

文章编号 1004-924X(2021)09-2149-09

电磁驱动柔顺微定位平台闭环频域 逆迭代学习控制

张 旭¹, 赖磊捷^{1*}, 李朋志^{2,3}, 朱利民⁴

- (1. 上海工程技术大学 机械与汽车工程学院, 上海 201600;
2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
3. 格鲁斯特大学 计算与工程学院, 英国 切尔滕纳姆 GL50 2RH;
4. 上海交通大学 机械与动力工程学院 机械系统与振动国家重点实验室, 上海 200240)

摘要: 为了克服音圈电机电磁驱动柔顺微定位平台在大行程范围内存在的低阻尼谐振和动力学特性差异等问题, 利用综合数据驱动频域逆迭代前馈补偿和含相位超前校正 PI 反馈控制的复合闭环频域逆迭代学习控制方法对其进行高速高精控制。首先, 搭建了音圈电机驱动双平行四边形柔性机构微定位系统, 并针对不同工作点位进行了动力学模型辨识。然后, 为提高系统相对稳定性, 设计了含相位超前校正环节的 PI 反馈控制器。同时, 利用输入输出数据对系统频响函数进行在线逆估计并进行前馈补偿, 来进一步消除谐振的影响。最后, 利用所提出的控制方法进行了跟踪实验并与其它方法进行了对比。实验结果表明, 提出的控制方法对三角波期望轨迹的最大跟踪误差为 0.175%, 相比于 PID 控制、相位超前 PI 控制、传递函数逆模型前馈控制, 跟踪均方根误差分别减少了 8.75、5.43 和 2.21 倍, 能够较好满足大行程微纳米定位跟踪精度高、速度快、抗干扰能力强的要求。

关键词: 音圈电机; 微定位平台; 柔性机构; 相位超前; 频域逆迭代

中图分类号: TP29 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20212909.2149

Closed-loop inverse iterative learning control in frequency-domain for electromagnetic driven compliant micro-positioning platform

ZHANG Xu¹, LAI Lei-jie^{1*}, LI Peng-zhi^{2,3}, ZHU Li-min⁴

- (1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201600, China;
2. Changchun Institute of Optic, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
3. School of Computing and Engineering, University of Gloucestershire, Cheltenham, GL50 2RH, UK;
4. State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

* Corresponding author, E-mail: lailj@sues.edu.cn

Abstract: To overcome the problems of low damping resonance and different dynamics properties in the

收稿日期: 2021-01-24; **修订日期:** 2021-03-11.

基金项目: 国家自然科学基金联合基金重点支持项目(No. U2013211); 国家自然科学基金青年科学基金项目(No. 51605275); 上海自然科学基金资助项目(No. 21ZR1426000); (C)1994-2022 China Academic Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

large-range compliant micro-positioning stage driven by a voice coil motor, a compound closed-loop frequency-domain inverse iterative learning control method based on data-driven frequency-domain inverse iterative feedforward compensation and PI feedback control with phase-lead compensation is used for high-speed and high-precision control. First, the micro-positioning stage with a double-parallelogram flexure mechanism driven by a voice coil motor is built, and a dynamics model is identified for different working positions. Then, a PI feedback controller with phase-lead compensation is designed to improve the relative stability of the positioning system. Input and output data are then used for online inverse estimation of the system frequency response function, which can be used as feedforward compensation to further eliminate the resonance effect. Finally, tracking experiments are conducted using the proposed control method, which is then compared with other methods. Experimental results show that the maximum tracking error for the triangular trajectory using the proposed control method is 0.175%. Compared with a PID control, phase-leading PI control, and transfer function inverse feedforward control, the root mean square errors of tracking are reduced by 8.75, 5.43, and 2.21 times, respectively, which can better meet the requirements of high tracking accuracy, fast speed, and strong anti-interference ability of large stroke micro/nano-positioning.

Key words: voice coil motor; micro-positioning stage; compliant mechanism; phase-lead; frequency-domain inverse iteration

1 引言

近年来,纳米精度运动和定位技术在微纳制造装备、超精密加工机床、高端光电装备、微纳操作机器人和集成电路制造等领域有着广泛而重要的应用。基于压电陶瓷驱动器的常规压电微位移驱动技术行程一般只有几十微米,即使通过位移放大,也只有几百微米。而且压电陶瓷驱动器存在的蠕变和磁滞等非线性效应对其控制提出了更高要求。以音圈电机为代表的电磁直驱技术通过合理排布永磁阵列并改变线圈电流大小来控制电磁力大小并实现精确的位移输出,能够较好满足大行程、超精密的定位需求。该类驱动器具有无摩擦、结构紧凑、体积小、运动灵敏度和分辨率高等优点。结合柔性机构无摩擦、无间隙和无需装配等突出性能,基于电磁直驱和柔性机构的微纳米定位技术在大行程高速微位移定位技术中具有极大的应用潜力^[1-3]。

