

## 大行程高谐频柔顺纳米定位技术综述

王湘元<sup>1,2</sup>, 吴昊<sup>1</sup>, 余祺<sup>1</sup>, 黄维维<sup>1</sup>, 朱利民<sup>1\*</sup>

1. 上海交通大学机械系统与振动全国重点实验室, 上海 200240;
2. 浙江大学流体动力基础件与机电系统全国重点实验室, 浙江 杭州 310027)

**摘要:**随着科学研究和工业生产对纳米级精度的需求日益增长,能够生成和控制纳米级精度运动的柔顺纳米定位技术已成为高端装备的关键支撑。定位行程和谐振频率主导着纳米定位系统的工作空间和响应速度,但二者间存在原理性的矛盾,难以兼顾。本文以大行程、高谐频柔顺纳米定位技术为研究对象,从系统构成、关键性能指标等方面介绍了行程与谐频间矛盾问题的内在机制,并从基于不同致动方式的纳米定位器设计、相关控制问题及控制方法等方面介绍了国内外研究学者为解决这一问题所开展的探索与实践,分析了研究现状并讨论了发展趋势,为我国高端装备与精密仪器的发展提供了有益参考。

**关键词:** 纳米定位; 柔顺机构; 大行程; 高谐振频率; 致动器; 精密运动控制

**中图分类号:** TP215 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2026)03-107-19

## Review of long range high resonant frequency compliant nanopositioning technology

WANG Xiangyuan<sup>1,2</sup>, WU Hao<sup>1</sup>, YU Qi<sup>1</sup>, HUANG Weiwei<sup>1</sup>, ZHU Limin<sup>1\*</sup>

1. State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
2. State Key Laboratory of Fluid Power and Mechatronics Systems, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** With the growing demand for nanometer-scale precision in scientific research and industrial production, compliant nanopositioning technology capable of generating and controlling motion with nanometer-level precision has emerged as a key enabler for high-end equipment. The positioning range and resonant frequency determine the workspace and dynamic response of nanopositioning systems. However, there exists an inherent trade-off between them, making it difficult to optimize both simultaneously. This paper focused on the compliant nanopositioning technologies for achieving long range and high resonant frequency. From the perspectives of system configuration and key performance indicators, the intrinsic mechanism underlying the trade-off between positioning range and resonant frequency was introduced. Furthermore, the efforts and practices of researchers worldwide in addressing the trade-off, including the design of nanopositioners based on different actuation methods, as well as related control issues and control strategies, were reviewed. The current research status was analyzed, and future development trends were discussed, providing useful references for the advancement of high-end equipment and precision instruments in our country.

**Keywords:** nanopositioning; compliant mechanism; long range; high resonant frequency; actuator; precision motion control

纳米定位技术实现对各类末端执行器的纳米级精度的运动生成和控制,是支撑微纳尺度测量、制造、操作等应用的诸多高端装备的核心技术。例如:原子力显微镜依托纳米定位系统实现探针和样品之间的三自由度相对运动,用于纳米材料表征<sup>[1]</sup>;超精密切削加工中的快速刀具伺服系统借助纳米定位器带动刀具,通过微纳尺度的快速

往复进给实现复杂面型工件的高效加工<sup>[2]</sup>;显微注射机器人系统通过纳米定位技术实现细胞穿刺等微细操作,用于细胞外物质的介入<sup>[3]</sup>。

传统机械系统多采用电机等致动元件产生回转运动,并依赖齿轮、铰链、丝杆等传动部件将其转化为线性位移的输出<sup>[4]</sup>。然而,这些部件不可避免地引入间隙和摩擦,使系统输出的运动分辨

收稿日期:2025-12-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52335010);流体动力基础件与机电系统全国重点实验室开放基金资助项目(GZKF-202522)

第一作者:王湘元(1997—),男,吉林长春人,博士,E-mail:wangxiangyuan@sjtu.edu.cn

\*通信作者:朱利民(1973—),男,上海人,教授,博士,博士生导师,E-mail:zhulm@sjtu.edu.cn

引用格式:王湘元,吴昊,余祺,等.大行程高谐频柔顺纳米定位技术综述[J].国防科技大学学报,2026,48(3):107-125.

Citation: WANG X Y, WU H, YU Q, et al. Review of long range high resonant frequency compliant nanopositioning technology [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2026, 48(3): 107-125.

率难以达到纳米级。为实现纳米乃至亚纳米级分辨率的运动,研究人员采用能够直接输出高分辨率线性运动的精密致动器,并结合一体化、无摩擦、无磨损的柔顺传动机构设计纳米定位器。同时,运用高精度传感器和先进算法,实现了精密运动的监测和控制,逐步形成了成熟的技术路线<sup>[5]</sup>。

随着科学研究及工业应用的不断发展,各场景除了提出纳米精度的需求,对大定位行程和高谐振频率等性能指标的需求也日益提升,进一步促进了致动技术和柔顺机构设计的创新。另外,为充分发挥纳米定位器的性能,解决纳米定位器的迟滞非线性、低阻尼谐振模态、交叉耦合等问题的超精密控制算法也成为研究热点。

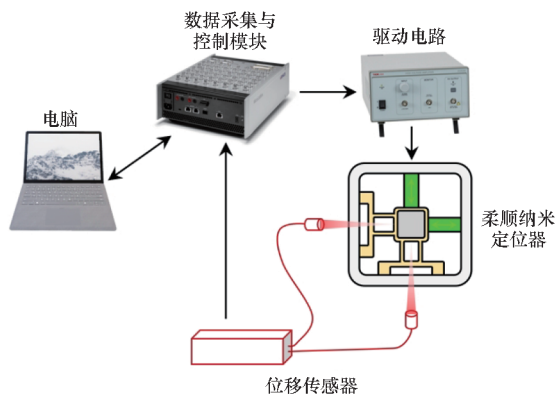
本文从纳米定位系统的组成和关键性能指标出发,系统梳理了国内外研究学者围绕大行程、高谐振需求开展的基于不同致动原理的纳米定位器设计研究,同时介绍了纳米定位中的典型运动控制问题及控制方法,并对本领域未来的发展趋势和挑战进行了展望。

### 1 柔顺纳米定位系统的组成

柔顺纳米定位系统主要由柔顺纳米定位器、驱动电路、位移传感器、数据采集与控制模块、电脑五个部分构成,系统如图 1(a) 所示。

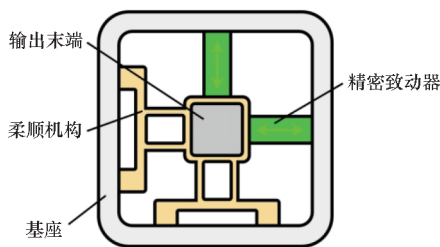
电脑是系统的上位机,用于编写控制程序并与作为下位机的数据采集与控制模块进行直接的交互。电脑发出控制指令后,数据采集与控制模块的数模转换器会将数字形式的控制信号转换成模拟控制信号,并输出给驱动电路。模拟控制信号一般是小幅值电压信号,须经驱动电路放大后,转换成驱动柔顺纳米定位器所需的高压或电流信号。柔顺纳米定位器是系统的核心,其结构如图 1(b) 所示。在电压或电流的激励下,精密致动器将产生致动力。柔顺机构在致动力的作用下产生微小的弹性形变,从而在输出末端产生位移。与传统带刚性铰链的运动机构不同,柔顺机构通常具有一体化的结构,且输出末端一般也固联在柔顺机构上,使得整个传动链无间隙、无摩擦,这是实现纳米级分辨率的前提。通过特定的结构构型,柔顺机构也可实现位移放大与运动约束等功能。作为柔顺纳米定位器的主要传动部件,柔顺机构的等效刚度和质量分布也直接决定了系统的动力学特性。位移传感器用于测量纳米定位器末端的位移,常见类型包括电容位移传感器、激光三角测量传感器、光栅尺、激光干涉传感器、电涡流

传感器、电阻应变传感器<sup>[6]</sup>等,包含探头和信号调节器两部分。探头直接感知末端位移,信号调节器将探头所获取的传感信号转换成可被数据采集与控制模块读取的低压模拟或数字信号。若为模拟信号,则需用数据采集与控制模块的模数转换器将其进一步处理为数字信号。数据采集与控制模块对位移信号进行采集,实现对运动过程的实时监测,并将其用于反馈控制。同时,所有采集的数据都可在电脑上呈现并存储,用于后续的处理和分析。



(a) 系统示意图

(a) Schematic diagram of the system



(b) 柔顺纳米定位器

(b) Compliant nanopositioner

图 1 典型的柔顺纳米定位系统

Fig. 1 The typical compliant nanopositioning system

### 2 纳米定位技术的关键性能指标

纳米定位技术的性能评价依赖于一系列关键指标,这些指标从静态到动态、从单轴到多轴,全面反映了纳米定位系统的能力。定位分辨率与行程分别决定了系统的最小可控运动和可覆盖的工作范围;机械谐振频率与闭环带宽分别体现了系统开环和闭环条件下的动态特性与响应速度;自由度数量反映了系统在不同应用场景下的适应性;交叉耦合效应则揭示了多自由度系统在各轴运动独立性上的挑战。这些性能指标相互制约、共同作用,决定了纳米定位系统在实际应用场景中的水平与潜力。

## 2.1 定位分辨率

定位分辨率是纳米定位最基本的性能指标,也是衡量系统是否具备纳米级定位能力的核心标准,其定义为系统能够实现的最小运动增量。

测试定位分辨率的普遍方法是让纳米定位器跟踪小幅值阶梯位移信号。若从传感器测量的实际位移信号中可以清晰地辨识出该阶梯,则可判断定位分辨率至少达到了单个阶梯的幅值水平。例如,如图2所示,Sang等利用此方法测得其纳米定位器的定位分辨率为20 nm<sup>[7]</sup>。

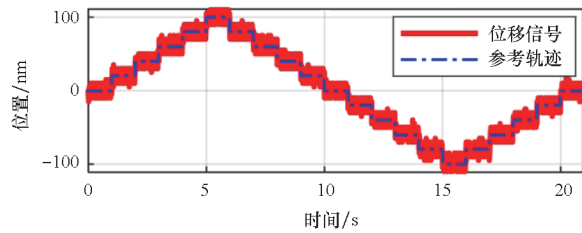


图2 定位分辨率测试曲线<sup>[7]</sup>

Fig. 2 Positioning resolution testing curve<sup>[7]</sup>

一般而言,柔顺纳米定位器由精密致动器驱动并通过柔顺机构传动,其机械结构具有无摩擦、无间隙特性<sup>[8]</sup>,在环境稳定的情况下均具备实现纳米级分辨率的条件。然而,纳米定位系统具有诸多组成部分,它们环环相扣,并呈现“木桶效应”,最终达到的分辨率水平通常由其最薄弱的环节决定。例如,图2所示的例子中,若位移传感器(光栅尺)的测量分辨率不能达到20 nm,即使定位器本身具备相应性能,也无法从实验中实现对20 nm阶梯信号的辨识。此外,驱动电路和数据采集系统对信号的细分能力、环境噪声水平等,也决定了实验能够获得的分辨率水平。

目前,对纳米定位系统的分辨率测试多是在闭环条件下开展的,其中,在压电和法应力电磁致动纳米定位器上可实现5 nm及以下的分辨率,音圈电机致动纳米定位器的分辨率可达十纳米级。但需注意,闭环控制可能会引发百皮米至纳米级的振动。因此,在原子力显微镜的原子级成像等运动范围极小的应用中,也有学者使用开环运行的方式以追求更好的横向定位分辨率(亚纳米及以下)<sup>[9]</sup>。但开环运行的方式无法对热漂移、蠕变等对成像效果带来的影响进行消除,需进行后续的处理。

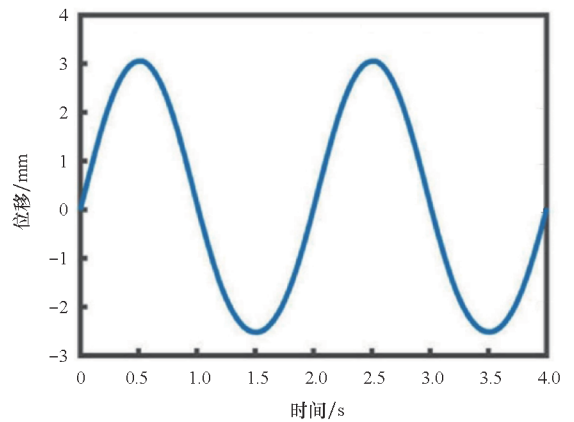
## 2.2 定位行程

定位行程指纳米定位器能够实现纳米定位的运动范围的大小,可表示为

$$S = \frac{\Delta F}{k} \quad (1)$$

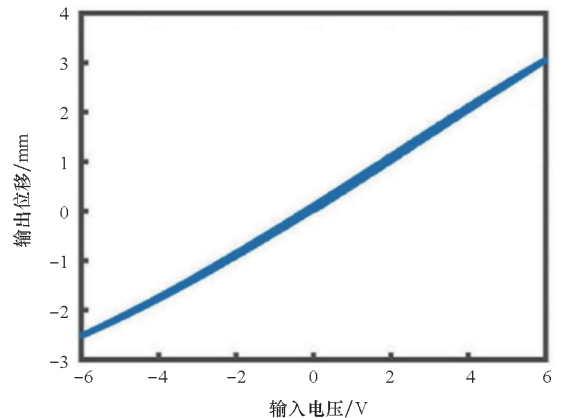
其中, $\Delta F$ 指其致动器能够输出的力的范围, $k$ 指纳米定位器的刚度。

