

# 大行程-高频响压电驱动纳米定位平台优化设计

张萌,刘时成,张松林,朱禹清,吴 焱

(陕西科技大学 机电工程学院,陕西 西安 710021)

**摘要:**针对原子力显微镜的扫描范围和扫描速度受限于柔性机构的工作行程和固有频率,而柔性机构在设计时难以兼顾大工作行程和高固有频率的问题,基于桥式放大机构设计了一款纳米定位平台,并对其构型和主要参数进行优化。首先研究了柔性臂数量和厚度对桥式机构固有频率及放大比的影响,建立了新型双桥式柔性放大机构构型;然后基于矩阵位移法实现了纳米定位平台离散化,构建纳米定位平台整体刚度矩阵及系统的力学模型;最后针对纳米定位平台的频响和行程对柔性放大机构的主要参数进行优化分析与仿真分析。仿真结果表明,优化后的压电驱动纳米定位平台的一阶固有频率为4.4 kHz,工作行程超过 $30\ \mu\text{m}\times 30\ \mu\text{m}$ 。

**关键词:**纳米定位平台;压电驱动器;柔性放大机构;矩阵位移法;有限元仿真

**中图分类号:**TN384;TH742 **文献标识码:**A

## Optimized Design of a Large Stroke-High Frequency Piezoelectric Driven Nanopositioning Platform

ZHANG Meng, LIU Shicheng, ZHANG Songlin, ZHU Yuqing, WU Yao

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China)

**Abstract:** The scanning range and scanning speed of the atomic force microscope are limited by the size of the working stroke and intrinsic frequency of the flexible mechanism; however, it is challenging for the flexible mechanism to account for the large working stroke and high intrinsic frequency in the design to solve the problem. This study proposes a nanopositioning platform based on the bridge-type amplification mechanism and optimizes its configuration and main parameters. First, a new type of double-bridge flexible amplification mechanism is established through the study of the influence of the number and thickness of flexible arms on the intrinsic frequency and amplification ratio of the bridge mechanism. Subsequently, the discretization of the nanopositioning platform is realized based on the matrix displacement method, and the overall stiffness matrix of the nanopositioning platform and the mechanical model of the system are constructed. Finally, the optimization of the main parameters of the flexible amplification mechanism is carried out with respect to the frequency response and the stroke of the nanopositioning platform, and simulation analysis is performed. Finally, the main parameters of the flexible amplification mechanism are optimized for the frequency response and travel of the nanopositioning platform and simulated. The simulation results show that the optimized piezoelectric-driven nanopositioning platform has a first-order intrinsic frequency of 4.4 kHz and a working travel of more than  $30\ \mu\text{m}\times 30\ \mu\text{m}$ .

**Key words:** nanopositioning platform; piezoelectric actuator; flexible amplification mechanism; matrix displacement method; finite element simulation

### 0 引言

原子力显微镜(AFM)是一种具有超高分辨率的表面成像设备。它利用扫描探针与样品表面的相互作用获取样品形貌和物理性质信息,广泛应用

于表面形貌分析<sup>[1]</sup>、材料学<sup>[2]</sup>、纳米技术<sup>[3]</sup>、生物医学<sup>[4]</sup>、化学<sup>[5]</sup>等领域。压电陶瓷<sup>[6]</sup>具有高分辨率、高精度、响应速度快等优点,AFM常采用压电陶瓷构成的扫描器实现扫描成像。但是压电陶瓷自身产

收稿日期:2024-07-17

基金项目:陕西省自然科学基金(2023-JC-QN-0408);陕西高校青年创新团队(2024);陕西省教育厅专项科研项目(23JK0348);西安市科技计划高校院所科技人员服务企业项目(2023JH-GXRC-0160)

作者简介:张萌(1990-),男,山西省临汾市人,副教授,博士。

生的输出位移较小,通常只有自身长度的 0.1%~0.2%,难以满足 AFM 大扫描范围的工作要求<sup>[7]</sup>。柔性机构可以通过柔性构件的弹性变形放大输出位移,且具有无需装配、无摩擦、响应速度快等优点<sup>[8]</sup>,故常作为压电陶瓷的位移放大机构<sup>[9-10]</sup>。

虽然柔性位移放大机构能保证较高的精度,但因自身结构的限制,其固有频率相对较低,导致 AFM 极易受到振动的影响,相应地降低了其工作时的扫描速度。受柔性机构动力学特性制约,高输出位移和高固有频率通常难以兼顾<sup>[11]</sup>,国内外学者为此进行了大量研究<sup>[12-13]</sup>。SCHITTER<sup>[14]</sup>提出了一种新型精密运动平台,将传统 AFM 的扫描速度提高了 3 个数量级。该 AFM 系统实现了在两个扫描方向上扫描范围为 13 μm,固有频率超过 20 kHz。林盛隆等<sup>[15]</sup>设计了一种由压电陶瓷驱动器直接驱动中心运动平台的压电驱动系统,最大行程为 12.950 μm×13.517 μm, $x$ 、 $y$  方向的固有频率分别为 12.21 kHz 和 13.50 kHz。LI 等<sup>[16]</sup>基于杠杆放大原理设计了精密运动平台, $x$  方向固有频率为 1 155 Hz,最大行程为 61 μm; $y$  方向固有频率为 1 163 Hz,最大行程为 62.2 μm。LING 等<sup>[17]</sup>采用桥式构型对精密运动平台行程进行放大,其行程达到 138 μm,一阶固有频率为 1 158 Hz。上述构型各具特点,但都难以兼顾大位移和高固有频率,因此,研究新型柔性位移放大机构以提高 AFM 的扫描范围和扫描速度非常必要。