音圈电机利用洛伦兹力驱动低刚度柔性机构能够实现较大运动范围内的微纳米定位。然而低刚度柔性机构容易产生较低的谐振频率,在通频带内容易出现自激振荡,从而影响系统的控制品质^[4]。另外,大变形柔性机构在不同工作点位的静动力学特性存在差异,容易影响系统鲁棒

性。为解决上述问题,澳门大学徐青松等提出了基于状态空间的增强型PID模型预测控制方法,同时增加了基于期望轨迹的前馈控制,表现出了优于传统PID和预测控制的跟踪性能^[5]。MIT的Awtar等设计了结合线性反馈的迭代学习控制器,能够将周期性的跟踪误差减少两个数量级以上^[6]。奥地利Schitter等在闭环系统模型前方串联陷波滤波器,使得系统模型与陷波滤波器零极点对消来抑制谐振^[7]。山东大学闫鹏等提出了一种并联内模抗饱和跟踪控制方法,将参考信号的动力学特性植入控制器,理论上可实现无静差跟踪^[8]。国内外诸多学者在该方面也做了大量的研究工作^[9-12]。但是,当前诸如陷波滤波、动力学逆模型前馈和主动阻尼控制等主流的谐振控制器较多依赖于系统的建模精度,并且一般具有“高通”特性,易对噪声以及未建模高频动态进行放大,从而影响定位精度和稳定性。因此,如何设计有效控制算法应对大行程微定位系统低阻尼谐振频率和谐振点漂移等复杂动力学特性是其获得良好控制性能的关键。

为解决上述问题,本文提出综合数据驱动频域逆迭代前馈补偿和含相位超前校正PI反馈控制的复合闭环频域逆迭代学习控制方法。首先,搭建了基于音圈电机与双平行四杆柔性机构的

微定位平台,并对平台进行了动力学模型的系统辨识,通过校正开环系统的稳定裕量,设计了含有相位超前环节的PI反馈控制器,增加了系统的相对稳定性。为进一步消除平台谐振的影响,从频域的角度,利用输入输出数据对系统频响函数进行在线逆估计并作为前馈补偿,来“学习”和“消除”定位系统的复杂动力学特性。最后,通过利用提出的控制方法对不同频率三角波信号进行跟踪实验并与其它控制方法进行对比,验证了本文所提出的控制方法的有效性。

2 音圈电机驱动柔顺微定位平台

如图1(a)所示,微定位平台中,采用苏州优尔特公司型号为VCA0070-0149-00A的音圈电机来驱动双平行四杆柔性机构以实现较大行程范围的直线精密运动。该电机能够在散热情况良好的条件下,产生40 N的持续推力、70 N的顶峰推力以及14.9 mm的总行程。采用美国Trust

公司的TA115线性放大器将数据采集卡的输出电压($-10\sim+10\text{ V}$)线性转换为音圈电机的驱动电流($-8\sim+8\text{ A}$)。平台位移由激光位移传感器(HL-G103-S-J)进行测量,该传感器能够实现 $\pm 4\text{ mm}$ 的测量范围,对应 $0\sim 10\text{ V}$ 的模拟量输出,测量分辨率为 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 。采用NI公司的PCI-6221数据采集卡来采集反馈电压和输出驱动电压,并搭建了基于xPC Target的微定位平台硬件在回路半实物仿真系统。实验系统的整体组成如图1所示。

如图1(b)所示,平台中双平行四杆柔性机构的柔性梁长度 l 、宽度 b 、厚度 h 分别为60,15和1 mm,机构的整体刚度 k 为^[13]:

$$k = \frac{2Ebh^3}{l^3} = 9.89\text{ N}\cdot\text{mm}^{-1}, \quad (1)$$

其中, E 为材料的弹性模量,柔性机构采用航空铝7075,弹性模量为71.7 GPa。

微定位平台的运动微分方程可表示为:

$$\begin{aligned} F &= m_e \ddot{z}_m + c \dot{z}_m + k z_m \\ m_e &= m_m + m_c + m_s/2, \end{aligned} \quad (2)$$