实验上,定位行程一般在准静态条件下测得。常用方法是以极低频、尽可能大幅值的电信号激励致动器,并通过位移响应曲线观测纳米定位器输出运动的范围。例如,Lyu等利用0.5 Hz、范围为[-6 V, 6V]的正弦电压作为其致动器的输入信号,测得纳米定位器的位移响应曲线如图3(a)<sup>[10]</sup>所示。通过观察,可直观地确定该纳米定位器的定位行程为5.58 mm。此外,也可以以输入电压作为横坐标、输出位移作为纵坐标绘制如图3(b)<sup>[10]</sup>所示的迟滞曲线。从迟滞曲线中,既能辨识定位行程,也能反映输入输出关系特征。



(a) 时域位移响应曲线

(a) Time-domain displacement response curve



(b) 输入输出关系

(b) Input-output relationship

图3 定位行程测试曲线<sup>[10]</sup>

Fig. 3 Positioning range testing curve<sup>[10]</sup>

定位行程的大小直接决定了纳米定位器在应用场景中的操作空间。在一些有原子级分辨率需求的原子力显微镜测量和操作场景中,对定位行程的需求通常仅为百纳米级或微米级<sup>[11]</sup>;面向更

广泛应用场景的通用型原子力显微镜<sup>[12]</sup>和快速刀具伺服切削系统<sup>[13]</sup>的定位行程一般为十微米至百微米量级;而机器人微操作<sup>[14]</sup>或光学调焦<sup>[15]</sup>等应用则需要毫米级甚至更高的定位行程。

### 2.3 机械谐振频率

机械谐振频率是衡量纳米定位器动态性能的重要指标。由于系统的开环幅频响应在高于主谐振频率的频段内迅速衰减,因此机械谐振频率决定了一个纳米定位系统适合工作的频率范围。纳米定位器普遍具有低阻尼谐振模态,在忽略阻尼时,其谐振频率可表达为

$$f = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2)$$

其中,  $m$  为纳米定位器的动质量。

为辨识纳米定位系统的机械谐振频率,通常需要在开环情况下对致动器输入一个激励信号,同时采集纳米定位器输出的位移响应信号。对两信号进行傅里叶变换,则可获得系统的伯德图,如图 4 所示<sup>[16]</sup>。从开环幅频响应中可以找到谐振峰所处的频率,即机械谐振频率。需要说明的是,在此测试中,激励信号需要包含足够多的频率成分,且必须包含谐振频率附近的频率,只有这样才能对系统的谐振频率进行有效的辨识。常见的激励信号包含扫频信号<sup>[17]</sup>、白噪声信号<sup>[18]</sup>等。需要注意,信号的幅值不宜过大,否则致动器的迟滞效应等幅值依赖的非线性特征将可能影响频率响应的辨识精度。进一步可基于频响数据辨识系统传递函数模型进行控制器设计。如图 4 所示, Babarinde 等<sup>[16]</sup>用一个三阶传递函数模型很好地描述了一个压电致动柔顺纳米定位器的频响特性。

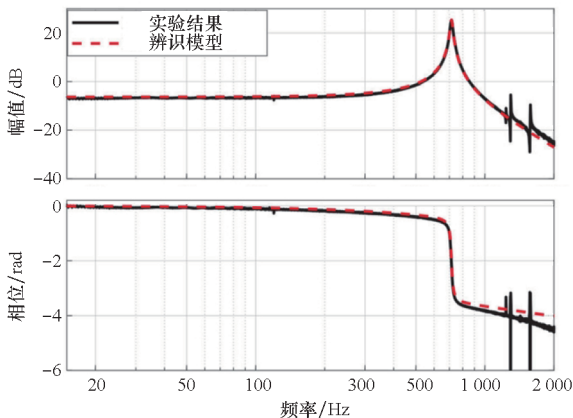


图 4 开环系统伯德图<sup>[16]</sup>

Fig. 4 Open-loop Bode plot<sup>[16]</sup>

除上述方法外,亦可采用锤击法对系统动力学特性进行辨识<sup>[19]</sup>。这虽然是一种有效的方法,

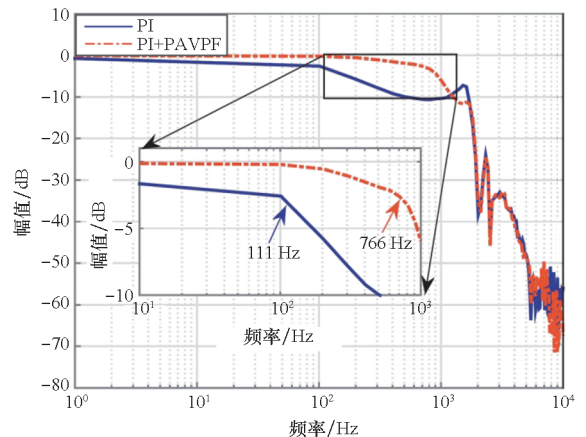
但需要额外的专用实验设备,如模态力锤和加速度计等,因此在纳米定位领域应用有限。

在一部分场景中,大定位行程和高分辨率的重要性远高于运行频率,因此纳米定位器的高谐振频率在很长时间内不是追求的目标。不过,近年来,随着纳米定位技术在超精密制造等对效率敏感的行业应用更为广泛,如何提高纳米定位器的谐振频率也成为重要的研究课题<sup>[20]</sup>。特别地,对于使用原子力显微镜进行生物分子观测,成像速度必须达到视频级(数十帧/s)才能捕捉到生物分子的动态行为。为达到此目的, Shimizu 等提出了一种谐振频率超过 1.1 MHz 的纳米定位器作为  $Z$  轴<sup>[21]</sup>,代表着目前纳米定位在谐振频率这一性能指标上的最高水平。

### 2.4 闭环带宽

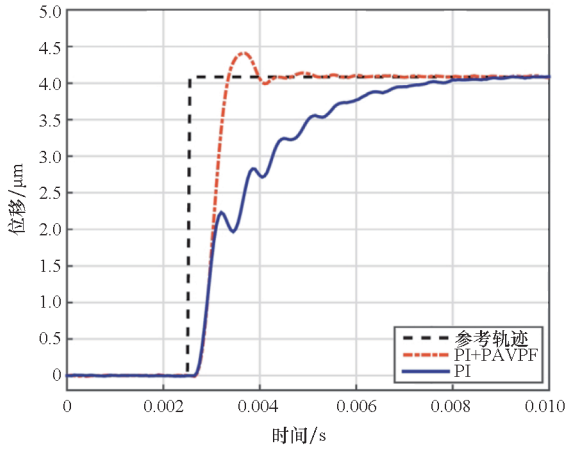
闭环带宽反映受控系统的响应速度,一般定义为闭环幅频响应下降至静态值  $-3$  dB 时对应的频率。以最大衰减为  $-3$  dB 以内作为可接受的衰减,则受控的纳米定位系统可以对频率成分处于带宽范围内的任意位移信号进行有效的跟踪。

对于同一纳米定位器,应用不同的控制算法获得的带宽间存在差异。例如, Li 等在一个单自由度压电致动纳米定位器上对比了比例-积分(proportional-integral, PI)控制器和 PI+正加速度-速度-位置反馈(PI+PAVPF)控制器这两种控制策略的控制效果<sup>[22]</sup>。如图 5(a)所示,前者实现了 766 Hz 的闭环带宽,远高于后者所实现的 111 Hz 的闭环带宽。更高的带宽将带来更快的响应速度。如图 5(b)所示,在 Li 等进行的闭环阶跃响应的实验中,纯 PID 控制下系统的上升时间为 2.8 ms,而 PID+正加速度-速度-位置反馈控制下,上升时间仅为 0.45 ms。



(a) 幅频响应曲线

(a) Amplitude-frequency responses curve



(b) 阶跃响应曲线  
(b) Step responses curve

图5 闭环响应曲线<sup>[22]</sup>

Fig. 5 Closed-loop responses curve<sup>[22]</sup>

从提升响应速度的角度来讲,带宽越高越有利。Ito 等通过二自由度控制,实现了高达一阶谐振频率 13 倍的闭环带宽<sup>[23]</sup>。但应注意系统机械谐振频率以上的开环幅频响应是剧烈衰减的,对超高频的频率成分进行跟踪需要付出更大的能量代价。另外,过高的带宽对噪声具有放大作用,将影响系统的稳定性。因此,闭环带宽在开环系统机械谐振频率附近为宜。

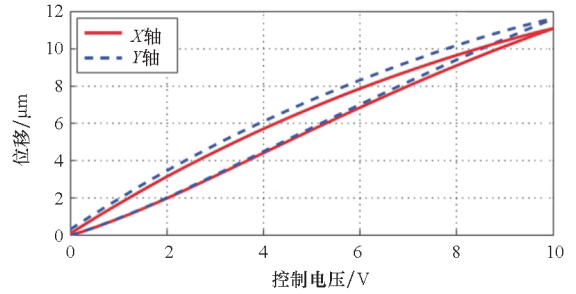
### 2.5 自由度

纳米定位系统的自由度指其能够提供的独立运动参数的数量,不同的应用场景对自由度有着不同的需求。例如,原子力显微镜需要 XYZ 三个自由度的纳米定位来实现对样品表面三维微观形貌的栅格扫描<sup>[24]</sup>。在快速刀具伺服车削中,具有单个平动自由度的纳米定位系统最为常见<sup>[25]</sup>。而为了获得更好的加工效果并加工更为复杂的微结构,学者也发展了具有两个<sup>[26]</sup>或三个<sup>[27]</sup>平动自由度的快速刀具伺服切削系统。快速反射镜系统一般具有两个回转自由度,用于实现光束的快速调整<sup>[28]</sup>。为模仿人手的“夹”和“搓”的功能,Lyu 等<sup>[29]</sup>设计了一个二自由度的微操作机构。具有平面内 XYθ 三个自由度的纳米定位器在微纳操作领域已经得到广泛应用<sup>[30]</sup>。Wu 等面向更高灵活性的微纳操作场景,设计了具有六个自由度的纳米定位器<sup>[31]</sup>。

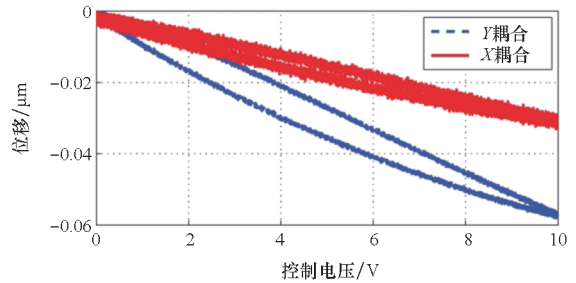
### 2.6 交叉耦合

交叉耦合效应普遍存在于多自由度纳米定位器中。它指当两轴并非完全正交布置时,沿一个方向上的主运动总是伴有沿另一方向的寄生运动,造成各轴间运动的耦合。

准静态的交叉耦合特性可以在对系统的一个轴进行行程测试时,同时对另外的轴的寄生位移进行观测而获得。如图 6(a)<sup>[32]</sup>所示,Li 等在二自由度纳米定位器测试中,测得 X 轴和 Y 轴的行程分别为 11.2 μm 和 11.6 μm。对应地,如图 6(b)<sup>[32]</sup>所示,沿 Y 轴和 X 轴的寄生运动位移分别为 0.058 μm 和 0.035 μm,交叉耦合率分别为 0.52% 和 0.3%。



(a) 主运动  
(a) The main motion

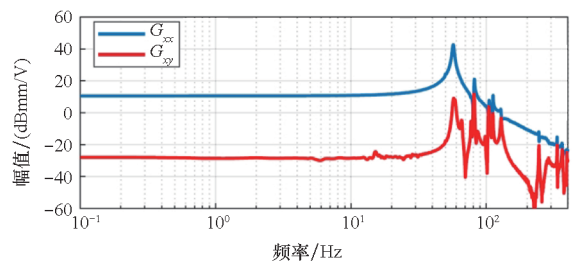


(b) 寄生运动  
(b) The parasitic motion

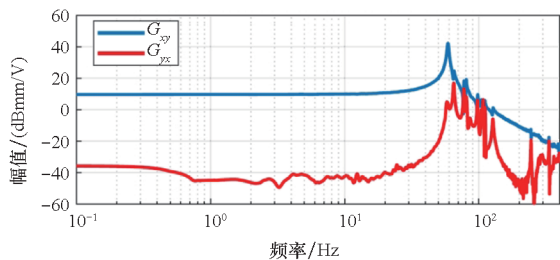
图6 准静态下的交叉耦合测试<sup>[32]</sup>

Fig. 6 Quasi-static cross-coupling effect tests<sup>[32]</sup>

动态的交叉耦合可通过对一个轴进行频率响应测试时观测另一个轴的频响而获得。图 7 展示了 Liu 等对一个二自由度纳米定位器的幅频响应测试结果,其中蓝色曲线代表主运动,红色曲线代表交叉耦合<sup>[33]</sup>。可以看到,在低频时,该平台的交叉耦合幅值比主运动低 40 dB 以上,而在谐振频率附近更加显著。



