

一种无附加运动二级缩小微动系统设计及性能分析*

DESIGN AND PERFORMANCE ANALYSIS OF A TWO-STAGE REDUCED MICRO-MOTION SYSTEM WITHOUT ADDITIONAL MOTION

杨满芝** 李 凯*** 冯 斌 韩飞燕 葛红玉

(西安科技大学 机械工程学院, 西安 710054)

YANG ManZhi LI Kai FENG Bin HAN FeiYan GE HongYu

(School of Mechanical Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

摘要 为实现更小缩小比进而获得更高运动精度的灵活运动空间,设计了一种无附加运动的二级缩小微动机构及压电陶瓷致动器组成的微动系统,并对其驱动性能、运动性能和动态性能进行研究。基于柔性铰链杠杆原理及附加运动平衡原理,设计了一种无附加运动的二级缩小微动机构,可实现输入位移精密缩小;采用压电陶瓷致动器驱动二级缩小微动机构,组成二级缩小微动系统;采用有限元法完成系统驱动性能、运动性能及动态性能分析,实验法完成系统驱动性能及动态性能分析。分析结果显示,微动系统驱动具有线性度高、误差小等优点,系统具有优良的定位性能,系统动态性能良好且在运动过程中不会发生共振。研究对微动系统设计及性能分析具有重要的参考价值。

关键词 微动系统 无附加运动 二级缩小 驱动性能 动态性能

中图分类号 TH112

Abstract In order to achieve a smaller reduction ratio and thus obtain a flexible motion space with higher motion precision, a micro-motion system composed of a two-stage reduction micro-motion mechanism without additional motion and a piezoelectric ceramic actuator was designed, and its driving performance, motion performance and dynamic performance were studied. Based on the principle of flexible hinge lever and the principle of additional motion balance, a two-stage reduction micro-motion mechanism without additional motion was designed, which could realise the precision reduction of input displacement; a piezoelectric ceramic actuator was used to drive the two-stage reduction micro-motion mechanism to form a two-stage reduction micro-motion system; the finite element method was used to complete the analysis of the system's driving performance, kinematic performance and dynamics, and the experimental method to complete the analysis of the system's driving performance and dynamics. The analysis results show that the micro-motion system drive has the advantages of high linearity, small error, etc., the system has excellent positioning performance, the system dynamic performance is good and will not resonate in the movement process. The research has an important reference value for the design and performance analysis of the micromotion system.

Key words Micro-motion system; No additional motion; Two-stage reduction; Drive performance; Dynamic performance

Corresponding author: YANG ManZhi, E-mail: xkdymz@xust.edu.cn

The project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52475537), the Xi'an Science and Technology Plan Project-Scientist+Engineer Team Construction Project (No. 24KGDW0029), the Shaanxi Provincial Department of Education Service Local Special Project (No. 23JC050), the Shaanxi Province Innovation Capability Support Plan Project (No. 2021TD-27), and the Beilin District 2024 Science and Technology Plan Project (No. GX2434).

Manuscript received 20240807, in revised form 20240909.

*20240807收到初稿, 20240909收到修改稿。国家自然科学基金面上项目(52475537), 西安市科技计划项目-科学家+工程师队伍建设项目(24KG-DW0029), 陕西省教育厅服务地方专项项目(23JC050), 陕西省创新能力支撑计划项目(2021TD-27), 碑林区2024年科技计划项目(GX2434)资助。

**杨满芝(通信作者), 男, 1986年生, 河南固始人, 汉族, 西安科技大学机械工程学院副教授, 博士, 硕士研究生导师, 主要研究方向为精密定位系统设计及控制、精密微动机构设计及性能。

***李 凯, 男, 1996年生, 陕西榆林人, 汉族, 西安科技大学机械工程学院硕士研究生, 主要研究方向为精密定位系统设计及控制、精密微动机构设计及性能。

0 引言

微动机构是精密机械系统的重要组成部分,其广泛应用于精密及超精密定位及加工领域^[1-7]。微动缩小机构可将输入微位移进行缩小,提供更小步长和运动范围的精密运动,为精密机械系统提供较小的灵活运动空间以及更加精密的机械运动,可广泛应用于微型位移传感器、微型机器人、生物医学、精密电子制造等领域^[8-11],在微型位移传感器中进行高精度的位移检测,在微型机器人中进行导航、感知并与环境互动,在生物医学中进行医学诊断和手术康复,在精密电子制造中进行纳米级电子器件的处理、表征、工程和制造。

