

永磁直线同步电机推力脉动削弱方法综述

冀 相, 许 金, 黄垂兵, 王逸林

(海军工程大学 舰船综合电力技术国防科技重点实验室, 湖北 武汉 430033)

摘 要: 对永磁直线同步电机(PMLSM)的推力脉动削弱方法进行了原理介绍和特点分析。针对边端效应力、齿槽力和电磁脉动力,归纳和总结了其对应的推力脉动削弱方法,并对其控制方式进行了概括。最后讨论了PMLSM推力脉动削弱方法的发展趋势。所做研究有助于促进PMLSM性能的提高和应用领域的扩大。

关键词: 永磁直线同步电机; 推力脉动削弱; 边端效应; 齿槽效应; 电磁脉动

中图分类号: TM 351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2019)01-0070-05

Review of Methods for Reducing Thrust Ripple of Permanent Magnet Linear Synchronous Motor

Ji Xiang, XU Jin, HUANG Chuibing, WANG Yilin

(National Key Laboratory of Science and Technology on Vessel Integrated Power System,
Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: The methods for reducing the thrust ripple of permanent magnet linear synchronous motor (PMLSM) were introduced and analyzed. In view of the end-effect force, the cogging force and the electromagnetic pulse force, the corresponding thrust ripple reduction methods were summed up and summarized, and the control modes were summarized. The development trend of thrust ripple reduction method for PMLSM was discussed. This research will contribute to the improvement of the performance and application of PMLSM.

Key words: permanent magnet linear synchronous motor (PMLSM); thrust ripple reduction; end-effect; slot-effect; electromagnetic pulse

0 引 言

直线电动机是近年来迅速发展起来的一种电机,可以不借助传动装置将电能直接转换成直线运动机械能,在一些领域正逐步取代液压、气动、滚珠丝杠、齿轮齿条等传统传动技术。随着永磁稀土材料的开发以及电力电子技术不断深入发展,永磁直线同步电机(PMLSM)以其高动态响应性能、高效率和高精度的特性得到广泛的重视和研究开发。其应用领域日益扩大,如新式发射武器、高速轨道交通、数控机床、抽油机、直线电梯、压缩机、机器人部件、大型冲压机、冶金设备、医疗器械等^[1-2]。国外的大型电机制造厂商都有永磁

直线伺服电机的产品,如美国的 Baldor 公司、Anorad 公司、Kollmorgen 公司,德国的 Indramat 公司、Siemens 公司,日本的 SODICK 公司等^[3]。

PMLSM 消除了传动机构的弹性变形、间隙、摩擦等因素的影响,但同时其系统的参数摄动、负载扰动、端部效应、齿槽效应、摩擦力等不确定因素未经衰减直接作用于电机上,导致其推力脉动的成分相较于旋转电机的转矩脉动更复杂,增加了电机设计与控制的难度,直接影响其推力和速度平稳性,产生系统振动和噪声,限制了 PMLSM 性能的提高和应用领域的扩大。推力脉动削弱技术的突破,对于直线电机的进一步推广应用意义重大。

本文在原理分析的基础上,针对推力脉动的

作者简介:冀 相(1993—),男,硕士研究生,研究方向为直线电机设计。

许 金(1983—),男,博士,研究员,研究方向为特种电机设计及驱动控制。

黄垂兵(1988—),男,博士研究生,研究方向为特种电机设计。

3 种成因,归纳和总结了其对应的推力脉动削弱方法,对其控制方式进行了概括,并讨论了 PMLSM 推力脉动削弱方法的发展趋势。本文所做研究有助于促进 PMLSM 性能的提高和应用领域的扩大。

1 PMLSM 推力脉动理论分析

PMLSM 推力脉动按照脉动来源可分为边端效应力、齿槽效应力、电磁脉动力、摩擦力、负载扰动等,其中摩擦力和负载扰动与电机具体的轴承结构和工况有关^[4],无法定量分析,且由其所引起的推力脉动占比较小,故本文仅讨论边端效应力、齿槽效应力和电磁脉动力。

