

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2023.06.01

多自由度压电纳米定位平台控制技术研究现状

齐思宁, 李强*

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 介绍了压电驱动的工作原理、压电材料的非线性特性以及压电定位平台的直接驱动方式, 分别阐述了串联、并联和串并联三种驱动方案的多自由度压电定位平台的结构设计以及解耦优化方式。重点分析了多自由度纳米压电定位平台控制系统需要解决的压电驱动器的非线性特性、交叉耦合等问题, 提出应根据多自由度压电定位平台不同的结构和运动形式选定合适的控制策略。最后总结了适用于多自由度压电定位平台的控制算法, 有助于研究者了解压电纳米定位平台领域的最新进展, 为压电纳米定位平台控制技术研究提供借鉴。

关键词: 纳米定位; 多自由度压电驱动; 先进控制技术; 控制策略; 压电驱动器

中图分类号: TB92; TB97; TP21

文献标志码: A

文章编号: 1674-5795 (2023) 06-0008-12

Research status of control technologies for multi-DOF piezoelectric nano-positioning platform

QI Sining, LI Qiang*

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: This paper makes a concise overview of the working principle of piezoelectric drive, the nonlinearity characteristics of the piezoelectric materials, and the direct driving method of piezoelectric positioning platforms. It summarizes the structural design and decoupling optimization methods of multi-degree-of-freedom piezoelectric positioning platforms based on three driving schemes: series, parallel, and series-parallel. It focuses on the analysis of the cross-coupling and the nonlinear characteristics of the piezoelectric driver that need to be addressed in the control system of multi-degree-of-freedom nano piezoelectric positioning platforms. It is proposed that appropriate control strategies should be selected according to the different structures and motion modes of multi-degree-of-freedom piezoelectric positioning platforms. Finally, it summarizes the control algorithms suitable for multi-degree-of-freedom piezoelectric positioning platforms. It is helpful for researchers to understand the latest developments in the field of piezoelectric nano positioning platforms and serves as a valuable reference for research on control technology for piezoelectric nano positioning platforms.

Key words: nano positioning; multi-DOF piezoelectric drive; advanced control technology; control strategy; piezoelectric actuators

0 引言

纳米科学和纳米技术在过去的数十年里取得

了显著的发展与进步, 尤其是扫描隧道显微镜 (Scanning Tunneling Microscope, STM)^[1] 和原子力显微镜 (Atomic Force Microscope, AFM)^[2] 发明后,

收稿日期: 2023-11-28; 修回日期: 2023-12-18

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFB2004903)

引用格式: 齐思宁, 李强. 多自由度压电纳米定位平台控制技术研究现状[J]. 计测技术, 2023, 43(6): 8-19.

Citation: QI S N, LI Q. Research status of control technologies for multi-DOF piezoelectric nano-positioning platform[J]. Metrology & Measurement Technology, 2023, 43(6): 8-19.



纳米技术已成为近年来的热门研究领域。纳米定位对于纳米技术至关重要, 纳米技术的研究需要依托高精度的纳米定位平台来保证能够在纳米尺度上对设备和材料进行精确控制和操作。

多自由度纳米定位平台在光学计量检测、生物医学、精密智能制造、航空航天等领域具有广泛的应用需求^[3-4], 例如基于纳米操纵的细胞注射、基于纳米运动的卫星微扫描和姿态调节、基于微纳米加工光栅等均需使用多自由度纳米定位平台。随着科技的不断发展, 精密多自由度定位平台在更多领域发挥了越来越重要的作用, 同时, 多轴压电纳米定位平台的系统性能也得到了很大的提升。本文梳理近年来的相关研究, 介绍多自由度纳米定位平台的结构设计和控制方法。

1 压电纳米定位技术

1.1 压电材料介绍

压电材料如锆钛酸铅压电陶瓷 (Piezoelectric Ceramic Transducer, PZT) 是一类具有压电效应的材料, 能够实现电能和机械能的相互转换, 具有机电耦合效应。如图1所示, 对元件施加电场会导致材料受到机械应变, 这种特性被称为“逆压电效应”。压电材料具有逆压电效应, 这种变形特性使压电材料可被用作驱动器, 驱动纳米定位平台产生精密运动。

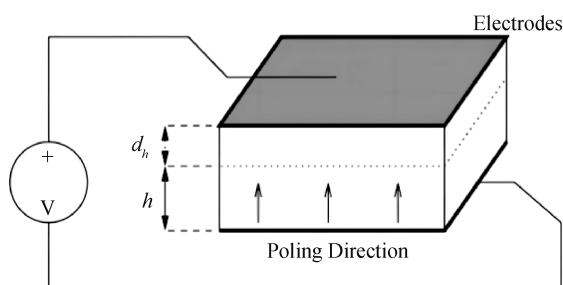


图1 逆压电效应

Fig.1 Converse piezoelectricity effect

压电执行器 (Piezoelectric Actuators, PEA) 克服了传统执行机构的精度下降问题, 具有结构紧凑、定位精度高、响应速度快、承载能力大等特性^[5], 通常被用作多自由度纳米定位平台的驱动装置。PEA有基于堆栈和薄膜两种形式^[6], 纳米定位平台多使用堆栈式PEA做执行器, 如图2所示, 它由多层压电材料和电极层黏合而成, 能够在电场的作

用下产生微米级的形变和千牛级的驱动力^[7]。堆栈式压电执行器每个电极层的极性相同, 连接到外部电极^[8], 在电场的作用下, 多个压电层可以产生位移叠加效果, 位移方向为纵向或横向, 通过位移叠加可成倍扩大位移范围^[9]。

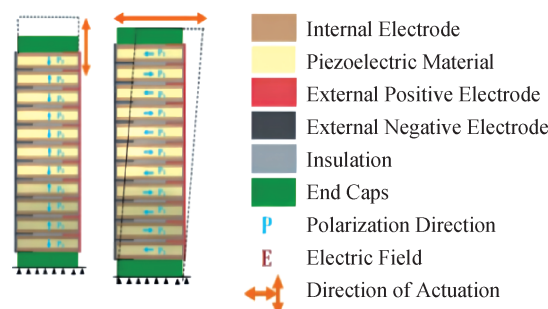


图2 堆栈式压电驱动器

Fig.2 Stacked piezoelectric actuators

1.2 压电执行器特性

PEA 具有的典型特性包括迟滞、蠕变等。如图3所示, 迟滞特性主要表现为压电材料在电压驱动过程中的非线性依赖性, 输入电压与 PEA 的输出位移关系存在滞后。PEA 的输出位移不仅取决于电压的当前输入, 还取决于过去的输入^[10]。

