

文章编号 1004-924X(2013)02-0371-09

# 直线电机精密运动平台轨迹跟踪控制器设计

张 刚, 刘品宽\*, 张 波, 丁 汉

(上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240)

**摘要:** 为了实现直线电机精密定位平台的位置和速度的轨迹跟踪控制, 本文基于内模控制(IMC)的基本原理, 在直线电机精密定位平台参数辨识的基础上, 设计了定位平台速度环的模型状态反馈(MSF)控制器和基于位置环 PID 和速度环 MSF 的级联控制器。将 PID/MSF 级联控制器与速度/加速度前馈控制(VFC/AFC)相结合, 构成了 PID/MSF+VFC/AFC 的复合轨迹跟踪控制器。该复合轨迹跟踪控制器通过整定速度前馈的增益来改善位置环偏差控制的跟踪滞后现象和动态响应, 增加控制系统的稳定性和伺服精度; 通过整定加速度前馈的增益在不减小级联控制器位置环增益的前提下, 减小速度前馈带来的超调量, 提高轨迹跟踪精度。基于 MATLAB/dSPACE 实时仿真控制平台, 实现了某直线电机平台的轨迹跟踪控制。仿真和实验结果表明, 该轨迹跟踪控制器的轨迹跟踪精度为 $\pm 0.028$  mm, 定位精度为 $\pm 4$   $\mu$ m, 满足直线电机精密定位平台轨迹跟踪控制的要求。

**关键词:** 永磁同步直线电机; 模型状态反馈; 速度/加速度前馈; MATLAB/dSPACE; 硬件在回路仿真

**中图分类号:** TP273; TM359.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132102.0371

## Design of trajectory tracking controller for precision positioning table driven by linear motor

ZHANG Gang, LIU Pin-kuan\*, ZHANG Bo, DING Han

(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

\* Corresponding author, E-mail: pkliu@sjtu.edu.cn

**Abstract:** In order to achieve the high precision trajectory tracking control of a positioning table driven by Permanent Magnetic Synchronous Linear Motor (PMSLM), This paper designs a hybrid trajectory tracking controller. The controller combines Model State Feedback (MSF) and Velocity/Acceleration Feedforward controls (VFC/AFC) to ensure the precision of a positioning table. Based on the principles of Internal Model Control (IMC) and the identified model of the positioning table, a MSF controller is proposed and the parameter calculation methods of the MSF controller are presented. Using the MSF model, a cascade PID/MSF controller is designed. The PID/MSF cascade controller is incorporated with the VFC/AFC control to construct a hybrid PID/MSF+VFC/AFC trajectory tracking controller. The VFC in the trajectory tracking controller is used to improve the velocity command response and the AFC is used to remove the overshoot induced by VFC without lowering the position loop gains. The hybrid trajectory tracking controller is implemented in the MATLAB/dSPACE real

收稿日期: 2012-09-15; 修订日期: 2012-10-24.

基金项目: 国家自然科学基金国际重大合作资助项目(No. 51120155001); 国家科技重大专项资助项目(No. 2009ZX02006-002); 国家自然科学基金资助项目(No. 50905118)

time control platform. Simulation and experimental results show that the controller can meet the requirements of precision tracking control and can achieve the tracking accuracy of  $\pm 0.028$  mm and the positioning accuracy of  $\pm 4 \mu\text{m}$  for a precision positioning table driven by PMSLM.

**Key words:** Permanent-magnet Synchronous Linear Motor (PMSLM); Model State Feedback(MSF); Velocity/Acceleration Feedforward controls (VFC/AFC); MATLAB/dSPACE; Hardware in the Loop Simulation (HILS)

## 1 引言

随着自动控制技术和微型计算机的高速发展,对各类自动控制系统的定位精度提出了越来越高的要求。永磁同步直线电机(Permanent Magnetic Synchronous Linear Motor, PMSLM)驱动系统由于取消了一些响应时间常数较大的(如滚珠丝杠、联轴器等)机械传动件,减少了由于这些机械传动件弹性变形引起的传动误差和传动系统滞后带来的跟踪误差,使整个闭环控制系统动态响应性能大大提高,从而系统定位精度高,传动刚度大<sup>[1]</sup>。目前,永磁同步直线电机驱动系统在精密机床<sup>[2-3]</sup>、电子制造<sup>[4-5]</sup>等领域得到了广泛应用。

然而,由于直线电机传动系统没有任何中间缓冲过程,影响控制系统性能的各种扰动因素如非线性摩擦、机械振动等将直接反映到直线电机的运动控制中,加上直线电机所固有的力波纹、端部效应等非线性及不确定因素的影响,给直线电机的高速、高精度运动控制器设计带来了一定的困难<sup>[6-7]</sup>。

