

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2013.05.006

# 新型永磁同步直线电机的有限元分析和实验研究

吴红伟, 杨家军\*, 程远雄

(华中科技大学 机械科学与工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 针对永磁同步直线电机推力波动大的问题,分析了推力波动产生的原因,通过Fourier级数展开对推力波动的频率成分进行了分析,提出了一种削弱推力波动的移相叠加方法。在此基础上以两个动子移相叠加,消除了推力波动中的奇数阶频率成分,创新出一种带铁芯的U型永磁同步直线电机,并探讨了这种新型的直线电机在机床上的具体应用,进行了单个动子和两个动子移相叠加的对比实验。有限元仿真结果表明,移相叠加的方法具有大幅减小推力波动的功能,并且消除了定子和动子之间的磁吸力。实验结果表明,移相叠加的方法能将静磁阻力波动降低到电机有效推力的2%。该基于移相叠加的、带铁芯的U型永磁同步直线电机可在重载机床和高速运输等场合得到应用。

**关键词:** 永磁同步直线电机; 推力波动; 静磁阻力; 移相叠加; 有限元分析

**中图分类号:** TM359.4; TH122; O242.21

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-4551(2013)05-0541-04

## Analysis and experimental research of a new type of permanent magnet linear synchronous motor

WU Hong-wei, YANG Jia-jun, CHEN Yuan-xiong

(School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of large thrust fluctuation of permanent magnet linear synchronous motor, the reasons of thrust fluctuation were analyzed, the frequency components of thrust fluctuation were analyzed by Fourier series, a method of phase shift superposition was put forward. Based on the method, two movers were arranged by phase shift superposition, and odd number frequency components of the thrust fluctuation were eliminated, then a kind of U-shaped iron-cored permanent magnet linear synchronous motor was put forward innovatively, and its application on machine tool was discussed. The comparative experiments of phase shift superposition with one and two movers were done. The finite element simulation verifies that phase shift superposition can largely reduce the thrust fluctuation and eliminate the magnetic attractive force between the stator and mover. Comparative experiments indicate that the thrust fluctuation is reduced to 2% of the effective thrust force. The U-shaped iron-cored permanent magnet linear synchronous motor based on phase shift superposition can be used on heavy-load machine tool and transportation.

**Key words:** permanent magnet linear synchronous motor; thrust ripple; magnetic resistance; phase shift superposition; finite element analysis

## 0 引 言

自上世纪90年代以来,随着机电产品向高速、高精密、重载、智能化等方向迅速发展,其对驱动系统也提出了更高的要求。而传统的驱动方式(如旋转电机加滚珠丝杠)在速度、加速度、精度等方面已接近极限,不能很好地满足现代制造业的发展需求。作为一

种新的驱动技术,直线电机越来越受到人们的重视。

直线电机是一种直接输出直线运动,不需要任何中间转换机构的动力装置。直线电机无传动间隙,不存在机械摩擦,可以达到比传统驱动方式更高的速度、加速度和传动精度<sup>[1]</sup>。

直线电机可以看作是由普通旋转电机沿径向剖开,然后展开成平面形成。所以在原理上,每一种旋

收稿日期: 2012-12-28

作者简介: 吴红伟(1987-),男,重庆人,主要从事智能机械和计算机仿真方面的研究。E-mail: whwei@hust.edu.cn

通信联系人: 杨家军,男,教授,博士生导师。E-mail: yjjar@sina.com

转电机都有与之对应的直线电机。其中,永磁同步直线电机与其他形式的直线电机相比能输出更大的推力,适用于重载机床、高速运输等场合<sup>[2]</sup>。

但是永磁同步直线电机存在较大的推力波动。推力波动的存在,降低了电机的推力性能,增加了对电机控制的难度,是其未能获得广泛应用的一个重要原因。另外,由于定子永磁体对动子铁芯存在较大的磁吸力(一般为有效推力的10倍左右),这个磁吸力最终被直线导轨所承受。即使在电机空载的情况下,直线导轨也会承受较大的预压,恶化了直线导轨的工作条件,减小了其使用寿命。