其中: m_m 为音圈电机定子质量, m_c 和 m_s 分别为双平行四杆机构末端和中间平台的质量, z_m 为末端平台位移, c 和 k 分别是柔性机构的阻尼和刚度。音圈电机驱动力 F 与其输入电流 I 成正比:

$$F = k_m I, \quad (3)$$

其中, k_m 为音圈电机的电机常数等于 $17.7\text{ N}\cdot\text{A}^{-1}$ 。音圈电机的输入电流 I 由数据采集卡输出电压 V_r 经线性放大器TA115产生,两者关系为:

$$I = \alpha V_r, \quad (4)$$

其中, α 为线性放大器的放大系数,等于 $0.8\text{ A}\cdot\text{V}^{-1}$ 。

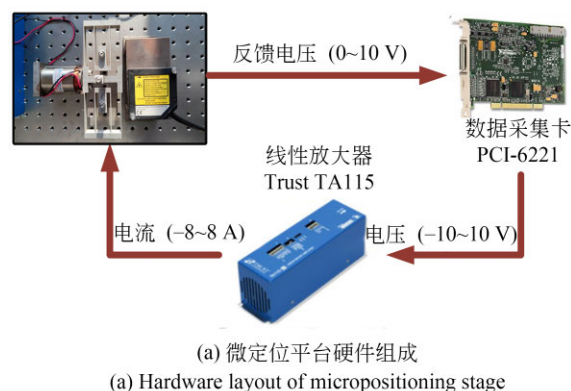
根据上述分析,得到输入电压 V_r 与平台输出位移 z_m 对应的电压值($V_m = k_s z_m$, $k_s = 1.25\text{ V}\cdot\text{mm}^{-1}$)间的传递函数为

$$G(s) = \frac{V_m(s)}{V_r(s)} = \frac{K}{(1/\omega_n^2)s^2 + (2\zeta/\omega_n)s + 1}, \quad (5)$$

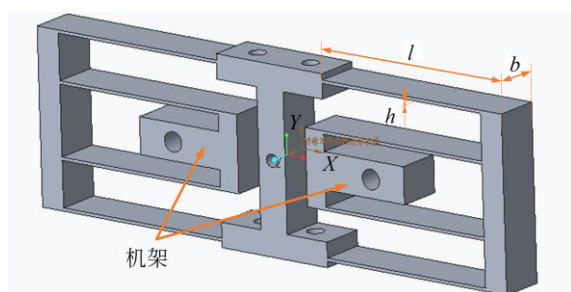
其中: $K = \frac{\alpha k_m k_s}{k}$, ω_n 和 ζ 分别为系统的无阻尼固有频率和阻尼比:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m_e}}, \quad \zeta = \frac{c}{2\sqrt{k m_e}}. \quad (6)$$

根据平台参数,计算可得系统无阻尼固有频率的理论值为50 Hz。



(a) 微定位平台硬件组成
(a) Hardware layout of micropositioning stage



(b) 双平行四杆柔性机构
(b) Double parallel four-bar flexure mechanism

图1 音圈电机驱动柔顺微定位平台实验系统

Fig. 1 Experimental setup of compliant micropositioning stage driven by voice coil motor

3 控制器设计

为了实现音圈电机驱动柔顺微定位平台的高速轨迹跟踪控制,本文拟采用综合数据驱动的频域逆迭代前馈补偿和含相位超前校正PI反馈控制的复合闭环频域逆迭代学习控制方法,希望通过使用频域逆迭代学习控制方法对闭环反馈控制器进行性能优化,来应对平台复杂动力学特性对控制性能带来的不利影响。首先对平台的传递函数模型进行了系统辨识,根据辨识结果,设计了含相位超前环节的PI闭环控制器以提升系统的幅值裕量和相位裕量,提高系统稳定性。之后,针对大行程柔顺微定位平台的高阶谐振、谐振点漂移等复杂动力学特性,利用系统输入输出数据对系统频率响应逆模型进行估计和更新,在闭环控制的基础上进行前馈补偿。

3.1 系统传递函数模型辨识

为了设计线性反馈控制器,首先需要得到微定位平台的传递函数模型。选择幅值尽量小的带限白噪声信号作为平台输入信号^[4],并通过调整该噪音信号的偏置电压,将微定位平台的位移限制在0,±2和±4 mm五个不同的位置进行系统辨识,利用傅里叶变换对采集到的输入输出时域信号进行处理,得到平台在上述五个不同工作位置的开环频率响应,如图2所示。同时,利用使用MATLAB系统辨识工具箱ident对平台的输入输出数据进行处理,由于平台中采用的双平行四杆机构含有二级运动平台,容易产生运动方向以外的高阶谐振,因此为了更加精确描述系统真实动力学模型,辨识中采用包含三组二阶振荡环节的六阶传递函数模型^[13],如下式:

$$G(s)=\frac{k'}{\prod_{i=1}^3(s^2+2\zeta_i\omega_{ni}s+\omega_{ni}^2)}.$$
 (7)

辨识得到的五个点位处的传递函数模型参数如表1所示,其伯德图和测量获得的频率响应对比如图3所示,可见辨识结果与实际测量结果吻合度较高,但同时平台也存在预期的高阶谐振及其谐振点漂移等问题。另外,图2和图3也显示了不同工作点位处的平台动力学模型主谐振频率基本一致,均在50 Hz附近,能够为设计高性能线性反馈控制器提供重要依据。