位置/速度级联控制器<sup>[8]</sup>是实现伺服系统轨迹跟踪控制的常用方法,一般采用 P/PI,PI/P 的控制器结构。内模控制(Internal Model Control, IMC)<sup>[9-10]</sup>作为一种基于过程数学模型进行控制器设计的控制策略,目前广泛应用于过程控制、交流伺服控制<sup>[11-12]</sup>等领域,可用来实现伺服系统的速度环控制。相对于传统的内模控制,基于模型状态反馈(Model state feedback, MSF)的内模控制器<sup>[13]</sup>可以克服内模控制器响应慢、无超调、抗干扰能力差等缺点,提高伺服控制系统的速度响应和轨迹跟踪精度。

在控制理论中,反馈校正与前馈控制相结合

的复合控制<sup>[8-14]</sup>是提高伺服系统轨迹跟踪精度的常用方法,采用速度前馈<sup>[8]</sup>可有效提高控制器速度环的动态特性,提高系统的响应速度。加速度前馈则可以减小速度前馈带来的超调量,在不影响伺服系统绝对稳定性的前提下提高控制器的轨迹跟踪精度。

本文在分析内模控制基本原理的基础上,给出了基于内模原理的模型状态反馈控制器设计的具体步骤和控制器参数计算方法。基于永磁同步直线电机的  $d$ - $q$  轴数学模型和 MATLAB/dSPACE 实时仿真平台进行直线电机传递函数的参数辨识,设计了基于辨识参数模型的直线电机速度环模型状态反馈(MSF)控制器以及位置环 PID 和速度环 MSF 的 PID/MSF 级联控制器。该级联控制器与速度/加速度前馈控制(VFC/AFC)相结合,实现了直线电机驱动定位平台的轨迹跟踪控制。通过仿真分析和对比实验,验证了 PID/MSF+VFC/AFC 轨迹跟踪控制器的有效性和可靠性。

## 2 永磁同步直线电机的数学模型

图 1 所示为一个典型直线电机驱动的精确定位平台。由直线电机、线性导轨、直线光栅尺、工作台等部件组成。

直线电机大多采用矢量控制的方法,根据矢量控制的基本原理,永磁同步直线电机的  $d$ 、 $q$  轴数学模型<sup>[15]</sup>的电压方程式为:

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \frac{\pi}{\tau} v \psi_q \\ u_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \frac{\pi}{\tau} v \psi_d \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $u_d$ 、 $u_q$  为直线电机初级  $d$  轴和  $q$  轴电压, $R_s$  为初级绕组等效电阻, $\tau$  为永磁体极距, $v$  为永磁

直线同步电机的同步运动速度,  $i_d, i_q$  为  $d$  轴和  $q$  轴的电流,  $\Psi_d, \Psi_q$  为  $d$  轴和  $q$  轴的磁链。

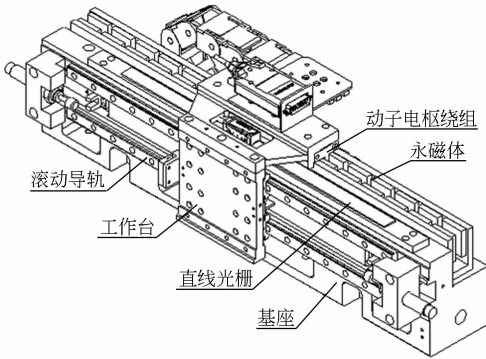


图 1 永磁同步直线电机驱动的精确定位平台

Fig.1 CAD model of a precision positioning table driven by PMSLM

永磁同步直线电机的磁链方程为:

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \psi_f \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases}, \quad (2)$$

式中:  $L_d, L_q$  为  $d$  轴和  $q$  轴的电感,  $\Psi_f$  为永磁体励磁基波磁链。

永磁同步直线电机的电磁推力方程为:

$$F_e = K[\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q], \quad (3)$$

式中:  $F_e$  为电磁推力,  $K = \frac{3\pi}{2\tau}$  为反电动势系数。

对于永磁同步直线电机,  $L_d = L_q = L$ , 则:

$$F_e = K_f i_q, K_f = \frac{3\pi}{2\tau} \psi_f, \quad (4)$$

式中:  $K_f$  为电磁推力系数。

永磁同步直线电机的机械运动方程:

$$M \frac{dv}{dt} + Bv + F_1 = F_e, \quad (5)$$

式中:  $M$  为电机初级质量,  $B$  为黏摩擦系数,  $F_1$  为负载阻力。

根据矢量控制的基本原理, 采用  $i_d = 0$  的矢量控制策略, 则永磁同步直线电机的数学模型可简化为:

$$\begin{cases} L \frac{di_q}{dt} = -R_s i_q - \frac{\pi}{\tau} \psi_f v + u_q \\ M \frac{dv}{dt} = K_f i_q - Bv - f_1 \end{cases}. \quad (6)$$

通过以上分析, 直线电机速度环和位置环的传递函数可以表示为:

$$G_v(s) = \frac{\tau \cdot K_f}{\tau(Ls + R)(Ms + B) + \tau \cdot K_f \cdot \psi_f}, \quad (7)$$

$$G_p(s) = \frac{\tau \cdot K_f}{s[\tau(Ls + R)(Ms + B) + \tau \cdot K_f \cdot \psi_f]}. \quad (8)$$

