

DOI: 10.3901/JME.2013.10.178

# 超精密微动台离散回路成形控制器优化\*

杨进<sup>1,2</sup> 朱煜<sup>1,2</sup> 尹文生<sup>1,2</sup> 杨开明<sup>1,2</sup> 张鸣<sup>1,2</sup>

(1. 清华大学精密仪器与机械学系 北京 100084;

2. 清华大学摩擦学国家重点实验室 北京 100084)

**摘要:** 为降低对存在模型摄动的超精密微动台的控制器的保守性,并规避常用的“连续设计—离散化”方法引入的离散化逼近误差的影响,以最优化微动台的控制性能,研究一种系统化的回路成形离散控制器优化方法。利用 $w$ 变换建立的 $z$ 平面与 $w$ 平面之间的映射关系,将 $z$ 平面的离散控制器设计转化为 $w$ 平面内的连续控制器设计问题,并利用连续回路成形方法进行控制器设计。在回路成形设计准则的基础上,引入结构奇异值( $\mu$ )分析作为无保守性的鲁棒性约束,以控制带宽及干扰抑制能力为目标,建立完整的离散控制器优化框架。通过遗传算法该控制器优化问题进行参数寻优,获得对微动台最优的离散控制器。分析显示该方法有效地规避了离散化逼近误差的影响,并且在实际试验中优化的控制器有效地提高了微动台的控制性能,验证了所提出方法的有效性。

**关键词:** 超精密微动台 离散控制器 回路成形 鲁棒控制 遗传算法

**中图分类号:** TP271

## Discrete Loop Shaping Controller Optimization for Ultra-precision Positioning Stage

YANG Jin<sup>1,2</sup> ZHU Yu<sup>1,2</sup> YIN Wensheng<sup>1,2</sup> YANG Kaiming<sup>1,2</sup> ZHANG Ming<sup>1,2</sup>

(1. Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084;

2. State Key Laboratory of Tribology, Tsinghua University, Beijing 100084)

**Abstract:** In order to optimize the control performances of an ultra-precision position stage with varying dynamics, a systematic procedure for discrete loop shaping controller optimization is proposed, which minimizes the conservativeness of the controller and eliminates the discretization approximating error of the commonly used continuous design-discretization approach. With the mapping between the  $z$ -plane and the  $w$ -plane established by  $w$  transformation, the design of discrete controllers in the  $z$ -plane is converted to the design of continuous controllers, and then accomplished by continuous loop shaping method. Besides the design criteria of loop shaping, structure singular value( $\mu$ ) analysis is introduced as a non-conservative constraint for robustness, and a completed framework for discrete controller optimization is constructed with the objective of maximizing the control bandwidth and disturbance rejection. Then the genetic algorithm is applied to solve the optimization problem and obtain the optimal discrete controller. Analysis shows that the proposed method evade the influence of discretization approximating error, and the optimized discrete controller significantly improve the control performance of the ultra-precision positioning stage in experiments, which demonstrates the effectiveness of the proposed method.

**Key words:** Ultra-precision stage Discrete controller Loop shaping Robust control Genetic algorithm

## 0 前言

超精密微动台在集成电路制造、高精密测量等设备中得到了越来越广泛的应用,其性能指标要求

也越来越高,目前微动台的运动精度要求达纳米量级,控制带宽要求高达数百赫兹,以满足设备对工件台的运动精度及响应速度的要求。受制于材料属性、结构设计约束以及加工、装配等工艺性能的限制,微动台的一阶机械模态频率一般难以突破 1 kHz,模态引起的共振特性是威胁控制稳定性及限制性能的主要因素<sup>[1]</sup>。另外,对应用于光刻机等设备中

\* 国家重点基础研究发展计划资助项目(973 计划, 2009CB724205)。  
20120627 收到初稿, 20121205 收到修改稿

的微动台,其控制目标点需要随实际工况而变化,导致其模型的共振特性发生与目标点位置相关的摄动<sup>[2-4]</sup>,进一步增加了控制器的设计难度并限制了系统的控制性能。因此,控制器优化设计是提高超精密微动台的控制性能的关键手段。

在超精密微动台的控制研究中,鲁棒控制方法如  $H_\infty$ 、 $\mu$  综合以及线性变参数(Linear parameter varying, LPV)控制等方法得到了较多的研究与应用。DIRK 等<sup>[5-7]</sup>分别利用  $H_\infty$  鲁棒控制方法对超精密微动台进行了控制研究,取得了较好的效果。MARC 等<sup>[2]</sup>研究了  $\mu$  综合方法在硅片台微动台控制中的应用,比经验 PID 控制提高了性能。MATTHIJS 等<sup>[3]</sup>针对对硅片台模型存在摄动的特性,通过 LPV 控制提高了控制性能。上述鲁棒控制方法能够以标准化的框架对存在模型摄动的对象,以设定的性能权重为目标进行控制器优化,获得理论上最优的控制器,但其存在难以合理选择性能权重、控制器阶次高等问题,实际应用中仍然存在诸多限制。在微动台控制相关的应用及研究中,回路成形控制方法由于其设计过程简单、控制器阶次低、性能较好等优势得到了最为广泛的应用<sup>[8-11]</sup>,其主要缺点是性能很大程度上取决于设计人员的经验,并且对于存在模型摄动的对象,只能以大保守性、牺牲性能为代价换取控制器的鲁棒性。针对经验设计方法的缺陷,基于优化算法的回路成形控制器优化方法被提出,DENNIS 等<sup>[12-16]</sup>分别提出了基于遗传算法或粒子群算法的控制器优化方法,针对频域指标、 $H_\infty$  鲁棒性指标等优化目标进行控制器参数的优化,能够获得易于实现的低阶控制器,并降低了设计对经验需求,取得了较好的实际控制效果。

