

文章编号 1004-924X(2024)12-1891-11

低寄生性能均衡的柔顺导向平台优化设计与实验

郑诚心¹, 孙小庆^{1,2*}, 孙志宏¹, 缪翌杰¹, 侯秀松³

- 东华大学 机械工程学院, 上海 201620;
- 东华大学 产业用纺织品教育部工程研究中心, 上海 201620;
- 国家先进印染技术创新中心, 山东 泰安 271000

摘要:受青蛙后肢的运动过程和对称式结构的启发,提出一种兼顾长行程和较高工作频率的柔顺刀具导向平台,解决了刀具导向平台中直驱式工作行程短和放大式工作频率低的问题。首先,提出柔顺导向平台初步模型,确定重要杆件长度。其次,利用有限元分析对初步模型进行多目标优化设计,并采用熵权法和优劣解距离法(TOPSIS)进行得分排序。在此基础上,进一步利用有限元分析进行结构的多工况拓扑优化。最后,加工试验样机进行实验测试。有限元分析和试验结果表明:该导向平台放大比为4.67,最大行程可达90 μm左右,一阶固有频率为1765 Hz,实现了长行程和高频率的运动;同时,导向平台的分辨率可达亚微米级,轨迹跟踪误差约为2%。综合仿真结果和实验测试结果,所提出来的柔顺刀具导向平台可以实现精密导向运动。

关键词:柔顺机构;压电驱动;长行程;高频;寄生位移

中图分类号:TH703;TP27 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/OPE.20243212.1891

Optimal design and experimentation of a low-parasitic performance-balanced compliant guide platform

ZHENG Chengxin¹, SUN Xiaoqing^{1,2*}, SUN Zhihong¹, MIAO Yijie¹, HOU Xiusong³

- College of Mechanical Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China;
- Engineering Research Center of Technical Textiles, Ministry of Education, Donghua University, Shanghai 201620, China;
- National Innovation Center of Advanced Dyeing & Finishing Technology, Tai'an 271000, China)

* Corresponding author, E-mail: sunxq@dhu.edu.cn

Abstract: Inspired by the movement process and symmetrical structure of the hind limbs of frogs. A compliant tool guide platform that combines long stroke and high working frequency was proposed. The problems of short working stroke of the direct drive type and low working frequency of the amplified type in the tool guiding platform were solved. First of all, a preliminary model of the compliant guide platform was proposed. The lengths of important rods were determined. In the second place, multi-objective optimization design was carried out on the preliminary model using finite element analysis. And the entropy weight

收稿日期:2024-03-07;修订日期:2024-04-12.

基金项目:中国博士后面上资助项目(No. 2022M712835);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(No. 2232023G-06);国家先进印染技术创新中心科研基金(No. 2022GCJJ11);机械系统与振动国家重点实验室课题资助项目(No. MSV202317)

method and the distance between superior and inferior solutions (TOPSIS) were used to rank the scores. On this basis, the structure was further optimized for the multi-operational topology using finite element analysis. In the end, the test prototype was machined for experimental testing. The finite element analysis and experimental results show that the amplification ratio of the guide platform is 4.67. And the maximum stroke can reach about 90 μm . The first-order natural frequency is 1 765 Hz. The results of experimental tests on amplification ratio and natural frequency indicate that the proposed tool guide platform is capable of achieving long stroke and high frequency motion. And the X-axis parasitic error is 0.002 2%. This can be seen as the presence of low parasitic displacements in the guide platform. At the same time, the resolution of the guide platform can reach the sub-micron level. And the trajectory tracking error is about 2%. Combining the simulation and experimental test results, the proposed compliant tool guide platform can achieve precision guided motion.

