

永磁同步直线电机直接驱动控制技术

赵国平¹, 吴红星¹, 张立华², 李立毅¹

(1. 哈尔滨工业大学 电气工程及自动化, 哈尔滨 150001; 2. 哈尔滨电工仪表研究所, 哈尔滨 150001)

摘要: 永磁同步直线电机构成的直线电动舵机具有结构简单, 体积小, 高动态响应能力等特性。本文介绍了永磁同步直线电机推力波动产生的原因, 对国内外直线电动舵机的应用背景和永磁同步直线电机的发展现状进行综述, 分析直线电机直接驱动中控制策略的特点。

关键词: 永磁同步电机; 直线电机; 控制策略

中图分类号: TP273; T351; TM341; TM359.4

文献标志码: A

文章编号: 1001-6848(2013)08-0072-07

Technology of Direct Drive for Permanent Magnet Synchronous Linear Motor Control

ZHAO Guoping¹, WU Hongxing¹, ZHANG Lihua², LI Liyi¹

(1. Harbin Institution of Technology, Electrical Engineering and Automation, Harbin 150001, China;

2. Harbin Research Institute of Electrical Instrument, Harbin 150001, China)

Abstract: The linear electromechanical actuator composed by permanent magnet synchronous linear motor has the advantages of simple structure, small size, high dynamic response and other characteristics which can enhance the missiles precision-guided. The paper presented the reason of thrust wave and discussed the permanent linear magnet synchronous motor and the application background of the linear electromechanical actuator, analysed the characteristics of a variety of linear motor drive control strategy.

Key words: permanent magnet synchronous motor; linear motor; control strategy

0 引言

电动舵机伺服系统根据驱动方式的不同, 可以分为间接驱动型和直接驱动型。直接驱动电动舵机具有结构简单灵活, 输出推力大, 控制精度高, 便于检测维护等特点, 已成为电动舵机主流研究方向。应用永磁同步直线电机构成的直线电动舵机直接驱动伺服系统, 采取直接利用电能产生直线运动的工作方式, 消除传统将旋转运动转换成直线运动所需的齿条丝杠和涡轮螺杆等中间转换装置, 使系统结构更简单, 重量更轻便, 并且应用直线电机直接驱动也消除弹性形变对系统产生的影响, 提高舵机系统运动的平稳性。

采用永磁同步直线电机构成的直线电动舵机具有结构简单, 体积小, 高动态响应能力等特性, 有效的提升导弹的精确制导能力。本文对国内外直线电动舵机的应用背景和永磁同步直线电机的发展现状进行综述, 分析各种直线电机直接驱动控制策略的特点。对开展永磁同步直线电机直接驱动舵机技

术进一步深入研究有着重大意义。

1 永磁同步直线电机推力波动因素

为实现应用对电动舵机的永磁直线同步电机的高精度和高动态响应伺服控制, 必须对磁直线同步电机的位置, 速度和输出推力进行精确的控制。而永磁同步直线电机驱动控制系统采用直接驱动, 由于不存在中间缓冲环节, 推力的波动将直接作用在负载上, 其将直接影响系统的控制性能, 这正是永磁同步直线电机直接驱动系统的控制难点。

对永磁同步直线电机直接驱动系统进行分析, 可以看出, 目前系统的推力波动主要由以下几个方面产生。

机械传动系统中普遍存在摩擦力。由于摩擦力的性质不同, 其大小变化上体现着严重的非线性, 使直线电机产生推力波动, 严重影响直线电机的控制性能。

纵向端部效应的影响最大, 纵向端部效应的存

收稿日期: 2012-12-25; 修回日期: 2013-03-04

作者简介: 吴红星(1975), 男, 副教授, 从事特种电机设计及其控制技术。

在会增加电机的附加损耗，并且端部作用力会引起永磁同步直线电机的推力波动，产生机械振动和噪声，在低速运行时还可能造成机械系统的共振，进而严重恶化直线电机直接驱动系统的伺服性能，是限制直线电机应用的主要原因之一^[1]。

永磁体空间磁场分布中含有的高次谐波成分将产生电磁扰动，产生推力波动，进而影响伺服系统的控制效果。温度场的变化和磁场的饱和会导致如永磁同步直线电机的定子相自感、定子相互感、定子相电阻等直线电机的电磁参数产生非线性变化，将会给电机的控制性能带来较大的影响，如果控制系统的鲁棒性不足以克服参数变化对伺服系统产生的影响，同样会产生较大的推力波动。

