

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.12.014

一种动磁式直线振荡电机的设计与分析*

田 乐, 吴觅旒, 庄 周, 卢琴芬*
(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要:针对横向磁通式双定子动磁式直线振荡电机推力较小的问题,分析了该电机的工作原理,建立了动力学模型,探究了其动力学特性,基于三有限元方法建立了电机的有限元模型,探究了气隙厚度、永磁体长度、永磁体厚度、定子位置、内定子厚度等参数对电机性能的影响。在此基础上,优化了电机结构参数,并设计了适用于制冷压缩机的大推力方案。研究结果表明,电机的运动呈现正弦规律,永磁体长度等结构参数对电机性能影响较大,参数合理优化后,输出总推力能达到 700 N 以上,满足压缩机大推力应用需求。

关键词:直线振荡电机;电磁推力;优化;有限元法

中图分类号:TH39;TM359

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)12-1590-05

Analysis and design of a linear oscillatory motor with moving magnet

TIAN Le, WU Mi-ni, ZHUANG Zhou, LU Qin-fen

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at the low thrust force of a transverse-flux double-stator moving magnet linear oscillatory motor (LOA), the working principle was analyzed. The dynamic model of the motor was established and the dynamic factors were investigated. The effect of main structure parameters on motor thrust force performance were investigated based on 3D finite element method (FEM), such as gap thickness, length of permanent magnet (PM), PM thickness, the location of the rotor, inner stator thickness, etc. Based on this, the parameters were optimized and a transverse-flux LOA with high thrust force for a refrigeration compressor was designed. The results show that the motion follows the law of sine and the structure parameters such as the length of PM have great effect on performance. By optimal design, the thrust force can reach 700 N, which meets the application requirement of high force.

Key words: linear oscillatory motor(LOA); electromagnetic thrust; optimization; finite element method(FEM)

0 引 言

冰箱、空调等制冷机已成为办公室及家庭的常用电器,其内部的核心部件压缩机主要由旋转电机与曲柄-连杆系统构成,存在传动效率低、摩擦损耗严重和噪声大等问题。而直线电机能够直接驱动负载做直线运动,省去了曲柄-连杆系统,提高了系统的机械效率^[1]。在此背景下,开发低成本、高效率的直线振荡压缩机成为国内外研究的热点。相比于传统的旋转电机驱动的压缩机,直线电机直接驱动活塞做同轴心的

往复直线运动,侧向力很小,并具有机械损耗小、效率高、结构简单紧凑、振动和噪声小、寿命长等优点^[2]。

直线振荡电机通常可以按照运动体形式分为动圈式、动铁芯式和动磁式,其中动磁式直线振荡电机结构简单,体积小,损耗小,易于控制,近年来受到广泛的研究与关注^[3]。

2005 年,浙江大学的谢洁飞等^[4]研制了一台冰箱用动磁式直线压缩机,该样机活塞行程 20 mm,运动质量 0.9 kg。2007 年起,浙江大学的夏永明等人^[5]研究了双定子结构的动磁式直线电机,并对其电磁性能进

收稿日期:2015-08-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51277158)

作者简介:田 乐(1994-),男,安徽亳州人,主要从事直线振荡电机方面的研究。E-mail:3120103861@zju.edu.cn

通信联系人:卢琴芬,女,博士,教授,博士生导师。E-mail:luqinfen@zju.edu.cn

行了有限元分析。2010 年,浙江大学的于明湖等^[6]对横向磁通双定子直线振荡电机采用了谐振弹簧式设计,理论分析与实验验证了电机运行频率对于其工作特性的影响,并于 2011 年对该电机建立了等效磁路模型,在此基础上推导出了电磁推力的详细解析公式,更为直观地得到了电机电磁力的影响因素^[7]。2012 年,中科院邹慧明等人^[8]用二维有限元对动磁式直线振荡电机进行了性能模拟,得到了样机模型的电磁力系数和谐振工况时位移与电流的关系曲线。后续又有许多关于该类型电机的设计和应用的研究。但目前该研究主要针对家用冰箱压缩机,推力较小。