本研究对永磁同步直线电机的推力波动进行详细的分析,提出一种削弱推力波动的移相叠加的方法,并运用有限元仿真和实验的方法对其进行验证。

## 1 削弱直线电机推力波动的移相叠加方法

对于永磁同步直线电机,由端部力和齿槽力形成的静磁阻力是其推力波动的主要组成部分,本研究着重讨论端部力与齿槽力。

端部力是由端部效应引起的推力波动。直线电机动子由于铁芯特殊的开放式结构形成两个端部。随着初级铁芯与次级永磁体相对位置的变化,两个端部受到的铁磁吸力产生周期变化且不平衡,并形成随铁芯位置变化而大幅波动的端部力。齿槽力是由齿槽效应产生的推力波动。初级铁芯必须开槽以容纳绕组线圈,导致每个槽的开口部位处的气隙磁场发生变化,也会产生周期性变化的铁磁吸力,引起静磁阻力波动<sup>[3]</sup>。静磁阻力与电机是否加载电流无关,是动子位置的函数,以磁极的极距 $\tau$ 为周期变化,是永磁同步直线电机推力波动的主要成分和影响因素<sup>[4]</sup>。

端部力是直线电机相对于旋转电机特有的现象,对于端部力有学者指出存在减小端部力的最佳铁芯长度的现象<sup>[5]</sup>。对于齿槽力,也存在减小齿槽力的最佳齿槽数和磁极数的组合<sup>[6-7]</sup>。这些方法对减小永磁同步直线电机的推力波动均有一定的效果。在此之外,本研究讨论一种移相叠加的思想。

旋转电机由于初级绕组沿周向循环对称,其结构和电气参数均是对称恒定的。直线电机存在推力波动的一个根本原因是由于铁芯开断形成了两个端部,造成了结构的不连续性。所以要从根本上解决直线电机推力波动的问题,必须重新构建具有循环对称特性的初级绕组。

动子移相叠加的原理如图1所示,假设有 $k$ 个相同结构和电气参数的动子沿定子按距离 $n\tau+\tau/k$ 均匀

排列,并用非导磁材料连接为刚性整体(其中, $\tau$ 为级距, $n$ 为保证动子间距大于0的正整数)。在这种情况下,可以看做是 $k$ 个动子以 $\tau/k$ 的相位差均匀分布在周长为 $\tau$ 的圆周上。

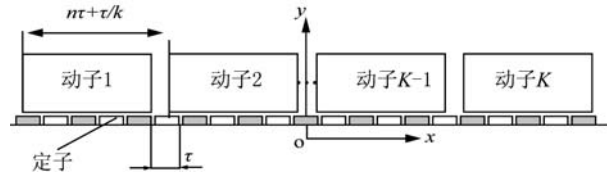


图1 动子移相叠加的原理

由于动子均匀排列,则第1,2,⋯, $k$ 个动子相对于第1个动子的相位差分别为:

$$0, \frac{\tau}{K}, \frac{2\tau}{K} \dots \frac{(K-2)\tau}{K}, \frac{(K-1)\tau}{K} \quad (1)$$

在永磁同步直线电机推力波动的各种成分中,端部力、齿槽力均是以级距 $\tau$ 为周期的函数。作用在第 $i$ 个动子上的推力波动函数的Fourier级数展开式为:

$$F_u^i(x) = \sum_{n=1}^{\infty} F_n \sin \frac{2n\pi}{\tau} \left( x + \frac{(i-1)\tau}{k} \right) \sin \delta_n \quad (2)$$

式中: $x$ —动子相对于定子的位移, $F_n$ —第 $n$ 阶频率的幅值, $\delta_n$ — $x$ 方向坐标原点的初相角。

$k$ 个动子的推力波动满足叠加原理,则:

$$F_{tr} = \sum_{i=1}^k \sum_{n=1}^{\infty} F_n \left[ \sin \frac{2n\pi}{\tau} \left( x + \frac{(i-1)\tau}{k} \right) \right] \sin \delta_n = \sum_{n=1}^{\infty} F_n \sin \delta_n \left[ \sin \frac{2n\pi}{\tau} x \sum_{i=1}^k \cos \frac{2(i-1)n\pi}{k} + \cos \frac{2n\pi}{\tau} x \sum_{i=1}^k \sin \frac{2(i-1)n\pi}{k} \right] \quad (3)$$