1.1 边端效应力

由于直线电机把传统电机的旋转循环式运动转换为直线往复运动,导致其两端存在开断的端部铁心,运动方向上导磁介质的突变造成端部磁场畸变,如图 1 所示。这影响了行波磁场的完整性,导致两端铁心与永磁体之间产生力的作用。这种效应一般称为端部效应,由其产生的推力波动称为端部效应力。如果动子运动速度较高,还需考虑动态边端效应。

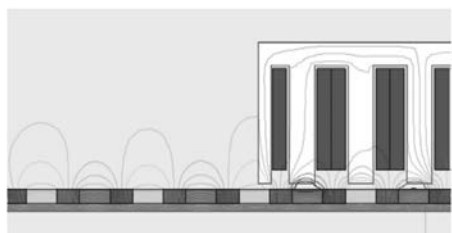


图 1 PMLSM 的端部磁场畸变

电机内电磁力计算采用虚位移法或麦克斯韦应力法^[5],在确定交界面上的电磁力时采用麦克斯韦应力法较为简便。这两种计算方法的计算精度依赖于对模型的有限元剖分程度,故一般使用加密剖分验证计算精度。文献[6]利用解析法得到空载气隙磁场表达式,再由麦克斯韦应力法推导出端部铁心所受力的大小,并分析了端部力特性。文献[7-8]在对端部力进行傅里叶级数分解之后对其特性进行了分析。

1.2 齿槽效应力

永磁电机内永磁体与初级铁心在相对运动时,由于初级铁心开槽使得气隙磁导发生周期性

变化,磁阻的变化产生了力的作用。这种效应称为齿槽效应。如果电机的推力密度需求较小或电机工作在铁心处于饱和的状态,那么可以采用无槽或无铁心结构来彻底消除齿槽效应的影响。若电机设计不合理,齿槽力可达额定推力的 25%,经过分析与优化之后其值可以降到 10% 以下^[9]。

计算齿槽力时可采用能量法和傅里叶分解的方法来粗略得到齿槽力的表达式和相应参数^[10-11],在精确分析时还需采用有限元法和麦克斯韦应力法。

1.3 电磁脉动力

理想情况下当初级绕组通电后,PMLSM 内永磁体产生的正弦波磁场和绕组电流产生的正弦波磁场相互作用产生恒定推力。实际运行时,次级侧永磁体的排列组合方式、充磁的不均匀性、局部磁饱和效应等都会导致气隙磁场畸变,初级侧绕组分布形式的不同会导致磁势中掺杂不同的谐波,端部效应会导致各相绕组间参数的不对称且随运动位置变化,使得各相电流不对称,经逆变器输出的电流也会受开关器件的死区时间、管压降等非线性因素干扰^[12],导致合成磁势不能成为标准正弦波,其合成电磁推力无可避免地包含谐波成分,造成推力不能平稳输出。这部分脉动力称为电磁脉动力。

削弱此类推力脉动时应尽可能使气隙磁场波形和绕组合成磁动势波形正弦化。

2 PMLSM 推力脉动削弱方法

大量文献针对 PMLSM 的推力脉动提出了相应的削弱方法。本节按推力脉动的 3 个来源分别归纳整理如下。

2.1 削弱边端效应力的方法

2.1.1 合理设计铁心长度

通过傅里叶分解或麦克斯韦应力法解析分析找到两端合成的端部效应力表达式,由表达式结果可以分析出其周期内幅值最小的点,获得优化铁心长度。文献[7,13-14]根据上述方法找到了各自的电机结构下的优化铁心长度,并用有限元分析验证了其结论。

