The Optimization of the Parameters of Linear Motor's Control System Based on PMAC

Jie YANG[1], Qingdong YANG[2], Liang TONG[3]
Beijing Information Science & Technology University, Beijing, China，100192
1. yangjie.21@163.com, 2. 13501060954@139.com, 3. tongliang@tsinghua.org.cn

Abstract: Limited by the structure of the permanent magnet synchronous linear motor (PMSLM) itself, if the adjustment of the control system's parameters were unreasonable, the performances of the control system would fail to meet the requirements. Based on studying the mathematical model of the permanent magnet synchronous linear motor, this paper focused on analysis the current loop and the position/speed loop of the servo control system, and achieving the decoupling control by vector control method. This paper adapted to the PID control algorithm plus the velocity feed-forward, the acceleration feed-forward and the NOTCH servo filter. The reasonable regulation of the permanent magnet synchronous linear motor's PID parameters made the permanent magnet synchronous linear motor to achieve the best results. The measured experimental data of the permanent magnet synchronous linear motor validated the feasibility of this method, and all of that could pave the way for the application of the control algorithms in the future.

Key Words: Linear Motor; PMAC; Servo Control

基于 PMAC 的直线电机控制系统参数的优化

杨杰 [1], 杨庆东 [2], 童亮 [3]
北京信息科技大学, 北京, 中国, 100192
1.yangjie.21@163.com, 2. 13501060954@139.com, 3. tongliang@tsinghua.org.cn

【摘要】受永磁同步直线电机本身结构的制约，如果控制系统参数的调节不合理，将导致直线电机的控制性能达不到要求。本文在分析研究永磁同步直线电机数学模型的基础上，着重讲述了对电流环和位置/速度环的分析，实现由矢量控制的解耦控制方法。提出了基于 PMAC 中速度前馈、加速度反馈加 NOTCH 滤波器的 PID 控制算法，并对其 PID 参数的合理调节，使得直线电机的性能达到最佳的控制效果。通过直线电机实验平台测得的实验数据来验证该算法的可行性，为以后提出新的控制算法并验证其正确性和有效性做铺垫。

【关键词】直线电机; PMAC; 伺服控制

1 引言

永磁同步直线电机(Permanent Magnet Synchronous Linear Motor)是近年来发展起来的一种新型进给传动方式，采用直接将电能转换为直线运动的驱动方式，取消了传统的从旋转电机到工作台之间的一切机械传动环节，具有高速、高精和“零传动”特性，因此直线电机正在成为高档数控机床的主要功能部件，是高端数控设备未来的发展趋势[1]。同样，由于永磁同步直线电机采用“零传动”的方式直接驱动负载，使得直线电机所固有的端部效应和齿槽效应所产生的磁阻力、外部的扰动、负载的变化以及系统参数摄动等不确定性因素，都未经衰减直接作用于直线电机本身，没有中间的缓冲，严重影响直线电机系统的定位精度和低速时的速度特性[2]。本文以基于 PMAC 速度加速度前馈控制算法为例，通过对直线电机实验平台控制系统参数调节的优化，使直线电机的性能达到最佳。

978-1-935068-47-1 © 2010 SciRes.

2 永磁同步直线电机的数学模型

永磁同步直线电机的 dq 轴数学模型为：

d 轴电压平衡方程：

$$L_d \frac{di_d}{dt} + R_s i_d = u_d + \omega L_q i_q$$

q 轴电压平衡方程：

$$L_q \frac{di_q}{dt} + R_s i_q = u_q - \omega L_d i_d - \omega \psi_f$$

永磁同步直线电机在 dq 轴坐标系下的电压平衡模型：

$$u_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega L_q i_q = R_s i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega \psi_q$$

$$u_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega L_d i_d + \omega \psi_f = R_s i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega \psi_d$$