本文设计了一款高频响、大行程的压电驱动纳米定位平台。在确定中心运动平台主要参数的基础上,根据多个柔性臂的桥式构型与固有频率和放大比的关系,选择双桥式柔性机构作为本文的柔性放大机构。建立柔性铰链的力学模型,基于矩阵位移法离散化纳米定位平台,构建纳米定位平台整体刚度矩阵并建立系统的力学模型,得到纳米定位平台结构参数与中心运动平台位移的映射关系。针对纳米定位平台的频响和行程优化柔性放大机构的关键参数,在考虑压电驱动器尺寸及机械加工等因素后,引入凸台并确定位移放大机构的长度。最后对纳米定位平台进行仿真分析。结果表明,经过优化设计后,纳米定位平台的一阶固有频率为 4.4 kHz,行程超过 30 μm×30 μm,满足纳米定位平台高频响、大行程的要求。

### 1 纳米定位平台的组成

图 1 为所设计的纳米定位平台机构二维示意图。图中,(1)为堆叠式压电陶瓷,分别为柔性放大机构在  $x$ 、 $y$  方向提供输入位移;(2)为中心运动平台,其构型如图 2 所示, $h$  为高度,其关键参数如表 1 所示;(3)为桥式放大机构,其具有结构紧凑、放大比高、抗干扰能力强等优点<sup>[18]</sup>。为保证纳米定位平台同时兼顾高频响和高输出位移,初步采用单桥式构型对压电陶瓷输出位移进行放大。

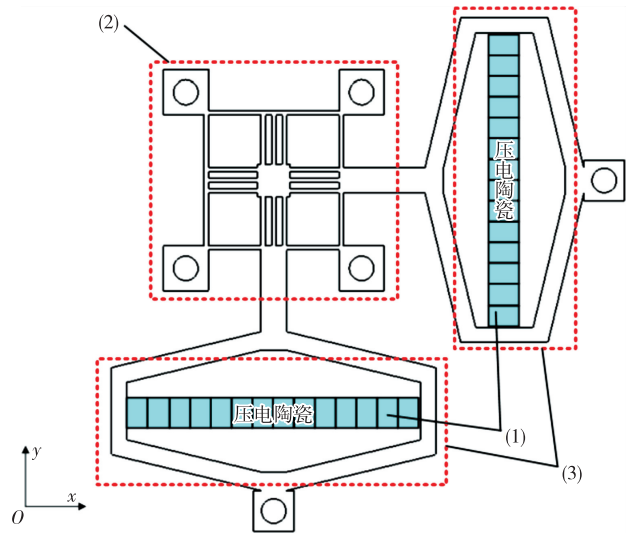


图 1 纳米定位平台

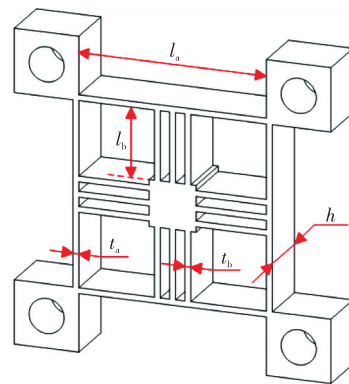


图 2 中心运动平台

表 1 中心运动平台尺寸参数

参数	数值	参数	数值
$l_a$ /mm	16	$t_a$ /mm	0.5
$l_b$ /mm	6	$t_b$ /mm	0.5

### 2 纳米定位平台构型的优化

所设计的纳米定位平台的位移放大比与固有

频率主要取决于桥式机构的位移放大比和固有频率。桥式机构的柔性臂厚度、数量和长度与其固有频率和位移放大比存在密切的关系。当柔性臂的厚度增大、数量增加及长度减小时,桥式机构的固有频率增大,而位移放大比随之减小;反之,当柔性臂的厚度减小、数量减少及长度增加时,桥式机构的位移放大比增大,而固有频率随之减小。

降低柔性臂的长度会压缩压电驱动器的预留空间,考虑到纳米定位平台的布局合理性,使用有限元仿真分析了柔性臂数量、厚度与桥式机构的位移放大比、固有频率之间的关系。图3为桥式机构的柔性臂数量变化示意图。