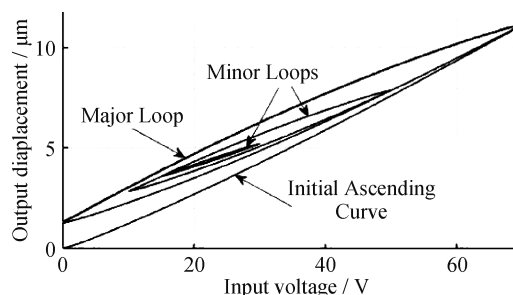


图3 压电材料的滞后现象

Fig.3 Hysteresis phenomenon of piezoelectric materials

PEA 的滞后是导致输出非线性的主要原因, 它在需要长距离位移的动态应用中尤为突出。因此, 在控制算法的设计中, 需要考虑 PEA 的滞后特性。一种解决方法是在短距离的线性范围内操作执行器, 但这会减少 PEA 的驱动位移。

多年来, 国内外学者已经开发了不同的滞后数学模型用来描述压电执行器的非线性特性。对压电元件的非线性滞后进行建模主要有以下3种方法: ①物理模型法, 物理模型建立在物理效应的第一性原理之上, 如 Jiles-Atherton 模型、Domain

wall 模型等；②唯象学模型法，主要分为两种类型，一种由一组微分方程进行数学描述，如 Duhem 模型、简单 Dahl 模式、Bouc-Wen 模型、Backlash-Like 模型、麦克斯韦模型和近似多项式模型等；另一种则基于算子的建模理论，如 Maxwell 模型、

Preisach 模型、Preisach 模型的衍生模型 Prandtl-Ishlinskii (PI) 模型和 Krasonsel'skii-Pokrovskii 模型等；③系统识别方法，如采用线性自回归-移动平均方法模拟滞后^[11]、基于神经网络的滞后非线性模型^[12]等。经典迟滞模型对比如表 1 所示。

表 1 经典迟滞模型对比

Tab.1 Comparison of classical hysteresis models

经典模型	描述	特点
Preisach 模型	通过无限数量的 Preisach 滞后算子的综合效应来表示滞后。将压电执行器的迟滞特性分解为许多独立的迟滞单元，每个迟滞单元都有一个固定的迟滞回线	可以很好地拟合实验数据，但是需要大量的参数，并且难以构造逆模型
Prandtl-Ishlinskii (PI) 模型	基于积分方程的迟滞模型，它将压电执行器的迟滞特性分解为许多单调递增的非线性函数，每个非线性函数都有一个权重系数	参数较少，容易构造逆模型，但是需要选择合适的非线性函数
Krasonsel'skii-Pokrovskii 模型	Preisach 模型的一般化，将 Preisach 模型中的非连续的迟滞算子改为连续的迟滞算子	建模精度高，但是计算量也会增多，需要控制算子数量
Bouc-Wen 模型	包含非线性阻尼和非线性刚度，采用一阶微分方程来表现滞后性	可以与 PEA 的动力学相结合。状态空间公式化、实用相似性，计算简单，适用于系统控制设计
Maxwell 模型	是一种基于电路的模型，它将压电执行器的迟滞特性用一个电阻和一个电容串联的电路来表示，用分数阶微积分描述非线性特性	可以直接描述输入电压和输出位移之间的关系，但是需要对电阻和电容的非线性特性进行物理解释

蠕变是 PEA 输出位移的缓慢漂移，一般在输入电压没有任何变化的情况下发生^[13]，如图 4 所示。蠕变是一种缓慢且很小的影响^[14]，是由施加的电压对压电材料残余极化的影响引起的^[15]。蠕变效应在闭环和低频操作中有时会被忽略，但是在 PEA 的静态或低频定位运行时和开环操作中，这种漂移很明显，必须考虑蠕变以避免较大的定位误差。

描述 PEA 蠕变现象的蠕变模型主要包括非线性和线性两种形式。非线性蠕变模型是根据蠕变

响应随时间变化的对数形状提出的对数模型，通过非线性方程(1)对蠕变效应进行近似描述

$$y(t) = y_0 \left\{ 1 + \gamma \cdot \log\left(\frac{t}{t_0}\right) \right\} \quad (1)$$

式中： $y(t)$ 为压电陶瓷的位移， t_0 为蠕变效应显现的时间， y_0 为执行器位移时的值和蠕变速率， γ 为对数响应速率的系数。 t_0 、 y_0 和 γ 通过观察测试阶段的执行器阶跃响应的实验数据来识别。对数模型可以更加近似地描述蠕变效应，但 t_0 、 y_0 和 γ 三个参数的选择难以确定，增加了建模的复杂程度。

为了避免非线性蠕变模型方程(1)中的无界问题，提出了第二种蠕变模型，其为动态模型，使用力学中应用的蠕变模型捕获压电制动器的低频响应。蠕变效应可以建模为多个弹簧和阻尼器的串联连接，在拉普拉斯频域中表示为

$$G_c(s) = \frac{1}{k_0} + \sum_{i=1}^N \frac{1}{c_i s + k_i} \quad (2)$$

式中： s 为复数变量， k_0 为模拟压电执行器在低频下的弹性行为， k_i 为弹簧常数， c_i 为阻尼常数， N 为模型个数。 $N=3$ 时能够以合理的精度捕获蠕变

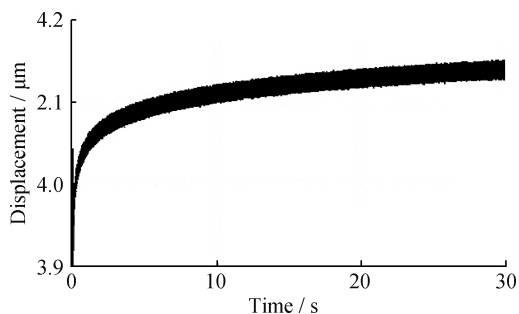


图 4 压电材料的蠕变现象

Fig.4 Creep phenomenon of piezoelectric materials

效应。这种频域方法可以将这种低频模型附加到线性模型中,描述PEA在较高频率下的振动动力学。

2 多自由度压电纳米定位平台

本文主要研究直接驱动方式的压电运动平台,其可以提供更高分辨力的运动。直接驱动方式是指驱动单元通过直接驱动柔顺机构来获得输出运动^[16]。压电陶瓷的变形有限,冲程很短,所以一般设计定位平台时需要选择放大装置。如图5所示,当施加电压信号时,压电驱动器伸展,柔顺机构移动,输出位移为压电驱动器的行程乘以柔顺机构的放大比。在直接驱动模式下运行定位平台,可以实现纳米分辨力的线性或旋转运动。

