

## 应用于高速离子电导扫描成像的双压电定位平台

庄健, 王志武, 廖晓波

引用本文:

庄健, 王志武, 廖晓波. 应用于高速离子电导扫描成像的双压电定位平台[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(10): 2203–2214.

ZHUANG Jian, WANG Zhi-wu, LIAO Xiao-bo. Dual-stage piezo nanopositioner for high-speed ion conductance microscopy imaging[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(10): 2203–2214.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/OPE.20202810.2203>

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 双向作动大行程二自由度稳像机构

Two-freedom image stabilization institution of large stroke of bidirectional actuation

*光学精密工程*. 2017, 25(6): 1494–1501 <https://doi.org/10.3788/OPE.20172506.1494>

### 压电式高精度位移微扫描控制系统设计

Micro-scanning control system design for piezoelectric high-precision displacement

*光学精密工程*. 2016, 24(10s): 454–460 <https://doi.org/10.3788/OPE.20162413.0454>

### 双压电驱动高频喷射点胶阀的设计与实验

Design and Experiment of High Frequency Jetting Dispenser Driven by Double Piezoelectric Stacks

*光学精密工程*. 2019, 27(5): 1128–1137 <https://doi.org/10.3788/OPE.20192705.1128>

### 空间超大幅宽低畸变红外成像扫描控制

Scanning control of spaceborne infrared imaging with super-swath and low distortion

*光学精密工程*. 2018, 26(1): 208–217 <https://doi.org/10.3788/OPE.20182601.0208>

### X轴分离式高速原子力显微镜系统设计

Design of high-speed atomic force microscope with a separated X-scanner

*光学精密工程*. 2018, 26(3): 662–671 <https://doi.org/10.3788/OPE.20182603.0662>

文章编号 1004-924X(2020)10-2203-12

# 应用于高速离子电导扫描成像的双压电定位平台

庄 健<sup>1\*</sup>, 王志武<sup>1</sup>, 廖晓波<sup>1,2</sup>

- (1. 西安交通大学 机械工程学院, 陕西 西安 710049;
2. 西南科技大学 制造科学与工程学院, 四川 绵阳 621010)

**摘要:**为了解决离子电导显微成像系统中传统跳跃工作模式高速扫描时存在的运动过冲以及成像速度慢的问题,提出了一种基于双压电纳米定位平台的高速扫描方法。根据扫描系统需求提出了采用大行程-慢速和小行程-快速压电纳米定位平台串联的设计方案,满足探针 Z 向测量量程要求并可快速回提探针。以菱形位移放大机构和导向机构为构型,设计并确定双压电驱动扫描平台的关键几何参数。基于解析模型计算了定位平台的静力学性能参数并采用有限元分析方法分析了双压电平台的静/动态特性。最后,加工了双压电平台样机并进行了离子电流过冲和形貌扫描成像的测试。实验结果表明:所设计的双压电驱动探针定位平台在保证成像稳定的前提下可使下探速度至少达到 500 nm/ms,有效地减小了电流过冲,提高了系统成像效率。

**关键词:**离子电导扫描成像系统;双压电扫描器;位移放大机构;跳跃工作模式

**中图分类号:** TN384 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20202810.2203

## Dual-stage piezo nanopositioner for high-speed ion conductance microscopy imaging

ZHUANG Jian<sup>1\*</sup>, WANG Zhi-wu<sup>1</sup>, LIAO Xiao-bo<sup>1,2</sup>

- (1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
  2. School of Manufacturing Science and Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)
- \* Corresponding author, E-mail: zhuangjian@mail.xjtu.edu.cn

**Abstract:** To address motion overshoot and low imaging speed of the hopping mode unconventional scanning ion-conductance microscopy (SICM), this paper proposes a high-speed scanning method based on a dual-stage nanopositioning system. A design scheme consisting of a long-range actuator operating along with a high-speed actuator is proposed, according to the need for the SICM measurement range in the Z direction. The pipet probe can approach the sample surface with a high speed, without contact. Rhombus-type amplification and guiding mechanism are used as the basic configuration. The key parameters of the dual-stage nanopositioner are determined by an analytical modeling. The static and dynamic characteristics of the dual-stage nanopositioner are evaluated via finite-element analysis.

收稿日期:2020-04-23;修订日期:2020-06-05.

基金项目:国家自然科学基金面上项目(No. 51375363);陕西省科技厅工业公关项目(No. 2013GY2-04);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(No. Z201707084)

The final prototype is processed and overshoot and imaging experiments are performed. Experimental results show that the designed  $Z$  direction nanopositioning stage driven by the dual actuator can significantly improve the probe approach speed to at least 500 nm/ms, which effectively improves the imaging efficiency of the hopping mode, without reducing the imaging stability.

**Key words:** ion conductance microscopy imaging system; dual-nanopositioning stage; amplification mechanism; hopping mode

## 1 引 言

以高的时间-空间分辨率捕捉细胞等生物样品的动态响应过程在生命科学研究领域中具有重要意义,然而能够实现该功能的科学仪器并不多。扫描离子电导显微技术(Scanning ion conductance microscopy, SICM)能够在细胞培养环境下以无损伤的方式在纳米尺度测量活细胞的形态、力学和电学特性<sup>[1-2]</sup>,已在包括药物、纳米颗粒作用下细胞的动态响应研究中得到了广泛应用<sup>[3-4]</sup>。常用的 SICM 扫描模式有直流模式、调制模式和跳跃模式等<sup>[1,5-7]</sup>。直流和调制模式采用的是连续扫描模式,不适合形貌高度突变样品的扫描成像<sup>[3]</sup>。跳跃模式是一种非连续扫描模式,由于具备对高度复杂表面形貌样品的成像能力,已发展为 SICM 的主流扫描模式<sup>[6]</sup>。在跳跃模式中,在每一测量点探针均需由远到近逼近样品表面探测表面的高度,这一特点使其成像速度极慢。限制跳跃模式速度的主要因素有探针在  $Z$  向运动的跳跃幅值、探针下探速度等。跳跃幅值通常凭经验设定;探针下探速度由探针尖端的开口尺寸、以及  $Z$  向压电定位器响应快慢决定<sup>[8-9]</sup>。常规 SICM 探针的下探速度仅为 20~100 nm/ms,严重制约着成像的快速性。同一开口尺寸的探针,下探速度越大,过冲越大,很容易使探针碰撞样品并断裂。因此,减小探针高速下探时的过冲成为提高扫描速度的关键。提高下探速度的常用方法是提高  $Z$  向定位平台的固有频率,从而减小平台的响应时间<sup>[9-10]</sup>,但是难免会降低探针  $Z$  向的测量行程<sup>[11]</sup>。日本学者 Ando 设计了一种高速 XYZ 压电定位平台,可以使 10 nm 开口半径探针的下探速度达到 400 nm/ms,但是  $Z$  向测量范围

仅为 6  $\mu\text{m}$  且三轴存在交叉耦合,降低了定位平台的精度<sup>[9]</sup>。德国学者 Schäffer 采用样品在  $Z$  向运动的扫描器设计方案,提高了 SICM 的扫描速度(对 A6 细胞成像一帧 0.6 s),但是  $Z$  向压电定位平台的最大行程仅为 5  $\mu\text{m}$ ,限制了测量高纵横比样品的能力<sup>[10]</sup>。