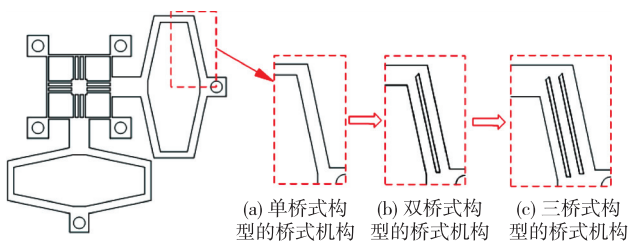


图3 桥式位移放大机构柔性臂数量变化示意图

图4为单桥式构型柔性臂厚度与运动平台的放大比和固有频率的变化关系。由图可见,当柔性臂厚度为2.5 mm时,纳米定位平台的放大比最大(为1.87),对应机构的固有频率为4 044 Hz;柔性臂厚度为3 mm时,纳米定位平台的固有频率最高(为5 008 Hz),放大比为1.86。

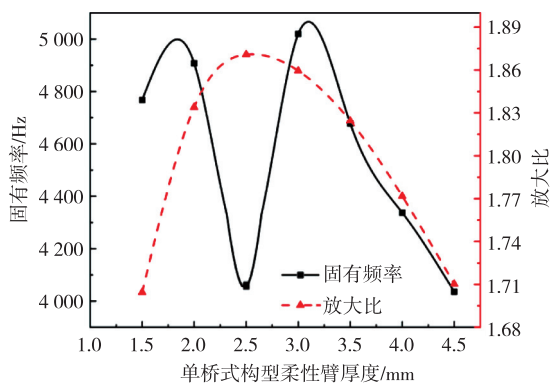


图4 单桥式构型关键参数作用关系

图5为双桥式构型单个柔性臂厚度与运动平台的放大比和固有频率的变化关系。由图可见,当单个柔性臂厚度为1.5 mm时,纳米定位平台的固有频率最高(为4 381 Hz),放大比是2.05;当单个柔性臂厚度增大到2.0 mm时,该类构型放大比达到

峰值(为2.07)。

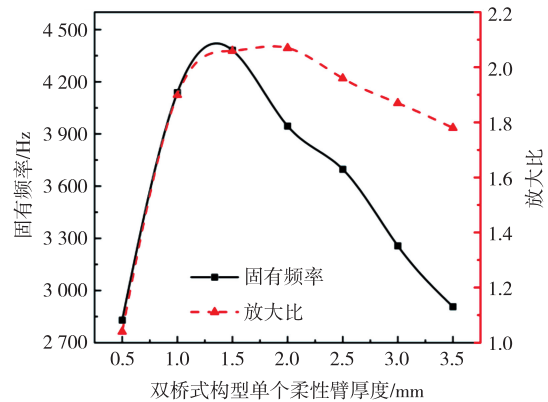


图5 双桥式构型关键参数作用关系

图6为三桥式构型柔性臂厚度与运动平台的放大比和固有频率的关系。由图可见,当单个柔性臂厚度为1.5 mm时,该类构型位移放大比达到峰值(为2.16),固有频率为3 728 Hz;单个柔性臂厚度为1.3 mm时,固有频率达到峰值(为3 779 Hz),放大比为2.13。

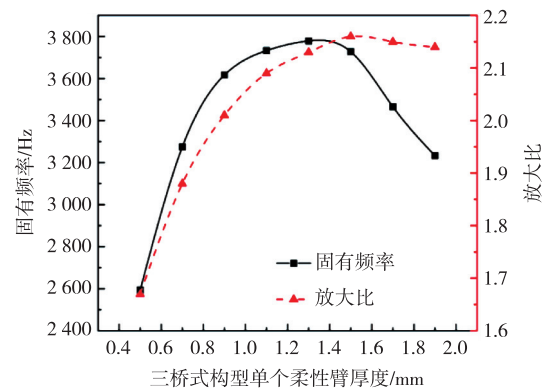


图6 三桥式构型关键参数作用关系

对比图4-6可知,虽然单桥式位移放大机构的固有频率峰值在三类柔性机构中最高,但其放大比相对较小,仅为1.87。三桥式构型的位移放大比最高可达2.16,但其固有频率不足4 kHz,无法满足纳米定位平台的高频响要求。双桥式构型放大比可达2倍,且固有频率高于4 kHz。为了兼顾大行程和高频响,基于双桥式柔性机构设计了双桥式纳米定位平台,如图7所示。

该平台是将图1中单桥式机构优化为双桥式机构组成局部并联构型,整体上桥式构型与中心运动平台组成串联构型。

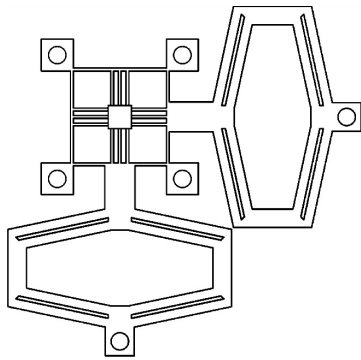


图 7 双桥式纳米定位平台

### 3 纳米定位平台静力学建模

#### 3.1 双桥式纳米定位平台离散化分析

将图 7 所示的纳米定位平台抽象为由柔性直梁和集中质量组成的单元和节点,如图 8 所示。由图可见,输入力分别在节点 1、节点 2、节点 7 和节点 8,输出端是中心定位平台,将其抽象为节点 10,其余柔性直梁抽象为柔性单元,将可忽略的刚性体抽象为节点,分别对节点和柔性单元进行顺序编号,单元编号为  $n(n=1,2,3,\dots,36)$ ,节点编号为  $p(p=1,2,3,\dots,9)$ 。