机械运动力学方程： $K_f i_q = m\ddot{x} + B\dot{x} + F_d$

式中，R_s 分别为永磁同步直线电机的动子绕组电阻；L_d 和 L_q 分别为永磁同步直线电机 d 轴和 q 轴电感；$\omega = \frac{v}{p_n \tau} * 2\pi$ 为永磁同步直线电机的等效角速度，p_n 为极对数，τ 为极距；u_d、u_q 为永磁同步直线电机电压的 d 轴和 q 轴分量；ψ_d 为 d 轴电枢绕组磁链，$\psi_d = L_d i_d + \psi_f$。$\psi_q$ 为 q 轴电枢绕组磁链，$\psi_q = L_q i_q$；ψ_f 为永磁体磁链。

根据永磁同步直线电机的数学模型可以得出其模型图：

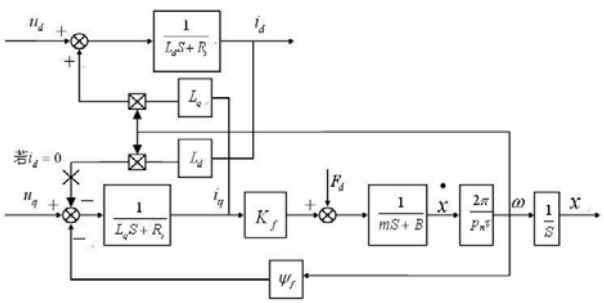

Figure 1. Diagram: mathematical model of PMSLM
图 1 永磁同步直线电机数学模型

3 伺服控制系统

3.1 永磁同步直线电机伺服控制系统的构成

永磁同步直线电机伺服控制系统的构成如图 2 所示。系统的基本组成由永磁同步直线电机（PMSLM）、驱动器（电压型 PWM 逆变器）、调理电路、位置传感器（光栅尺）、霍尔电流传感器以及一台工控机，其中工控机中包括 Turbo PMAC2 运动控制卡、PWM 信号发生器、模数转换器等。

在工控机的 PMAC 卡中输入控制信号，通过功率放大器和电压逆变器输出一定的电压信号控制直线电机（包括被测直线电机一台和加载电机两台）的运动。电流传感器位于直线电机之前，直接检测驱动装置输出的电压信号，电流信号直接反馈给 PMAC 卡，而位置传感器（光栅检测装置）检测到的正弦波或者方波信号细分后反馈给数模转换器，经过转换传给 PMAC 卡。

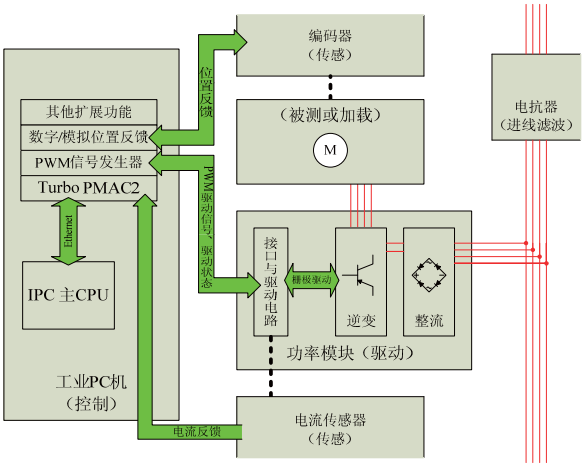

Figure 2. Diagram: contorl diagram of linear motor
图 2 直线电机实物的基本控制框图

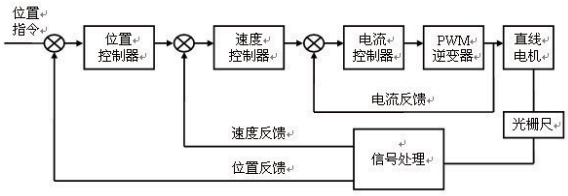

Figure 3. Diagram: strcture of servo control system
图 3 伺服控制系统结构简图

图 3 所示为直线电机控制系统结构简图，该控制系统采用三个闭环控制，其中电流环为内环，位置/速度环为外环。位置指令经过位置/速度控制器输出电流信号，再通过电流控制器和 PWM 逆变器输出的电压信号，电流传感器检测到的电流信号直接反馈给电流环，三相电压驱动电机运动。位置传感器（光栅尺）检测到的正弦波或方波信号经过信号处理一部分反馈