2.1.2 改变边端形状

文献[15-17]在 PMLSM 边端两侧添加了辅助槽结构,减少端部效应引起的推力波动,并改善

由端部效应引起的各相电流不对称现象,仿真和试验验证了其结果的正确性。文献[18]利用克里格插值和遗传算法计算筛选得出的弧型端部可以使推力脉动达到相对最小。

2.1.3 分段式铁心

文献[6,19]从重构具有对称循环特性的绕组入手,提出了一种分段式电枢铁心的方法,通过分析得出不同分段之间的间距,分段之间采用磁障连接,理论上可以使各段产生的边端效应力相互抵消,仿真和试验验证了该方法能够较彻底地消除边端效应的影响。

2.2 削弱齿槽力的方法

大多数永磁旋转电机削弱齿槽力的方法在PMLSM中也适用,还有学者针对PMLSM的结构特点提出了一些特有的削弱方法。

2.2.1 改变磁极参数或电枢参数

由理论分析可知通过合理改变气隙磁场或初级铁心的空间分布可以达到削弱齿槽力的目的^[20]。改变磁极参数的方法主要包括采用不同的极弧系数、不同的永磁体厚度和宽度、磁极偏移、斜极等。改变电枢参数的方法主要有改变槽宽、改变齿的形状(齿顶开辅助槽)、不等槽口宽、斜槽等。消除齿槽力最有效的方法为斜槽与斜极,但该方法增加了工艺的复杂性,且存在一定的横向窜动力。文献[21]对定、转子不等极距削弱齿槽力的机理进行了理论分析,给出了定子极距选取的计算公式,有限元分析和样机试验证明了理论的正确性。

2.2.2 合理选择槽极数配合

由文献可知槽极数的最大公约数与齿槽力的幅值具有负耦合的关系,合理选择槽极数可以在不增加工艺复杂性的基础上削弱齿槽力,故目前这种方法应用较多。文献[22]采用有限元软件对比分析了两种分数槽集中绕组的推力特性,得出了推力波动与推力比值最小的方案。文献

[23]提出一种槽极配合为9槽10极的圆筒型PMLSM,有限元分析和试验证明该电机推力密度大且具有较小的齿槽力。

2.2.3 双边错位

双边型PMLSM的两边完全对称的特殊结构可以为减少磁阻力提供一些思路。文献[24-25]分别提出一种双边错位式PMLSM,试验结果表明:合理地定子错位式布置可以有效降低齿槽力并抑制法向力。

2.3 削弱电磁脉动力的方法

2.3.1 改善气隙磁场波形

改善气隙磁场波形的方 法主要有优化磁极形状、合理设计磁路等。文献[26]分析了似Halbach充磁方式的优点,利用有限元方法分析出波形畸变率最小的磁极结构。文献[27]利用有限元方法分析了3种不同形状永磁体结构的气隙磁密波形,发现在有槽磁路中梯形永磁体结构的抗畸变性最强,合理选取参数可以得到较好的气隙磁密波形。

2.3.2 改善电枢绕组磁势波形

如何使电枢绕组磁势波形尽可能正弦化是电机设计过程中必须考虑的因素。长期积累下的经验有采用短距绕组、分布绕组、多相绕组等。针对电机驱动系统中大功率IGBT死区和管压降产生的谐波,采用注入谐波电压的方式可以起到抑制谐波电流的作用^[12]。

需要注意的是,有的方法可能对多种推力脉动源都有削弱作用(如组合铁心法),而有的在削弱一种效应力时,可能使电机的另外一种性能变差(使用分数槽集中绕组比使用整数槽分布绕组齿槽力要小很多,但相应地电枢绕组磁势中的谐波含量也变多),因此要结合需求综合考虑选择。当关注的优化指标较多时,可以采用全局优化算法进行综合优化,例如模拟退火算法、遗传算法、TABU算法、蚁群算法等^[20],其分类如表1所示^[28]。