另一方面,目前微动台系统均采用计算机控制系统进行伺服控制,连续控制器需要通过离散化转化为离散控制算法才能在控制系统中执行。离散化会造成一定的逼近误差,导致实际执行的离散控制器的性能与设计的连续控制器的性能相比产生下降,甚至出现不稳定的情况。对诸如超精密微动台等性能要求极为苛刻的系统,通常所用的“连续设计-离散化”方法引入的离散化逼近误差已经成为限制系统性能的重要因素,为进一步提高控制性能、充分发挥系统硬件的极限性能,必须寻求离散控制器设计的方法,以规避离散化逼近误差的影响。目前成熟的离散控制器设计方法较少,主要有极点配置、线性二次型高斯(Linear quadratic gaussian, LQG)、基于  $w$  变换的离散回路成形设计等<sup>[17]</sup>。其中极点配置、LQG 设计缺少保证鲁棒性的手段,难以应用于

包含模型摄动的对象。基于  $w$  变换的离散回路成形设计与连续回路成形相似,但  $w$  变换引起频率翘曲,使得性能指标不易理解,其设计过程对经验的要求很高。

本文针对一个存在模型摄动的超精密微动台系统进行了离散控制器设计的研究,在基于  $w$  变换的离散回路成形设计方法的基础上,利用连续回路成形控制器优化<sup>[12-16]</sup>的思路,建立了完整的离散回路成形控制器优化框架。该方法以控制带宽及干扰抑制能力为优化目标,并在回路成形设计准则的基础上,引入结构奇异值( $\mu$ )分析作为无保守性的鲁棒性约束。通过遗传算法对控制器优化问题进行参数优化,获得了最优的离散控制器。试验显示,与经验“连续设计-离散化”方法获得的控制器相比,优化的控制器显著提高了微动台的控制性能,验证了该方法的有效性。

## 1 微动台系统及其模型特征

本文研究的微动台结构如图 1 所示,微动台动子与定子之间采用平面气浮支撑,使得动子能够做无阻尼的运动;4 个平面动铁式音圈电动机提供微动台动子运动所需的力及转矩。微动台系统整体安装于主动隔振平台之上,采用双频激光干涉仪作为位置传感器测量微动台动子的位置。控制系统运行于 VME 总线的工控机及 VxWorks 实时操作系统平台上,采样频率为 5 kHz,系统整体硬件配置使得微动台具有实现纳米级精度的潜在能力。

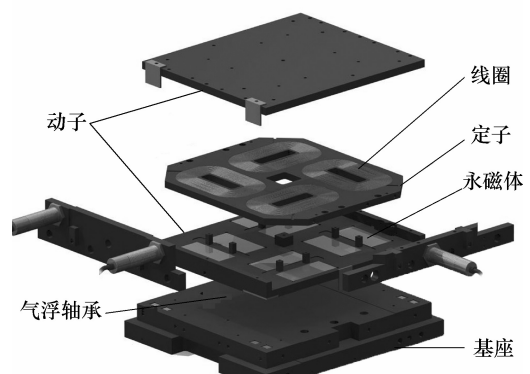


图 1 微动台结构示意图

本文对微动台的单自由度( $y$  轴)进行控制器设计的研究,根据微动台的工作要求,考虑控制目标点(即位置测量解算点)需要在一定的工作空间内变化的情况,而不是固定为动子的几何中心。由于微动台的结构存在柔性,控制目标点  $x$  坐标位置的变化将导致  $y$  轴模型中的共振特性随之发生摄动。设控制目标点位置变化区间为  $x \in [-100, 100] \text{ mm}$ , 分别取 20 mm

的间隔点作为控制目标点进行模型辨识,如图2所示,获得11个目标点下的频率响应模型。对其进行曲线拟合获得参数化模型(传递函数),并进一步将拟合模型的参数摄动描述为线性分式变换(Linear fraction transformation, LFT)形式的参数不确定模型。图3为辨识频率响应模型与LFT参数不确定模型的Bode图,可见LFT参数不确定模型很好地描述了辨识模型的摄动情况。对于二者之间仍存在的微小的误差,如图4所示,对其上界进行参数拟合作为加性误差。于是实际模型的摄动可完整地表达为包含LFT参数误差及加性误差的结构化不确定模型,如图5所示,其中 $G_0$ 为名义模型, $W_a$ 为拟合的加性误差, $\Delta \in \mathbf{R}^{1 \times 1}$ 及 $\Delta_a \in \mathbf{C}^{1 \times 1}$ 为不确定结构,且有 $\|\Delta\|_\infty \leq 1$ , $\|\Delta_a\|_\infty \leq 1$ 。具体的建模过程见文献[19]。由于LFT参数不确定模型不包含保守性<sup>[18]</sup>,因而获得的结构化不确定模型也基本不包含保守性,最小化地表达了实际模型的摄动情况。

