

直线电机的发展及其磁阻力优化综述

章达众^{1,2}, 廖有用^{1*}, 李国平²

(1. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所, 浙江宁波 315211; 2. 宁波大学机械工程系, 浙江宁波 315211)

摘要:针对传统间接驱动系统在自动化设备上的应用缺陷等问题,提出了直接驱动的概念,以直线电机为动力源直接推动运动台运动。在比较直接驱动与传统间接驱动性能的基础上,论述了直线电机在大行程、高速高精度自动化控制领域的应用趋势,并从驱动原理、驱动力和定位精度等方面介绍了国内外直线电机的研究现状。针对影响直线电机驱动性能的磁阻力参数,归纳了相关文献削弱磁端效应和减少齿槽力的原理和研究方法,并从电机本体设计与电机控制技术两个方面对直线电机磁阻力的优化方法进行了总结。研究表明:直线电机以其良好的运行性能将逐步取代传统旋转电机的市场地位,同时直线电机在工程应用上的深入推广必须解决制造工艺、电机热效应、电机驱动器设计等问题。

关键词:直线电机;发展;磁阻力;电机设计;控制

中图分类号:TH39;TM359.4

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2013)09-1051-04

Development of linear motor and its optimization method of detent force

ZHANG Da-zhong^{1,2}, LIAO You-yong^{1*}, LI Guo-ping²

(1. Ningbo Institute of Materials Technology & Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315211, China; 2. Department of Mechanical Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: Aiming at application defects of traditional indirect driving system using in automation equipment, the concept of direct driving was proposed, the linear motor was used as a power source to promote the platform. Based on a comparison of direct driving and the traditional indirect driving performance, the application tendency of linear motor was discussed using in automatic control fields of larger stroke, high speed and high precision, and then the linear motor of domestic and foreign research status were introduced from the driving principle, the driving force and the positioning precision. In view of the effecting of detent force of linear motor on its driving performance, the principle and research methods using by some related scholars were summarized, which were about the end effect weakened and cogging force reduced, and finally the optimization methods were summed up for the linear motor's detent force from the motor body design and the motor control technology. The results indicate that owing to the perfect operating performance of linear motor, it will replace the traditional rotary motor in the industry market, at the same time, the linear motor must solve the problem of manufacturing process, the motor thermal effects, and the motor driver design to be promoted in engineering application deeply.

Key words: linears motor; development; detent force; motor design; control

0 引言

随着制造行业越来越苛刻的要求,现代先进制造装备向着高速度、高精度、快响应、大行程的趋势发展。

这必然要求一个反应灵敏、高速、轻便的驱动系统,由于传统的进给方式—“旋转电机+滚珠丝杠”需要联轴器、丝杠等中间传递环节,造成整体系统刚性不够、弹性变形严重,又因为该“间接传动”中丝杠精度很难提高、

存在反向间隙等缺点,使得传统的进给系统无法达到上述要求。相对而言,直线电机具有结构简单、安装方便、无接触、无磨损等优点^[1],并在精度、重复定位精度、刚度、工作寿命等其他性能指标上都优于旋转电机。近些年来,直线电机逐步取代旋转电机在工业自动化上的应用,其设备的性能指标均优于传统的自动化设备。

本研究主要介绍直线电机的发展历程与现阶段国内外直线电机的技术水平,并从直线电机的本体设计与控制两方面概述直线电机的磁阻力优化方法。

1 直线电机的发展与研究近况

1.1 直线电机的发展历程

直线电机与旋转电机出现的年代相差不远。19世纪40年代英国人 Charles Wheatstone^[2]发明了全球第一台直线电机,但由于该样机气隙过大导致电机效率不高而宣告失败。随后直线电机研究热在全球蔓延,在之后的100多年中直线电机的发展经历了探索实验、开发应用到实用商品化3个阶段,每个阶段都有各自的特点。在探索实验阶段主要是理论推导与实验数据为主;在开发应用阶段直线电机出现了感应直线电机,以感应直线电机为主的设备相继被开发出来,如空气压缩机、磁头定位驱动装置、缝纫机等;第三阶段是实用商品化阶段,伴随着市场上高矫顽力、高磁能积的钕铁硼出现,越来越多的感应直线电机向着永磁直线电机的方向发展,如采油机器设备用永磁直线电机,高速钻孔用永磁直线电机,还有PCB打孔用永磁直线电机等。感应直线电机与永磁直线电机性能对比如表1所示^[3]。

1.2 国内外直线电机的研究近况

近几年来,欧美等发达国家的直线电机技术和系

表 1 永磁直线电机与感应直线电机性能对比

直线电机种类	永磁直线	感应直线
电机推力/单位面积	大	小
电机效率	高	低
磁极位置传感器	要	不要
速度波动	小	较小
可控性	好	较差
气隙要求	低	高
尘埃防护要求	难	容易
电磁吸力	常量	变量
安装难易	难	容易

