

文章编号 1004-924X(2007)10-1540-07

# 直线电机驱动的 H 型气浮导轨运动平台

刘 强<sup>1</sup>, 张从鹏<sup>2</sup>

(1. 北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100083; 2. 北方工业大学 机电工程学院, 北京 100041)

**摘要:**建立了双边直线电机驱动的 H 型气浮精密定位平台, 对该精密定位系统的气浮导轨设计方法和双边直线电机同步运动控制等关键技术进行了研究。利用有限元法设计了气浮导轨, 分析了气膜压力场的分布情况, 采用预加载技术提高气浮导轨的承载能力和刚度等性能。静态特性实验表明, 开发的定位平台气浮导轨具有较高的承载能力和刚度, X、Y 导轨的垂直方向静刚度为 276.9 N/ $\mu\text{m}$  和 333.3 N/ $\mu\text{m}$ 。设计了基于同步速度偏差的改进型并联结构同步控制器, 采用模糊控制实现 PID 参数的自适应在线整定。运动实验表明, 改进的控制器具有较高的同步控制精度, 速度同步精度比一般同步控制提高了 3 倍多, 适合于具有强机械耦合的多电机同步运动控制。H 型直线电机气浮定位平台具有承载能力强、精度高的优点, 可以用于光刻机和光学检测等精密工程领域。

**关键词:**直线电机; H 型运动平台; 同步控制; 气浮导轨; 预加载

**中图分类号:**TH133.35; TP273 **文献标识码:**A

## H-type air-bearing motion stage driven by linear motors

LIU Qiang, ZHANG Cong-peng

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100083, China;

2. College of Mechanical and Electromechanical Engineering, North China

University of Technology, Beijing 100041, China)

**Abstract:** An H-type air bearing precise positioning stage driven by dual linear motors is established. Some key techniques, including design method of air bearing slider and synchronic-motion control of dual linear motors, are studied. The air-bearing sliders are designed by finite element method, and the pressure field distribution of gas film in the bearing gap is analyzed. Preload technologies are adopted to improve air bearing's static performance. The static experimental results show that the preload sliders developed by finite element method have high load capability and stiffness. The static stiffness in the vertical direction of X-slider is 276.9 N/ $\mu\text{m}$  and the Y-slider is 333.3 N/ $\mu\text{m}$ . The improved parallel structure synchronous controller based on velocity synchro-error is designed, which adaptively tunes the PID parameters on-line by the fuzzy controllers. The motion experimental results show that the improved synchronous controller has high synchronous precision, the velocity synchronous precision is higher three times than the common parallel control, and will be suitable for multi-motor synchronization control with strong mechanical coupling. The H-type air bearing positioning stage driven by linear motors has high load capability and high precision, and can be used in precision engineering area such as photoetching machine and optical inspecting equipments.

**Key words:** linear motor; H-type motion table; synchronous control; air bearing slider; preload

收稿日期: 2007-01-22; 修订日期: 2007-06-29.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 50390063)

## 1 引 言

精密定位技术是精密工程领域的一项关键技术。随着先进电子制造特征尺寸越来越小,电子制造设备中的运动平台都需要达到  $0.1 \sim 1 \mu\text{m}$  亚微米、微米级的定位精度<sup>[1-2]</sup>。由于直线电机驱动的气浮定位平台集中体现了直线电机和空气轴承的优点,真正实现了无摩擦和“零传动”,被越来越多地应用到如光刻、大面板液晶显示器制造和检测、光学扫描检测等设备中。

但是,静压气浮导轨具有承载能力低、刚度低、稳定性差等缺点,常用的工程方法计算的气浮导轨在静态性能上存在较大的误差<sup>[2-6]</sup>。H 型运动平台的双边直线电机需要同步驱动,同时又存在较强的机械耦合作用,采用一般的串联和并联结构同步控制器无法达到满意的控制效果,而且容易造成机械损伤。由于结构参数的变化,工作台的控制性能会随着工作台运动到不同位置而降低<sup>[7-11]</sup>。