给速度控制器，另一部分反馈给位置控制器。

3.2 电流环

在伺服控制系统中，为了使伺服电机具有快速响应和更高的定位精度，电流的反馈控制是非常必要的。PMAC 支持电流环闭环，把电流指令和实际电流值比较后得出相电压指令。这些相电压指令通过数值比较计算转换到 PWM 逆变器输出数字矩形波。功率放大器只执行功率转换任务。在这种控制模式下，PWM 输出三相电压指令给直线电机的每一相。通过直接控制功率晶体管的通断状态，最大限度地减少了 PMAC 中伺服环的计算和传输延迟。它支持较大的增益值，以获得更好的稳定性，加速度和抗干扰能力[3]。

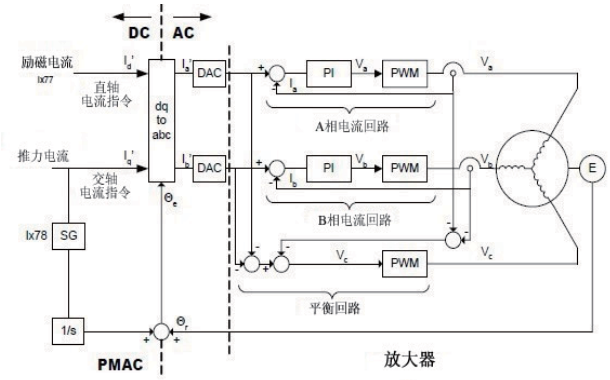

Figure 4. Diagram: contorl system of current loop
图 4 电流环控制系统

图 4 为电流环控制系统简图，从图上可以看出，左侧有两个电流控制量，包括直轴电流和交轴电流控制量。根据矢量控制原理，在直线电机数学模型中 u_d、u_q 的方程中存在耦合量 ω，而控制系统中的耦合会导致系统性能变差，如超调增大、调节时间变长等。采用控制 i_d 为零的磁场定向的矢量控制策略，可以实现对励磁电流和推力电流之间的解耦控制，其原理如图 3 所示，i_d = 0 时，交流电机控制就转变成直流电机控制。通过霍尔传感器检测的电流经过模数转换以及 abc 三相坐标系转换到旋转的 dq 坐标系，得到励磁电流 i_d 和推力电流 i_q 的测量值。利用 PID 控制器分别对励磁电流 i_d 和推力电流 i_q 的误差进行调节，从而达到对 i_d 和 i_q 的跟踪控制。

给电流环一个阶跃信号时，电流给定值为 5000，令 PI=0，P=1.78，I= 0.097，图 5 为电流环的实际电流响应曲线。实验结果：上升时间 tr=0.002s，峰值时间 tp=0.003s，无超调；