Key words: compliant mechanism; piezoelectric actuation; long stroke; finite element design; parasitic displacement

1 引言

随着现代科学技术的发展,近年来,研究的关注点主要集中在微结构、微运动和高精度等方面^[1-3]。由于柔顺机构是通过自身弹性构件的挠曲变形实现运动^[4],其运动精度可以达到微纳米级别,因此常被运用于精密领域,如微喷润滑^[5]、定位平台^[6-8]、压电泵^[9]、快刀伺服装置(Fast Tool Servo, FTS)^[10]等。在快刀伺服装置中,柔顺机构的无摩擦、无润滑、无装配、高精度、重量轻等特点避免了传统加工方式的短板,实现光学曲面的高效高精加工制造,促进复杂光学元件的发展和推广应用。

快刀伺服装置的驱动器主要包括压电致动器、磁致伸缩器和音圈电机等。压电致动器具有结构简单紧凑、分辨率高、输出力大等性能特征,更能够适用于快刀伺服装置。因此,在以往的研究中,众多学者给出了多项应用于快刀伺服装置的压电-柔顺机构的刀具导向平台方案^[10-18]。张建国等^[11]利用圆锥曲线柔性铰链设计出一款压电致动器直驱的柔性刀架用于实现高频加工。该柔性刀架输入刚度为 61.926 N/ μm ,工作频率达 8 KHz,跟踪误差为 5%,但工作行程只有 6 μm 。桂堂军^[12]则在单自由度基础上提出了两自由度的刀具伺服装置,其XY方向的耦合误差为 3.4%,1.3%,跟踪误差 2.3%,2.5%,工作频率为 2 540 Hz,工作行程则同样只有 10 μm 左右。

为克服压电直驱式的刀具导向平台工作行

程过短的问题,满足需要长行程的加工要求,有些学者提出利用柔顺机构来实现压电位移放大的方法。Van-Khien Nguyen等^[13]提出一款利用杠杆放大原理的导向平台,尺寸约为 90 mm \times 150 mm \times 10 mm。其放大倍数为 3.016,输入刚度为 28.574 N/ μm ,输出刚度为 0.312 6 N/ μm ,但工作频率只有 260.9 Hz。Liang等^[14]借助对称式分布和二级杠杆放大原理,设计出放大比为 2.872 5,应力为 260 MPa,工作频率为 316.84 Hz的导向平台。闫鹏、李金银^[15-16]设计的导向平台工作行程达 100 μm ,放大比为 4.45,尺寸约为 110 mm \times 80 mm \times 15 mm,其中耦合位移为 0.005 μm ,且拥有 858 Hz和 1 029 Hz两种工作频率,但两种工作频率切换需要手动释放和固定刚度可调机构,无法实现快速切换长行程和高频率两种模式。

为平衡直驱式刀具导向平台工作行程较短和放大式刀具导向平台工作频率较低,实现刀具导向平台具有长行程输出性能和较高的工作频率,同时为保障加工精度,消除机构的寄生位移,本文通过观察青蛙后肢的运动过程和结构,对杠杆放大器、Scott-Russell放大器、桥式放大器采用新的串联布置方式,提出一种综合性能优良的小体积仿生低寄生柔顺导向平台。详细讨论所设计的刀具导向平台的仿生运动原理和结构优化分析,并对该导向平台进行有限元仿真以及实验测试。

2 结构设计与分析

青蛙在游动过程中,后肢主要运动动作为伸展和收缩,分解运动过程如图 1 所示^[3]。若固定青蛙头部不动,则青蛙游动可以视为后肢末端垂直导向运动的过程。观察青蛙后肢结构,发现青蛙后肢呈现对称式结构,该结构能够保证青蛙在游动中方向的直线性和强大的输出力。