上式可进一步简化为总的推力波动:

$$F_{tr} = k \sum_{n=1}^{\infty} F_{nk} \sin \frac{2nk\pi}{\tau} x \sin \delta_{nk} \quad (4)$$

观察上式发现,在总的推力波动的表达式中只含有 $k$ 阶频率及 $k$ 的倍数频率成分,表明其余频率成分均被消除。由于在推力波动成分中,低阶频率具有较大的幅值,从而在静磁阻力中占有很大的比重。所以当 $k$ 足够大的时候,推力波动可以得到很大程度的削减。

在更特殊的情况下,取 $k=2$ ,即2个动子按 $n\tau+\tau/2$ 移相叠加,则推力波动中的第1,3,5⋯等奇数阶频率均被消去,只剩下偶数阶频率。由于第1阶频率的波动幅值最大,奇数阶频率波动占总波动的比重较大,也能在很大程度上减小推力波动。

U型永磁同步直线电机的结构形式如图2所示,本研究设计了一种移相叠加的方式:2个动子以“背靠背”方式按距离 $\tau/2$ 移相叠加,并用非导磁材料连接为刚性整体。此处采用两个动子对齐而定子移相 $\tau/2$ 的

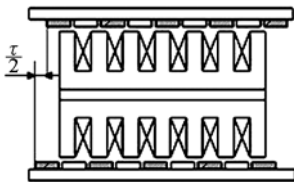


图2 U型永磁同步直线电机的结构形式

方式,即等效于动子移相 $\tau/2$ 。在这种情况下,两个动子并非排列在同一个定子之上,而是分别对应于上、下两个定子。这种组合方式形成一种新型的带铁芯的U型永磁同步直线电机。由移相叠加的原理可知,这种形式的直线电机具有大幅减小推力波动的能力,并且两个动子所受的磁吸力相互抵消,导轨不受到由磁吸力引起的预压。

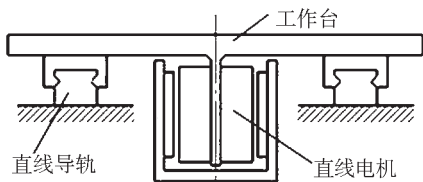


图3 U型永磁同步直线电机应用于工作台

U型永磁同步直线电机应用于工作台的示意图如图3所示,这种带铁芯的U型永磁同步直线电机可用于驱动机床工作台,代替滚珠丝杠,从而获得更高的速度、加速度和传动精度。同时,直线导轨不承受磁吸力引起的预压。在具体应用中,可将两个动子制造为一个整体,连同U型定子作为一台直线电机,从而简化了驱动系统的复杂程度,使机床整体性能得到提升。

## 2 推力波动的有限元仿真

目前用于有限元计算的软件有很多,其中ANSYS软件是集结构、流体、热、电磁场、耦合场分析于一体的大型通用有限元分析软件。本研究利用ANSYS软件对直线电机进行有限元仿真计算。

进行电磁场仿真的主要步骤为:首先建立好电磁场分析对象的物理模型,并划分有限单元,定义材料属性;其次对模型建立合适的电磁边界条件和电磁载荷;最后选用合适的求解器进行计算,得到仿真结果<sup>[8]</sup>。

本研究根据直线电机各部分实际尺寸和参数建立有限元模型,并划分有限单元<sup>[9-12]</sup>。通过ANSYS软件计算出动子移动距离为 $2\tau$ ( $\tau=16\text{ mm}$ )内的静磁阻力。静磁阻力波动仿真曲线如图4所示,从图4中可以明显看出,单个动子的静磁阻力波动以级距 $\tau$ 为周期,波动幅值为6 N。两个动子经过移相叠加后,静磁阻力波动被大幅削减,波动幅值降到不足2 N,比原来减小了67%。仿真结果表明,动子移相叠加的方法对减小永磁同步直线电机的推力波动具有良好的效果。

