级在初级线圈磁场中的不同位置分别建模计算。初级线圈为 6 极,次级为铝环,输入三相交流电,采用星形接法。模型采用轴对称方式建立,左侧 Y 轴为对称轴。取其中一个有限元模型示意如图 4。图中 (a) 为电机几何模型, (b) 为有限元网格模型。

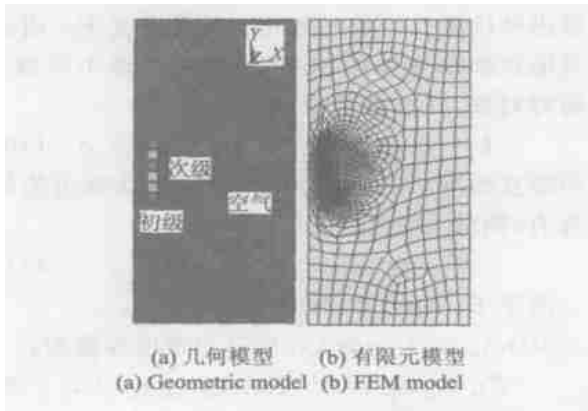


图 4 圆筒型直线电机有限元模型

Fig. 4 Geometric and FEM model of cylinder Linear motor

4.2 结果分析

采用解析法和轴对称有限元法分别对新型圆筒型直线电机模型进行分析与计算,得到在不同次级位置 (h) 时的推力 F 的解析值和数值解 (Maxwell 力及虚功力) 如图 5。从图中数据的变化趋势可以看出:解析法和有限元法计算结果基本吻合,说明采用本文建立的数学模型研究这种新型圆筒型直线电机是准确可行的。由于解析法能过显式表达计算结果,可以清楚地从显式中观察到各个参数对所描述问题贡献,从而可以深入研究模型的内在机理。数值方法采用插值拟合的方法获得最终解,适合用于研究模型的空间量的

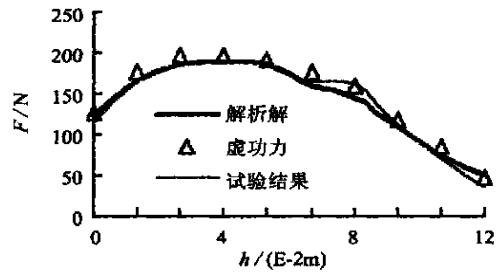


图 5 次级在不同位置的推力

Fig. 5 Relationship between pushing force and site of secondary

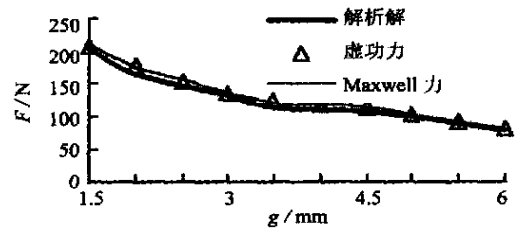


图 6 气隙与推力的关系

Fig. 6 Relationship between pushing force and width of air space

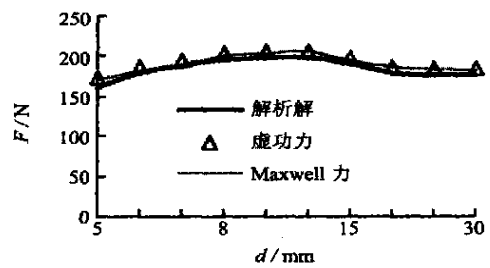


图 7 次级厚度与推力的关系

Fig. 7 Relationship between Pushing force and thickness of secondary

分布规律,对工程中的电磁计算问题具有较强的适应性。随着计算机性能的提高,数值方法得到了更广泛的应用。两种方法都适用于研究本文所提出的新型圆筒型直线电机。

4.3 试验验证

为了进一步验证计算方法的正确性,制作了该种类型电机样机,如图 8,电机初级内置于不锈钢导轨内部,次级采用铝质圆筒结构,电机接入 380 V 交流电,采用星型接法。并测定了电机启动过程中推力的变化情况,如图 5,排除电机三相

不平衡,摩擦等因素的影响,图中启动推力的变化趋势和理论计算结果基本吻合,证明了文中所研究计算方法的可靠性。



图8 新型圆筒直线电机样机
Fig. 8 Model of the novel cylinder linear motor

4.4 电机参数对性能的影响分析

动感雕塑的驱动部件结构变化多样,找到一种快速计算驱动部件输出性能的方法将大大缩短驱动部件的设计与研制周期。本文进行方法研究的目的是用于新型圆筒型直线电机的输入输出性能计算。电机结构参数的变化对电机性能有很大的影响,寻找好的结构参数是研究该电机结构的主要出发点。改变电机的气隙 g 大小,分别用上述研究的解析法和有限元法计算电机的推力,其变化关系比较如图6,随着气隙的不断增大,电机的推力大幅度减小。

改变电机次级的厚度,分别计算电机的推力 F 如图7,次级厚度 d 的增加时,有助于感生电流的形成,推力增加,但厚度增加到一定程度时,次

级边远处的感生电流对推力的贡献很微弱,使得推力有所下降,进而保持在稳定值,之后再增加次级厚度并不能使电机推力增大,反而会增加电机负载。图中数据显示,在厚度为10 mm时,推力最大值为198.51 N。