由此可见, $Z$  向压电定位平台设计要兼顾  $Z$  向测量范围避免高速下探的过冲就变得尤为重要。由于压电堆式作动器的最大输出位移一般为其自身长度的 0.1%,直接驱动的设计方案很难满足 SICM 的  $Z$  向测量行程要求。而位移放大机构,例如杠杆放大、三角形放大、桥式放大等<sup>[11-13]</sup>,能够实现输出位移的放大。柔性放大机构(包括柔性铰链等)具有无摩擦、免润滑、免装配、放大倍数高等优点<sup>[14-15]</sup>。然而,使用放大机构会降低系统的动态性能和输出刚度。采用压电作动器直接驱动方案(对位移无放大作用),可直接提供预紧力,平台具有结构紧凑、体积小的优点,有利于提高动态性能<sup>[16-17]</sup>。因此,联合采用位移放大与直接驱动的方案,是 SICM 高速扫描兼顾测量范围与快速性的可选配置。本课题组之前提出了一种调制电流式 SICM,但是该模式采用小压电平台进行正弦振动来产生调制电流信号,随着正弦振动频率的提高,易于引起大行程定位平台的机械共振,限制了扫描速度的提高<sup>[16]</sup>。

基于以上考虑,本文设计了一种用于提高 SICM 跳跃工作模式的  $Z$  向双压电定位平台。该平台采用位移放大机构放大压电作动器的输出位移,采用弹性薄板直接驱动实现小压电作动器的高速运动。将大行程和高速压电定位平台串联,即满足高纵横比样品的测量,又提升了探针接近速度,真正地物理结构上解决了跳跃模式过冲大、成像慢的问题。

## 2 双压电定位平台总体设计

### 2.1 扫描成像系统的硬件构成

基于双压电定位平台的 SICM 系统配置如图 1 所示。样品和探针间的相对运动主要由 XY 和 Z 向微电机(M111. 1DG, PI, Germany, 15 mm 行程)、XY 压电定位平台(P621. 2CL, 100  $\mu\text{m}$  行程)和自行研制的 Z 向双压电定位平台实现。XY 和 Z 向压电定位平台分别固定在 XY 和 Z 向微电机上,实现样品与探针间距的粗略定位和精密定位。本文设计的是一种基于大行程和高速压电驱动柔性机构串联的 Z 向定位平台,在系统中的位置如图 1 所示。

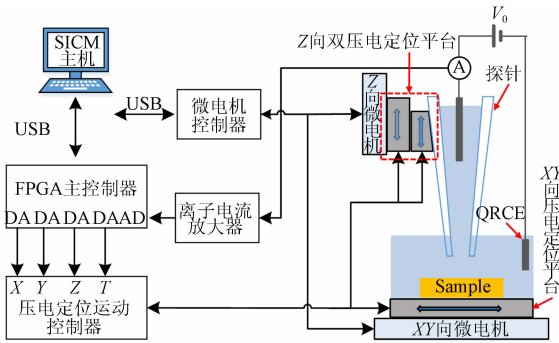


图 1 基于 Z 向双压电定位平台的 SICM 系统

Fig. 1 SICM system based on dual-stage nanopositioner

### 2.2 双压电定位平台机构

传统跳跃模式中的 Z 向探针下探速度需满足  $v_a < r_p / t_z$  [8-9], 其中  $r_p$  为探针尖端开口半径;  $t_z$  为 Z 向压电定位平台的时延。当  $r_p$  一定时, 提高定位平台的响应速度可以有效提高探针的下探速度。提高压电定位平台的固有频率可以提高响应速度, 但是压电定位平台的输出量程与固有频率相互制约, 只能根据系统要求折中选择。

本文设计的 Z 向双压电定位平台旨在获得高的下探速度, 且最大输出位移可满足细胞表面特征信息的测量(约 30  $\mu\text{m}$ )。图 2 所示为设计的双压电高速定位平台结构图。

整个平台由三大部分构成: 菱形位移放大机构、柔性导向机构支撑的运动平台以及环形小压电陶瓷驱动的高速定位平台。大压电作动器(型号 P888. 51)通过菱形位移放大机构输出放大位移, 菱形放大机构的输出端驱动一个运动平台, 该运动平台由 4 个柔性导向机构支撑。在平台的运动端有放置环型小压电作动器的圆形凹槽, 环形小压电作动器(型号: PD080. 31)由柔性薄板提供预紧力, SICM 探针末端整体伸入平台中心孔, 并可与柔性薄板固定在一起。Ag/AgCl 电极通过预留的电极孔穿入并最终插入固定在 SICM 探针的空腔中。为了最大程度减小负载对定位平台动态性能的影响, 需要将探针折断到 15 mm, 并与柔性薄板固定牢固。

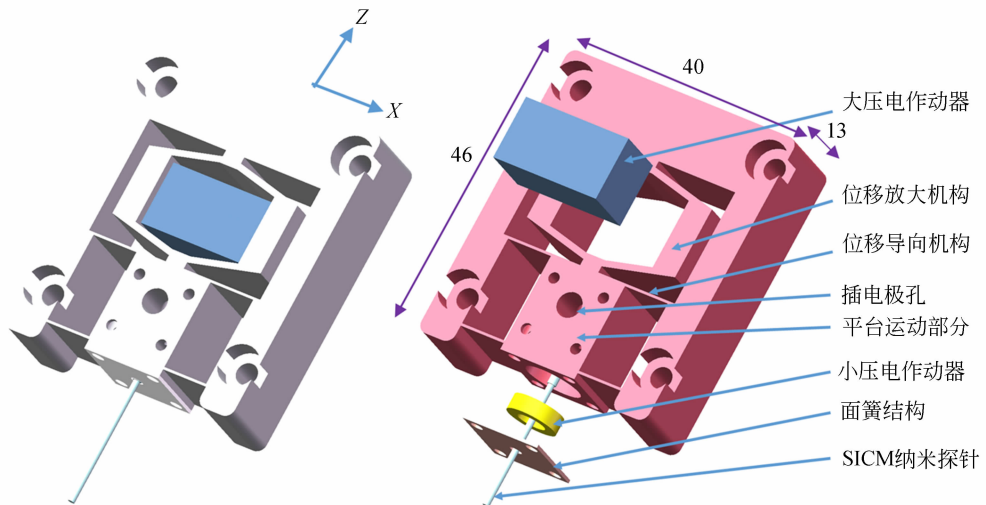


图 2 Z 向双压电定位平台总体设计

Fig. 2 Overall design of Z-direction dual-stage nanopositioner

大压电作动器通过位移放大机构驱动运动端带动探针沿  $Z$  轴上下运动, 环型小压电作动器能够通过柔性薄板预紧使探针沿  $Z$  向高速运动。菱形放大机构、运动导向机构和直接驱动机构的静态性能可通过调节对应的几何参数(菱形夹角  $\theta$ 、梁宽度  $t$ 、高度  $b$ 、长度  $l$  及薄板厚度等)实现。

### 2.3 关键参数

双压电定位平台的结构材料选型为铝合金(材料型号 Al7075)。该材料价格相对低廉、易于实现精密加工, 具有相对较高的  $E/\rho$  值, 有利于提高平台刚度(弹性模量  $E = 72 \text{ GPa}$ , 泊松比为 0.33, 密度  $\rho = 2\,810 \text{ kg/m}^3$ )<sup>[11]</sup>。平台的关键几何参数如图 3 所示, 取值如表 1 所示。双压电陶瓷驱动器的相关参数如表 2 所示。