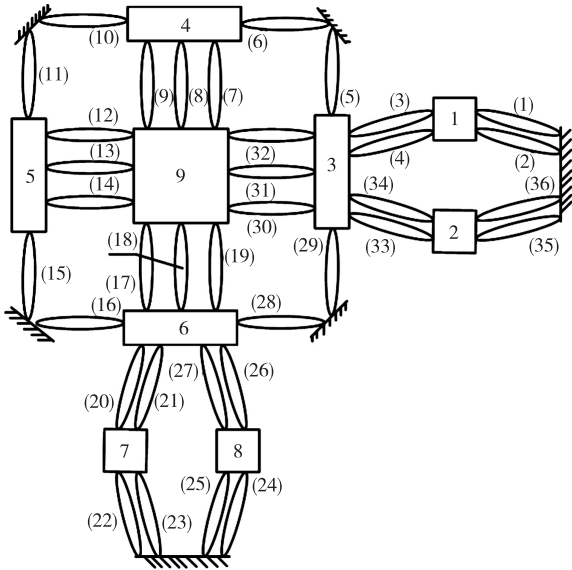


图 8 纳米定位平台离散化单元、节点编号

#### 3.2 柔性铰链力学分析

图 8 中每个单元都可视为一个平面类柔性铰链,其力学模型如图 9 所示。平面类柔性铰链  $i$  端和  $j$  端分别存在轴力、剪力和弯矩,则其节点力可表示为  $\mathbf{F}_n = [F_{ix}; F_{iy}; M_{iz}; F_{jx}; F_{jy}; M_{jz}]^T$ ,节点位移可表示为  $\mathbf{x}_n = [u_i; v_i; \alpha_i; u_j; v_j; \alpha_j]^T$ ,其中  $[F_{ix}; F_{iy}]$  和  $[F_{jx}; F_{jy}]$  是沿坐标轴方向的力,  $[M_{iz}]$  和

$[M_{jz}]$  是绕坐标轴旋转产生的弯矩,  $[u_i; v_i]$  和  $[u_j; v_j]$  是沿坐标轴方向的位移,  $[\alpha_i]$  和  $[\alpha_j]$  是垂直于坐标轴的转角。由广义胡克定律可得:

$$\mathbf{F}_n = \mathbf{K}_n \cdot \mathbf{x}_n \tag{1}$$

式中  $\mathbf{K}_n$  为第  $n$  个柔性铰链的刚度矩阵。

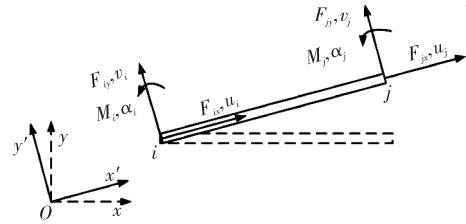


图 9 平面类柔性铰链节点

在柔性铰链  $i$  端施加沿  $x$  方向的单位位移,如图 10 所示。根据结构力学可得:

$$F_{ix} = \frac{EA_n}{l_n} \cdot (u_i - u_j) = -F_{jx} \tag{2}$$

即:

$$\begin{bmatrix} F_{ix} & 0 & 0 & F_{jx} & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{EA_n}{l_n} & 0 & 0 & -\frac{EA_n}{l_n} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_i & 0 & 0 & u_j & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{3}$$

式中:  $E$  为材料的弹性模量;  $A_n$  为第  $n$  个柔性铰链的横截面积;  $l_n$  为第  $n$  个柔性铰链的长度。

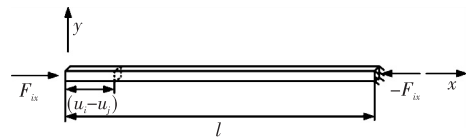


图 10 柔性铰链  $-F_{ix}$

同理,在柔性铰链  $i$  端、 $j$  端沿  $y$  方向施加单位位移和转角单位位移,得到第  $n$  个柔性铰链的刚度矩阵  $\mathbf{K}_n$  为

$$\mathbf{K}_n = \begin{bmatrix} \frac{EA_n}{l_n} & 0 & 0 & -\frac{EA_n}{l_n} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI_n}{l_n^3} & -\frac{6EI_n}{l_n^2} & 0 & -\frac{12EI_n}{l_n^3} & \frac{6EI_n}{l_n^2} \\ 0 & -\frac{6EI_n}{l_n^2} & \frac{4EI_n}{l_n} & 0 & \frac{6EI_n}{l_n^2} & \frac{2EI_n}{l_n} \\ -\frac{EA_n}{l_n} & 0 & 0 & \frac{EA_n}{l_n} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI_n}{l_n^3} & \frac{6EI_n}{l_n^2} & 0 & \frac{12EI_n}{l_n^3} & -\frac{6EI_n}{l_n^2} \\ 0 & -\frac{6EI_n}{l_n^2} & \frac{2EI_n}{l_n} & 0 & \frac{6EI_n}{l_n^2} & \frac{4EI_n}{l_n} \end{bmatrix} \tag{4}$$