学者对微动缩小机构研究主要集中在输出行程和定位精度。秦宇等^[12]基于柔性铰链杠杆机构设计了一种弹性位移缩小机构,该机构的理论缩小比为100,然而实验结果的缩小倍数约50。FUKUDA M等^[13-14]提出了一种用扭转板簧铰链组成的位移缩小机构,该机构的理论缩小比为1 000,实验结果表明输出位移波动较大,仅平均位移接近理论值。

然而现有缩小微动系统存在缩小比有限且运动时存在附加运动,导致运动精度低、输出稳定性差,影响其安全性。为了获得更小的缩小比,以获得更小的运动空间及运动精度,需要进行二级缩小微动系统设计。同时,二级缩小微动系统的驱动性能、运动性能和动态性能直接影响系统的精密性及安全性,对其进行研究尤为必要。

因此,本文设计了一种无附加运动的二级缩小微动机构,采用压电陶瓷致动器驱动二级缩小微动机构,设计了二级微动缩小系统,并对该系统驱动性能、运动性能和动态性能进行分析。

1 二级微动缩小机构设计

1.1 柔性铰链

柔性铰链通过自身材料弹性变形实现位移和力的精准传递和导向,具有分辨率高、响应快、无噪声等优点,广泛应用于高精密定位领域^[15-22]。

柔性铰链根据变形处外形不同可以分为直圆型、圆弧型、抛物线型和矩形型。通过比较柔度和运动精度,选用直圆型柔性铰链。直圆型柔性铰链等效模型如图1所示。

柔性铰链等效为一个回转副和两个杆件,两个杆件绕中心点做转动运动, O_p 和 O_q 为两杆件,则 O 为一

个回转副的中心点如图1(c)所示,受力后柔性铰链既产生拉压变形又产生弯曲变形,此时 O_p 和 O_q 的长度变为 O_p' 和 O_q' 如图1(d)所示。

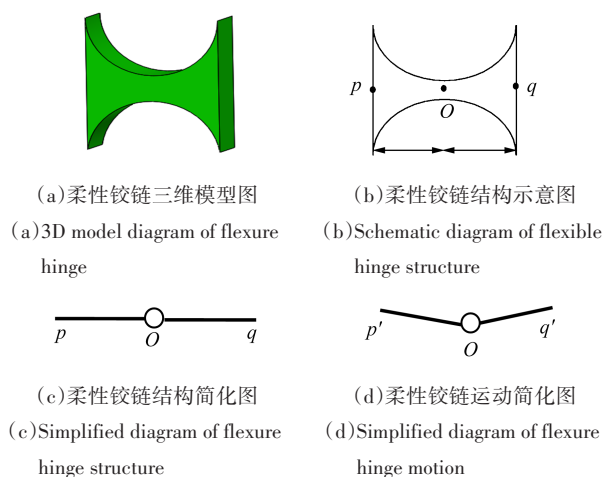


图1 单个直圆型柔性铰链等效模型

Fig. 1 Equivalent model of a single straight circular flexure hinge

1.2 杠杆原理

二级缩小微动机构杠杆原理如图2所示,其中 F_1 为输入力; F_2 为输出力; L_1 为输入力臂长度; L_2 为输出力臂长度。当杠杆保持平衡时,输入输出力的大小跟输入输出力臂的长短成反比,关系为

$$F_1 L_1 = F_2 L_2 \quad (1)$$

当杠杆受到输入力且输入力臂大于输出力臂,此时杠杆起到缩小作用。

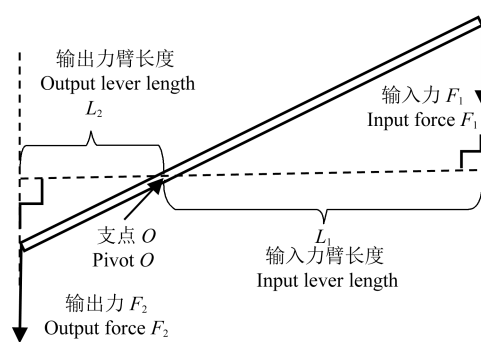


图2 二级缩小微动机构杠杆原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the lever principle of the two-stage reduction micro-motion mechanism

1.3 附加运动平衡原理

附加运动平衡原理如图3所示,16个柔性铰链对称设计组成8个柔性铰链组件。微驱动器放置在C处组成输入装置,柔性铰链1、4、5、8、9、12、13、16固定,微驱动器输入力时,柔性铰链组会产生主运动方向与非主运动方向的力,该设计因8个柔性铰链组对称分布,故非主运动方向产生的力大小相同、方向相反,使非运动方向产生力不会影响主运动方向的力,从而实