2 直线电动舵机系统应用背景

随着战术导弹精确制导技术研究的深入，目前，国际各大研究机构均已经着手开始对应用于电动舵机领域的永磁同步直线电机直接驱动系统进行研究。

S A Evans 针对直线电动舵机的工作特性，对直线电动舵机的本体结构的设计进行了优化。其选择的是圆柱对称的圆筒形直线电机的结构形式，如图 1 所示。S A Evans 对动子的结构进行优化，有效的提高电机的运行刚度，同时为了提高电机的动态性能，对电机的外形尺寸进行优化，采用沿着动子中心平均打孔的手段来减小电机动子的质量，提高电机的快速反应能力^[2]。

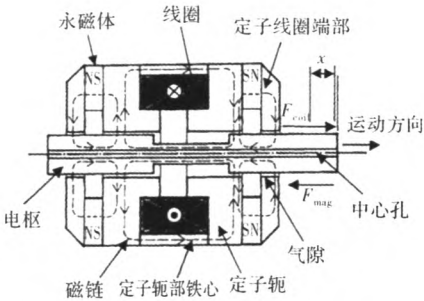


图 1 圆筒形直线电动舵机结构示意图

Joe Y Xiang 为提高电动舵机的控制精度，对如图 2 所示的直线电机的结构进行进一步研究，建立直线电动舵机的非线性磁场模型，并且根据建立的非线性磁场模型推导新的电机动态模型，作者还通过了有限元分析软件和实验测试结果验证所设计的非线性模型的正确性，基本能够满足控制系统的需要。同时作者提出一种基于能级跟踪的电流控制策略，并且通过仿真和实物实验验证了控制策略的正确性^[3]。

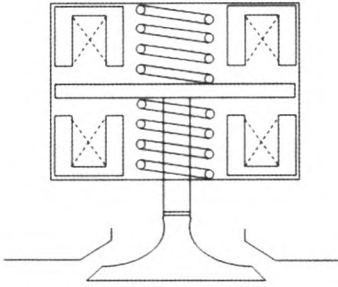


图 2 直线电动机结构示意图

Anton V Lebedev 对如图 3 所示的直线电机的结构进行分析研究。探讨电动舵机的电磁特性和电磁行为，建立电动舵机的磁路模型和 3D 有限元分析模型，但是通过对实验测试结果分析，发现电机磁路模型的计算结果存在 15% ~ 25% 的计算误差，不能够用于电动舵机结构的设计中，仅有有限元模型能够充分的体现电机参数变化和表现系统中如电流和位置刚度等复杂的物理特性^[4]。

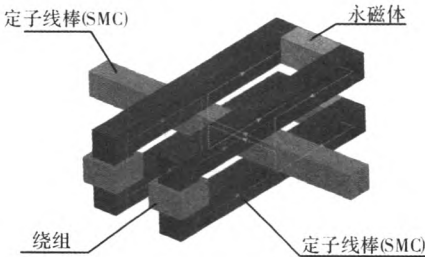


图 3 直线电机结构设计示意图

E A Lomonova 提出一种应用于电动舵机领域上的直线电机的一种详细的设计方法，其结构示意图如图 4 所示。同时研究出一种减小尺寸规格和绕组排布的设计理念，采用有限元模型仿真实验和实物测试实验对原始设计下的样机和改进设计下的样机进行的测试与比较，结果表明改进设计下的直线电机具有显著地性能优势^[5]。

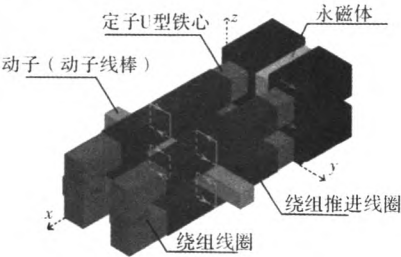


图 4 直线电机三维结构示意图

可以看出，目前国际上对直线电动舵机的研究还是主要集中在本体结构的设计优化和直线电动舵机的数学模型的推导上，研究用于电动舵机的永磁同步直线电机高精度高动态响应控制系统具有较高