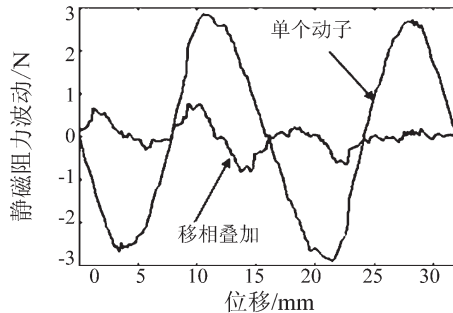


图4 静磁阻力波动仿真曲线

磁吸力仿真曲线如图5所示,对磁吸力的仿真结果表明,磁吸力也是以级距 $\tau$ 为周期而变化。单个动子的情况下存在较大的磁吸力,磁吸力的平均值为515 N。两个动子经移相叠加后,磁吸力被相互抵消,平均值降为零。

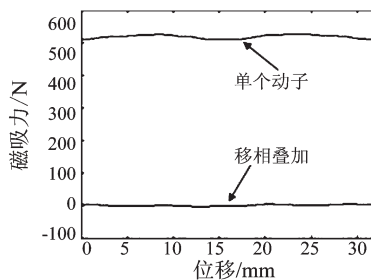


图5 磁吸力仿真曲线

## 3 实验

为观察永磁同步直线电机的推力波动现象,并通过比较实验结果与仿真结果,验证仿真结果的可靠性,本研究进行了以下实验。实验器材有永磁同步直线电机综合实验平台、拉力传感器、计算机和由郑州微纳公司提供的直线电机原型样机一套。

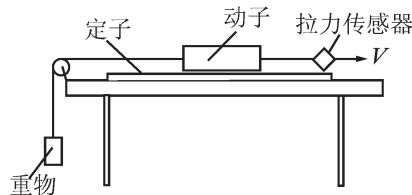


图6 实验原理图

实验原理如图6所示,本研究利用重物将待测直线电机动子张紧,以微纳公司原型样机为动力源,匀速拖动直线电机动子,利用拉力传感器记录拉力的变化,并将数据存入计算机中。在实验中,设定拖动速度为 $V=5\text{ mm/s}$ ,数据采集周期为 $T=200\text{ ms}$ 。最后将拉力传感器得到的拉力 $F$ 减去重物的重量 $G$ ,即为静磁阻力波动的大小。

根据实验原理,本研究一共进行了两组实验,分别为如图7所示的单个动子实验和如图8所示的两个动子移相叠加实验。在两个动子移相叠加实验中,移



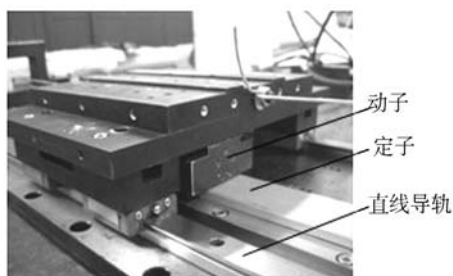


图7 单个动子实验

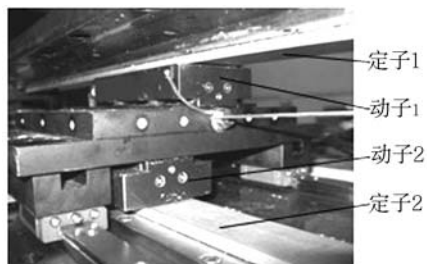


图8 两个动子移相叠加实验

相的距离为 $\tau/2$ (即 8 mm)。值得说明的是,实验中并未按照图4设计一个U型的直线电机定子,而是只从原理上对移相叠加的效果进行验证。

实验结果表明,永磁同步直线电机的静磁阻力波动在未通电的时候表现明显。在一个动子的情况下,用手推动动子时能明显感觉到随着动子的移动,阻力有较大的波动。而在两个动子移相叠加的情况下,用手推动时感觉到阻力明显变得平稳。这一点在实验数据中得到验证。静磁阻力波动曲线如图9所示,单个动子的静磁阻力波动幅值为 7 N,而两个动子经过移相叠加后静磁阻力波动仅为 2 N,波动幅值减小了 71.4%。实验中使用的动子有效推力为 50 N,两个动子共 100 N,故在实验中移相叠加的方法使静磁阻力波动降低到有效推力的 2%。