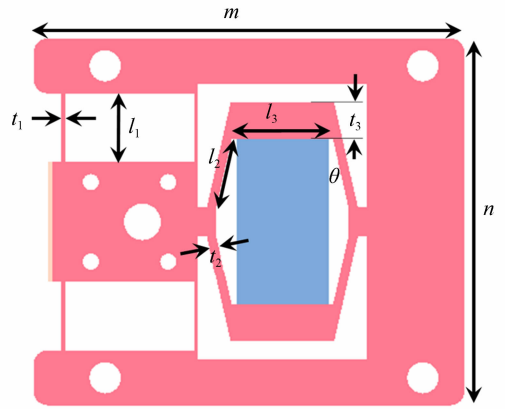


图 3 双压电定位平台的关键几何参数

Fig. 3 Key geometric parameters of dual-stage positioner

表 1 定位平台的关键参数

Tab. 1 Key geometric parameters of designed positioning stage

$m/\text{mm}$	$n/\text{mm}$	$l_1/\text{mm}$	$t_1/\text{mm}$	$l_2/\text{mm}$	$t_2/\text{mm}$	$l_3/\text{mm}$	$t_3/\text{mm}$	$\theta/(\text{^\circ})$	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
46	40	7.5	0.4	7.6	1	11	4	12	2 810

表 2 双压电陶瓷驱动器参数

Tab. 2 Parameters of two piezoelectric actuators

压电堆 陶瓷类型	几何参数 / $\text{mm}^3$	刚度/ $(\text{N} \cdot \mu\text{m}^{-1})$	杨氏模量 $E/\text{GPa}$	泊松比	标称行程 / $\mu\text{m}$	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	空载共振频率 / $\text{kHz}$
大陶瓷	$10 \times 10 \times 18$	200	33.9	0.3	15	7 800	70
小陶瓷	$8 \times 4.5 \times 2.5$	500	33.9	0.3	2	7 800	500

## 3 导向机构与放大机构建模

### 3.1 导向机构的刚度建模

导向机构是由四个片状柔性梁组成的。取单个片状柔性梁为分析对象, 建立等效模型, 由欧拉梁计算公式可知, 单个导向机构的刚度解析计算公式为:

$$k_s = \frac{12EI_1}{l_1^3}, \quad (1)$$

式中:  $k_s$  为单个片状柔性梁的刚度,  $l_1$  为片状柔性梁的长度,  $E$  为杨氏模量,  $I_1$  为惯性矩。由于有 4 个片状柔性梁对称平行布置, 因此导向机构的总等效刚度为 4 个柔性梁刚度之和。即:

$$K_{\text{guide}} = 4k_s = 4 \cdot \frac{12EI_1}{l_1^3} = 48 \frac{EI_1}{l_1^3}, \quad (2)$$

式中:  $I_1 = bt_1^3/12$ ,  $b$  为梁的高度,  $t_1$  为梁的厚度。

由于整个定位平台是由菱形位移放大机构与导向机构串联而成, 放大机构的输出端直接与导向机构相连, 导向机构的末端位移与菱形放大机构的输出位移相等, 因此, 导向机构对放大机构的加载效应等效为弹性加载, 其端口刚度为  $K_{\text{load}} = K_{\text{guide}}$ <sup>[14]</sup>。

### 3.2 位移放大机构建模

利用卡氏第二定理可以对其输入-输出静态位移和力的关系进行建模。由于菱形放大机构为对称结构, 因此只对其四分之一的结构进行分析(如图 4 所示静力学模型)。

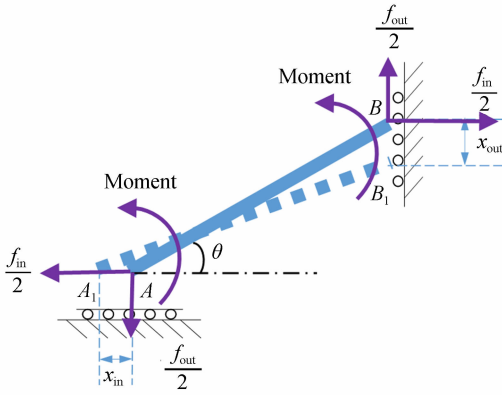


图 4 四分之一放大机构的静力学模型

Fig. 4 Static model of quarter of amplification mechanism

基于欧拉-伯努利梁理论求解图 4 所示的输入输出位移模型。当考虑位移放大机构柔性梁的平移和弯曲变形时,输入输出位移如下:

$$x_{in} = \int_0^{l_2} \frac{f(x)}{EA} \cdot \frac{df(x)}{df_{in}} dx + \int_0^{l_2} \frac{M(x)}{EI} \cdot \frac{dM(x)}{df_{in}} dx, \quad (3)$$

$$x_{out} = \int_0^{l_2} \frac{f(x)}{EA} \cdot \frac{df(x)}{df_{out}} dx + \int_0^{l_2} \frac{M(x)}{EI} \cdot \frac{dM(x)}{df_{out}} dx, \quad (4)$$

式中: $A$  为梁截面积, $I$  为对应截面关于柔性臂中性轴的惯性矩, $f(x)$  和  $M(x)$  分别为沿柔性臂中性轴的轴向拉力和力矩。由图 4 可知:

$$f(x) = (f_{in} \cdot \cos \theta + f_{out} \cdot \sin \theta) / 2, \quad (5)$$

$$M(x) = (f_{in} \cdot \sin \theta + f_{out} \cdot \cos \theta) \cdot (l_2 / 2 - x) / 2. \quad (6)$$

由式(3)~式(6)求积分,柔性放大机构的输入输出静学位移可写为柔度矩阵的形式,如式(7)~式(12)所示:

$$\begin{bmatrix} x_{in} \\ x_{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f_{in} \\ f_{out} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix}^{-1}, \quad (8)$$

$$c_{11} = \frac{1}{2} \left( \frac{l_2 \cos^2 \theta}{EA} + \frac{l_2^3 \sin^2 \theta}{12EI} \right), \quad (9)$$

$$c_{12} = \frac{1}{2} \left( \frac{l_2^3 \cos \theta \sin \theta}{12EI} - \frac{l_2 \cos \theta \sin \theta}{EA} \right), \quad (10)$$

$$c_{21} = \frac{1}{2} \left( \frac{l_2^3 \cos \theta \sin \theta}{12EI} - \frac{l_2 \cos \theta \sin \theta}{EA} \right), \quad (11)$$

$$c_{22} = \frac{1}{2} \left( \frac{l_2 \sin^2 \theta}{EA} + \frac{l_2^3 \cos^2 \theta}{12EI} \right), \quad (12)$$

式中: $l_2$  为菱形放大机构柔性臂的长度; $t_2$  为柔性臂的厚度, $\theta$  为放大机构柔性臂的角度(如图 3 所示)。基于式(3)~式(12),计算得到放大机构的输出输入刚度  $k_{out}, k_{in}$ , 位移放大比  $R_{amp}$ , 分别为:

$$R_{amp} = \frac{(l_2^2 - t_2^2) \cdot \sin \theta \cos \theta}{l_2^2 \sin^2 \theta + t_2^2 \cos^2 \theta}, \quad (13)$$

$$k_{in} = 1/c_{11}, k_{out} = c_{11}/(c_{11}c_{22} - c_{21}c_{12}). \quad (14)$$

最终可得柔性定位平台的输出位移为:

$$X_{out} = T_1 \cdot \frac{K_{out}}{K_{out} + K_{load}} \cdot R_{amp} \cdot \frac{K_{pzt}}{K_{pzt} + K_{in}} \cdot \Delta l_0, \quad (15)$$