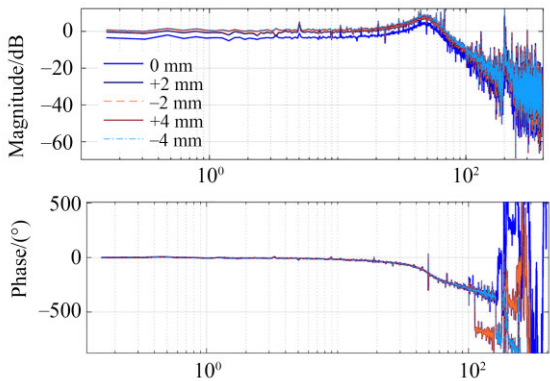


图2 测量获得的不同工作点位处频率响应

Fig. 2 Measured frequency responses in different positions

表1 辨识获得的传递函数模型参数

Tab. 1 Identification parameters of transfer function

	0 mm	+2 mm	-2 mm	+4 mm	-4 mm
ζ_1	0.20	0.20	0.20	0.19	0.19
ζ_2	0.72	0.84	0.83	0.82	0.81
ζ_3	0.22	0.52	0.51	0.22	0.21
ω_{n1}	50.44	50.27	50.22	50.36	50.34
ω_{n2}	100.15	101.10	103.17	116.14	115.94
ω_{n3}	220.36	159.31	157.23	187.26	186.19
$k'(e^{11})$	8.07	43.5	43.2	7.65	7.57

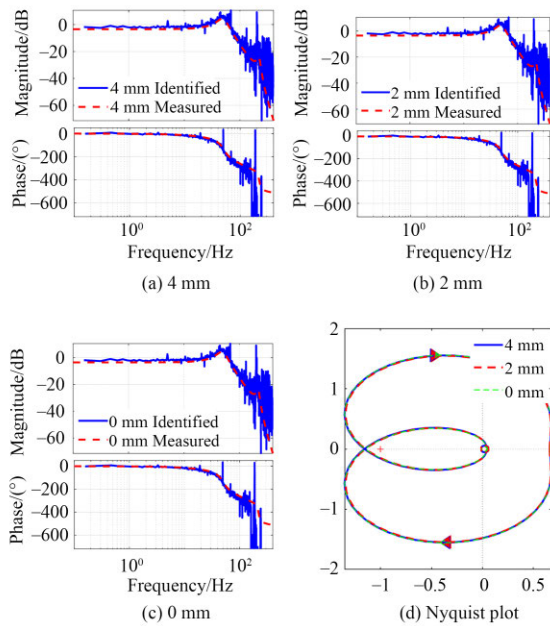


图3 测量获得的频率响应与辨识结果

Fig. 3 Measured and identified frequency response

3.2 含相位超前环节的PI控制器

由图4可知,系统的开环传递函数 $G(s)$ 的幅值裕量和相位裕量分别只有1.24 dB和 -19.2° ,过小的稳定裕量使得平台的稳定性较差,调整时间过长,极大的影响了跟踪精度。由图3(d)中Nyquist图也可以看出系统的不稳定状态。单纯使用传统PID控制器难以抵消低阻尼谐振引发的相位快速下降对系统稳定性带来的影响,无法同时满足稳定性和精确性的要求,因此为了使定位平台具有更好的轨迹追踪性能,本节利用含相位超前的PI控制器来同时提升系统的相对稳定性和稳态精度。

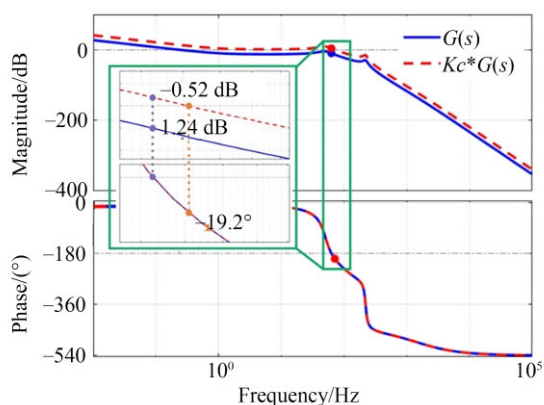


图4 调整开环增益前后未校正系统bode图

Fig. 4 Bode diagram of uncorrected system before and after adjusting open-loop gain

相位超前校正可有效提高系统的相位裕量,使定位平台满足稳定性的要求。首先根据校正前系统开环增益和校正后系统的静态速度偏差要求,确定控制器增益为 $K_c=4.95$,增益调整前后的未校正系统伯德图如图4所示。