现附加运动平衡,确保微动系统的精度和准确性。

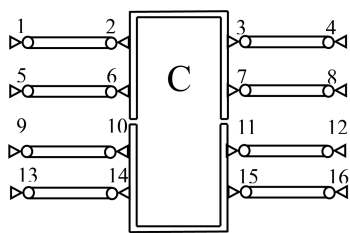


图3 柔性铰链附加运动平衡原理

Fig. 3 Additional motion balance principle of flexure hinge

1.4 二级缩小微动机构设计

根据杠杆原理和无附加运动平衡原理,设计了一种整体尺寸为138 mm×194 mm×50 mm的二级缩小微动机构,微动机构缩小比为25:1。微动机构的结构示意图如图4所示。该微动机构由32个柔性铰链呈y轴对称分布,其中柔性铰链15、16和微动机构的输入部分相连接,柔性铰链1、2和微动机构的输出部分相连接。在微动机构运动过程中,柔性铰链1~16起力传递的作用,将压电陶瓷致动器产生的位移传递到微动机构的输出部位;柔性铰链17~32起附加运动平衡作用,将运动过程中产生的非运动方向的力平衡,使微动机构始终沿着直线方向运动。

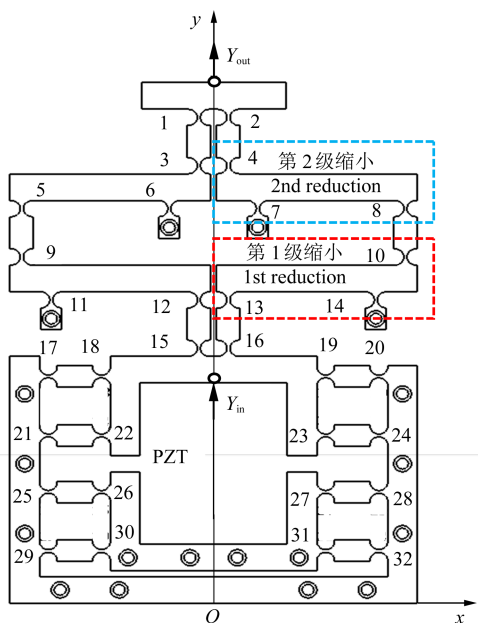


图4 二级缩小微动机构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the two-stage reduction micro-motion mechanism

因微动机构是关于Y轴对称设计,取右半部分进行分析。柔性铰链13、16将压电陶瓷制动器产生输入位移 Y_{in} 传递至第1级缩小机构(柔性铰链10、13、14),柔性铰链14固定为杠杆支撑点。柔性铰链8、10将第1级缩小后的输出位移传递至第2级缩小机构(柔性铰

链4、7、8),柔性铰链7固定为杠杆支撑点,柔性铰链2、4将第2级缩小后的输出位移传递到机构顶端,由此得到缩小后的输出位移 Y_{out} 。柔性铰链20右下边的3个孔、柔性铰链31左边的2个孔、机构最下方2个孔用以固定机构。

综合考虑材料的屈服极限、拉伸极限、塑性变形及加工过程中的各项性能后,微动机构的加工材料选为60Si2Mn,材料参数如表1所示。为减少加工误差,提高加工精度,选用线切割工艺加工。

表1 二级缩小微动机构材料(60Si2Mn)参数

Tab. 1 Material (60Si2Mn) parameters of the two-stage reduction micro-motion mechanism

材料参数 Material parameters	值 Values
弹性模量 Elasticity modulus/MPa	2.06×10^5
屈服极限 Yield limit/MPa	1 176
抗拉强度 Tensile strength/MPa	1 274
泊松比 Poisson's ratio	0.26
密度 Density/(g/cm ³)	7.85

1.5 缩小比计算

二级缩小微动机构根据无附加运动原理和杠杆原理设计,而无附加运动原理是平衡非运动方向产生的力,杠杆原理确定微动机构的缩小比,故缩小比只和起杠杆作用的柔性铰链(柔性铰链13、14、10、8、7、4)位置坐标的X轴有关,而Y轴方向发生位移与缩小比无关。设柔性铰链13的坐标值为 x_1 (mm),柔性铰链14的坐标值为 x_2 (mm),柔性铰链10的坐标值为 x_3 (mm),柔性铰链8的坐标值为 x_4 (mm),柔性铰链7的坐标值为 x_5 (mm),柔性铰链4的坐标值为 x_6 (mm)。6个柔性铰链的坐标值如表2所示。

