

文章编号 1004-924X(2015)04-1081-07

## X-Y 精密定位平台的敏感函数逆前馈补偿控制

崔 晶, 王迪凡

(北京工业大学 机械工程与应用电子技术学院, 北京 100124)

**摘要:**针对音圈电机驱动的 X-Y 定位平台中稳态误差导致的系统定位精度较低的问题,提出了基于敏感函数逆的前馈补偿控制方法。首先,采用频域辨识方法建立了系统模型,基于终值定理推导出系统扰动和稳态误差的关系,并由此设计了敏感函数的逆模型来补偿扰动对稳态误差的影响,从而提高系统精密定位性能。最后,在搭建的音圈电机驱动 X-Y 定位平台上进行了不同运动行程的实验研究。实验结果表明:在行程为 10  $\mu\text{m}$ ,最大加速度为 6  $\text{mm/s}^2$  的微定位运动条件下,补偿后的定位误差可由 2  $\mu\text{m}$  降低到 0.2  $\mu\text{m}$ ;在行程为 10 mm,最大加速度为 6  $\text{m/s}^2$  的宏定位运动条件下,定位误差可由 2  $\mu\text{m}$  降低到 0.4  $\mu\text{m}$ 。实验结果验证了本方法的有效性,为后续高精密伺服系统的研制提供了重要参考和设计依据。

**关键词:**音圈电机;精密定位平台;敏感函数;前馈补偿

**中图分类号:**TH703;TP273 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152304.1081

## Feedforward compensation control of X-Y precise positioning table using inversed-sensitive function

CUI Jing, WANG Di-Fan

(College of Mechanical Engineering and Applied Electronics,  
Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

\* Corresponding author, E-mail: twdidi9005@sina.com

**Abstract:** As the stable state error of an X-Y precise positioning table driven by a Voice Coil Motor (VCM) will lead to a poor position precision, a feedforward compensation method based on inversed-sensitive function was proposed. Firstly, the system model was set up based on frequency domain identification, and the relationship between system disturbances and steady state error was established using final-value theorem. Then, an inversed-sensitive function was designed to compensate the effect of the disturbances on the stable error and to improve the positioning accuracy of the system. Finally, the experiments of different strokes were implemented on the X-Y table driven directly by the VCM to validate the efficacy of the proposed method. The experimental results show that the static errors of the system decrease from 2  $\mu\text{m}$  to 0.2  $\mu\text{m}$  with a micro positioning of 10  $\mu\text{m}$  and a maximum acceleration of 6  $\text{mm/s}^2$ , and those decrease from 2  $\mu\text{m}$  to 0.4  $\mu\text{m}$  with a macro positioning of 10 mm and a maximum acceleration of 6  $\text{m/s}^2$ . Obtained achievements verify the validity of the proposed

收稿日期:2014-08-09;修订日期:2014-09-20.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61005066);国家科技重大专项资助项目(No. 2013ZX04008021)

method and provide a references for the subsequent study in high accuracy positioning servo system design.

**Key words:** voice coil motor; precise positioning table; sensitivity function; feedforward compensation

## 1 引言

随着自动控制技术和微型计算机的迅速发展,对各类自动控制系统的定位精度提出了越来越高的要求<sup>[1]</sup>。特别是在精密加工、精密测量、微电子工程等领域,除了要求定位平台具备高定位精度和较大运动行程外,还要求其具有更高的快速响应能力<sup>[2]</sup>。为提高运动平台的定位性能,有学者提出采用音圈电机直接驱动的方式来避免中间传动装置的影响,这是因为音圈电机平台具有无滞后、无齿槽效应、响应快、效率高、推力大、力特性稳定和控制方便等优点<sup>[3-5]</sup>。同时,为进一步降低系统的运动惯量,平台设计通常采用 X-Y 轴运动解耦机构<sup>[6]</sup>。

