

压电叠堆致动器在大刚度负载下位移损失因素分析

张段芹,杨闻涛,张敬航,陈瑶瑶,刘旭玲

(郑州轻工业大学 机电工程学院,河南 郑州 450005)

摘要:通过测量大刚度负载下压电叠堆微动台的位移输出特性,表明其输出位移明显小于商用压电叠堆说明书中的预期值,且随着压电叠堆上预压力的增大,其输出位移先增大后减小。经分析发现,在大刚度负载、低预压力下,压电叠堆与负载之间的机械接触刚度与叠堆刚度在同一数量级,驱动端有效刚度的减小将导致输出位移损失;随着预压力的增大,压电叠堆内非 180° 畴重定向增强了压电效应,且机械接触刚度增大直至极限值。但叠堆的压电系数在压力过大时会因退极化而降低,故微动台总体上将有较大的位移损失,且在接触刚度和退极化两种因素作用下,位移在某预压力时达到极值。

关键词:压电叠堆致动器;大刚度负载;位移损失;预压力;微动台

中图分类号:TP271.4;TN384 **文献标识码:**A

Analysis of Displacement Loss Factors in Piezoelectric Ceramic Stack Actuators Under High-Stiffness Load

ZHANG Duanqin, YANG Wentao, ZHANG Jinghang, CHEN Yaoyao, LIU Xuling

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450005, China)

Abstract: The displacement output characteristics of a piezoelectric stack micropositioner under high-stiffness load were measured, revealing that the output displacement is notably lower than expected. This displacement initially increases and then decreases as preload increases. It was found that under high-stiffness load and low preload, the mechanical contact stiffness between the piezoelectric stack and the load is of the same order of magnitude as the stack stiffness. This reduces the effective stiffness of the driving end, leading to displacement loss. As preload increases, non- 180° domain reorientation within the piezoelectric stack enhances the piezoelectric effect, and mechanical contact stiffness increases until it reaches its limit. However, at higher loads, the piezoelectric coefficient of the stack decreases rapidly owing to depolarization. Overall, the micropositioner exhibits significant displacement loss, with displacement reaching its peak at a specific preload owing to the combined influence of these two factors.

Key words: piezoelectric stack actuator; high-stiffness load; displacement loss; preload; micropositioner

0 引言

压电致动器利用逆压电效应将电能转换为机械能,是精密定位器、微型超声电机和自适应机械阻尼器中的关键部件。最常见的两种致动器结构形式有叠堆(或多层)式和双晶片式。叠堆致动器具有驱动电压低(对于软PZT陶瓷)、响应快、驱动推力高及机电耦合能力强等优点,但其输出位移较小,通常为叠堆长度的0.1%。双晶片式致动器通常产生几百微米的大弯曲位移,但响应较慢且驱动力较低^[1-2]。压电叠堆致动器主要分为电脉冲驱动和伺服直流驱动两种模式。电脉冲驱动已应用于

点阵式喷头、丰田汽车电子控制悬架系统、共轨式燃油喷射阀^[3-4]等。在伺服直流驱动模式下,压电叠堆致动器与控制器等相结合进行超精密定位,应用于超精密制造、光学定位与跟踪^[5]等需要高精度运动控制领域。已商业化的直流驱动具有纳米级位移精度,但负载通常不高于100 N,且对响应速度的要求不苛刻。对于要求响应快、负载大且高精度位移伺服或力伺服的应用场合,如压电式流量或压力伺服阀^[6],以及快速刀具伺服系统^[7-8],目前仍是压电叠堆应用研究的热点。

压电叠堆致动器工作在高频小电场驱动下的

收稿日期:2024-09-11

基金项目:河南省重点研发与推广专项(242102220003);河南省交通运输厅科技计划项目(2023-5-3,2020J2)