表2 缩小作用柔性铰链坐标值

Tab. 2 Coordinate value of flexure hinge mm

x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6
5	55	65	65	15	5

在第1级缩小杠杆中,柔性铰链14固定为杠杆的支点,杠杆的两端分别为柔性铰链10、13,由杠杆原理可知,第1级缩小比为

$$H_1 = \frac{L_{13-14}}{L_{10-14}} = \frac{x_2 - x_1}{x_3 - x_2} = 5 \quad (2)$$

在第2级缩小杠杆中,柔性铰链7固定为杠杆的支点,杠杆的两端分别为柔性铰链4、8,由杠杆原理可知,第2级缩小比为

$$H_2 = \frac{L_{8-7}}{L_{4-7}} = \frac{x_4 - x_5}{x_6 - x_5} = 5 \quad (3)$$

因此,设计的二级缩小微动机构的缩小比为

$$H = H_1 \times H_2 = \frac{x_2 - x_1}{x_3 - x_2} \times \frac{x_4 - x_5}{x_5 - x_6} = 25 \quad (4)$$

根据式(4)可计算出输入分别为0~15 μm 的理论输出值。

2 二级缩小系统设计

2.1 微驱动器选型

目前常用微驱动器是磁致伸缩致动器和压电陶瓷致动器两种。磁致伸缩致动器是磁性体的形状在外部磁场的作用下发生改变,当磁场消失时,磁性体形状恢复原来状态。压电陶瓷致动器的原理是它的压电效应,一种电介质材料受到电场作用时该电介质材料发生形变,而电场消失后该电介质材料恢复到原来状态。

通过对磁致伸缩致动器和压电陶瓷致动器的使用情况进行比较,同时结合微动系统的结构尺寸、输出力等因素,最终选定型号为P-235.1s压电陶瓷致动器作为驱动器。压电陶瓷致动器最大伸长量为15 μm ,最大运动频率为300 Hz,工作电压0~10 V。

2.2 系统结构设计

二级缩小微动系统整体包括二级缩小微动机构、压电陶瓷致动器、垫片和固定套,结构如图5所示。压电陶瓷致动器作为微驱动器,将位移输入到二级缩小微动机构之后,二级缩小微动机构通过柔性铰链的传递、杠杆原理缩小及无附加力平衡作用将压电陶瓷致动器输入的直线位移缩小25倍后再精确输出,为了连接微动机构和压电陶瓷致动器,设计了垫片和固定套。固定套有两方面的作用:一是固定压电陶瓷致动器,使输入位移沿着运动方向传递;二是通过调整固定套和螺栓等零部件的连接,将压电陶瓷驱动器和垫片放入微动机构的内部。垫片也有两方面的作用:一是使压电陶瓷致动器得到预紧,确保输入位移直线传递;二是保护压电陶瓷致动器,防止压电陶瓷致动器与微动机构直接接触产生磨损。微动机构的柔性铰链组件对压电陶瓷驱动器的输出进行精确导向,使非运动方向的力平衡,保证运动过程中的精密性及安全性。

3 驱动性能分析

3.1 驱动性能研究

压电陶瓷致动器有蠕变、迟滞、非线性等固有属性影响它的驱动,本文为了验证系统的驱动效果,即在压电陶瓷致动器上升阶段和回程阶段分别对其输

入不同的电压,则压电陶瓷致动器输出相应的位移,利用这个运动特点进行了系统驱动性能实验。

实验装置如图6所示,包括压电陶瓷致动器(P-235.1s)、连接件、实验底座、磁力表座、1个U1电涡流传感器(分辨率为0.05 μm ,量程为1 mm,线性误差为 $\pm 0.25\%$)、二级缩小微动机构等。为了防止外界环境对实验的影响,将实验在恒温27 $^{\circ}\text{C}$ 的条件下进行,并将实验底座放置于隔振台之上,用连接件将装配了压电陶瓷致动器的微动机构固定于实验底座上,通过改变压电陶瓷致动器输入电压,用U1传感器测量出压电陶瓷致动器的输出位移。