本文以直线电机驱动的 H 型气浮工作台的开发应用为目的,研究提到的两个关键技术问题。首先,采用有限元计算方法设计气浮导轨,分析了气浮导轨气膜内的压力分布,并采用不同预加载技术来设计高承载能力、高刚度的气浮导轨;然后,对于工作台双边直线电机的同步控制问题,在传统并联同步控制的基础上,设计了基于速度同步偏差的同步误差补偿器,为了消除工作台运动过程中结构参数变化对控制性能的影响,采用模糊 PID 控制,在线自适应整定 PID 控制器参数。

## 2 工作台气浮导轨设计

### 2.1 静压气体轴承有限元算法

静压气体轴承的设计,是指外部加压气体轴承在低速、中速下工作时,轴承润滑以静压效应为主的工况下所进行的设计,主要围绕轴承稳定工作时的静载荷、静刚度、气体消耗量和摩擦功耗等性能指标进行设计。

过去常用工程计算方法进行设计,所谓工程计算方法就是通过简化的经验公式得到雷诺方程

的解析解。工程计算方法设计的空气轴承静态特性存在较大的误差,而且对于结构形状或流动状态比较复杂的轴承或要求知道轴承压力分布的场合,工程计算方法无法实现。

有限元计算方法是直接从雷诺方程出发进行编程计算,利用计算机来求解气膜压力场内的离散压力值,通过 CAD 来实现气体轴承的静态设计,是空气轴承设计的一个新方法。采用有限元计算方法可以精确得到空气轴承内气膜压力的分布情况和静态特性。

小孔节流式气浮导轨静压止推气体轴承结构和有限元计算网格划分如图 1 所示。

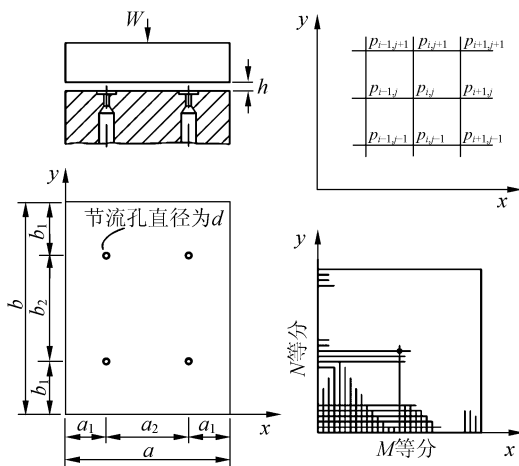


图 1 止推气体轴承及其网格划分

Fig. 1 Thrust air bearing and its grid plotting

根据气膜内气体等温、定常状态的假设,将流动压缩气体的雷诺方程简化为:

$$\frac{\partial^2 p^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p^2}{\partial y^2} = 0. \quad (1)$$

由于轴承周围都是空气环境,其边界条件为:

$$\begin{cases} x=0, x=a \text{ 时 } p=p_a \\ y=0, y=b \text{ 时 } p=p_a \end{cases}, \quad (2)$$

其中,  $p_a$  为环境的气体压力。

根据式(2)所示的气体轴承的边界条件,可以求解出式(1)简化雷诺方程的离散解—气膜内的压力分布。然后根据压力分布求解承载能力、刚度、流量、气膜厚度等气体轴承的静态参数。气浮导轨有限元计算的流程图如图 2。

图 2 中的参数说明:  $p_0$  为节流孔出口压力,  $p_s$  为供气压力,  $W$  为承载能力,  $h$  为气膜厚度,  $\omega_{in}$