的发展和应用前景。

3 永磁同步直线电机直接驱动技术

目前在永磁同步直线电机伺服控制领域上采用的控制策略主要有以下 8 种，包括基于传统自动控制理论的 PID 控制，基于现代控制理论的模型预测控制、自适应控制和鲁棒性控制，基于伪线性网络的滑模变结构控制，基于智能控制理论的模糊控制、专家控制和神经网络控制策略。

3.1 传统 PID 控制

目前在运动控制系统应用领域中使用最多的就是传统的 PID 控制策略，如图 5 所示。

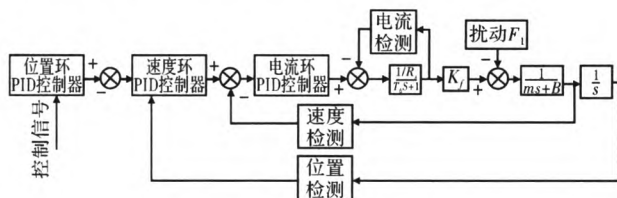


图 5 典型的 PID 三闭环伺服控制系统结构框图

虽然通过对现代控制理论研究科学界提出许多新的控制策略，但是由于 PID 控制方法巧妙的使用过去、现在和未来的状态变量，并且算法简单，控制方便，同时具有一定的鲁棒性，因而其已经成为运动控制系统的基本控制手段，在运动控制系统中得到的长足的应用和发展^[6]。

3.2 鲁棒性控制

控制系统的某项性能在某种扰动之下保持原状态的能力称为系统的鲁棒性。近些年来，鲁棒性控制理论得到了高速的发展，其中 G-Zames 在 80 年代提出的 H^∞ 控制方法是现在比较成熟的鲁棒性控制设计方法，其基本原理如图 6 所示。

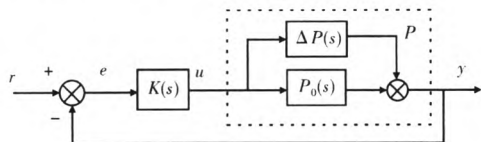


图 6 鲁棒性控制工作原理框图

图 6 中 P 为增广被控对象， K 为控制器， u 为输出控制项， ΔP 为包括扰动、传感器噪声、参考指令信号和模型不确定性的所有外部输入^[7]。

H^∞ 控制策略是针对一有限功率的系统模型扰动或外部干扰信号，在保证系统闭环稳定的前提下，通过调整系统控制器 K 的控制参数，使得有限输入的扰动能量对系统期望输出信号的稳态偏差的传递

函数的 ∞ 范数取得最小值，以达到系统抵抗扰动最优的目的^[8-9]。

3.3 模型预测控制

模型预测控制是在 20 世纪 70 年代后期才正式由 Rechalet, Mehra 等提出^[10]，旨在系统能够获得控制对象任一时刻目标采样值的基础上，通过对模型预测控制器参数的调整，使优化后的控制对象输出量与目标量之间的整体偏差闭环控制最小的控制方式。

在永磁同步直线电机伺服控制系统电流环应用模型预测控制，能够极大减小目标值和系统实际值之间的时间延迟，提高电流环的带宽和响应时间，甚至可以实现电流环的无差拍控制的目的。根据具体预测校正控制方式的不同，电流的预测校正控制可以简单的分为直接 PWM 预测校正控制和 PWM 预测校正控制 (Deadbeat 预测控制)。直接 PWM 预测校正控制的结构原理图如图 7 所示，其通过评价函数对所有可以采用的开关矢量在对控制系统目标电流的作用效果进行预测评估，进而获取评估结果最小的开关矢量来控制下一个 PWM 周期的开关动作，使得电流快速达到目标值。

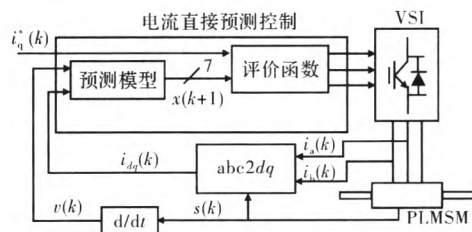


图 7 直接电流预测结构示意图

图 8 为 PWM 预测控制结构示意图，PWM 预测校正控制 (Deadbeat 预测控制) 对下一开关周期所需要的指令电压矢量进行预测，使得控制系统的目标电流能够在下一开关周期之内达到指令参考电流值，相比于直接 PWM 预测控制，其控制思路更加的直接明确。在 Deadbeat 预测控制下，系统能够准确地得到参考电流，而不是使实际电流尽可能接近参考电流^[11]。M Susanu 对 Deadbeat 预测控制在理论上