由于以上建模过程中忽略了直线电机本身存在的端部效应、力波纹等非线性因素的影响, 故在后续控制器设计过程中, 采用了理论推导与系统辨识相结合的建模方法, 在理论推导模型的基础上, 通过系统辨识的方法来确定直线电机驱动系统的传递函数, 并作为控制器设计的基础。

### 3 模型状态反馈控制器

#### 3.1 内模控制器

内模控制器(IMC)<sup>[9]</sup>的控制框图如图 2 所

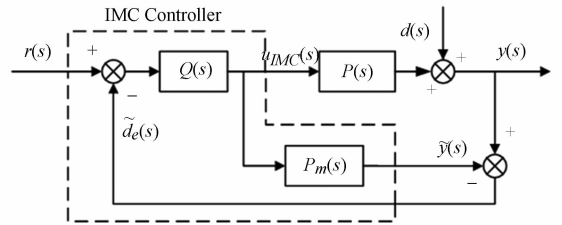


图 2 内模控制器的模型框图

Fig.2 Block diagram of internal model controller

示。其中  $Q(s)$  为内模控制器,  $P(s)$ 、 $P_m(s)$  分别为实际被控对象和被控对象的数学模型,  $r(s)$ 、 $y(s)$ 、 $d(s)$  和  $\tilde{d}_e(s)$  分别为系统的输入量、输出量、干扰输入量和干扰估计值,  $u_{IMC}(s)$  为内模控制器输出的控制量。

实际被控对象  $P(s)$  及被控对象的  $P_m(s)$  传递函数可表示为:

$$P(s) = \frac{N(s)}{D(s)} e^{-T_s}, D(0) = 1, \quad (9)$$

$$P_m(s) = \frac{N_m(s)}{D_m(s)} e^{-T_m s}, D_m(0) = 1. \quad (10)$$

按图 2 所示的 IMC 控制框图, 内模控制器的控制量  $u_{IMC}(s)$  及系统输出  $y(s)$  分别表示为:

$$u_{IMC}(s) = G_{ru}(s)r(s) - G_{du}(s)d(s), \quad (11)$$

$$y(s) = G_{ry}(s)r(s) + G_{dy}(s)d(s), \quad (12)$$

式中:  $G_{ru}(s) = \frac{1}{1 + Q(s)[P(s) - P_m(s)]}$ ,

$$G_{du}(s) = \frac{P_m(s)Q(s)}{1 + Q(s)(P(s) - P_m(s))},$$

$$G_{ry}(s) = \frac{Q(s)P(s)}{1+Q(s)[P(s)-P_m(s)]},$$

$$G_{dy}(s) = \frac{1-Q(s)P_m(s)}{1+Q(s)[P(s)-P_m(s)]},$$

分别为  $r(s)$ ,  $d(s)$  到  $u_{\text{IMC}}(s)$ ,  $y(s)$  的传递函数。

如果被控对象  $P(s)$  稳定, 其数学模型精确且可逆,  $P_m(s) = P(s)$ , 内模控制器取为被控制对象模型的逆, 即  $Q(s) = P_m^{-1}(s)$ , 则由式(12)可知,

$$y(s) = \begin{cases} r(s), r(s) \neq 0, d=0 \\ 0, r(s)=0, d \neq 0 \end{cases}. \quad (13)$$

由式(13)可知, 理想内模控制器的输出始终等于输入, 且可实现完全的扰动重构及跟踪控制。由于实际控制对象  $P(s)$  中分母  $D(s)$  的阶次高于分子  $N(s)$  的阶次, 理想内模控制器难于物理实现。因此, 通过增加滤波器环节并调整滤波器的结构和参数来确保内模控制器的可实现性, 提高系统的动态品质, 采用的内模控制器为:

$$Q(s) = P_m^{-1}(s)F(s), F(s) = \frac{1}{(1+\varepsilon s)^r}, \quad (14)$$

式中:  $F(s)$  为低通滤波器,  $r$  为滤波器的阶次, 取为被控对象  $P_m(s)$  传递函数分母  $D_m(s)$  与分子  $N_m(s)$  的阶次差,  $\varepsilon$  为滤波器参数, 是内模控制器唯一的设计参数。滤波器参数  $\varepsilon$  的调整需要同时兼顾外扰抑制特性和目标跟踪特性折衷处理, 通常按外扰抑制特性选定初值, 并根据具体控制对象实验加以整定, 滤波器参数  $\varepsilon$  初值取为:

$$\varepsilon \geq \left( \lim_{s \rightarrow \infty} \frac{D_m(s)N_m(0)}{20s^r N(s)D(0)} \right)^{1/r}. \quad (15)$$

### 3.2 模型状态反馈控制器

传统的内模控制器具有完全的输入跟踪及干扰重构等优点, 但是, 内模控制的输出无超调、响应时间慢, 且假定控制器的输出完全作用于被控对象, 未考虑实际控制对象模型误差及驱动器饱和和效应对控制器的约束, 对于高速度、高响应的直线电机伺服系统, 就需要在传统内模控制的基础上对控制器结构加以改进, 在充分发挥内模控制优点的基础上提高内模控制器的动态响应和抗饱和性能。