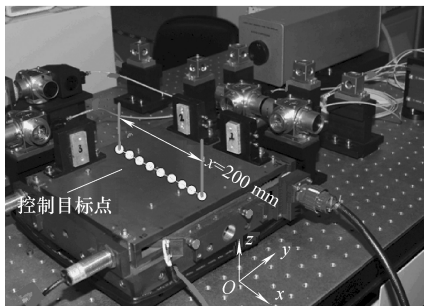


图2 微动台的不同控制目标点

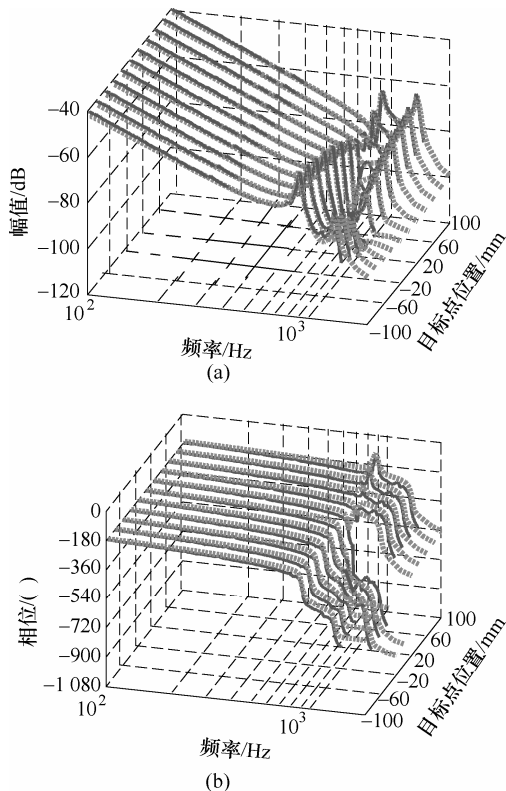


图3 辨识模型与LFT参数不确定模型  
—— 辨识模型      ..... LFT模型

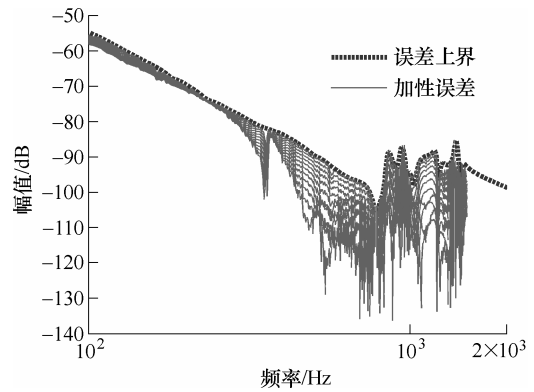


图4 辨识模型与LFT参数不确定模型之间的误差及拟合的加性误差

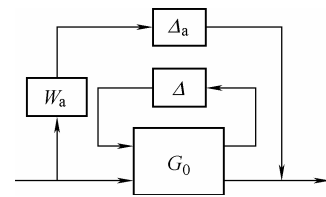


图5 微动台的结构化不确定模型

## 2 离散回路成形设计方法

回路成形设计是在频域内对受控对象的频率响应特性进行补偿,使之达到特定的频域形状而满足预期的设计指标要求。对连续域的传递函数,频率响应通过令 $s = j\omega$ 获得,即频率响应是频率 $\omega$ 的有理函数,而对于离散域的脉冲传递函数,其频率响应需要令 $z = \exp(j\omega T)$ 获得,故频率响应是 $\exp(j\omega h)$ 的有理函数,而与 $\omega$ 呈非线性的关系。因此,离散域内的超前、滞后等补偿环节的频率响应特性与其参数之间的关系不如连续域内那样简单、直观,难以直接进行离散控制器的设计。为解决这一困难,引入 $w$ 变换<sup>[17]</sup>

$$w = W(z) = \frac{2z-1}{Tz+1} \quad (1)$$

式中, $T$ 为采样周期; $w$ 、 $z$ 分别为 $w$ 平面与 $z$ 平面的算子。相应地,定义 $w$ 反变换

$$z = W^{-1}(w) = \frac{1+wT/2}{1-wT/2} \quad (2)$$

于是 $z$ 平面内的控制器可变换到 $w$ 平面

$$C(w) = C(z) \Big|_{z=\frac{1+wT/2}{1-wT/2}} \quad (3)$$

$w$ 变换将 $z$ 平面上的单位圆映射为 $w$ 平面上的虚轴,故 $w$ 平面内的频率响应可通过令 $w = j\nu$ 获取。因此, $w$ 平面的频率响应函数是虚拟频率 $\nu$ 的有理函数,超前、滞后等补偿环节形式及特性与 $s$ 平面的情况完全一致,故可利用连续回路成形设计方法进行

控制器设计, 然后通过  $w$  反变换得到相应的离散控制器, 而不引入离散化逼近误差。

由于  $z = \exp(j\omega T)$ , 于是有

$$w = jv = \frac{2 \exp(j\omega T) - 1}{h \exp(j\omega T) + 1} = j \frac{2}{T} \tan \frac{\omega T}{2} \quad (4)$$