式中  $I_n$  为第  $n$  个柔性铰链的惯性矩。

将单元刚度矩阵、节点位移、节点力等柔性单元的关联参数从局部坐标系  $xOy$  转换到参考坐标系  $x'O'y'$ 。由于平面类柔性机构的参考坐标系通过旋转得到局部坐标系,设第  $n$  个柔性单元相对于参考坐标系的夹角为  $\theta_n$ ,则平面类柔性机构刚度矩阵的坐标变换矩阵为

$$\mathbf{R}_n = \begin{bmatrix} \cos \theta_n & \sin \theta_n & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \sin \theta_n & \cos \theta_n & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \theta_n & \sin \theta_n & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\sin \theta_n & \cos \theta_n & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中  $\mathbf{R}_n$  为第  $n$  个柔性单元坐标变换矩阵。

第  $n$  个柔性单元经过坐标变换位于参考坐标系下柔性铰链的刚度矩阵为

$$\mathbf{K}'_n = \mathbf{R}_n^T \cdot \mathbf{K}_n \cdot \mathbf{R}_n \quad (6)$$

经过坐标变换后,得到参考坐标系中的节点力-位移关系:

$$\mathbf{F}_n = \mathbf{K}'_n \cdot \mathbf{x}_n \quad (7)$$

式中:  $\mathbf{F}_n$  为第  $n$  个柔性单元的节点力;  $\mathbf{x}_n$  为第  $n$  个

$$\begin{cases} f_{in,1} = (k_{1,3} \cdot 0 + k_{1,4} \cdot x_1) + (k_{2,3} \cdot 0 + k_{2,4} \cdot x_1) + (k_{3,1} \cdot x_1 + k_{3,2} \cdot x_3) + (k_{4,1} \cdot x_1 + k_{4,2} \cdot x_3) \\ -f_{in,1} = (k_{33,1} \cdot x_2 + k_{33,2} \cdot x_3) + (k_{34,1} \cdot x_2 + k_{34,2} \cdot x_3) + (k_{35,3} \cdot 0 + k_{35,4} \cdot x_2) + (k_{36,3} \cdot 0 + k_{36,4} \cdot x_2) \\ \vdots \\ -f_{in,2} = (k_{24,3} \cdot 0 + k_{24,4} \cdot x_8) + (k_{25,3} \cdot 0 + k_{25,4} \cdot x_8) + (k_{26,1} \cdot x_8 + k_{26,2} \cdot x_6) + (k_{27,1} \cdot x_8 + k_{27,2} \cdot x_6) \\ 0 = (k_{7,3} \cdot x_4 + k_{7,4} \cdot x_9) + (k_{8,3} \cdot x_4 + k_{8,4} \cdot x_9) + \dots + (k_{31,3} \cdot x_3 + k_{31,4} \cdot x_9) + (k_{32,3} \cdot x_3 + k_{32,4} \cdot x_9) \end{cases} \quad (10)$$

对柔性机构所有节点所建立的弹性静力学模型可统一表示为力、位移和刚度之间的平衡方程:

$$\{F\} = \mathbf{K} \{X\} \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} f_{in,1} \\ -f_{in,1} \\ \vdots \\ f_{in,2} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{1,4} + k_{2,4} + k_{3,3} + k_{4,1} & 0 & k_{3,2} + k_{4,2} & \dots & 0 \\ 0 & k_{33,1} + k_{34,1} + k_{35,4} + k_{36,4} & k_{33,2} + k_{34,2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & k_{24,4} + k_{25,4} + k_{26,1} + k_{27,1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & k_{7,4} + \dots + k_{32,4} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_8 \\ x_9 \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中:  $\pm f_{in,1}$  为第一个双桥式构型输入力;  $\pm f_{in,2}$  为第二个双桥式构型输入力;  $[x_1, x_2]^T$  为第一个双

柔性单元的节点位移。

### 3.3 柔性机构的静力学模型

式(7)表述了第  $n$  个柔性单元的节点力与节点位移的关系,有:

$$\{F_n\} = \begin{Bmatrix} F_{n,i} \\ F_{n,j} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{n,1} & k_{n,2} \\ k_{n,3} & k_{n,4} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} x_i \\ x_j \end{Bmatrix} \quad (8)$$

式中:  $F_{n,i}$  和  $F_{n,j}$  分别为第  $n$  个柔性单元在节点  $i$  端和  $j$  端的节点力;  $x_i$  和  $x_j$  分别为第  $n$  个柔性单元在节点  $i$  端和  $j$  端的节点位移;  $k_{n,1}$ 、 $k_{n,2}$ 、 $k_{n,3}$  和  $k_{n,4}$  分别为第  $n$  个柔性单元在参考坐标系下刚度矩阵  $\mathbf{K}'_n$  的子矩阵。