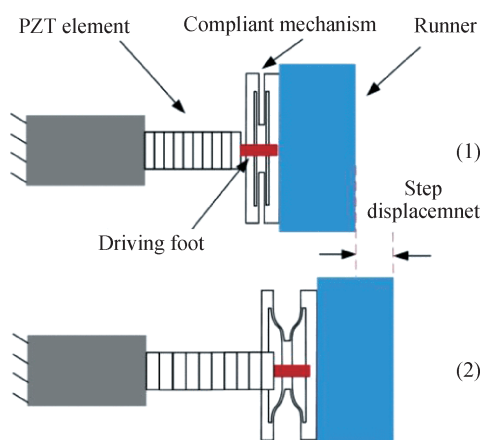


图5 直接驱动方式原理

Fig.5 Principle of direct drive mode

随着压电纳米定位平台的发展,单轴定位平台不能满足更加精细复杂操作的需求,纳米定位平台需要更多的自由度。交叉耦合是多自由度压电运动平台系统不可避免的,合适的结构设计可以大大降低交叉耦合对系统的影响。根据不同的运动方案可以将多轴压电纳米定位平台分为三种类型,即串联型、并联型和串并联混合型^[17]。

2.1 串联式压电定位平台

串行方案是形成多自由度级最简单的方法,通过将一个运动级的固定端串联到另一级的输出端来实现。通过将不同自由度的载物台或平台串联组合,设计者可以根据具体需求快速构建多自由度系统。串联型运动方案具有控制简单和无耦合运动等特点,已经得到了广泛的发展和商业化应用。其缺点是无法测量(和校正)寄生运动,存

在跳动或导向误差,惯性大、固有频率低以及存在误差累积。

Lee等人^[18]设计了一个具有堆叠结构的串行XY载物台,如图6所示,工作空间级联结构设计可以有效降低系统复杂性,并可进一步扩展以获得额外的自由度。

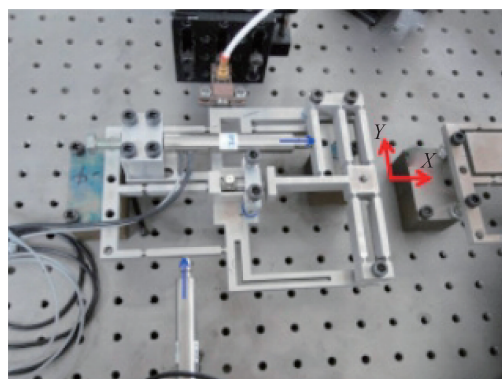


图6 Lee等人设计的串联XY载物台

Fig.6 Tandem XY stage designed by Lee et al

Kenton等人^[19]设计了扫描型应用的三轴高性能串联运动纳米定位平台,如图7所示。该平台专为高带宽应用而设计,采用了垂直刚性的双铰链挠曲结构来引导平台输出运动。X轴为快速轴,用于进行高速扫描,Y轴为慢速轴,用于进行低速运

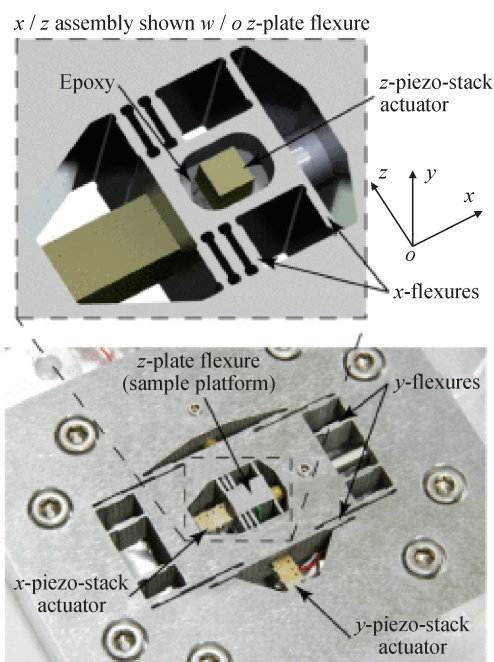


图7 Kenton等人设计的串联定位平台

Fig.7 Tandem positioning platform designed by Kenton et al

动,主共振分别为24.2 kHz和6.0 kHz,Z轴的主谐振为70 kHz。横向和垂直运动行程分别为9 μm 和1 μm 。

2.2 并联式压电定位平台

并联型运动方案具有惯性小、共振频率高、无累积误差和各运动轴的动态特性相同等优点,可以实现平台的高精度控制。然而,输入和输出之间的强耦合会严重影响运动的精度,增加了建模和控制的难度。多位专家学者提出了不同的解耦并联机制,通过压电定位机构的设计和优化,以减小或消除轴间耦合的影响,使平台实现更精确的位移控制和更稳定的工作性能。

吴志刚等人^[20]设计了完全解耦的带有杠杆放大器的微/纳米定位平台,如图8所示,杠杆放大器采用柔性铰链以减少寄生运动。PZT输入位移通过双杠杆位移放大器放大,驱动运动平台运动。X、Y驱动方向的结构具有对称性并拥有2个双四杆机构,可以有效地减少平台的耦合甚至消除耦合效应。

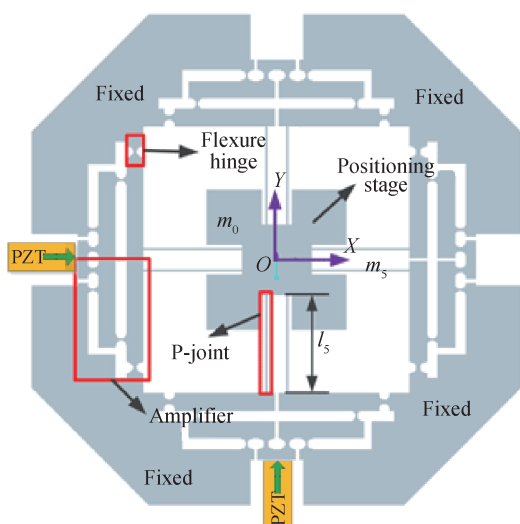


图8 XY定位平台

Fig.8 XY positioning platform

Xu等人^[21]设计了新型解耦XYZ并联微定位平台,如图9所示。3个PPP(棱柱-棱柱-棱柱)支链以正交方式组装在一起,每个支链包含1个复合桥式放大结构和1个二自由度的线性导向机构,可以实现3个轴向的纯平移运动,XYZ轴的串扰小于4.5%,具有良好的解耦性能。