(a) X 轴激励下的 X 轴和 Y 轴的幅频响应  
(a) X- and Y- axial amplitude-frequency responses under X-axial excitation



(b) Y 轴激励下的 Y 轴和 X 轴的幅频响应  
(b) Y- and X- axial amplitude-frequency responses under Y-axial excitation

图 7 动态交叉耦合测试<sup>[33]</sup>

Fig. 7 Dynamic cross-coupling effect tests<sup>[33]</sup>

这一运动耦合将对纳米定位器的运动精度产生影响,因此应尽可能从机构设计的角度避免过大的交叉耦合效应。

### 3 面向大行程、高谐频的柔顺纳米定位器设计

各类应用场景均希望纳米定位系统的各项性能指标更为优越。然而,与其他机械系统类似,柔顺纳米定位器的性能指标之间存在内在矛盾与折中。最为突出的矛盾在表征静态性能的定位行程和表征动态性能的机械谐振频率之间。如式(1)~(2)所示,这两个性能指标均与刚度密切相关。较高的刚度有助于提升谐振频率,但会降低定位行程;反之,较低的刚度有利于获得更大行程,却难以满足高频应用需求。针对不同应用场景的性能要求,研究人员使用柔顺机构作为主要传动部件,提出了一系列柔顺纳米定位器设计方案。按致动原理划分,主要包括压电致动、音圈电机致动、法应力电磁致动的纳米定位器等。在行程与谐频这两个指标中,每一种致动方式都有着各自的优势区间。例如,最主流且最成熟的压电致动方式在面向高谐频应用的柔顺纳米定位器中具有优势,但其难以适合大行程应用。音圈电机适合于实现毫米级以上的超大行程输出,但其动态性能相对较低。近年来兴起的法应力电磁致动方式则在中大行程、中高谐频的折中区间展现出综合性能的优势,但难以实现较为极端的单一性能指标。目前,一些研究追求在一种致动方式的优势区间内将其优势发挥到极致,也有一些研究通过设计特殊的柔顺机构(如压电致动纳米定位器中常见的柔顺位移放大机构)等部件,尝试在该致动方式的非传统优势区间实现与其他致动方式相媲美的性能。本章将着重对基于这三种致动方式的柔顺纳米定位器

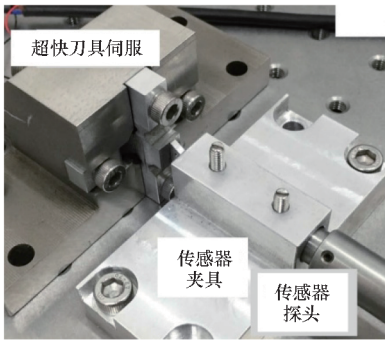
的设计现状进行介绍。

#### 3.1 压电致动柔顺纳米定位器

压电陶瓷致动器是开发柔顺纳米定位器的最主流的致动元件。在外部电压的激励下,压电陶瓷利用其逆压电效应将电能转化为机械能,输出微小的位移<sup>[34]</sup>。在一众精密致动器中,压电陶瓷具有结构紧凑、分辨率高的优势,同时,它还具有高正刚度,可以带来极快的响应速度。因此,基于压电致动的柔顺纳米定位器可轻易实现千赫兹级别的谐振频率,常被用于高频场景。

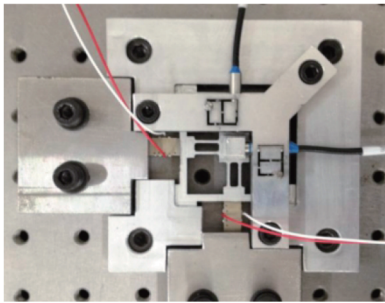
例如,Zhu 等面向超快刀具伺服切削加工研发了一款单自由度的柔顺纳米定位器<sup>[25]</sup>,如图 8(a)所示,其机构采用有理 Bezier 曲线缺口设计,并经解析优化,最终实现了超 20 kHz 的谐振频率和 6  $\mu\text{m}$  的静态行程。李春霞设计了如图 8(b)所示的并联式二自由度压电致动柔顺纳米定位器<sup>[35]</sup>,其柔顺机构采取了中间加厚梁,能够实现较低的轴间交叉耦合并提升刚度。该定位器实现了 11.2  $\mu\text{m}$   $\times$  11.6  $\mu\text{m}$  的空间,一阶谐振频率达 13.6 kHz,闭环定位分辨率为 3 nm,轴间交叉耦合率仅为 0.52%。Kenton 等面向原子力显微镜高速栅格扫描成像需求,设计了具有串联构型的三自由度纳米定位器<sup>[36]</sup>。如图 8(c)所示,该定位器将 Z 轴、X 轴、Y 轴从内向外串联布置,有利于 Z 轴和 X 轴实现更高的谐振频率,满足了原子力显微镜各轴间差异化的带宽需求。在 X、Y、Z 方向上,该系统分别实现了 24.2 kHz、6.0 kHz、70 kHz 的谐振频率以及 9  $\mu\text{m}$ 、9  $\mu\text{m}$ 、1  $\mu\text{m}$  的定位行程。与商用原子力显微镜测头相集成,实现了 70 帧/s 的视频级成像。Chen 等基于环形压电陶瓷致动器设计了一款三自由度快速刀具伺服系统<sup>[27]</sup>,如图 8(d)所示,得益于致动器的中空结构,其致动器和位移传感器可被布置在同一侧,且致动器可为传感器提供有效的保护。其每个自由度的输出刚度约为 30 N/ $\mu\text{m}$ ,分辨率为 5 nm,机械谐振频率高于 3 260 Hz,且轴间的交叉耦合率在 0.92% 以下。这一高谐振频率、低耦合的特性使其适合于准确、快速地加工复杂的光学微结构表面。

这些研究充分证明了压电致动柔顺纳米定位器在实现高谐振频率方面的优势。然而,由于压电陶瓷具有极高的刚度,尽管可以输出较大的致动力,其最大伸长量通常仅为其自身长度的约 0.1%,每 1 mm 长度的压电陶瓷只能输出约 1  $\mu\text{m}$  的位移。在兼顾系统尺寸和材料成本的情况下,



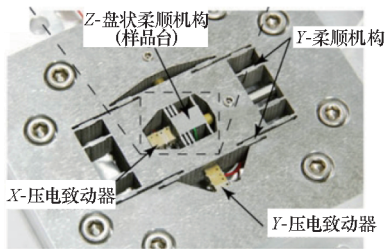
(a) Zhu 等提出的纳米定位器<sup>[25]</sup>

(a) Nanopositioner proposed by Zhu et al.<sup>[25]</sup>



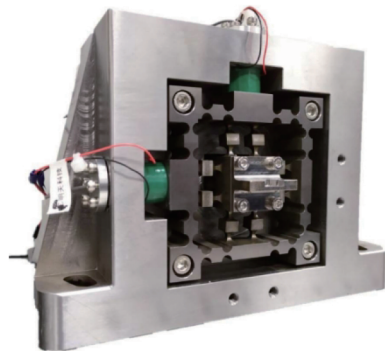
(b) 李春霞提出的纳米定位器<sup>[35]</sup>

(b) Nanopositioner proposed by Li Chunxia<sup>[35]</sup>



(c) Kenton 等提出的纳米定位器<sup>[36]</sup>

(c) Nanopositioner proposed by Kenton et al.<sup>[36]</sup>



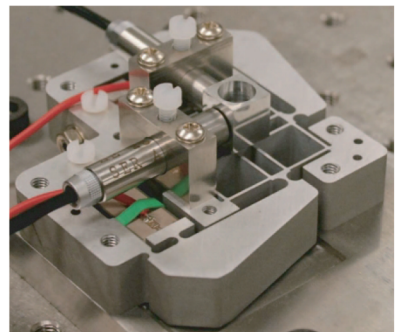
(d) Chen 等提出的纳米定位器<sup>[27]</sup>

(d) Nanopositioner proposed by Chen et al.<sup>[27]</sup>

图8 无柔顺位移放大机构的压电致动纳米定位器

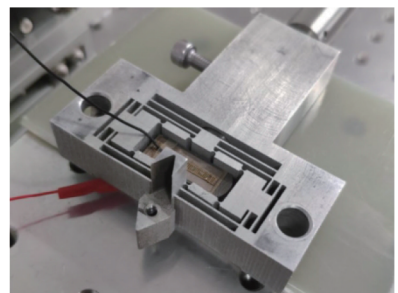
Fig.8 Piezo-actuated nanopositioners without compliant displacement amplifiers

为使压电致动纳米定位器获得更大的定位行程,研发柔顺位移放大机构成为近十几年来的研究热点<sup>[37]</sup>。Yong 等设计了一款应用杠杆放大机构的并联型二自由度纳米定位器<sup>[38]</sup>。如图9(a)所示,杠杆机构将压电叠堆输出的位移放大2.5倍,实现了 $25\ \mu\text{m} \times 25\ \mu\text{m}$ 的工作空间以及每轴2.7 kHz的谐振频率。Zhou 等基于桥式放大机构设计了如图9(b)所示的单自由度快速刀具伺服刀架<sup>[39]</sup>,其解析计算得到的放大比为9.58,实验测得的定位行程为 $35\ \mu\text{m}$ ,谐振频率为1.25 kHz。其柔顺放大机构可被用作机械式观测器,实现对切削力的感知,在不需要额外的力传感器的情况下实现了切削力的实时测量,展现出0.24 mN的力感知分辨率和600 Hz的工作带宽,并实现对快速刀具伺服系统的力/位移混合控制。Wang 等提出了具有拱形桥式放大机构的并联型二自由度纳米定位器<sup>[40]</sup>,如图9(c)所示。该系统在X和Y方向上分别实现了5.46和5.37的位移放大比,对应着 $55.4\ \mu\text{m}$ 和 $53.2\ \mu\text{m}$ 的定位行程,每轴的谐振频率约为253.4 Hz,定位分辨率为8 nm。Kim 等利用斜双复合平行四边形结构研发了一款具有自导向位移放大机构的纳米定位平台<sup>[41]</sup>,如图9(d)所示,其柔顺机构的设计位移放大比达到了16。该系统实现了 $963\ \mu\text{m}$ 的定位行程,但一阶谐振频率只有83 Hz。



(a) Yong 等提出的纳米定位器<sup>[38]</sup>

(a) Nanopositioner proposed by Yong et al.<sup>[38]</sup>



(b) Zhou 等提出的纳米定位器<sup>[39]</sup>

(b) Nanopositioner proposed by Zhou et al.<sup>[39]</sup>

这种致动方式难以直接满足百微米级以上的大行程需求。

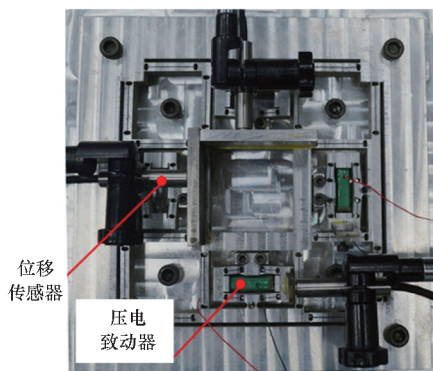
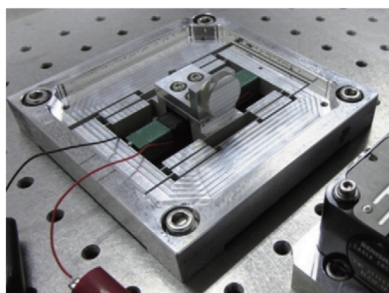
(c) Wang 等提出的纳米定位器<sup>[40]</sup>(c) Nanopositioner proposed by Wang et al.<sup>[40]</sup>(d) Kim 等提出的纳米定位器<sup>[41]</sup>(d) Nanopositioner proposed by Kim et al.<sup>[41]</sup>

图 9 有柔顺位移放大机构的压电致动纳米定位器

Fig. 9 Piezo-actuated nanopositioners with compliant displacement amplifiers

上述结果表明,柔顺位移放大机构可以有效提升压电致动柔顺纳米定位器的定位行程,但是随着行程的增加,其机械谐振频率将降低。一方面,更高的放大比将显著降低定位器的刚度;另一方面,实现高放大比往往需要复杂、庞大的结构,这将带来额外的动质量,从而限制谐振频率。