基于模型状态反馈的控制器如图 3 所示, 其中 MSF 的控制量  $u_{\text{MSF}}(s)$  和输出  $\tilde{y}(s)$  的估计值分别为:

$$u_{\text{MSF}}(s) = -\mathbf{K}(s)\mathbf{x}(s) + k_p[r(s) - \tilde{d}(s)], \quad (16)$$

$$\tilde{y}(s) = N_m(s)e^{-T_m s}\mathbf{x}(s), \quad (17)$$

式中:  $\mathbf{x}(s) = \frac{u(s)}{D_m(s)}$ , 为被控对象  $P_m(s)$  的状态矢

量,  $\mathbf{K}(s) = \sum_{i=0}^{n-1} k_i s^i$ , 为状态反馈矩阵,  $k_p$  为 MSF 控制器的增益。

MSF 控制器的反馈系数矩阵  $\mathbf{K}(s)$  和增益  $k_p$  的选取遵循以下原则: 在不考虑饱和效应的影响下, MSF 的控制量  $u_{\text{MSF}}(s)$  与内模控制器的控制量  $u_{\text{IMC}}(s)$  相等, 即:

$$u_{\text{MSF}}(s) = u_{\text{IMC}}(s). \quad (18)$$

MSF 控制器设计的关键在于增益  $k_p$  和反馈增益矩阵  $\mathbf{K}(s)$  的计算, 其详细计算步骤如下:

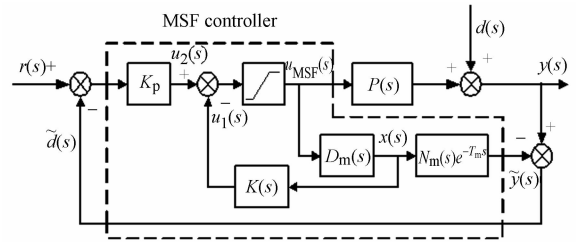


图 3 模型状态反馈控制器的模型框图

Fig. 3 Block diagram of MSF controller

(1) 对于最小相位系统的实际被控对象数学模型,  $P_m(s) = \frac{N_m(s)}{D_m(s)} e^{-T_m s}$ ,  $D_m(0) = 1$  按式(14)和(15)设计内模控制器(IMC)

$$Q(s) = \frac{D_m(s)}{N_m(s)(\varepsilon s + 1)^r}. \quad (19)$$

(2) 根据内模控制器  $Q(s)$ , 取 MSF 的增益  $K_p$  为内模控制器的稳态增益, 即,

$$K_p = Q(\infty) = \lim_{s \rightarrow \infty} \frac{D_m(s)}{N_m(s)(\varepsilon s + 1)^r}. \quad (20)$$

不同的滤波器参数  $\varepsilon$  对应于不同的  $K_p$  值, 实验过程中也可以根据实际的误差曲线, 按控制器的实际响应特性整定  $K_p$  值。

(3) 按以上计算得到的增益  $K_p$ , 计算 MSF 的状态反馈矩阵  $\mathbf{K}(s)$  的反馈增益  $k_i$

$$\mathbf{K}(s) = k_p N_m(s)(\varepsilon s + 1)^r - D_m(s) = \sum_{i=0}^{n-1} k_i s^i. \quad (21)$$

如果被控对象为非最小相位系统,  $D_m(s)$  只取相应控制对象传递函数中的最小相位部分, 且保证  $N_m(0) = P_m(0)$ 。

### 4 轨迹跟踪控制器设计

直线电机精密定位平台的轨迹跟踪控制器结构如图 4 所示,其中轨迹规划模块用于定位平台的位移、速度和加速度规划;反馈校正采用 PID/MSF 级联控制器,其中 PID 控制器用来保证系统的稳定性和鲁棒性,MSF 控制器用于控制对直线电机的速度环,复合前馈控制由速度前馈和加速度前馈两部分组成, $K_{VFC}$  为速度前馈系数, $K_{AFC}$  为加速度前馈系数。

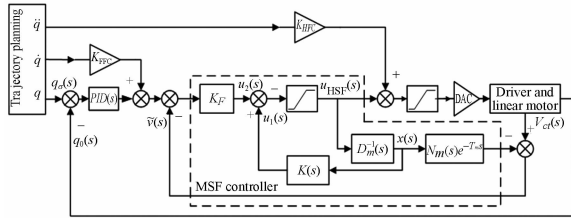


图 4 定位平台的轨迹跟踪控制器结构图

Fig. 4 Block diagram of trajectory tracking controller

基于直线电机传递函数模型,设计基于 dSPACE 实时仿真系统<sup>[16]</sup>的直线电机参数辨识系统,通过理论分析和系统仿真,确定级联控制器 PID/MSF 的控制参数和速度/加速度前馈控制的增益。在此基础上,通过实验过程中实际的位置误差和速度响应曲线,在线整定级联控制器参数和复合前馈控制器 VFC/AFC 的前馈增益。