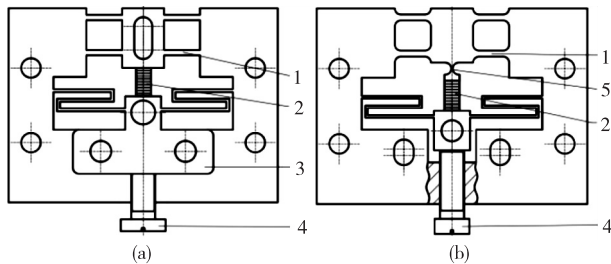
作者简介:张段芹(1981-),女,河南省浚县人,副教授。

机电行为已有研究。针对低频大电场驱动且较大负载力下压电叠堆致动器的性能问题, Mitrovic等^[10]研究表明, 压电致动器的刚度系数和压电系数明显受到电场和力载荷条件的影响, 说明除了迟滞和蠕变非线性外, 压电叠堆致动器在大电场和大负载力下表现出复杂的非线性^[10]。德国PI公司在其产品手册上注明了压电陶瓷驱动器分别在空载、恒值负载、低刚度弹簧负载情况下的输出位移曲线, 但未说明压电叠堆致动器在大刚度负载下的输出特性。对于伺服阀或快刀伺服等应用场合, 需要较高频率下的高精密大位移驱动。此场合下压电叠堆致动器可能会受到大刚度负载作用^[11], 而对在此工况下压电致动器的输出特性研究较少。本文对压电叠堆致动器在大刚度负载下的位移输出特性进行测试, 发现其在大刚度负载下的输出位移明显小于商用压电叠堆说明书中的预期值, 由此研究了在不同的刚度负载和预压力下的输出位移, 并重点分析了位移损失因素。

1 实验

1.1 实验装置

实验采用自制预紧力可调的压电陶瓷叠堆致动的微动台^[12], 其主要包括带有固定盖板的螺栓预紧部分、压电致动器和柔性导向部分, 导向机构的弹性恢复力作用在压电叠堆上, 故前者可被认为是后者的负载。图1为两种微动台的结构图。



1-导向机构; 2-压电叠堆致动器; 3-固定盖板; 4-预紧螺栓; 5-柔性铰链

图1 两种压电叠堆致动微动台的结构图

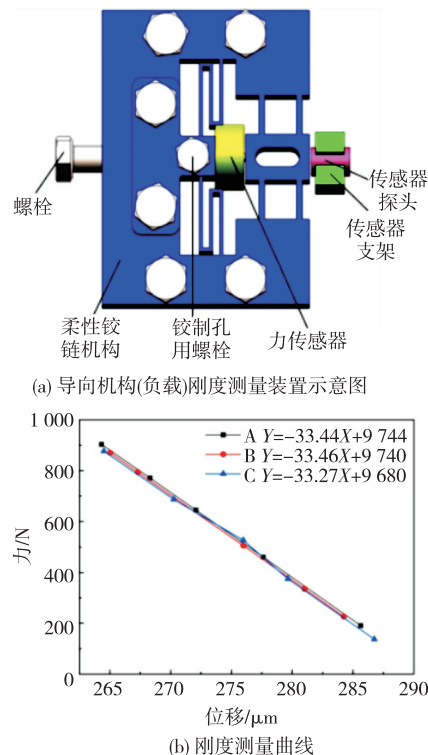
两者不同之处在于导向机构的刚度系数, 以及在压电叠堆和导向机构之间是否有直圆型柔性铰链。实验采用的压电陶瓷致动器材料为软PZT陶瓷, 尺寸为 $5\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 10\text{ mm}$, 最大安全驱动电压为 120 V 。压电陶瓷驱动电源采用芯明天E01.D2型。采用两路的米铱电容式传感器测量位移, 量程分别为 $200\text{ }\mu\text{m}$ 和 $500\text{ }\mu\text{m}$ 。采用国产商用的应变式力传感器进行力测量, 其量程为 1 kN 。采用NI ELVIS II数

据采集卡实现电驱动信号发生以及两路位移和力信号采集。

压电叠堆致动器的最大输出位移、最大输出力和纵向刚度系数都是重要的应用参数。已有文献表明, 相比于无负载下的压电致动器, 弹性负载下的压电致动器的输出位移有所损失, 实际输出位移会受到压电叠堆致动器和弹性负载的刚度系数之比的影响。本实验采用的压电叠堆, 其同样规格、不同商家标称的轴向刚度系数约为 $100\text{ N}/\mu\text{m}$, 且有 $10\% \sim 20\%$ 误差。目前, 压电叠堆致动器的刚度系数的测量设备复杂且造价高^[13], 因此, 本文参考商用标出的刚度值, 即 $90\text{ N}/\mu\text{m}$ 。