表1 电机优化设计算法分类

算法	类别	收敛速度	受初始解制约	寻优能力	代表性算法
基于导数的算法	传统算法, 适合与磁路法结合	快	是	局部寻优	Powell法、罚函数法、 单纯形法、梯度法
智能算法或 启发式算法	现代算法, 适合与场计算方法和 有限元法结合	慢	否	全局寻优	模拟退火算法、遗传算法、 免疫算法、粒子群优化算法、 正交算法

3 PMLSM 推力脉动控制方法

电机设计与电机驱动控制的关系密不可分。在对 PMLSM 的推力波动进行抑制和补偿时,系统控制层面的方法也是有效的手段,成本也相对较低。目前已有的抑制推力波动的控制方法主要分为 3 种:传统控制策略、现代控制策略和智能控制策略。

传统控制技术譬如 PID 控制、矢量控制等,其算法简单,但要求对象模型确定且线性变化,在高精度控制系统中大都与其他控制方法相结合运用。

现代控制技术提高了对非线性变量的适应能力,发展出滑模变结构控制、自适应控制、预测控制、鲁棒控制等控制方法。文献[29]提出将神经网络和滑模控制相结合的方法,有效减弱系统抖动现象,提高了系统的鲁棒性。文献[30]设计了一种基于自适应控制和鲁棒控制的控制器,增强了对谐波的抗干扰能力。文献[31]在广义预测控制基础上,加入扰动观测器,提高了对速度的控制效率,使推力可以较平滑地输出。

智能控制策略的出现为控制多变量、强耦合、非线性的复杂系统提供了新的方向^[32],其将人的逻辑思维、学习能力应用到控制器的设计中,如模糊逻辑控制、神经网络控制等。文献[33]将模糊神经网络与 PID 结合,使系统具备了较强的抗干扰能力,提高了系统的自适应能力。文献[34]设计的经细菌觅食优化算法优化的 PID 神经元网络控制器具有较强的应对复杂系统的能力,对推力波动有较好的抑制效果。

4 结 语

通过对目前已有的关于永磁直线同步电机推力脉动削弱的研究工作的分析与总结,得出以下结论。

(1) 伴随着材料科学的发展和交叉学科的不断融合,PMLSM 的推力特性和其控制方法近年来得到不断改善和发展,将引起其应用领域的巨大变革。

(2) PMLSM 的主要推力波动来源于边端效应、齿槽效应和电磁波动,其中边端效应力作为直线电机特有的结构导致的推力波动,对其机理和

削弱方法的研究有待进一步深入。

(3) PMLSM 绝大多数分数槽集中绕组用来降低齿槽力和提高功率密度,但其绕组磁势的低次谐波很难消除。目前对分数槽集中绕组的应用只是停留在已有的几种槽极配合,还有很多理论上的问题值得研究。

【参 考 文 献】

- [1] 张明元,马伟明,何娜.长初级直线电动机分段供电技术综述[J].中国电机工程学报,2013,33(27): 96.
- [2] 焦留成,程志平.永磁直线同步电动机特性及控制[M].北京:科学出版社,2014.
- [3] 唐丽婵,齐亮,王庆东.国产直线电机在机床中的应用研究[J].装备机械,2010(1): 8.
- [4] 于立娟,秦平,李登举,等.永磁直线同步电动机推力波动分析及抑制方法综述[J].微特电机,2014,42(7): 33.
- [5] 汤蕴璆.电机内的电磁场[M].北京:科学出版社,1981.
- [6] 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,2011.
- [7] 韩雪岩,祁坤,张哲,等.永磁同步直线电机磁阻力分析及抑制措施[J].电工技术学报,2015,30(6): 70.
- [8] ZHU Y W, KOO D H, CHO Y H. Detent force minimization of permanent magnet linear synchronous motor by means of two different methods[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2008, 44(11): 4345.
- [9] KRISHNAN R.永磁无刷电机及其驱动技术[M].柴凤,译.北京:机械工业出版社,2013.
- [10] 黄克峰,李槐树,周羽.圆筒型永磁直线电机齿槽力解析[J].哈尔滨工程大学学报,2014,35(5): 613.
- [11] 陈卫宝,范承志,叶云岳.圆筒永磁直线电机齿槽力综合优化[J].哈尔滨工程大学学报,2011,32(7): 943.
- [12] 廖勇,甄帅,刘刃,等.用谐波注入抑制永磁同步电机转矩脉动[J].中国电机工程学报,2011,31(21): 119.
- [13] 王斐然,廖有用,陈进华,等.Halbach 阵列永磁同步直线电机边端力最小化研究[J].微特电机,2017,45(4): 20.
- [14] 张颖.永磁同步直线电机磁阻力分析及控制策略研究[D].武汉:华中科技大学,2008.
- [15] ZHU Y W, LEE S G, CHUNG K S, et al.

