

压电驱动技术研究进展与展望*

刘英想, 邓杰, 常庆兵, 张仕静, 陈维山

(哈尔滨工业大学机器人技术与系统国家重点实验室 哈尔滨, 150001)

摘要 压电驱动具有结构简单、构型多样、力密度高、精度高、响应快、断电自锁、无电磁干扰以及环境适应性好等突出优势,在超精加工、半导体制造、机器人、精密仪器、生命科学、航空航天和武器装备等领域均具有迫切的应用需求,已成为高端装备向高精尖发展的一项核心技术。压电驱动技术可为高端装备的突破和发展提供坚实的基础,具有重要的科学意义和实用价值。首先,从高端装备发展对精密驱动技术的实际需求出发,系统阐述了压电驱动技术的定义、分类及特点;其次,介绍了压电驱动技术的研究现状,并对压电驱动技术的典型应用进行了概述和分析;最后,对压电驱动技术进行了讨论与展望。

关键词 压电驱动技术;纳米级精密驱动;共振型压电驱动器;非共振型压电驱动器;超精密操控
中图分类号 TB552;O426.9

引言

精密驱动是高端装备领域的一项共性支撑技术,其行程、速度和精度等指标将直接决定装备的加工精度、机器人的操控精度、仪器的检测精度、航天器的飞行轨迹精度和武器系统的打击精度等。如超精加工运动平台、大规模集成电路加工、微机电系统器件封装及细胞精细操控等高端装备领域均对驱动系统的各项指标提出了极高的要求,需具备 nm 级精度、mm 级行程、多自由度输出、N 级输出力、mm/s 级速度以及灵活紧凑的结构等特性,部分指标已超出目前驱动系统所能达到的极限。因此,发展精密驱动技术成为高端装备寻求突破过程中最为基础和亟待攻克的问题之一。

传统的精密驱动主要通过电磁驱动方式实现,然而受到工作原理及结构制约,已不能满足上述高端装备领域对相关技术的发展要求。压电驱动利用压电材料的逆压电效应工作,易于实现 nm 级分辨力,通过灵活的结构和多样化的致动方式结合,可满足兼顾小体积和多自由度输出特性的技术要求。此外,压电驱动还具有出力大、响应速度快、电磁兼容性优异等特性,已被应用在各种具有纳米级定位能力的系统中,成为精密驱动技术的核心研究方向。

首先,对压电驱动技术进行概述,介绍压电驱动的定义和致动原理、压电驱动器的特点及分类;其

次,阐述目前压电驱动技术的研究现状;然后,结合笔者团队工作,介绍压电驱动技术在 9 个典型领域的应用现状;最后,对压电驱动技术进行讨论与展望。

1 压电驱动技术概述

1.1 压电驱动的定义和致动原理

压电驱动是一种利用压电材料逆压电效应将电能转换为机械能,从而实现运动输出的新型驱动技术。压电驱动的致动原理如图 1 所示。压电陶瓷元件在外部电场的作用下会产生微小的机械变形,这种机械变形可用于实现微小尺度范围内纳米精度位移的直接输出,称之为压电陶瓷直接变形致动,其原理如图 1(a)所示。此外,压电陶瓷元件和金属弹性体可以组成特定形状的弹性复合体,通过给压电陶瓷元件施加特定形式的信号可激励定子弹性体产生低频运动/高频振动,进而在定子弹性体驱动区域内,质点形成具有驱动作用的运动轨迹(直线、斜线、矩形、三角形及椭圆等),进一步通过定子和动子之间的摩擦耦合实现动子的宏观运动输出。这种基于摩擦耦合的致动原理可以通过微小步距重复累积的方式实现大行程输出,如图 1(b)所示,工作过程中存在两个能量转换过程:①通过逆压电效应将电能转换为定子微观运动的机械能;②通过摩擦耦合将

* 国家自然科学基金资助项目(52225501,5210051275)
收稿日期:2022-10-10;修回日期:2022-11-15

定子的微观运动转换为动子的宏观运动。

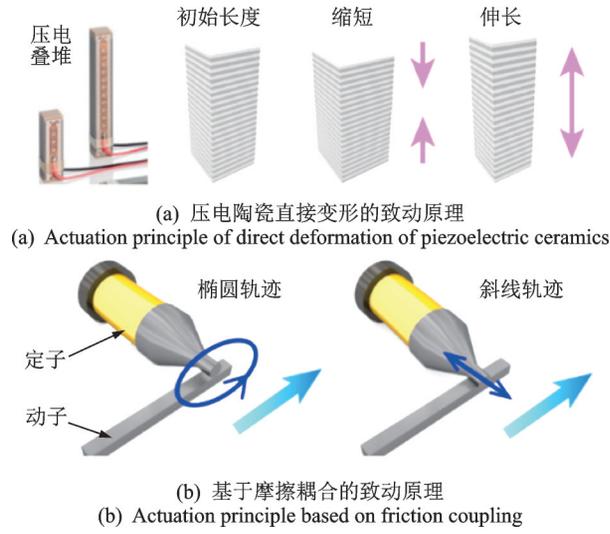


图 1 压电驱动的致动原理

Fig.1 Actuation principle of piezoelectric actuation

压电驱动技术由于其独特的致动原理和技术特点,在研究应用中表现出以下优点^[1-3]:位移分辨率高、响应速度快、出力密度高、低速大推力、构型多样、断电自锁、无电磁干扰、环境适应性好及运动形式多样化。受工作原理限制,压电驱动器存在以下局限:对驱动电源要求严格、输出功率较小、输出存在非线性及成本较高,这 4 个典型缺陷在一定程度上限制了压电驱动器的大规模应用。

1.2 压电驱动器的分类

各种原理、形式和结构的压电驱动器的分类如图 2 所示。按振动模式可以分为共振型和非共振型;按输出形式可以分为单自由度型和多自由度型;按驱动模式可以分为超声驱动型、惯性驱动型、行走驱动型以及直接驱动型^[4]。



图 2 压电驱动器分类

Fig.2 Classification of piezoelectric actuator

2 压电驱动技术研究现状

2.1 共振型压电驱动器

共振型压电驱动器工作在共振状态下,为避免工作过程中产生噪音,通常将工作频率设计在超声频段(大于 20 kHz),因此共振型压电驱动器也被称为超声电机。按照驱动器工作中所采用的振动模式,将共振型压电驱动器分为行波超声压电驱动器、驻波超声压电驱动器和模态复合超声压电驱动器。

2.1.1 行波超声压电驱动器

行波超声压电驱动器,也称为行波超声电机,是指利用压电陶瓷在弹性体定子中激励出行进的弯曲振动行波,从而使弹性体定子驱动表面的质点产生具有驱动作用的椭圆轨迹运动。弹性体定子中的行波是由 2 组相同振型的驻波叠加而成。根据振动叠加原理,2 组驻波不仅具有相同振型,还应具有空间和时间上的正交关系,即具有空间上的 1/4 波长差以及时间上的 $\pm 90^\circ$ 相位差,通过改变 2 组驻波的相位差可以改变行波的行进方向,进而实现动子的双向运动输出。通常在定子弹性体表面设置驱动足并以椭圆轨迹运动,再利用定子与动子间的摩擦力驱动动子。

行波超声压电驱动器根据动子的运动形式可分为直线型^[5-6]和旋转型^[7-8]。其中,直线型行波超声压电驱动器所用定子一般是长梁或细杆结构,定子两端容易产生波反射,进而破坏行波的生成条件。旋转型行波超声压电驱动器采用圆环等轴对称结构作为定子,容易激励出行波,成为行波超声压电驱动器领域中的主要研究对象。1983 年,日本新生(Shinsei)公司研制出一种旋转型行波超声压电驱动器,是现在环形行波超声压电驱动器的前身,并被佳能(Canon)公司应用在照相机自动调焦系统上。旋转型行波超声压电驱动器^[9-15]如图 3 所示,其所使用的振动模式主要有圆筒的径向弯曲振动模式和圆环的轴向弯曲振动模式 2 种。

目前,市场上有许多商用旋转型行波超声压电驱动器。例如,日本新生(Shinsei)公司开发的 USR-60 系列电机,其属于采用环形轴向弯曲振动模式的旋转型行波超声压电驱动器。国内学者也研制了一系列的行波电机^[15-20],包括采用圆筒的径向弯曲振动模式和圆环的轴向弯曲振动模式的旋转型行波超声压电驱动器。旋转型行波超声压电驱动器因其结构简单、力矩和效率较高、驱动和控制性能较好的特点,一直是超声压电驱动器领域的主要研究对象,也是技术最成熟和产业化最成功的超声压电驱动器。



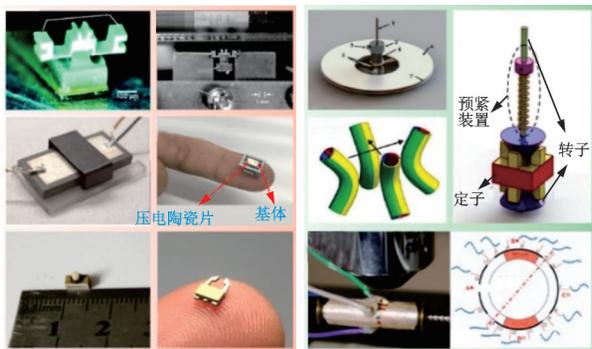
(a) 圆筒径向振动型 (b) 圆环轴向振动型
(a) Cylinder radial vibration type (b) Ring axial vibration type