可见增益调整后的未校正系统的相位裕量为 $\gamma_1=-19.2^\circ$,设定期望的相位裕量 $\gamma=30^\circ$,可确定超前校正控制器的相位超前角:

$$\theta = \gamma - \gamma_1 + \theta_c = 53^\circ, \quad (8)$$

其中, $\theta_c=3.8^\circ$ 为超前校正环节引起的系统剪切频率右移产生相角变化的补偿量。由 $\alpha=(1-\sin\theta)/(1+\sin\theta)$ 得到对应的 α 值为0.11,根据 $10\lg(1/\alpha)$ 得到所对应的频率 $\omega_m=347 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$,求得超前校正控制器转角频率对应时间常数为:

$$T = \frac{1}{\omega_m \sqrt{\alpha}} = \frac{3}{347} = 8.654 \times 10^{-3}. \quad (9)$$

由此可得相位超前校正环节的传递函数为:

$$C_a(s) = \frac{Ts+1}{\alpha Ts+1} = \frac{8.654s+1000}{0.952s+1000}. \quad (10)$$

为了减小系统的稳态误差,在相位超前环节的基础上增加PI控制器,为了减少PI控制器对相位裕量的影响,积分环节中选择时间常数 $T_i=1/50$,最终得到含相位超前环节的PI反馈控制器如下式:

$$C_f(s) = K_c \cdot \frac{Ts+1}{\alpha Ts+1} \cdot \frac{T_i s+1}{s}. \quad (11)$$

为验证该反馈控制器对于不同工作位置的有效性,对辨识得到的五个位置的传递函数分别加入上述控制器,获得校正后的开环系统传递函数,并绘制伯德图。如图5所示,可见校正后的开环系统幅值裕量和相位裕量分别大于2.51dB和 30.5° ,能够满足平台全行程范围内的稳定性和控制精度要求。

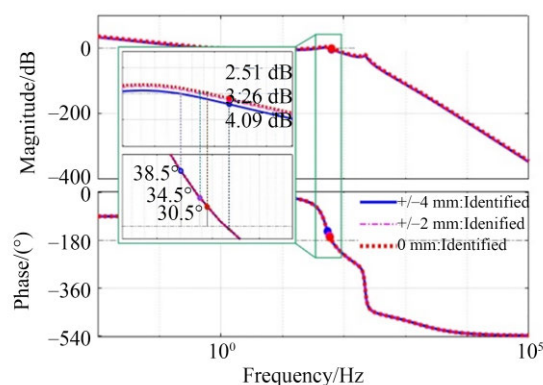


图5 加入含相位超前环节的PI控制器后系统开环频率
Fig. 5 Open loop frequency response using PI controller with phase lead compensation

3.3 频域迭代学习控制器设计

通过辨识结果发现,柔性机构非线性大变形和欠约束等问题使平台存在谐振点漂移、高阶谐振等复杂动力学特性。为了消除运动控制算法对被控对象精确数学模型的依赖性,控制器设计中进一步利用输入输出数据对系统的频率响应逆模型进行迭代更新并作为上节中反馈控制器的前馈补偿,以此来实现微定位平台在大行程范围内的高精度和高速控制。

分别对每个周期内采集到的放大器输入电压 V_r 和位移传感器输出电压 V_s 进行离散傅里叶变换,以 V_r 为例:

$$\begin{aligned} V_{r,i} &= [V_{r,i}(1), V_{r,i}(2), \dots, V_{r,i}(k)], \\ V_{r,i}(j\omega) &= V_{r,i}(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} v_{r,i}(n) e^{-j \frac{2\pi}{N} nk}, \\ 0 < k &\leq N-1 \end{aligned} \quad (12)$$

其中: N 为跟踪信号单周期内的采样点数, i 为迭代跟踪周期数。

经由频域内的迭代学习, 第 i 次的迭代前馈输入 V_i 可由以下频域内的迭代公式获得:

$$\begin{aligned} V_{f,i}(j\omega) &= V_{f,i-1}(j\omega) + \\ \rho(j\omega) G^{-1}(j\omega) [V_d(j\omega) - V_{s,i-1}(j\omega)] \end{aligned} \quad (13)$$

$$V_{f,0}(j\omega) = \alpha V_d(j\omega), i = 0$$

$$V_{f,i}(j\omega) = \begin{cases} \frac{V_{r,i-1}(j\omega)}{V_{s,i-1}(j\omega)} V_d(j\omega), & \text{当 } V_{r,i-1}(j\omega) \neq 0 \text{ 且 } V_d(j\omega) \neq 0, i \geq 1, \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (16)$$

其中, α 选择为系统直流增益的倒数等于 1.49。将迭代得到的频域信号进行离散傅里叶逆变换, 得到最终的迭代学习前馈输入信号:

$$V_f(n) = \sum_{k=0}^{N-1} V_f(k) e^{-j \frac{2\pi}{N} nk}, 0 < k \leq N-1. \quad (17)$$