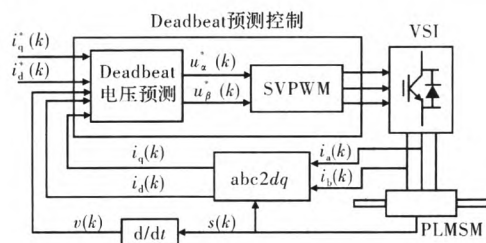


图 8 PWM 预测 (Deadbeat) 控制结构示意图

进行研究, 证明其在 1 个 PWM 周期即能够使系统的电流值达到指令电流值, 极大的提升伺服系统的控制性能^[12]。

但是, 由于模型预测控制要求精确的获得受控系统的结构和数学模型, 对模型参数的要求比较高, 在系统工作条件比较苛刻的条件下将无法达到所期望的控制效果。

3.4 自适应控制

在永磁直线同步电机的控制运行的过程中, 系统模型的参数往往是不能够精确得到的, 甚至是随着运动状态而改变的, 因而可以采用自适应控制的方式对系统随运动状态而变化的系统参数和外界的干扰加以辨识和消除, 提高系统的控制性能。根据系统自适应控制器的工作原理进行划分, 可以将自适应控制器划分为对系统参考模型实时跟踪的模型参考自适应控制器(如图 9 所示)和对系统实际模型实时辨识的自适应校正控制器(如图 10 所示)。

Tan 使用自适应控制算法对直线电机控制系统进行了优化补偿, 将系统模型优化为一个二阶模型和摩擦力与经验力波纹的复合结构, 应用自适应算法对系统摩擦力和纹波力进行补偿, 提升系统的控制精度^[13]。Bin Yao 针对直线电机齿槽间隔推导出直线电机定位力的简化表达式, 通过自适应算法对摩擦力和定位力进行了补偿, 提高了系统的控制精度^[14]。

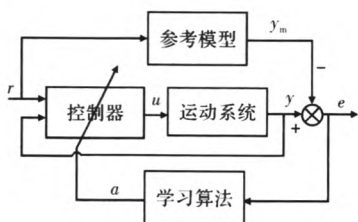


图 9 模型参考自适应模型

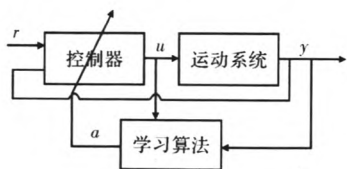


图 10 自适应校正控制模型

但是自适应控制本质上来讲是对控制系统的一种线性化的近似, 并且要求对系统参数或者扰动的变化特点知道的较为清楚的条件才能够获得最佳的控制性能, 对于强耦合、强非线性的永磁同步直线电机控制系统, 所设计的自适应率不一定总能保

证系统的稳定性, 单独使用的情况下很难达到最佳的控制性能。

3.5 变结构控制

变结构控制首先是根据控制系统的性能指标, 设计一个满足控制对象工作特性的工作超平面, 而后在变结构系统的非线性的控制之下, 使得控制对象按照所设定的运行轨迹高频、小幅度的在工作超平面附近反复切换, 最终迫使系统沿着设定的工作超平面稳定滑动到工作平衡点, 最终达到系统的控制性能要求的某个邻域范围之内。

滑模控制是一种典型的变结构控制策略, 在永磁同步直线电机伺服控制系统中得到长足的应用。赵金在设计交流伺服控制系统中采用了内环外环串联滑模控制器的控制结构, 使得系统具有非常强的鲁棒性, 但是系统的控制过程中存在的比较大的抖振^[15]。Hung John Y 应用滑模控制在直线电机伺服控制系统中, 提高系统的快速响应能力, 加大系统的鲁棒性^[16]。K. David Young 在系统中使用了变速趋近率的滑模控制方式, 使得系统具有更快的动态响应精度, 但是抖振的问题仍然影响着系统的性能^[17]。