图 3 行波压电驱动器

Fig.3 Traveling wave ultrasonic piezoelectric actuator

2.1.2 驻波超声压电驱动器

驻波超声压电驱动器,也称为驻波超声电机,其利用压电陶瓷在定子弹性体中激励出弯曲振动驻波,将驱动足布置于驻波的特定位置,使得驱动足端面质点随驻波的周期振动而产生椭圆或斜线等具有驱动作用的振动轨迹,进而基于摩擦耦合驱动动子。与行波超声压电驱动器相比,驻波超声压电驱动器在任何形状的定子中都可以轻松获得驻波。驻波压电驱动器如图 4 所示,按照输出形式,驻波超声压电驱动器也分为直线型^[21-27]和旋转型^[28-31]。



(a) 直线型 (b) 旋转型
(a) Linear type (b) Rotary type

图 4 驻波压电驱动器

Fig.4 Standing wave ultrasonic piezoelectric actuator

驻波超声压电驱动器用单相信号即可在定子中激励出驻波振动,并通过合理布置驱动足位置或设计定子形状来获得具有驱动作用的振动轨迹^[32-33]。目前,市场上有许多商用驻波超声压电驱动器,例如德国 PI 公司研发的 PILine 系列压电驱动器。国内学者也开展了驻波超声压电驱动器的研究^[27,34-37],在结构设计、致动原理、理论建模、仿真分析、实验测试

与实际应用方面取得了一系列成果。驻波压电驱动器的优点在于单相激励,驱动电路和控制方法简单,出力大;不足之处在于速度波动大,不易实现双向驱动,或实现双向直线驱动时两个运动方向性能存在差异,或需分别激励两个压电振子来实现具有相同运动性能的双向驱动。

2.1.3 模态复合超声压电驱动器

模态复合型超声压电驱动器如图 5 所示,其原理是在定子复合弹性体上激励出相同频率的振动模态,通常一个模态用于在定子/动子间提供正压力,另一个模态借助于定子与动子的摩擦来提供驱动力,从而使动子产生直线或旋转运动。定子的振动模态形式多样,目前比较成熟的有纵-扭、纵-弯、弯-弯和纵-纵^[38-42]等模态复合类型。



(a) 纵-扭复合 (b) 纵-弯复合 (c) 弯-弯复合 (d) 纵-纵复合
(a) Longitudinal-torsional hybrid (b) Longitudinal-bending hybrid (c) Bending-bending hybrid (d) Longitudinal-longitudinal hybrid

图 5 模态复合型超声压电驱动器

Fig.5 Mode hybrid ultrasonic piezoelectric actuator

Nakamura 等^[43]设计了一种纵扭复合旋转型超声压电驱动器。由于模态复合超声压电驱动器的速度可控性好,得到了大量研究^[39-40,43-52],并在航天、医疗、超精加工及精密仪器等领域得到了应用。

对比总结不同模态复合型超声压电驱动器的基本特点,如表 1 所示。其中:纵-纵复合型超声压电驱动器可以实现直线和旋转运动,因为需要 2 个正交的纵振压电振子,导致其整体尺寸较大;纵-扭复合型超声压电驱动器只能激励出驱动足的平面椭圆轨迹,故仅能实现旋转运动,由于采用 2 种不同的振动模态,其结构较为复杂;纵-弯复合型超声压电驱动器采用 2 种不同的振动模态,频率简并过程较复杂,驱动器对称性较差,导致体积偏大;弯-弯复合型超声压电驱动器具有无需频率简并、结构简单、可用于直线和旋转运动的优点,综合特性最优,应用前景最好。笔者团队在弯-弯复合型超声压电驱动器领域进行了深入研究,提出了多种结构和激励方案,大大提高了驱动的综合特性^[53-56]。

表 1 模态复合型超声压电驱动器特点对比

Tab.1 Characteristics comparison of mode hybrid ultrasonic piezoelectric actuator

类型	结构形式	频率简并	输出运动形式	结构紧凑性	结构复杂性
纵-扭	直梁	需要	旋转	紧凑	简单
纵-弯	直梁	需要	直线/旋转	紧凑	中等
弯-弯	直梁	不需要	直线/旋转	紧凑	复杂
纵-纵	交叉梁	需要	直线/旋转	不紧凑	中等

2.2 非共振型压电驱动器

非共振型压电驱动器工作在低频非共振频率范围,按照致动模式,将其分为直驱型压电驱动器、叠堆融合位移放大机构直驱型压电驱动器、行走型压电驱动器和惯性压电驱动器。

2.2.1 直驱型压电驱动器

叠堆型压电驱动器是直驱型压电驱动器的代表,采用多层压电陶瓷片堆叠的结构形式,在电压信号激励下实现多层陶瓷响应位移的叠加输出,具有结构紧凑、分辨力高、输出力大及体积小等优点。叠堆型压电驱动器由上千片压电陶瓷组成,在电压激励下同时伸长,输出位移为压电陶瓷伸长量之和,用于实现直线运动输出。直驱型压电驱动器如图 6 所示。代表性的压电叠堆主要包括圆形截面压电叠堆

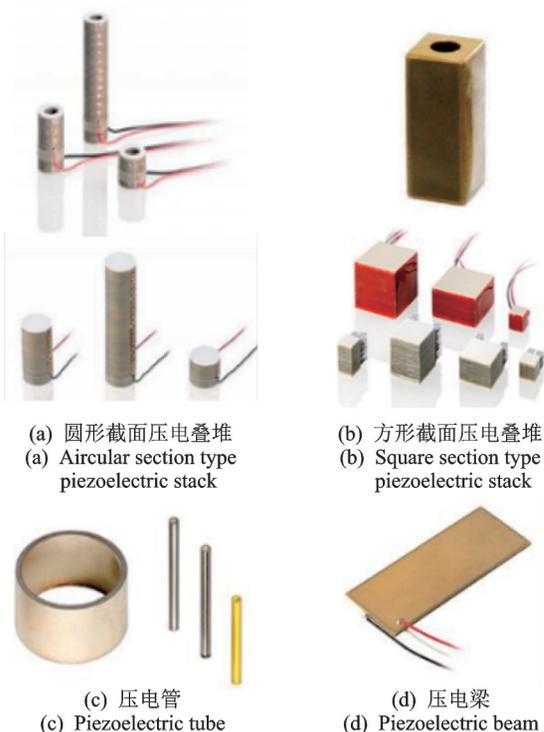


图 6 直驱型压电驱动器

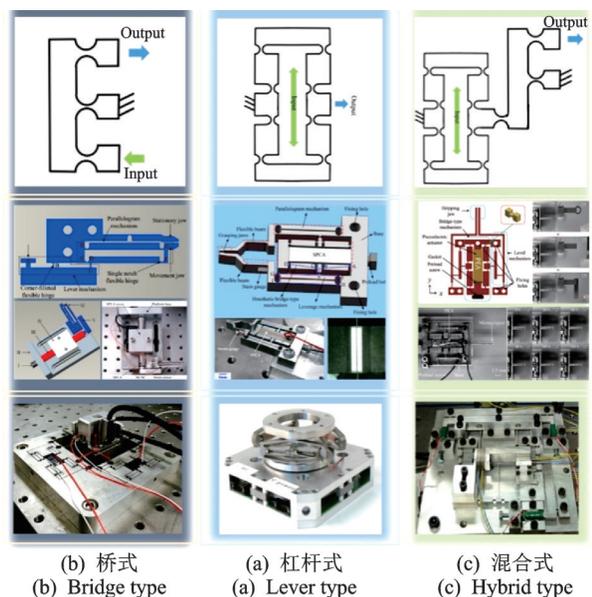
Fig.6 Direct drive piezoelectric actuator

和方形截面压电叠堆。此外,直驱型压电驱动器还包括通过弯曲变形实现直线输出运动的压电管和压电梁结构。直驱型压电驱动器的优点是输出力大,易于实现 nm 级分辨力,激励信号简单,易于控制;但存在输出行程小的缺点。目前,直驱型压电驱动器主要用于输出直线运动。针对输出旋转运动的直驱型压电驱动器,文献[57]提出一种基于压电陶瓷 d_{15} 工作模式的旋转型压电驱动器,将多片压电陶瓷沿圆周方向布置,各压电陶瓷沿轴向极化,沿周向施加激励电压,压电陶瓷在激励电压的作用下发生剪切变形,从而输出精密旋转运动,该旋转直接驱动型压电驱动器具有体积小、动态特性好等优点。

2.2.2 叠堆融合位移放大机构直驱型压电驱动器

将压电叠堆和具有导向功能的柔性位移放大机构组合,压电叠堆的输出位移被柔性位移放大机构放大,可以在一定程度上改善压电叠堆行程小的问题^[58-59]。

根据所采用柔性位移放大机构的工作原理,叠堆融合位移放大机构直驱型压电驱动器主要分为杠杆式^[60-61]、桥式^[62-63]和混合位移放大式^[64-65],如图 7 所示。国外学者在构型设计及数学模型等方面做了一系列研究^[66-71]。国内学者在叠堆融合位移放大机构直驱型压电驱动器的结构设计、数学模型建立、控制系统搭建及实际应用方面取得了丰硕的研究成果^[72-76]。在商用领域,法国 Cedrat Technologies SA 公司研发了一系列直线、旋转型叠堆融合位移放大机构直驱型压电驱动器,在航空航天、医疗等领域得到了应用。



(b) 桥式 (a) 杠杆式 (c) 混合式
(b) Bridge type (a) Lever type (c) Hybrid type

图 7 叠堆融合位移放大机构直驱型压电驱动器

Fig.7 Direct drive piezoelectric actuator by stack fusion displacement amplifier

通过压电叠堆融合柔性位移放大机构的设计,将输出位移放大数十倍,大大拓展了应用范围。但是柔性位移放大机构的使用会进一步增大驱动器的整体尺寸,导致系统动态特性变差,并存在耦合位移、控制方法复杂等不足。笔者团队提出一种基于空间螺旋柔性机构融合压电叠堆的旋转型压电驱动器,将压电叠堆的直线运动输出转换为旋转运动,具有结构紧凑、动态响应特性好的优势^[77]。