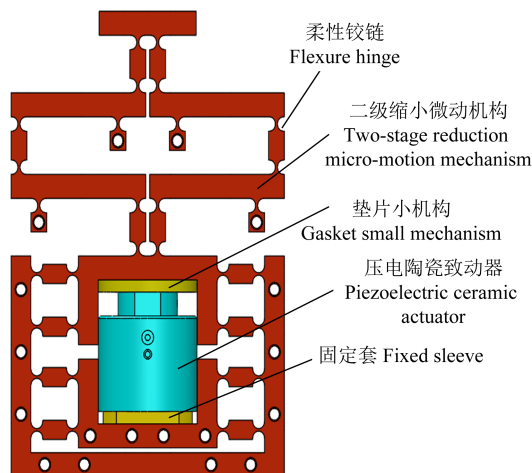


图5 二级缩小微动系统整体结构

Fig. 5 Overall structure of the two-stage reduced micro-motion system

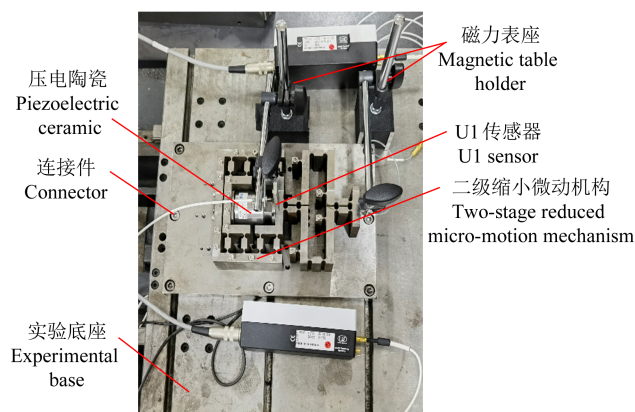


图6 系统驱动性能实验

Fig. 6 System drive performance experiment

为了减小实验的测量误差对结果的影响,进行了多次重复实验。压电陶瓷致动器上升阶段和回程阶段实验结果如表3所示。

将表3中实验数据进行拟合, X 轴设置为压电陶瓷的工作电压, Y 轴设置为 U_1 传感器测得的输出位移(即压电陶瓷致动器的输出位移),实验的线性拟合曲线如图7所示。

表 3 系统驱动性能实验结果

Tab. 3 Experimental results of system drive performance

上升阶段 Ascending stage		回程阶段 Return stage	
工作电压 Operating voltage U/V	输出位移 Output displacement $\Delta y/\mu\text{m}$	工作电压 Operating voltage U/V	输出位移 Output displacement $\Delta y/\mu\text{m}$
1.014	1.23	9.665	13.52
2.055	3.04	8.766	12.62
3.021	4.29	7.746	11.93
4.020	5.99	6.765	9.69
5.015	7.25	5.741	8.16
6.011	8.53	4.716	6.46
7.041	10.23	3.702	4.99
8.045	11.43	2.671	3.57
9.025	13.07	1.736	2.34
9.982	14.36	0.934	1.26

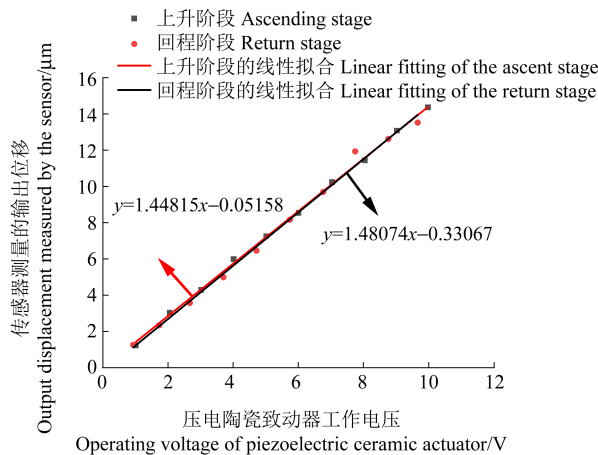


图 7 系统驱动特性实验结果

Fig. 7 Experimental results of system driving performance

从图 7 中得到压电陶瓷致动器的工作电压 U 与压电陶瓷致动器的输出位移 Δy 在上升阶段与回程阶段的拟合线性方程分别为

$$\Delta y = \begin{cases} 1.44815U - 0.05158, & \text{上升阶段} \\ 1.48047U - 0.33067, & \text{回程阶段} \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)得到上升阶段和回程阶段拟合的线性度分别为 0.998 61 和 0.992 14。

系统的驱动误差为

$$\theta = \frac{g_2 - g_1}{g_2} \times 100\% = 2.18\% \quad (6)$$

式中, g_1 、 g_2 分别为上升阶段和回程阶段线性方程的斜率。

通过系统的驱动性能实验可知,系统驱动过程中具有驱动精度高(驱动误差为 2.18%)、线性度高(最小

线性度为 0.992 14)等优点。

4 运动性能分析

本文采用有限元法对微动系统的运动性能进行分析。将三维模型导入仿真软件中,根据表 1 中的材料参数分别对材料名称、密度、弹性模量、泊松比等进行设置;然后进行网格划分,在 Mesh 中 Resolution 设置为 5、Transition 中设置为 Slow、Span Angle Center 中设置为 Fine,为防止柔性铰链的圆弧面在运动过程中应力集中,将其进行细化,Refinement 设置为 1,如图 8 所示,模型共划分为 745 626 个单元、1 126 720 个节点。