虽然变结构控制系统具有快速的动态响应能力和良好的鲁棒性, 但是抖振的问题仍然限制其在高精度永磁同步直线伺服控制系统中的应用。

3.6 神经网络控制

根据神经网络在控制器中工作方式不同, 可将神经网络控制分成两种神经控制和混合神经网络控制。神经控制是指以神经网络为基础形成的独立的智能控制器, 典型的神经网络直接逆控制, 如图 11 所示。而混合神经网络则是应用神经网络的优化和学习能力来改善传统控制的智能控制方法, 典型的控制策略如神经网络预测控制, 如图 12 所示。

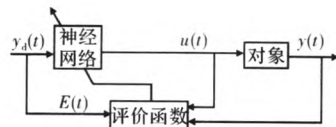


图 11 神经网络直接逆控制结构图

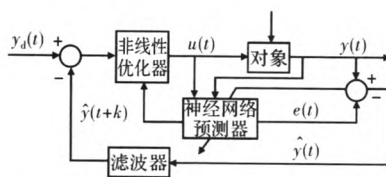


图 12 神经网络预测控制结构图

在永磁同步直线电机伺服控制系统中往往应用神经网络对非线性函数的超强的拟合能力,来补偿强耦合、强非线性系统对控制性能的影响,一般不在系统中单独使用

3.7 模糊控制

模糊控制方式是智能控制方式在伺服控制领域中最常使用的一种控制方式,也是唯一一种商品化、芯片化的一种控制方式。

典型的模糊控制器结构原理框图如图 13 所示。模糊控制是一种智能控制技术,它吸取人类思维所具有的模糊性的特点,根据该领域的专家的知识 and 经验构建模糊控制系统的模糊集,而后根据系统控制对象的状态参照模糊集对系统控制器参数利用模糊推理原则进行推理判断调整,从而实现对包含模型不确定性和扰动的系统的智能调节。模糊控制方式不需要系统精确的数学模型,同时控制的实时性好,适合于在永磁同步直线伺服控制系统中应用。

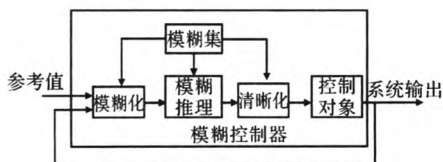


图 13 模糊控制器的结构原理框图

叶云岳针对于直线电机伺服系统种强耦合、强非线性的特点,比较了传统的 PID 控制方式和模糊控制方式的特点,证明了模糊控制特别适合于直线电机伺服控制系统变负载条件下的工作^[18]。

You-ping Chen 应用模糊控制方法在永磁同步直线电机伺服控制系统中,提高了系统在长行程上的伺服控制精度,加强了系统对扰动的抵抗能力,提高了系统的鲁棒性^[19]。

但是,模糊控制方式也有着自身的缺点,对于简单的系统,能够比较容易的通过经验来获得模糊集,但是对于复杂的系统,特别是对于高精度,高动态响应的伺服系统,很难准确的获得模糊集。并且,由于模糊控制从本质上来讲是一种非线性的 PD 控制方式,单独使用很难保证系统的重复定位精度。

3.8 复合控制

目前通常使用的各种控制策略都有其自身的优点和缺点,单独使用都很难满足高精度、高动态响应的直线电动舵机伺服驱动控制系统的性能要求,因而,对于直线电机直接驱动系统,往往将前文所论述的多种控制策略综合在一起,通过优势互补的

复合控制的形式来实现直线电动舵机系统高动态响应、高精度的驱动性能要求。

潘霞远将 PID 控制方式与 H^∞ 鲁棒性控制方式结合在一起,形成了 H^∞ 鲁棒 PID 控制算法,综合了两种控制方式的优点,实验表明,这种控制方式既满足系统的控制精度的要求,也提高了系统的鲁棒性^[7]。

Qing Hu, Lu Xiuhe 等人分别在不同的永磁直线伺服系统中将模糊控制方法与传统的 PID 控制方式结合在了一起,对伺服系统进行控制。模糊 PID 算法的原理框图如图 14 所示。