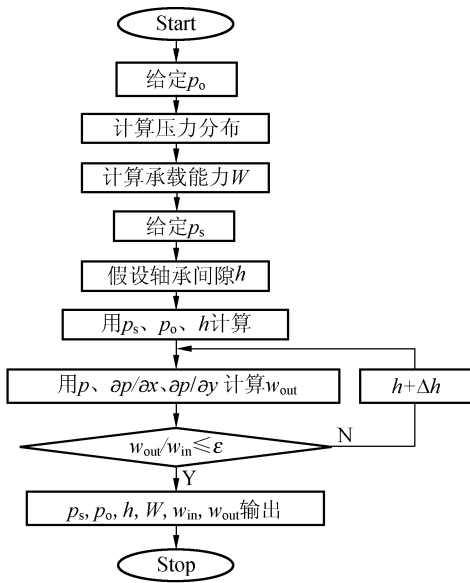


图 2 气体止推轴承有限元计算流程图

Fig. 2 Finite element method flowchart of thrust air bearing

为流入空气轴承的气体量,  $w_{out}$  为流出空气轴承的气体量。

根据图 2 所示的计算流程, 集成了工程计算方法和有限元计算方法, 设计了出空气轴承的计算软件。利用此开发工具, 对工作台的一个四节流孔止推轴承进行计算, 将有限元的各节点压力值绘制成三维图, 得到的气膜压力场的三维分布图如图 3。

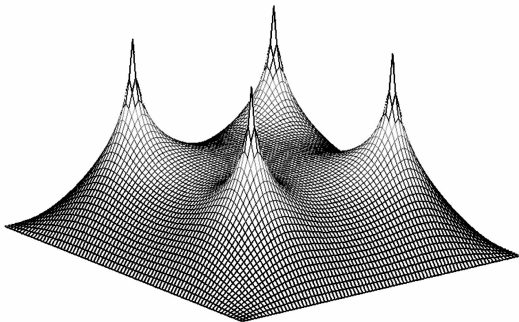


图 3 压力分布图

Fig. 3 Pressure field distribution

图 3 表明, 小孔节流的止推轴承气膜压力场呈马鞍状分布, 节流孔处压力最高, 空气轴承边缘压力和外界环境压力相等, 因此空气轴承具有比较低的角刚度。在设计轴承时, 应合理的设置节

流孔的位置, 以获得满意的角刚度。

## 2.2 预加载技术

预加载技术是提高气浮导轨的承载能力和刚度的有效途径。气浮导轨的预加载方式有三种: 气膜预加载、真空预加载和磁力预加载。

气膜预加载是在支撑方向上设计两个相对的气膜, 从而产生预加载荷, 使之具有承载双向载荷能力和双向刚度, 气浮导轨的稳定性比较好。

真空预加载是在滑块的气浮工作面上设计一个真空腔, 靠真空负压把滑块吸附在导轨的气浮面上, 从而产生预加载荷, 提高气浮轴承的刚度, 当浮力和吸力平衡时, 形成稳定的工作气膜。

磁力预加载是在导轨和滑套上镶嵌磁钢等永磁体, 靠磁场吸引力把滑块吸附在导轨的气浮面上, 形成磁力预加载。

采用有限元计算方法和预加载技术, 利用本文设计的气浮导轨计算软件设计的直线电机 H 型气浮导轨运动平台如图 4 所示。

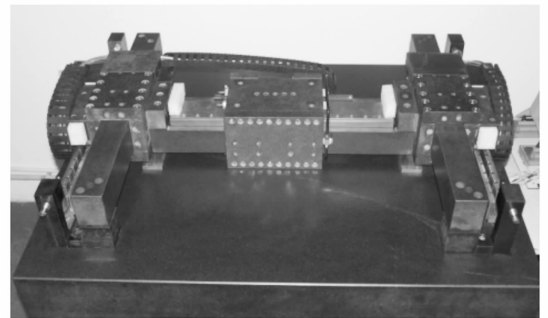


图 4 气浮工作台图片

Fig. 4 Air bearing stage

图 4 所示气浮工作台的双边导轨为 Y 导轨, 中间横梁方向为 X 导轨。工作台的 Y 导轨采用闭式结构, 在垂直方向和 X 方向均采用气膜预加载技术来提高性能。X 导轨在垂直方向上以大基面为气浮工作面, 采用真空预加载技术; 在 Y 方向上采用气膜预加载技术。X、Y 导轨采用全方向的预加载设计, 获得满意的承载能力和刚度。