2.2.3 行走型压电驱动器

为了解决直驱型压电驱动器行程小的问题,受自然界多足动物行走运动的启发,行走致动原理被提出。各压电致动单元分别完成“箝位”、“进给”、“释放”及“收缩”等动作,通过多单元协调配合实现行走运动,通过微小步距累积的方式实现大行程运动输出。由于动作类似于自然界中尺蠖的蠕动物作,行走型压电驱动器也被称为尺蠖压电驱动器。根据驱动器运动单元的不同,主要分为行走式^[78-82]和推动式^[83-86]。行走式类似于动物的行走运动,各压电单元配合驱动自身运动;推动式利用各压电单元配合驱动动子运动。2类典型的行走型压电驱动器如图8所示。Galutva^[87]设计了第1个行走式压电驱动器,包含2个箝位压电叠堆和2个驱动压电叠堆,精度达到了 μm 级。文献[88-89]针对行走型压电驱动器,在构型设计及致动原理等方面进行了研究。文献[90-93]对尺蠖型压电驱动器开展了研究。在商用领域,德国、法国等国家的公司针对行走型压

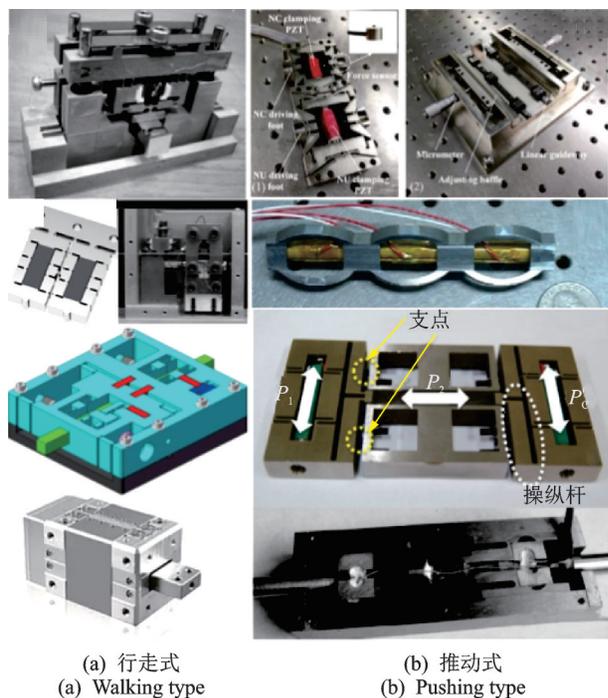


图8 行走型压电驱动器

Fig.8 Walking piezoelectric driver

电驱动器的集成化和小型化开展了研究,研制出一系列尺寸和特性各异的行走型压电驱动器。

行走压电驱动器利用静摩擦力驱动,输出力大,步距重复性好;但其采用多组压电单元配合实现行走运动,结构和控制信号复杂,体积较大。此外,多组压电单元动作之间容易发生耦合现象,输出位移存在一定的回退。笔者针对行走型压电驱动技术面临的箝位单元与驱动单元动作耦合问题,提出了通过改善连接单元结构刚度的方案,抑制了耦合位移的输出^[94]。文献[95]针对尺蠖型压电结构体积较大的问题,采用三角放大机构嵌入压电叠堆的结构方案,设计了一种结构紧凑的行走型压电驱动器。

2.2.4 惯性驱动型压电驱动器

惯性驱动型压电驱动器充分利用了压电材料快速响应的特点,基于惯性原理实现致动效果。典型惯性压电驱动器如图9所示,按照其工作原理可分为惯性冲击式^[96-97]和惯性摩擦式^[98-99]。Pohl^[100]提出了惯性冲击式压电驱动器,当压电单元快速伸长时利用其惯性实现驱动器的整体移动;当压电单元缓慢缩短时驱动器整体保持静止,通过周期性的动作实现步进运动输出。Hunstig^[101]提出了惯性摩擦式压电驱动器,当驱动器定子缓慢动作时,其动子跟随定子移动;当驱动器定子快速动作时,其动子由于惯性保持静止,利用定子单元的“慢-快”周期性动作,即可驱动动子实现“粘-滑”的步进运动。



图9 惯性压电驱动器

Fig.9 Inertia piezoelectric actuator

由于具有致动原理和结构简单的优势,惯性压电驱动器得到了国内外学者的深入研究^[101-106]。在商用领域,多国针对惯性驱动型压电驱动器的集成化和小型化设计开展了研究,研制出一系列小尺寸的惯性驱动型压电驱动器,在生物医学和精密机器人领域得到了应用。

惯性驱动型压电驱动器的结构和激励信号简单,输出速度较大,易于小型化;但由于采用惯性致动原理,其存在固有的回退和驱动力小等问题。针对这些问题,笔者团队提出了多足交替驱动的方式实现回退位移的抑制方法,以摩擦现象中的Stribeck效应为基础,基于最大静摩擦力大于滑动摩擦力的理论,利用多个驱动单元运动方向、速度和时序的配合来实现对动子驱动力的精准调控,使驱动力的方向和大小保持恒定,进而消除动子运动过程中的惯性回退^[107-108]。此外,通过动态调整正压力的方法来控制驱动足与动子之间的摩擦力,抑制“滑”阶段的回退位移,增大输出力^[109]。

2.3 不同类型压电驱动器的基本特性

表2为不同压电驱动器特性对比。超声致动型压电驱动器的优点是结构灵活,输出速度和输出力大;缺点是易发热,驱动足存在磨损,导致精度损失并影响其使用寿命,适用于 μm 级精度和大工作范围的领域。惯性致动型压电驱动器的优点是结构和

表 2 不同压电驱动器特性对比

Tab.2 Characteristic comparison of different piezo-electric actuators

致动模式	结构复杂性	输出性能	缺点
超声致动	中等	m/s级速度、亚 μm 级分辨力、百N级出力	易发热,存在磨损
惯性致动	简单	mm/s级速度、 μm 级分辨力、N级出力	位移回退,力小
行走致动	复杂	百 $\mu\text{m}/\text{s}$ 级速度、亚 μm 级分辨力、数十N级出力	结构及信号复杂
直接致动	简单	μm 级行程、亚nm级分辨力、kN级出力	行程小
直接致动(融合位移放大机构)	复杂	数百 μm 级行程、nm级分辨力、数十N出力	行程较小、结构较复杂

激励信号简单,输出速度较大;但存在位移回退、输出力小等缺点,适用于低速度、大行程、 μm 级精度及小驱动力领域。行走致动型压电驱动器的优点是利用静摩擦力驱动,摩擦磨损较小,易于实现亚 μm 级分辨力,步距重复性好;但其结构和控制信号复杂,适用于输出速度较小、输出力较大的领域。直驱型压电驱动器的优点是输出力大,易于实现亚nm级分辨力,激励信号简单;但存在输出行程小的缺点,虽然可通过结合柔性放大机构放大输出位移,但同时导致了结构复杂及动态性能较差的问题。

综合而言,工作在单种致动模式下的压电驱动器难以同时实现大行程、nm级分辨力和快速度的运动输出。通过设计出工作在多致动模式下的压电驱动器可改善上述问题^[110]:在直接致动模式下可获得nm级分辨力;在超声致动模式下可获得快速度输出;在惯性致动或行走致动模式下可获得大行程致动输出。

3 压电驱动技术应用现状

压电驱动技术的典型应用领域如图10所示,包括精密定位平台、生物组织及细胞穿刺、光学仪器调姿、超精密加工、微纳加工、振动抑制、空间机构、微纳操纵机器人以及微小型机器人等9个方面。

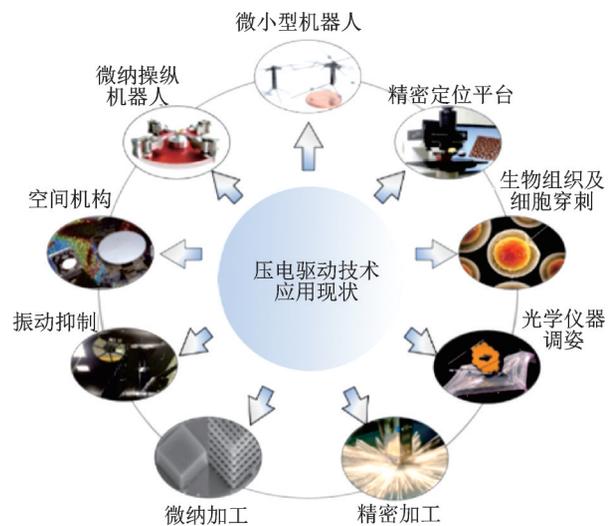


图 10 压电驱动技术的典型应用领域

Fig.10 Typical application fields of piezoelectric actuation technologies

3.1 精密定位平台

精密定位平台属于半导体光刻、超精密加工、微电子、纳米技术和生物工程等领域的核心部件,这些

领域要求运动系统的定位精度应达到 μm 甚至 nm 级。传统的精密定位平台一般是基于“伺服电机+滚珠丝杠”进行直线运动,将电机旋转运动转换成直线运动,中间存在转换环节和弹性变形,无法避免间隙误差,限制了定位精度的进一步提高,只能用于定位精度不够高的精密工作台的驱动。压电驱动器非常适用于要求超高精度及快速响应的定位平台,已被广泛应用于各种精密定位系统中,部分已经实现商用化。原子力显微镜系统(Atomic Force Microscopy)是压电精密定位平台最成功的应用之一。

国内外学者针对压电精密定位平台大尺度运动、多自由度运动解耦、建模控制及应用等方面取得了丰硕的研究成果^[111-115]。笔者团队利用单压电驱动器单足多维轨迹致动原理,研发了两自由度压电精密定位平台^[116],并基于多驱动足协同致动方式实现了平面致动;通过行走致动模式和直接致动模式切换实现跨尺度运动输出,在 $15\text{ mm}\times 15\text{ mm}$ 运动范围内达到了优于 $\pm 20\text{ nm}$ 的定位精度^[110]。