虽然通过直驱的方式消除了传动机构的间隙,提高了系统响应,但是平台对外界的扰动仍然非常敏感,由此带来的非线性扰动仍会严重影响极限工作条件下平台的定位精度和稳定时间。就滑动导轨作为支撑的运动平台而言,导轨带来的摩擦扰动力矩会引起响应的稳态误差,减慢系统的响应速度<sup>[7]</sup>。针对此类高精度定位伺服系统,目前主要有两大类方法来消除摩擦力矩等扰动的影响,一类是建立速度、位置与摩擦力矩非线性函数的摩擦模型的补偿方法,此方法难点在于诸多模型参数的辨识<sup>[8-11]</sup>,一方面由于摩擦模型的辨识参数多,包含了不可测量,和较强的位置依赖性,限制了此种方法的实际应用;另一方面由于摩擦模型多针对被控对象速度过零时的非线性摩擦扰动进行抑制,故利用摩擦模型补偿来改善高速定位精度的针对性不强。另一类方法的核心思想是将摩擦视为一种外界干扰,通过控制结构的调整来提高系统的抗干扰能力,其中,以扰动观测器为代表的鲁棒控制可以实现对扰动力矩的有效补偿<sup>[12]</sup>,但是这种方法的应用效果取决于滤波器带宽的设计,如果设计不当会引发机械系统的谐振。另外以神经网络为代表的智能控制方法虽能以任意精度辨识摩擦干扰<sup>[13]</sup>,但其训练时间过长,实时性不强等限制了其应用。总之,如果通过提高

控制系统的复杂度来消除扰动带来的稳态误差,会使系统成本和研制难度大幅提高。

本文首先针对非线性摩擦等各类扰动带来的稳态误差进行分析,根据终值定理获知常值扰动力矩引起定位的稳态误差,通过计算扰动对误差的传递函数即敏感函数,然后利用敏感函数的逆估计系统稳态时的扰动大小。文中首先通过频域扫频辨识出系统传递函数,进而计算敏感函数及其逆模型;在此基础上,设计了基于敏感函数逆的稳态误差前馈补偿器;最后,在音圈电机驱动 X-Y 平台上进行了不同定位行程的补偿实验。实验结果表明该方法在保证系统稳定的同时可快速简便地消除稳态误差、提高系统定位精度。

## 2 实验平台简介

### 2.1 平台的组成和原理

图 1 所示为音圈电机驱动 X-Y 运动平台结构图,该平台 X、Y 轴滑台分别由动圈式音圈电机直接驱动,并且通过弹性解耦机构将 X、Y 轴运动解耦。滑台运动由直线精密导轨作为支撑导向,两轴滑台一侧各安装有光栅尺和读数头作为位置测量传感器。



图 1 音圈电机 X-Y 运动平台结构图

Fig. 1 Structure of X-Y positioning table driven by voice coil motors

实验平台的伺服控制系统以可编程多轴控制 (PMAC) 运动卡为核心,完成对光栅尺位置信号的采样并对线性放大器发出控制信号、实现伺服算法等功能。PMAC 运动控制卡与工控机通过

以太网交互,工控机作为人机交互界面完成运动控制程序的编写和运动状态的监视。线性放大器作为音圈电机的驱动器,将运动控制卡的模拟电压信号转变为驱动电流输出。控制系统及音圈电机运动平台的性能指标如表 1 所示。

表 1 音圈电机驱动 X-Y 定位平台的主要性能指标  
Tab.1 Specifications of X-Y positioning table driven by voice coil motors

名称	型号	主要技术参数
		电机行程/mm 50
		推力常数 $K_f/(N \cdot A^{-1})$ 33.1
音圈电机	LAR400	反电动势 $K_b/(V \cdot s \cdot m^{-1})$ 33.1
		电枢电阻 $R/\Omega$ 3
		峰值推力/额定推力/N 400/105
X、Y 滑台		X 轴质量 $m_x/kg$ 2.256
		Y 轴质量 $m_y/kg$ 0.444
线型放大器	TA330	跨导/ $(A \cdot V^{-1})$ 0.6
光栅尺	RGH22	分辨率/ $\mu m$ 0.1
		伺服周期/ms 0.408
控制器	Turbo-PMAC2	D/A 输出分辨率/mV 10
		D/A 输出范围/V $-10 \sim 10$