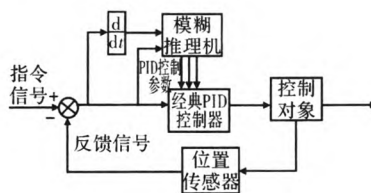


图 14 模糊 PID 控制系统的原理框图

在系统中采用模糊 PID 自整定算法,依据反馈量的不同实时在线的校正控制系统的 PID 参数,使得在不同状态下控制系统的 PID 参数总保持在最优的条件下,使得系统能够达到稳态最优和动态最优,提高了系统的控制性能,加强了系统的鲁棒性^[20-22]。

鲁棒性控制器具有抗干扰能力强的优点,但是由于保证了在整个状态空间上的稳定性,使得控制的精度受到了限制。Li Xu, Bin Yao 等人采用了自适应鲁棒性控制器对系统进行控制,其工作原理框图如图 15 所示。

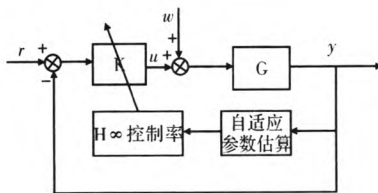


图 15 自适应鲁棒性控制的原理框图

根据系统的结构通过自适应算法辨识系统的参数落在某一范围内,然后通过鲁棒性算法对系统进行控制,既增强了系统的鲁棒性,有加快了系统的瞬时响应能力^[23-24]。

Al-Otaibi 在滑模控制系统应用模型扰动抑制法(MBDA)设计了一个干扰观测器,有效的直线伺服控制系统中的扰动进行了抑制,进而削弱了滑模控制器的抖振,提高了系统的控制精度^[25]。

Bousserhane 等人将模糊控制算法和滑模控制算法综合在一起, 用于设计永磁同步直线电机伺服控制系统。模糊滑模控制器的原理框图如图 16 所示。

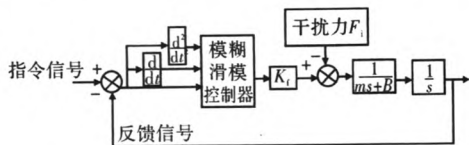


图 16 模糊滑模控制器的原理框图

模糊滑模控制算法综合了两种算法的优点, 当系统远离滑模控制器的切换面的时候, 由模糊算法计算出较大的开关函数, 使得系统快速的向切换面靠近; 当系统接近切换面的时候, 模糊算法计算出较小的开关函数, 减小滑模控制器在切换面附近的抖动, 即保证了系统的快速性和鲁棒性, 同时又减小了抖振, 提高了系统的控制精度^[26]。

由于神经网络具有对非线性系统出色的逼近能力, 所以通过具有自适应性、自学习能力的神经网络常常作为补偿环节应用于永磁同步直线电机伺服控制系统中, 进而能够在伺服系统控制的过程中实时的获得更精确的系统的模型、参数和扰动的大小。将神经网络算法和其它控制算法相结合, 使得永磁同步直线电机伺服控制系统具有更好的控制性能。目前典型的控制算法有神经网络自适应控制^[27-28], 神经网络滑模控制^[29-30]和神经网络鲁棒性控制^[31-32]等算法。

4 结 语

传统的导弹舵机系统常采用气压舵机和液压舵机伺服系统, 其结构繁冗复杂限制了导弹舵机系统的发展。采用永磁同步直线电机构成的直线电动舵机有效的提升导弹的精确制导能力。文中分析目前国内外直线电动舵机系统的应用背景, 对国内外永磁同步直线电机的发展现状进行总结。探讨永磁同步直线电机直接驱动的控制策略, 并比较不同控制策略的特点。

参考文献

- [1] 曹文霞. RBF 神经网络整定 PID 控制直线永磁同步电机的研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2009.
- [2] Evans S A, Smith I R, Kettleborough J G. Permanent-magnet Linear Actuator for Static and Reciprocating Short-stroke Electromechanical Systems[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2001, 6 (1): 36-42.
- [3] Xiang J Y. Modeling and Control of a Linear Electro-mechanical Actuator (LEMA) for Operating Engine Valves[C]. Industry Applica-

tions Conference, 2002: 1943-1949.