王华等人^[22]提出了基于有限元的输入耦合分

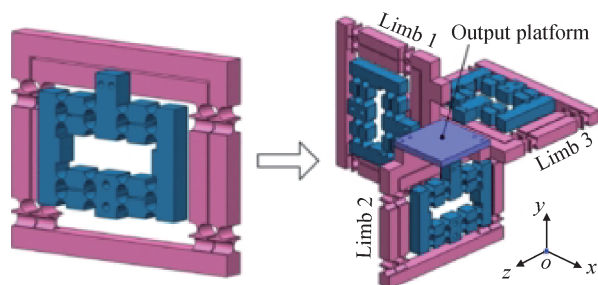


图9 XYZ定位平台

Fig.9 XYZ positioning platform

析方法,讨论了结构参数对输入耦合的影响。为了获得最小的输入耦合级,提出了一种最优设计方法,将如图10所示的多自由度压电定位平台的耦合最小化到可忽略不计的水平。

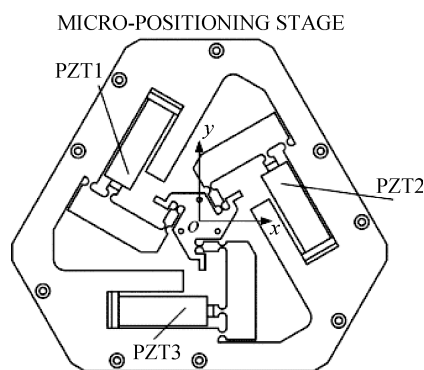


图10 XYθZ定位平台

Fig.10 XYθZ positioning platform

陈锡刚等人^[23]设计了新型超紧凑的解耦XYZθ运动平台,使用双级串联桥式放大器来扩大输出位移,如图11所示。同时,为了使整个运动台更加紧凑,采用Z型挠性铰链来改变传动方向。使用

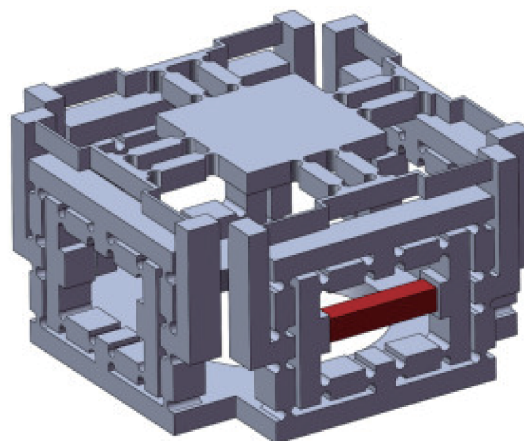


图11 超紧凑解耦XYZθ运动平台

Fig.11 Ultra compact decoupled XYZθ stage

柔顺引导装置作为解耦机构来降低各运动轴之间的耦合, 水平方向的耦合率为1.7%。

谢彦林等人^[24]设计开发了一种具有平行运动学和更紧凑结构的新型XYZ定位平台, 在平台设计中加入了基于Z型弯曲铰链的机构, 如图12所示。采用平行四边形机构作为解耦的导向机构, 以减少寄生运动。最终通过使用一对平面内放置的PZT来实现水平和垂直方向的解耦运动, 从而缩小平台的整体结构尺寸, 降低耦合。

2.3 串并联混合式压电定位平台

串行和并行方案有各自的优缺点, 为了降低设计难度并获得可靠的性能, 研究人员提出了串并联方案。串并联方案相较串行方案具有更高的刚度, 相较并联方案工作空间更大。

Tian等人^[25]设计了一种XYZ轴微/纳米定位装置, 其主要由平行的XY平台和嵌套在XY平台上的Z平台组成, 如图13所示。该课题组提出了一种新型的L型杠杆和半桥式位移放大器, 采用新型凹

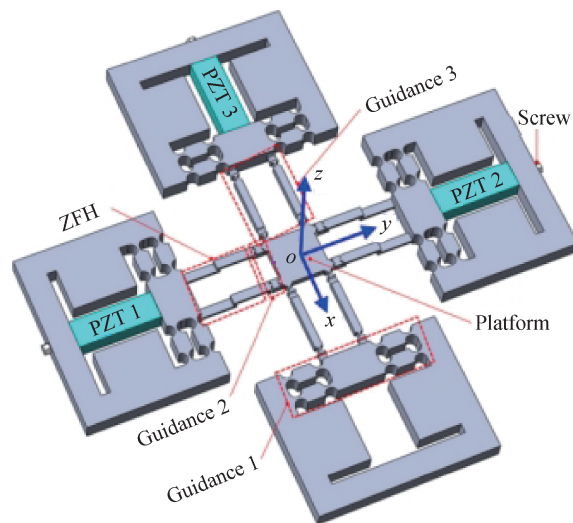


图12 带“Z”型铰链的XYZ定位平台

Fig.12 XYZ positioning stage with "Z" hinge

形输入机构进行位置限制, 减少PEA方向与输入机构的中心轴方向不一致引起的运动耦合。结果显示, 其输出耦合小于2%, 输入耦合评估值低于1%。

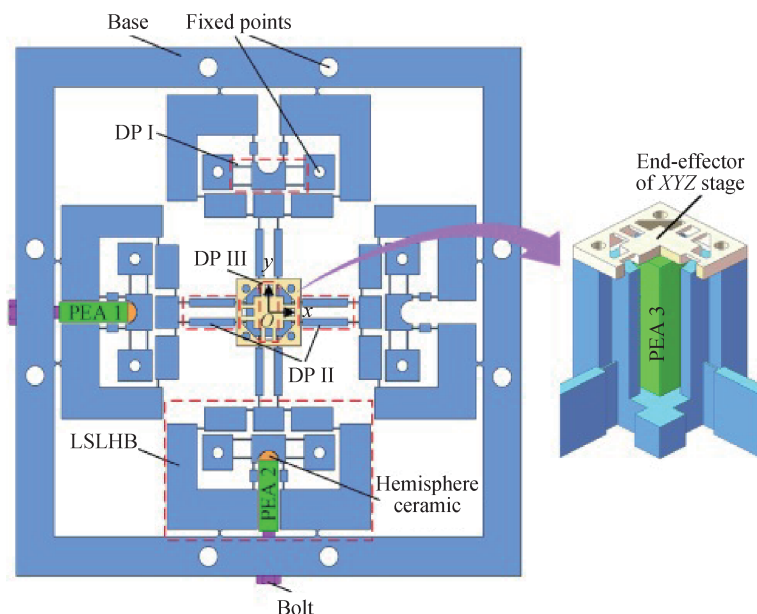


图13 XY-Z定位平台

Fig.13 XY-Z positioning platform

Cai等人^[26]设计了一个六自由度的平台, 该平台由2个不同的三自由度精密定位平台组装而成, 如图14所示。3个水平方向的压电堆以120°的间隔构成面内三自由度平台, 另外3个垂直方向的压电陶瓷构成面外的三自由度平台。6个自由度

相互耦合, 在后期进行控制算法设计时, 需要进行逆运动学解耦, 再进一步设计控制器。定位平台的运动行程为 $8.2\ \mu\text{m} \times 10.5\ \mu\text{m} \times 13.0\ \mu\text{m} \times 224\ \mu\text{rad} \times 105\ \mu\text{rad} \times 97\ \mu\text{rad}$, 最低谐振频率为585.6 Hz。