2.2 动力学建模

忽略摩擦等非线形扰动影响,利用电机的电压平衡方程和力平衡方程建立音圈电机的名义模型。音圈电机电流  $I$  和输入电压  $U$ 、动圈速度  $v$ 、反电动势  $K_b$  及电枢电阻  $R$  的关系为:

$$I = \frac{U - K_b \cdot v}{R} \quad (1)$$

选取音圈电机平台的 Y 轴向运动机构为研究对象,根据牛顿第二定律可得 Y 轴方向运动机构位移与电机推力的微分运动方程为  $F = m \frac{d^2 x}{dt^2}$ , 电机输出推力与电机线圈中的电流成正比,即  $F = K_f I$ ,其中  $K_f$  为音圈电机的推力常数,故:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = K_f \cdot I, \quad (2)$$

将式(1)代入式(2)并进行拉式变换可得:

$$\frac{X(s)}{U(s)} = \frac{1}{R} \cdot \frac{K_f}{m s^2 + \left( \frac{K_f \cdot K_b}{R} \right) \cdot s} \quad (3)$$

由标称模型的推导可知, X-Y 运动平台可近似看作二阶系统,因此对模型结构已知的此系统,可进一步利用辨识方法获得模型参数以提高建模的精度。为此,首先向系统输入幅值 300 mV、频

率 2~8 Hz、步长为 1 Hz 的正弦激励信号  $U(s)$ , 并采集激励的响应  $X(s)$ , 获得相应的频响数据后,利用 MATLAB 辨识工具箱中的 invfreqs 函数将频响数据拟合为连续传递函数,由此获得了相应 X 轴及 Y 轴输入电压  $U$  到平台输出位移  $x$  的传递函数:

$$G_x(s) = \frac{X_x(s)}{U_x(s)} = \frac{2\ 505\ 947}{s^2 + 55s} \quad (4)$$

$$G_y(s) = \frac{X_y(s)}{U_y(s)} = \frac{1\ 432\ 189}{s^2 + 34.6s} \quad (5)$$

进行采样时间为 0.408 ms 的 Z 变换,得到离散化后的传递函数并提取零极点后有:

$$G_x(z) = \frac{0.207(z+0.993)}{(z-1)(z-0.9778)} \quad (6)$$

$$G_y(z) = \frac{0.1186(z+0.9953)}{(z-1)(z-0.986)} \quad (7)$$

3 基于敏感函数逆的前馈补偿控制

3.1 敏感函数的推导

为提高系统响应并简化计算,反馈控制器采用了速度、位置环双比例控制器。以单轴为例,图 2 中  $y_d$ 、 $y_k$  分别为系统的输入和输出信号,  $e(s)$  为误差,  $K_p$ 、 $K_v$  分别为位置环、速度环比例系数,  $G(s)$  为之前辨识的运动平台模型,  $N(s)$  为外界扰动。

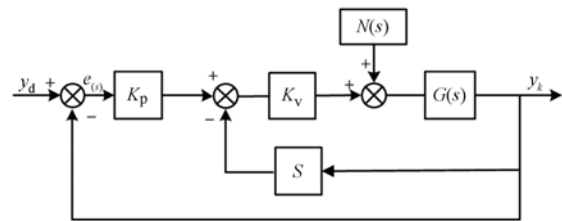


图 2 双闭环反馈系统控制框图

Fig.2 Diagram of dual close-loop feedback control system

由图 2 可推导出扰动  $N(s)$  和误差  $e(s)$  的关系:

$$[(-e(s) \cdot K_p + e(s) \cdot s) \cdot K_v + N(s)] \cdot G(s) = -e(s) \quad (8)$$

整理可得敏感函数  $S_p(s)$  即扰动  $N(s)$  到误差  $e(s)$  的传递函数:

$$S_p(s) = \frac{e(s)}{N(s)} = - \frac{G(s)}{1 + (K_v \cdot s - K_p \cdot K_v) \cdot G(s)} \quad (9)$$

进一步分析扰动的形式就可以利用终值定理求得对应扰动产生的稳态误差,同理,如果实际系统的稳态误差可测,就可以利用敏感函数逆来计算扰动的数值大小,从而进行反向补偿以提高系统定位精度。