即

$$v = \frac{2}{T} \tan \frac{\omega T}{2} \quad (5)$$

$w$  平面上的频率标度  $v$  相对于真实频率标度出现非线性扭曲。 $w$  变换并不改变频率响应特性, 但频率扭曲使得  $w$  平面下带宽等频率指标不是真实值, 故本研究中利用真实频率响应特性评价控制器的性能指标, 控制器在真实频率标度下的频率响应特性为

$$C(j\omega) = C(w) \Big|_{w=j \frac{2}{T} \tan \frac{\omega T}{2}} \quad (6)$$

由此即可对控制器的带宽、稳定性裕度等性能指标进行评估。

### 3 控制器优化方法

回路成形控制设计指标中, 带宽是体现系统性能重要的指标, 为提高微动台的控制性能, 需要尽可能地提高带宽, 即最小化带宽指标

$$J_{bw} = -\omega_{bw} \quad (7)$$

本文中带宽  $\omega_{bw}$  取为系统的开环剪切频率。另一方面, 定位精度也是微动台的重要性能, 为提高定位精度, 引入干扰抑制指标

$$J_{dis} = \|S(j\omega)D(j\omega)\|_{\infty} \quad (8)$$

式中,  $S$  为系统的灵敏度函数,  $D(j\omega)$  为等效到对象输出端的干扰的频谱。 $D(j\omega)$  可通过稳态定位误差进行估计, 忽略激光干涉仪纳米级的测量噪声, 有

$$\hat{D}(j\omega) = \frac{1}{S(j\omega)} E(j\omega) \quad (9)$$

式中,  $E(j\omega)$  为定位误差频谱。实际进行干扰频谱估计时, 采用低增益的控制器使得定位误差的幅值远大于测量噪声, 从而减小估计的误差。

综合考虑带宽及干扰抑制两方面的性能, 控制器优化目标定义为

$$J_0 = -\omega_{bw} + \lambda \|S(j\omega)D(j\omega)\|_{\infty} \quad (10)$$

式中,  $\lambda$  为加权系数。

回路成形稳定性准则主要有幅值裕度、相位裕度、灵敏度峰值, 以保证控制器对名义模型的稳定性。由于本对象的模型存在摄动, 需要进一步考虑控制器对模型摄动的鲁棒性, 回路成形设计中, 一

般通过增大对名义模型的稳定性裕度来保证对模型摄动的鲁棒性, 但将导致控制器的保守性过大, 从而限制了系统的性能。对图 5 所示的结构化不确定模型, 结构奇异值( $\mu$ )分析可无保守地判断控制器的鲁棒性<sup>[18]</sup>, 因此引入  $\mu$  分析作为鲁棒性判据, 鲁棒性能考虑为加权灵敏度条件, 如图 6 所示, 则鲁棒性约束为

$$\|T_{zw}\|_{\infty} = \|W_p S\|_{\infty} < 1 \quad (11)$$

$$S = \frac{1}{1 + [F_u(G_0, \Delta) + W_a \Delta_a] C} \quad (12)$$

式中,  $T_{zw}$  加权的灵敏度函数,  $W_p$  为灵敏度性能加权,  $S$  是灵敏度,  $F_u(G_0, \Delta)$  为关于  $G_0$  和  $\Delta$  的上线性分式变换, 定义为

$$F_u(N, \Delta) = N_{22} + N_{21} \Delta (I - N_{11} \Delta)^{-1} N_{12} \quad (13)$$

为使得灵敏度峰值不超过 6 dB, 取

$$W_p = \frac{\frac{s}{2} + \omega_B}{s} \quad (14)$$

式中,  $\omega_B$  为灵敏度低于 0 dB 频率, 在此可取  $\omega_B = 0$ 。为鲁棒性定义一个虚拟的模型摄动结构  $\Delta_p \in \mathbb{C}^{l \times l}$  ( $|\Delta_p|_{\infty} \leq 1$ ), 得到新的不确定结构

$$\hat{\Delta} = \text{diag}\{\Delta, \Delta_a, \Delta_p\} \quad (15)$$

将控制回路中的不确定结构  $\hat{\Delta}$  拉出, 写成  $N\Delta$  形式, 如图 7 所示, 若控制回路对名义模型稳定, 则鲁棒性条件表达为

$$\mu_{\hat{\Delta}}(N(j\omega)) < 1 \quad (16)$$

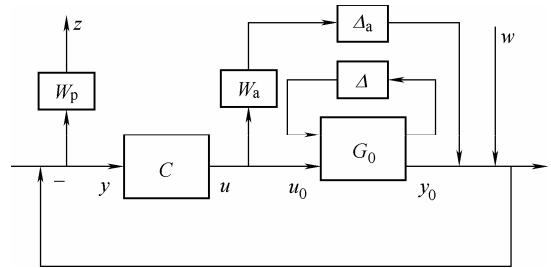


图6 加权灵敏度鲁棒性框图

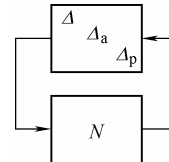


图7  $\mu$ 分析所需的  $N\Delta$  形式

将名义性能约束及鲁棒性约束条件以罚函数的形式加在优化目标上, 得到无约束的优化问题

$$J = J_0 + J_G + J_P + J_V + J_S + J_R \quad (17)$$

式中,  $J_G$ 、 $J_P$ 、 $J_V$ 、 $J_S$ 、 $J_R$  分别是幅值裕度、

相位裕度、第二相位裕度、灵敏度峰值及鲁棒性条件对应的罚函数

$$J_G = \begin{cases} 0 & G_m \geq \gamma_G \\ P_G (G_m - \gamma_G)^2 & G_m < \gamma_G \end{cases} \quad (18)$$

$$J_P = \begin{cases} 0 & P_m \geq \gamma_P \\ P_P (P_m - \gamma_P)^2 & P_m < \gamma_P \end{cases} \quad (19)$$

$$J_V = \begin{cases} 0 & |P(j\omega)C(j\omega)| < 1 \quad \omega > \omega_{bw} \\ 0 & P_{m,2nd} > \gamma_{P2nd} \\ P_V (P_{m,2nd} - \gamma_{P2nd})^2 & P_{m,2nd} \leq \gamma_{P2nd} \end{cases} \quad (20)$$

$$J_S = \begin{cases} 0 & \|S\|_\infty \leq \gamma_S \\ P_S (\|S\|_\infty - \gamma_S)^2 & \|S\|_\infty > \gamma_S \end{cases} \quad (21)$$

$$J_R = \begin{cases} 0 & \mu_{\hat{A}}(N(j\omega)) < 1 \quad \forall \omega \in \omega \\ P_R (\mu_{\hat{A}}(N(j\omega)) - 1)^2 & \mu_{\hat{A}}(N(j\omega)) \geq 1 \quad \forall \omega \in \omega \end{cases} \quad (22)$$