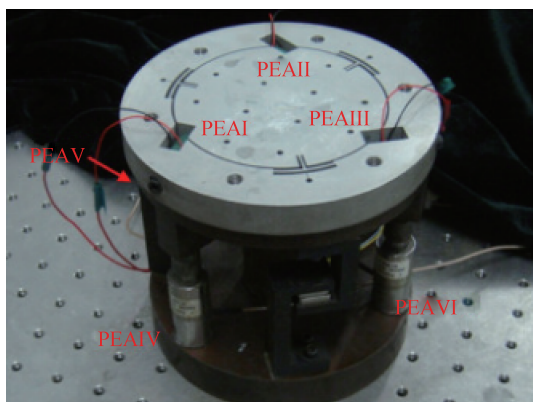


图14 串并联六自由度定位平台

Fig.14 Serial-parallel six-degree-of-freedom positioning platform

3 控制策略和控制问题

PEA的固有非线性以及其与平台动力学的耦合特性导致压电驱动平台的精密控制非常复杂。一方面, PEA的非线性特性(特别是滞后)会对控制系统的定位准确性和稳定性造成不利影响, 因此所有控制方案中, 补偿或抑制这种非线性效应一直是主要考虑因素。另一方面, 多自由度压电纳米定位系统耦合造成了额外的控制困难, 不同驱动方案将引起不同程度的耦合, 因此有必要进行细致地分析。

多自由度PEA驱动的串联机构和XYZ型并联机构的各个运动轴通常耦合程度较低, 因而可以视作独立的单自由度PEA驱动单元。在设计控制算法时, 可以将交叉耦合看作一种扰动因素, 无需专门构建耦合模型, 将复杂的多自由度控制问题转化为若干个更易处理的单自由度问题。因此, 多自由度系统的建模和控制可以采用适用于单自由度系统的技术来解决。

其他类型的多自由度PEA驱动并联机构则存在明显的耦合。主要有两种方法来消除轴间耦合: ①对多自由度PEA驱动的定位系统建立耦合模型, 主要分为两种方式, 第一种是先建立基于机构几何结构的运动学模型, 再建立唯象学或基于物理的动力学模型; 第二种是直接动态特性出发, 识别机构的动力学模型; ②将耦合当作扰动来处理, 设计抗干扰能力较强的控制方法, 用于单自由度PEA定位系统的控制策略可适用于此, 但设计的控制系统设计抗干扰能力必须较为突出。

一般来说, 影响多轴运动控制系统控制精度的因素包括: 各运动轴的动态性能、抗干扰能力和对参数变化的鲁棒性。目前专家学者对压电纳米定位平台控制系统的设计主要分为以下两种思路:

1) 基于模型的控制技术

建立相对准确的非线性模型, 通过逆模型和压电制动器的级联组合, 可以将系统视为线性系统。在此基础上结合其他反馈控制方法减少逆输入中不确定性引起的误差, 提高控制系统性能。压电纳米定位平台的驱动特性和结构特性导致模型较为复杂, 在应用时模型的计算和辨识过程存在许多复杂的问题。因此, 尽管基于逆滞后模型的控制方法简单直观, 但是建模的复杂性和参数敏感性问题仍有待解决。

2) 无模型的控制技术

避开建立压电纳米定位平台的动力学模型, 设计一种直接补偿滞后非线性的闭环控制器, 以取代逆滞后补偿控制方法。例如, 滑模控制可将造成驱动非线性的因素视为有界扰动, 基于滑模控制原理设计非线性跟踪控制器, 能够减小系统中的滞后非线性影响。

3.1 结合PID的复合控制

比例积分微分(Proportional Integral Derivative, PID)控制算法诞生于20世纪的20-40年代, 是基于误差的反馈控制, 是现代工业应用中最有效、最简单的经典控制器之一, 也时常用于控制压电执行器。PID控制算法如图15所示。

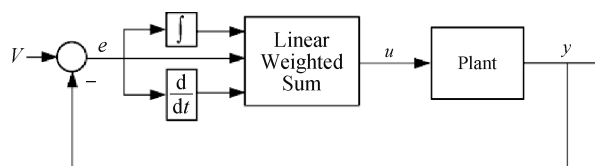


图15 PID控制算法

Fig.15 PID control algorithm

在实际使用过程中, 比例积分(Proportional Integral, PI)和比例双积分(Proportional Integral Integral, PII)控制器是目前扫描探针行业中用于纳米定位的最常见控制器形式。多轴压电纳米定位平台的控制系统需要具备高精度以及较强的抗干扰能力, 经典的PID控制在处理不确定性时带宽有

限, 因此需要结合其他算法来进行复合控制, 主要包括两类:

1) 基于前馈补偿的前馈与反馈相结合的复合控制。刘长利等人^[27]提出了逆 Bouc-Wen 前馈控制与 PI 反馈控制相结合的复合控制算法, 并应用于压电陶瓷驱动器轨迹跟踪控制。实验结果表明, 在复合控制算法控制下, 压电陶瓷迟滞误差几乎为零, 线性度高达 96.5%。

2) 将 PID 控制算法结合其他先进控制技术, 设计复合控制器来控制多自由度压电纳米定位平台。

模糊控制可以提高 PID 的适应性和在线参数调整能力。Basem 等人^[28]开发了模糊控制和 PI 控制的复合控制系统, 如图 16 所示, 模糊逻辑控制器采用 Mamdani 规则类型(输入和输出均为模糊变量), 将误差和位移变化量作为归一化模糊控制器的输入(标度-1~1), 其输出为 PZT 制动器所加电压。张泾周等人^[29]将模糊控制和 PID 控制相结合, 在控制系统中不断检测误差和误差的导数, 根据模糊控制原理对 PID 的 3 个参数进行在线修改, 在保证准确性的基础上提高系统的鲁棒性和灵活性。模糊 PID 控制是一种较好的控制方法, 但也存在计算量大、误差大等明显不足。如何修改和设计模糊控制规则, 减少计算量, 提高控制精度, 是未来工作的主要方向。

迭代学习控制(Iterative Learning Control, ILC)是一种无模型方法, 原理为根据系统前次运行获

得的输出误差信息来修正控制输入, 通过迭代过程, 逐步改进系统的下一次控制输入, 以使整体控制效果越来越好。刘磊等人^[30]提出了一种 PID 与 ILC 结合的混合控制方法, 在给定稳定 PID 控制的基础上, 用以压电驱动器的滞后补偿为目的的基于抖振的 ILC 控制来保证控制系统的稳定性。Yan 等人^[31]基于压电定位平台控制系统建立了控制系统的近似数学模型, 设计了迭代学习控制器结合基于频域工具的 PI 控制来实现精密控制。