众所周知,稳态误差是系统定位精度的度量,因此着重了分析系统进入稳态后的扰动特征。事实上系统在进入稳态过程后一些不确定的扰动仍然存在,只是因为大部分扰动并不具有时变特征,系统才能达到平衡并进入稳态。因此可近似认为稳态段的扰动为一常值  $N \cdot 1(t)$ , 将其进行拉氏变换后为  $\frac{N}{s}$ , 基于终值定理可确定扰动力矩所带来的稳态误差  $e_{ss}$  :

$$e_{ss} = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot e(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot S_p(s) \cdot \frac{N}{s}, \quad (10)$$

将敏感函数  $S_p(s)$  和系统模型  $G(s)$  代入式(10)可得:

$$e_{ss} = -\frac{N}{K_p \cdot K_v}. \quad (11)$$

由此可以看出,当稳态段的扰动力矩为一常值时,系统的稳态误差  $e_{ss}$  也同样为一常值误差,这与实际情况相符。因此可以利用反向补偿原理,直接补偿引起稳态误差的那部分常值扰动以削弱其影响。采用敏感函数逆模型计算了扰动力矩并进行前馈补偿,从而最大限度降低稳态误差,实现提高定位精度的目的。

### 3.2 基于敏感函数逆的前馈补偿器

设计了如图 3 所示的基于敏感函数逆的补偿结构框图。其中  $S_p^{-1}$  为敏感函数逆模型,由稳态误差计算扰动力矩; $Q(s)$  为低通滤波器,用于保证敏感函数逆输出补偿量的稳定;Switch 为控制补偿通道的开关,当系统进入稳态时开关闭合;Holder 为保持器,当通道打开时将保持器采集的前 10 个数据平均值作为稳态误差的估计值。

敏感函数逆模型  $S_p^{-1}$  的稳定性是保证该方法能够实现的前提,而当敏感函数模型包含单位圆上与单位圆外的零点时,直接求逆会造成  $S_p^{-1}$  产生不稳定的极点,因此在这里引入零相位误差跟踪(ZPETC)算法<sup>[14]</sup>设计敏感函数逆:

$$S_p^{-1} = \frac{A_c(z^{-1}) \cdot B^u(z)}{z^{-d} \cdot B^a(z^{-1}) \cdot [B^u(1)]^2}, \quad (12)$$

其中: $B^u()$  包含了敏感函数中所有位于单位圆上

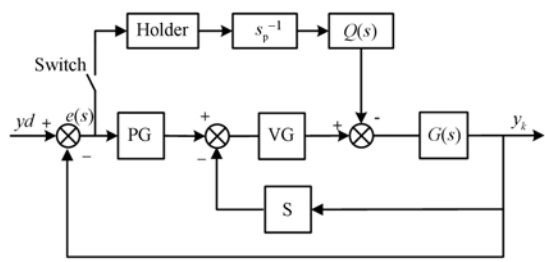


图 3 基于敏感函数逆的前馈补偿结构框图

Fig. 3 Diagram of feedforward compensation based on inverse sensitive function

及单位圆外不稳定零点的多项式,  $B^a()$  包含了所有位于单位圆内的稳定零点的多项式,  $A_c()$  为原敏感函数中包含所有极点的多项式。以  $Y$  轴为例通过将式(9)离散化可得敏感函数为:

$$S_p = 0.1186 z^{-1} (1 + 0.9953 z^{-1}) / \{ (1 - z^{-1}) (1 - 0.986 z^{-1}) + 0.1186 K_v (1 + 0.9953 z^{-1}) [K_p + (1 - z^{-1})] \}. \quad (13)$$

可以看出该敏感函数中包含负实轴上且趋于 -1 的零点,因此有:

$$B^a(z^{-1}) = 1 + 0.9953 z^{-1}, \quad (14)$$

$$A_c(z^{-1}) = (1 - z^{-1}) (1 - 0.986 z^{-1}) + 0.1186 K_v \cdot (1 + 0.9953 z) \cdot z^{-1} \cdot [K_p + (1 - z^{-1})], \quad (15)$$

$$B^u(z^{-1}) = 0. \quad (16)$$

由于敏感函数的逆函数已失去低通特性,若稳态误差以阶跃形式输入,  $S_p^{-1}$  会造成前馈补偿量的输出振荡,因此须在  $S_p^{-1}$  之后串联低通滤波器以保证前馈补偿通道的稳定。同时为了保证前馈补偿的快速性,低通滤波器的带宽选择又不宜过小,这里选择 4 阶 Butterworth 低通滤波器  $Q(s)$ 。