式中: $K_{pzt}$  为压电陶瓷作动器的刚度, $\Delta l_0$  为其标称位移, $K_{load}$  为 4 个导向机构的等效刚度。 $T_1$  为考虑压电作动器和柔性位移放大器有限刚度的传递系数,表达式如下:

$$T_1 = \frac{1}{1 + \frac{R_{amp}^2 \cdot K_{out} \cdot K_{load}}{(K_{out} + K_{load})(K_{in} + K_{pzt})}}. \quad (16)$$

带入参数计算得定位平台的输出行程约为  $34.6 \mu\text{m}$ 。

### 3.3 小压电高速定位平台的最大输出行程

高速小定位平台采用柔性薄板来近似计算其输出端刚度。考虑到一个外边缘固定的柔性板,环形压电作动器与该柔性板固定,环形压电作动器施加在柔性板上的载荷为  $F=PA$ ,  $A$  为环形压电作动器端面与柔性板的接触面积, $P$  为压力,则柔性板在垂直方向上的变形量  $\delta_z$  为<sup>[19]</sup>:

$$\delta_z = \frac{Fr_a^3}{2\pi r_b C_1} \left( \frac{C_2 C_3}{C_4} - C_5 \right), \quad (17)$$

式中  $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5$  的表达式见文献[19]。其中  $E = 72 \text{ GPa}$ ;泊松比  $\nu = 0.33$ ;  $r_b = 4 \text{ mm}$ ,薄板厚度取  $t = 0.25 \text{ mm}$ ,  $r_a = 5.6 \text{ mm}$ ,则沿着驱动方向的刚度为:

$$k_f = \frac{F}{\delta_z} = \frac{2\pi r_b C_1}{r_a^3} \left( \frac{C_2 C_3}{C_4} - C_5 \right)^{-1}. \quad (18)$$

计算得  $k_f = 9.4 \text{ N}/\mu\text{m}$ ,则小压电定位平台的输出端行程为:

$$\Delta L = \Delta L_0 \cdot k_p / (k_f + k_p), \quad (19)$$

式中: $\Delta L$  为柔性面簧在预载作用下的输出位移, $\Delta L_0$  是环型小压电作动器无载荷时的最大输出位移, $k_f$  和  $k_p$  分别是柔性板和环型压电陶瓷驱动器的刚度。因此,由本文设计的几何参数计算得到环形高速压电平台的输出行程  $\Delta L = 1.96 \mu\text{m}$ 。

## 4 有限元分析

### 4.1 大行程压电定位平台

本节采用 SolidWorks 对平台进行建模,并使用 COMSOL5.3 软件包进行静力学和模态分析。有限元模型结构和材料参数如表 1 和表 2 所示。模型中 4 个螺钉孔设为固定端,沿柔性放大机构输入端分别加载 200 N 的力,记录得到菱形放大机构的每个输入端的位移均为  $5.23 \mu\text{m}$ ,平台沿  $X, Y$  方向的变形结果和应力云图分别如图 5(a)、5(b)和 5(c)所示。记录定位平台运动部分(由四个导向机构支撑)的位移为  $23.27 \mu\text{m}$ ,因此平台

的位移放大比为:

$$R_{\text{stage}} = X_{\text{out}}/X_{\text{in}} = 23.27/2 \times 5.23 = 2.22. \quad (20)$$

$R_{\text{stage}}$  小于解析解的放大比(2.31),以有限元计算为真值,偏差为 4.0%。考虑到大压电作动器的标称位移为  $15 \mu\text{m}$ ,由于在输出方向上其刚度有限,因此装夹在放大机构中后,实际输出位移会有部分损失。图 5(d)所示为放大机构两输入端分别输入  $7.5 \mu\text{m}$  时,整个平台的应力云图,最大应力为 49.5 MPa,发生在放大机构输出端的内侧,远小于 Al7075 铝合金材料的屈服强度 503 MPa。因此定位平台可以工作在弹性变形范围内。

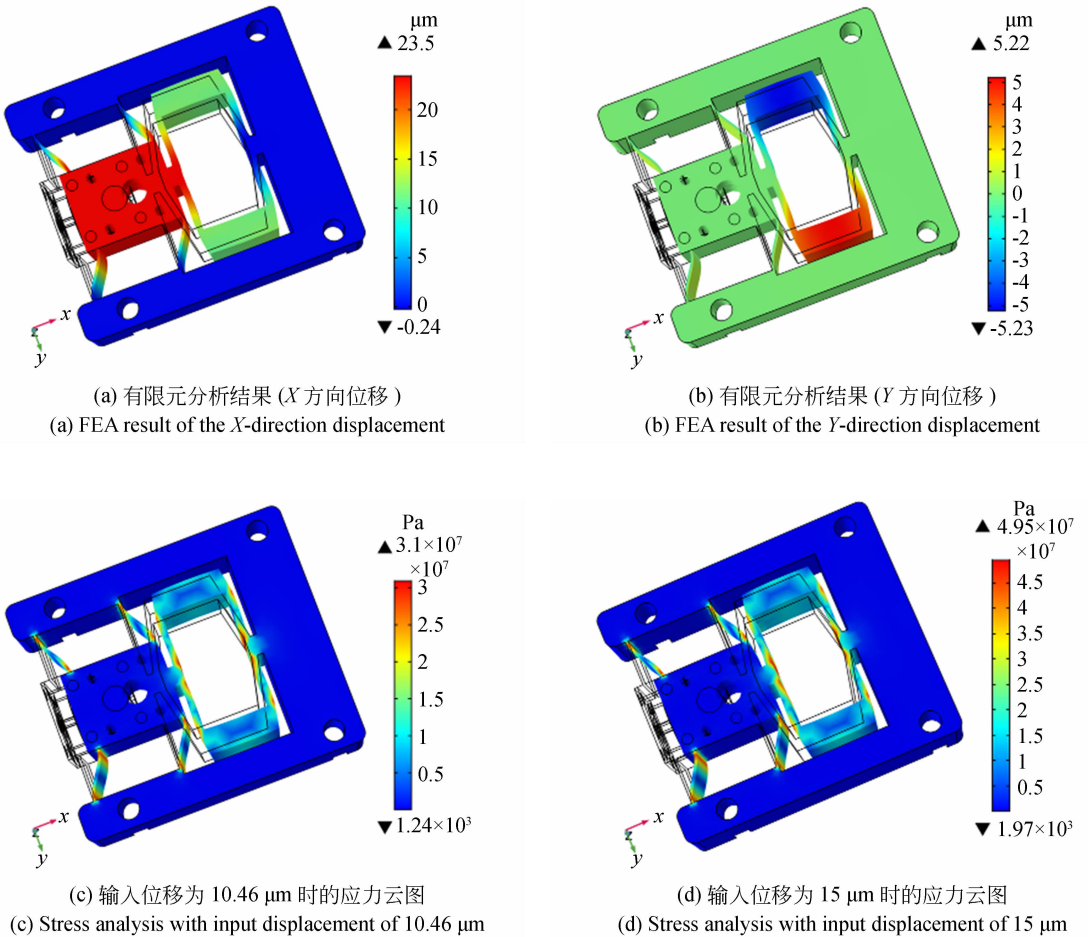


图 5 有限元静力学分析结果

Fig. 5 Results of finite element static analysis

对设计的大行程-高速压电定位平台进行模态分析,4 个螺栓孔为固定端,求解得到前 5 阶的固有频率,分别如图 6(a)~6(e)所示。第一阶固有频率的振型是沿着  $X$  方向的平动,和放大机构