1.2 导向机构(负载)刚度测量

由于微位移平台的实际输出位移受到导向机构的刚度系数影响, 故对其进行刚度系数测量。将力传感器置于原来压电叠堆放置的位置, 拆卸掉固定盖板, 通过旋转预紧螺栓将推力通过力传感器传递到导向机构上, 并利用位移传感器测量导向机构的变形位移量。图2(a)为负载刚度测量示意图。在作用力小于 1 kN 时, 测得作用力与位移曲线如图2(b)所示。



(a) 导向机构(负载)刚度测量装置示意图

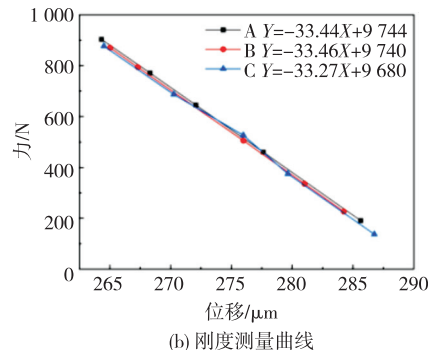


图2 导向机构刚度测量原理与数据曲线

由图2(b)可见, 曲线显示出良好的线性度, 由曲线斜率可获得导向机构的刚度系数。两种不同

尺寸的导向机构的刚度系数分别为 $33 \text{ N}/\mu\text{m}$ 和 $71 \text{ N}/\mu\text{m}$ 。

1.3 微动台位移输出特性测试

由于压电叠堆不能承受拉力,故在准静态精密定位时设置预压力约为 200 N 。但对于较高频率应用时,如快刀伺服或伺服阀等,为了提高其使用寿命,要求预压力大于加速度引入的动态拉应力。为了适用不同的工作频率要求,设计了可调预压力的位移台。通过预紧螺栓调节施加到压电叠堆上的预压力,通过测量已知刚度系数的导向机构的变形位移间接获得预压力值。预压力调整结束后,通过安装固定盖板以确保压电叠堆产生的后座位移最小化。在施加驱动电压时采用两路位移传感器分别测量压电叠堆的预紧后座位移和前端导向机构的位移(即名义上的输出位移)。图3为位移特性测试装置的实物图。实验中调整好预压力后,驱动电压则以 5 V 的步长从 0 增大到 90 V ,再减小到 0 ,同时测量两路位移信号。由于压电叠堆致动器首次加载电场后存在残余位移或应变,为了保证实验数据的可靠性与准确性,同等实验条件下每个实验至少重复3次,且重复实验中两路位移传感器的值不清零。在调整预压力操作中,先保持驱动电源电压为 0 ,松开固定盖板,然后调整预紧螺栓施加预压力,最后将固定盖板再次固定。再次通过导向机构的变形位移获得调整后的预压力数值,开始不同预压力下的电场加载实验。

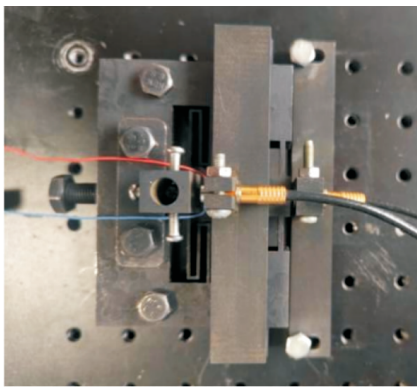
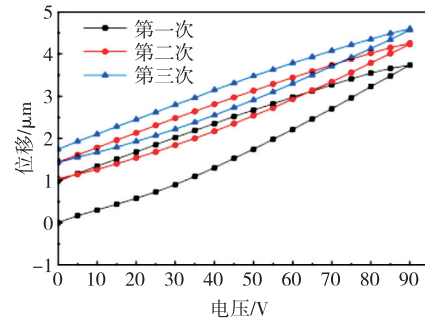