## 4 实验结果

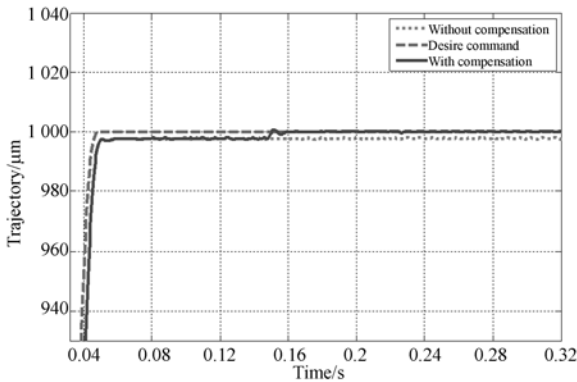
为验证利用敏感函数逆模型补偿外界扰动方法的有效性,以图 1 所示的音圈电机驱动 X-Y 定位平台为实验对象,利用式(9)、(12)计算出敏感函数逆,控制框图如图 3 所示,其中位置环、速度环比例系数  $K_p$ 、 $K_v$  分别设置为 20、300。

实验中选择 5 阶位移曲线作为输入信号:

$$y_d = \begin{cases} A \left[ 6 \left( \frac{t}{T_r} \right)^5 - 15 \left( \frac{t}{T_r} \right)^4 + 10 \left( \frac{t}{T_r} \right)^3 \right], & 0 \leq t \leq T_r \\ A, & t > T_r \end{cases}, \quad (17)$$

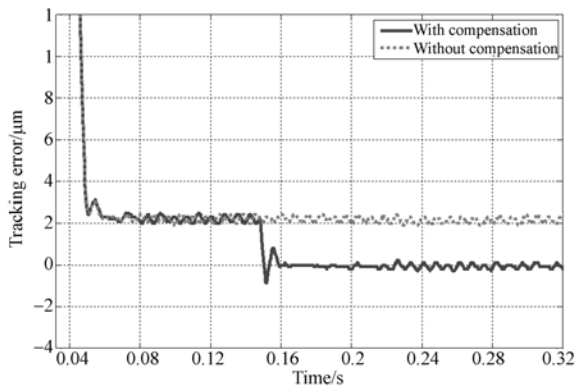
其中:  $A$  为曲线的行程,  $T_r$  为曲线的上升段运动时间, 可以通过调整这两个参数获得不同加速度的曲线。首先验证利用敏感函数逆进行补偿的可行性; 之后调整滤波器  $Q(s)$  的带宽以提升补偿的稳定性和快速性; 最后验证 X-Y 轴不同行程定位运动的补偿效果。

输入行程为 1 mm、运动时间为 50 ms、最大加速度为  $2.3 \text{ m/s}^2$  的 5 阶位移曲线作为指令信号, 结果如图 4 所示。未补偿前, 由于摩擦等外界扰动的存在, 导致系统存在  $2 \mu\text{m}$  的稳态误差; 而当在进入 0.15 s 时引入前馈补偿, 可以看出定位误差减少到  $0.2 \mu\text{m}$ , 说明通过敏感函数逆进行补偿的方法是可行的。



(a) 指令位移曲线和实际位移曲线

(a) Actual and command displacement curve



(b) 加入补偿和未加入补偿的误差比较曲线

(b) Comparison of error curves with/without compensation

图 4 应用敏感函数逆对稳态误差的补偿实验

Fig. 4 Steady state error compensation experiments with inversed-sensitivity function

进一步观察图 4(b) 的误差曲线可知, 系统在补偿指令结束后的 0.02 s 即可进入稳态, 因此可

考虑进一步减少前馈通道开关的延时以提高快速性。此外, 由于敏感函数逆失去了敏感函数的低通特性, 导致在加入补偿的瞬间存在振荡, 需要设计一低通滤波器串接在敏感函数逆之后以进一步提高补偿的稳定性。