位移输出端的运动方向相同。

### 4.2 双压电定位平台动态性能

采用和大行程压电定位平台同样的有限元分析方法(静力学刚度分析),得到高速小压电定位

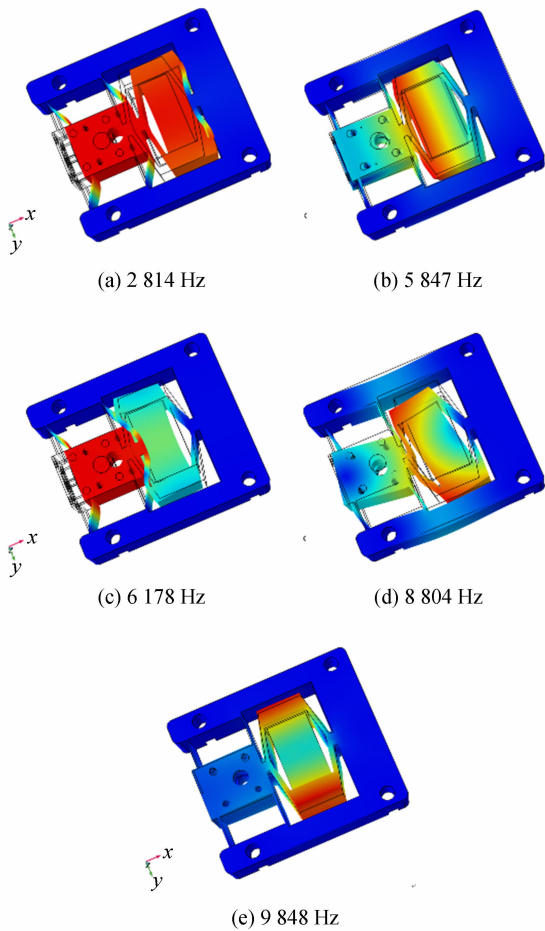


图 6 有限元分析得到的前 5 阶固有频率

Fig. 6 First 5 order natural frequencies obtained by FEA

平台的刚度约为  $7.6 \text{ N}/\mu\text{m}$ , 和解析解差距较大, 原因是解析模型进行了一定程度的简化。在双压电定位平台的输入端输入频率为  $10 \sim 150 \text{ kHz}$  的扫频驱动信号, 记录定位平台输出端的位移, 得到大行程慢速定位平台和小行程快速定位平台的幅频响应曲线, 如图 7 所示。由共振频率确定双压电定位平台动态性能, 能够满足 SICM 高速扫描的要求。

### 4.3 基于双压电定位平台的高速 SICM 扫描流程

基于双压电定位平台的 SICM 高速扫描流程如图 8 所示。扫描步骤如下:

(1) 首先, 探针在  $Z$  向从初始位置逼近样品表面, 待进入工作区后, 根据进入工作区的位置高度, 设定探针的最大运动高度 ( $p_{\max}$ ) 和最小高度 ( $p_{\min}$ ) 值。

(2) 施加驱动电压使环型小压电定位平台的

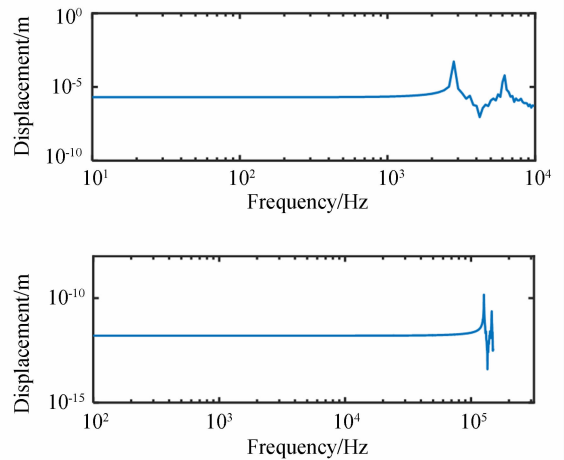


图 7 大行程慢速和小行程快速平台的幅频响应曲线

Fig. 7 Dynamic response of dual-stage positioners

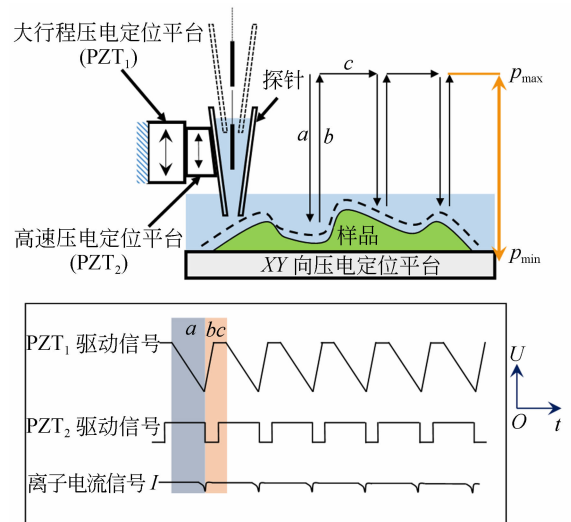


图 8 双压电定位平台 SICM 高速扫描示意图

Fig. 8 Schematic diagram of high-speed SICM scanning based on dual-stage positioner

输出端伸长量达到最大并保持不变 (如图 8 所示  $PZT_2$  驱动信号中  $a$  阶段)。施加驱动电压使高压电定位平台输出端向上运动到最高位置  $p_{\max}$ , 然后给高压电作动器施加线性减小的电压 (如图 8 所示  $PZT_1$  驱动信号中  $a$  阶段), 使探针逐渐由  $p_{\max}$  向  $p_{\min}$  位置运动。

(3) 在探针接近过程中 (如图 8 所示  $a$  阶段), 当系统检测到离子电流  $I$  减小到设定的阈值电流  $I_{\text{set}}$  时, 立即对大-小压电作动器同时施加相反的电压控制信号, 使探针以最快速度撤离样本表面 (如图 8 所示  $b$  阶段)。

(4) 待探针缩回到最大位置高度  $p_{\max}$  时, 恢复

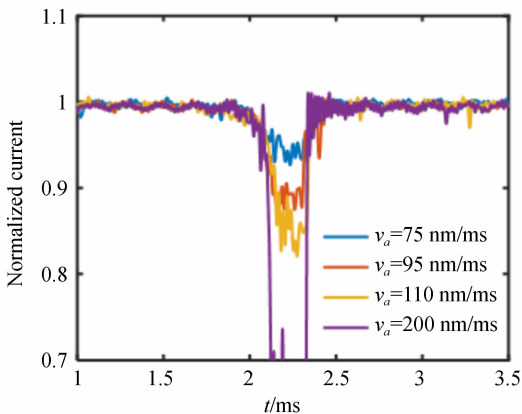
小压电作动器的施加电压使其输出端伸长量达到最大值并保持恒定(如图 8 中  $bc$  阶段);驱动  $XY$  向压电定位平台使样品运动到下一个测量点,探针在  $Z$  向重复执行(2)~(3)步骤,直到完成所有测量点扫描。