3.2 自抗扰控制

自抗扰控制(Active Disturbance Rejection Control, ADRC)是韩京清^[16]教授通过总结 PID 算法的优势和局限性, 结合瞬态曲线生成、非线性反馈组合以及总扰动估计和抑制, 在 PID 的形式上衍生出的控制方法。ADRC 形式如图 17 所示, 为了防止跳变信号导致超调和振荡问题, 通过经典微分器对期望信号 v 和进行过渡处理, 生成一个平滑的中间参考信号 v_1 和其导数 v_2 。通过扩张状态观测器(Extended State Observer, ESO)进行总干扰估计和补偿控制器中的扰动, 将各种已知干扰和未知干扰量转化为总干扰可以将复杂的控制问题简单化。控制器选用非线性反馈控制律, 根据 v_1 、 v_2 以及 ESO 得到的状态估计和总干扰估计计算出控制器的输入信号。

ADRC 中的干扰观测器可以将许多不可跟踪的因素归为“总干扰”, 通过这种方式, 复杂的控制系统可以简化为一阶或二阶 ADRC, 不需要详细的滞后模型和耦合模型。一般 ADRC 在低频控制过程中可以达到可接受的精度, 但在高频操作中, 由于干扰估计值与其实值之间的自然不匹配, ARDC 的控制性能会严重下降, 从而限制了滞后的补偿效果, 降低控制精度。将 ADRC 和其他控制方

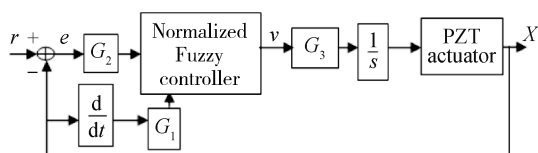


图 16 模糊 PI 控制器框图

Fig.16 Block diagram of fuzzy PI controller

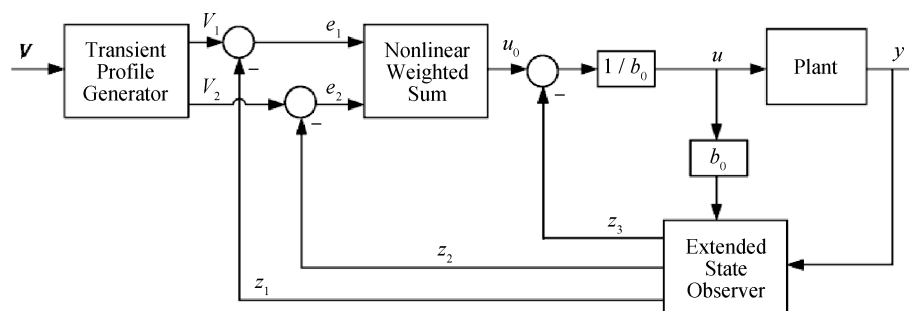


图 17 自抗扰控制系统

Fig.17 Active disturbance rejection control system

法相结合作为复合控制器可以达到更好的效果。

Gao 等人^[32]将控制器参数与带宽联系起来,并提出了一种易于实现的线性 ARDC (Line Active Disturbance Rejection Control, LADRC)。Liu 等人^[33]应用 LADRC 控制器补偿 PEA 中的滞后和其他干扰。Min 等人^[34]开展的 PEAs 的对比实验表明 LADRC 相较比例积分控制具有更好的跟踪性能。Huang 等人^[35]将 LADRC 整合到迭代学习控制循环中,以实现 PEA 的精确轨迹控制。Wei 等人^[36]将 LADRC 控制器与 U 型方法相结合以控制压电纳米定位平台,提高了跟踪速度和精度。

3.3 滑模控制

滑模控制 (Sliding Mode Control, SMC) 是一种当存在系统扰动和不确定性的情况下仍较为有效的非线性控制方法。SMC 是一种鲁棒控制方法,能够有效地解决多轴压电定位平台控制中 PEA 的非线性和多轴耦合问题。SMC 具有抗干扰和易实现的特点,能够消除被控对象输入通道中的匹配不确定性或不确定性的影响^[37]。

作为一种典型的可变结构控制,SMC 的目的是将系统状态轨迹驱动到定义的滑模面,然后保持其沿表面移动。一旦到达滑模面,受控系统对某些模型变化和外部干扰具有鲁棒性。具体来说,滑模控制器产生的控制信号的基本形式分为两部分:第一部分是不连续的,称为开关控制,用于补偿系统的不确定性,同时将被控对象轨迹驱动到滑模面;第二部分是连续的,称为等效控制,用于将被控对象的运动轨迹保持在滑动表面上。

滑模控制器中存在符号功能所特有的颤振现象,该现象是限制传统 SMC 应用的主要原因,在

PEA 的高频控制过程中,颤振现象尤为严重,因为它们无法滤除开关控制信号中的高频分量。有两类方法可以降低颤振:①采用高阶滑模面^[38]、用符号函数代替饱和函数、使用终端滑模控制^[39]等方法;②结合其他控制方法,例如采用扰动观测器来估计扰动,并补偿控制器中的扰动。对于压电纳米定位平台的单轴运动控制系统,设计扩展状态观测器观察系统总扰动,对上述总扰动进行补偿后,符号函数的开关增益可以大大降低抖振。

3.4 自适应控制

自适应控制 (Adaptive Control) 是一种带有在线参数识别的控制方法,对系统参数的变化具有一定的适应能力,可以很好地解决多自由度压电纳米定位平台控制系统存在建模误差、参数不确定性和系统环境的变化等问题。自适应控制通过在线参数估计和控制器自动更新来实现系统的高精度、高响应速度和高抗干扰能力的定位要求,可以有效地处理系统的不确定性和多变量耦合的复杂性,不需要对压电材料的非线性特性和平台的动力学特性进行精确建模和补偿。

自适应控制系统控制框图如图 18 所示。自适应控制系统使用参数估计器来实时估计模型参数。参数估计器基于适应性算法 (最小二乘法或最小均方误差法),根据实际测量数据更新模型参数的估计值。

自适应方法能够有效地消除常数参数不确定性的影响,Bashash 等人^[40]推导了一种具有参数自适应的滑模控制器,可以对载物台进行有效的双轴跟踪控制,相较 PI 控制具有更好的瞬态响应和低频跟踪性能。

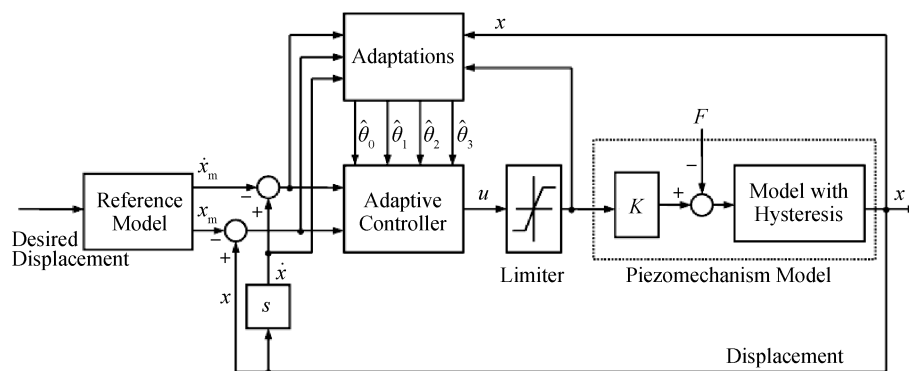


图 18 自适应控制系统控制框图

Fig.18 Control block diagram of adaptive control system

Shieh 等人^[41]提出了一种基于压电驱动定位机构的自适应位移跟踪控制。使用刚体运动系统并添加参数化迟滞系数表示压电驱动定位机构的运动动力学数学模型。根据定义的状态变量、系统输出位移及其速度，对滞后函数进行了参数化，在此基础上实现了参数自适应的位移跟踪控制。