此外,复杂的柔顺机构还会带来建模上的困难,导致模型计算的性能和实验测得的性能相差较大<sup>[42]</sup>。进一步将具有高刚度的压电致动器放置在柔顺机构中,并施加预紧力,也将会在一定程度上影响其实际的各项输出性能,尤其是对谐振频率具有提升作用<sup>[43]</sup>。加强对复杂机构的建模,并在建模中考虑致动器和机构间的耦合,将对提升性能预测的准确性、获得系统整体性能的最佳动力学匹配提供帮助。

### 3.2 音圈电机致动柔顺纳米定位器

音圈电机(voice coil motor, VCM)常被用于毫米、厘米级定位行程的纳米定位器中,其利用运动电荷在磁场中受到的切应力(洛伦兹力)致动,因此也被称为洛伦兹电机<sup>[44]</sup>。根据洛伦兹力

公式,音圈电机所输出的致动力<sup>[7]</sup>可表示为

$$F_{VCM} = BILN \quad (3)$$

其中, $B$ 表示气隙中的磁通密度, $I$ 是音圈电机的输入电流, $L$ 和 $N$ 分别表示线圈的长度和匝数。在纳米定位场景中,可以将永磁体固定并将线圈作为运动部件,也可以固定线圈并令永磁体作为运动部件<sup>[45]</sup>。相较于永磁体,线圈的质量一般更低,所以使用线圈运动型音圈电机作为致动元件设计纳米定位器,更适合于实现更高的负载能力或获得更高的谐振频率,但需注意线圈的发热问题对系统输出的影响。永磁体运动型音圈电机则更适合在对温度敏感的应用场景中应用。

音圈电机自身具有近零刚度的特性,因此当其搭配刚度足够低的柔顺机构构成纳米定位器时,则无须特殊设计放大机构即可满足大定位行程的需求。降低刚度主要有两种途径:一是让柔顺机构变薄,二是让柔顺机构变长。然而,前者受到加工工艺等方面的限制,无法让柔顺机构无限变薄,且更薄的尺寸让机构的强度变低,难以满足可靠性的要求;后者则让机构占据了更大的空间,无法满足诸多应用场景对尺寸紧凑的需求。因此,简单的柔顺机构,如平板梁式机构或平行四边形机构,难以在此类低刚度系统中应用。

为解决上述问题,国内外学者近年来面向大行程应用,创新设计柔顺机构,提出了一系列基于音圈电机的柔顺纳米定位器。例如,Xu 提出了一款厘米级行程二自由度柔顺纳米定位器<sup>[46]</sup>。如图 10(a)所示,其利用多级复合平行四边形柔性铰链,使柔顺机构在较为紧凑的尺寸下实现了较低的刚度。在 $X$ 和 $Y$ 方向上,该系统分别实现了 11.75 mm 和 11.66 mm 的定位行程,几乎是典型的无放大机构的压电直驱纳米定位器的 100 ~ 1 000 倍<sup>[35]</sup>。同时,其 $X$ 轴和 $Y$ 轴在运动学上实现了解耦,交叉耦合率不超过 1.24%。然而,其较低的刚度和较复杂的结构导致其谐振频率较低,两轴分别仅为 29.3 Hz 和 29.6 Hz,只有典型压电平台的几十分之一。Roy 等基于改进型双平行四边形柔顺机构研制了一款定位行程超过 50 mm 的二自由度音圈电机致动纳米定位器,如图 10(b)所示<sup>[47]</sup>。实验测得其一阶谐振频率仅为 4.2 Hz,但该设计在实现大行程的同时有效提高了高阶模态的频率,使其运动不易受到不受控的高阶模态的干扰。Yang 等设计了一款具有环形柔顺机构的单自由度音圈电机致动纳米定位器<sup>[48]</sup>,如图 10(c)所示。通过将传统的平面设计转化为环形的设计,其柔顺机构结合了双复合平

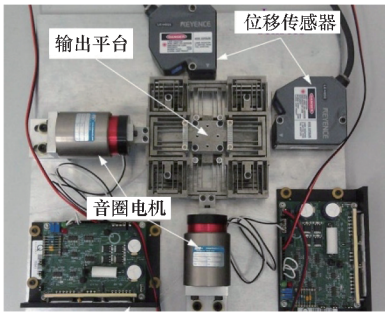
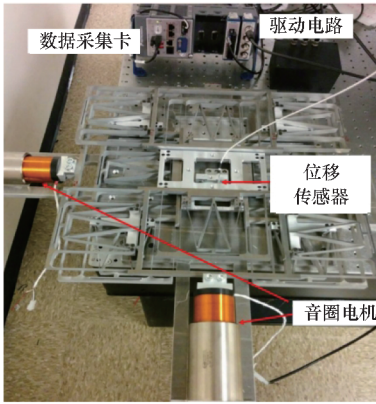
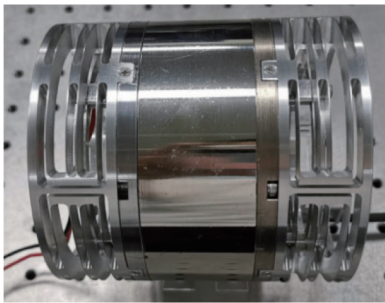
(a) Xu 提出的纳米定位器<sup>[46]</sup>(a) Nanopositioner proposed by Xu<sup>[46]</sup>(b) Roy 等提出的纳米定位器<sup>[47]</sup>(b) Nanopositioner proposed by Roy et al.<sup>[47]</sup>(c) Yang 等提出的纳米定位器<sup>[48]</sup>(c) Nanopositioner proposed by Yang et al.<sup>[48]</sup>

图 10 典型的音圈电机致动柔顺纳米定位器  
Fig. 10 Typical voice coil motor-actuated compliant nanopositioners

行四边形机构和膜片型机构的优势,可以将环形的音圈电机布置在柔顺机构中间,且在获得大行程的前提下实现更为紧凑的尺寸。在静、动态性能方面,其实现了 10 mm 的定位行程和 38.99 Hz 的谐振频率。

以上三项工作的柔顺机构均是由 Al7075 铝合金材料制作的,这也是文献中最常见的柔顺机构材料之一。有学者尝试使用弹性模量更小的材料制作柔顺机构,使得简单构型的柔顺机构也可以在较为紧凑的尺寸下实现较低的刚度。例如,

Lee 等利用立体光刻增材制造技术制作了如图 11(a)所示的光敏聚合物材料的柔顺机构,并用音圈电机致动,实现了 500  $\mu\text{m}$  的定位行程和 80 Hz 的谐振频率<sup>[49]</sup>。Ito 等面向原子力显微镜纵向跟踪提出了如图 11(b)<sup>[23]</sup>所示的单轴音圈电机致动纳米定位器,其柔顺机构使用聚乳酸材料静熔沉积法增材制造而成<sup>[50]</sup>。实验结果表明,其定位行程为 700  $\mu\text{m}$ ,谐振频率为 67 Hz。这两项工作所实现的定位行程在音圈电机致动柔顺纳米定位器中已属较短的水平,但其谐振频率仍然难以超过 100 Hz。这一方面可归因于柔顺机构的低刚度特性,另一方面也与音圈电机的运动部分(线圈或永磁体)质量有较大关系。

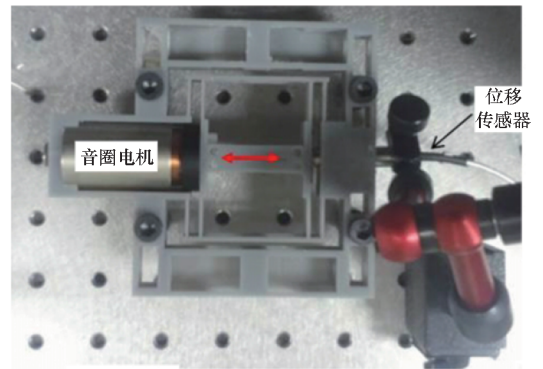
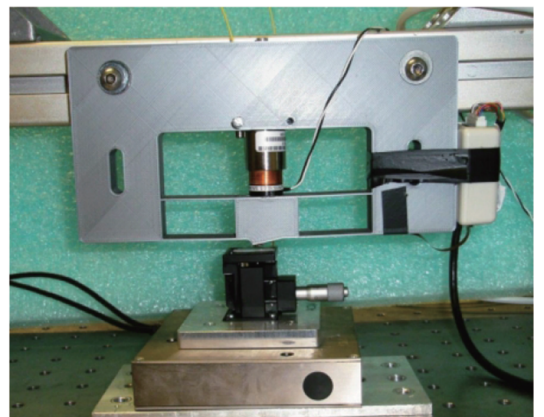
(a) Lee 等提出的纳米定位器<sup>[49]</sup>(a) Nanopositioner proposed by Lee et al.<sup>[49]</sup>(b) Ito 等提出的纳米定位器<sup>[23]</sup>(b) Nanopositioner proposed by Ito et al.<sup>[23]</sup>

图 11 使用低模量材料制作柔顺机构的音圈电机致动纳米定位器

Fig. 11 Voice coil motor-actuated nanopositioners with compliant mechanisms fabricated from low-modulus materials

类似于对压电致动纳米定位器设计柔顺位移放大机构以弥补其定位行程不足的问题的思路,也有学者提出使用柔顺位移降低机构改善音圈电

机谐振频率低的问题,但相关报道较少。Chen 等提出了一款装备了具有 0.136 9 的位移降低比的柔顺机构的音圈电机致动纳米定位器,如图 12 所示<sup>[51]</sup>。其定位行程为 197.43  $\mu\text{m}$ ,柔顺机构的谐振频率为 291 Hz,但与音圈电机的线圈组装在一起之后,谐振频率降低至 55.2 Hz。由此可见,音圈电机的动质量大是音圈电机致动纳米定位器谐振频率低的一个主导因素。这是音圈电机的固有属性,难以通过机构设计来弥补。因此,在高频应用场景中鲜有见到以音圈电机为致动元件的纳米定位器。

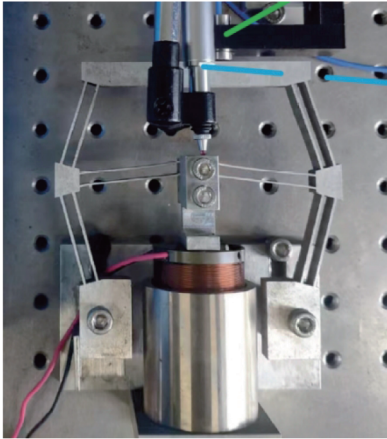


图 12 Chen 等提出的具有柔顺位移降低机构的音圈电机致动纳米定位器<sup>[51]</sup>

Fig. 12 Voice coil motor-actuated nanopositioner with compliant displacement reduction mechanism, proposed by Chen et al. <sup>[51]</sup>

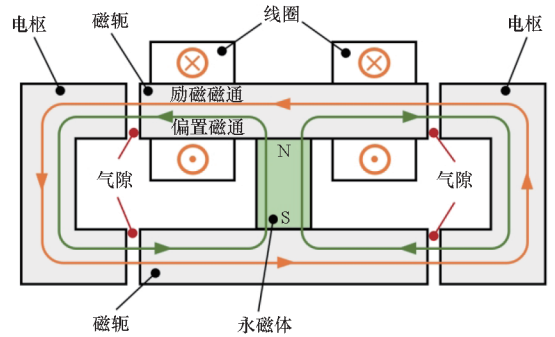
### 3.3 法应力电磁致动柔顺纳米定位器

不同于使用洛伦兹力致动的音圈电机,法应力电磁致动器是以麦克斯韦法应力作为致动力的另一类电磁致动器。麦克斯韦法应力指磁路中具有不同磁导率的磁性物质边界上产生的磁张应力<sup>[52]</sup>。它可在较大范围内实现较高的致动力密度,且无须将线圈或永磁体作为运动部件,是面向中大定位行程、中高谐振频率的纳米定位器的理想致动元件。

通电螺线管型电磁铁即是一种简单的法应力电磁致动器,Xiao 等<sup>[53]</sup>、Gutierrez 等<sup>[54]</sup>都基于螺线管型电磁铁发展了柔顺纳米定位器。然而,螺线管的输入电流和输出致动力之间存在二次函数关系,属于强非线性系统,不利于超精密运动控制,因此未在纳米定位系统中广泛应用。

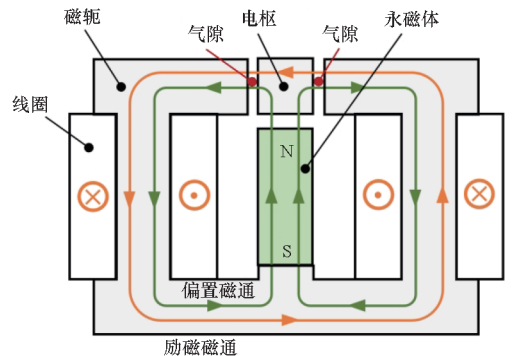
1977 年,Studer 提出了如图 13(a)所示的法应力电磁致动器磁路,并应用于电磁轴承中。其首次在磁路中引入永磁偏置磁通,将致动器的输入输出关系线性化<sup>[55]</sup>。该磁路由磁轭、电枢、永