引入不同带宽巴特沃斯滤波器进行比较实验研究, 如图 5 所示。对比不同带宽的滤波器后发现, 在保证系统稳定条件下, 选择带宽为 200 Hz 的滤波器, 能够使得定位误差以较快的速度收敛, 2 ms 内就能使定位误差从  $2 \mu\text{m}$  减少到  $0.2 \mu\text{m}$ ; 而带宽为 100 Hz 与 50 Hz 的滤波器, 虽然稳定性强但其收敛快速性不佳。

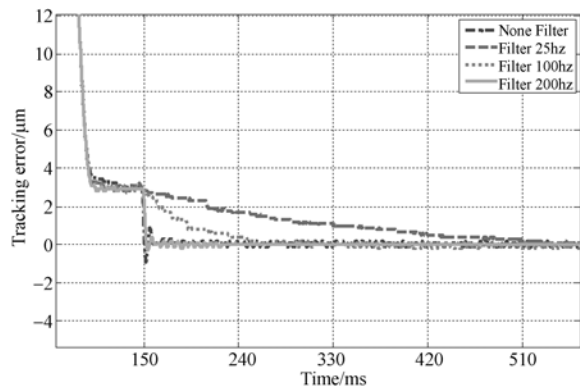
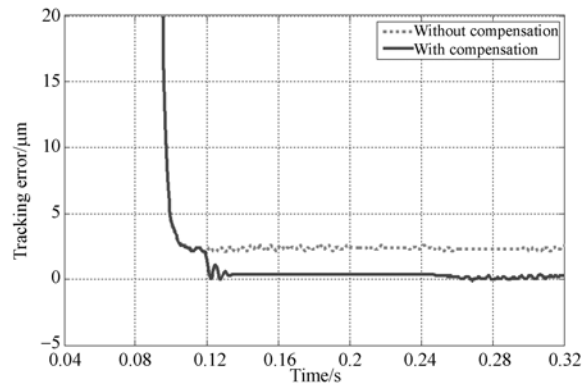


图 5 对比不同滤波器带宽对误差收敛的影响

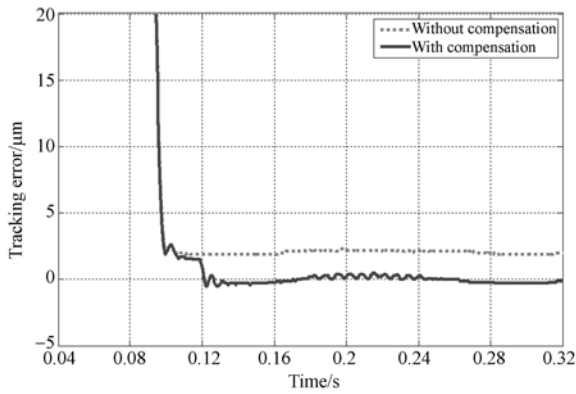
Fig. 5 Comparison of different effect of filter bandwidth

滤波器带宽确定后, 进行了行程为 10 mm, 运动时间为 100 ms 的宏行程定位实验; 曲线最大加速度为  $6 \text{ m/s}^2$ ,  $Q(s)$  带宽为 200 Hz, 且选择指令结束后延时 0.02 s 加入补偿, X、Y 轴跟踪误差的测试结果如图 6 所示。从图中可以看出, X、Y 轴的定位误差分别从未经补偿的  $2.5 \mu\text{m}$  和  $2.4 \mu\text{m}$  均快速降低到  $0.4 \mu\text{m}$ , 所需的调整时间均为 0.01 s。