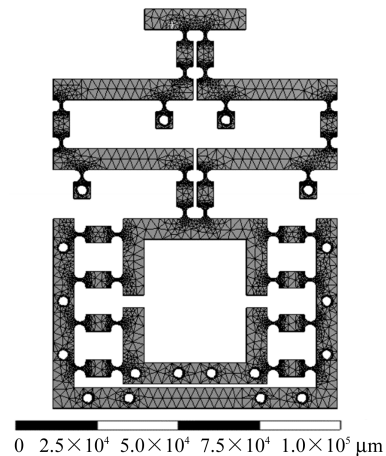


图 8 二级缩小微动机构网格划分

Fig. 8 Grid division of the two-stage reduction micro-motion mechanism

对二级缩小微动机构上对称分布的 18 个孔添加固定约束,如图 9 中 A 所示;输入位置依次施加 1~15 μm 的输入位移,如图 9 中 B 所示;利用变形探针测得输出位置 Y 轴方向的位移,如图 10 所示,仿真输出结果如表 4 所示。

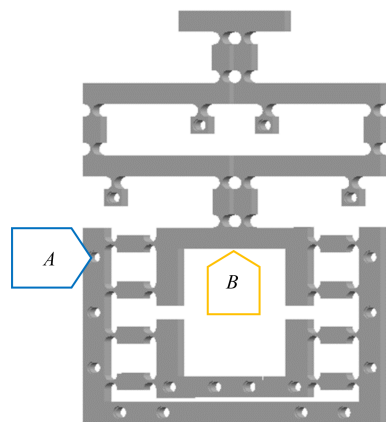


图 9 施加固定约束与位移输入

Fig. 9 Applying fixed constraints and inputting displacements

由表 4 分析可知,微动系统的有限元仿真最大输出位移为 0.598 91 μm ,理论输出和有限元仿真输出的最大绝对误差为 0.001 09 μm 、最大相对误差为 0.26%。

故微动系统定位性能优良。

表 4 系统运动性能分析结果
Tab. 4 Results of system motion performance analysis

输入位移 Input displace- ment/ μm	理论输出位移 Theoretical output displace- ment/ μm	仿真输出位移 Simulation output displacement/ μm	绝对误差 Absolut error/ μm	相对误差 Relative error/%
1.0	0.04	0.039 91	0.000 09	0.23
2.0	0.08	0.079 79	0.000 21	0.26
3.0	0.12	0.119 82	0.000 18	0.15
4.0	0.16	0.159 69	0.000 31	0.19
5.0	0.20	0.199 58	0.000 42	0.21
6.0	0.24	0.239 44	0.000 56	0.23
7.0	0.28	0.279 49	0.000 51	0.18
8.0	0.32	0.319 19	0.000 81	0.25
9.0	0.36	0.359 26	0.000 74	0.21
10.0	0.40	0.399 29	0.000 71	0.18
11.0	0.44	0.439 03	0.000 97	0.22
12.0	0.48	0.479 04	0.000 96	0.20
13.0	0.52	0.518 93	0.001 07	0.21
14.0	0.56	0.558 96	0.001 04	0.19
15.0	0.60	0.598 91	0.001 09	0.18

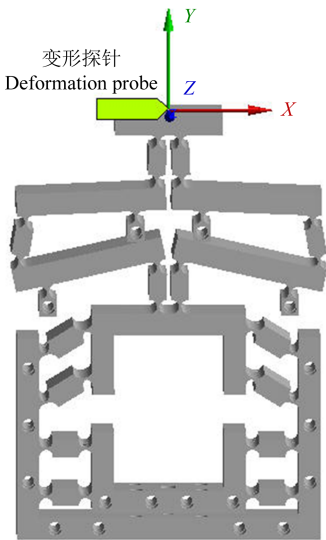


图 10 输出位移检测
Fig. 10 Output displacement detection

5 模态分析

为了确保系统运动过程中不会发生共振,需要对二级缩小微动机构固有频率进行分析,并保证其与驱动频率不会发生重叠。

5.1 二级缩小微动机构有限元分析

采用有限元对二级缩小微动机构进行模态分析

时,将微动机构的三维结构模型导入有限元软件中,选择 model 模块,材料设置、网格划分等与运动性能分析设置相同。为分析二级缩小机构所有振型微动,选择自由模态进行分析,前 6 阶固有频率计算结果如表 5 所示。