本研究将针对横向磁通双定子直线振荡电机,分析其推力的影响因素,在此基础上,完成大推力的横向磁通式双定子动磁式直线振荡电机方案,用于制冷压缩机。笔者基于 Ansoft 软件,建立 3D 有限元模型,分析结构参数对电机力性能的影响,为双定子直线振荡电机的设计提供参考。

1 工作原理和动力学特性

1.1 工作原理

横向磁通式双定子动磁式直线振荡电机结构原理图^[9]如图 1 所示。其利用直线电机的原理,产生短行程高频往复运动。外定子和内定子都由硅钢片叠装而成,两外定子结构完全相同,采用半闭口槽。动子由永磁体和永磁体支架共同构成,永磁体采用径向充磁,充磁方向交替,且与定子齿部一一对应。主磁路由外定子齿部、气隙、永磁体、气隙、内定子、气隙、永磁体、外定子齿部、外定子轭部构成闭合回路。

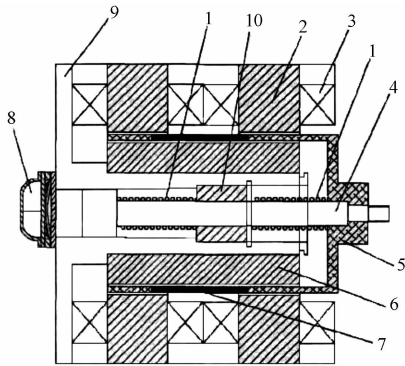


图 1 横向磁通双定子直线压缩机结构剖面图
1—弹簧;2—外定子铁芯;3—定子绕组;4—活塞轴;5—永磁体支架;6—内定子;7—永磁体;8—吸排气腔体;9—压缩腔体;10—直线轴承

该直线压缩机工作时,圆周方向相邻的绕组里通以方向相反的电流,均可对永磁体产生同向的吸力或斥力;轴向相邻的绕组通以方向相反的电流,对同一块

永磁体分别产生吸力和斥力,从而使动子向同一个方向运动。当绕组里所加的电流方向改变时,动子产生反方向的力从而向相反方向运动。当电机定子通入一定频率的交变电流时,动子产生往复振荡运动。改变定子电流频率,即可以改变动子振荡频率,从而动子产生相应的往复直线运动。动子运动带动活塞轴上的弹簧伸长或压缩,从而对腔体内的气体产生挤压作用,推动负载气体密度变化。该电机工作时通入一定频率的正弦交流电。

1.2 动力学特性

直线振荡电机可简化为一个阻尼受迫振荡的系统,电机动子受到电磁力 F_e 、弹簧拉力 $F_s = kx$ 以及阻力 $F_m = cv$ 的作用。根据机械原理可以建立电机机械动力学的模型^[10]:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx = F_e \tag{1}$$

式中: m —动子质量, x —动子位移, c —阻尼系数, k —弹簧的弹性系数。

电机的电磁推力 F_e 基本上与电流 i 成正比,因此,在电机通入一定频率的正弦交流电时 F_e 也是一个正弦变化的量。若动子质量 m 为 0.7 kg,阻尼系数 c 为 0.05,弹簧的弹性系数 k 为 44 N/m,电流频率 f 为 40 Hz,将上述模型用 Matlab 软件进行仿真,可以得到电机的动力学特性,动子的速度、加速度、位移以及电磁力的波形(不考虑起振过程)如图 2 所示。