- Investigation of auxiliary poles design criteria on reduction of end effect of detent force for PMLSM[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(6): 2863.
- [16] 石昊天, 李斌. 附加磁极法优化永磁直线电机定位力[J]. 电机技术, 2016(1): 1.
- [17] JANG K B, KIM J H, AN H J, et al. Optimal design of auxiliary teeth to minimize unbalanced phase due to end effect of PMLSM [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47(5): 1010.
- [18] ZHANG Y, YUAN J, XIE D, et al. Shape optimization of a PMLSM using Kriging and genetic algorithm[C] // 5th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 2010: 1496.
- [19] 邵能. 低推力波动组合铁芯永磁同步直线电机的特性分析与优化[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- [20] 王秀和. 永磁电机[M]. 2版. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [21] 任宁宁, 李槐树, 薛志强, 等. 不等距圆筒型永磁直线电机推力波动研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2017, 38(2): 241.
- [22] 卢琴芬, 程传莹, 叶云岳, 等. 每极分数槽永磁直线电机的槽极数配合研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(36): 68.
- [23] WANG J, WEST M, HOWE D, et al. Design and experimental verification of a linear permanent magnet generator for a free-piston energy converter[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(2): 299.
- [24] 程传莹. 双边型水冷式永磁直线同步电机的设计与分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [25] KIM S A, ZHU Y W, LEE S G, et al. Electromagnetic normal force characteristics of a permanent magnet linear synchronous motor with double primary side [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2013, 50(1): 4001204.
- [26] 王咏菲. 圆筒型永磁直线同步电机的电磁场分析与研究[D]. 天津: 天津大学, 2008.
- [27] 王秀静, 相志辉. 三种不同形状永磁体圆筒型永磁直线电机气隙磁场研究[J]. 防爆电机, 2016, 51(4): 5.
- [28] 陈梁远, 李黎川. 压缩机用直线电机及其关键技术的发展综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(15): 52.
- [29] LI L, GU Z, TIAN J. Neural network-sliding mode control of permanent magnet synchronous linear motor [C] // 2016 Chinese Control and Decision Conference, IEEE, 2016: 3061.
- [30] YAO B, XU L. Adaptive robust motion control of linear motors for precision manufacturing [J]. Mechatronics, 2002, 12(4): 595.
- [31] ROBBRECHT E. Robust continuous generalized predictive control of a permanent magnet synchronous motor drive [C] // 2009 IEEE Electrical Power & Energy Conference, 2009.
- [32] 郭庆鼎. 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.
- [33] 党明辉, 郭亮. 基于模糊神经网络 PID 的永磁同步直线电机控制算法研究[J]. 浙江理工大学学报(自然科学版), 2006, 35(1): 52.
- [34] 赵晓东. 永磁直线同步电机的推力波动抑制研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2017.

收稿日期: 2018-07-11

声 明

本刊已许可万方数据、重庆维普、中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、北京世纪超星信息技术发展有限责任公司在其网站及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网

络传播本刊全文。该社著作权使用费与本刊相关费用抵消。如作者不同意文章被收录, 请在来稿时向本刊声明, 本刊将做适当处理。

《电机与控制应用》编辑部