表 5 二级缩小微动机构的前 6 阶固有频率
Tab. 5 First six natural frequencies of the two-stage reduction
micro-motion mechanism

阶次 Order	有限元计算固有频率值 Finite element calculation of natural frequency values/Hz	实验固有频率值 Experiment natural frequency value/Hz	相对误差 Relative error/%
1	167.62	181.00	7.98
2	196.99	208.50	5.84
3	520.44	482.00	7.38
4	562.27	516.50	8.14
5	705.14	653.50	7.32
6	712.98	665.00	6.72

5.2 实验分析

采用实验方法对二级缩小微动机构进行固有频率测试时,实验装置包括数据传感器、橡皮绳、二级缩小微动机构、M+P 动态测试控制分析系统、高精度力锤等,如图 11 所示。用橡皮绳将二级缩小微动机构自由悬挂防止外界因素干扰,将数据传感器的一端与二级缩小微动机构的输出位置连接进行数据的采集,另一端与 M+P 动态测试控制分析系统相连进行数据的传输,微动机构被高精度力锤快速轻轻敲击,经数据传感器采集并传输到 M+P 动态测试控制分析系统,从而得到实验数据如图 12 所示。



1. 数据传感器 Data sensor; 2. 橡皮绳 Rubber cord; 3. 二级缩小微动机构 Two-stage reduced micro-motion mechanism; 4. M+P 动态测试控制分析系统 M+P dynamic test control analysis system; 5. 高精度力锤 High precision force hammer。

图 11 二级缩小微动机构固有频率实验

Fig. 11 Natural frequency experiment of the two-stage reduced micro-motion mechanism

二级缩小微动机构前6阶固有频率实验结果和有限元分析结果如表5所示,并求出了实验结果和有限元分析结果的相对误差。

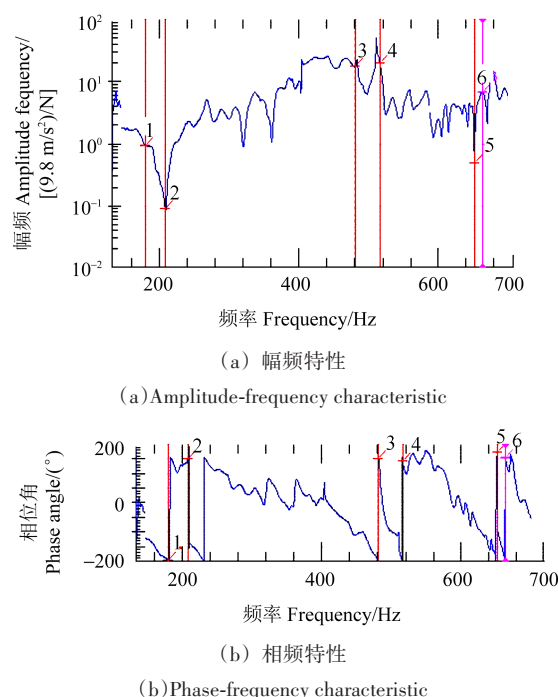


图12 二级缩小微动机构前6阶固有频率实验结果

Fig. 12 Experimental results of the first six natural frequencies of the two-stage reduction micro-motion mechanism

由表5可知,有限元分析与实验结果的最大相对误差为8.14%,证明模态分析的正确性;微动系统所用的压电陶瓷致动器的运动频率为300 Hz。系统在工作过程中微动机构和微驱动器不会发生共振现象,因此,微动机构动态性能优良且设计满足要求。

6 结论

本文完成了一种无附加运动的二级缩小微动系统设计,并采用有限元及实验法对系统驱动性能及动态性能进行了分析,主要结论如下:

1)设计了一种无附加运动的二级缩小微动系统,系统具有较大缩小比(25:1),可将输入位移精密缩小以获得较大缩小比,且运动过程中无非运动方向的附加运动确保了系统精密性及安全性。

2)系统驱动性能良好,系统上升阶段和回程阶段最小线性度为0.992 14,微动系统的驱动误差仅为2.18%。

3)系统定位性能优良,系统有限元仿真的最大输出位移为0.598 91 μm ,理论输出和有限元仿真输出最大绝对误差为0.001 09 μm 、最大相对误差为0.26%。

4)系统动态性能优良,实验和有限元最大相对误差仅为8.14%,微动系统在运动的过程中不会发生共振。

参考文献(References)