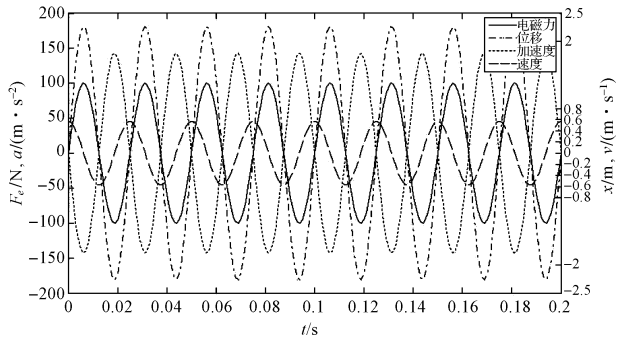


图 2 电机动子运动状态仿真图

根据图 2 可知,电磁力与动子的加速度 a 相位相反,当电磁力 F_e 达到最大时候,加速度 a 也达到了最大。动子位移达到最大时候,速度为零,加速度为最大,但位移与加速度方向相反,速度和电磁力存在着固定的相位关系,这与电机动子运动的规律是一致的。动子往复运动的距离很小,仅为 2.3 mm。

2 结构参数的影响

2.1 电机方案

针对横向磁通双定子式结构,本研究设计了大推

力(大于 600 N)的电机方案,主要参数如表 1 所示。

表 1 大功率直线压缩机主要参数表

参数	数值
永磁体厚度/mm	6
单个定子极数	18
外定子外径/mm	201
外定子轭部厚度/mm	15
内定子厚度/mm	15
负载电流/A	5
绕组每极匝数	210
两外定子间隔/mm	35
内外气隙厚度/mm	2
永磁体长度/mm	63
永磁体材料	N35
铁芯材料	50W470
内定子铁芯叠厚/mm	90
外定子铁芯叠厚/mm	30

2.2 有限元基本模型

在电磁场分析运算中,Ansoft 软件以其计算简便、速度快、误差小而得到了广泛的应用。为了分析横向磁通直线振荡电机的推力特性,本研究建立了该电机的 3D 有限元模型。考虑对称性及计算的快速性,仅需建立一个极的模型,3D 有限元模型如图 3 所示。本研究取电机轴向中心点为 $x=0$,所加定子绕组电流在 $x<0$ 的区域建立的主磁场与永磁体建立的磁场相互增强,在 $x>0$ 的区域建立的主磁场与永磁体建立的磁场相互削弱,构成两个闭合的磁通路径。

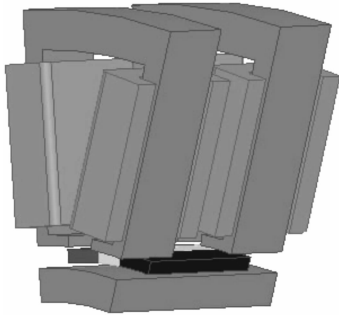


图 3 3D 有限元模型

经有限元计算,在负载电流为 5 A 的情况下,图示动子平衡位置时模型得到的电磁推力为 35 N,单个定子共 9 对极,即整个电机电磁推力为 630 N。

2.3 结构参数的影响

直线压缩机的推力是影响气体压缩的最直接的因素,本研究通过 Ansoft 软件有限元仿真,利用控制变量法,得到一系列关键因素对电磁推力的影响。

2.3.1 气隙厚度

内、外气隙厚度对推力的影响如图 4 所示。其中,永磁体长度为 63 mm,永磁体厚度为 6 mm,永磁体位置在 $x=15$ mm 处,内定子厚度为 15 mm。

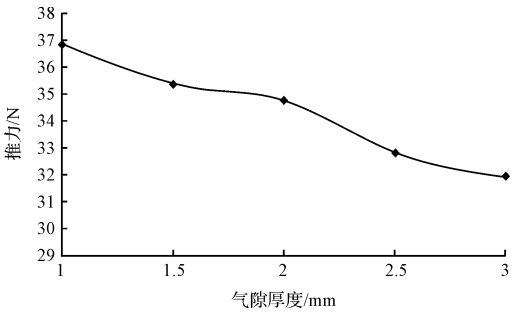


图 4 推力与气隙厚度关系曲线

从图 4 可知,随着气隙厚度的增加,推力基本成线性减小,这是因为气隙的磁导率约为真空磁导率 μ_0 ,其导磁性能远差于铁磁材料,随着气隙厚度的增大,闭合磁路的磁阻增大,磁密减小比较明显,推力减小。