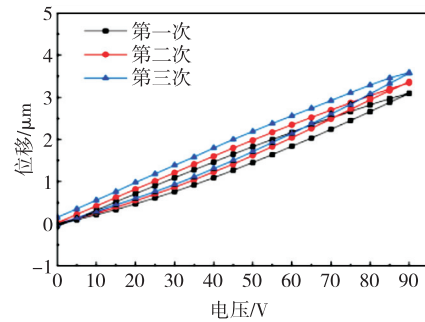
图3 位移特性测试装置的实物图

本文对两种负载刚度系数的微动台在4种不同预压力下的位移输出特性进行测试。对于负载刚度系数为 $33 \text{ N}/\mu\text{m}$ 的微动台,4次施加的预压力分别为 136 N 、 275 N 、 370 N 和 427 N ,对应压电叠堆上的压强分别为 5.4 MPa 、 11 MPa 、 14.8 MPa 和

17 MPa 。图4给出了在较小的预压力下两种工况的输出位移与驱动电压之间的关系曲线。



(a) 136 N 预压力下的位移-电压曲线



(b) 275 N 预压力下的位移-电压曲线

图4 不同预压力下的位移输出特性曲线

图5(a)给出了 370 N (相当于 14.8 MPa) 预压下的后座位移与电压关系曲线。由图可见,在电场上升和下降过程中,压电叠堆预紧端的后座位移测量值几乎总是朝后座方向增大且数值最大约 $0.6 \mu\text{m}$,说明位移与激励电场、预压力无直接关联。因此,该位移被认为是传感器电路或探头支架引入的信号漂移,分析时可忽略。除去第一次加载后的残余应变,随着预压力的增大,实际输出位移的平均值分别为 $3.17 \mu\text{m}$ 、 $3.35 \mu\text{m}$ 、 $3.48 \mu\text{m}$ 和 $3.45 \mu\text{m}$,显然最大平均输出位移未超过 $3.5 \mu\text{m}$,远小于无负载时加载同样驱动电压下的输出位移 ($7.5 \mu\text{m}$)。预压力对压电叠堆的输出位移特性也有影响,输出位移随着预压力的增大而增大,但会出现拐点;迟滞现象随着预压力的增大而有所缓解。此外,当预压力 $\geq 14.8 \text{ MPa}$ 时,电压上升和下降曲线在低电压位置出现交叉,返回零电压时输出位移甚至出现负值,如图5(b)所示。

采用同样的实验方法对负载刚度系数为 $71 \text{ N}/\mu\text{m}$ 的微动台进行输出位移测试。预压力对输出位移的影响规律与上文相同。不同的是,当最大驱动电压为 90 V 时,输出最大平均位移为 $1.62 \mu\text{m}$ 。

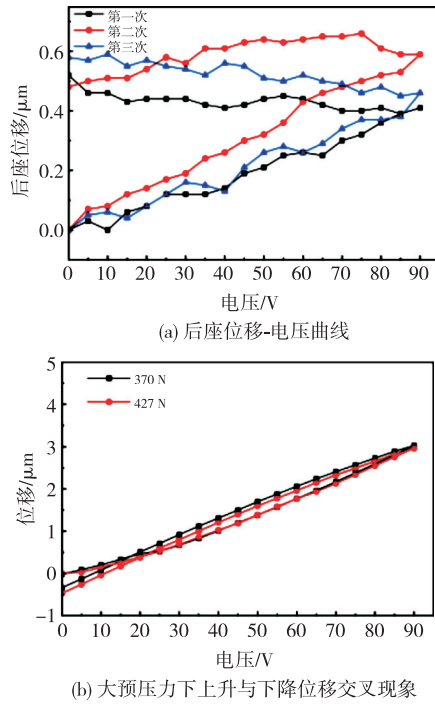


图5 后座位移与大预压力下的位移曲线

2 结果分析与讨论

2.1 输出位移损失分析

参考商用压电叠堆产品说明书,压电叠堆在低刚度负载条件下的输出位移为

$$\Delta x = x_0 \left(\frac{K_p}{K_p + K_L} \right) = x_0 \left(\frac{1}{1 + K_L/K_p} \right) \quad (1)$$