3.2 生物组织及细胞穿刺

近年来,生物组织及细胞操控技术在生物医学工程中得到了越来越广泛的应用。其中,组织和细胞的穿刺是细胞操纵技术的最典型代表,也是开展其他生物操纵如组织或细胞靶向药物注射的重要前提。压电驱动器凭借其高分辨力、大行程、快响应、易于微型化和易于控制等优点,成为国内外学者研究生物组织及细胞穿刺技术的首选驱动部件^[117-119]。卡内基梅隆大学将3自由度压电操控器和6自由度惯性位置传感器集成到手持式视网膜手术机器人中,实现了震颤消除和高精度显微操控^[118]。文献[120-121]利用压电驱动器开展了眼内组织穿刺研究。文献[122]通过压电驱动的微操纵实现对小鼠中期卵母细胞的穿刺注射,使用压电驱动器开展多种应用,包括核移植克隆、精子细胞注射以及囊胚注射等显微操作。

国内对生物组织及细胞的穿刺技术研究主要集中在构型设计、控制器开发以及实验测试等方面^[123-128]。文献[129]提出一种采用压电惯性驱动的空间二维大尺度压电穿刺针,研制了配套的专用手持控制器,可完成直线和旋转两个自由度的大尺度运动,可提供 32 mN 的稳定穿刺力。

3.3 光学仪器调姿

精密光学工程领域的快速发展对光束指向控制技术提出了迫切的应用需求。在机载激光通信系统及现代星地激光通信链路中,要求调姿机构响应速度快、工作频带宽且对光束指向控制的误差在微弧度量级^[130-131]。压电快速反射镜通过压电驱动器控制反射镜偏摆来调整激光光束的偏折方向,具有结构紧凑、响应速度快、控制精度高以及够实现微弧度量级或更高精度的定位控制等优点。国外对快速反射镜的研究较早,部分技术已经成熟,如美国Ball Aerospace公司生产出一系列不同尺寸、功能和性能的快速反射镜,反射镜镜面尺寸最大可达上千毫米,广泛应用于航空、航天以及地基光学系统中。

国内对快速反射镜也有一定的研究^[132-135]。文献[136]针对光学辅助微操作对两轴光束偏转装置的应用需求,基于压电双晶梁结构提出了一种贴片式十字梁构型的两轴压电偏转镜,其具有高分辨力、低迟滞等优点。文献[137]针对空天发射伴随外部振动、大加速度和侧向力冲击等情况,研制了一种高抗剪能力、高刚度的压电偏转镜。

3.4 超精密加工

20世纪初,压电驱动器在超精密加工领域已经得到应用。Legge^[138]将超声压电驱动器引用到陶瓷的钻孔中,发现由振动引入形成的断续切削,具有切削力减小、切削温度降低、刀具磨损减小以及排屑容易等许多优点,表现出加工过程韧性切削深度提升、刀具寿命延长、毛刺抑制明显、形状误差减小以及表面粗糙降低^[139]。研究人员进行了大量的超声辅助加工在新型难加工材料领域的加工实验,已经成功拓展到钛合金、复合材料、陶瓷材料及半导体材料等高硬度、高强度、高脆性材料加工中,涉及航空航天、生物医学、半导体和光学等领域。国内外学者针对振动辅助加工平台开展了一系列的研究,研制了多种类型的加工设备,实现了不同材料的超精密加工^[140-145]。

笔者团队研制了一种基于纵-弯振动复合换能器的新型压电超声铣削刀具,其钛合金纵-弯振动复合铣削的切削力比常规铣削和纵向振动辅助铣削分别降低 39.3% 和 27.2% ,毛刺形成概率明显降低^[146-147]。

3.5 微纳加工

微纳加工技术指尺度为亚 μm 和 nm 级元件以及由这些元件构成的部件或系统的优化设计、加工、组装、系统集成与应用技术,是先进制造的重要组成部分。压电驱动技术易于实现 nm 级精度,使其在微纳加工领域有着广泛的应用。Gozen 等^[148]设计了一套多自由度纳米级压电机器人系统,用于微纳尺度材料的铣削加工。Kawasegi 等^[149]基于原子力显微镜研究了单晶硅的微纳加工,利用压电扫描器的反馈控制加工质量。Zimmermann 等^[150]提出一种用于增材制造的压电机器人装置,实现了对亚 μm 级粒子的操控,具有高可靠性和可重复性。Lu 等^[151]研制了一种用于加工三维螺旋微结构的压电机器人操控系统,加工精度可达 $10\ \mu\text{m}$,三维螺旋微结构的尺寸可达 mm 级。文献[152-153]在增材制造领域通过金属液滴 3D 打印技术,研究了金属液滴的喷射特性。

3.6 振动抑制

压电材料所具备的机电耦合效应可实现机械能与电能之间的相互转化,用作控制振动能量的材料。从控制角度来看,振动的抑制可以采用被动控制和主动控制 2 种方法,因此抑振分为被动抑振和主动抑振。被动抑振单纯消耗结构振动的能量,相当于阻尼器的作用,通过给原有结构安装被动抑振装置,等效于增大结构的被动阻尼,从而加快能量的消耗,快速减小振动的幅度。虽然其效果一般不如主动抑振,但系统无条件稳定且无需附加设备。主动抑振则是通过驱动器给结构施加位移或力,从而减小被控对象的相对位移及受力等,达到抑振目的。由于具有额外的能量输入,导致其系统稳定性降低,在某些情况下,振动还可能被增强。使用压电智能材料进行隔振,通过主动切换可以灵活选择使用被动、主动或者两者结合的抑振方法,因此可以同时具备两者的优点。1996 年,一个由美国波音公司、马里兰大学、麻省理工学院、加利福尼亚大学洛杉矶分校和美国陆军研究办公室组成的小组研制了智能直升机旋翼^[154],旋翼的一部分由压电纤维等复合材料构成,充分利用了压电智能材料的灵活特点,能够减小运行时的振动和噪声,提高气动性能,振动垂直剪切减小了 70%。美国、加拿大和澳大利亚通过技术合作,为 F-18 战斗机研制了垂直尾翼抖振控制系统^[155],进行抖振的抑制,使其寿命延长 70%。

此外,压电抑振装置也在民用领域得到了应用^[156]。

笔者团队提出了一种基于弯曲复合模式的嵌入式压电主动抑振装置,利用四分区压电陶瓷,单独控制每个分区的动作,使得轴系径向尺寸大幅缩小,最小可与轴径相同,使用二维压电驱动器输出的弯曲运动来控制轴端部运动^[157]。

3.7 空间机构

随着空间探测领域的快速发展,执行各种探测任务的航天器层出不穷。其中,调姿机构是航天器中的核心装置之一,是保证航天器在轨可靠运行和高效工作的先决条件,广泛存在于太阳能帆板、空间相机等航天装置中。美国喷气推进实验室和麻省理工学院联合研制了用于火星探测器操作臂关节驱动的大力矩双面齿超声压电驱动器,转速为 $40\ \text{r/min}$ 时力矩可达 $2\ \text{N}\cdot\text{m}$,效率大于 40%。美国国家航天局将超声压电驱动器应用于第 2 代空间探测机器人操作手臂 MarsArm II 中,其主臂关节采用 6 个旋转超声压电驱动器进行驱动^[158]。国内也开展了压电驱动器在空间探测机构中的应用研究^[159-161]。

中国学者研发的超声压电驱动器被应用到嫦娥三号、四号和五号探测器上,前者用于驱动与控制红外成像光谱仪内的定标板,后者用来控制光谱仪接收反射光谱的镜面方向和角度,将月壤上不同位置的光线反射进光谱仪,协助探测器上的仪器分析月球表面的物质^[162-163]。笔者团队针对空间机构技术,研制出一种基于单足直线压电驱动器的连杆式折展机构^[160],展开用时约为 $0.2\ \text{s}$,可实现折展机构的快速展开。在低频冲击激励方法下,导轨的步距为 $0.285\ \mu\text{m}$,满足了空间折展机构高展开分辨力要求。此外,基于纵-弯复合型超声压电驱动器研制出一种可旋转式套筒伸展机构^[161],通过不同振动复合可实现内套筒直线、旋转以及螺旋运动输出。

3.8 微纳操控机器人

具有纳米级定位能力的移动机器人配合执行器可以完成微纳米尺度样品的精细操控,移动机器人用于样品的移动与定位,执行器用于配合机器人完成任务^[164]。压电精细操控机器人继承了压电驱动技术的独特优点,近年来得到了越来越多的研究与应用^[165]。Li 等^[166]研发了一款用于细胞操控的 2 自由度串联压电精细操控机器人,其工作范围为 $120\ \text{mm}\times 100\ \text{mm}$,单自由度分辨力为 $10\ \text{nm}$,最终实现细胞 mm 尺度下沿不同轨迹的操控,轨迹误差

为 $0.2\ \mu\text{m}$ 。文献[167]研制了2自由度串联压电精细操控机器人,可以 $2\sim 3\ \text{mm/s}$ 的速度对直径为 $120\ \mu\text{m}$ 以上的血管完成穿刺操控。笔者团队提出了一种基于功能模块设计、多足协同作业以及多模式融合驱动的压电微纳操控机器人的设计理念,并以此为依据研制了一种压电六足机器人^[168],在平面内3自由度的运动行程可自由扩展,其运动分辨率高达 $4\ \text{nm}$ ($0.2\ \mu\text{rad}$)。借助图像识别和视觉反馈技术,这种机器人可应用于大面积分散细胞的自动批量化注射,能够显著提高微纳操控的工作效率。