式中,  $G_m$ 、 $P_m$ 、 $P_{m,2nd}$ 、 $\|S\|_\infty$  分别是幅值裕度、相位裕度、第二相位裕度以及灵敏度峰值,  $\gamma_G$ 、 $\gamma_P$ 、 $\gamma_{P2nd}$  与  $\gamma_S$  分别是允许的极限值,  $P_G$ 、 $P_P$ 、 $P_V$ 、 $P_S$  及  $P_R$  是各约束的惩罚系数,  $\omega$  是  $\mu$  值计算频率点矢量, 由于模型摄动仅存在于高频共振频段,  $\omega$  也仅需要覆盖共振频段, 以减小计算时间。

## 4 离散控制器优化

微动台模型在低频段表现为双积分模型, 高频段存在模态引起的共振特性, 根据回路成形设计原则, 控制器需要包含相位超前环节, 以镇定双积分模型, 并且需要包含一个积分环节, 以提高低频段增益并消除稳态误差, 对于模型中的高频共振特性, 一般通过陷阱滤波器抑制共振峰幅值以保证稳定性。根据文献[20-21], 相位镇定方法, 即利用相位滞后环节改变共振频段的相位特性, 使得开环传递函数的 Nyquist 轨迹在谐振频率处位于 Nyquist 图的右半平面, 避开  $(-1, 0j)$  点而保证对高频共振特性的稳定性, 而且能够获得比陷阱滤波更好的性能, 故在此利用滞后环节抑制模型的共振。另外, 第 1 节中的模型辨识及建模仅考虑了微动台在 1 500 Hz 以下的特性, 更高频的特性并未被准确表达, 为此在控制器增加一个截止频率 1 500 Hz 的二阶低通滤波器以抑制高频未建模动态特性的影响。根据之前的设计经验, 复二阶超前及滞后环节的性能优于实一阶及

二阶环节<sup>[15]</sup>, 因此, 控制器的结构选为

$$C(w) = K \frac{1 + \frac{w}{v_I}}{w} \frac{w^2 + 2\xi_{Lnz} v_{Lnz} w + v_{Lnz}^2}{w^2 + 2\xi_{Lnp} v_{Lnp} w + v_{Lnp}^2} \times \frac{w^2 + 2\xi_{Rnz} v_{Rnz} w + v_{Rnz}^2}{w^2 + 2\xi_{Rnp} v_{Rnp} w + v_{Rnp}^2} \times \frac{v_{roll}^2}{w^2 + 2 \times 0.7 v_{roll} w + v_{roll}^2} \quad (23)$$

式(23)中除低通滤波器截止频率  $v_{roll}$  以外的控制器参数都通过优化获得。值得注意的是, 式(23)的控制器参数的频率都是以  $w$  平面的虚拟频率标度  $v$  表达的, 需要通过式(5)计算出虚拟频率标度下的低通滤波截止频率  $v_{roll}$ 。

通过遗传算法对控制器的待定参数进行优化, 为提高遗传算法的收敛速度, 适应度定义为优化目标函数的指数尺度变换, 即

$$F_{fitness} = \exp(-\alpha J) \quad (24)$$

式中,  $\alpha$  为尺度变换系数, 通过试算,  $\alpha = 0.1$ , 种群数设定为 500, 最大进化代数取为 100, 可获得稳定的优化结果且有较快收敛速度。优化算法在 Matlab 平台下按照标准的遗传算法编程实现。

为获得合适的参数搜索空间, 首先通过经验设计方法粗略设计一组满足名义稳定性的控制器参数, 在此基础上给出一定的浮动空间作为优化参数的上下界。通过优化获得的  $w$  平面的最优的控制器, 并通过  $w$  反变换转换为  $z$  平面的离散控制器, 记为  $C_o(z)$ 。

## 5 优化控制器性能分析及试验

为验证上述离散控制器优化方法有效性, 利用经验回路成形方法, 设计了一个性能相对最优的控制器  $C_m(s)$ , 并通过双线性变换获得其离散形式  $C_m(z)$ , 以作为性能对比的基准控制器。由于微动台不同目标点的模型在谐振频率处相位特性差异很大, 经验设计难以采用相位镇定方法对所有模型的谐振特性保证闭环稳定, 故利用经验回路成形设计中最常用的陷阱滤波器抑制模型的共振特性,  $C_m(s)$  与式(23)的控制器具有相同的阶次。实际上, 当参数取特定值时, 式(23)中相位镇定所用的复二阶滞后环节即变为陷阱滤波器。此外, 采用连续控制器优化方法以相同的优化目标及约束对相同结构的控制器进行了参数优化, 得到最优的连续控制器, 记为  $C_o^{con}(s)$ , 并离散化为  $C_o^{con}(z)$ 。