由图 6 可见, 微定位平台的第一个周期实质上是比例环节前馈的反馈控制。第二个周期开始后, 系统的输入输出数据对频率响应进行估计, 并作为前馈, 因此需要考查该迭代学习方法的收敛性。开环频域迭代学习控制方法的收敛条件已经在文献[14]进行了考查。本文中另外使用了高性能反馈控制来进一步镇定系统实现强鲁棒性和高精度跟踪, 所提出控制方法的收敛条件和有效性将直接由下一节中通过实验进行

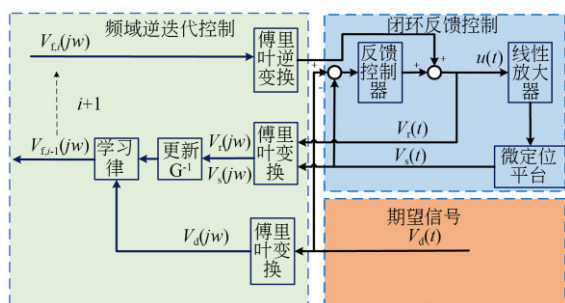


图 6 复合频域迭代控制原理图

Fig. 6 Schematic diagram of the compound iterative learning control in inverse frequency domain

其中: V_d 为期望跟踪周期信息, ρ 为迭代学习率, G^{-1} 为系统的频域逆模型, 可由输入输出信号的频谱数据获得:

$$G_i^{-1}(j\omega) = \frac{V_{r,i-1}(j\omega)}{V_{s,i-1}(j\omega)}. \quad (14)$$

另外设定 $\rho=1$, 则式(13)可改写为:

$$\begin{aligned} V_{f,i}(j\omega) &= V_{f,i-1}(j\omega) + \\ \frac{V_{r,i-1}(j\omega)}{V_{s,i-1}(j\omega)} [V_d(j\omega) - V_{s,i-1}(j\omega)] &= \\ \frac{V_{r,i-1}(j\omega)}{V_{s,i-1}(j\omega)} V_d(j\omega). \end{aligned} \quad (15)$$

因此, 频域逆迭代控制器如下式所示:

4 轨迹跟踪实验

频率逆迭代控制方法的 Simulink 主体程序如图 7 所示, 首先通过使用 Simulink 中的 Buffer 模块将一周内离散时域信号 $V_{r,i-1}(n)$, $V_{s,i-1}(n)$, $V_d(n)$ 通过缓冲区压缩为整体数据块并延迟至下一周期后利用傅里叶变换将时域数据转换为频域数据, 并通过 Complex to Magnitude Angle 模块计算频域数据复数中的幅值与相角获得系统频率响应的逆模型 G^{-1} , 并与期望输入的频域数据进行迭代更新。最后通过 Magnitude Angle to Complex 将更新后的幅值与相角整合为对应的复数, 并通过傅里叶逆变换与 Unbuffer 模块将经过 Buffer 模块获得的周期内的整体频域数据块离散化为单个周期内的频域数据, 通过利用 Complex to Real Imagine 模块取出时域数据

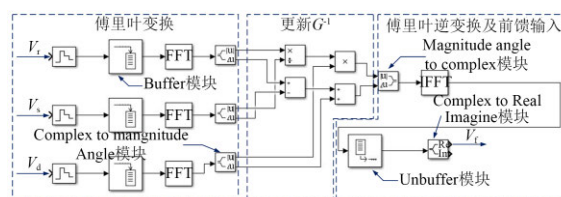


图 7 频域逆迭代 Simulink 控制模块

Fig. 7 Simulink module of frequency domain inverse iterative control

即 $V_{f,i}(n)$, 并作为最终的频域逆迭代前馈输入量。

为了验证所设计控制器的有效性, 分别使用PID控制、传递函数逆模型前馈控制、含相位超前的PI控制以及频域逆迭代学习前馈控制四种控制方法, 对频率为1 Hz, 幅值为2 V(对应行程为2.5 mm)的三角波信号进行跟踪对比实验。实验结果如图8所示。