3.9 微小型机器人

微小型压电机机器人是指尺度在几厘米甚至几毫米、由压电元件驱动的移动机器人。传统机器人因为存在尺寸大、位移分辨率低、电磁干扰及死区大等缺陷而无法完成的许多任务,都可由这些微小型机器人执行完成,如细胞操作、狭窄或拥挤空间中的搜索工作、精密加工、安全监控及医疗应用等。根据压电微小型机器人的致动模式,将微小型压电机机器人分为非谐振驱动型和谐振驱动型等^[169-171]。

在谐振型压电微小机器人的研究方面,文献[172]基于自然界蟑螂的仿生学步态,研制了一种六足微小型压电机机器人HAMR,该机器人长仅为 $57\ \text{mm}$,质量仅为 $2\ \text{g}$ 。Wu等^[173]研制了一种由压电聚合物材料制成的微型压电软体机器人,尺寸仅为 $3\ \text{cm}\times 1.5\ \text{cm}$ 。还有一些非谐振型压电微小机器人,如:Liu等^[174]提出了一种惯性驱动型管内移动微小型机器人;Xing等^[175]提出了一种惯性驱动型小型压电爬管机器人;Yan等^[176]提出了一种行走型压电机机器人;Fuchiwaki^[177]提出了一种行走型微小型压电机机器人。笔者团队研制了小型谐振型和非谐振型压电机机器人及相应的小型化电源,在电源集成、无线运动方面取得了一定的成果。提出了一种微小型多模式六足压电机机器人^[178],工作在谐振模式下,其体长为 $58\ \text{mm}$,质量为 $42.55\ \text{g}$ 。对于非谐振驱动型压电机机器人,研制了一种惯性驱动型压电机机器人,尺寸为 $39\ \text{mm}\times 15\ \text{mm}\times 4\ \text{mm}$,质量为 $0.9\ \text{g}$ ^[179]。

4 讨论与展望

基于压电驱动技术的发展现状,未来有待进一步深入研究和解决的问题归纳如下。

1) 压电驱动机械输出性能的提升。压电驱动器的机械输出特性可以归纳为5个度:精度(开环、

闭环);尺度(尺寸、质量、行程);维度(直线、旋转、多自由度);力度(推力、力矩);速度(线速度、速域)。单一性能指标的提升和多项性能的协调优化是该领域最为基础的研究方向,可兼顾宏-微-纳的多维高性能跨尺度驱动是其中的一个核心问题。

2) 压电驱动的寿命和可靠性。一般压电叠堆的寿命在10亿次以上,而包含摩擦耦合环节的压电驱动器则大多存在磨损及特性衰变问题,因此需要深入研究压电驱动长周期服役过程中特性演变规律及工作稳定性。新型压电材料和摩擦材料的研制可直接提升寿命周期和可靠性。此外,以静摩擦为主的压电驱动技术(如行走型)可最大程度地降低磨损及特性衰减,该类压电驱动器的发展是一个优选方向。

3) 压电驱动的系统化和集成化发展。笔者主要从压电驱动器机械本体的角度进行了分析和讨论,但一套完整的压电驱动系统涵盖机械本体、传感器、控制器、功率放大器及控制系统等多个子系统,系统的集成设计是重点发展方向。

4) 压电驱动技术的自主化。压电驱动器及运动控制系统实现全自主化研发与生产还有很多工作需深入开展,特别是以下几个方面:①兼顾高性能和高稳定性的压电陶瓷材料;②纳米级超精密传感器;③大功率精密功放芯片。

5) 压电驱动技术应用领域的拓展。压电驱动已经在多个领域获得成功应用,展现了其独特的技术优势;但还存在成本偏高、规模小及产业链不完整等问题。拓宽压电驱动技术的应用领域,尤其是在深空、深海及生命科学等重要领域的应用,对于压电驱动技术的进一步发展至关重要。

5 结束语

笔者介绍了压电驱动器定义及工作原理,总结了压电驱动器的技术特点,概括分析了压电驱动器的研究现状,对不同类型压电驱动器的特点进行了分析对比,指出了现有各类压电驱动器的优缺点及各自适用的领域,对9个典型应用领域进行了介绍,并对未来需要深入研究和重点解决的问题进行了归纳总结。

参 考 文 献

- [1] 胡敏强,金龙,顾菊平. 超声波电机原理与设计[M]. 北京:科学出版社,2005:13-17.

- [2] 赵淳生. 超声电机技术与应用[M]. 北京:科学出版社, 2007:1-18.
- [3] 陈维山,刘英想,石胜君. 纵弯模态压电金属复合梁式超声电机[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2011: 1-4.
- [4] LIU Y, DENG J, SU Q. Review on multi-degree-of-freedom piezoelectric motion stage [J]. IEEE Access, 2018, 6:59986-60004.
- [5] ROH Y, LEE S, HAN W. Design and fabrication of a new traveling wave-type ultrasonic linear motor[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2001, 94(3): 205-210.
- [6] LI H, WANG L, CHENG T H, et al. A high-thrust screw-type piezoelectric ultrasonic motor with three-wavelength exciting mode[J]. Applied Sciences, 2016, 6(12):442.
- [7] MASHIMO T, URAKUBO T, SHIMIZU Y. Micro geared ultrasonic motor[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2018, 23(2):781-787.
- [8] PENG T, SHI H, LIANG X, et al. Experimental investigation on sandwich structure ring-type ultrasonic motor[J]. Ultrasonics, 2015, 56:303-307.
- [9] 上羽贞行,富川义郎. 超声波马达理论与应用[M]. 杨志刚,译. 上海:上海科学技术出版社,1998:22-55.
- [10] WU J, MIZUNO Y, NAKAMURA K. Piezoelectric motor utilizing an alumina/PZT transducer [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 67(8): 6762-6772.
- [11] CHEN X, CHEN Z, LI X, et al. A spiral motion piezoelectric micromotor for autofocus and auto zoom in a medical endoscope[J]. Applied Physics Letters, 2016, 108(5):052902.
- [12] YE Z, ZHOU C, JIN J, et al. A novel ring-beam piezoelectric actuator for small-size and high-precision manipulator[J]. Ultrasonics, 2019, 96:90-95.
- [13] IULA A, BOLLINO G. A travelling wave rotary motor driven by three pairs of Langevin transducers[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2012, 59(1):121-127.
- [14] WANG D, ZHAO K, YUAN Y, et al. Fabrication and characterization of a microscale piezoelectric vibrator based on electrohydrodynamic jet printed PZT thick film[J]. Micromachines, 2021, 12(5):524.
- [15] MA X, LIU J, DENG J, et al. A rotary traveling wave ultrasonic motor with four groups of nested PZT ceramics: design and performance evaluation[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2020, 67(7):1462-1469.
- [16] LU X, HU J, YANG L, et al. A novel dual stator-ring rotary ultrasonic motor[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2013, 189:504-511.
- [17] LU X, HU J, ZHAO C. Analyses of the temperature field of traveling-wave rotary ultrasonic motors[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2011, 58(12):2708-2719.
- [18] CHEN W, LIU Y, YANG X, et al. Ring-type traveling wave ultrasonic motor using radial bending mode [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2014, 61(1):197-202.
- [19] LIU Y, LIU J, CHEN W. A cylindrical traveling wave ultrasonic motor using circumferential composite transducer[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2011, 58(11): 2397-2404.
- [20] LIU Y, CHEN W, LIU J, et al. Actuating mechanism and design of a cylindrical traveling wave ultrasonic motor using cantilever type composite transducer [J]. PLoS ONE, 2010, 5(4):e10020.
- [21] FRIEND J, YEO L, HOGG M. Piezoelectric ultrasonic bidirectional linear actuator for micropositioning fulfilling Feynman's criteria[J]. Applied Physics Letters, 2008, 92(1):014107.
- [22] FRIEND J, GOUDA Y, NAKAMURA K, et al. A simple bidirectional linear microactuator for nanopositioning-the "Baltan" microactuator[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2006, 53(6):1160-1168.
- [23] WANG Y J, CHEN Y C, SHEN S C. Design and analysis of a standing-wave trapezoidal ultrasonic linear motor[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2015, 26(17):2295-2303.
- [24] LI J, LIU Y, DENG J, et al. Development of a linear piezoelectric microactuator inspired by the hollowing art [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(10):10407-10416.
- [25] LI X, CI P, LIU G, et al. A two-layer linear piezoelectric micromotor[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2015, 62(3):405-411.
- [26] LIU Y, SHI S, LI C, et al. Development of a bidirectional standing wave linear piezoelectric actuator with four driving feet[J]. Ultrasonics, 2018,84:81-86.
- [27] CHEN Z, LI X, CI P, et al. A standing wave linear ultrasonic motor operating in in-plane expanding and bending modes [J]. Review of Scientific Instruments, 2015, 86:035002.