图 8 显示了  $C_m(s)$ 、 $C_o^{con}(s)$  以及  $C_o(z)$  对模型摄动的  $\mu$  值曲线, 均仅略微超过 1, 图 9 为对摄动模型的最坏情况(即峰值最大)的灵敏度 Bode 图, 灵敏度

的峰值都在 6 dB 左右,因此上述三个控制器都基本满足鲁棒性约束。从图 9 可看出,相对于经验设计控制器  $C_m(s)$ ,优化控制器  $C_o^{con}(s)$  与  $C_o(z)$  在低频段的灵敏度幅值较低,且灵敏度凸起部分的频率较高,因而性能更优。经验设计中为保证稳定性要求,控制器一般都包含较大的保守性,而在所提出的控制器优化方法中,约束条件仅保证了对模型摄动必要的鲁棒性而基本不包含保守性,因此,相对于经验设计方法,所提出的控制器优化方法能够最优化控制性能。

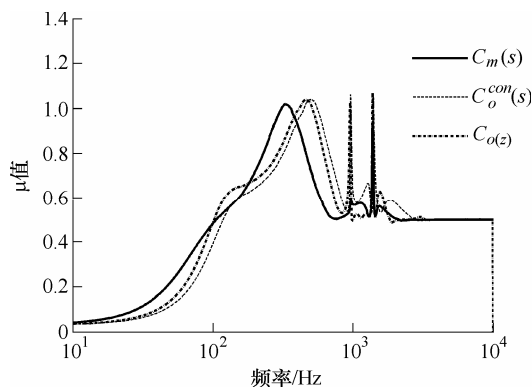


图 8  $C_m(s)$ ,  $C_o^{con}(s)$  与  $C_o(z)$  对应的  $\mu$  值曲线

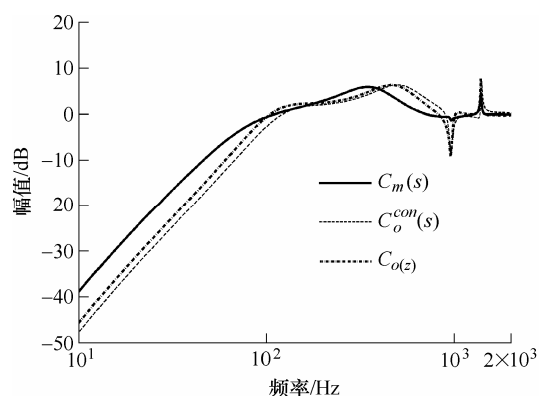


图 9  $C_m(s)$ ,  $C_o^{con}(s)$  与  $C_o(z)$  对摄动模型的最坏情况灵敏度

图 10 显示了  $C_m(z)$  与  $C_o^{con}(z)$  对模型摄动的  $\mu$  值曲线,从图 10 中可看出,  $C_o^{con}(z)$  对应的  $\mu$  值的最大值远超过 1,二者对应的最坏情况的灵敏度如图 11 所示,  $C_o^{con}(z)$  对应的灵敏度峰值约为 16 dB,不满足鲁棒性要求,而  $C_m(z)$  基本满足鲁棒性要求。试验显示,  $C_m(z)$  及  $C_o(z)$  对所有的目标点都能保证稳定性,而  $C_o^{con}(z)$  仅在控制目标点靠近微动台的几何中心时能保证稳定性,当目标点靠近边缘时系统不稳定,与上述分析结果一致。连续优化方法中,离散化过程导致最终的离散控制器  $C_o^{con}(z)$  不稳定,而离散优化方法直接针对离散控制器进行参数优化,规避了离散化的过程,因而能够获得性能最优的离散控制器  $C_o(z)$ 。  $C_m(z)$  能够保证稳定主要是因为其包含较大的保守性,离散化逼近误差的影响不明显。