- [4] Lebedev A V, Lomonova E A, Van Leuven P G, et al. Analysis and Initial Synthesis of a Novel Linear Actuator With Active Magnetic Suspension[C]. Industry Applications Conference, 2004: 2111-2118.
- [5] Lebedev A V, Lomonova E A, Vandenput A J A, et al. Optimal Design Considerations for a Linear Actuator With Active Magnetic Suspension[C]. Power Electronics and Applications, 2005: 1-10.
- [6] 刘璐. 基于直线电机的精密位置伺服控制系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006: 10-11.
- [7] 潘霞远. 高精度永磁直线伺服系统的研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2008: 10, 16-17, 26-40.
- [8] 蔡超豪. 直线永磁同步伺服电动机的鲁棒 H_∞ 控制[J]. 电气传动自动化, 2004, 26(3): 20-22.
- [9] 郭庆鼎, 孙艳娜. 直线永磁同步伺服电动机的鲁棒 H_∞ 自适应控制[J]. 电工技术学报, 2000, 15(4): 1-4.
- [10] Kwon W H. Advances in Predictive Control: Theory and Application[C]. First Asian Control Conf., 1994: 208-217.
- [11] 洪俊杰. 绕组分段永磁直线同步电机电流预测控制的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010: 9-11.
- [12] M Susanu, D Dumur. Using Predictive Techniques within CNC Machine Tools Feed Drives[C]. Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control, 2005: 5150-5155.
- [13] Tan K K, Huang S N, Lee T H. Robust Adaptive Numerical Compensation for Friction and Force Ripple in Permanent-magnet Linear Motors[J]. IEEE Trans. Magnetics, 2002, 38(1): 221-228.
- [14] Bin Yao, Li Xu. Adaptive Robust Motion Control of Linear Motors for Precision Manufacturing[J]. Mechatronics, 2002, 12(4): 595-616.
- [15] 赵金, 万淑云, 孙晓鹏, 等. 交流伺服系统基于滑模变结构理论的控制方案综述[J]. 电气传动, 1996, 26(1): 2-6.
- [16] Hung John Y, Gao Weibing, Hung James C. Variable Structure Control: a Survey[J]. IEEE Trans. Industrial Electronics, 1993, 40(1): 2-22.
- [17] K David Young, Vadim I Utkin, Umit Ozguner. A Control Engineer's Guide to Sliding Mode Control[J]. IEEE/ASME Trans. Control Systems Technology, 1999, 7(3): 328-342.
- [18] 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.
- [19] You-Ping Chen, Dai-Lin Zhang, Wu Ai, et al. An Improved Fuzzy System for Position Control of Permanent Magnet Linear Motor[C]. Machine Learning and Cybernetics, Proceedings of 2005 International Conference on, 2005, 5(5): 2731-2735.
- [20] Qing Hu, Jing Zhang, Dongmei Yu, et al. Velocity Control for Rope-less Elevator Using Permanent Magnet Linear Synchronous Motor with Adaptive Fuzzy PID[C]. Automation and Logistics, 2007 IEEE International Conference on, 2007: 2361-2366.
- [21] Qing Hu, Haiyan Yu, Yonghong Mu, et al. A Novel Fuzzy PID Velocity Control of Linear Elevator Driven by the Permanent Magnet Linear Synchronous Motor[C]. Electrical Machines and Systems, 2008: 1539-1542.
- [22] Lu Xiuhe, Wu Ke, Guo Min. The Permanent Magnet Linear Synchronous Motor Distribution System Based on Fuzzy PID Control [C]. Intelligent Computation Technology and Automation (ICIC-