#### 4.1 直线电机参数辨识

基于 MATLAB/dSPACE 实时仿真平台的永磁同步直线电机参数辨识实验系统如图 5 所示。实际的辨识对象包含式(8)中未建模的驱动器部件(包括驱动器电流环控制器、滤波器等)。采用伪随机二进制信号(Pseudo-random Binary Sequence, PRBS)作为系统参数辨识的输入信号  $u(s)$ ,通过 dSPACE 的 DAC 输出端口和编码器接口进行辨识信号的输入与直线电机位置/速度输出信号的采集。

伪随机二进制信号是一种重要的用于线性系统辨识的输入信号,具有近似白噪声的性质,可保证良好的辨识精度,且在工程中也比较容易实现。

由于直线电机的输出速度是由直线光栅的位置信号差分得到的,为了避免差分运算带来的高频干扰信号,采用直线电机的位置信号作为参数

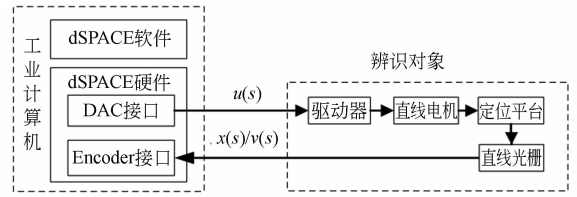


图 5 直线电机的参数辨识系统

Fig. 5 Parameter identification system for the PMSLM

辨识的输出信号。应用 MATLAB 辨识工具箱 (identification toolbox) 辨识的直线电机位置环传递函数为:

$$G_p(s) = \frac{22.25(6.593s+1)}{s(1.5186s+1)(0.0776s+1)} \quad (22)$$

实验数据和辨识模型的仿真输出结果如图 6 所示,辨识过程中需要在物理模型的精确度和控制器设计的复杂性两方面折衷处理。通过分析发现,含一个零点的传递函数 P2I2 与实验曲线有较好的匹配度,故将该模型作为以下直线电机精密定位平台 MSF 控制器设计的基础。

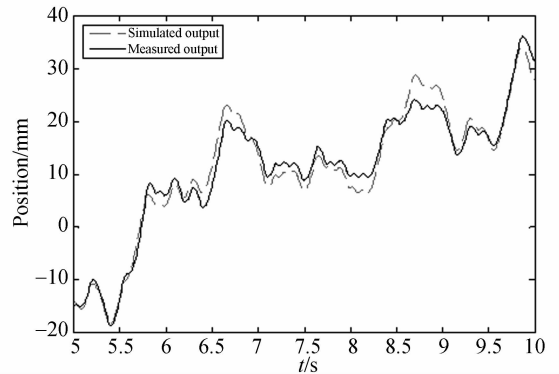


图 6 参数辨识实验曲线与仿真结果比较

Fig. 6 Comparison of experimental results and simulated output of identified model

#### 4.2 模型状态反馈控制器设计

根据实验辨识结果,直线电机定位平台速度环传递函数可表示为:

$$G_v(s) = \frac{22.25(6.593s+1)}{(1.5186s+1)(0.0776s+1)} \quad (23)$$

按式(19)~(21)设计的 IMC 及 MSF 控制器参数列于表 1,根据速度环的控制器参数,整定位置环 PID 控制器参数,保证了级联控制器的稳定性和鲁棒性。

表 1 位置环/速度环级联控制器参数

Tab.1 Parameters of cascade position/velocity controllers

控制器	控制器参数	
内模控制器	滤波器时间常数 $\epsilon$	0.004
	采样周期 (s)	0.001
	滤波器时间常数 $\epsilon$	0.004
模型状态反馈 控制器	增益 $k_p$	0.160 7
	状态反馈系数 $k_i$	[27.883, 3.469]
	饱和环节	$\pm 10$
	采样周期 (s)	0.001
速度环 PI 控制器	比例环节	2
	积分环节	0.05
	比例环节	50
位置环 PID 控制器	积分环节	150
	微分环节	0.05
	采样周期 (s)	0.004