磁体和线圈组成。其中磁轭、永磁体和线圈是固定的部件,构成致动器的定子;电枢是运动部件,作为致动器的转子。磁轭和电枢由软磁材料制成,用于导磁。永磁体被用于提供偏置磁通(图中环路),通电线圈被用于提供励磁磁通。磁轭和电枢之间存在气隙,在如图 13(a)所示的电流激励条件下,励磁磁通和偏置磁通在左侧气隙中的方向相同,在右侧气隙中的方向相反。根据叠加原理,左侧气隙中的总磁通密度大于右侧气隙中的磁通密度。因此,在左侧气隙所对应的电枢极面上将产生一个相较于右侧气隙所对应的电枢极面上更大的吸引力。最终,作用在电枢上的合力是向右的。类似地,若将电流方向反转,则可在电枢上产生向左的合力。2005 年,Lu 进一步提出了如图 13(b)所示的改进型磁路,其使致动器电枢极面的全部面积都可用于产生致动力,大幅降低了动质量、提升了致动效率,成为目前纳米定位中应用最为广泛的法应力电磁致动器磁路<sup>[56]</sup>。本节接下来所介绍的纳米定位器皆是基于带偏置磁通的法应力电磁致动器设计的。



(a) Studer 提出的磁路<sup>[55]</sup>

(a) Magnetic circuit proposed by Studer<sup>[55]</sup>



(b) Lu 提出的磁路<sup>[56]</sup>

(b) Magnetic circuit proposed by Lu<sup>[56]</sup>

图 13 带永磁偏置的法应力电磁致动器磁路  
Fig. 13 Magnetic circuits of normal-stressed electromagnetic actuators with permanent magnet for providing the bias flux

Lu 等研制了如图 14(a) 所示的超快刀具伺服系统<sup>[57]</sup>。该系统具有 30  $\mu\text{m}$  的行程,并能实现 3 kHz 的谐振频率,在 3 kHz 的频率下,可精确跟踪 P-V 值为 16  $\mu\text{m}$  的正弦轨迹,误差仅为 2.1 nm。Zhu 等提出了一款法应力电磁-压电混合致动的三自由度快速刀具伺服系统<sup>[58]</sup>。如图 14(b) 所示,它的 X、Y 两轴采用法应力电磁致动的方式,并联布置;Z 轴采用压电叠堆作为致动元件,串联在 XY 平台上。该系统的法应力电磁致动轴可以实现 54.4  $\mu\text{m}$  的定位行程和 782 Hz 的谐振频率,轴间的交叉耦合率的绝对值不超过 1.61%。Fang 等提出了如图 14(c) 所示的三轴并联的法应力电磁致动快速刀具伺服系统<sup>[59]</sup>,其在 XY 平面内可实现约 200  $\mu\text{m}$  的行程和约 449 Hz 的谐振频率,Z 轴的定位行程达到了 266.2  $\mu\text{m}$ ,谐振频率达 542 Hz。Wang 等面向原子力显微镜栅格扫描提出了如图 14(d) 所示的法应力电磁-压电混合致动纳米定位器<sup>[60]</sup>。为满足其 XY 平面的大行程需求,其 XY 轴采用法应力电磁致动方式,Z 轴则针对高谐振频率需求采用压电致动方式。由于栅格扫描中对 X 轴的谐振频率需求远

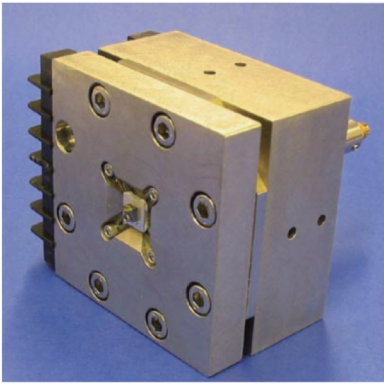
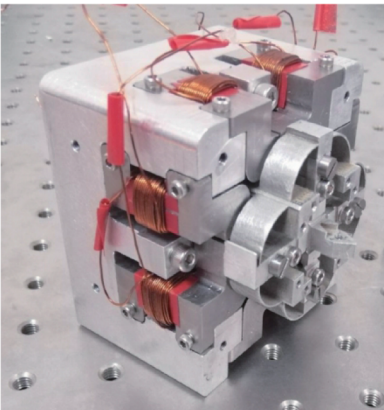
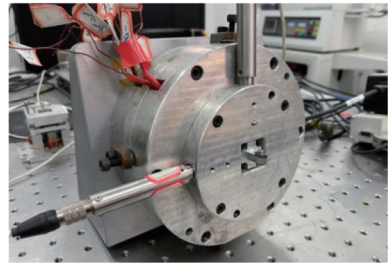
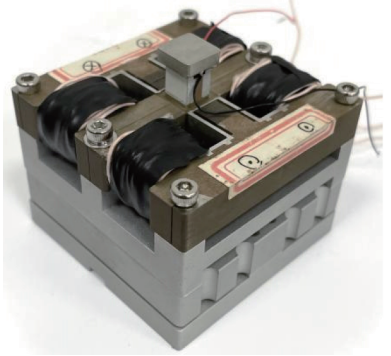
(a) Lu 等提出的纳米定位器<sup>[57]</sup>(a) Nanopositioner proposed by Lu et al. <sup>[57]</sup>(b) Zhu 等提出的纳米定位器<sup>[58]</sup>(b) Nanopositioner proposed by Zhu et al. <sup>[58]</sup>(c) Fang 等提出的纳米定位器<sup>[59]</sup>(c) Nanopositioner proposed by Fang et al. <sup>[59]</sup>(d) Wang 等提出的纳米定位器<sup>[60]</sup>(d) Nanopositioner proposed by Wang et al. <sup>[60]</sup>

图 14 法应力电磁致动纳米定位器

Fig. 14 Normal-stressed electromagnetic-actuated nanopositioners

高于 Y 轴,为最小化 X 轴的动质量,该定位器整体采用串联构型,并将 X 轴的柔顺机构嵌入法应力电磁致动器之中。最终,其 X 轴在实现 212.7  $\mu\text{m}$  定位行程的同时实现了高达 1 313.2 Hz 的谐振频率。以上工作表明,与具有类似定位行程或谐振频率的压电或音圈电机致动纳米定位器相比,法应力电磁致动纳米定位器在兼顾静、动态性能方面体现出了显著的优势。

由于永磁体提供的偏置磁通,法应力电磁致动器表现出负刚度特性,其电枢在磁场中的势能与其位移间存在耦合关系<sup>[61]</sup>。一旦电枢偏向某一侧,该侧气隙减小、磁阻降低,导致磁通密度增大,从而进一步吸引电枢向该方向偏移,使势能降低。这种负刚度特性,即电枢偏离中心平衡位置后会产生进一步偏离趋势的特性,与柔顺机构的正刚度特性(其恢复力始终指向中心位置)恰好相反。法应力电磁致动纳米定位器的总刚度由致动器的负刚度与柔顺机构的正刚度叠加而成,因而低于单纯柔顺机构的刚度。这一影响是不能忽略的。一些工作以柔顺机构的刚度作为纳米定位器整体刚度进行建模,而忽略了电磁致动器和机械系统间的耦合,造成了性能预测时对定位行程

的高估和对谐振频率的低估<sup>[62]</sup>。另外需注意,不同于压电致动和音圈电机致动的柔顺纳米定位器,法应力电磁致动柔顺纳米定位器不能使用刚度过低的柔顺机构。其柔顺机构的正刚度必须大于致动器的负刚度,以保证开环系统的稳定性。

Wang 等分析了负刚度特性的形成机理,并提出利用电磁线圈提供偏置磁通的刚度可调的电磁负刚度弹簧,与柔顺机构一同作为纳米定位器的传动部件。将电磁负刚度弹簧与法应力电磁致动器、柔顺机构相结合,形成了如图 15 所示的电磁致动可调刚度纳米定位器<sup>[63]</sup>。根据式(1)~(2),刚度的可调将使定位行程和谐振频率之间的平衡可以灵活调整,满足不同应用场景的需求。实验结果显示,随着电磁弹簧的输入电流从 0 增加至 1.5 A,其提供的负刚度从 0 提升到  $-0.311 \text{ N}/\mu\text{m}$ 。对应地,纳米定位器的定位行程从  $47.93 \mu\text{m}$  增长至  $155.32 \mu\text{m}$ ,谐振频率从 716 Hz 降低至 425 Hz。

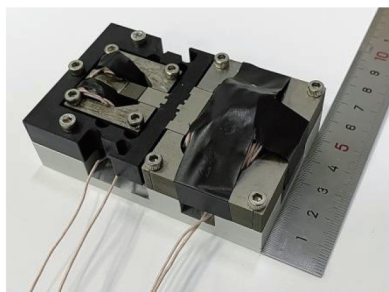


图 15 Wang 等提出的法应力电磁致动可调刚度柔顺纳米定位器<sup>[63]</sup>

Fig. 15 Normal-stressed electromagnetic actuated stiffness-tunable compliant nanopositioner, proposed by Wang et al. <sup>[63]</sup>

根据现有报道,当电枢的运动范围不超过气隙宽度的三分之一时,负刚度几乎是恒定的,不会影响法应力电磁致动器输入与输出间的线性关系<sup>[61, 64]</sup>。但 Ito 等发现,当电枢运动范围接近气隙极限时,法应力电磁致动器的负刚度不再保持恒定,其输入-输出特性呈现非线性<sup>[50]</sup>。电枢的位移越大,负刚度特性越显著,越能有效地抵消柔顺机构的刚度,使得在大位移条件下施加更小的电流增量即可产生较大范围运动,提高了能量的效率。但需注意,对这种非线性系统进行超精密运动控制将更具挑战性。Li 等为了解决这一问题提出利用刚度非线性的柔顺机构来补偿电枢在气隙中大范围运动时致动器所产生的非线性<sup>[65]</sup>。尽管致动器的非线性可以通过保持电枢的运动范围不超过气隙宽度的三分之一来避免,但该研究

仍具有重要意义。其价值在于,可以在在不增大气隙(气隙越大,磁路的漏磁也越大,能量效率越低)的前提下,同时满足大定位行程和输入电流与输出位移间线性关系的需求。

### 3.4 不同致动方式的柔顺纳米定位器性能对比

图 16 整理了文献中具有代表性的压电<sup>[32, 38, 66-72]</sup>、音圈电机<sup>[23, 33, 46, 48, 73-76]</sup>、法应力电磁<sup>[50, 57, 59-62, 77-78]</sup>致动柔顺纳米定位器的定位行程和谐振频率。通过这些数据可以观察到,各致动方式在不同的定位行程和谐振频率区间内展现出了优势。其中:压电致动方式在面向高谐振频率(数千赫兹以上)、小定位行程(数十微米及以下)纳米定位器中具有优势。音圈电机致动更适合作为大行程(毫米级以上)、低谐振频率(几十赫兹及以下)纳米定位器的致动元件。在不需要单项极端性能指标的纳米定位器中,法应力电磁致动技术在数十赫兹到数千赫兹谐振频率和数十微米到数毫米的定位行程的区间内展现出了综合性能的优势。这些数据和讨论为未来设计面向不同定位行程和谐振频率的纳米定位器从选择合适的致动元件方面提供了参考。需要说明的是,在此对“大行程”和“高谐频”的界定并非绝对的,而是对基于多种致动方式的柔顺纳米定位器的研究文献进行概括时所采用的相对标准。在对某种特定致动方式进行单独讨论时,由于优势区间的不同,这一界定标准可能也会发生变化。例如:在压电致动纳米定位器中,实现百微米级别的行程已经属于“大行程”;而对于音圈致动方式而言,百赫兹的谐振频率已属于“高谐频”。

观察上述不同致动方式的柔顺纳米定位器研究可以发现,相关技术路线并非简单并行发展,而是根据应用需求,且在行程与谐频间的矛盾和结构刚度约束下的不断演化。不同致动方式的优势区间十分明确,尽管通过设计特殊的柔顺机构可对其短板进行弥补(如为压电致动纳米定位器设计柔顺放大机构),但若想获得数量级的显著效果,其在原有优势指标上的损失将由于其刚度和动质量的显著变化而更为巨大。因此,选择恰当的致动方式,或发展新的、更具优势的致动方式,对研制大行程、高谐频纳米定位器具有重要意义。

除本节着重介绍的宏观体系下的柔顺纳米定位技术外,也有学者在微机电系统(microelectromechanical system, MEMS)技术框架下通过电磁致动<sup>[79]</sup>、静电致动<sup>[80]</sup>、电热致动<sup>[81]</sup>等致动方式开发 MEMS 纳米定位器。这些研究