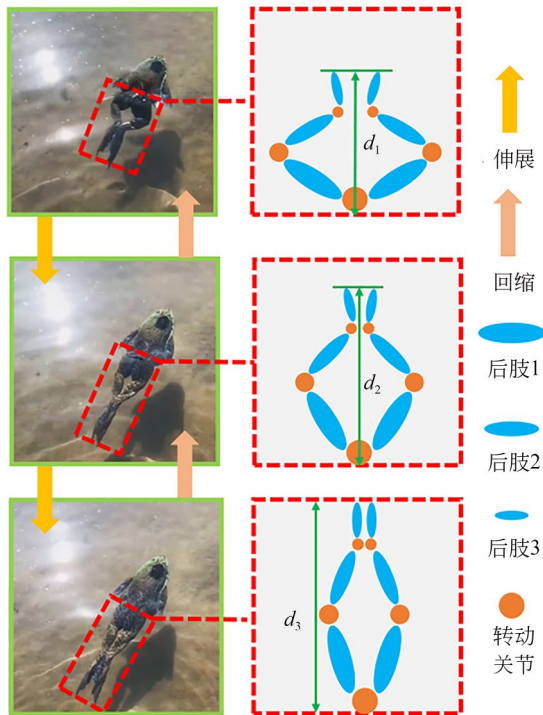


图 1 青蛙运动过程分解

Fig. 1 Decomposition of frog movement

根据青蛙运动过程和后肢对称式结构,本文提出一种柔顺微位移放大导向平台,如图 2 所示。导向平台采用全新的杠杆放大器、Scott-Russell 放大器、三角放大器对称串联形式,其中杠杆放大器对应于后肢 1、Scott-Russell 放大器对应于后肢 2、三角放大器对应于后肢 3,对应关系表示在图 2 黑色阴影处。考虑压电制动器尺寸和整体结构,在 Scott-Russell 放大器和三角放大器之间引入中间连接杆。导向平台的整体尺寸为 56 mm×60 mm×10 mm,其结构尺寸相较于已提出的放大式刀具导向平台,尺寸较小。导向平台的对称式设计和末端的直梁型柔性铰链在结构上降低了运动方向上的寄生误差,其整体刀具

伺服装置如图 3 所示。

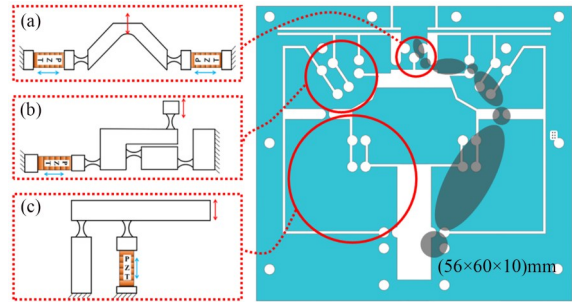


图 2 柔顺导向平台结构分解

Fig. 2 Structural decomposition of the compliant guide platform

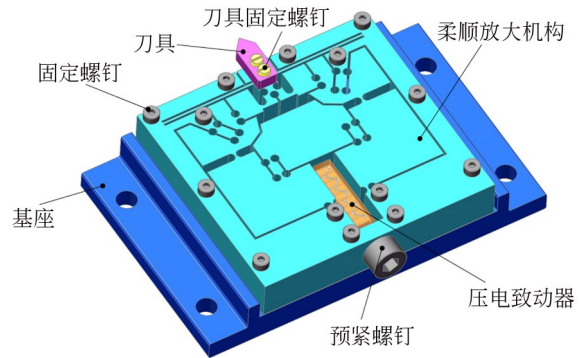


图 3 整体刀具伺服装置

Fig. 3 Integral tool servo device

3 模型优化

根据经验法,设计初步模型,确定模型各杆长如表 1 所示。

表 1 模型各杆杆长

Tab. 1 Length of each rod in the model

杆	长度/mm	杆	长度/mm
l_{AB}	5	l_{EF}	5.4
l_{BC}	13.9	l_{FG}	6
l_{CD}	25.5	l_{GH}	7
l_{DF}	9	l_{HI}	3.8
l_{DG}	10.8	l_{MN}	23.5

在建立初步模型时,除确定空间结构大小和各杆杆长以外,对各铰链相关参数进行大量的系统性设计。图 4 中的(a)、(b)所示的即为柔性铰链半径和厚度的设计点。由图 4(a)、(b)中的拟