## 5 实验结果与讨论

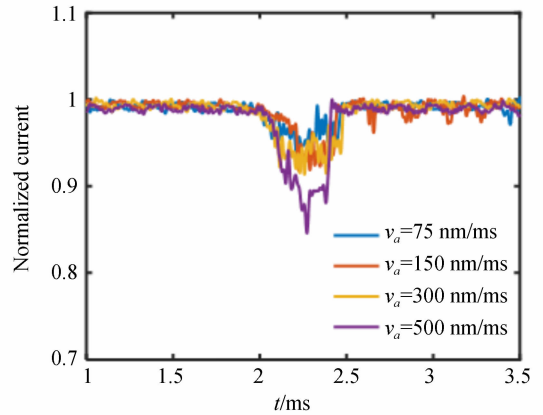
### 5.1 探针接近表面的离子电流过冲测试

为了验证双压电定位平台对 SICM 扫描速度提升的有效性,本节在跳跃模式下,仅使用大行程压电定位平台和使用双压电定位平台(高速大行程)分别对培养皿底面进行接近曲线测试。实验时离子电流的阈值设为 1%。仅使用大行程压电定位平台时,探针接近速度( $v_a$ )分别设置为 75, 95, 110, 200 nm/ms。当使用双压电定位平台时,探针接近速度( $v_a$ )分别设置为 75, 150, 300, 500 nm/ms。两种平台配置下的离子电流接近曲线分别如图 9(a)和图 9(b)所示。

仅有大行程压电定位平台工作时,当接近速度达到 200 nm/ms 时,离子电流的减小量超过了 70%刻度,此时探针很有可能已经接触到了培养皿底部。说明仅使用单一大行程定位平台在接近速度增加易产生很大的过冲,使探针碰撞样品或断裂。而在大小双压电定位平台工作时,当探针下探速度达到 500 nm/ms,离子电流减小量为 83%刻度。说明采用双压电平台可以有效抑制高速下探运动引起的电流过冲,避免探针碰撞样品



(a) 仅使用大行程压电平台的接近曲线  
(a) Current approach curves with slow stage working



(b) 使用双压电定位平台的接近曲线  
(b) Current approach curves with dual-stage positioner working

图 9 大行程和双压电定位平台工作时的电流接近曲线  
Fig. 9 Current approach curves with single and dual-stage working

或探针断裂。因此,双压电平台扫描可使探针以更大的接近速度扫描,从而提高跳跃模式的成像速度。

### 5.2 扫描成像快速性测试

扫描实验使用和电流过冲测试相同的探针(图 10 中 SEM 图像所示)。被测样品为聚二甲基硅氧烷(PDMS)样品,表面制备有圆形微观形貌,SEM 图像如图 10 中右图所示。对样品的不同区域分别进行多次形貌扫描,成像在相同的跳跃幅度下进行。其中,使用双压电定位平台对样品斜面区域的成像结果如图 11 所示,探针的下探速度( $v_a$ )分别设置为 100, 350, 450 nm/ms。扫描点数为  $40 \times 40$  点,相邻测量点间距为  $1 \mu\text{m}$ 。3 种接近速度均能够得到重复性较好的形貌图像。随着下探速度的提高,双压电定位平台始终能够获得到斜面形貌图像。

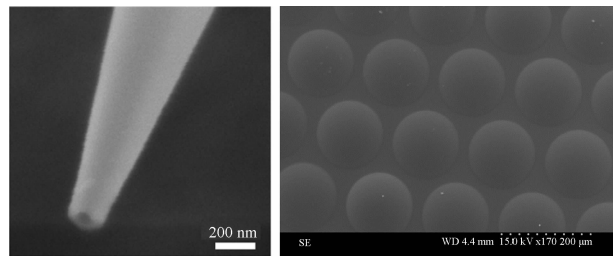
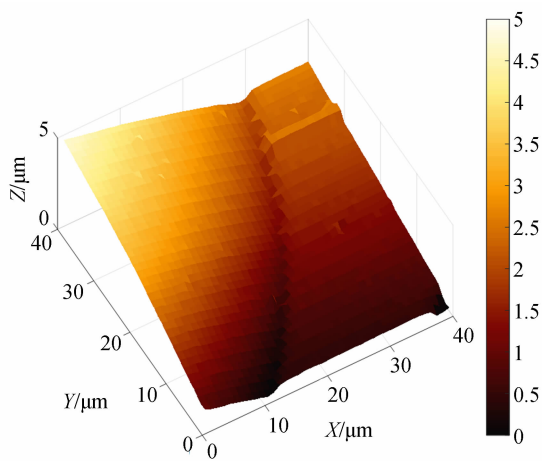
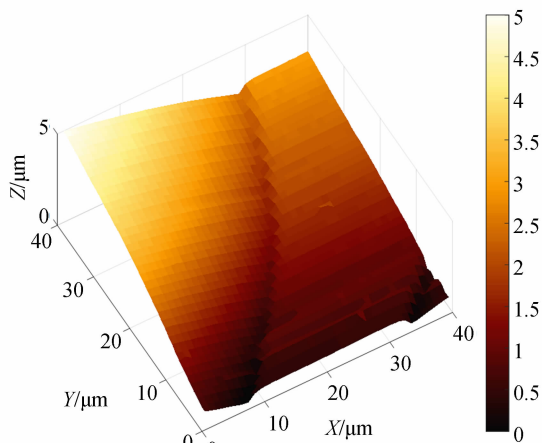


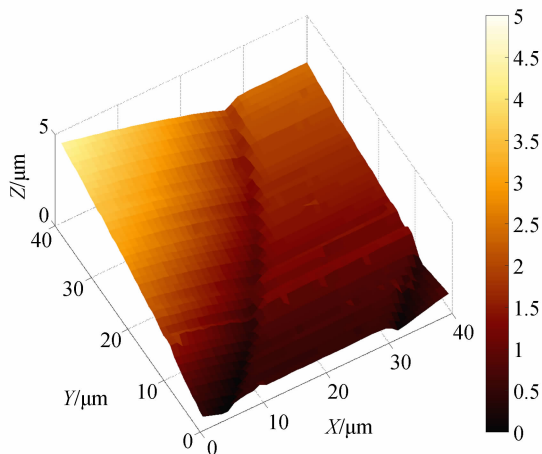
图 10 SICM 探针与成像样品的 SEM 图像  
Fig. 10 SEM images of SICM probe and sample



(a) 100 nm/ms



(b) 350 nm/ms



(c) 450 nm/ms

图 11 双压电驱动平台配置下 SICM 成像结果  
Fig. 11 SICM imaging results with dual-stage nanopositioner

图 12 所示为仅使用大行程压电定位平台,设置接近速度( $v_a$ )为 70 nm/ms 时,样品的斜坡形貌图像( $40 \times 40$  点)。可见在图像斜表面有明显的噪声点,说明仅使用单块大行程定位平台,接近速度过大时探针尖端离子电流达到阈值时过冲严重,平台响应速度慢,轻则使探针碰撞到样品,重则使探针完全断裂,导致扫描失败。此外,相比于扫描平面,扫描斜面时,探针提前进入阈值电流区,在同样的阈值电流下,在斜面处更容易与样品发生接触或碰撞<sup>[20]</sup>,进而引起噪声干扰。

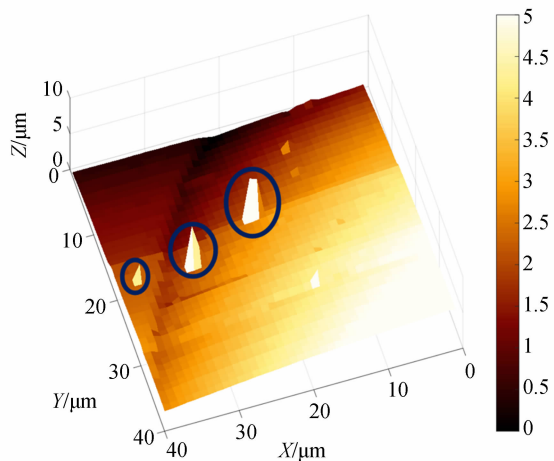


图12 仅用大行程慢速定位平台的成像结果(70 nm/ms)  
Fig. 12 SICM imaging with single slow-positioner (70 nm/ms)