基于 MATLAB/Simulink 精密定位平台的速度环 MSF 控制器如图 7 所示,图 7 中,直线电机速度环的传递函数表示为零极点形式。

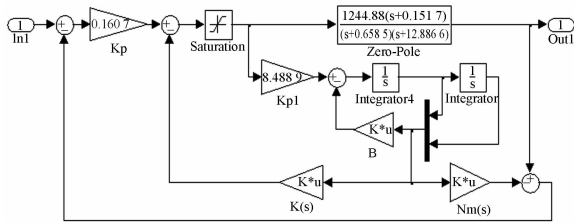


图 7 基于 MATLAB/Simulink 的 MSF 控制器

Fig.7 MSF implementation with MATLAB/Simulink

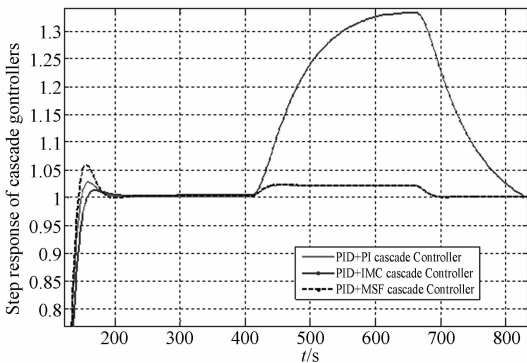


图 8 级联控制器的阶跃响应

Fig.8 Step responses of cascade controllers

图 8 为不同级联控制器的阶跃响应,由图 8 可知,MSF 控制器与 IMC 控制器相比,提高了系统的动态响应,控制系统响应速度较快,抗饱和性能较好。在仿真时间  $t=0.4\sim 0.7$  s 时加入一个

幅值为 0.2 的干扰信号,由图 8 的阶跃响应可知,MSF 和 PI 控制器均可在干扰作用解除后迅速收敛于目标值,而 IMC 控制器干扰抑制特性较差,显示了 PID/MSF 级联控制器良好的鲁棒性和干扰抑制特性。

#### 4.3 速度前馈/加速度前馈控制器设计

在 PID/MSF 级联控制器中,跟踪滞后是影响跟踪误差的主要因素,为了减小跟踪滞后的不利影响,需要在伺服速度环中引入复合前馈控制,提高伺服控制系统的稳定性和轨迹跟踪精度。

直线电机精密定位平台的速度前馈和加速度前馈如图 4 所示,轨迹规划模块输出相应的速度和加速度信号,其中速度信号通过速度前馈增益  $K_{VFC}$  加到 MSF 控制器的输入端,加速度信号通过为加速度前馈增益  $K_{AFC}$  前馈加到 DAC 的输入端。

通过 PID/MSF+VFC/AFC 控制系统的传递函数,可以确定 VFC/AFC 前馈控制器增益,复合前馈增益的初值通常按以下原则选取,

$$K_{VFC} = 0.7 \sim 0.95, K_{AFC} = \frac{K_f}{M}, \quad (24)$$

其中:  $K_f$  为电磁推力系数,  $M$  为定位平台的质量。

速度/加速度前馈增益的具体数值则在轨迹跟踪控制器实验过程中,通过 dSPACE 的 ControlDesk 变量输入模块,根据实验误差曲线在线整定。

## 5 实验结果分析

### 5.1 直线电机精密定位平台硬件结构

设计的直线电机精密定位平台采用 Parker 无铁芯直线电机, dSPACE 实时仿真平台作为控制器,美国 Glentek 的 Omega 系列伺服电机驱动器和 Heidenhain LIDA573 直线光栅作为位移反馈器件。

直线电机精密定位平台的机械结构如图 9 所示,其控制系统主要组成部件及相应技术指标如表 2 所示。

直线电机精密定位平台的控制器为 dSPACE 实时仿真系统,实现了和 MATLAB/Simulink/RTW 的完全无缝链接,是进行快速控制原型验证(Rapid Control Prototype, RCP)和硬件回路仿真(Hardware In the Loop Simulation, HILS)

的实时平台。

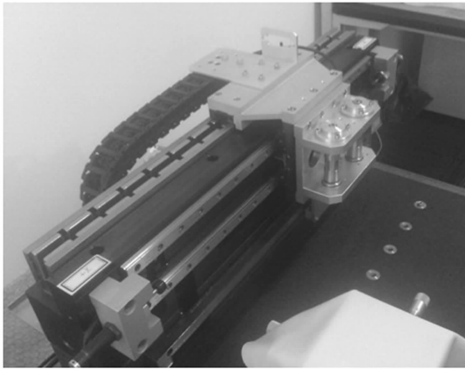


图 9 直线电机精密定位平台实验系统

Fig. 9 Experimental system of precision positioning table driven by linear motor

表 2 直线电机定位平台的主要性能指标

Tab. 2 Specifications of positioning table

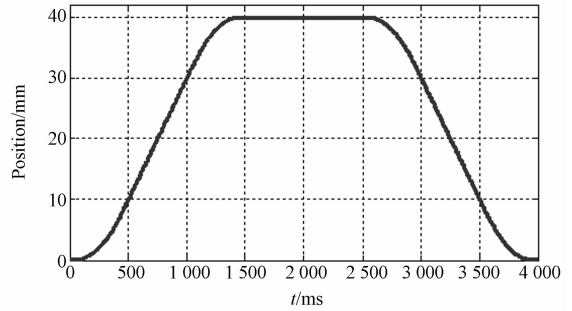
名称	型号	技术参数	
直线电机	210-2T	连续推力/N	57.4
		力常量/(N·Amp <sup>-1</sup> )	7.3
		反电动势/(V/m/s)	8.4
		电枢电阻/ $\Omega$	1.3
		电枢电感/mH	0.5
驱动器	SMB9715	饱和电流/Amp	16
		栅距/ $\mu\text{m}$	20
光栅尺	LIDA573	分辨率/ $\mu\text{m}$	0.4
		CPU 型号	RTI1103
dSPACE 控制器	DS1103	DAC 接口	16 位
		Encoder 接口	16 位