## 2.3 气浮导轨静态特性试验

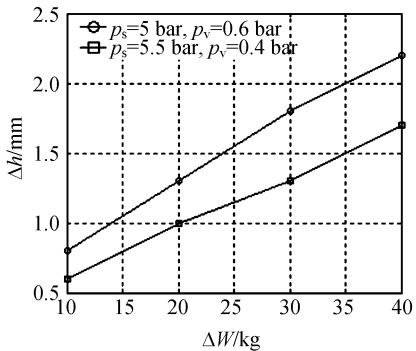
### 2.3.1 X 导轨竖直方向的静态刚度测试

加载方式: 竖直方向上依次静态加载 10 kg、20 kg、30 kg、40 kg。第一组实验: 供气压力  $p_s =$

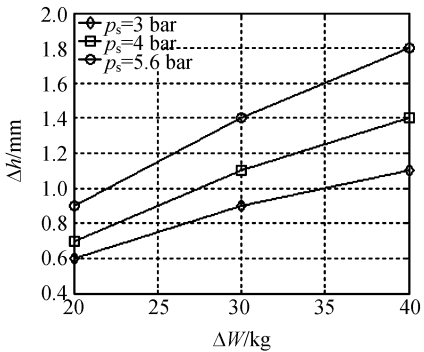
5 bar,真空腔内压力为  $p_v = 0.6$  bar;第二组实验:供气压力  $p_s = 5.5$  bar,真空腔内压力为  $p_v = 0.4$  bar。实验曲线如图 5(a)所示。用线性回归的方法,求出两种情况 X 导轨垂直方向的静刚度分别为:212.2 N/ $\mu\text{m}$ ,276.9 N/ $\mu\text{m}$ 。

2.3.2 Y 导轨垂直方向的静态刚度测试

加载方式:双边导轨对称加载,在垂直方向上依次静态加载  $2 \times 10$  kg,  $2 \times 15$  kg,  $2 \times 20$  kg。第一组实验:供气压力  $p_s = 3$  bar;第二组实验:供气压力  $p_s = 4$  bar;第三组实验:供气压力  $p_s = 5.6$  bar。实验曲线如图 5(b)所示。



(a) X 导轨  
(a) X-slider



(b) Y 导轨  
(b) Y-slider

图 5 垂直方向加载与气膜厚度关系

Fig. 5 Relation of load in vertical direction and gas film thickness

根据图 5(b),求出三种供气压力情况下导轨的静刚度,如表 1 所示。由于 Y 导轨采用闭式结构,在垂直方向上横梁、直线电机定子和滑块总质量比较大,具有较大的自重加载,在供气压力为

3 bar 时气膜刚度比较大。

表 1 供气压力与气膜静刚度

Tab. 1 Source air pressures and stiffnesses of gas film

Source air pressure (bar)	Stiffness (N/ $\mu\text{m}$ )
3.0	333.3
4.0	293.8
5.6	221.3

3 工作台同步运动控制

H 型工作台双边电机存在强机械耦合作用情况,高精度的同步运动控制是实现工作台精确定位的基础。

3.1 一般同步控制结构

常用的同步控制为并联、串联两种结构。

并联同步控制是指各电机同时输入相同的路径命令,每个电机的运动控制回路采用相互独立的设计,相互间不存在交互关系。每个同步轴都在各自的动态特性范围内与指令位置和速度保持同步。在实际应用中,当其中一个电机受到干扰时,则无法保证各电机之间的同步性能,这样就影响了同步运动控制的精度和性能,而且可能造成机械结构损害。