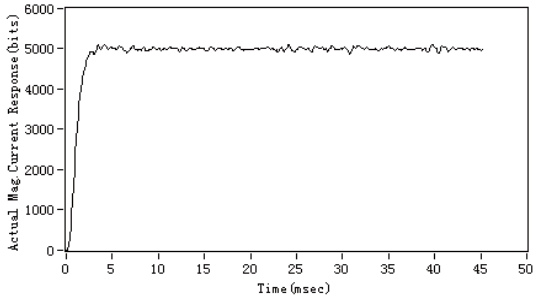

Figure 5. Curve: actual current response of current loop
图 5 电流环实际电流响应曲线

3.3 位置/速度环

图6为位置/速度环的带速度前馈和加速度前馈控制系统图。

在PMAC控制算法中，各参数所代表的变量分别为：

K_P：比例增益（I×30）；K_d：微分增益（I×31）；K_{vff}：速度前馈增益（I×32）；

K_i：积分增益（I×33）；IM：积分模式（I×34）；K_{aff}：加速度前馈增益（I×35）；

n_1 :带通滤波器系数(I×36)；n_2 :带通滤波器系数(I×37)；

d_1 :带通滤波器系数(I×38)；d_2 :带通滤波器系数(I×39)；

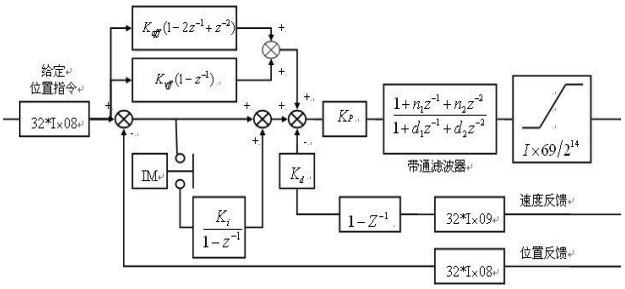

Figure 6. Diagram: PMAC PID+NOTCH Servo FILTER
图 6 基于 PMAC 直线电机速度加速前馈

系统中各个参数的调节过程如下：作为P参数的I×30，是系统的比例增益，作为I 参数的I×33，是算法中的积分增益；作为D 参数的I×31，是算法中的微

978-1-935068-47-1 © 2010 SciRes.

分增益；I×32是速度前馈，通过它可减少由于微分的引入所带来的跟随误差，I×35是加速度前馈，由它减少由于系统惯性所带来的跟随误差；在调整中，当I×34为0时，积分增益全程有效，当I×34为1时，积分增益只在控制速度为0时才有效。当速度前馈I×32太大时，会带来太大的跟随误差[4]。适当地加入加速度前馈，将使电机的性能达到更好[5]。在增加了适当的速度前馈和加速度前馈后，跟随误差和速度的相关性变弱，同时，跟随误差也得到大幅度的下降，从而使得整个系统的控制性能得到较大的提高[6]。

给定系统一个阶跃信号，令 K_P=890，K_d=2240，K_{vff}=10，K_i=0，K_{aff}=0；实验结果如图7所示：上升时间 t_r=0.031s，峰值时间 t_p =0.053s，超调率为6.0%；

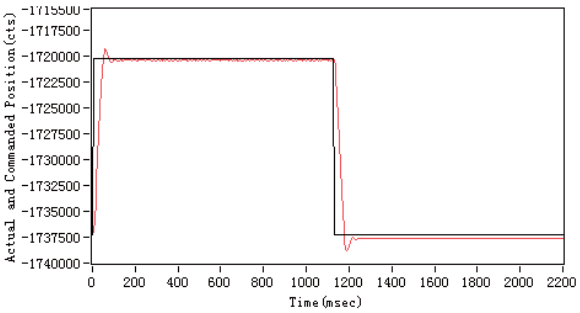

Figure 7. Curve: step response of actual and commanded position
图 7 给定位置和实际位置的阶跃响应曲线

给定系统一个正弦信号，令 K_P=890，K_d=2240，K_{vff}=10，K_i=0，K_{aff}=0；实验结果如图 8 和图 9 所示：上升时间 t_r=0.11s，峰值时间 t_p=0.81s；

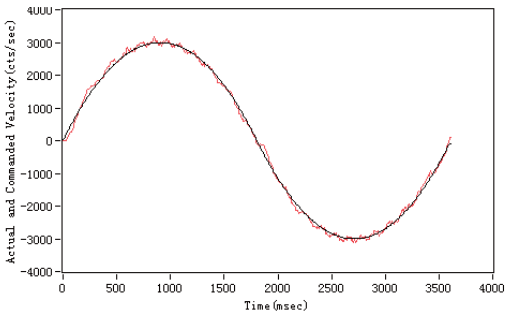

Figure 8. Curve: parabolic move follow of actual and commanded velocity
图 8 正弦信号速度跟随曲线