基于图 8,依次取每个节点作为研究对象,根据力平衡方程,作用在节点上的合力等于与该节点连接柔性单元节点力的反作用力与所受外力之和。以第  $p$  个节点为例,与其相连接的第  $n$  个柔性单元的  $i$  端点或  $j$  端点的力在  $p$  节点达到力学平衡,即:

$$F_p = \sum_N \{ (k_{n,1}x_i + k_{n,2}x_j) \text{ or } (k_{n,3}x_i + k_{n,4}x_j) \} \quad (9)$$

依次对所有节点罗列力平衡方程,并组装成柔顺机构的静力学模型,有:

式中:  $\{F\}$  为柔性机构所受外力;  $\mathbf{K}$  为柔性机构的整体刚度矩阵;  $\{X\}$  为柔性机构所有节点位移。

将式(10)代入式(11)可得:



构型的固有频率是整体刚度矩阵行列式为 0 的根,即:

$$\det\{K\}=0 \quad (13)$$

### 3.4 柔性机构尺寸优化

图 11 为双桥式构型图。对纳米定位平台性能影响最大的 4 个关键参数分别是长度  $l$ 、夹角  $\theta$ 、宽度  $t$  和高度  $h$ 。考虑到压电陶瓷的尺寸,桥式构型的柔性臂长度设计为 16 mm,在此基础上对纳米定位平台的关键尺寸参数进行优化。选择桥式放大机构柔性臂的夹角  $\theta$ 、宽度  $t$  和高度  $h$  为待优化参数,以纳米定位平台的最大固有频率作为优化目标。

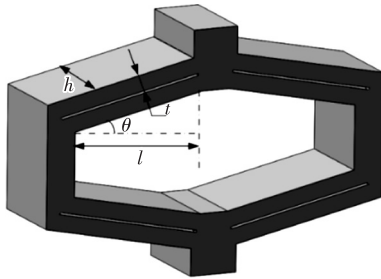
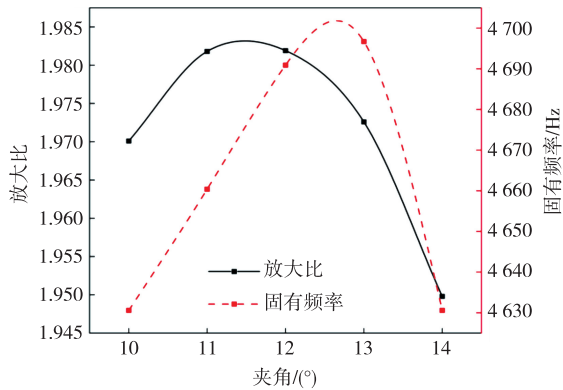
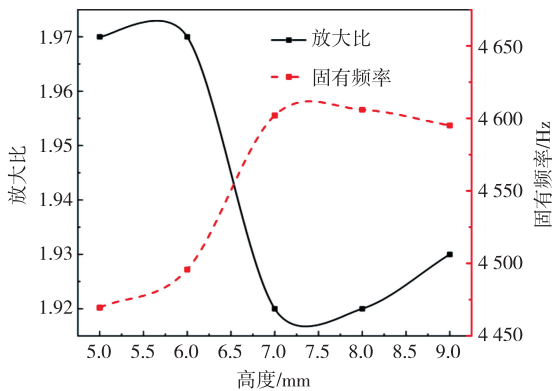


图 11 双桥式构型尺寸

对不同尺寸的双桥式构型进行仿真分析,其结果如图 12 所示。



(a) 双桥式构型夹角与频响和放大比的关系



(b) 双桥式构型高度与频响和放大比的关系

图 12 双桥式构型尺寸对频响和放大比的影响

由图 12(a) 可见,双桥式构型的固有频率在夹角  $10^\circ \sim 12^\circ$  呈增长趋势,随着夹角增大,构型的固有频率呈下降趋势。同时,构型的放大比在  $10^\circ \sim 12^\circ$  呈增长趋势,在  $12^\circ$  后则呈下降趋势。由图 12(b) 可见,双桥式构型固有频率在高度 5~7 mm 呈增长趋势,随着构型高度的增加,构型的固有频率呈下降趋势。综合上述构型尺寸参数与固有频率和放大比的关系,夹角  $12^\circ$  时固有频率和放大比较大;高度 7 mm 时固有频率较高,但放大比较小。为保证构型的固有频率,本文选择夹角  $12^\circ$  和高度 7 mm 的双桥式放大机构。

由于压电陶瓷驱动器的尺寸较小,为了充分利用压电驱动器在柔性机构输入端所施加的驱动力,在柔性机构输入端引入凸台。为了便于实验测量中心运动平台的运动轨迹,在中心运动平台也引入凸台。通过测量凸台的位移或形变来获取中心运动平台的运动信息,优化后的双桥式纳米定位平台如图 13 所示。