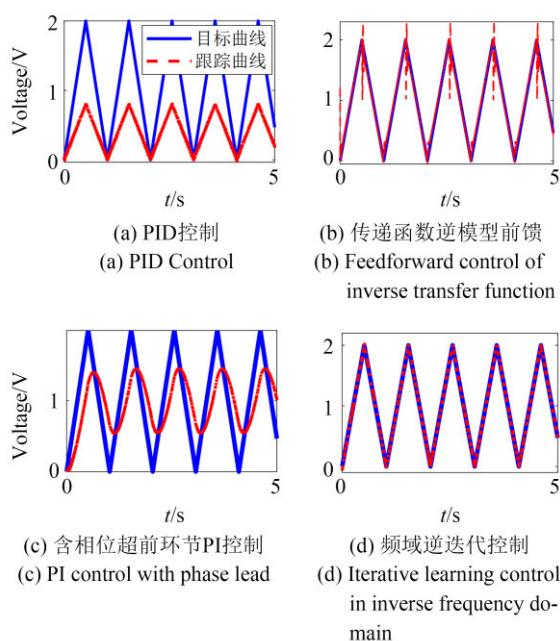


图8 不同控制方法三角波跟踪效果对比

Fig. 8 Target curve tracking renderings of different control modes

可见, PID控制和含相位超前环节的PI控制器, 虽然实现了对微定位平台的稳定裕量的调整, 提高了系统的稳定性, 但仍无法满足大行程微定位平台对于准确性和快速性的要求。传递函数逆模型前馈的加入, 使得控制误差明显减小, 但由于其具有的“高通”特性, 易对噪声以及未建模高频动态进行放大, 在三角波的波峰波谷处, 存在较严重谐振, 从而影响跟踪精度和稳定性。

如图8(d)和表2所示, 相比于其他控制方法, 频域逆迭代+相位超前控制器很好的满足了微定位平台稳定性, 快速性和准确性的要求。另外, 利用该控制方法分别对频率为5和10 Hz, 幅

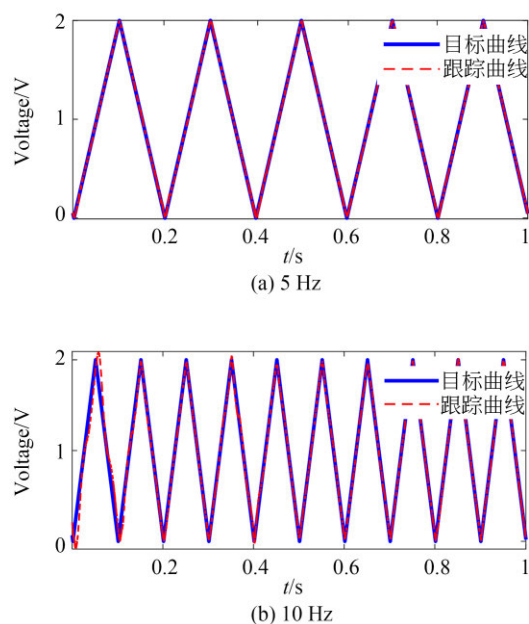


图9 不同频率三角波跟踪结果

Fig. 9 Tracking results of triangular trajectories with different frequencies

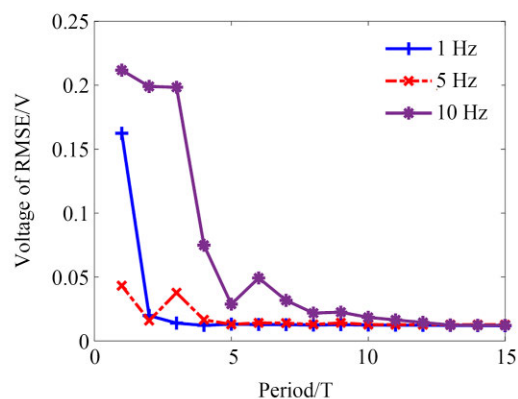


图10 均方根误差频域逆迭代收敛效果

Fig. 10 Convergence effect of root mean square (RMS) errors using frequency domain inverse iteration

值为2 V(对应行程为2.5 mm)的三角波信号进行估计跟踪, 实验结果如图9所示, 其迭代收敛效果如图10所示可见在目标曲线频率为5 Hz时, 经过5~6个迭代周期后, 轨迹跟踪的均方根误差能够收敛至0.012 5 V(1.56×10^{-3} mm)附近, 当目标曲线频率为10 Hz时, 经过10个迭代周期之后, 轨迹跟踪的均方根误差能够收敛至0.012 V(0.015 mm)附近。

表 2 对于 1 Hz 三角波信号不同控制方法跟踪误差

Tab 2 Tracking errors of different control methods for 1 Hz triangular wave signal (V)

控制方法	PID	含超前环节的 PI 控制	传递函数逆模型前馈	频域逆迭代前馈
最大误差	1.208	0.686	0.676	0.0035
均方根误差	0.694	0.435	0.177	0.080164

5 结 语

本文提出了使用复合闭环频域逆迭代学习控制方法来实现音圈电机驱动柔顺微定位平台的高速、高精控制。该方法同时含有相位超前环节的 PI 反馈控制和频域逆迭代前馈控制,能