为了进一步验证双压电定位平台的成像速率优势,本节采用平均像素点成像速率指标  $f$  来衡量并对比单块大行程慢速和双压电定位平台配置下的成像速率。 $f$  的定义如下:

$$f = L \times M \times N / \sum_{k=1}^L t_k, \quad (21)$$

式中: $f$  为平均像素点的成像频率; $t_k$  为扫描得到第  $k$  幅形貌图像消耗的时间; $M \times N$  为图像总像素点个数; $L$  为每种定位平台配置扫描得到的图像个数。同时,通过计算形貌图像的 MSE 值对比两种平台的成像稳定性。对同一样品区域进行重复扫描,探针和扫描参数(像素点间距、探针尖端起始位置、扫描区域面积)相同,对同种类样品进行 10 次重复扫描成像。指标 MSE 定义如式 (22) 所示:

$$MSE = \frac{\sum_{k=1}^L \left[ \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (z_k(i,j) - \bar{z}(i,j))^2 \right]}{L \times M \times N}, \quad (22)$$

式中:  $z_k(i, j)$  为第  $k$  幅图像中坐标点位置为  $(i, j)$  的形貌高度,  $\bar{z}(i, j)$  的表达式为:

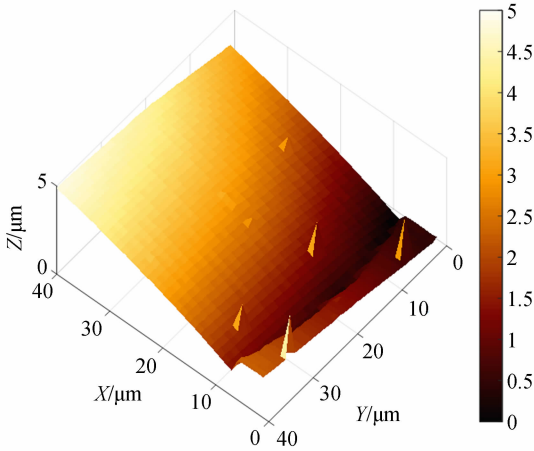
$$\bar{z}(i, j) = \sum_{k=1}^L z_k(i, j) / L, \quad (23)$$

式中:  $\bar{z}(i, j)$  为  $L$  幅图像  $z_k(i, j)$  值的平均值。

由于样品的形貌特征高度已知, 所以扫描时设置的跳跃幅度为  $8 \mu\text{m}$ , 统计两种方法重复测量 10 次的平均像素点成像频率和图像 MSE 值。两种配置的成像结果如图 13 所示。可见采用单块

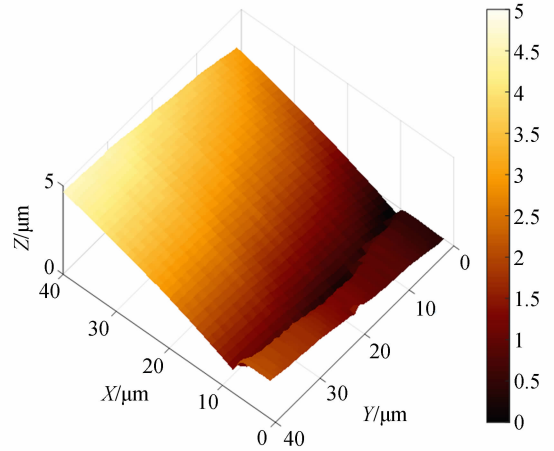
大行程定位平台时, 随着下探速度由  $50 \text{ nm/ms}$  增加到  $70 \text{ nm/ms}$ , 成像质量降低, 形貌图像的表面尖峰噪声增多。原因主要是探针在离子电流降低到阈值后, 来不及迅速撤离样品, 进而引起探针与样品接触, 电流噪声增多。而在双压电定位平台工作时, 随着探针下探速度由  $300 \text{ nm/ms}$  增加到  $500 \text{ nm/ms}$ , 图像表面仍然非常光滑、一致性好, 说明双压电定位平台能够在离子电流降低到阈值后, 迅速撤离样品, 进而减少了噪声干扰。

分别采用两种不同定位平台配置, 在不同探针下探速度下统计成像速率和图像噪声(稳定性), 结果如表 3 所示。



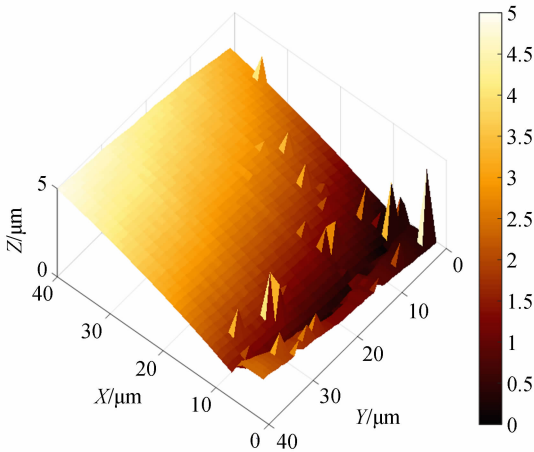
(a) 单一大行程定位平台成像结果 ( $50 \text{ nm/ms}$ )

(a) Imaging result of using single slow-positioner ( $50 \text{ nm/ms}$ )



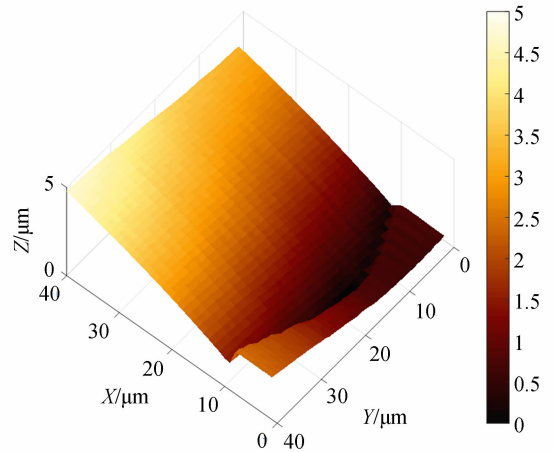
(b) 双压电定位平台成像结果 ( $300 \text{ nm/ms}$ )

(b) Imaging result of using dual-stage positioner ( $300 \text{ nm/ms}$ )



(c) 单一大行程定位平台成像结果 ( $70 \text{ nm/ms}$ )

(c) Imaging result of using single slow positioner ( $70 \text{ nm/ms}$ )



(d) 双压电定位平台成像结果 ( $500 \text{ nm/ms}$ )

(d) Imaging result of using dual-stage positioner ( $500 \text{ nm/ms}$ )

图 13 单一大行程和双压电定位平台的 SICM 成像结果

Fig. 13 SICM imaging results with different positioner configurations

表 3 两种压电定位平台配置下 SICM 成像性能对比

Tab. 3 Comparison of imaging quality with different positioner configurations

$v_a$ /( $\text{nm} \cdot \text{ms}^{-1}$ )	$f$ /Hz	MSE / $\text{nm}^2$	噪声点数目
30	4.65	189.23	0
40	5.96	254.40	2
50	7.23	397.65	8
60	8.41	452.80	15
70	9.56	649.67	23
60	8.32	160.45	0
70	9.63	173.50	0
100	12.55	185.21	1
300	24.05	223.56	0
500	29.67	250.55	2