- [28] QIU J, YANG Y, HONG X, et al. A disc-type high speed rotary ultrasonic motor with internal contact teeth [J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(5):2386.
- [29] PARK S, HE S. Standing wave brass-PZT square tubular ultrasonic motor[J]. *Ultrasonics*, 2012, 52(7): 880-889.
- [30] DABBAGH V, SARHAN A, AKBARI J, et al. Design and experimental evaluation of a precise and compact tubular ultrasonic motor driven by a single-phase source[J]. *Precision Engineering*, 2017, 48: 172-180.
- [31] HE S, CHIAROT P, PARK S. A single vibration mode tubular piezoelectric ultrasonic motor [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2011, 58(5):1049-1061.
- [32] YOKOYAMA K, TAMURA H, MASUDA K, et al. Single-phase drive ultrasonic linear motor using a linked twin square plate vibrator[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2013, 52:07HE03.
- [33] ROH Y, KWON J. Development of a new standing wave type ultrasonic linear motor [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2004, 112(2/3):196-202.
- [34] 苏鹤玲,赵向东,赵淳生. 单相驱动旋转型驻波超声电机的运动机理[J]. *压电与声光*, 2001, 23(4): 306-312.
SU Heling, ZHAO Xiangdong, ZHAO Chunsheng. Study on moving mechanism of a rotatory type standing wave ultrasonic motor with single phase driver[J]. *Piezoelectrics and Acoustooptics*, 2001, 23(4): 306-312.(in Chinese)
- [35] SHI Y, ZHAO C. A new standing-wave-type linear ultrasonic motor based on in-plane modes[J]. *Ultrasonics*, 2011, 51(4):397-404.
- [36] WANG L, LIU J, LIU Y, et al. A novel single-mode linear piezoelectric ultrasonic motor based on asymmetric structure[J]. *Ultrasonics*, 2018, 89:137-142.
- [37] LIU Y, SHI S, LI C, et al. A novel standing wave linear piezoelectric actuator using the longitudinal-bending coupling mode[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2016, 251:119-125.
- [38] WANG J, GUO J. Development of a radial-torsional vibration hybrid type ultrasonic motor with a hollow and short cylindrical structure [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2009, 56(5):1054-1058.
- [39] YANG X, LIU Y, CHEN W, et al. Longitudinal and bending hybrid linear ultrasonic motor using bending PZT elements [J]. *Ceramics International*, 2013, 39: S691-S694.
- [40] LIU Y, CHEN W, LIU J, et al. A rotary piezoelectric actuator using the third and fourth bending vibration modes[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, 61(8):4366-4373.
- [41] LI X, YAO Z, YANG M. A novel large thrust-weight ratio V-shaped linear ultrasonic motor with a flexible joint[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2017, 88: 065003.
- [42] LIU Y, CHEN W, FENG P, et al. A square-type rotary ultrasonic motor with four driving feet[J]. *Sensors and Actuators: A. Physical*, 2012, 180: 113-119.
- [43] NAKAMURA K, KUROSAWA M. Design of a hybrid transducer type ultrasonic motor [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 1993, 40(4):395-401.
- [44] TAKANO M, TAKIMOTO M, NAKAMURA K. Electrode design of multilayered piezoelectric transducers for longitudinal-bending ultrasonic actuators [J]. *Acoustical Science and Technology*, 2011, 32(3): 100-108.
- [45] JEONG S, PARK T, KIM M, et al. Characteristics of a V-type ultrasonic rotary motor [J]. *Current Applied Physics*, 2011, 11(3):S364-S367.
- [46] SATONOBU J, FRIEND J R, NAKAMURA K, et al. Numerical analysis of the symmetric hybrid transducer ultrasonic motor [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2001, 48(6):1625-1631.
- [47] SHI Y L, LI Y B, ZHAO C S, et al. A new type butterfly-shaped transducer linear ultrasonic motor [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2011, 22(6):567-575.
- [48] SHI Y, ZHAO C, HUANG W. Linear ultrasonic motor with wheel-shaped stator[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2010, 161(1/2):205-209.
- [49] 周铁英,傅德永,陈宇,等. 驱动内窥镜OCT的超声电机研究[J]. *振动、测试与诊断*, 2013, 33(5):737-740.
ZHOU Tieying, FU Deyong, CHEN Yu, et al. Ultrasonic motor for driving OCT endoscope [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2013, 33(5): 737-740.(in Chinese)
- [50] 周铁英,张凯,陈宇,等. 1mm圆柱式超声电机的研制及在OCT内窥镜中的应用[J]. *科学通报*, 2005(7): 713-716.
ZHOU Tieying, ZHANG Kai, CHEN Yu, et al. Development of 1mm cylindrical ultrasonic motor and its

- application in OCT endoscope [J]. Science Bulletin, 2005(7):713-716.(in Chinese)
- [51] GUO M, HU J, ZHU H, et al. Three-degree-of-freedom ultrasonic motor using a 5-mm-diameter piezoelectric ceramic tube [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(7):1446.
- [52] CHEN Z, LI X, CHEN J, et al. A square-plate ultrasonic linear motor operating in two orthogonal first bending modes [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2013, 60(1): 115-120.
- [53] DU P, HAN L, QIU X, et al. Development of a high-precision piezoelectric ultrasonic milling tool using longitudinal-bending hybrid transducer [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2022, 222:107239.
- [54] LI H, LIU Y, DENG J, et al. Design philosophy for ultrasonic motors using the bending hybrid modes [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2021, 331: 113029.
- [55] LIU Y, YAN J, WANG L, et al. A two-DOF ultrasonic motor using a longitudinal-bending hybrid sandwich transducer [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(4):3041-3050.
- [56] LIU J, LIU Y. Design and experiments of a single-foot linear piezoelectric actuator operated in stepping mode [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(10): 8063-8071.
- [57] YU H, LIU Y, DENG J, et al. A novel piezoelectric stack for rotary motion by d_{15} working mode: principle, modeling, simulation and experiments [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2020, 25(2): 491-501.
- [58] WU Z, XU Q. Survey on recent designs of compliant micro-/nano-positioning stages [J]. Actuators, 2018, 7(1):5.
- [59] YONG Y, MOHEIMANI S, KENTON B, et al. Invited review article: high-speed flexure-guided nanopositioning: mechanical design and control issues [J]. Review of Scientific Instruments, 2012, 83(12): 121101.
- [60] YONG Y, APHALE S, MOHEIMANI S. Design, identification, and control of a flexure-based XY stage for fast nanoscale positioning [J]. IEEE Transactions on Nanotechnology, 2009, 8(1):46-54.
- [61] BHAGAT U, SHIRINZADEH B, CLARK L, et al. Design and analysis of a novel flexure-based 3-DOF mechanism [J]. Mechanism and Machine Theory, 2014, 74:173-187.
- [62] LEE H, KIM H, KIM H, et al. Optimal design and experiment of a three-axis out-of-plane nano positioning stage using a new compact bridge-type displacement amplifier [J]. Review of Scientific Instruments, 2013, 84(11):115103.
- [63] LING M, CAO J, JIANG Z, et al. Optimal design of a piezo-actuated 2-DOF millimeter-range monolithic flexure mechanism with a pseudo-static model [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 115: 120-131.
- [64] ZHU X, XU X, WEN Z, et al. A novel flexure-based vertical nanopositioning stage with large travel range [J]. Review of Scientific Instruments, 2015, 86(10): 105112.
- [65] ZHU W, ZHU Z, SHI Y, et al. Design, modeling, analysis and testing of a novel piezo-actuated XY compliant mechanism for large workspace nanopositioning [J]. Smart Materials and Structures, 2016, 25(11):115033.
- [66] CLARK L, SHIRINZADEH B, BHAGAT U, et al. Development and control of a two DOF linear-angular precision positioning stage [J]. Mechatronics, 2015, 32: 34-43.
- [67] FLEMING A, YONG Y. An ultrathin monolithic XY nanopositioning stage constructed from a single sheet of piezoelectric material [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2017, 22(6):2611-2618.
- [68] KENTON B, LEANG K. Design and control of a three-axis serial-kinematic high-bandwidth nanopositioner [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2012, 17(2):356-369.
- [69] 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.
- [70] WATANABE S, ANDO T. High-speed XYZ-nanopositioner for scanning ion conductance microscopy [J]. Applied Physics Letters, 2017, 111:113106.
- [71] JANAIDEH M, RAKHEJA S, SU C. An analytical generalized Prandtl-Ishlinskii model inversion for hysteresis compensation in micropositioning control [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2011, 16(4):734-744.
- [72] LAI L, GU G, ZHU L. Design and control of a decoupled two degree of freedom translational parallel micro-positioning stage [J]. Review of Scientific Instruments, 2012, 83(4):045105.

- [73] WANG F, SHI B, TIAN Y, et al. Design of a novel dual-axis micro manipulator with an asymmetric compliant structure [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2019, 24(2):656-665.
- [74] WANG R, ZHANG X. Parameters optimization and experiment of a planar parallel 3-DOF nanopositioning system [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 65(3):2388-2397.
- [75] WANG P, XU Q. Design and testing of a flexure-based constant-force stage for biological cell micromanipulation [J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2018, 15(3):1114-1126.
- [76] DU Z, SHI R, DONG W. A piezo-actuated high-precision flexible parallel pointing mechanism: conceptual design, development, and experiments [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2014, 30(1):131-137.
- [77] XUN M, YU H, LIU Y, et al. A precise rotary piezoelectric actuator based on the spatial screw compliant mechanism [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, DOI: 10.1109/TMECH. 2022. 3197454.
- [78] HUANG K, LEE C. Design and development of a piezoelectric actuator for the scanning probe microscope used in ultrahigh vacuum [J]. *Journal of Mechanics*, 2007, 23(2):117-126.
- [79] MA X, LIU Y, DENG J, et al. A compact inchworm piezoelectric actuator with high speed: design, modeling, and experimental evaluation [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2023, 184:109704.
- [80] SALISBURY S, WAECHTER D. Closed-loop control of a complementary clamp piezoworm actuator [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2007, 12(6):590-598.
- [81] XUE X, TIAN X, ZHANG D, et al. Design of a piezo-driven inchworm flexure stage for precision positioning [J]. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2016, 50(4):569-581.
- [82] SHAO S, SONG S, CHEN N, et al. Structure and control strategy for a piezoelectric inchworm actuator equipped with MEMS ridges [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2017, 264:40-50.
- [83] WANG Y, YAN P. A novel bidirectional complementary-type inchworm actuator with parasitic motion based clamping [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 134:106360.
- [84] KIM J, LEE J H. Self-moving cell linear motor using piezoelectric stack actuators [J]. *Smart Materials and Structures*, 2005, 14(5):934-940.
- [85] KIM Y, CHOI S, PARK J, et al. The characteristics of variable speed inchworm stage using lever mechanism by different materials [J]. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2008, 8(1):5696-5701.
- [86] ZHANG Z, XU M, FENG B, et al. Research for a new actuator with variable step and large displacement [J]. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2010, 33:597-604.
- [87] GALUTVA G. Device for precision displacement of a solid body: US, 3684904 [P]. 1972-04-15.
- [88] KIM J, KIM H K, CHOI S B. A hybrid inchworm linear motor [J]. *Mechatronics*, 2002, 12(4):525-542.
- [89] MERRY R, KLEIJN N, MOLENGRAFT R, et al. Using a walking piezo actuator to drive and control a high-precision stage [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2009, 14(1):21-31.
- [90] LI J, ZHAO H, QU X H. et al. Development of a compact 2-DOF precision piezoelectric positioning platform based on inchworm principle [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2015, 222:87-95.
- [91] 韩路, 黄卫清, 王寅. 两级复合放大箝位步进压电直线电机 [J]. *振动、测试与诊断*, 2017, 37(4):698-702. HAN Lu, HUANG Weiqing, WANG Yin. Clamp stepper piezoelectric linear motor with combination of two amplification [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2017, 37(4): 698-702. (in Chinese)
- [92] CHEN W S, LIU Y Y, LIU Y X, et al. Design and experimental evaluation of a novel stepping linear piezoelectric actuator [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2018, 276:259-266.
- [93] 王丽娜, 刘俊标, 郭少鹏, 等. 立式高精度压电尺蠖式位移致动器 [J]. *压电与声光*, 2010, 32(4): 601-603, 607. WANG Lina, LIU Junbiao, GUO Shaopeng, et al. A precision inchworm-type piezoelectric actuator with vertical movement, simple structure and easy assembly feature [J]. *Piezoelectrics and Acousto-optics*, 2010, 32(4):601-603, 607. (in Chinese)
- [94] TIAN X, ZHANG B, LIU Y, et al. A novel U-shaped stepping linear piezoelectric actuator with two driving feet and low motion coupling: design, modeling and experiments [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 124:679-695.
- [95] DENG J, ZHANG S, LI Y, et al. Development and experiment evaluation of a compact inchworm piezoelectric actuator using three-jaw type clamping mechanism [J]. *Smart Materials and Structures*, 2022, 31:045020.