式中: x_0 与 Δx 分别为压电叠堆无机械负载时的输出位移与有负载时的输出位移; K_p 与 K_L 分别为压电叠堆与负载的刚度系数。式(1)表明,压电叠堆的位移损失大小取决于机械负载的刚度,通常建议负载的刚度不超过压电叠堆刚度的10%。若想产生较大出力而不是位移时,则负载的刚度需要大于甚至远大于压电叠堆的刚度。无预压力大刚度负载条件下的有效出力公式为

$$F_{\text{eff}} = F_{\text{max}} \left(\frac{K_L}{K_p + K_L} \right) = F_{\text{max}} \left(\frac{1}{1 + K_p/K_L} \right) \quad (2)$$

$$F_{\text{max}} = K_p x_0 \quad (3)$$

式中: F_{max} 为最大阻塞力; F_{eff} 为有效出力。

当压电叠堆工作在既需要输出位移,又需要足够大出力或因快速定位要求较高带宽时,机械负载的刚度可能会接近压电叠堆刚度的1/2或更大,那么低刚度负载条件下的输出位移公式不再适用。这种情况下需要考虑机械结合面的接触刚度和原来近似为刚体材料部分的变形。图6为微动台在大

刚度负载条件下的静态力学简化模型。图中引入压电叠堆后座(或预紧部分)的刚度系数 K_b 、压电叠堆致动端与负载(或导向机构)机械接触面的法向刚度系数 K_c 。该模型中后座、压电叠堆和接触面串联,压电叠堆在驱动电压和机械负载同时作用下的输出位移 Δx 与负载实际输出位移 y 满足如下关系:

$$K_p(x_0 - \Delta x) = K_L y = K_b x_b = K_c x_c \quad (4)$$

$$\Delta x = y + x_b + x_c = y + \frac{K_L}{K_b} y + \frac{K_L}{K_c} y \quad (5)$$

式中 x_b 和 x_c 分别为后座的压缩位移和接触面的压缩位移。由此推导出:

$$y = \frac{x_0}{1 + K_L \left(\frac{1}{K_p} + \frac{1}{K_b} + \frac{1}{K_c} \right)} \quad (6)$$

由式(6)可知,大刚度负载时,由于接触刚度和底座的非理想无穷刚度造成微动台的输出位移进一步损失,压电驱动的有效刚度相当于压电叠堆与接触刚度和后座刚度串联后的刚度,即压电驱动的有效刚度减小。

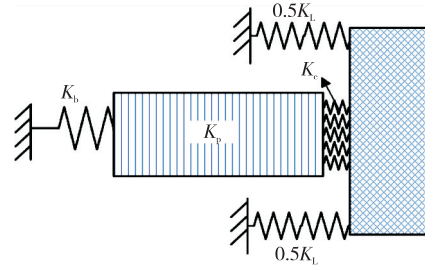


图6 大刚度负载条件下的微动台的静态力学简化模型

本实验微动台选用65Mn弹簧钢材料,快走丝线切割机加工,其表面粗糙度约为 $3.2 \mu\text{m}$ 。已有研究表明,接触表面越粗糙,其接触刚度越低,且法向接触刚度随着法向载荷的增加而增加^[14]。本文参考文献[15]构建了粗糙表面的有限元模型,仿真分析了尺寸为 $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 的接触面在不同粗糙度和不同法向载荷下的刚度,所得刚度数据如图7所示。由于本实验中压电叠堆的截面面积为 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$,故其接触刚度比仿真值小36倍。由此可知,当载荷为 10 MPa 时,接触刚度约为 $65 \text{ N}/\mu\text{m}$ 。此接触刚度与负载刚度、压电叠堆刚度在同一数量级。取压电叠堆和后座刚度系数分别为 $90 \text{ N}/\mu\text{m}$ 和 $300 \text{ N}/\mu\text{m}$,根据式(1)、(6)计算可得负载输出位移分别为 $5.47 \mu\text{m}$ 和 $3.8 \mu\text{m}$,后者更接近实验值 $3.5 \mu\text{m}$ 。