合直线可知,在设计过程中,导向平台的放大比和固有频率存在设计矛盾。除此以外,从图 4(c) 中可以看到,柔性铰链的半径对设计的影响程度小于柔性铰链的厚度。

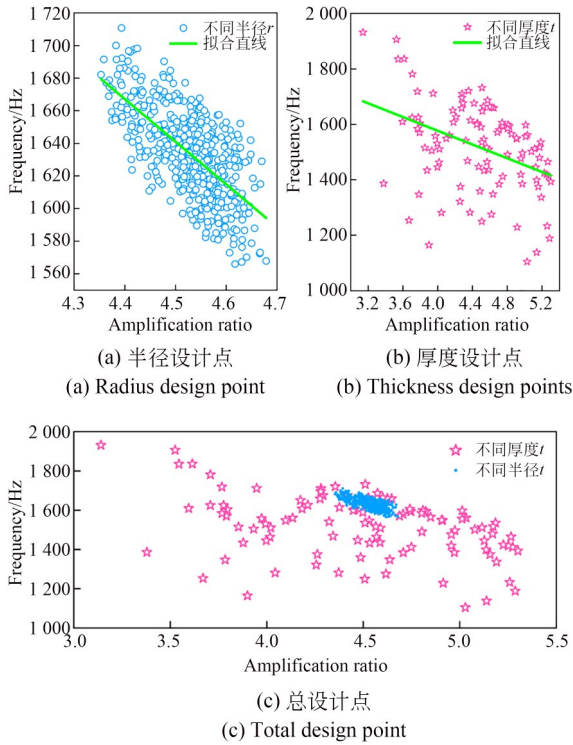


图 4 不同半径和厚度的设计点
Fig. 4 Design points with different radius and thicknesses

3.1 参数优化

为平衡设计矛盾,得出优解,有必要对模型进行多目标优化。首先,对柔性铰链的半径和最小厚度进行灵敏度分析,分析结果如图 5~图 6 所

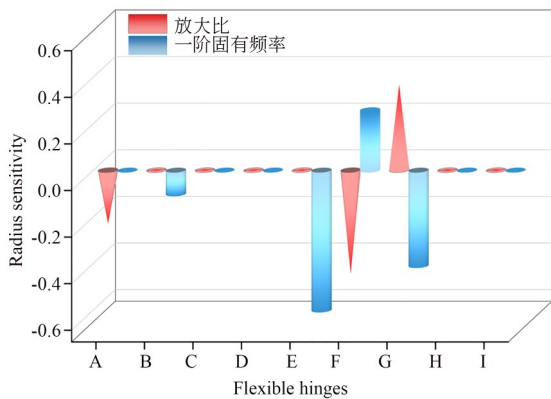


图 5 半径灵敏度分析结果
Fig. 5 Radius sensitivity analysis results

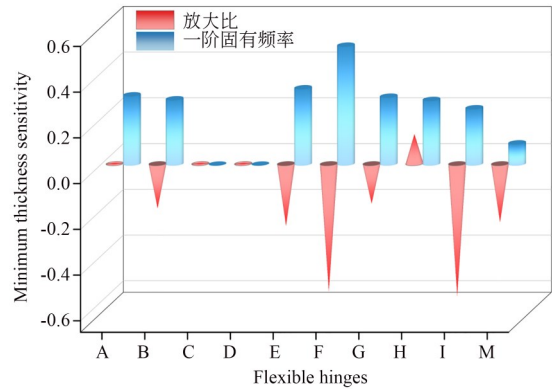


图 6 最小厚度灵敏度分析结果
Fig. 6 Minimum thickness sensitivity analysis results

示。灵敏度绝对值越大,则柔性铰链对尺寸变化越敏感,这有利于减少后期优化的工作量和筛选后期加工重点对象。

结合前期设计和分析,纳入 $t_F, t_I, t_E, r_G, r_F, r_E, L_1, L_2, L_3, L_4$ 为设计变量。其中, L_1 为输入杆块上下端的距离, L_2, L_3 为 l_{CD}, l_{DG} 杆块外侧到柔性铰链 D 中心的距离, L_4 为输出杆块侧面到对称中心的距离。

在前期设计中,发现该对称结构的寄生位移较小,故多目标优化主要用于平衡放大比和固有频率。在 ANSYS Workbench 中搭建多目标优化模块,设定固有频率和放大比为优化目标,待优化参数变量取值范围如表 2 所示。加工件材质为 AI(6061-T6),其弹性模量为 69 GPa,泊松比为 0.33,厚度为 $b=10$ mm。

表 2 优化变量取值范围

Tab. 2 Optimization variable value range

优化变量	t_F, t_I, t_E	r_G, r_F, r_E	L_1	L_1, L_2	L_3
最小值/mm	0.5	1	13	8	4
最大值/mm	0.8	1.2	16	10	6

为避免人为因素干扰过大,结合熵权法和优劣解距离法(TOPSIS)对设计点进行得分排序,得分排名前 63 的设计点如图 7 所示。为协调整体尺寸统一和方便加工,对设计点进行选取。