统配套日臻成熟,并且在工业设备、物流自动化、交通运输等领域得以广泛应用。如西门子(Siemens)已推出成套适合数控设备的直线电机、驱动器及数控系统,最大移动速度达到200 m/min,最大推力为6 600 N;以研究数控系统为主的发那科(FANUC)也推出用于高端设备用的直线电机,以求提供完整的系统解决方案,其底下的LiS系列直线电机,在机械结构中没有磨损部件,也无需考虑如滚珠丝杠发生形变等的因素,利用高刚性的伺服系统,实现高增益、高精度的运动控制,以及免维护的机械结构;MITSUBISHI开发研究的精密两轴XY工件台,分辨率达到了1 μm,重复定位精度±1.5 μm;Kollmorgen公司开发了两种类型的永磁直线同步电动机,该种无铁芯结构的直线电机具有较高的动态特性、零齿槽力、零电磁引力,在速度低于1 μm/s时仍能平滑运动,而带铁芯的直线电机其额定推力可以达到8 000 N,运行中最大加速度可达15 g;最近几年,来自中国台湾的HIWIN、新加坡的AKRIBIS等也开始以中姿态的身份进入市场,HIWIN不仅做直线电机,而且直线电机的配套器件也产品化生产,如线性导轨、光栅、磁栅等。国外直线电机生产商的电机性能比较表如表2所示^[4]。

表 2 国外直线电机生产商电机性能对比表

公司	型号	类型	行程/mm	连续额定推力/N		峰值速度/(m·s ⁻¹)	峰值加速度/g
				无冷却	水冷		
Anorad	LEC 系列	永磁(双)	无限制	730	910	5	10
	LFD 系列	永磁(单)	无限制	4 000	8 000	5	10
Indramat	LSF 系列	永磁(单)	±3 000	6 000	12 000	≥3.3	≥10
	LAF 系列	感应式	±3 000	4 500	9 000	≥3.3	≥10
Aeroteeh	BLM 系列	永磁(双)	无限制	280	427(空冷)	5	90(空载)
Parker	Linearserv	永磁(双)	50~1 500	50~300		2	7
Fanuc	9000B	永磁(单)			9 000	2	2
Kollmorgen	Plat. Dri	永磁(双)	无限制	245	8 000	>3	>10
	Drv. Linear	永磁(单)	无限制	5 000		>3	>10
Siemens	INFI 系列	永磁(单)	无限制		6 600	3.3	8

目前,国内品牌近通过几年的研发,在产品覆盖面上占有了一席之地,主要有哈尔滨泰富、深圳大族精密机电、北京首科凯奇、惠摩森、郑州微纳等,哈尔滨泰富将自己的直线电机产品应用到各种自动化设备中,如

直线电机驱动的轨道交通、梁游式直线电机拖动抽油机、直线电机驱动的食品加工设备等,大族精密机电将自己的直线产品用于开发平台,不仅仅是XY二维平台,还有三维平台。在国内的高校或者是研究机构中,

从事直线电机研究的主要有中国科学院宁波材料技术与工程研究所^[5]、中国科学院电工研究所^[6]、沈阳工业大学^[7]、清华大学^[8]、浙江大学^[9-10]、广东工业大学^[11]、上海大学、焦作工业学院国内知名高校。宁波材料所的直线电机如图1、图2所示。

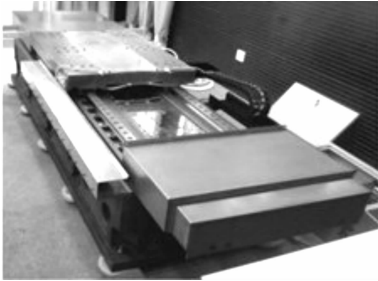


图1 宁波材料所大推力直线电机



图2 宁波材料所轴式直线电机

2 磁阻力削弱方法的国内外研究现状

当然,直线电机也有其自身的缺点,就是在电机中存在端部效应和齿槽力,两者合称为磁阻力,磁阻力是直线电机在稳态运行中产生推力波动的主要原因之一。直线电机的端部效应是因为初级铁芯长直开断的,导致两端磁力线突变,而直线电机的齿槽力性质类似于旋转电机的齿槽转矩(Cogging force),这是因为初级铁芯硅钢片的开槽结构导致气隙磁导不连续造成的。对于直线电机磁阻力的研究,国内外学者做了大量的研究。

在削弱端部力方面,Zhu等学者^[12]建立了建立基本的物理模型,将端部力假设为关于峰值对称进行推导研究,文献[13]在Zhu等人建立的基础上,在优化初级长度的时候,通过改变左右端部力的相位差等到了满意的结果。在国内,李庆雷等人^[14]利用有限元软件与曲线拟合求解初级长度,结果合乎实际。