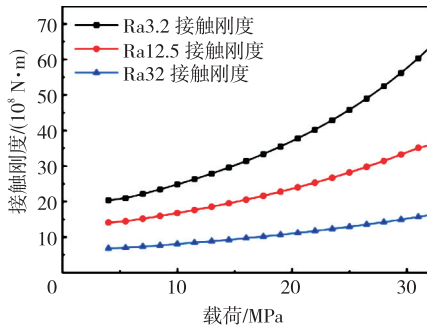


图 7 不同接触面粗糙度下接触刚度与载荷之间的关系曲线

综上所述,当负载刚度较大时,压电叠堆与微动台间机械接触面的法向刚度会加剧位移损失。为了减小位移损失,可采取如下措施:通过增大压电叠堆的横截面积来提高其自身的刚度系数;通过提高压电叠堆与负载接触面的粗糙度、光洁度以及增大接触面预紧力来增大接触刚度;提高压电叠堆后座的刚度系数。

对于微动台(见图 1(b)),除负载刚度变为 $71 \text{ N}/\mu\text{m}$ 外,还在压电叠堆和导向机构中间增加了一个直圆型柔性铰链,其设计目的是为了避免压电叠堆受到弯曲力或侧向力。但在负载刚度较大时,此柔性铰链会减小压电叠堆致动器的有效刚度,导致负载输出位移减小。

2.2 预压力对输出位移的影响分析

由 1.3 节的输出位移实验数据可知,在最大驱动电压 90 V 时,随着初始预压力的增大,最大输出位移先增大后减小。根据式(6)可知,输出位移与无负载输出位移、若干刚度系数有关。由于负载的刚度测量曲线的线性度较好(见图 2(b)),故认为负载刚度系数为常数;而接触刚度随着预压力的增大而增大,从而减小了接触位移损失。下面将分析预压力如何影响压电叠堆的刚度系数和无负载输出位移。

当沿压电陶瓷的极化方向施加小应力和/或弱电场时,极化方向上的应变和电位移可用第一类压电方程表示,即

$$S_3 = s_{33}^E T_3 + d_{33} E_3 \quad (7)$$

$$D_3 = d_{33} T_3 + \epsilon_{33}^T E_3 \quad (8)$$

式中: S_3 、 T_3 、 E_3 和 D_3 分别为压电叠堆内部纵向的应变、应力、电场强度和电位移分量; d_{33} 、 s_{33}^E 、 ϵ_{33}^T 分别为压电叠堆纵向的压电系数、弹性柔顺系数和介电系数。第一类压电方程适用于电场强度和应力信号很小且准静态加载场合,压电响应是合理的线

性和可逆的。但当对压电叠堆施加较大的电场或应力时,输出位移在有限时间内发生的不可逆变化会引起迟滞^[10]。Esteves 等^[16]通过实验证实,随着压应力的增加,软 PZT 压电叠堆的压电系数 d_{33} 先增大再降低;在较低预压力下,电场诱导相变和非 180° 畴重定向是压电效应增强的主因,而当预压力较大时,应力夹紧影响畴重定向率,压电材料开始出现退化现象,导致 d_{33} 降低,且随着应力的增大,退极化越发严重。由于压电系数 d_{33} 是唯一影响无负载下输出位移的因素,所以随着压应力的增加,无负载输出位移先增大再降低。

通过分析四类压电方程可知,电场强度为常数(即电学短路)时压电材料柔顺系数 s_{33}^E ,与电位移为常数(即电学开路)时柔顺系数 s_{33}^D 之间满足如下关系:

$$s_{33}^D = s_{33}^E [1 - (k_{33})^2] \quad (9)$$

式中 k_{33} 为压电耦合系数。由式(9)可知,电学开路时柔顺系数小于电学短路时柔性系数,即开路时压电叠堆的刚度大于其短路时的刚度。在较高应力和电场作用下,迟滞和退极化等因素会使压电叠堆的刚度系数稍微增大。另外,从机械角度分析可知,压电叠堆为陶瓷层与电极层堆叠多层共烧的压电陶瓷,插入电极层会引起压电叠堆的机械强度和刚度等机械特性变弱,而预压力在提高叠堆抗拉能力的同时也会提高其刚度。

综上所述,随着预压力和负载压力的增大,压电效应增强促使无负载位移增大,压电叠堆的刚度和接触刚度也会稍微增大,进而引发微动台输出位移增大。但是随着预压力或压力负载的进一步增大,接触刚度和叠堆刚度增大变缓或达到极限,而因过大的压力造成的退化使压电系数降低,进而使输出位移减小。