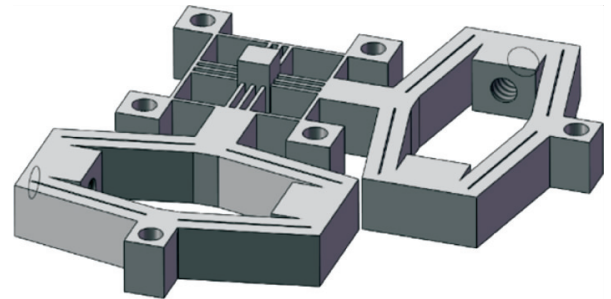


图 13 优化后纳米定位平台

## 4 仿真分析

### 4.1 双桥式纳米定位平台放大比分析

采用铝合金作为纳米定位平台柔性机构的材料,再将引入凸台、减小长度后的纳米定位平台三维模型导入 ANSYS 软件,设置材料为 AL7075,密度为  $2.82 \text{ g/cm}^3$ ,弹性模量为 71 GPa,强度极限为 572 MPa,屈服极限为 503 MPa。以 6 个通孔为固定边,通过在柔性机构的输入端施加位移,经有限元分析得到其输出位移及柔性机构的放大比。静态分析图如图 14 所示,静态分析参数值如表 2 所示,当输入位移为  $19 \mu\text{m}$  时,双桥式纳米定位平台的输出位移超过  $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$ ,放大比均为 1.654。

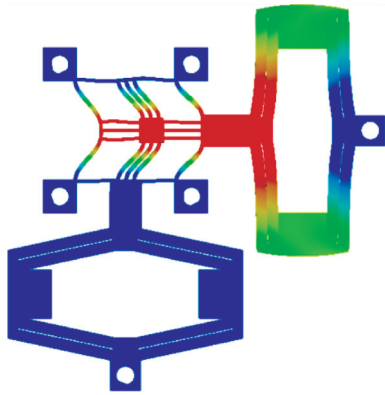


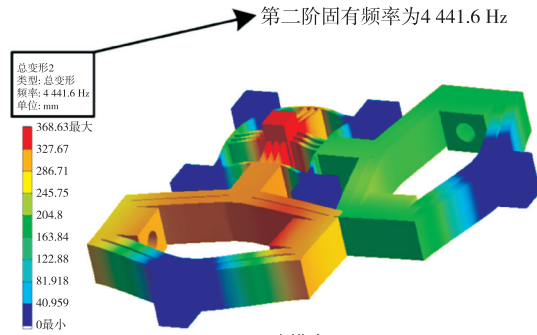
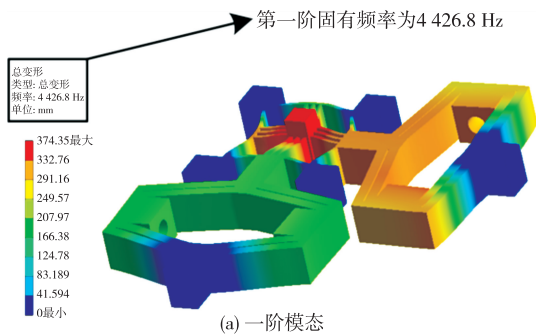
图 14 柔性机构的静态分析图

表 2 柔性机构静态仿真结果

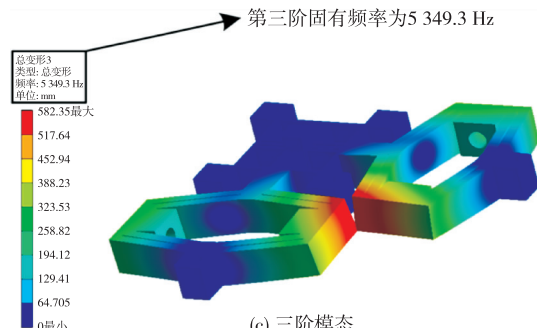
输入位移/ $\mu\text{m}$	输出位移/ $\mu\text{m}$	位移放大比
1	1.654	1.654
4	6.617	1.654
7	11.579	1.654
10	16.542	1.654
13	21.504	1.654
16	26.466	1.654
19	31.429	1.654

### 4.2 双桥式纳米定位平台模态分析

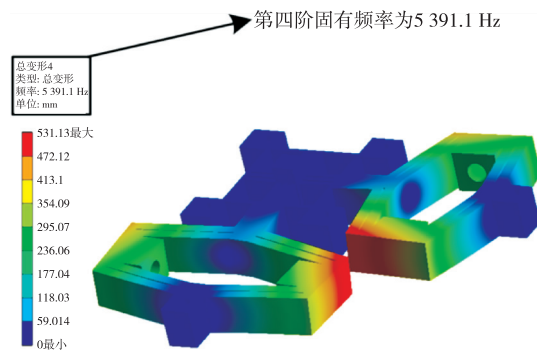
图 15 为纳米定位平台前 4 阶模态分析。由图可见,设置的边界条件为 6 个通孔,最大模态阶数为六阶。其中,柔性机构的第一阶固有频率为 4 426.8 Hz,此时变形最大的区域为中心运动平台;第二阶固有频率为 4 441.6 Hz;第三阶固有频率为 5 349.3 Hz,变形最大的区域是双桥式柔性放大机构的两个边界,这是绕  $x$ 、 $y$  轴旋转方向的振动频率;第四阶固有频率为 5 391.1 Hz,其变形最大区域与第三阶类同,旋转方向与第三阶相反;第五阶固有频率和第六阶固有频率均为沿  $z$  轴正反方向的振动频率,大小分别为 5 651.2 Hz 和 5 677.5 Hz。