2.3.2 永磁体长度

永磁体长度对推力的影响如图 5 所示。其中,气隙厚度为 2 mm,永磁体厚度 6 mm,永磁体位置在 $x=15$ mm 处,内定子厚度 15 mm。

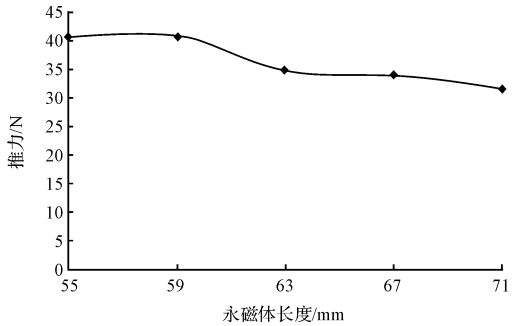


图 5 推力与永磁体长度关系曲线

从图 5 可知,当永磁体长度较长时,两外定子绕组建立的主磁场受永磁体磁场的影响越来越大。对于两外定子给定的电流方向,可以发现两侧磁场中一侧磁场增强,一侧磁场减弱,但由于铁磁材料的非线性,当磁场强度较大时,磁导率会减小,总体上增强的磁场小于减弱的磁场,因此推力有所减小。

2.3.3 永磁体厚度

永磁体厚度对推力的影响如图 6 所示。其中,气隙厚度 2 mm,永磁体长度 63 mm,永磁体位置在 $x=15$ mm 处,内定子厚度 15 mm。

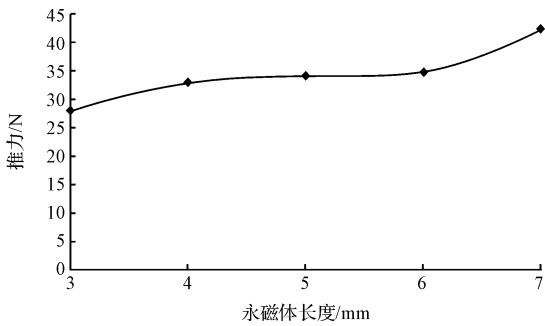


图 6 推力与永磁体厚度关系曲线

从图 6 可知,随着永磁体厚度的增加,推力也增大,这是因为永磁体的激磁对磁场的增强作用比较明显。

2.3.4 动子位置

动子位置对推力的影响如图 7 所示。其中,气隙厚度 2 mm,永磁体长度 63 mm,永磁体厚度 6 mm,内定子厚度 15 mm。

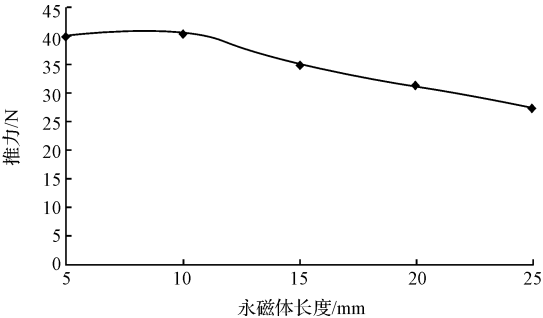


图 7 推力与永磁体位置关系曲线

从图 7 可知,随着永磁体位置向规定正方向移动,推力减小。分析可知,电机在 $x < 0$ 的区域主磁场与永磁体建立的磁场是相互增强的,在 $x > 0$ 的区域主磁场与永磁体建立的磁场是相互削弱的。当 $x < 0$ 时,增强作用明显,故电机所提供的推力较大;而当 $x > 0$ 时,电机所提供的推力就会受到削弱。