注:前 5 行为大行程慢速定位平台数据,后 5 行为双压电定位平台数据。

由表 3 可知,对于单个大行程压电定位平台配置,随着探针下探速度的增加(30~70 nm/ms),成像的平均像素点成像频率由 4.65 Hz 增加到 9.56 Hz;图像的 MSE 值增加(189.23~649.67  $\text{nm}^2$ ),平均噪声点数同步增加,说明成像稳定性变差。而采用双压电定位平台时,随着探针的下探速度由 60 nm/ms 增加到 500 nm/ms,成像的平均像素点成像频率由 8.32 Hz 增加到 29.67 Hz;平均 MSE 值为 160.45~250.55  $\text{nm}^2$ 。

## 参考文献:

- [1] RHEINLAENDER J, SCHÄFFER T E. Mapping the creep compliance of living cells with scanning ion conductance microscopy reveals a subcellular correlation between stiffness and fluidity [J]. *Nanoscale*, 2019, 11(14): 6982-6989.
- [2] SHI W Q, ZENG Y H, ZHU C, *et al.*. Characterization of membrane patch-ion channel probes for scanning ion conductance microscopy [J]. *Small*, 2018, 14(18): 1702945.
- [3] BENTLEY C L, EDMONDSON J, MELONI G N, *et al.*. Nanoscale electrochemical mapping [J]. *Analytical Chemistry*, 2019, 91(1): 84-108.

使用双压电定位平台获得图像 MSE 的均值和标准差分别为 198.65, 37.37  $\text{nm}^2$ ,而使用大行程单定位平台获得图像 MSE 的均值和标准差分别为 388.75, 180.36  $\text{nm}^2$ 。后者分别为前者的 1.96 倍和 4.83 倍,说明双压电定位平台在提高成像速率的同时重复成像的稳定性优于仅使用单个大行程压电定位平台,从而验证了双压电定位平台高速扫描的优势。

## 6 结 论

针对传统 SICM 跳跃模式在高速扫描时存在的探针运动过冲、成像速率慢等问题,本文提出采用双压电纳米定位平台的扫描方法。本文通过串联大行程慢速和小行程快速压电定位平台,使扫描系统兼顾了 Z 向测量范围和响应快速性的要求。大小双压电定位平台同时工作,使得以跳跃模式扫描时探针能够快速脱离样品表面,解决了探针高速下探时的运动过冲问题。针对传统压电作动器输出位移小的问题,本文采用菱形位移放大机构实现位移放大,然后基于解析模型计算了平台的静力学性能参数,并采用有限元方法分析了双压电平台的静/动态特性。最后,加工平台样机并进行了接近曲线和扫描成像的测试。实验结果表明,设计的双压电定位平台在保证成像稳定性的前提下克服了运动过冲,探针下探的速度(至少达到 500 nm/ms),有效提高了跳跃模式的成像效率。

- [4] RHEINLAENDER J, GEISSE N A, PROKSCH R, *et al.*. Comparison of scanning ion conductance microscopy with atomic force microscopy for cell imaging [J]. *Langmuir*, 2011, 27(2): 697-704.
- [5] LI P, LIU L Q, YANG Y, *et al.*. In-phase bias modulation mode of scanning ion conductance microscopy with capacitance compensation [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 62(10): 6508-6518.
- [6] NOVAK P, LI C, SHEVCHUK A I, *et al.*. Nanoscale live-cell imaging using hopping probe ion conductance microscopy [J]. *Nature Methods*, 2009, 6(4): 279.
- [7] IDA H, TAKAHASHI Y, KUMATANI A, *et*

- al.. High speed scanning ion conductance microscopy for quantitative analysis of nanoscale dynamics of microvilli[J]. *Analytical Chemistry*, 2017, 89(11): 6015-6020.
- [8] NOVAK P, SHEVCHUK A, RUENRAROENGSAK P, *et al.*. Imaging single nanoparticle interactions with human lung cells using fast ion conductance microscopy[J]. *Nano Letters*, 2014, 14(3): 1202-1207.
- [9] WATANABE S, ANDO T. High-speed XYZ-nanopositioner for scanning ion conductance microscopy[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 111(11): 113106.
- [10] SIMEONOV S, SCHAFFER T E. High-speed scanning ion conductance microscopy for sub-second topography imaging of live cells [J]. *Nanoscale*, 2019, 11(17): 8579-8587.
- [11] 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]. *The Review of Scientific Instruments*, 2012, 83(12): 121101.
- [12] 卢倩, 黄卫清, 孙梦馨. 基于柔度比优化设计杠杆式柔性铰链放大机构[J]. *光学 精密工程*, 2016, 24(1): 102-111.  
LU Q, HUANG W Q, SUN M X. Optimization design of amplification mechanism for level flexure hinge based on compliance ratio[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(1): 102-111. (in Chinese)
- [13] 马立, 谢炜, 刘波, 等. 柔性铰链微定位平台的设计[J]. *光学 精密工程*, 2014, 22(2): 338-345.  
MA L, XIE W, LIU B, *et al.*. Design of micro-positioning stage with flexure hinge[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(2): 338-345. (in Chinese)
- [14] CAO J, LING M, INMAN D J, *et al.*. Generalized constitutive equations for piezo-actuated compliant mechanism[J]. *Smart Materials and Structures*, 2016, 25(9): 095005.
- [15] 陈为林, 卢清华, 乔健, 等. 柔顺桥式位移放大机构的非线性建模与优化[J]. *光学 精密工程*, 2019, 27(4): 849-859.  
CHEN W L, LU Q H, QIAO J, *et al.*. Nonlinearity modeling and optimization of compliant bridge-type displacement amplification mechanism [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(4): 849-859. (in Chinese)
- [16] 郭仁飞, 庄健, 于德弘. 用于三维形貌定量测量的调制电流式扫描离子电导显微镜[J]. *西安交通大学学报*, 2016, 50(7): 83-88, 139.  
GUO R F, ZHUANG J, YU D H. Three-dimensional quantitative surface topography measurement using modulated-current based scanning ion conductance microscopy [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2016, 50(7): 83-88, 139. (in Chinese)
- [17] YONG Y K, WADIKHAYE S P, FLEMING A J. High speed single- and dual-stage vertical positioners [J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(8): 085104.
- [18] GUO D J, NAGEL W S, CLAYTON G M, *et al.*. Spatial-temporal trajectory redesign for dual-stage nanopositioning systems with application in AFM[J]. *ASME Transactions on Mechatronics*, 2020, 25(2): 558-569.
- [19] KENTON B J, FLEMING A J, LEANG K K. Compact ultra-fast vertical nanopositioner for improving scanning probe microscope scan speed[J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2011, 82(12): 123703.
- [20] DEL LINZ S, WILLMAN E, CALDWELL M, *et al.*. Contact-free scanning and imaging with the scanning ion conductance microscope[J]. *Analytical Chemistry*, 2014, 86(5): 2353-2360.

#### 作者简介:



庄健(1974—),男,江苏南通人,博士,教授,博士生导师,1996年、1999年、2002年于西安交通大学分别获得学士、硕士和博士学位,主要研究方向为微纳测量技术、智能优化算法和机电控制系统。E-mail: zhuangjian@mail.xjtu.edu.cn



王志武(1987—),男,内蒙古乌兰察布人,博士研究生,主要研究方向为离子电导显微技术成像系统的研究。E-mail: wangzhiwu@stu.xjtu.edu.cn