Wenjie Si 等人^[42]提出了一种自适应神经跟踪控制，所提出的自适应控制器能够保证所有闭环信号均有界，跟踪误差收敛到预定义的零小邻域。

3.5 多种控制算法对比

除上述常用的控制算法，还有许多其他控制算法也应用于在多自由度压电纳米定位平台的定位控制领域，包括神经网络、前馈控制、迭代学习控制、模糊控制、鲁棒控制，详见表2。

这些控制策略针对不同的目的，提高了运动控制系统某一方面的性能。运用时，需要根据平台的特性、控制要求以及控制算法的特点来选择合适的控制策略。

表2 控制算法对比
Tab.2 Comparison of control algorithms

控制方法	优势	限制
PID 控制	用于基础控制问题，调整参数来响应位置误差，实现简单，参数调整直观，使用灵活	不适用于高度非线性系统、大延迟系统或强扰动的系统
模型预测控制	利用压电纳米定位平台的动态模型，通过优化预测误差的加权来进行控制。适用于处理具有较大延迟和动态变化的系统和复杂的轨迹规划控制，优化未来输出。能处理多输入多输出系统，可满足高精度和高动态性要求	需要准确的系统模型，优化算法设计复杂，计算量大
自抗扰控制	可以有效识别和补偿系统非线性和外部扰动，对系统模型精度要求不高，参数调节简单	计算复杂，稳定性和鲁棒性理论分析复杂
自适应控制	适用于参数随时间变化或不确定性较高的系统，可以自动调整控制策略以适应环境和系统参数变化	系统设计和稳定性分析复杂
滑模控制	用于抵抗各种不确定性和扰动，保持系统的鲁棒性，有效对抗系统不确定性和外部干扰	可能产生高频振荡(抖振)
神经网络	适用于处理高度非线性、复杂、不确定性高的系统。能学习和适应未知或变化的环境	训练过程复杂，需要大量数据
前馈控制	补偿已知的系统扰动，常与其他控制策略结合，能够提高系统响应速度和准确性，减少稳态误差	只对可预测的已知扰动有效
迭代学习控制	执行重复动作的定位任务，通过迭代改善性能，对重复任务的性能逐步提升	仅适用于重复或周期性任务
鲁棒控制	用于确保定位系统在各种未知扰动和不确定性下的稳定性、强鲁棒性，适用于不确定性和变化条件下的控制	设计复杂，可能需要保守的控制策略
模糊控制	通过设计模糊规则和模糊推理机制来控制。不需要任何精确的系统数学模型，可以处理复杂度高的非线性系统	复杂系统规则库设计难度高，难以处理系统动态性和变化

4 总结

多自由度压电纳米定位平台的控制系统需要满足高精度、快速响应和高稳定性的要求。然而，压电驱动器的非线性特性、多轴交叉耦合以及其他不确定性因素严重影响了平台的定位控制性能。本文综述了国内外多自由度压电纳米定位平台控制技术相关研究的最新进展和主要成果，基于结构设计和控制策略阐述提升控制性能的方法。

压电纳米定位平台需要在保证高精度的同时，提高运动速度和带宽，增强系统的鲁棒性和适应性。为使压电纳米定位平台控制技术得到更好的发展，需从结构设计、软件算法和硬件等方面开展研究和探索。可通过创新优化机构设计方案，提高定位平台的刚度和固有频率，降低质量和惯性，减少平台的交叉耦合。通过建立更准确简单的算法数学模型，准确描述压电驱动器动态特性和平台动力学特性；基于现代控制理论（自适应

控制、模糊控制、模型预测控制等), 结合定位平台特征, 为定位平台寻找更合适的现代控制算法, 实现对非线性问题的有效抑制, 提高控制系统的定位精度和抗干扰能力。采用更高性能的控制器和位移传感器以提高硬件系统整体性能, 实现数据快速处理、位移信息准确反馈、复杂控制算法高效运行, 提高控制系统的响应速度和适应性。