在直线电机的齿槽力优化方面,其原理与旋转电机的齿槽转矩(Cogging Force)类似,所以采用的方法也是类似的。主要方法有以下几种:

(1) 定子铁芯斜槽或者定子磁钢斜极,在实际工程中,可以采用这种方法来最大限度减低直线电机的齿槽力^[15-16];

(2) 改变极弧系数,极弧系数对永磁同步电机中齿槽力基波幅值及其形状都有重要的影响,利用选择合适的极弧系数可以有效降低齿槽力的谐波分量;

(3) 移动相邻磁极,在多级电机中往往采用移动相邻磁极来降低齿槽力^[17],文献[18]中提出利用傅立叶级数回归分析对磁阻力进行了数值计算,根据磁极偏移量的不同,对极数不同的直线直流电动机的磁阻力进行了有限元仿真;

(4) 采用分数槽,在旋转电机中当定子与转子相对位移发生变化时,齿槽转矩呈周期性变化,变化的周期数 N_p 与槽数和极数的组合有关, $N_p = 2p / [GCD(Z, 2p)]$,周期数 N_p 越大,齿槽转矩的谐波幅值越小,这在直线电机中也同理的;

(5) 优化磁钢结构,文献[19-20]介绍了一种具有极弧或者是带有倒角的磁钢来减少直线电机运动中所带来的磁阻力,磁钢形状的改变如图3所示,文献[21]在磁钢排布上作了改变,两端的磁钢比中间各段磁钢要短,可以有效改变电机齿槽力,磁钢排布的改变如图4所示。

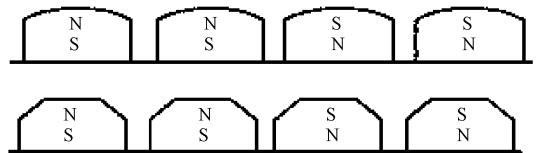


图3 磁钢形状的改变

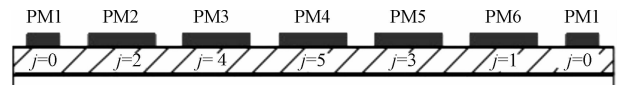


图4 磁钢排布的改变

(6) Halbach 永磁体阵列, Halbach 的核心思想^[22-23]是采用合理的磁化方向和拓扑结构,使得磁势在位移方向上呈现出一定的规律性,从而满足所需要的磁场分布。

在直线电机磁阻力优化方面,除了在电机本体设计时提出一系列方法,在后续的控制中也提出了相应措施。直线电机的控制特点具有多变量、非线性的特点,其抑制磁阻力的控制方法主要有以下几种:

(1) 改善直线电机的输入电流,运用合理的滤波与PWM调制,使得通入直线电机的电流与反电势相匹配;

(2) PI控制方式^[24],PI控制是现代工程中应用最为广泛的控制方式,其具有较强的鲁棒性和可靠性;

(3) FOC(矢量)控制,为了达到一定的力控制精度,系统采用闭环控制,快速跟踪推力波动;

(4) 现代控制理论与现代智能控制理论相结合^[25],如采用自适应控制、滑模变结构控制、模糊控制等,文献[26]将人工神经网络和滑模变结构结合,应

用于永磁直线伺服控制系统中,消除滑模控制器抖振对系统的影响,文献[27-28]将 H_∞ 鲁棒控制应用于直线电机中,取得了较好的实验效果,文献[29]采用预测控制提高直线电机的跟踪性能。

3 结束语

直线电机直接驱动系统具有结构简单、安装方便、高速高精快响应等优点,其主要推广与高速、高精等旋转电机无法满足要求的场合。现代直线电机技术日益成熟,其势必取代传统的“旋转电机 + 丝杠”的传动模式。当然,直线电机也有其自身的缺点,如前述电机存在的磁阻力影响电机的伺服运动之外,还需要在以下方面完善:

(1) 直线电机的制造与工艺。目前制备直线电机工艺不全面,主要以人工装备为主,不能满足电机大批量生产;

(2) 电机的热分析。热分析是直线电机今后研究的主要方向,它是电机系的一个重要领域,电机在运行中散热是否及时能较大程度地影响电机的整体性能;

(3) 直线电机驱动器的研究。目前国内尚无自己牌子的直线电机驱动器,主要被国外的 Coplay 与 Elmo 公司所垄断,这也是直线电机的应用在国内受限制的主要原因之一。

参考文献 (References):

[1] 王先逵,陈定积,吴 丹. 机床进给系统用直线电动机综述[J]. 制造技术与机床,2001,8(4):18-20.

[2] MCLEAN G W. Review of recent progress in linear motors [J]. **Electric Power Applications**,1988,135(6):380-416.