- [1] YIP W S, TO S, ZHOU H T. Current status, challenges and opportunities of sustainable ultra-precision manufacturing [J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2022, 33(8): 2193-2205.
- [2] WANG S, KONG L, WANG C, et al. Ultra-precision manufacturing of microlens arrays using an optimum machining process chain [J]. *Optics Express*, 2023, 31(2): 2234-2247.
- [3] YUAN J L, LYU B H, HANG W, et al. Review on the progress of ultra-precision machining technologies [J]. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2017, 12(2): 158-180.
- [4] ZHOU H T, YIP W S, REN J Z, et al. Thematic analysis of sustainable ultra-precision machining by using text mining and unsupervised learning method [J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2022, 62: 218-233.
- [5] LAVANYA S B, JAYANTH G R. A nano-positioning system based on an optimal two-stage linear displacement amplifier [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2024, 366: 114984.
- [6] ZHUANG Z X, DU H H, SZE YIP W, et al. Development of a high-performance cutting device based on hybrid actuation for ultra-precision machining [J]. *Materials & Design*, 2023, 225: 111420.
- [7] YANG M Z, ZHANG X D, ZHANG C W, et al. Design and performance research of a precision micro-drive reduction system without additional motion [J]. *Micromachines*, 2022, 13(10): 1636.
- [8] LI X E, WANG R, DU H M, et al. Three-dimensional micro-displacement measurement method based on capacitance-grating sensor [J]. *Measurement*, 2022, 187: 110179.
- [9] GARDI G, CERON S, WANG W D, et al. Microrobot collectives with reconfigurable morphologies, behaviors, and functions [J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 2239.
- [10] SINGH A, AMIJI M M. Application of nanotechnology in medical diagnosis and imaging [J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2022, 74: 241-246.
- [11] PAYAL, PANDEY P. Role of nanotechnology in electronics: a review of recent developments and patents [J]. *Recent Patents on Nanotechnology*, 2022, 16(1): 45-66.
- [12] 秦宇, 冯之敬. 纳米级定位精度弹性位移缩小机构的仿真与实验 [J]. *纳米技术与精密工程*, 2007(1): 19-22.
QIN Yu, FENG ZhiJing. Simulation and experiment of nano-positioning compliant mechanisms for motion reduction [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2007(1): 19-22 (In Chinese).
- [13] HAYASHI M, FUKUDA M. Generation of nanometer displacement using reduction mechanism consisting of torsional leaf spring hinges [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufactur-*

- ing, 2012, 13(5): 679-684.
- [14] FUKUDA M, HAYASHI M, MARITA S. Generating sub-nanometer displacement using reduction mechanism consisting of torsional leaf spring hinges [J]. Measurement Science Review, 2014, 14(1): 48-51.
- [15] WEI H X, SHIRINZADEH B, TANG H, et al. Closed-form compliance equations for elliptic-revolute Notch type multiple-axis flexure hinges[J]. Mechanism and Machine Theory, 2021, 156: 104154.
- [16] LI L J, ZHANG D, QU H B, et al. Generalized model and configuration design of multiple-axis flexure hinges[J]. Mechanism and Machine Theory, 2022, 169: 104677.
- [17] 伍建军, 谢周伟, 黄裕林, 等. 基于田口方法柔性铰链应力对设计参数的灵敏度分析[J]. 机械强度, 2016, 38(2): 252-258.
WU JianJun, XIE ZhouWei, HUANG YuLin, et al. Sensitivity analysis on stress of flexible hinges to design parameters based on taguchi method[J]. Journal of Mechanical Strength, 2016, 38(2): 252-258(In Chinese).
- [18] 任 宁, 王长路, 欧开良, 等. 新型双曲线直梁复合型柔性铰链刚度研究[J]. 机械强度, 2012, 34(5): 781-785.
REN Ning, WANG ChangLu, OU KaiLiang, et al. Research on rigidity of the novel hyperbolic-rectangle flexural hinges[J]. Journal of Mechanical Strength, 2012, 34(5): 781-785(In Chinese).
- [19] ZHANG X, KANG X, LI B. Development and evaluation of a lightweight flexure-based lockable joint for morphing wings [J]. Aerospace Science and Technology, 2023, 143: 108720.
- [20] KOPPEN S, LANGELAAR M, VAN KEULEN F. A simple and versatile topology optimization formulation for flexure synthesis [J]. Mechanism and Machine Theory, 2022, 172: 104743.
- [21] CHEN X G, LI Y M, XIE Y L, et al. Design and analysis of new ultra compact decoupled XYZ θ stage to achieve large-scale high precision motion[J]. Mechanism and Machine Theory, 2022, 167: 104527.
- [22] YU H Q, HAN J G, LI S Y, et al. Hierarchical micro/nano structures fabrication by a novel tri-axial piezoelectric servo system [J]. Materials & Design, 2022, 224: 111330.