够有效消除平台谐振对控制性能的影响。首先搭建了音圈电机双平行四边形柔性机构微定位平台并对平台进行了动力学建模和系统辨识,并以此为根据设计了含有相位超前校正环节的 PI 反馈控制器来改善平台的稳定性与快速性。然后,利用输入输出数据对系统频响函数进行在线逆估计并进行前馈补偿,来进一步消除谐振的影响。最后为了验证闭环频域逆迭代控制方法的有效性,使用该方法与其它常规控制方法进行了对比实验,并对不同频率三角波轨迹进行了跟踪实验。实验结果表明,该控制方法对三角波期望轨迹的最大跟踪误差为 0.175%,相比于 PID 控制、相位超前 PI 控制、传递函数逆模型前馈控制等方法,跟踪均方根误差分别减少了 8.75、5.43 和 2.21 倍,实现了大行程微纳米定位的高速高精控制。

参考文献:

- [1] 崔晶,王迪凡. X-Y精密定位平台的敏感函数逆前馈补偿控制[J]. 光学精密工程, 2015, 23(4): 1081-1087.
CUI J, WANG D F. Feedforward compensation control of X-Y precise positioning table using inversed-sensitive function[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(4):1081-1087. (in Chinese)
- [2] 王福超,王昱棠,田大鹏. 音圈快速反射镜的完全跟踪控制[J]. 光学精密工程, 2020, 28(9):1997-2006
WANG F C, WANG Y T, TIAN D P. Perfect tracking control for fast-steering mirror driven by voice coil motor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(9):1997-2006. (in Chinese)
- [3] 吴俊杰. 基于纳米测量机的微结构三维坐标测量[J]. 光学精密工程, 2020, 28(10):2252-2259.
WU J J. Three-dimensional coordinate measurement of microstructures based on nano measuring machine[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(10): 2252-2259. (in Chinese)
- [4] ITO S, TROPPEMAIR S, LINDNER B, et al. Long-range fast nanopositioner using nonlinearities of hybrid reluctance actuator for energy efficiency [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 66(4): 3051-3059.
- [5] XU Q. New flexure parallel-kinematic microposi-

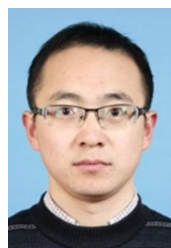
- tioning system with large workspace [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2011, 28(2): 478-491.
- [6] PARMAR G, BARTON K, AWTAR S. Large dynamic range nanopositioning using iterative learning control [J]. *Precision engineering*, 2014, 38(1): 48-56.
- [7] CSENSICS E, SCHLARP J, SCHITTER G. High-performance hybrid-reluctance-force-based tip/tilt system: Design, control, and evaluation [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2018, 23(5): 2494-2502.
- [8] ZHANG Z, YANG X, YAN P. Large dynamic range tracking of an XY compliant nanomanipulator with cross-axis coupling reduction [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 117: 757-770.
- [9] KANG S, LEE M G, CHOI Y M. Six Degrees-of-Freedom Direct-Driven Nanopositioning Stage using Crab-Leg Flexures [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2020. 513-525
- [10] 戴一帆,段伟然,王贵林等. 音圈电机驱动的快刀伺服系统建模与性能分析[J]. 国防科技大学学报, 2008, 30(1):78-82
DAI Y F, DUAN W R, WANG G L, et al. Modeling and performance analysis of fast knife servo system driven by voice coil motor[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2008, 30(1):78-82(in Chinese)

- [11] 谢晓丹,王博超,吴丹. 电磁驱动快速刀具伺服机构的电磁场和驱动力[J]. 清华大学学报(自然科学版),2008,48(8),72-75.
XIE S D, WANG B C, WU D. Electromagnetic field and driving force of electromagnetic driven fast tool servo mechanism [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2008, 48(8): 72-75. (in Chinese)
- [12] CAI K, TIAN Y, LIU X, *et al.* Development and control methodologies for 2-DOF micro/nano positioning stage with high out-of-plane payload capacity[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2019, 56: 95-105.
- [13] XI S Z, LAI L J. Paired double parallelogram flexure mechanism clamped by corrugated beam for underconstraint elimination [J]. *Rev. Sci. Instrum*, 2020, 91(8):086102
- [14] KIM K S, ZOU Q. A Modeling-Free Inversion-Based Iterative Feedforward Control for Precision Output Tracking of Linear Time-Invariant Systems [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2013, 18(6):1767-1777.

作者简介:



张旭(1996—),男,河北石家庄人,硕士,2019年于河南理工大学获得学士学位,现为上海工程技术大学机械与汽车工程学院硕士,主要从事微纳米定位技术方面的研究。E-mail: 18839129173@163.com



赖磊捷(1984—),男,浙江宁波人,博士,副教授,2014年于上海交通大学获得博士学位,现为上海工程技术大学机械工程学院副教授,主要从事微位移驱动控制、微纳制造装备等领域的研究。E-mail: laij@sues.edu.cn