### 5.2 实验结果分析

为了避免参考输入突变造成的饱和、系统失稳等现象,减少运动过程中的振动和冲击,对参考运动轨迹按 7 段 S 型曲线规划,如图 10 所示。

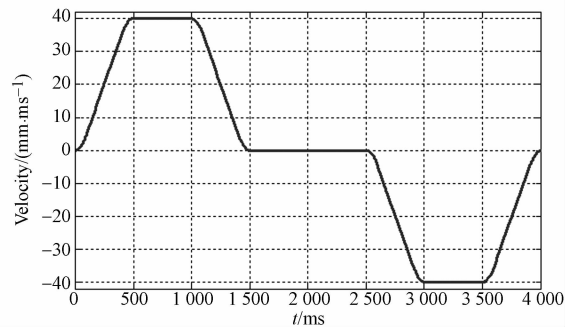
图 11 为轨迹跟踪控制器速度跟踪响应对比,可见在级联控制器参数相同的情况下,通过调整复合前馈 VFC/AFC 的前馈系数,可以有效地抑制高频噪声和模型误差带来的速度波动,速度跟踪曲线更接近规划曲线,而单独采用 PID/MSF 级联控制器时,由于响应滞后带来的影响,速度响应波动较大。

图 12 为复合轨迹控制器的轨迹跟踪误差对比,由图 12 可知,PID/MSF 控制器的最大跟踪误差为 0.14 mm, PID/MSF+VFC/AFC 的最大跟



(a) 轨迹规划的位置输入信号

(a) Position input signal of planned trajectory



(b) 轨迹规划的速度输入信号

(b) Velocity input signal of planned trajectory

图 10 参考轨迹的位置和速度输入指令信号

Fig. 10 Position and velocity input signal of planned trajectory

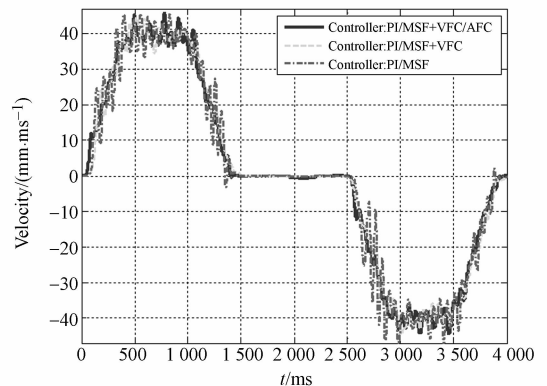


图 11 PID/MSF、PID/MSF+VFC 和 PID/MSF+VFC/AFC 速度响应

Fig. 11 Velocity output signals of PID/MSF, PID/MSF+VFC and PID/MSF+VFC/AFC controllers

踪误差为 $\pm 0.028$  mm, PID/MSF+VFC 的稳态误差最小,为 $\pm 4 \mu\text{m}$ , AFC 可有效地减小运动初

始阶段的超调和速度波动, PID/MSF + VFC/AFC 的稳态跟踪误差比 PID/MSF + VFC 大, 因此, 设计中应该根据实际的需求, 在整定 VFC 和 AFC 前馈增益的时候折衷处理, 以满足不同应用场合对轨迹跟踪精度、稳态定位精度的不同需求。

由图 12 可知, 轨迹跟踪误差的主要来源于于加/减速运动起始段克服摩擦力所带来的速度冲

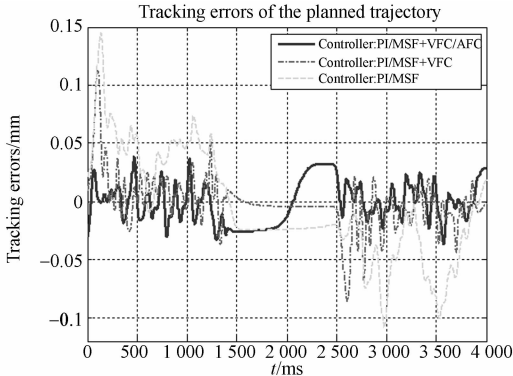


图 12 PID/MSF + VFC 和 PID/MSF + VFC/AFC 轨迹跟踪误差

Fig. 12 Tracking errors of PID/MSF + VFC and PID/MSF + VFC/AFC controllers

击, 如何抑制摩擦的非线性因素, 提高轨迹跟踪起始段的精度和动态响应是需要进一步深入研究的问题。

## 6 结 论

在分析了永磁同步直线电机  $d-q$  轴数学模型和内模控制基本原理的基础上, 基于实时仿真平台 MATLAB/dSPACE, 辨识了直线电机传递函数的各项参数, 基于参数辨识模型设计的位置环和速度环 PID/MSF 级联控制器克服了传统内模控制响应慢、抗饱和性能差等缺点。该级联控制器与速度/加速度前馈控制相结合, 构成了 PID/MSF + VFC/AFC 复合轨迹跟踪控制器。仿真分析和实验结果表明, 采用速度和加速度复合前馈控制时可使 PID/MSF 控制器的轨迹跟踪精度由 0.14 mm 提高到  $\pm 0.028$  mm, 单独采用速度前馈控制时可提高速度响应, 轨迹跟踪控制器的稳态误差收敛于  $\pm 4 \mu\text{m}$ 。所提出的轨迹跟踪控制器可以满足大多数工业应用场合对直线电机运动平台轨迹跟踪精度、定位精度的需求, 控制器参数调整方便, 具有较强的鲁棒性和抗干扰能力。