另外,直线电机的线圈匝数,线圈的体积,次级的高度等,都是影响电机推力的主要因素,为了获得较好的电机性能,采用上述计算方法,并综合考虑各因素对性能的贡献,选取一组较为适合的电机参数。图8中样机的参数就是基于理论计算结果选取的。应用结果表明:本文研究的方法能够较好得满足新型圆筒型直线电机性能的计算,为该种电机的设计与研制提供可靠的数据参考。

5 结 论

本文从动感雕塑隐蔽驱动的特殊要求出发,提出了一种新型结构的圆筒型直线电机,通过对该电机结构分析,基于麦克斯韦理论建立了适合其结构特征的复数形式轴对称涡流方程,采用解析法给出了方程的解析解,并进一步得出了电机的推力;采用变分方法,建立了该轴对称涡流场的有限元方程,通过仿真计算,验证解析模型的正确性。基于该计算方法,选取适合的结构参数制作了样机,并测试电机启动推力的变化,进一步验证了理论计算方法的可靠性。基于该理论计算手段,分析了电机主要结构参数对性能的影响,为该种类型直线电机结构优化计算提供了重要理论依据和计算方法。

参考文献:

- [1] 孙宝玉,梁淑卿,宋文荣,等. 直线驱动磁悬浮进给机构的研究[J]. 光学精密工程, 2003, 11(4): 338-342.
SUN B Y, LIANG SH Q, SONG W R, et al. Linear drive technology and its application to a magnetic levitation stage in the microelectronic field[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, 11(4): 338-342. (in Chinese)
- [2] BUDIG P K. The application of linear motors, power electronics and motion control conference [C]. *Proceedings. PIEMC 2000. The Third International*, 2000: 1336-1341.
- [3] 叶云岳. 直线电机原理与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
YE Y Y. *Application and theory of linear motor* [M]. Beijing, Publishing Company of Machinery Industry, 2000. (in Chinese)
- [4] YOSHIDA K, MATSUMOTO H. Electromagnetic force analysis of HTS bulk in DC-magnetic fields due to electromagnet [C]. *Physica C Volume*, 2002: 848-852.
- [5] BUCCI G. Experimental comparison between direct and indirect measurement techniques for the characterization of linear induction motors [J]. *Measurement*, 1997, 21(2): 47-56.

- [6] CLARK R E, JEWELL G W, HOWE D. Finite element analysis of short-stroke linear motors and actuators, Current Trends in the use of finite elements (FE) in electromechanical design and analysis[J]. *IEEE Seminar*, 2000, (14):1-8.
- [7] IDIR K, DAWSON G E, EASTHAM A R. Modeling and performance of linear induction motor with saturable primary [J]. *Industry applications IEEE Transactions on*, 1993, 29(6):1123-1128.
- [8] 王秉中. 计算电磁学[M]. 北京:科学出版社, 2002.
WANG B ZH. *Calculation electromagnetic*[M]. Beijing:Publishing Company of Science, 2002. (in Chinese)
- [9] EDMINISTER J. A: *Schaum's outlines theory and problems of electromagnetics*[M]. Second Edition, 1995.
- [10] ONUKI T, KAMIYA Y, FUKAYA K, et al. Characteristics analysis of linear induction motor with two types of secondary structure based on electromagnetic field and electric circuit analysis[J]. *Magnetics, IEEE Transactions on*, 1999, 35(5):4022-4024.
- [11] AHN S CH, HO LEE J, HYUN D S. Dynamic characteristic analysis of LIM using coupled FEM and control algorithm [J]. *Magnetics, IEEE Transactions on*, 2000, 36(4):1876-1880.
- [12] 张榴晨. 有限元法在电磁计算中的应用[M]. 北京:中国铁道出版社, 1996.
ZHANG L CH. *Application of FEM in electromagnetic calculation*[M]. Beijing: Publishing Company of Railway, 1996. (in Chinese)
- [13] 盛剑霓. 工程电磁场数值分析[M]. 西安:西安交通大学出版社, 1991.
SHENG J N. *Numeric analysis of engineering electromagnetic field*[M]. Xian:Publishing Company of Xian traffic University, 1991. (in Chinese)
- [14] ADAMIAK K. Application of impedance boundary conditions in finite element[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1991, 27(6):5193-5195.
- [15] LEE J H, SUNG CH A, DONG S H. Dynamic characteristic analysis of vector controlled LIM by finite element method and experiment, Industry applications conference[C]. *Thirty-Third IAS Annual Meeting*, 1998:799-806.

作者简介:孔凡让(1951-),男,安徽人,中国科学技术大学精密机械与精密仪器系,教授,博士生导师,主要研究方向为测控技术,创新工程,故障诊断,动感雕塑等;
赵吉文(1973-),男,安徽人,中国科学技术大学精密机械与精密仪器系,博士研究生,主要研究方向为智能信息处理,动感雕塑关键技术与设计理论研究。