- [96] HU Y, WANG R, WEN J, et al. A low frequency structure-control-type inertial actuator using miniaturized bimorph piezoelectric vibrators [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 66(8):6179-6188.
- [97] ZHANG Y, ZHANG W, HESSELBACH J, et al. Development of a two-degree-of-freedom piezoelectric rotary-linear actuator with high driving force and unlimited linear movement [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2006, 77(3):035112.
- [98] DUBOIS F, BELLY C, SAULOT A, et al. Stick-slip in stepping piezoelectric inertia drive motors—mechanism impact on a rubbing contact [J]. *Tribology International*, 2016, 100:371-379.
- [99] MORITA T, YOSHIDA R, OKAMOTO Y, et al. A smooth impact rotation motor using a multi-layered torsional piezoelectric actuator [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 1999, 46(6):1439-1445.
- [100] POHL D. Dynamic piezoelectric translation devices [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1987, 58(1):54-57.
- [101] HUNSTIG M. Piezoelectric inertia motors—a critical review of history, concepts, design, applications, and perspectives [J]. *Actuators*, 2017, 6(1):7.
- [102] YANG Z, ZHOU X, HUANG H, et al. On the suppression of the backward motion of a piezo-driven precision positioning platform designed by the parasitic motion principle [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020, 67:3870-3878.
- [103] DENG J, LIU Y, LI J, et al. Influence of multi-directional oscillations on output characteristics of inertial piezoelectric platform [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2022, 27(5):4122-4131.
- [104] ZHANG S, LIU Y, DENG J, et al. Development of a two-DOF inertial rotary motor using a piezoelectric actuator constructed on four bimorphs [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 149:107213.
- [105] GAO X, ZHANG S, DENG J, et al. Development of a small two-dimensional robotic spherical joint using a bonded-type piezoelectric actuator [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021, 68(1):724-733.
- [106] WANG L, CHEN D, CHENG T, et al. A friction regulation hybrid driving method for backward motion restraint of the smooth impact drive mechanism [J]. *Smart Materials and Structures*, 2016, 25(8):085033.
- [107] YU H, LIU Y, DENG J, et al. A collaborative excitation method for piezoelectric stick-slip actuator to eliminate rollback and generate precise smooth motion [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2022, 170:108815.
- [108] DENG J, LIU Y, LI J, et al. Displacement linearity improving method of stepping piezoelectric platform based on leg wagging mechanism [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2022, 69(6):6429-6432.
- [109] DENG J, LIU Y, CHEN W, et al. Development and experiment evaluation of an inertial piezoelectric actuator using bending-bending hybrid modes [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2018, 275:11-18.
- [110] DENG J, LIU Y, ZHANG S, et al. Development of a nano-positioning platform with large travel range based on bionic quadruped piezoelectric actuator [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2021, 26(4):2059-2070.
- [111] KANG D, KIM J, LEE G M, et al. Development of compact high precision two degree of freedom XY piezoelectric stepping positioner [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2012, 79(2):075112.
- [112] 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]. *Precision Engineering*, 2016, 45:374-386.
- [113] GU G, ZHU L, SU C. High-precision control of piezoelectric nanopositioning stages using hysteresis compensator and disturbance observer [J]. *Smart Materials and Structures*, 2014, 23(10):105007.
- [114] ZHANG X, ZHANG Y, XU Q. Design and control of a novel piezo-driven XY parallel nanopositioning stage [J]. *Microsystem Technologies—Micro-and Nanosystems—Information Storage and Processing Systems*, 2017, 23(4):1067-1080.
- [115] CHEN F, DONG W, YANG M. A PZT actuated 6-DOF positioning system for space optics alignment [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2019, 24(6):2827-2838.
- [116] DENG J, LIU Y X, ZHANG S J, et al. Modeling and experiments of a nano-positioning and high frequency scanning piezoelectric platform based on function module actuator [J]. *Science China Technological Sciences*, 2020, 63(12):2541-2552.
- [117] WONG W, SU X, LI X, et al. Global prevalence of age-related macular degeneration and disease burden projection for 2020 and 2040: a systematic review and meta-analysis [J]. *The Lancet Global Health*, 2014, 2(2):E106-E116.
- [118] RIVIERE C, ANG W, KHOSLA P. Toward active tremor canceling in handheld microsurgical instruments

- [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2003, 19(5):793-800.
- [119]SUZUKI H, WOOD R J. Origami-inspired miniature manipulator for teleoperated microsurgery [J]. Nature Machine Intelligence, 2020, 2(8):437-446.
- [120]SONG C, GEHLBACH P, KANG J. Active tremor cancellation by a "Smart" handheld vitreoretinal microsurgical tool using swept source optical coherence tomography [J]. Optics Express, 2012, 20(21):23414-23421.
- [121]KANG J, CHEON G. Demonstration of subretinal injection using common-path swept source ophthalmic microinjector [J]. Applied Sciences-Basel, 2018, 8(8):1287.
- [122]YOSHIDA N, PERRY A C F. Piezo-actuated mouse intracytoplasmic sperm injection (ICSI) [J]. Nature Protocols, 2007, 2(2):296-304.
- [123]XIE H, ZHANG H, SONG J, et al. Living cell manipulation and in situ nanoinjection based on frequency shift feedback using cantilevered micropipette probes [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2020, 17(1):142-150.
- [124]HUANG H, DAI C, SHEN H, et al. Recent advances on the model, measurement technique, and application of single cell mechanics [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2020, 21(17):6248.
- [125]LIU Y, WANG X, ZHAO Q, et al. Robotic batch somatic cell nuclear transfer based on microfluidic groove [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2020, 17(4):2097-2106.
- [126]WANG H, HUANG Q, SHI Q, et al. Automated assembly of vascular-like microtube with repetitive single-step contact manipulation [J]. IEEE Transactions on Bio-Medical Engineering, 2015, 62(11):2620-2628.
- [127]WEI Y, XU Q S. Design and testing of a new force-sensing cell microinjector based on soft flexure mechanism [J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(15):6012-6019.
- [128]ZHANG S, ZHAO H, MA X, et al. A 3-DOF piezoelectric micromanipulator based on symmetric and antisymmetric bending of a cross-shaped beam [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, DOI: 10.1109/TIE.2022.3213906.
- [129]DENG J, LIU S H, LIU Y X, et al. A 2-DOF needle insertion device using inertial piezoelectric actuator [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(4):3918-3927.
- [130]ZORAN S, HANSPETER L, BERNHARD F, et al. Optical satellite communications in Europe [C]//Free-Space Laser Communication Technologies, Proceedings of SPIE. San Francisco, CA:SPIE, 2010.
- [131]NEVINK, DOYLEK, PILLSBURY A. Optomechanical design and analysis for the LLCD space terminal telescope [C]//Optical Modeling and Performance Predictions V. San Diego, CA:SPIE, 2011.
- [132]张丽敏, 王帅, 杨飞, 等. PZT 驱动快速控制反射镜的设计与试验 [J]. 机电工程, 2013, 30(7):783-787. ZHANG Limin, WANG Shuai, YANG Fei, et al. Design and test of fast steering mirror driven by PZT actuator [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2013, 30(7):783-787. (in Chinese)
- [133]付锦江, 颜昌翔, 刘伟, 等. 椭圆弧柔性铰链刚度简化计算及优化设计 [J]. 光学精密工程, 2016, 24(7):1703-1710. FU Jinjiang, YAN Changxiang, LIU Wei, et al. Stiffness calculation and optimal design of elliptical flexure hinges [J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(7):1703-1710. (in Chinese)
- [134]邵兵. 激光星间通信终端精瞄微定位系统关键技术的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [135]鲁亚飞. 快速反射镜机械结构特性设计问题研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2009.
- [136]ZHANG S J, LIU Y X, DENG J, et al. Development of a low capacitance two-axis piezoelectric tilting mirror used for optical assisted micromanipulation [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 154:107602.
- [137]CHANG Q, CHEN W, LIU J, et al. Development of a novel two-DOF piezo-driven fast steering mirror with high stiffness and good decoupling characteristic [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 159:107851.
- [138]LEGGE P. Ultrasonic drilling of ceramics [J]. Industrial Diamond Review, 1964, 24(278):20-24.
- [139]KUMAR S, WU C S, PADHY G K, et al. Application of ultrasonic vibrations in welding and metal processing: a status review [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2017, 26:295-322.
- [140]MORIWAKI T, SHAMOTO E, INOUE K. Ultraprecision ductile cutting of brittle materials by applying ultrasonic vibration [J]. CIRP Annals, 1992, 41:141-144.
- [141]KIM J, LEE E. A study of the ultrasonic-vibration cutting of carbon-fiber reinforced plastics [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1994, 43(2):259-277.
- [142]ZHOU M, WANG X, NGOI B, et al. Brittle - ductile