(a) X 轴跟踪误差曲线

(a) X-axis following error curves



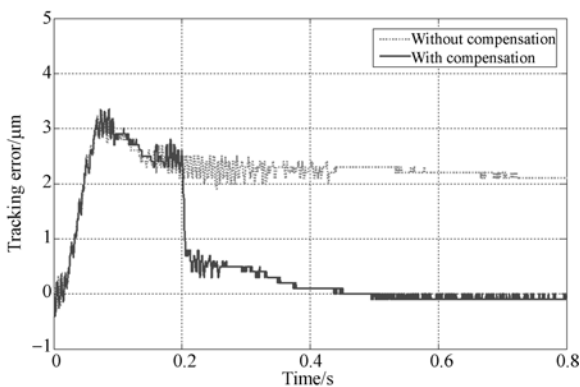
(b) Y 轴跟踪误差曲线

(b) Y-axis following error curves

图 6 行程为 10 mm 的稳态误差补偿实验

Fig. 6 Steady state error compensation experiments in 10 mm trajectory

此外,为验证补偿算法在微定位行程上的应用效果,进行了行程为  $10 \mu\text{m}$  的微行程定位实验,其运动时间为  $100 \text{ ms}$ ,曲线最大加速度为  $6 \text{ mm/s}^2$ , $Q(s)$  带宽为  $200 \text{ Hz}$ ,选择指令结束后延时  $0.1 \text{ s}$  加入补偿,实验数据如图 7 所示。从图中可以看出,X、Y 轴的定位误差从未经补偿的  $2.2 \mu\text{m}$  和  $1.7 \mu\text{m}$  均降低到  $0.2 \mu\text{m}$ ,所需的调整时间分别为  $0.2 \text{ s}$  和  $0.05 \text{ s}$ 。X、Y 轴的调整时间存

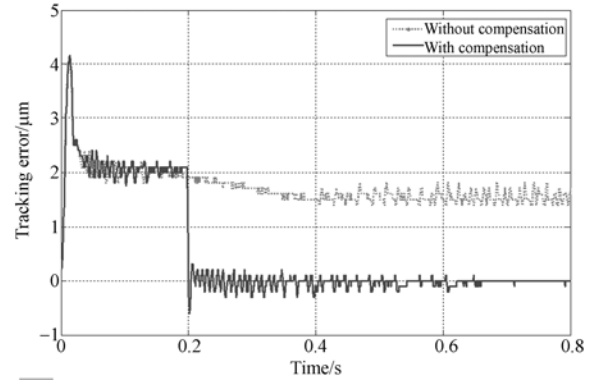


(a) X 轴跟踪误差曲线

(a) X-axis following error curves

#### 参考文献:

- [1] 张刚,刘品宽,张波,等. 直线电机精密运动平台轨迹跟踪控制器设计[J]. 光学精密工程,2013,21(2): 138-146.  
ZHANG G, LIU P K, ZHANG B, et al.. Design of trajectory tracking controller for precision positioning table driven by linear motor[J]. *Opt.*



(b) Y 轴跟踪误差曲线

(b) Y-axis following error curves

图 7 行程为  $10 \mu\text{m}$  的稳态误差补偿实验Fig. 7 Steady state error compensation experiments in  $10 \mu\text{m}$  trajectory

在差别的原因主要在于 X 轴不是同音圈电机刚性连接而是通过弹性解耦机构连接,从而降低了机械系统的带宽,导致响应变慢。

## 5 结 论

本文针对音圈电机驱动 X-Y 定位平台中稳态误差导致定位精度低的问题,提出基于敏感函数逆的前馈补偿控制方法。首先,建立了被控对象的数学模型并通过系统辨识确定了模型的参数。然后,推导了敏感函数逆模型以反向补偿扰动并减小了稳态误差。最后,在音圈电机驱动 X-Y 定位平台上分别进行了  $10 \text{ mm}$  的宏行程和  $10 \mu\text{m}$  的微行程定位的实验研究,结果表明,在不同行程下,系统都实现了较好的快速精密定位性能,特别是在  $10 \mu\text{m}$  小行程定位条件下,补偿后定位误差由原来的  $2.2 \mu\text{m}$  和  $1.7 \mu\text{m}$  均减少到  $0.2 \mu\text{m}$ ,在保证系统稳定的前提下简便有效地降低了定位误差。本文工作可为此类高加速度精密伺服系统的研制提供参考和设计依据。

*Precision Eng.*, 2013, 21 (2): 138-146. (in Chinese)

- [2] 胡俊峰,张宪民. 3 自由度精密定位平台的运动特性和优化设计[J]. 光学精密工程,2012,20(12): 2686-2695.  
HU J F, ZHANG X M. Kinematical properties and optimal design of 3-DOF precision positioning stage [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20 (12): 2686-