## 参考文献:

- [1] PRITSCHOW G. A comparison of linear and conventional electromechanical drives [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 1998, 47(2): 541-548.
- [2] ALTINTAS Y. Machine tool feed drives [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2011, 60(2): 779-796.
- [3] 林献坤, 于垂顺, 李郝林. 2X/Y 直线进给轴直线轮廓误差的学习补偿方法 [J]. *光学精密工程*, 2011, 19(5): 1048-1053.
- LIN X K, YU CH SH, LI H L. Learning-based linear contour error compensation method for 2X/Y-type linear feed axes [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(5): 1048-1053. (in Chinese)
- [4] DING H, XIONG Z. Motion stages for electronic packaging design and control [J]. *Robotics & Automation Magazine, IEEE*, 2006, 13(4): 51-61.
- [5] 刘强, 张从鹏. 直线电机驱动的 H 型气浮导轨运动平台 [J]. *光学精密工程*, 2007, 15(10): 1048-1053.

- LIU Q, ZHANG C P. H-type air-bearing motion stage driven by linear motors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(10): 1048-1053. (in Chinese)
- [6] LEE T H, TAN K K, HUANG S. Adaptive friction compensation with a dynamical friction model. *Mechatronics* [J]. *IEEE/ASME Transactions on*, 2011, 16(1): 133-140.
- [7] BASCETTA L, ROCCO P, MAGNANI G. Force ripple compensation in linear motors based on closed-loop position-dependent identification. *Mechatronics* [J]. *IEEE/ASME Transactions on*, 2010, 15(3): 349-359.
- [8] ELLIS G H. *Control system design guide: a practical guide* [M]. Academic Press, 2004.
- [9] GARCIA C E, MORARI M. Internal model control. A unifying review and some new results [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, 1982, 21(2): 308-323.
- [10] RIVERA D E, MORARI M, SKOGESTAD S. Internal model control: PID controller design [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, 1986, 25(1): 252-265.
- [11] KAWATO M. Internal models for motor control

and trajectory planning [J]. *Current Opinion in Neurobiology*, 1999,9(6):718-727.

- [12] WANG Y, XIONG Z H, DING H. Robust internal model control with feedforward controller for a high-speed motion platform [C]. *IEEE*, 2005:187-192.
- [13] BROSILIOU C, JOSEPH B. *Techniques of model-based control* [M]. Prentice Hall PTR, 2002.
- [14] 孙丽娜, 宋悦铭, 戴明. 采用复合控制提高机载光电平台的数引跟踪精度[J]. *光学精密工程*, 2008,16(2):265-269.  
SUN L N, SONG Y M, DAI M. Improving digit-

al-leading tracking precision for photoelectric platform by complex control [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(2):265-269. (in Chinese)

- [15] 郭庆鼎, 等. 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.  
GUO Q D, et al.. *Precision control technology of linear AC servo system* [M]. Beijing: China Machine press, 2000. (in Chinese)
- [16] QUIJANO N, PASSINO K, JOGI S. *A Tutorial Introduction to Control Systems Development and Implementation with dSPACE* [M]. Columbus: The Ohio State University, 2002.

#### 作者简介:



张刚(1973—),男,江苏连云港人,博士研究生,2002年于北京航空航天大学获硕士学位,主要从事精密运动平台、机器人动力学和精密运动控制等方面的研究。E-mail: zgrobot@sjtu.edu.cn



刘品宽(1969—),男,湖北天门人,博士,研究员,1991年、1995年、2003年于哈尔滨工业大学分别获学士、硕士、博士学位,主要从事纳米级微定位技术、微操作机器人,电子制造中的高速高精度定位与操纵,以及纳米制造中的精密驱动与控制等方面的研究。E-mail: pkliu@sjtu.edu.cn



张波(1977—),男,河南新蔡人,博士,助理研究员,2007年于上海交通大学获博士学位,主要从事纳米制造中的精密驱动与控制,微电子封装工艺等方面的研究。E-mail: zhangbowq@sjtu.org

#### 导师简介:



丁汉(1963—),男,安徽省枞阳人,1989年于华中理工大学获博士学位,上海交通大学第四批长江学者奖励计划特聘教授,德国洪堡学者,国家杰出青年基金获得者,973首席科学家,主要从事数字化制造中的测量、建模、操作和加工、机器人技术、先进电子制造等方面的研究。Email: hding@sjtu.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)