- transition in the diamond cutting of glasses with the aid of ultrasonic vibration[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, 121(2):243-251.
- [143]XU J, ZHENG J, DING S. The basic experimental research on the NC-creep feed ultrasonic assisted grinding ceramics [C]//*Proceedings of the 15th International Symposium on Electromachining*. Pittsburgh, PA: ISEM, 2007.
- [144]ZHANG C, SONG Y. A novel design method for 3D elliptical vibration-assisted cutting mechanism[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2019, 134:308-322.
- [145]LIU X, WU D, ZHANG J, et al. Analysis of surface texturing in radial ultrasonic vibration-assisted turning [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2019, 267:186-195.
- [146]DU P, LIU Y, DENG J, et al. A compact ultrasonic burnishing system for high precision planar burnishing: design and performance evaluation[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021, 69(8):8201-8211.
- [147]DU P, HAN L, QIU X, et al. Development of a high-precision piezoelectric ultrasonic milling tool using longitudinal-bending hybrid transduce [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2022, 222:107239.
- [148]GOZEN B, OZDOGANLAR O. A rotating-tip-based mechanical nano-manufacturing process: nanomilling [J]. *Nanoscale Research Letters*, 2010, 5(9):1403-1407.
- [149]KAWASEGIN, TAKANON, OKA D. Nanomachining of silicon surface using atomic force microscope with diamond tip [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering-Transactions of the ASME*, 2006, 128(3):723-729.
- [150]ZIMMERMANN S, TIEMERDING T, FATIKOW S. Automated robotic manipulation of individual colloidal particles using vision-based control[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2015, 20(5):2031-2038.
- [151]LU H, WANG P, RONG T, et al. Nanorobotic system for precise in-situ three-dimensional manufacture of helical microstructures[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2018, 3(4):2846-2853.
- [152]FENG Y, LIU J, LI H, et al. Deposition behavior optimization of on-demand tin droplet with gravity based on piezoelectric micro-jet [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, 192:122902.
- [153]LI K, WANG R, LIU J, et al. On-demand direct printing of tin microdots by a piezoelectric microjet: design, simulation, and experimental evaluation[J]. *Smart Materials and Structures*, 2022, 31:045017
- [154]THAKKAR D, GANGULI R. Active twist control of smart helicopter rotor-a survey[J]. *Journal of Aerospace Sciences and Technologies*, 2005, 57(4):429-448.
- [155]NITZSCHE F, ZIMCIK D. Closed-loop control tests for vertical fin buffeting alleviation using strain actuation [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2001, 24(4):855-857.
- [156]HE Y, CHEN X, LIU Z, et al. Piezoelectric self-sensing actuator for active vibration control of motorized spindle based on adaptive signal separation [J]. *Smart Materials and Structures*, 2018, 27(6):065011.
- [157]LU F, LIU Y, CHEN W, et al. Radial disturbance compensation device of cylindrical cantilever beam using embedded piezoelectric ceramics with bending mode[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2022, 172:109009.
- [158]SCHENKER P S, BAR-COHEN Y, BROWN D K, et al. Composite manipulator utilizing rotary piezoelectric motors: new robotic technologies for mars in-situ planetary science [C]//*Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*. San Diego, CA, USA: Society of Photo-Optical Instrumentat Engineers(SPIE), 1997.
- [159]全齐全, 李贺, 邓宗全, 等. 用于星球表面岩石采样的超声波钻进取心器[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2016, 47(12):4081-4089.
- QUAN Qiquan, LI He, DENG Zongquan, et al. An ultrasonic coring tool for rock-sampling on extraterrestrial planets [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2016, 47(12):4081-4089. (in Chinese)
- [160]赵亮亮. 面向折展机构的足式直线压电驱动器及驱动电源的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2017.
- [161]闫纪朋. 面向可旋转式套筒伸展机构的两自由度压电超声电机研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2017.
- [162]郑伟. 讲好“嫦五”奔月背后的“江苏智慧”[J]. *记者观察*, 2021(14):140-141.
- ZHENG Wei. Talk about the "Jiangsu Wisdom" behind the "Changwu" flying to the moon[J]. *Journalists Observation*, 2021(14):140-141. (in Chinese)
- [163]杨淋, 赵淳生. 军民两用高性能超声电机的研发和产业化[J]. *军民两用技术与产品*, 2018(9):40-43.
- YANG Lin, ZHAO Chunsheng. R&D and industrialization of military and civilian high-performance ultrasonic motor [J]. *Dual Use Technologies & Products*, 2018(9):40-43. (in chinese)

- [164]DU E, CUI H, ZHU Z. Review of nanomanipulators for nanomanufacturing [J]. *International Journal of Nanomanufacturing*, 2006, 1(1):83-103.
- [165]SHI C, LU D, YANG Q, et al. Recent advances in nanorobotic manipulation inside scanning electron microscopes [J]. *Microsystems and Nanoengineering*, 2016, 2:16024.
- [166]LI X, CHEAH C. A simple trapping and manipulation method of biological cell using robot-assisted optical tweezers: singular perturbation approach [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 64(2): 1656-1663.
- [167]李治廷. 眼科显微手术辅助机器人视网膜血管注药器研制[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2019.
- [168]YU H, LIU Y, DENG J, et al. Bioinspired multilegged piezoelectric robot: the design philosophy aiming at high-performance micromanipulation[J]. *Advanced Intelligent Systems*, 2022, 4(3):2100142.
- [169]MCCLINTOCK H, TEMEL F Z, DOSHI N, et al. The milliDelta: a high-bandwidth, high-precision, millimeter-scale Delta robot[J]. *Science Robotics*, 2018, 3(14):3018.
- [170]YANG X, CHEN Y, CHANG L, et al. Bee+: a 95-mg four-winged insect-scale flying robot driven by twinned unimorph actuators [J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2019, 4(4):4270-4277.
- [171]LI J, DENG J, LIU Y, et al. A linear piezoelectric actuator based on working principle of three-petal mouth of a rabbit[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021, 69(5):5091-5099.
- [172]BAISCH A, SREETHARAN P, WOOD R, et al. Biologically-inspired locomotion of a 2g hexapod robot [C]//IEEE/RSJ 2010 International Conference on Intelligent Robots and Systems. Taipei, China: IEEE, 2010.
- [173]WU Y, YIM J K, LIANG J, et al. Insect-scale fast moving and ultrarobust soft robot[J]. *Science Robotics*, 2019, 4(32):1594.
- [174]LIU P, WEN Z, LI J. A piezoelectric in-pipe micro robot actuated by impact drive mechanism [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 12:2320-2326.
- [175]XING J, NING C, LIU Y, et al. A piezoelectric inertial robot for operating in small pipelines based on stick-slip mechanism: modelling and experiment [J]. *Frontiers of Mechanical Engineering*, DOI: 10.1007/s11465-022-0697-z.
- [176]YAN S, ZHANG F, QIN Z, et al. A 3-DOFs mobile robot driven by a piezoelectric actuator [J]. *Smart Materials and Structures*, 2006, 15(1):N7-N13.
- [177]FUCHIWAKI O. Insect-sized holonomic robots for precise, omnidirectional, and flexible microscopic processing: Identification, design, development, and basic experiments [J]. *Precision Engineering*, 2013, 37(1):88-106.
- [178]LIU Y, LI J, DENG J, et al. Arthropod-metamerism-inspired resonant piezoelectric millirobot [J]. *Advanced Intelligent Systems*, 2021, 3(8):2100015.
- [179]WANG W, DENG J, LIU Y, et al. Design, modeling and experiment of a miniature biped piezoelectric robot [J]. *Smart Materials and Structures*, 2022, 31:075004.



第一作者简介:刘英想,男,1982年6月生,博士、教授、博士生导师。国家杰出青年科学基金获得者、全国优秀博士论文获得者、哈尔滨工业大学青年科学家工作室负责人。主要研究方向为压电驱动理论与技术、机器人理论与技术。出版专著2部,在IEEE TIE等国际权威期刊发表论文160余篇(IEEE汇刊论文50余篇),获授权发明专利120余项。曾获黑龙江省自然科学二等奖、黑龙江省高校科学技术一等奖、黑龙江省技术发明二等奖。担任IEEE Transactions on Industrial Electronics、IEEE Transactions on Robotics 和 IEEE Access 编委(Associate Editor)、Materials 编委(Topic Editor)、Applied Sciences 和 Actuators 特邀编辑(Guest Editor)、《振动、测试与诊断》编委、《振动工程学报》青年编委,中国机械工程学会高级会员、IEEE Senior Member、中国机械工程学会机器人分会第1届委员会委员、中国人工智能学会智能机器人专业委员会委员。E-mail: liuyingxiang868@hit.edu.cn