2695. (in Chinese)
- [3] ANANTHANARAYANAN K S. Third-order theory and bang-bang control of voice coil actuators [J]. *IEEE Transaction on Magnetics*, 1982, 18(3): 888-892.
- [4] ZHANG H B, Huang X H, Peng G, *et al.*. Dual-stage HDD head positioning using  $H^\infty$  almost disturbance decoupling controller and a tracking differentiator [J]. *Mechatronics* 2009, 19(5): 788-796.
- [5] XU L M, ZENG S, GUO N. Design and analysis of a passive damping device in a head actuator assembly [J]. *Proceedings of IMechE, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2002, 216(3): 353-366.
- [6] JIE D G, SUN L N, LIU Y J, *et al.*. Design and simulation of a macro-micro dual-drive high acceleration precision XY-stage for IC bonding technology [C]. *Proceedings of 2005 6th International Conference on Electronic Packaging Technology, Shenzhen*, 2005:1-5.
- [7] 王福军. 芯片键合高速精密定位系统设计与控制 [D]. 天津:天津大学, 2010.  
WANG F J. *Design and Control of Precision Positioning System with High Speed for IC Bonding* [D]. Tianjin: Tianjin University, 2010. (in Chinese)
- [8] 向红标, 谭文斌, 李醒飞, 等. 基于 LuGre 模型的自适应摩擦补偿 [J]. *机械工程学报*, 2012, 17:70-74.  
XIANG H B, TAN W B, LI X F, *et al.*. Adaptive friction compensation based on LuGre model [J]. *Journal Of Mechanical Engineering*, 2012, 17:70-74. (in Chinese)
- [9] 王丽梅, 李兵. 基于摩擦观测器的直接驱动 XY 平台轮廓控制器设计 [J]. *电机与控制学报*, 2013, (1):31-36.
- WANG L M, LI B. Contour controller design for direct drive XY table based on friction observer [J]. *Electric Machines And Control*, 2013, (1):31-36. (in Chinese)
- [10] 于伟, 马佳光, 李锦英, 等. 基于 LuGre 模型实现精密伺服转台摩擦参数辨识及补偿 [J]. *光学精密工程*, 2011, 19(11):2736-2743.  
YU W, MA J G, LI J Y, *et al.*. Friction Parameter Identification and Friction Compensation for Precision Servo Turning Table [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(11): 2736-2743. (in Chinese)
- [11] 倪风雷, 刘宏, 介党阳. 基于速度观测器的 GMS 摩擦模型辨识与补偿 [J]. *电机与控制学报*, 2012(11):70-75.  
NI F L, LIU H, JIE D Y. GMS friction model identification and compensation based on velocity observer [J]. *Electric Machines And Control*, 2012(11):70-75. (in Chinese)
- [12] 黄显林, 鲍文亮, 卢鸿谦, 等. 一种具有时变观测器增益的摩擦补偿方法 [J]. *电机与控制学报*, 2011(11):46-49, 54.  
HUANG X L, BAO W L, LU H Q, *et al.*. Friction compensation using observers with time-varying gain [J]. *Electric Machines And Control*, 2011(11):46-49, 54. (in Chinese)
- [13] 徐智浩, 李胜, 张瑞雷, 等. 基于 LuGre 摩擦模型的机械臂模糊神经网络控制 [J]. *控制与决策* 2014(6):1097-1102.  
XU ZH H, LI SH, ZHANG R L, *et al.*. Fuzzy-neural-network control for robot manipulators with LuGre friction model [J]. *Control and Decision*, 2014(6):1097-1102.
- [14] TOMIZUKA M. Zero phase error tracking algorithm for digital control [J]. *Syst. Meas. and Control*, 1987(109): 65-68.

#### 作者简介:



崔晶(1976—),女,黑龙江齐齐哈尔人,博士,副教授,硕士生导师,2004年于哈尔滨工业大学获博士学位,主要从事精密运动控制、嵌入式系统等方面的研究。E-mail: cuijing@bjut.edu.cn



王迪凡(1990—),男,北京人,硕士研究生,2012年于北京工业大学获学士学位,主要从事精密运动控制等方面的研究。E-mail: twdidi9005@sina.com