基于片上柔顺机构与微型致动单元也实现了优异的纳米定位性能,且同样面临行程与谐振频率之间的矛盾。但其在制造工艺、结构尺度等方面与

本文关注的目标存在显著差异,本文并未对其展开讨论,感兴趣的读者可以参考 MEMS 纳米定位相关的综述论文<sup>[82-84]</sup>。

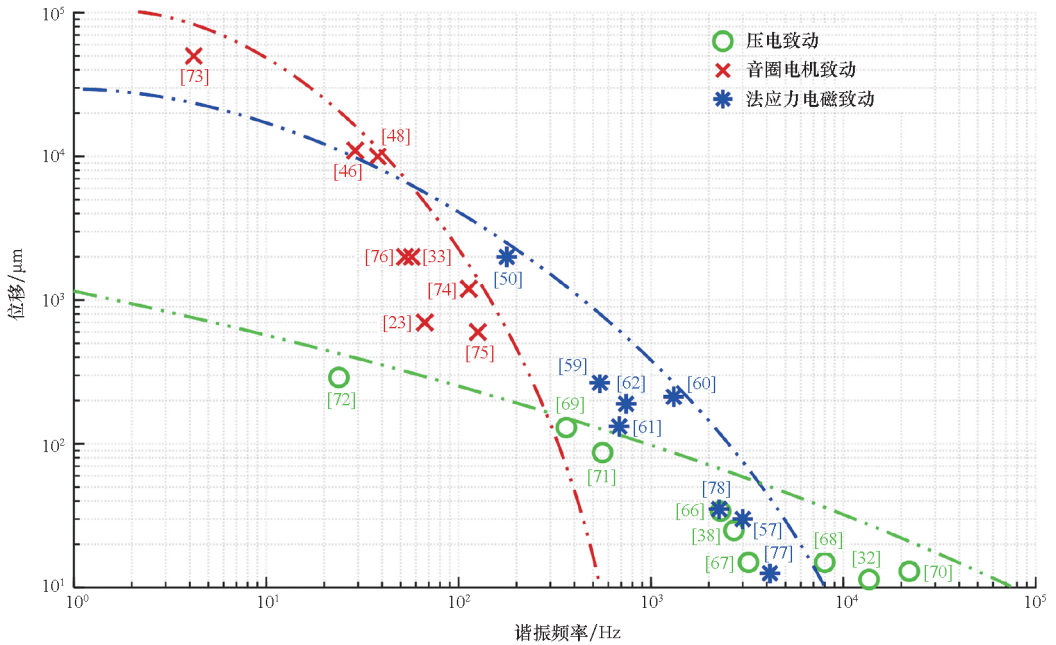


图 16 基于不同致动方式的柔顺纳米定位器的定位行程与谐振频率对比

Fig. 16 Comparison of positioning range and resonant frequency of compliant nanopositioners based on different actuation principles

## 4 运动控制的问题与方法

高性能柔顺纳米定位器为执行纳米定位任务提供了良好的硬件基础,但要保证纳米定位的精度与速度,还必须对纳米定位器输出的运动进行有效的控制。目前,国内外学者在纳米定位器超精密运动控制方法方面做了大量的研究工作,并撰写了多篇综述论文<sup>[85-89]</sup>。先进控制方法为将纳米定位器的性能充分发挥提供了重要保障,但由于具体的控制方法不是本文论述的重点,本节仅对纳米定位器所面临的控制问题和若干代表性的控制策略进行介绍。

纳米定位主要面临三方面的控制问题:迟滞非线性、低阻尼谐振模态、交叉耦合。由于纳米定位器的材料特性及结构特性,迟滞非线性及低阻尼谐振模态成为其高速高精度运动的主要障碍。另外,对于多自由度纳米定位器,寄生运动导致的轴间交叉耦合现象亦会引入显著的定位误差。

迟滞非线性是压电材料与铁磁材料的固有属性,取决于压电、铁磁材料的晶粒大小、方向排布、热处理方式等因素<sup>[90]</sup>。其如图 17 所示的具有幅值相关性及率相关性的迟滞环将严重制约定位精

度,且对压电和法应力电磁致动的系统影响尤为显著<sup>[91]</sup>。从算法的角度来讲,针对迟滞非线性的控制主要分为两类:基于迟滞逆模型的前馈补偿和无须逆模型的反馈控制。前馈补偿方法建立精准描述系统迟滞非线性的数学模型,并在前馈控制路径上使用其数值逆模型进行迟滞补偿。其中,常用的数学模型包括 Prandtl-Ishlinskii 模型<sup>[92]</sup>、Bouc-Wen 模型<sup>[93]</sup>、Jiles-Atherton 模型<sup>[94]</sup>、Duhem 模型<sup>[95]</sup>等。近年来,随着机器学习的普及,越来越多的研究人员也应用机器学习型方法建立迟滞模型,常见的方法有神经网络法<sup>[96]</sup>、模糊系统法<sup>[97]</sup>、高斯过程法<sup>[91]</sup>等。前馈控制方法的优势在于:建模完成后,无须再在工作情况下使用传感器实时采集系统的输出位移信号,即可实现对迟滞非线性的补偿,这为难以集成额外传感器的系统的控制带来了便利<sup>[98]</sup>。但是,迟滞模型的复杂性,难以求出其解析逆模型,因此研究者们通常使用其数值逆模型来近似,这导致了逆模型的不唯一性<sup>[91]</sup>。反馈控制方法无须对迟滞非线性进行建模或求解逆模型,而是将迟滞影响视为一种扰动进行抑制。常用的反馈控制方法包括 PID 控制<sup>[16]</sup>、 $H_\infty$  控制<sup>[99]</sup>、滑模控制<sup>[100]</sup>等。值得注意的是,纳米定位器的低阻尼谐振模态导致了

低增益裕量,限制了反馈控制器的增益,进而影响对迟滞非线性的抑制效果。因此,基于反馈的控制方法通常与谐振控制方法同时使用。除从控制算法层面补偿或抑制迟滞非线性外,也有学者从硬件层面提出迟滞非线性的解决方案。例如:面向压电致动纳米定位器,有学者提出对电气系统进行改造,从而使用电荷控制方法取代传统的电压控制方法解决迟滞非线性问题<sup>[101]</sup>;面向法应力电磁致动纳米定位器,有学者提出利用铁基非晶合金带材等制作成层叠的导磁材料,取代传统的块状导磁材料,使纳米定位器仅表现出极弱的迟滞非线性<sup>[63]</sup>。

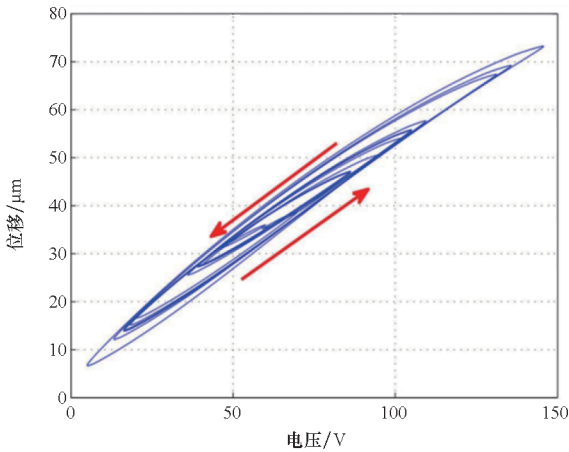
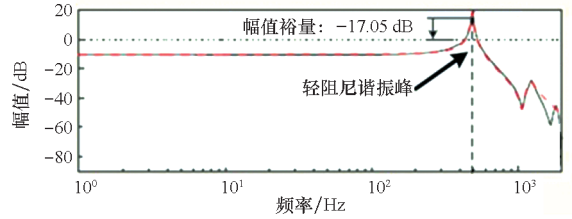


图 17 迟滞环<sup>[85]</sup>

Fig. 17 Hysteresis loop<sup>[85]</sup>

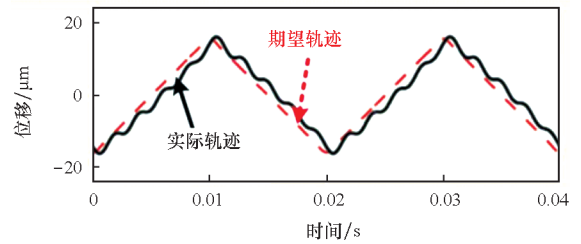
纳米定位器使用柔顺机构进行传动,因此具有无摩擦、无间隙的特性,为其实现纳米级定位精度提供了可能。但是,这同时导致了其系统具有低阻尼特性,使得幅频响应中具有如图 18 所示的尖锐的谐振峰。无论是否使用柔顺放大机构,这一低阻尼谐振模式普遍存在于各种致动方式的纳米定位器之中。该谐振模式会在跟踪含有高频成分的轨迹时受到激发,引起机械系统振动,导致显著的定位误差。为抑制低阻尼谐振模式导致的振动的影响,学者提出的前馈控制器包括陷波滤波器<sup>[102]</sup>、零相位误差跟踪控制器<sup>[103]</sup>、零幅值误差跟踪控制器<sup>[104]</sup>等。但是,前馈方法对系统参数敏感,若环境、负载等因素引起了系统参数的变化,控制效果将急剧下降。因此,学者也发展了基于反馈控制的主动谐振控制器,例如力积分反馈控制器<sup>[105]</sup>、正速度 - 位置反馈控制器<sup>[106]</sup>、正加速度 - 速度 - 位置反馈控制器<sup>[22]</sup>等。除避免机械振动外,抑制低阻尼谐振模式的另一个益处是增加系统的幅值裕量,这使得研究者可以进一步使用具有高增益的反馈控制器来消除迟滞等带来

的定位误差,实现接近甚至超过系统一阶谐振频率的闭环带宽<sup>[107]</sup>。另外,从硬件层面上,也可通过设计涡流阻尼器的方式有效抑制低阻尼谐振模式,包括通过永磁体与非磁性导电板间相互运动产生涡流的被动涡流阻尼器<sup>[108]</sup>、通过电磁铁和导电板间相互运动产生涡流的主动涡流阻尼器<sup>[7]</sup>等。



(a) 幅频响应曲线

(a) Amplitude-responses curve



(b) 位移曲线

(b) Displacement curve

图 18 轻阻尼谐振模式及振动<sup>[85]</sup>

Fig. 18 Lightly damped resonance and vibration<sup>[85]</sup>

如 2.6 节所述,对于多自由度纳米定位器,各运动轴之间会因寄生运动导致交叉耦合。减少交叉耦合最基本的思路是设计解耦的柔顺机构,但即使设计了完全解耦的机构,加工误差、装配误差的存在也使得交叉耦合无法被完全避免。交叉耦合在追踪高频信号时引起的定位误差尤其显著,限制了多自由度纳米定位器在高速需求下的应用<sup>[109]</sup>。因此,随着诸多领域对多自由度纳米定位器的需求的增加,必须考虑从控制角度对交叉耦合进行抑制。交叉耦合的抑制方法主要分为基于耦合模型的控制和无须耦合模型的控制。在基于耦合模型的控制方法中,秦岩丁对二自由度纳米定位器的交叉耦合项进行了传递函数模型辨识,并通过基于逆模型的前馈控制方法实现了耦合的抑制<sup>[110]</sup>。Li 等建立了 Prandtl-Ishlinskii 模型以描述多轴间交叉耦合关系,并用于逆前馈补偿<sup>[111]</sup>。在无须耦合模型的控制方法中,通常将交叉耦合视为某一轴的输出端干扰,并以扰动抑制的方式实现对交叉耦合的抑制,例如 Yong 等通过在单轴控制器的设计过程中选取与交叉耦合频率响应接近的权函数,降低

了栅格扫描中X轴对Y轴的耦合影响<sup>[109]</sup>。

以上控制器可以使特定的控制问题得到解决,它们相对独立地处理各自的控制问题,也通常被组合使用,形成多自由度控制器<sup>[112]</sup>。但需要注意的是,由于控制器的复杂性及需解决的控制问题繁多,在实际应用中,多自由度控制方案往往也只能将控制问题部分地解决。考虑到很多纳米定位任务中,目标运动轨迹可以是提前预知的,因此诸多学者提出了将参考轨迹信息引入控制器设计的学习型控制方法。例如,通过引入内模,在目标轨迹的基频和倍频处提供超高增益,进而高效抑制周期性跟踪误差的重复控制方法<sup>[113]</sup>;通过反复应用先前试验所得信息,重复修正控制输入,进而减少轨迹跟踪误差的迭代学习控制方法<sup>[114]</sup>;通过结合系统逆模型与迭代修正机制,逐次利用历史误差信息优化控制输入,进而实现高精度轨迹跟踪的基于系统逆的迭代控制方法<sup>[115]</sup>等。针对具有重复性的运动轨迹,学习型控制方法往往能获得比多自由度控制方法更高的精度,并实现无相位滞后的跟踪,但是它们难以有效应对具有随机性的定位误差。多自由度控制器则可以对频率成分在其闭环带宽内的任意轨迹进行高精度的跟踪。