串联式同步控制方法利用各轴频宽的差异,将两电机分为主动电机和从动电机。主动电机的位置输出当作从动电机的位置输入,根据各轴的机械或伺服频宽的差异来调整比例增益值。但此控制方法容易因伺服落后而造成跟踪误差,主动电机对从动电机的波动没有响应。

3.2 改进型并联同步控制

传统的并联和串联同步控制,不能满足高精度同步运动的要求。采用基于同步误差的同步控制策略,设计了改进型并联同步控制器,在传统的并联结构中,设计了同步补偿控制器,如图 6 所示。工作台 Y 轴双边直线电机定义为 2<sup>#</sup> 电机和 3<sup>#</sup> 电机。

同步控制器以两直线电机的速度同步误差信号作为输入,将输出信号分别返回到两直线电机的主通道中。这种策略在原有通道各有控制器的前提下,将同步偏差引入系统并进行调解,提高了系统对不同步的调解速度。当其中一台直线电机受到外界干扰产生位置反馈的变化,与之同步的

直线电机的参考速度命令也随之变化,这样提高了控制系统的伺服频宽及耦合机械安全系数。

### 3.3 模糊 PID 控制器设计

工作台在不同位置运动时,控制性能会随着结构参数的变化而下降,为此在 PID 控制的基础上,设计了如图 6 所示的模糊控制器,对 2<sup>#</sup> 和 3<sup>#</sup> 电机控制器参数进行在线自适应整定。

模糊控制器的输入为直线电机的实时位置误差和误差的变化率,输出为控制器比例、积分和微分增益的调整量  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$  和  $\Delta K_d$ 。

控制器参数模糊的整定原则为:当偏差  $|e|$  较大时,为了加快系统的响应速度,应取较大的  $K_p$  和较小的  $K_d$ ,同时对积分作用加以限制。当  $|e|$  和  $|ec|$  适中时,为使系统具有较小的超调, $K_p$  应取小一些,  $K_d$  的取值要大小适中,以保证系统响应速度。当  $|e|$  较小时,为使系统有良好的稳态性能,应增大  $K_p$  和  $K_i$  的取值;当  $|ec|$  较小时,  $K_d$  可取大一些;当  $|ec|$  较大时,  $K_d$  应小些。

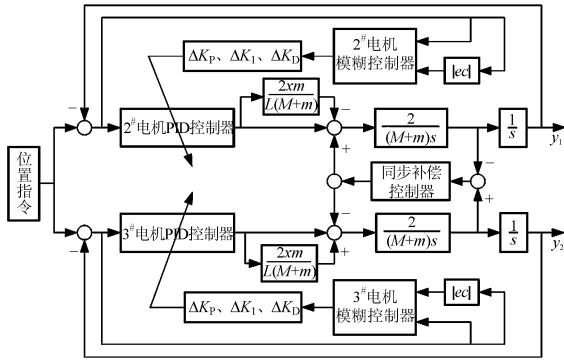
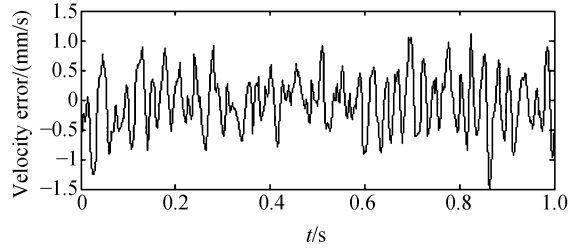