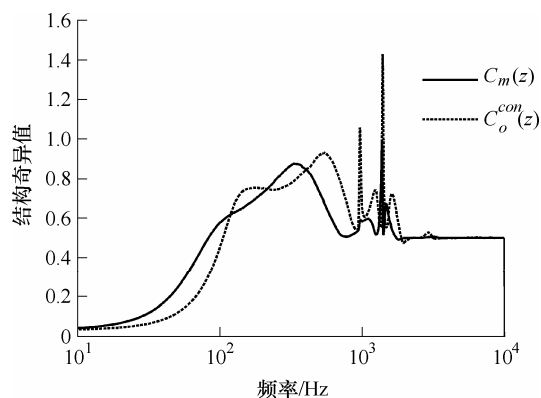


图 10  $C_m(z)$ ,  $C_o^{con}(z)$  对应的  $\mu$  值曲线

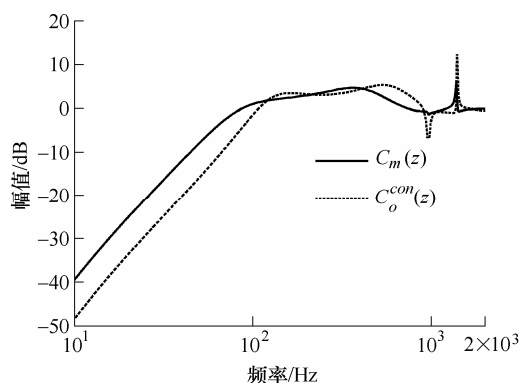
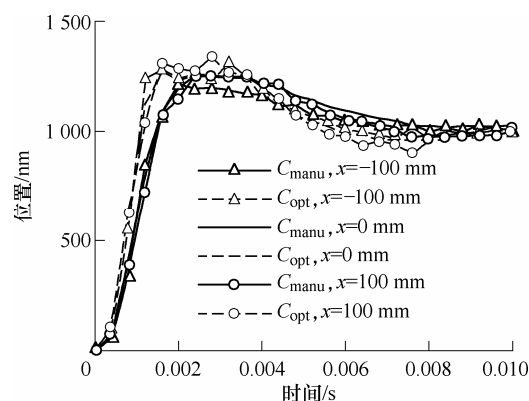
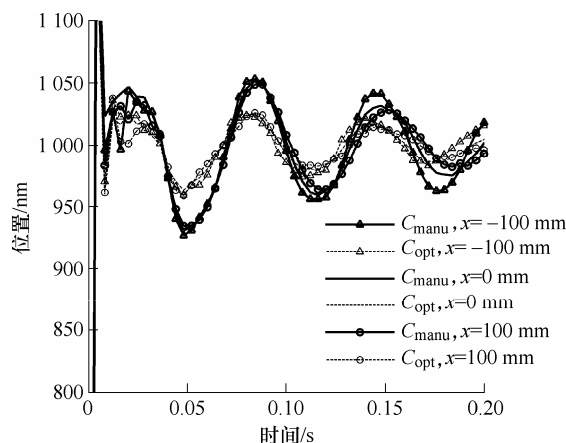
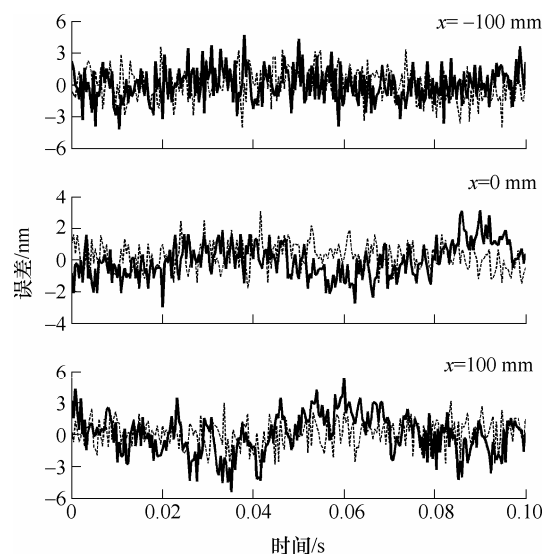


图 11  $C_m(z)$ ,  $C_o^{con}(z)$  对摄动模型的最坏情况灵敏度

分别采用  $C_m(z)$  及  $C_o(z)$  在微动台系统上进行控制试验,利用阶跃及定位试验评价两个控制器的性能,控制目标点依次取为图 2 所示的 11 个目标点。为表达清晰起见,图 12~14 仅绘制了控制目标点处于三个特殊位置,即  $x = -100$  mm,  $0$  mm,  $100$  mm 的情况,而所有目标点下的控制性能统计在下表中给出。图 12 为  $1 \mu\text{m}$  阶跃响应的上升过程,图 13 为阶跃响应的调整过程,试验结果显示,采用同一控制器时,微动台在不同的目标点下的阶跃响应基本相同;而在各个目标点下,离散优化控制器  $C_o(z)$  在阶跃的上升及调整的快速性方面都明显优于经验设计的控制器  $C_m(z)$ 。图 14 为稳态定位误差的时域曲线,采用同一控制器时,目标点越靠近几何中心,定位误差越小;在各个目标点下,采用  $C_o(z)$  控制时的定位误差均明显小于  $C_m(z)$  控制的情况。

相对于经验设计的控制器  $C_m(z)$ ,采用离散优化控制器  $C_o(z)$  控制时,微动台阶跃响应的平均上升时间减小了 25%,阶跃响应的平均调整时间减小了 92%,平均定位误差减小了 27%,可见离散优化控制器显著提高了微动台的控制性能。

图12  $C_m(z)$  及  $C_o(z)$  控制下的  $1\mu\text{m}$  阶跃的上升过程图13  $C_m(z)$  及  $C_o(z)$  控制下的  $1\mu\text{m}$  阶跃的调整过程图14  $C_m(z)$  及  $C_o(z)$  控制下的定位误差表  $C_m(z)$  及  $C_o(z)$  在 11 个目标点下的控制性能统计

性能统计	上升时间(90%)		调整时间( $\pm 5\%$ )		定位误差( $3\sigma$ )	
	/ms		/ms		/nm	
	$C_m(z)$	$C_o(z)$	$C_m(z)$	$C_o(z)$	$C_m(z)$	$C_o(z)$
最大值	1.38	1.06	90.2	8.0	6.45	4.42
最小值	1.31	0.98	83.0	5.4	3.39	2.56
平均值	1.35	1.01	86.9	6.7	4.53	3.30

## 6 结论

(1) 对于高性能的要求的微动台系统, 通常采用的“连续设计-离散化”方法所引入的离散化逼近误差是限制性能的重要因素, 文中所提出的离散控制器优化方法能够规避离散化误差的影响, 提高超精密微动台的控制性能。

(2) 建立了完整的离散回路成形控制器优化框架, 以控制带宽及干扰抑制能力为优化目标, 并通过  $\mu$  分析无保守性的保证对模型摄动的鲁棒性。通过遗传算法对控制器参数进行寻优, 能够获得性能最优的离散控制器。

(3) 试验结果显示, 相对于经验回路成形“连续设计-离散化”方法获得的控制器, 优化的控制器在微动台的动态响应速度、定位精度等控制性能方面都有显著的提高, 验证了所提出方法的有效性。