2.3.5 内定子厚度

内定子厚度对推力的影响如图 8 所示。其中,气隙厚度 2 mm,永磁体长度 63 mm,永磁体厚度 6 mm,永磁体位置在 $x = 15$ mm 处。

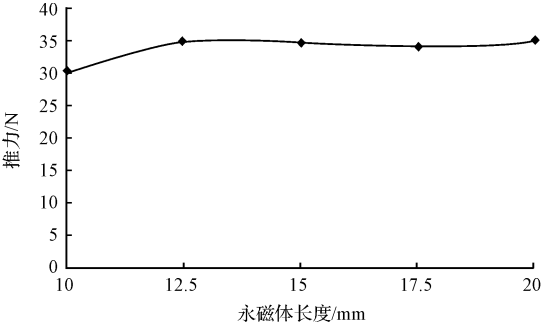


图 8 推力与内定子厚度关系曲线

从图 8 可知,推力基本不随内定子厚度的变化而变化。由有限元分析结果可知,内定子在整个磁路中基本是不饱和的,故增大内定子厚度并不能带来磁阻的减小,其变化不影响整个磁路的关键参数,故推力是基本不变的。

2.4 试验结果与分析

气隙厚度、永磁体长度、永磁体厚度、内定子厚度等电机本身结构会对电机推力特性产生影响,通过分析发现,在其他因素不变的情况下,气隙厚度越小、永磁体厚度越大,电机会产生更大的电磁推力。对于永

磁体长度,要考虑其在运动过程中对两侧外定子绕组产生的主磁场的增强作用或削弱作用,考虑增强和削弱的综合影响。而内定子铁芯由于磁路处于不饱和状态,其对电磁推力影响不大,过厚的内定子铁芯会造成资源浪费。

3 优化方案

本研究通过结构参数对推力影响的分析,确定了大推力直线振荡电机设计的优化方案,主要参数如表 2 所示。

表 2 优化方案主要参数

参数	数值
永磁体厚度/mm	5
单个定子极数	18
外定子外径/mm	201
外定子轭部厚度/mm	15
内定子厚度/mm	12.5
负载电流/A	5
绕组每极匝数	210
两外定子间隔/mm	35
内外气隙厚度/mm	1.5
永磁体长度/mm	59
永磁体材料	N35
铁芯材料	50W470
内定子铁芯叠厚/mm	90
外定子铁芯叠厚/mm	30

有限元分析结果显示,该组参数下的永磁体位于 $x = 15$ 处电机推力达到 42 N,比初始值 35 N 增加了 20.8%,在所有电磁推力数据中最大,如果考虑到电机共有 9 对极,该推力可以达到 756 N,而选用较短和较薄的永磁体亦减轻了动子部分的质量,可以得到更大的加速度,是一种较为优化的电机设计方案。

4 结束语

本研究基于横向磁通双定子直线振荡电机结构,分析了其工作原理和符合正弦规律的动力学特性,及大功率情况下其推力的若干影响因素,包括电机气隙厚度、永磁体长度、永磁体厚度、内定子厚度等,详细阐述了各因素对电机力性能的影响。

在综合分析影响电机力性能的参数的基础上,笔者得到了一种横向磁通双定子直线振荡电机优化方案。在方案设计过程中,上述分析的各参数均进行了优化调整,优化后该电机静态推力达到 756 N,且有效减少了永磁材料和铁芯材料的使用量,能得到更大的加速度,是一种较为优化的电机方案。

该分析和方案适用于制冷压缩机。

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,2002.

[2] 王建生,廖振方. 直线电活活塞式压缩机的现状及发展[J]. 压缩机技术,1998(1):46-48.

[3] 夏永明,叶云岳,卢琴芬,等. 动磁式直线振荡电机特性研究[C]//第十三届中国小电机技术研讨会. 上海:[作者不详],2008:142-145.

[4] 谢洁飞. 动磁式直线压缩机理论与试验研究[D]. 杭州:浙江大学电气工程学院,2005.

[5] 夏永明,卢琴芬,叶云岳,等. 新型双定子横向磁通直线振荡电机[J]. 中国电机工程学报,2007,27(27):104-107.

[6] 于明湖,张玉秋,叶云岳,等. 双定子直线振荡电机谐振特性分析[J]. 电机与控制学报,2010,14(8):1-6.