图 6 同步控制框图

Fig. 6 Synchronous control block diagram

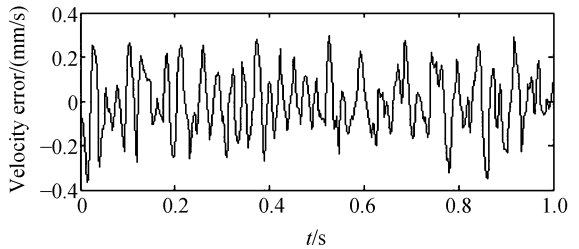
## 4 运动控制实验

工作台控制系统的组成为:Trilogy 直线电机 31019M1-WD3、Copley 驱动器、分辨率为 0.1  $\mu\text{m}$  的 Renishaw 直线编码器、控制器为 DELTA TAU 公司的 Turbo PMAC 8 轴卡、工控机等。控制器的开放性可以保证同步控制算法的实现,利用控制器的 OPEN SERVO 功能可以修改和启动用户自己设计的控制算法。图 6 所示的控制算法就是通过这一方法实现的,考虑控制器运行速度,模糊控制器对 PID 参数的调节是通过运行级别较高的 PLC 程序实现的。



(a)一般并联同步控制

(a) Common parallel synchro-control

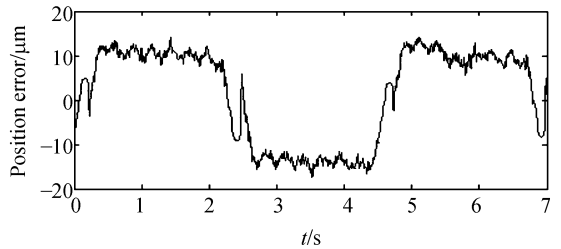


(b)改进型同步控制器

(b) Improved synchro-controller

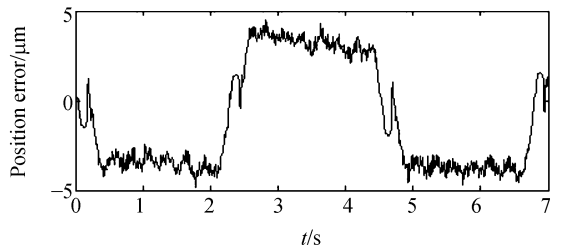
图 7 实测速度同步误差曲线

Fig. 7 Experimental velocity synchronous error



(a)一般并联同步控制

(a) Common parallel synchro-control



(b)改进型同步控制器

(b) Improved synchro-controller

图 8 实测位置同步误差曲线

Fig. 8 Experimental position synchronous error

出于安全考虑,在工作台双边直线电机没有横梁连接的情况下,分别用传统并联同步控制和基于偏差的改进型并联同步控制进行运动控制实验。工作台双边直线电机以 100 mm/s 的速度指令运动,两种控制算法情况下的速度同步误差分别如图 7(a)、7(b)所示,位置同步误差如图 8(a)、8(b)所示。

图 7、图 8 所示的同步误差实验曲线表明,基于同步速度偏差的改进型并联同步控制比传统并联同步控制方法具有更好的同步性能,在指令速度为 100 mm/s 时,最大速度同步误差为 0.3 mm/s,比一般的同步控制算法提高了 3 倍,最大位置同步误差是原来的 1/4。该算法可以用于此类具有机械耦合的多电机同步运动控制。

在此控制器基础上,通过误差补偿技术和扰动抑制技术,H 型气浮工作台可以在较高的速度

和加速度下达到微米级的定位精度。

## 5 结 论

利用开发的空气轴承设计软件,分析了气浮导轨气膜的压力分布特点,并在此基础上设计了用于运动平台的全方向预加载的高承载能力、高刚度的气浮导轨,X、Y 导轨在垂直方向上的静刚度分别可以达到 276.9 N/ $\mu\text{m}$  和 333.3 N/ $\mu\text{m}$ 。基于速度同步偏差观测器,设计了改进型并联结构同步控制器,具有控制器参数模糊自适应调整功能,将 H 型工作台双边直线电机的同步运动精度提高了 3 倍,达到了微米级的位置同步精度。实验结果表明,H 直线电机气浮定位平台具有承载能力强、精度高的特点,适合作为光刻机等精密工程领域的运动平台。