参考文献

- [1] BINNIG G, ROHRER H. Scanning tunneling microscopy [J]. *Surface Science*, 1983, 126(1-3): 236-244.
- [2] BINNIG G, QUATE C F, GERBER C. Atomic force microscope[J]. *Physical Review Letters*, 1986, 56(9): 930.
- [3] DEVASIA S, ELEFThERIOU E, MOHEIMANI S O R. A survey of control issues in nanopositioning [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2007, 15 (5): 802-823.
- [4] 李强, 任冬梅, 兰一兵, 等. 用于纳米级表面形貌测量的光学显微测头[J]. *计测技术*, 2022, 42(2): 91-96.
LI Q, REN D M, LAN Y B, et al. Optical microscope probe for nanoscale surface topography measurement [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2022, 42 (2) : 91-96. (in Chinese)
- [5] MOHITH S, UPADHYA A R, NAVIN K P, et al. Recent trends in piezoelectric actuators for precision motion and their applications: a review [J]. *Smart Materials and Structures*, 2020.
- [6] 杜刚, 康晓旭, 曾江涛, 等. 多层压电驱动器在光刻机中的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2022.
DU G, KANG X X, ZENG J T, et al. Application of multilayer piezoelectric actuator in lithography scanners [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022. (in Chinese)
- [7] ZHANG X, WANG C, LIU J, et al. Robust active control based milling chatter suppression with perturbation model via piezoelectric stack actuators [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 120: 808-835.
- [8] JEONG S J, LIM D H, SALEEM M, et al. Properties of CuAg / (BiNaSr) TiO₃ multilayer ceramic actuator [J]. *Ceramics International*, 2018, 44: 112-116.
- [9] WANG L, CHEN W, LIU J, et al. A review of recent studies on non-resonant piezoelectric actuators [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019.
- [10] ADRIAENS H, DE KONING W L, BANNING R. Modeling piezoelectric actuators [J]. *IEEE / ASME Transactions on Mechatronics*, 2000, 5(4): 331-341.
- [11] CAO Y, CHEN X B. A novel discrete ARMA - based model for piezoelectric actuator hysteresis [J]. *IEEE / ASME Trans, Mechatronics*, 2012, 17(4): 737-744.
- [12] DENG L, TAN Y H. Modeling hysteresis in piezoelectric actuators using NARMAX models [J]. *Sens. Actuators A Phys*, 2009, 149(1): 106-112.
- [13] FETT T, THUN G. Determination of room - temperature tensile creep of PZT [J]. *Journal of Materials Science Letters*, 1998, 17: 1929-1931.
- [14] JUNG H, GWEON D G. Creep characteristics of piezoelectric actuators [J]. *Review of scientific Instruments*, 2000, 71(4): 1896-1900.
- [15] ROBINSON R S. Interactive computer correction of piezoelectric creep in scanning tunneling microscopy images [J]. *J. Comput. -Assist. Microsc*, 1996, 2(1): 53-58.
- [16] LIU Y, DENG J, SU Q. Review on multi-degree-of-freedom piezoelectric motion stage [J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 59986-60004.
- [17] WU Z, XU Q. Survey on recent designs of compliant micro - / nano-positioning stages [C]. *Actuators*. MDPI, 2018.
- [18] LEE J W, LI Y C, CHEN K S, et al. Design and control of a cascaded piezoelectric actuated two-degrees-of-freedom positioning compliant stage [J]. *Precis*, 2016, 45: 374-386.
- [19] KENTON B J, LEANG K K. Design and control of a three -axis serial-kinematic high-bandwidth nanopositioner [J]. *IEEE / ASME Transactions on Mechatronics*, 2011, 17 (2): 356-369.
- [20] WU Z, LI Y, HU M. Design and optimization of full decoupled micro / nano - positioning stage based on mathematical calculation [J]. *Mechanical Sciences*, 2018, 9 (2): 417-429.
- [21] XU Q, LI Y. Optimal design and fabrication of a piezoactuated flexure XYZ parallel micropositioning stage [C]. 2010 IEEE / RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. *IEEE*, 2010: 3682-3687.
- [22] WANG H, ZHANG X. Input coupling analysis and optimal design of a 3-DOF compliant micro-positioning stage [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2008, 43 (4) : 400-410.
- [23] CHEN X, LI Y, XIE Y, et al. Design and analysis of new ultra compact decoupled XYZ θ stage to achieve large-scale high precision motion [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2022.
- [24] XIE Y, LI Y, CHEUNG C F, et al. Design and analysis of a novel compact XYZ parallel precision positioning stage [J]. *Microsystem Technologies*, 2021, 27: 1925-1932.
- [25] TIAN Y, MA Y, WANG F, et al. A novel XYZ micro / nano positioner with an amplifier based on L-shape levers

- and half-bridge structure[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2020, 302.
- [26] CAI K, TIAN Y, WANG F, et al. Design and control of a 6-degree-of-freedom precision positioning system[J]. *Robotics and Computer - Integrated Manufacturing*, 2017, 44: 77-96.
- [27] 刘长利, 胡守柱, 郭海林, 等. 叠堆式压电陶瓷驱动器的复合控制[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(9): 2248-2254.
- LIU C L, HU S Z, GUO H L, et al. Feed-forward control of stack piezoelectric actuator[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(9): 2248-2254. (in Chinese)
- [28] BADR B M, ALI W G. Nano positioning fuzzy control for piezoelectric actuators[J]. *International Journal of Engineering & Technology*, 2010, 10(1): 50-54.
- [29] 张泾周, 杨伟静, 张安祥. 模糊自适应PID控制的研究及应用仿真[J]. *计算机仿真*, 2009, 26(9): 132-135, 163.
- ZHANG J Z, YANG W J, ZHANG A X. Research and application simulation of fuzzy adaptive PID control[J]. *Computer Simulation*, 2009, 26(9): 132-135, 163. (in Chinese)
- [30] LIU L, TAN K K, PUTRA A S, et al. Compensation of hysteresis in piezoelectric actuator with iterative learning control[J]. *Journal of Control Theory and Applications*, 2010, 8: 176-180.
- [31] YAN G, FANG H, MENG F. High-accuracy tracking of piezoelectric positioning stage by using iterative learning controller plus PI control[J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2019, 41: 1-9.
- [32] GAO Z. Scaling and bandwidth - parameterization based controller tuning[C]. *ACC*, 2003: 4989-4996.
- [33] LIU W, CHENG L, HOU Z G, et al. An active disturbance rejection controller with hysteresis compensation for piezoelectric actuators[C]. *2016 12th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA)*. IEEE, 2016: 2148-2153.
- [34] MIN D, HUANG D, JIAN Y. High-precision tracking of piezoelectric actuator using active disturbance rejection control[C]. *2018 5th International Conference on Information, Cybernetics, and Computational Social Systems (ICCSS)*. IEEE, 2018: 13-18.
- [35] HUANG D, MIN D, JIAN Y, et al. Current-cycle iterative learning control for high-precision position tracking of piezoelectric actuator system via active disturbance rejection control for hysteresis compensation[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 67(10): 8680-8690.
- [36] WEI W, DUAN B, ZUO M, et al. Active disturbance rejection control for a piezoelectric nano-positioning system: a U - model approach [J]. *Measurement and Control*, 2021, 54(3-4): 506-518.
- [37] EDWARDS C, SPURGEON S K. *Sliding mode control: theory and applications*[J]. Crc Press, 1998.
- [38] LIANG H, LIU K, LI M, et al. Actuator saturation compensator design for disturbance observer based control structure supporting piezo driven nanopositioning systems [C]. *2022 IEEE 5th International Conference on Information Systems and Computer Aided Education (ICISCAE)*. IEEE, 2022: 645-650.
- [39] XU Q. Continuous integral terminal third - order sliding mode motion control for piezoelectric nanopositioning system [J]. *IEEE/ ASME Transactions on Mechatronics*, 2017, 22(4): 1828-1838.
- [40] BASHASH S, JALILI N. Robust adaptive control of coupled parallel piezo-flexural nanopositioning stages[J]. *IEEE / ASME Transactions on Mechatronics*, 2009, 14(1): 11-20.
- [41] SHIEH H J, LIN F J, HUANG P K, et al. Adaptive displacement control with hysteresis modeling for piezoactuated positioning mechanism[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2006, 53(3): 905-914.
- [42] SI W, DONG X, YANG F. Adaptive neural prescribed performance control for a class of strict-feedback stochastic nonlinear systems with hysteresis input[J]. *Neurocomputing*, 2017, 251: 35-44.

(本文编辑: 刘宇轩)



第一作者: 齐思宁 (1996—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为纳米测量技术研究。



通讯作者: 李强 (1976—), 男, 研究员, 主要从事纳米测量技术研究, 在微纳米表面形貌参数测量与校准、微纳尺度材料力学特征参数测量与校准、复杂微结构测量与评价等领域具有丰富经验。