- TA), 2011: 542-545.
- [23] Li Xu, Bin Yao. Adaptive Robust Precision Motion Control of Linear Motors with Negligible Electrical Dynamic: Theory and Experiments[J]. IEEE/ASME Trans. Mechatronics, 2001, 6(4): 444-452.
- [24] Bin Yao, Mohammed Al-Majed, Masayoshi Tomizuka. High-Performance Robust Motion Control of Machine Tools: An Adaptive Robust Control Approach and Comparative Experiments[J]. IEEE/ASME Trans. Mechatronics, 1997, 2(2): 63-76.
- [25] Al-Otaibi Z S, Jack A G. Utilising SMC in Single Phase Permanent Magnet Linear Motors for Compressor Applications[C]. Power Electronics, Machines and Drives, 2008: 752-756.
- [26] Bousserhane I K, Boucheta, A, Hazzab A, et al. Fuzzy-Sliding Controller Design for Single Sided Linear Induction Motor Position Control[C]. The International Conference on "Computer as a Tool" Digital Object, 2007: 1942-1947.
- [27] 李士勇. 模糊控制、神经网络和智能控制理论[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1992: 55-62.
- [28] Faa-Jeng Lin, Po-Hung Shen, Ying-Shieh Kung. Adaptive Wavelet Neural Network Control for Linear Synchronous Motor Servo Drive[J]. Magnetics, IEEE Transactions on, 2005, 41(12): 4401-4412.
- [29] Lin F J, Lin C H, Huang P K. Recurrent Fuzzy Neural Network Controller Design Using Sliding-mode Control for Linear Synchronous Motor Drive[J]. Theory and Applications, IEE Proceedings, 2004, 151(4): 407-416.
- [30] Qing Hu, Hongxia Li, Hiayan Yu, et al. Neural Network Sliding Mode Controller for Linear Elevator Using Permanent Magnet Linear Synchronous Motor[C]. Natural Computation, Fifth International Conference on Digital Object, 2009: 213-216.
- [31] Faa-Jeng Lin, Tzann-Shin Lee, Chih-Hong Lin. Robust H_{∞} Controller Design with Recurrent Neural Network for Linear Synchronous Motor Drive[J]. Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 2003, 50(3): 456-470.
- [32] Guo Qingding, Wang Limei. H_{∞} Control of Permanent Magnet Linear Synchronous Motor Based on Neural Network Command-compensator[C]. Advanced Motion Control, 7th International Workshop on Digital Object, 2002: 194-196.

(上接第 67 页)

4 试验分析

(1) 仿真验证了逆 F 放大器电路的可行性

由 Simulink 仿真电路结构可知, Scope 显示的波形为旋转变压器激磁绕组的激磁电压, 如图 4 所示。电压为无失真正弦波, 波形幅值大于 $20V_P - P$, 波形频率为 10 kHz, 与基波频率一致, 符合逆 F 类放大器输出要求。Scope1 显示的波形为 MOSFET 的漏极电压、电流波形, 如图 5 所示。波形的电压与电流相位差为 180° , 电压为近似的正弦半波, 电流为近似方波。通过对 Scope、Scope1 的分析表明驱动电路工作在逆 F 放大状态。

(2) 逆 F 类放大器效率有所提高

由理论分析可知, 逆 F 类放大器在最高工作效率时其输出阻抗为 F 类放大器的 2.467 倍。即逆 F 类有较小的集电极(漏极)工作电流, 可以减小输出管导通电阻引起的损耗提高输出效率。另外, 若两类放大器在相同大小的集电极(或漏极)电流下工作, F 类放大器需要较高的供电电压, 相对而言逆 F 类放大器更适用于低电压供电。

(3) 逆 F 类放大器输出波形得到明显改善

由输出波形分析可以看出, 逆 F 类放大器的输出波形图 4、图 5 与取自文献[2]中 F 类放大器的输

出波形图 6、图 7 比较, 图 4 与图 6 显示的负载电压波形基本相同, 但图 5 与图 7 漏极电压、电流波形则差别较大, 其中逆 F 类放大器的漏极电压、电流波形更趋近于半周期正弦波和理想方波。波形失真明显减小能够降低了对 RFC 等元件的要求。

5 结 语

由以上试验及分析可以看出, 利用逆 F 类放大器完全可以满足旋转变压器激磁绕组的驱动要求, 逆 F 类放大器激磁驱动电路工作效率较 F 类放大器有所提高。

参考文献

- [1] 解冰一, 蔡斐, 章宏, 等. F 类与逆 F 类功率放大器的效率研究[J]. 电子科技, 2011, 24(8): 78-80.
- [2] 刘雨棣, 祝恒洋. 基于 F 类放大器的旋转变压器功率驱动电路仿真研究[J]. 微电机, 2012, 45(11): 40-43.
- [3] KAI S T. Class-F Power Amplifier With Maximized PAE[D]. San Luis Obispo: California Polytechnic State University, 2010.
- [4] 付远钊. 大功率宽带 F 类功率放大器设计与调试策略分析[D]. 重庆: 电子科技大学, 2010.
- [5] Andrei Grebennikov, Bell Labs, Alcatel-Lucent. Load Network Design Technique for Class F and Inverse Class F PAs[J]. High Frequency Electronics, 2011(3): 58-76.