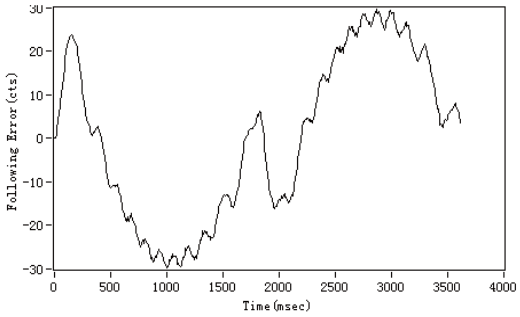

Figure 9. Curve: follow error of actual and commanded velocity
图 9 给定速度与实际速度的跟随误差

图 9 为图 8 中的速度跟随误差，其中最大跟随误差为 4.6μm。

实验表明：通过合理的参数调节，调节时间的很短，以及跟随误差比较小，充分说明了该直线电机达到了控制性能的要求，该控制算法能够使直线电机的控制性能达到快速响应和很高的跟随特性，直线电机的控制系统的控制性能达到了最佳的控制效果，验证了该控制算法的正确性和可行性。

4 结论

快速性、精确性和稳定性是评价控制系统的主要性能指标,而数控系统则特别要求在高速运行状态下,位置控制不产生超调;在稳定运行状态下,能够有较快的响应速度;在低速运行状态下,机床不产生“爬行”。要求整个系统能够快速而精确地定位。为了使直线电机控制性能达到最佳，提出了速度前馈和加速度前馈加 NOTCH 滤波控制算法。实验表明，通过对直线电机控制系统参数调节的优化，能够使直线电机达到最佳的控制性能，说明了该控制算法的正确性和可行性。

致谢

本文是在杨庆东和童亮导师的精心指导和大力支持下完成的。老师以其严谨求实的治学态度、高度的敬业精神、兢兢业业、孜孜以求的工作作风和大胆创新的进取精神对我产生重要影响。他们渊博的知识、开阔的视野和敏锐的思维给了我深深的启迪。

另外，我还要特别感谢刘若竹和吉彬同学对我实验以及论文写作方面的无私奉献，他们为我完成这篇

论文提供了巨大的帮助。

最后，再次对关心、帮助我的老师和同学表示衷心地感谢。

References (参考文献)

[1] LAI Guoting, WU Yuhou,FU Dawei. Velocity and Acceleration Feedback Control for Linear Motor Based on PMAC. Journal of Control Engineering of China, no.6, 2003.
赖国庭、吴玉厚、富大伟. 基于 PMAC 的直线电机速度/ 加速度前馈控制[J]，Control Engineering of China. 2003 年 11 月第 10 卷第 6 期.

[2] Zhang Ying. Research on the Analysis of Detent Force and Control Strategies of Permanent Magnetic Synchronous Linear Motor. Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, P.R.China. May, 2008:56-69.
张颖. 永磁同步直线电机磁阻力分析及控制策略研究[D]，华中科技大学. 2008 年.

[3] User Manual Turbo PMAC [M].

[4] WU Yu-hou, PAN Zhen-ning, ZHANG Ke, GAO Yu-shan, "Application of PID adjustment in the PMAC," Journal of Shenyang Architectural and Civil Engineering Institute，no.2, April 2004.
吴玉厚、潘振宁、张珂等. PMAC 控制器中 PID 调节的应用[J]. 沈阳建筑工程学院学报. 2004 年 4 月第 20 卷第 2 期.

[5] Zhuang,M.,Atherton,D.P. Automatic tuning of optimum PID controllers. IEE Proceedings-Part D: Control Theory and Applications, 1993, 140 (3):2 16-224.

[6] Gerco Otten,de,Vries Theo,JA. Linear motor motion control using a learning feedforward controller .IEEE/ASME Trans Mechatron, 1997, 2 :179-187.

978-1-935068-47-1 © 2010 SciRes.