## 参考文献

- [1] STEINBUCH M, NORG M. Advanced motion control: An industrial perspective[J]. European Journal of Control, 1998, 4: 278-293.
- [2] WAL Van De M, BAARS Van G, SPERLING F, et al. Multivariable feedback control design for high-precision wafer stage motion[J]. Control Engineering Practice, 2002, 10(7): 739-755.
- [3] GROOT W M, WAL Van De M, SCHERER C, et al. LPV control for a wafer stage: Beyond the theoretical solution[J]. Control Engineering Practice, 2005, 13(2): 231-245.
- [4] T'OTH R, WAL Van de M, HEUBERGER P S C, et al. LPV identification of high performance positioning devices[C]//Proc. American Control Conference, San Francisco, 2011: 151-158.
- [5] ROOVER D. Motion control of a wafer stage: A design approach for speeding up IC productionp[D]. Delft: Delft University of Technology, 1997.
- [6] SHIH-KANG K, XIMIN S, CHIA-HSIANG M. Large travel ultra precision x-y- $\theta$  motion control of a magnetic-suspension stage[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2003, 8(3): 334-341.
- [7] 张尚盈, 陈学东, 赵慧, 等. 精密硅片台的运动控制[J]. 中国机械工程, 2008, 9(12): 1474-1479.  
ZHANG Shangying, CHEN Xuedong, ZHAO Hui, et al. Motion control of a precise wafer stage[J]. China Mechanical Engineering, 2008, 9(12): 1474-1479.
- [8] DEJIMA S, GAO W, KATAKURA K, et al. Dynamic

- modeling, controller design and experimental validation of a planar motion stage for precision positioning [J]. Precision Engineering, 2005, 29(3): 263-271.
- [9] MAEDA G J, SATO K, HASHIZUME H, et al. Control of an XY nano-positioning table for a compact nano-machine tool[J]. JSME International Journal Series C, 2006, 49(1): 21-27.
- [10] GU J, KIM W, VERMA S. Nanoscale motion control with a compact minimum-actuator magnetic levitator [J]. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2005, 127(3): 433-442.
- [11] 李黎川, 丁玉成, 卢秉恒. 超精密磁悬浮工作台及其解耦控制[J]. 机械工程学报, 2004, 40(9): 84-88.  
LI Lichuan, DING Yucheng, LU Bingheng. High-precision magnetically suspended table and its decoupling control[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(9): 84-88.
- [12] BRUIJNEN D, MOLENGRAFT Van De R, STEINBUCH M. Optimization aided loop shaping for motion systems[C]//IEEE International Conference on Control Applications, Munich, Germany, 2006: 255-260.
- [13] KAY-SOON L, TZE-SHYAN W. A multiobjective genetic algorithm for optimizing the performance of hard disk drive motion control system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(3): 1716-1725.
- [14] KAITWANIDVILAI S, OLRANTHICHACHAT P. Robust loop shaping-fuzzy gain scheduling control of a servo-pneumatic system using particle swarm optimization approach[J]. Mechatronics, 2011, 21(1): 11-21.
- [15] YANG Jin, ZHU Yu, YIN Wensheng, et al. Optimization of phase stabilization controller for an ultra-precision positioning stage using structured genetic algorithm [J]. Proceedings of Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, 2012, 226(6): 841-851.
- [16] 杨进, 尹文生, 朱煜, 等. 超精密微动台控制器带宽优化研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(11): 9-13.
- YANG Jin, YIN Wensheng, ZHU Yu, et al. Controller bandwidth optimization for ultra-precision position stage [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(11): 9-13.
- [17] ASTROM K, WITTENMARK B. Computer-controlled systems: Theory and design [M]. New Jersey: Prentice Hall 2002.
- [18] SKOGESTAD S, POSTLETHWAITE I. Multivariable feedback control analysis and design, second edition[M]. New York: John Wiley & Sons Ltd., 2005.
- [19] YANG Jin, YIN Wensheng, ZHU Yu, et al. Structured uncertainty modeling of position-dependent model variations for an ultra-precision stage[C]//Accepted by IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, July 11-14, 2012, Kaohsiung, 2012: 843-848.
- [20] ATSUMI T, ARISAKA T, SHIMIZU T, et al. Vibration servo control design for mechanical resonant modes of a hard-disk-drive actuator[J]. JSME International Journal Series C, 2003, 46(3): 819-827.
- [21] KOBAYASHI M, NAKAGAWA S, NAKAMURA S. A phase-stabilized servo controller for dual-stage actuators in hard disk drives[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2003, 39(2): 844-850.

作者简介: 杨进(通信作者), 男, 1984 年出生, 博士研究生。主要研究方向为机电系统建模与辨识、超精密运动控制。

E-mail: j-y07@mails.tsinghua.edu.cn

朱煜, 男, 1965 年出生, 博士, 教授。主要研究方向为精密测量与控制理论、超精密机械设计与制造、电子制造工艺及其装备。

E-mail: zhuyu@tsinghua.edu.cn

尹文生, 男, 1968 年出生, 副教授。主要研究方向为超精密运动集成与控制、测量与控制技术。

E-mail: yinws@tsinghua.edu.cn

杨开明, 男, 1970 年出生, 博士, 助理研究员。主要研究方向为精密运动控制、数字控制技术。

E-mail: yangkm@mails.tsinghua.edu.cn

张鸣, 男, 1975 年出生, 博士, 助理研究员。主要研究方向为超精密运动定位系统、结构设计及动力学。

E-mail: zm01@mails.tsinghua.edu.cn