## 5 总结与展望

本文对大行程、高谐频柔顺纳米定位技术进行了介绍和讨论,描述了柔顺纳米定位系统的构成和各项关键性能指标,重点讨论了研究人员为满足不同定位行程和谐振频率需求而基于压电、音圈电机、法应力电磁致动方式研发的柔顺纳米定位器,最后介绍了纳米定位技术中的几点控制问题及相应的控制方法。

定位行程和谐振频率这两项关键的性能指标分别表征纳米定位器静、动态性能,但受到刚度的制约,二者相互冲突。基于压电、音圈电机、法应力电磁致动方式发展的纳米定位器,分别在面向超高谐振频率、超大行程、折中区间具有综合性能的优势。高性能的柔顺纳米定位器为执行纳米定位任务提供了优良的硬件基础,但其定位精度还受到迟滞非线性、低阻尼谐振模态、交叉耦合等控制问题的影响,需要利用先进控制方法来解决。目前,柔顺纳米定位技术已得到了大量的研究,并已在诸多高端设备之中得到应用。而未来科学研究和工业生产等方面对纳米定位的需求还将更加广泛,提出的性能要求也将越来越高,这使得纳米定位技术的发展面临以下的机遇和挑战:

1) 创新致动原理。目前纳米定位器常用的压电、音圈电机、法应力电磁致动原理已在面向不同定位行程、谐振频率的需求时体现出了各自的优势,且在其优势范围内,基于其他致动原理的纳米定位器难以通过其他途径(如柔顺机构优化设计)来获得与之相媲美的综合性能。因此,选定恰当的致动原理是设计高性能纳米定位器首先需要考虑的问题。而现在应用在柔顺纳米定位器中的致动原理并不多,即使是近年来受到学界关注的法应力电磁致动器也尚无成熟的商用产品。因此,探索新致动原理并将其应用于纳米定位系统,找到其独特的优势区间,将拓展纳米定位系统的性能边界。

2) 新颖传动机构。作为传动部件,柔顺机构在纳米定位器的性能中也占有主导地位。目前,针对纳米定位器的机械设计工作也多是围绕柔顺机构的设计开展。随着材料、制造技术的进步,除对柔顺机构的构型进行创新设计以外,基于金属以外的新材料、线切割以外的新制造方式的新型柔顺机构也同样值得被探索。另外,除柔顺机构以外,基于如电磁、气浮、液压等其他原理的传动机构也可被独立应用或结合柔顺机构一起应用于纳米定位器设计之中,以获得新颖的功能特性。

3) 系统集成优化。尽管在柔顺机构设计和先进控制算法方面均已取得显著进展,但文献中仍观察到实验性能受限于模型不完备、参数不匹配以及多物理量耦合效应等问题。纳米定位系统以放大电路的输入电流作为输入,又通过致动器将电能转换为机械能,再经过柔顺机构传动实现位移输出,具有诸多环节,涉及的物理量众多且相互耦合。仅从柔顺机构层面开展建模优化将忽略这些物理量间的耦合关系,所实现的性能与其理论的最佳性能仍有差距。建立综合考虑放大电路的电气特性、致动器的能量转换特性、柔顺机构的机械响应特性的耦合动力学模型,并开展参数的集成优化设计和样机—控制器一体化参数设计,这将有助于纳米定位系统实现最佳的动力学性能匹配。

4) 先进控制方法。现有的学习型控制方法可以通过重复、迭代的方式不断降低对目标轨迹的跟踪误差,实现几乎“完美”的控制效果,但这只能针对特定的、有重复特征的运动轨迹。而针对随机的、实时生成的轨迹,还需多自由度高带宽控制方法进行控制。理想条件下,对纳米定位系统进行动力学模型辨识并针对性设计前馈控制器,再对扰动进行观测和抑制,即可实现对任意轨

迹的高精度跟踪。但由于对系统特性的辨识精度的不足和对逆模型进行求解的复杂性,多自由度控制方法的应用效果往往不尽如人意。而人工智能技术的发展和计算能力的提升为解决这些问题提供了新的机遇。未来,结合机器学习方法发展高精度的多自由度控制器,将是面向任意轨迹的超精密运动控制的重要发展趋势。

## 参考文献 (References)

- [1] TAN L W, WANG X Y, YU Q, et al. An electromagnetic-piezoelectric hybrid actuated nanopositioner for atomic force microscopy [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2024, 73: 7503813.
- [2] YANG X, ZHU W L. Design, analysis, and test of a novel self-sensing fast tool servo [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2020, 16(7): 4447–4455.
- [3] WEI Y Z, XU Q S. A survey of force-assisted robotic cell microinjection technologies [J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2019, 16(2): 931–945.
- [4] 管寅昕, 杨吉祥, 丁汉. 考虑控制电信号中间量的机床运动控制误差数据驱动建模方法 [J]. *机械工程学报*, 2022, 58(23): 178–187.  
GUAN Y X, YANG J X, DING H. Data-driven machine tools motion control error modeling method using control signal as intermediate value [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2022, 58(23): 178–187. (in Chinese)
- [5] YONG Y K, MOHEIMANI S O R, KENTON B J, et al. Invited review article: high-speed flexure-guided nanopositioning: mechanical design and control issues [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2012, 83(12): 121101.
- [6] SCHITTER G, THURNER P J, HANSMA P K. Design and input-shaping control of a novel scanner for high-speed atomic force microscopy [J]. *Mechatronics*, 2008, 18(5/6): 282–288.
- [7] SANG N, ZHANG C, CHEN S L, et al. A novel nanopositioning stage integrated with voice coil motor and active eddy current damper [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2024, 29(6): 4411–4422.
- [8] LING M X, HOWELL L L, CAO J Y, et al. Kinetostatic and dynamic modeling of flexure-based compliant mechanisms: a survey [J]. *Applied Mechanics Reviews*, 2020, 72(3): 030802.
- [9] GAO Y Z, ALBRECHT F, RONČEVIĆ I, et al. On-surface synthesis of a doubly anti-aromatic carbon allotrope [J]. *Nature*, 2023, 623: 977–981.
- [10] LYU Z K, XU Q S, ZHU L M. Design of a compliant vertical micropositioning stage based on lamina emergent mechanisms [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2023, 28(4): 2131–2141.
- [11] HEATH G R, KOTS E, ROBERTSON J L, et al. Localization atomic force microscopy [J]. *Nature*, 2021, 594(7863): 385–390.
- [12] ADAMS J D, FREDERIX P L T M, BIPPES C A. Breakthrough instruments and products: driveAFM for high-performance atomic force microscopy [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2021, 92(12): 129503.
- [13] NIU Y H, ZHU Z H, ZHU L M, et al. Multiobjective topology optimization for a piezo-actuated fast tool servo [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2025, 72(5): 4612–4622.
- [14] LYU Z K, XU Q S. Design of a new XY compliant parallel manipulator based on deployable spatial monolithic structure [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2024, 29(5): 3762–3773.
- [15] LI J X, ZHANG S J, DENG J, et al. Development of a stepping piezoelectric actuator for an autofocus microscopic observation system [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2024, 71(6): 6107–6116.
- [16] BABARINDE A K, LI L L, ZHU L M, et al. Experimental validation of the simultaneous damping and tracking controller design strategy for high-bandwidth nanopositioning: a PAVPF approach [J]. *IET Control Theory & Applications*, 2020, 14(20): 3506–3514.
- [17] ZHANG T, ZHU W T, BIAN D L, et al. A high-bandwidth compact micro/nano-positioning stage based on a double parallelogram compliant mechanism [J]. *Smart Materials and Structures*, 2025, 34(6): 065015.
- [18] 董有驿, 蒋旭, 曾创佳, 等. 压电驱动纳米定位平台跟踪误差估计前馈补偿控制 [J]. *压电与声光*, 2025, 47(3): 561–566.  
DONG Y Y, JIANG X, ZENG C J, et al. Feedforward compensation control for tracking-error estimation of the piezoelectric-driven nanopositioning stage [J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2025, 47(3): 561–566. (in Chinese)
- [19] QIN Y D, SHIRINZADEH B, TIAN Y L, et al. Design and computational optimization of a decoupled 2-DOF monolithic mechanism [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2014, 19(3): 872–881.
- [20] DU X T, SHEN D R, HUANG P, et al. Dual-stage fast tool servo cascading a primary normal-stressed electromagnetic stage with a secondary piezo-actuated stage [J]. *Precision Engineering*, 2023, 80: 171–179.
- [21] SHIMIZU M, OKAMOTO C, UMEDA K, et al. An ultrafast piezoelectric Z-scanner with a resonance frequency above 1.1 MHz for high-speed atomic force microscopy [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2022, 93: 013701.
- [22] LI L L, LI C X, GU G Y, et al. Positive acceleration, velocity and position feedback based damping control approach for piezo-actuated nanopositioning stages [J]. *Mechatronics*, 2017, 47: 97–104.
- [23] ITO S, POIK M, SCHLARP J, et al. Atomic force microscopy breaking through the vertical range-bandwidth tradeoff [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021, 68(1): 786–795.
- [24] BIAN K, GERBER C, HEINRICH A J, et al. Scanning probe microscopy [J]. *Nature Reviews Methods Primers*, 2021, 1: 36.
- [25] ZHU Z W, DU H H, ZHOU R J, et al. Design and trajectory tracking of a nanometric ultra-fast tool servo [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020, 67(1): 432–441.
- [26] ZHU Z W, ZHOU X Q, LIU Z W, et al. Development of a piezoelectrically actuated two-degree-of-freedom fast tool servo with decoupled motions for micro-/nanomachining [J]. *Precision Engineering*, 2014, 38(4): 809–820.
- [27] CHEN Y L, LI Z W, CHEN F W, et al. Development of an

- optimized three-axis fast tool servo for ultraprecision cutting[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2022, 27(5): 3244–3254.
- [28] CSENCISCS 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.
- [29] LYU Z K, XU Q S. Design of a new bio-inspired dual-axis compliant micromanipulator with millimeter strokes[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2023, 39(1): 470–484.
- [30] WANG H, ZHANG X M. Input coupling analysis and optimal design of a 3-DOF compliant micro-positioning stage [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2008, 43(4): 400–410.
- [31] WU T L, CHEN J H, CHANG S H. A six-DOF prismatic-spherical-spherical parallel compliant nanopositioner [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2008, 55(12): 2544–2551.
- [32] LI C X, GU G Y, YANG M J, et al. Design, analysis and testing of a parallel-kinematic high-bandwidth XY nanopositioning stage[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2013, 84(12): 125111.
- [33] LIU Y J, ZHANG Z. A large range compliant XY nanomanipulator with active parasitic rotation rejection [J]. *Precision Engineering*, 2021, 72: 640–652.
- [34] 谷国迎. 压电陶瓷驱动微位移平台的磁滞补偿控制理论和方法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.  
GU G Y. Control of piezoceramic actuated micro/nanopositioning stages with hysteresis compensation [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012. (in Chinese)
- [35] 李春霞. 压电驱动二维纳米定位平台的高速栅格扫描运动控制方法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.  
LI C X. Motion control of piezo-actuated XY nanopositioning stages for high-speed raster scanning [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2017. (in Chinese)
- [36] KENTON B J, LEANG K K. Design and control of a three-axis serial-kinematic high-bandwidth nanopositioner [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2012, 17(2): 356–369.
- [37] CHEN F X, ZHANG Q J, GAO Y Z, et al. A review on the flexure-based displacement amplification mechanisms [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 205919–205937.
- [38] YONG Y K, APHALE S S, MOHEIMANI S O R. Design, identification, and control of a flexure-based XY stage for fast nanoscale positioning [J]. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 2009, 8(1): 46–54.
- [39] ZHOU R J, ZHU Z H, KONG L B, et al. Development of a high-performance force sensing fast tool servo [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2022, 18(1): 35–45.
- [40] WANG F J, HUO Z C, LIANG C M, et al. A novel actuator-internal micro/nano positioning stage with an arch-shape bridge-type amplifier [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 66(12): 9161–9172.
- [41] KIM J J, CHOI Y M, AHN D, et al. A millimeter-range flexure-based nano-positioning stage using a self-guided displacement amplification mechanism [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2012, 50: 109–120.
- [42] LING M X, CAO J Y, HOWELL L L, et al. Kinetostatic modeling of complex compliant mechanisms with serial-parallel substructures: a semi-analytical matrix displacement method[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2018, 125: 169–184.
- [43] LING M X, ZHANG X M. Coupled dynamic modeling of piezo-actuated compliant mechanisms subjected to external loads [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2021, 160: 104283.
- [44] 黄晓路. 基于音圈电机的精密运动平台设计与控制研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2022.  
HUANG X L. Research on design and control of precision motion stage based on voice coil actuator [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2022. (in Chinese)
- [45] HIEMSTRA D B, PARMAR G, AWTAR S. Performance tradeoffs posed by moving magnet actuators in flexure-based nanopositioning [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2014, 19(1): 201–212.
- [46] XU Q S. Design and development of a compact flexure-based XY precision positioning system with centimeter range [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, 61(2): 893–903.
- [47] ROY N K, CULLINAN M A. Design and characterization of a two-axis, flexure-based nanopositioning stage with 50 mm travel and reduced higher order modes [J]. *Precision Engineering*, 2018, 53: 236–247.
- [48] YANG M, ZHANG C, HUANG X L, et al. A long-stroke nanopositioning stage with annular flexure guides[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2022, 27(3): 1570–1581.
- [49] LEE C, TARBUTTON J A. Compliance and control characteristics of an additive manufactured-flexure stage[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2015, 86(4): 045107.
- [50] ITO S, TROPPEMIR 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.
- [51] CHEN Y Z, LAI L J. Design, modeling, testing, and control of a novel fully flexure-based displacement reduction mechanism driven by voice coil motor[J]. *Actuators*, 2022, 11(8): 228.
- [52] 卜文绍, 曹磊, 董双元. 图解分析法讲解无轴承电机磁悬浮控制原理[J]. *电气电子教学学报*, 2010, 32(1): 107–110.  
BU W S, CAO L, DONG S Y. Introducing the magnetic suspension control principle of bearingless motor by analysis and illustration [J]. *Journal of Electrical & Electronic Education*, 2010, 32(1): 107–110. (in Chinese)
- [53] XIAO S L, LI Y M. Optimal design, fabrication, and control of an XY micropositioning stage driven by electromagnetic actuators[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, 60(10): 4613–4626.
- [54] GUTIERREZ H M, RO P I. Sliding-mode control of a nonlinear-input system; application to a magnetically levitated fast-tool servo [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1998, 45(6): 921–927.
- [55] STUDER P. A practical magnetic bearing [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1977, 13(5): 1155–1157.
- [56] LU X D. Electromagnetically-driven ultra-fast tool servos for diamond turning[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2005.