[3] 杨大伟,杨智慧. 直线电机发展动态及其应用概况[J]. 电子工程师,1997(3):8-11.

[4] 石忠东,王先逵,陈定积,等. 永磁交流直线电机直接驱动伺服控制技术[J]. 微特电机,2002,30(3):8-10.

[5] 中国科学院宁波材料技术与工程研究所. 宁波材料所成功研制大推力直线电机[J]. 电气技术,2010(12):52.

[6] 陈宇明. 高速磁悬浮列车用常导直线同步电机的研究[D]. 北京:中国科学院电工研究所,2001.

[7] 李 玮,武 琳. 高精度永磁直线同步电机伺服系统鲁棒位置控制器的设计[J]. 2008 中国电工技术学会电力电子学会第十一届学术年会论文摘要集,2008.

[8] 王先逵. CCMT2004 展出国家“十五”科技攻关项目成果—清华大学研制成功交流永磁同步直线电机及其伺服系统[J]. 世界制造技术与装备市场,2004(3):64-64.

[9] 叶云岳. 直线电机的原理与应用[M]. 北京:机械工业出版社,2000.

[10] 徐月同. 高速精密永磁直线同步电机进给系统及控制技术[D]. 杭州:浙江大学机械工程学院,2004.

[11] 肖曙红,查长礼,张伯霖. 高速大推力直线电机直接驱动进给系统动态性能的分析[J]. 机床与液压,2007,35

(5):20-22.

[12] ZHU Z Q, XIA Z P, HOWE D, et al. Reduction of cogging force in slotless linear permanent magnet motors[J]. **Electric Power Applications**,1997,144(4):277-282.

[13] INOUE M, SATO K. An approach to a suitable stator length for minimizing the detent force of permanent magnet linear synchronous motors[J]. **Magnetics IEEE Transactions on**,2000,36(4):1890-1893.

[14] 李庆雷,王先逵. 永磁同步直线电机推力波动分析及改善措施[J]. 清华大学学报:自然科学版,2000,40(5):33-36.

[15] CRUISE R J, LANDY C. Reduction of cogging forces in linear synchronous motors [J]. **IEEE Africon**, 1999, 99(6):623-626.

[16] DEODHAR R P, STATON D A, MILLER T J. Modeling of skew using the flux-MMF diagram of PM machines[J]. **Industry Applications, IEEE Transactions on**,1996,32(6):1339-1347.

[17] LI T G, SLEMON G. Reduction of cogging torque in permanent magnet motors [J]. **Magnetics, IEEE Transactions on**,1988,24(6):2901-2903.

[18] 王书华,汪旭东,曹娟娟,等. 磁极偏移减小永磁直线无刷直流电动机磁阻力[J]. 微特电机,2008,212(9):8-10.

[19] 陈学东,李 健,张玲莉,等. 一种减小齿槽效应的永磁电机设计方法以及永磁电机:中国,CN201010614325.0 [P]. 2011-05-18.

[20] 陈学东,李 健,张玲莉,等. 减小齿槽效应的永磁电机:中国,CN201020690018 [P]. 2011-08-31.

[21] BIANCHI N, BOLOGNANI S, CAPPELLO A. Reduction of cogging force in PM linear motors by pole-shifting[J]. **In Electric Power Applications, IEE Proceedings**, 2005,152(3):703-709.

[22] ZHU Z D, HOWE D. Halbach permanent magnet machines and applications: a review[J]. **In Electric Power Applications, IEE Proceedings**,2011,148(4):299-308.

[23] LEE M G, LEE S Q, GWEON D G. Analysis of Halbach magnet array and its application to linear motor [J]. **Mechatronics**,2004,14(1):115-128.

[24] 叶云岳,陆凯元. 直线电机的 PID 控制与模糊控制[J]. 电工技术学报,2001,16(3):11-15.

[25] 王振滨,余鹿延,周守国. 直线电机开发及应用研究[J]. 上海电气技术,2009(1):25-31.

[26] 孙宜标,郭庆鼎. 交流永磁直线伺服系统的神经网络—滑模双自由度控制[J]. 电气传动,2002,32(1):19-23.

[27] 徐月同,傅建中,陈子辰. 永磁直线同步电机进给系统 H_∞ 控制策略的研究[J]. 浙江大学学报:工学版,2005,39(6):789-794.

[28] CHEUNG N C, CHEN Y R, WU J. H_∞ Control of Permanent Magnet Linear Motor in Transportation Systems [C]. In **Electrical Machines and Systems. Proceedings of the Fifth International Conference on**,2001.

[29] 郭庆鼎,周 悦. 交流永磁直线同步电机伺服系统的预见前馈补偿[J]. 电机与控制学报,1999,3(3):172-175.

[编辑:张 翔]