[7] 于明湖,张玉秋,卢琴芬,等. 动磁式横向磁通直线振荡电机建模分析[J]. 电机与控制学报,2011,15(2):1-6.

[8] 邹慧明,张立钦,彭国宏,等. 动磁式直线振荡电机性能模拟及实验[J]. 电机与控制学报,2012,16(4):25-29.

[9] 于明湖. 直线压缩机用横向永磁直线振荡电机系统研究[D]. 杭州:浙江大学电气工程学院,2011.

[10] HWANG K H, CHO Y H. Design and Dynamic Characteristics Analysis of Moving Magnet Linear Actuator for Human[C]//Proceedings of the 2004 IEEE International Conference. Mechatronics. Istanbul: [s. n.],2004:251-254.

[编辑:洪炜娜]

本文引用格式:

田 乐,吴冕旒,庄 周,等. 一种动磁式直线振荡电机的设计与分析[J]. 机电工程,2015,32(12):1590-1594.

TIAN Le, WU Mi-ni, ZHUANG Zhou, et al. Analysis and design of a linear oscillatory motor with moving magnet[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2015,32(12):1590-1594.

《机电工程》杂志:http://www.meem.com.cn

(上接第 1589 页)

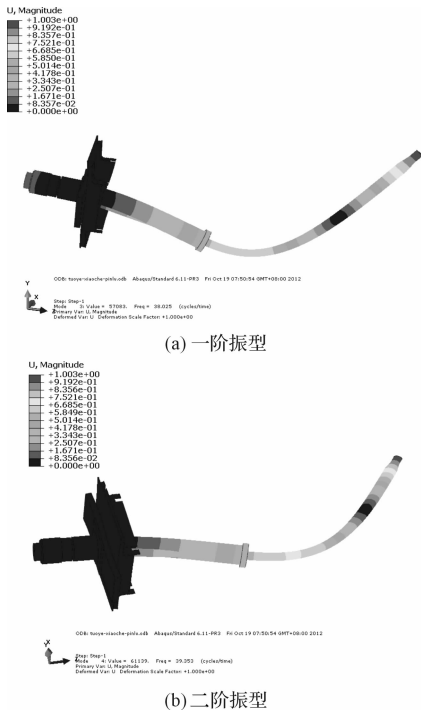


图 10 中央测桥振型云图

程,根据要求进行了运行参数设计,展开了相关计算并对重要结构件进行了强度校核及模态分析。由介绍可知,拖车结构设计中应重点考虑运行参数设计,运行过

程中倾覆状态计算,并考虑输入和运行中避开重要结构件的固有频率。

该方案经有限元仿真分析,结果表明其能够满足设计要求。该方案拖车目前已完成出厂验收,调试运行效果良好。

参考文献 (References) :

[1] 朱德祥,冷文浩,李百齐,等. CAE 在船舶性能研究领域的应用[J]. 中国造船,2007(2):48.

[2] 周广利,黄德波,李凤来. 船模拖曳阻力试验的不确定度分析[J]. 哈尔滨工程大学学报,2006,27(3):377-381.

[3] 李广年,谢永和,郭 欣. 拖曳水池方案设计[J]. 中国造船,2011,52(3):109-114.

[4] 余湘三,陈泽梁,楼连根,等. 船舶性能实验技术[M]. 上海:上海交通大学出版社,1991.

[5] 孙长龙. 船模拖曳水池主要参数的确定[J]. 武汉水运工程学院学报,1981(2):102-107.

[6] 杨松林,孙小峰. 确定拖曳水池长度的方法[J]. 船舶工程,2001(6):61-63.

[7] 谢克振,周占群,宋家瑾,等. 水池阻塞效应的试验探讨[J]. 上海船舶运输科学研究所学报,1978(2):1-5.

[8] 于志丹. 试验水池拖车速度控制系统设计与实现[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学自动化学院,2008.

[编辑:洪炜娜]