(b) 二阶模态



(c) 三阶模态



(d) 四阶模态

图 15 纳米定位平台的前 4 阶模态

### 5 结束语

为了提高 AFM 的扫描范围和扫描速度,基于桥式放大机构设计了一种新型双桥式纳米定位平台,研究了桥式放大机构的柔性臂数量和厚度对纳米定位平台的固有频率及放大比的影响。使用矩阵位移法对新型双桥式纳米定位平台进行建模分析,并在此基础上推导出整个平台的放大比和固有频率表达式。使用有限元仿真对理论建模的结果进行验证,结果表明,纳米定位平台的一阶固有频率为 4.4 kHz,行程超过  $30\ \mu\text{m} \times 30\ \mu\text{m}$ 。综上所述,本文所设计的新型双桥式纳米定位平台能同时满足大输出位移和高固有频率的设计要求,能提高 AFM 的扫描范围和扫描速度。

## 参考文献:

- [1] CANEPA P, ROTONDI S M C, CAVALLERI O. Atomic force microscopy as a nanolithography tool to investigate the DNA/gold interface[J]. *Current Opinion in Electrochemistry*, 2024: 44.
- [2] ISHIDA T, IWABUKI H, LIANG X, NAKAJIMA K. Visualization of crack generation of vulcanized butadiene rubber under uniaxial elongation by atomic force microscopy nanomechanics[J]. *Polymer*, 2024: 127263.
- [3] VINCENTI L, PELLEGRINO P, CASCIONE M, et al. Crafting at the nanoscale: A comprehensive review of mechanical atomic force microscopy-based lithography methods and their evolution[J]. *Materials & Design*, 2024: 113036.
- [4] LI X, CHEN L, KONG S, et al. Direct investigations of interactions between nucleolins and aptamers on pancreatic cancer and normal cells by atomic force microscopy[J]. *Ultramicroscopy*, 2024, 263: 113986.
- [5] 周连军, 王静宇, 田丽萍, 等. 液相外延碲镉汞表面化学腐蚀研究[J]. *红外技术*, 2015, 37(6): 506-509. ZHOU L J, WANG J Y, TIAN L P, et al. Study on chemical etching of LPE HgCdTe surface[J]. *Infrared Technology*, 2015, 37(6): 506-509.
- [6] YU H, LIU Y, DENG J, ZHANG S. 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.
- [7] 胡逸凡, 章海军, 倪凯佳. 三角放大型压电陶瓷微纳米驱动机构[J]. *光学精密工程*, 2022, 30(17): 2094. HU Y F, ZHANG H J, NI K J. Mini-piezo-element drive microactuator based on triangular amplification[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(17): 2094.
- [8] WANG P, XU Q. Design of a flexure-based constant-force XY precision positioning stage[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2017, 108: 1-13.
- [9] DENG J, LIU Y, LI K, ZHANG S. Design, modeling, and experimental evaluation of a compact piezoelectric XY platform for large travel range[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2019, 67(4): 863.
- [10] ZHU X, XU X, WEN Z, et al. A novel flexure-based vertical nan positioning stage with large travel range [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2015, 86(10): 123703.
- [11] 刘昊, 赖磊捷. 大行程推拉电磁驱动微定位平台的内环阻尼与迭代学习控制[J]. *机械科学与技术*, 2024, 43(7):1238-1243. LIU H, LAI L J. Inner loop damping and iterative learning control of a large stroke micropositioning stage driven by push-pull electromagnetic actuators [J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2024,43(7):1238-1243.
- [12] HUANG W, LEI Y, AN D, et al. Design and analysis of a novel 2-DOF rotation-translation precision positioning stage[J]. *Mathematics*, 2023, 11(2): 280.
- [13] JI H W, LV B, LI T Y, et al. Design of 2-DOF decoupled large stroke precision positioning platform[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2022, 36(12): 5871.
- [14] 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.
- [15] 林盛隆, 朱本亮. 高带宽两自由度并联柔顺精密定位平台的优化设计与实验[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(8):1774-1782. LIN S L, ZHU B L. Optimal design and experiment of a high-bandwidth two-degree-of-freedom parallel nan positioning stage[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(8): 1774-1782.
- [16] LI Y, YIN B, LIU J, et al. Optimal design of micro/nano positioning stage with wide range and high speed based on flexure structures[C]//Changsha, China: Proceedings of the Iop Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017.
- [17] LING M X. A flexure-based XY precision positioning stage with integrated displacement PVDF sensor[C]//Shenyang, China: Proceedings of the Intelligent Robotics and Applications: 12th International Conference, ICIRA, 2019.
- [18] 吴彤, 杨依领, 吴高华, 等. 二自由度大行程无耦合压电粘滑定位平台[J]. *光学精密工程*, 2024, 32(1): 62-72. WU T, YANG Y L, WU G H, et al. Two-DOF piezoelectric stick-slip positioning platform with large strokes and no coupling[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2024,32(1):62-72.