## 参考文献:

- [1] 孙麟治,李鸣鸣,程维明.精密定位技术研究[J].光学精密工程,2005,11(13):69-75.  
SUN L ZH, LI M M, CHENG W M. Study on precision positioning technique[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 11(13):69-75. (in Chinese)
- [2] 张从鹏,刘强.基于静压气浮导轨的直线电机高性能工作台研制[J].机械科学与技术,2006,10(10):1212-1216.  
ZHANG C P, LIU Q. Development of high-performance linear motor stage based on static-pressure air-bearing slider[J]. *Mechanical Science & Technology*, 2006, 10(10):1212-1216. (in Chinese)
- [3] 陶家生.闭式双排节流孔矩形气浮导轨的计算方法[J].光学精密工程,1997,2(1):55-61.  
TAO J SH. Calculation method of rectangle closed air bearing slider with double row orifices[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1997, 2(1):55-61. (in Chinese)
- [4] 刘瞰,刘育华,陈世杰.静压气体润滑[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1990.  
LIU T, LIU Y H, CHEN SH J. *Static Pressure Gas Lubrication*[M]. Harbin: Harbin Industry University Press, 1990. (in Chinese)
- [5] 马明建,辛世界,王辉林,等.静压式平面空气轴承压力场的有限元分析[J].农业机械学报,1994,12(4):91-97.  
MA M J, XIN SH J, WANG H L, *et al.*. Finite element analysis of static plane air bearing pressure field[J]. *Transaction of the Chinese Society for Agriculture Machinery*, 1994, 12(4):91-97. (in Chinese)
- [6] 孙西芝,陈时锦,程凯.空气静压导轨静态性能的解析计算及分析[J].机械设计与制造,2005,1(1):40-42.  
SUN X ZH, CHEN SH J, CHENG K. An analytic method calculation and analysis of the aerostatic guide way[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2005, 1(1):40-42. (in Chinese)
- [7] 翁秀华.双直线电机同步控制的研究[D].沈阳工业大学,2005.  
WONG X H. *Study on synchronous control of dual linear motors*[D]. Shenyang Industry University, 2005. (in Chinese)

- [8] 翁秀华,郭庆鼎,刘德君.基于模糊自适应PID的双直线电机同步驱动系统控制[J].组合机床与自动化加工技术,2004,9(9):28-29.  
WONG X H, GUO Q D, LIU D J. Based-on fuzzy self-adaptive PID synchronous drive of dual linear motors system [J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2004, 9(9): 28-29. (in Chinese)
- [9] 黄峰,汪岳峰,顾军,等.模糊参数自整定PID控制器的设计与仿真研究[J].光学精密工程,2005,12(2):235-239.  
HUANG F, WANG Y F, GU J, *et al.*. Design and simulation study of fuzzy parameter self-tuning PID controller [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 12(2): 235-239. (in Chinese)
- [10] 年海威.双直线电机伺服系统同步进给控制的研究[D].沈阳工业大学,2006.  
NIAN H W. *Study on synchronous control of dual linear motors servo system* [D]. Shenyang Industry University, 2006. (in Chinese)
- [11] 节德刚,刘延杰,孙立宁,等.一种宏微双重驱动精密定位机构的建模与控制[J].光学精密工程,2005,13(2):171-178.  
JIE D G, LIU Y J, SUN L N, *et al.*. Modeling and control of a macro-micro dual-drive ultra precision positioning mechanism [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(2): 171-178. (in Chinese)

作者简介:刘 强(1963—),男,湖南人,工学博士,北航机械工程及自动化学院教授,博士研究生导师,主要研究方向为高性能运动系统设计与控制、数控加工仿真优化与虚拟加工、微机电系统制造技术。

张从鹏(1975—),男,河南人,工学博士,北方工业大学讲师,主要研究方向为高精度运动平台设计、建模、分析及控制,数控技术。E-mail:zhangcongpeng@163.com