3 结束语

通过测量较大负载刚度的压电叠堆微动台的输出位移,发现微动台的输出位移损失大于预期值,且随着预压力的增大,输出位移先增大后减小。通过分析发现,当负载刚度较大时,压电叠堆与负载之间的机械接触刚度会导致压电驱动端的有效刚度减小,进而加剧了微动台的实际输出位移损失。随着预压力的增大,压电叠堆的端面与负载之间的接触刚度增大直至极大值,且压电体内畴重定

向均能促进输出位移增大,但当预压力超过 14.8 MPa 时,压电系数因退极化而降低,则输出位移随着压力的增大而减小。

参考文献:

- [1] UCHINO K. Advanced piezoelectric materials: Science and technology[M]. Cambridge, UK: Woodhead Publishing, 2017.
- [2] DING B, LI X, LI C, et al. A survey on the mechanical design for piezo-actuated compliant micro-positioning stages [J]. Review of Scientific Instruments, 2023, 94(10):101502.
- [3] OUYANG G, AN S, LIU Z, et al. Common rail fuel injection technology in diesel engines[M]. Hoboken, USA: John Wiley & Sons, 2019.
- [4] HAN S W, SHIN Y S, KIM H C, et al. Study on the common rail type injector nozzle design based on the nozzle flow model[J]. Applied Sciences, 2020, 10(2):549.
- [5] RAUHALA J. Implementation of a controller for a piezo-actuated Fabry-Perot interferometer[D]. Finland: Aalto University School of Electrical Engineering, 2024.
- [6] TAMBURRANO P, SCIATTI F, PLUMMER A R, et al. A review of novel architectures of servovalves driven by piezoelectric actuators[J]. Energies, 2021, 14(16): 4858.
- [7] HATEFI S, SMITH F. Design and analysis of ultra-precision smart cutting tool for in-process force measurement and tool nanopositioning in ultra-high-precision single-point diamond turning[J]. Micromachines, 2023, 14(10): 1857.
- [8] LIU Y T. Recent development of piezoelectric fast tool servo (FTS) for precision machining[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2024, 25(4): 851-874.
- [9] MITROVIC M, CARMAN G P, STRAUB F K. Response of piezoelectric stack actuators under combined electro-mechanical loading[J]. International Journal of Solids and Structures, 2001, 38(24/25): 4357-4374.
- [10] KORUZA J, FRANZBACH D J, SCHADER F, et al. Enhancing the operational range of piezoelectric actuators by uniaxial compressive preloading[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2015, 48(21):215302.
- [11] YONG Y K. A new preload mechanism for a high-speed piezoelectric stack nanopositioner [J]. Mechatronics, 2016, 36: 159-166.
- [12] ZHANG D, LI M, DOU L, et al. Output characteristics test of piezo-stack actuators for driving high stiffness loads with different preload [J]. International Journal of Nanomanufacturing, 2023(2):18.
- [13] 童兴野. BNT 基无铅多层压电陶瓷器件制备及性能测试表征[D]. 成都:中国科学院大学, 2022.
- TONG Xingye. Preparation and characterization of BNT based lead-free multilayer piezoelectric ceramic devices[D]. Chengdu: University of Chinese Academy of Sciences, 2022.
- [14] 党会鸿. 机械结合面接触刚度研究[D]. 大连:大连理工大学, 2015.
- DANG Huihong. The research on contact stiffness of joint surface[D]. Dalian: Dalian University of Industry, 2015.
- [15] 吴少雷, 冯玉, 吴凯, 等. 基于有限元的三维粗糙表面电接触模型构建与仿真分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2018, 41(11):1441-1445.
- WU Shaolei, FENG Yu, WU Kai, et al. Construction and simulation analysis of 3D rough surface electrical contact model based on finite element method[J]. Journal of Hefei University of Technology, 2018, 41(11): 1441-1445.
- [16] ESTEVES G, FANCHER C M, RÖHRIG S, et al. Electric-field-induced structural changes in multilayer piezoelectric actuators during electrical and mechanical loading[J]. Acta Materialia, 2017, 132: 96-105.