- [57] LU X D, TRUMPER D L. Ultrafast tool servos for diamond turning[J]. *CIRP Annals*, 2005, 54(1): 383–388.
- [58] ZHU Z H, CHEN L, NIU Y H, et al. Triaxial fast tool servo using hybrid electromagnetic-piezoelectric actuation for diamond turning [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2022, 69(2): 1728–1738.
- [59] FANG Y N, PU X N, TO S, et al. Normal-stressed electromagnetic triaxial fast tool servo for microcutting [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2023, 70(7): 7131–7140.
- [60] WANG X Y, YU B C, TAN L W, et al. Serial-kinematic hybrid electromagnetic-piezoelectric AFM scanner for high-throughput raster scanning [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2025, 72(1): 1003–1013.
- [61] WANG X Y, MENG Y X, HUANG W W, et al. Design, modeling, and test of a normal-stressed electromagnetic actuated compliant nano-positioning stage [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2023, 185: 109753.
- [62] CHEN L, NIU Y H, YANG X, et al. A novel compliant nanopositioning stage driven by a normal-stressed electromagnetic actuator [J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2022, 19(4): 3039–3048.
- [63] WANG X Y, LI L L, MENG Y X, et al. A normal-stressed electromagnetic-driven stiffness-tunable nanopositioner [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2024, 71(11): 15130–15139.
- [64] YU B C, WANG X Y, TAN L W, et al. Electromagnetic-mechanical modeling and evaluation of a 2-DoF parallel-kinematic compliant nano-positioning stage based on normal-stressed electromagnetic actuators[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2025, 22: 841–854.
- [65] LI X X, LIU Y J, GE L, et al. A large-stroke reluctance-actuated nanopositioner: compliant compensator for enhanced linearity and precision motion control [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2024, 29(4): 2947–2955.
- [66] WATANABE S, ANDO T. High-speed XYZ-nanopositioner for scanning ion conductance microscopy[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 111(11): 113106.
- [67] ZHU Z W, CHEN L, HUANG P, et al. Design and control of a piezoelectrically actuated fast tool servo for diamond turning of microstructured surfaces [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020, 67(8): 6688–6697.
- [68] POLIT S, DONG J Y. Development of a high-bandwidth XY nanopositioning stage for high-rate micro-/nanomanufacturing[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2011, 16(4): 724–733.
- [69] TIAN Y L, MA Y, WANG F J, 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: 111777.
- [70] SCHITTER G, ASTROM K J, DEMARTINI B E, et al. Design and modeling of a high-speed AFM-scanner[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2007, 15(5): 906–915.
- [71] YAO Q, DONG J, FERREIRA P M. Design, analysis, fabrication and testing of a parallel-kinematic micropositioning XY stage [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2007, 47(6): 946–961.
- [72] LI Y M, XU Q S. Modeling and performance evaluation of a flexure-based XY parallel micromanipulator [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2009, 44(12): 2127–2152.
- [73] ROY N K, CULLINAN M A. Fast trajectory tracking of a flexure-based, multi-axis nanopositioner with 50-mm travel[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2018, 23(6): 2805–2813.
- [74] WANG T W, LI Y Z, ZHANG Y X, et al. Design of a flexure-based parallel XY micropositioning stage with millimeter workspace and high bandwidth [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2021, 331: 112899.
- [75] LIN R, LI Y Z, ZHANG Y X, et al. Design of a flexure-based mixed-kinematic XY high-precision positioning platform with large range[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2019, 142: 103609.
- [76] LEE C, STEPANICK C K, LEE S K, et al. Cross-coupling effect of large range XY nanopositioning stage fabricated by stereolithography process [J]. *Precision Engineering*, 2016, 46: 81–87.
- [77] WANG X Y, LI L L, HUANG W W, et al. Design and control of a normal-stressed electromagnetic actuated nanopositioning stage [C]//*Proceedings of International Conference on Intelligent Robotics and Applications*, 2021: 324–334.
- [78] HUANG W W, LI L L, ZHU Z W, et al. Modeling, design and control of normal-stressed electromagnetic actuated fast tool servos[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2022, 178: 109304.
- [79] YANG M, NIE W R, CHENG B L, et al. Study of micro-electromagnetic actuator applied to MEMS safety and arming device[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2025, 72(12): 7004–7013.
- [80] SHI K H, NIKOOIENEJAD N, PETERSEN I R, et al. Negative imaginary control using hybrid integrator-gain systems: application to MEMS nanopositioner [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2024, 32(3): 718–730.
- [81] PIMPIN A, SRITURAVANICH W, PHANOMCHOENG G, et al. Position feedback-control of an electrothermal microactuator using resistivity self-sensing technique [J]. *Sensors*, 2024, 24(11): 3328.
- [82] MAROUFI M, FOWLER A G, MOHEIMANI S O R. MEMS for nanopositioning: design and applications[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2017, 26(3): 469–500.
- [83] IQBAL S, MALIK A. A review on MEMS based micro displacement amplification mechanisms [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2019, 300: 111666.
- [84] QU J T, LIU X Y. MEMS-based platforms for multi-physical characterization of nanomaterials: a review[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(3): 1827–1841.
- [85] GU G Y, ZHU L M, SU C Y, et al. Modeling and control of piezo-actuated nanopositioning stages: a survey [J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2016, 13(1): 313–332.
- [86] CLAYTON G M, TIEN S, LEANG K K, et al. A review of feedforward control approaches in nanopositioning for high-speed SPM[J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2009, 131(6): 061101.
- [87] DEVASIA S, ELEFATHERIOU E, MOHEIMANI S O R. A survey of control issues in nanopositioning [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2007, 15(5):

- 802–823.
- [88] HUANG W W, WANG X Y, MENG Y X, et al. Design, modeling and control of high-bandwidth nano-positioning stages for ultra-precise measurement and manufacturing: a survey[J]. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2024, 6(6): 062007.
- [89] 崔玉国, 孙宝元, 董维杰, 等. 基于纳米定位的压电陶瓷执行器控制方法的研究进展[J]. *中国机械工程*, 2003, 14(2): 164–168.
- CUI Y G, SUN B Y, DONG W J, et al. Review of research on control methods of piezoceramic micropositioner in nano-positioning process [J]. *China Mechanical Engineering*, 2003, 14(2): 164–168. (in Chinese)
- [90] JILES D C, KIARIE W. An integrated model of magnetic hysteresis, the magnetomechanical effect, and the Barkhausen effect[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2021, 57(2): 1–11.
- [91] TAO Y D, LI H X, ZHU L M. Rate-dependent hysteresis modeling and compensation of piezoelectric actuators using Gaussian process [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2019, 295: 357–365.
- [92] SHAN Y F, LEANG K K. Accounting for hysteresis in repetitive control design: nanopositioning example [J]. *Automatica*, 2012, 48(8): 1751–1758.
- [93] LI W, CHEN X D, LI Z L. Inverse compensation for hysteresis in piezoelectric actuator using an asymmetric rate-dependent model [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2013, 84(11): 115003.
- [94] JILES D C, ATHERTON D L. Theory of ferromagnetic hysteresis[J]. *Journal of Applied Physics*, 1984, 55(6): 2115–2120.
- [95] LIN C J, LIN P T. Tracking control of a biaxial piezo-actuated positioning stage using generalized Duhem model[J]. *Computers & Mathematics with Applications*, 2012, 64(5): 766–787.
- [96] LIN J F, QI C K, LIU X, et al. Development of a neural network-based compensatory enhanced-Hammerstein modeling strategy for piezoelectric system with hysteresis [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2025, 74: 9506712.
- [97] LI P Z, YAN F, GE C, et al. A simple fuzzy system for modelling of both rate-independent and rate-dependent hysteresis in piezoelectric actuators[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2013, 36(1): 182–192.
- [98] RAKOTONDRABE M, CLEVY C, LUTZ P. Complete open loop control of hysteretic, creeped, and oscillating piezoelectric cantilevers [J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2010, 7(3): 440–450.
- [99] LEE C, SALAPAKA S M. Robust broadband nanopositioning: fundamental trade-offs, analysis, and design in a two-degree-of-freedom control framework [J]. *Nanotechnology*, 2009, 20(3): 035501.
- [100] XU Q S. Continuous integral terminal third-order sliding mode motion control for piezoelectric nanopositioning system[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2017, 22(4): 1828–1838.
- [101] YANG C, XIA F Z, WANG Y, et al. Comprehensive study of charge-based motion control for piezoelectric nanopositioners: modeling, instrumentation and controller design [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2022, 166: 108477.
- [102] GU G Y, ZHU L M. Motion control of piezoceramic actuators with creep, hysteresis and vibration compensation[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2013, 197: 76–87.
- [103] TOMIZUKA M. Zero phase error tracking algorithm for digital control [J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 1987, 109(1): 65–68.
- [104] BUTTERWORTH J A, PAO L Y, ABRAMOVITCH D Y. A comparison of control architectures for atomic force microscopes[J]. *Asian Journal of Control*, 2009, 11(2): 175–181.
- [105] FLEMING A J. Nanopositioning system with force feedback for high-performance tracking and vibration control [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2010, 15(3): 433–447.
- [106] BHIKKAJI B, RATNAM M, MOHEIMANI S O R. PVDF control of piezoelectric tube scanners [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2007, 135(2): 700–712.
- [107] TAO Y D, LI L L, LI H X, et al. High-bandwidth tracking control of piezoactuated nanopositioning stages via active modal control[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2022, 19(4): 2998–3006.
- [108] ZHANG C, HUANG X L, YANG M, et al. Design of a long stroke nanopositioning stage with self-damping actuator and flexure guide [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2022, 69(10): 10417–10427.
- [109] YONG Y K, LIU K X, MOHEIMANI S O R. Reducing cross-coupling in a compliant XY nanopositioner for fast and accurate raster scanning[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2010, 18(5): 1172–1179.
- [110] 秦岩丁. 两自由度精密定位平台结构设计与运动控制[D]. 天津: 天津大学, 2011.
- QIN Y D. Structure design and motion control of a 2-DOF precision positioning platform [D]. Tianjin: Tianjin University, 2011. (in Chinese)
- [111] LI Z, SHAN J J. Modeling and inverse compensation for coupled hysteresis in piezo-actuated fabry-perot spectrometer[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2017, 22(4): 1903–1913.
- [112] HUANG W W, GUO P, HU C X, et al. High-performance control of fast tool servos with robust disturbance observer and modified  $H_\infty$  control [J]. *Mechatronics*, 2022, 84: 102781.
- [113] LI L L, CHEN Z Z, APHALE S S, et al. Fractional repetitive control of nanopositioning stages for high-speed scanning using low-pass FIR variable fractional delay filter[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2020, 25(2): 547–557.
- [114] XIE H, WEN Y B, SHEN X J, et al. High-speed AFM imaging of nanopositioning stages using  $H_\infty$  and iterative learning control [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020, 67(3): 2430–2439.
- [115] KIM K S, ZOU Q Z. 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.