实验结果同时显示出单个动子的静磁阻力波动以级距 $\tau$ 为周期,这一点也验证了理论分析和仿真研究的正确性。对于磁吸力,由于动子与定子之间的间隙距离非常小(仅 1 mm),目前的实验条件还无法准确地对其进行测量。但上、下两个动子之间的磁吸力相互抵消是显而易见的。在实验中,由于导轨安装误差、动子移相误差等原因,导致实验结果与仿真结果

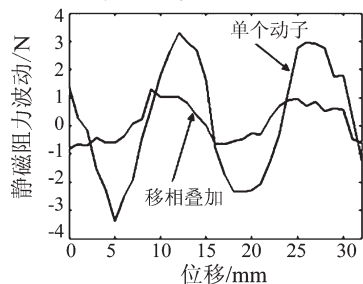


图9 静磁阻力波动曲线

相比静磁阻力波动幅值偏大,属于正常现象。

## 4 结束语

本研究在对永磁同步直线电机推力波动进行详细分析的基础上,提出了一种削弱推力波动的移相叠加方法。有限元仿真及实验结果表明,移相叠加是一种有效削弱永磁同步直线电机推力波动的方法。以两个动子“背靠背”方式移相叠加的原理形成的带铁芯的U型永磁同步直线电机具有以下优点:①能大幅减小永磁同步直线电机特有的静磁阻力波动现象,提高电机的推力性能;②动子受到的磁吸力相互抵消,消除了由磁吸力引起的对直线导轨的预压,改善了直线导轨的工作条件,提高了其工作寿命。

这种新型的U型永磁同步直线电机可在重载机床和高速运输场合作为直线电机应用的一种的具体形式。

## 参考文献(References):

- [1] 叶云岳. 直线电机原理与应用[M]. 北京:机械工业出版社,2000.
- [2] 郭庆鼎,王成元. 直线交流伺服系统的精密控制技术[M]. 北京:机械工业出版社,2000:41-52.
- [3] 全磊,范承志. 基于级弧系数组合的永磁直线电机齿槽力削弱方法[J]. 机电工程,2011,28(10):1209-1212.
- [4] 程远雄. 永磁同步直线电机推力波动的优化设计研究[D]. 武汉:华中科技大学机械科学与工程学院,2010.
- [5] ZHU Z O, XIA Z P, HOWE D, et al. Reduction of cogging force in slotless linear permanent magnet motors[J]. *IEEE Proceedings of Electric Power Applications*, 1997, 144(4): 277-282.
- [6] SCHLENSOK C, GRACIA M H, HAMEYER K. Combined numerical and analytical method for geometry optimization of a PM motor [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2006, 42(4): 1211-1214.
- [7] YOUN S W, LEE J J, YOON H S, et al. A new cogging-free permanent-magnet linear motor [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2008, 44(7): 1785-1790.
- [8] 朱诗威. 新型永磁同步直线电机的动态性能分析与研究[D]. 武汉:华中科技大学机械科学与工程学院,2009: 18-30.
- [9] 孙鹏,周惠兴. U型无铁芯永磁同步直线电机气隙磁场有限元分析及实验研究[J]. 微电机,2009,42(8):9-12.
- [10] 朱红建. 基于ANSYS的粉料罐有限元分析及结构优化[J]. 现代制造技术与装备,2011(2):57-59.
- [11] 丁立聪,张宪. 基于有限元技术的锅炉水冷壁管机关键部件研究[J]. 轻工机械,2012,30(3):92-96.
- [12] 江宏伟. 基于ANSYS的新型结构永磁直线同步电机力性能研究[J]. 机电工程,2012,29(2):227-229.

[编辑:张翔]