最终模型各柔性铰链尺寸和其他重要尺寸如表 3 所示。

对参数优化后的模型分别进行 Y 轴输出性能、X 轴寄生位移的有限元仿真分析,添加输入

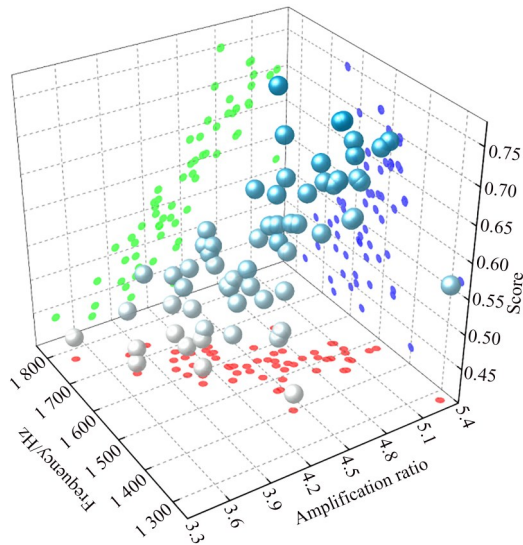


图 7 多目标优化设计点

Fig. 7 Multi-objective optimization of design points

表 3 部分重要参数尺寸

Tab. 3 Dimensions of some important parameters

参数	$t_{A-G,I}$	t_H	$t_{M,N}$	r_{A-I}
数值/mm	0.5	0.8	0.5	1
参数	L_1	L_2	L_3	L_4
数值/mm	14.5	8	8	4

位移为 $10\ \mu\text{m}$,如图 8 所示。提取参数优化模型的前六阶模态如图 9 所示。

由图 8~图 9 可知,仿真放大比为 5.312 5、X 轴寄生误差为 0.006 9%,一阶固有频率为 1 476 Hz。除此以外,仿真分析的输入刚度为 $26\ \text{N}/\mu\text{m}$ 、输出刚度为 $0.508\ \text{N}/\mu\text{m}$ 。因此,参数优化模型满足长行程和高频响的工作要求。

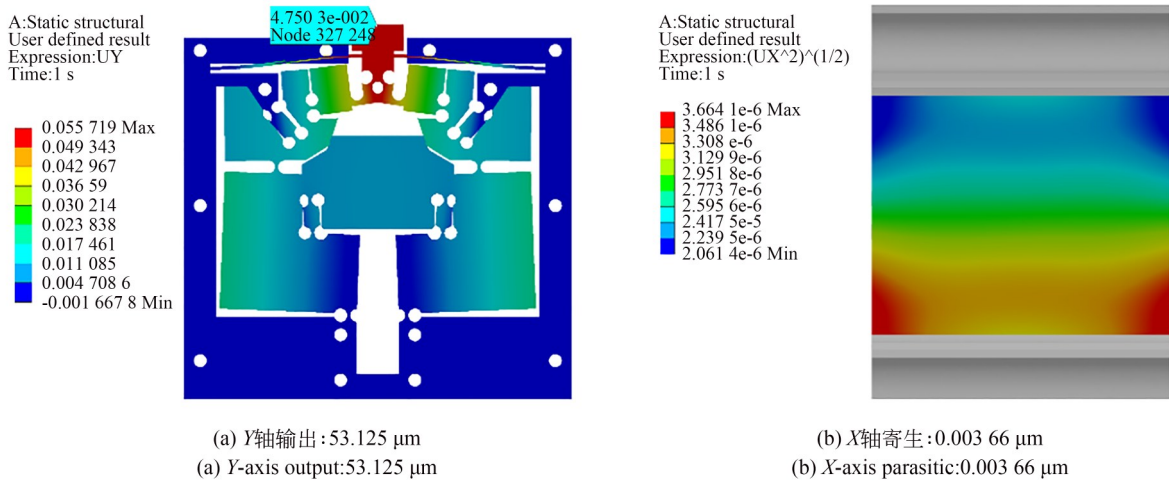


图 8 参数优化模型的 X 轴、Y 轴位移仿真结果

Fig. 8 Simulation results of X- and Y-axis displacements of parameter optimized model

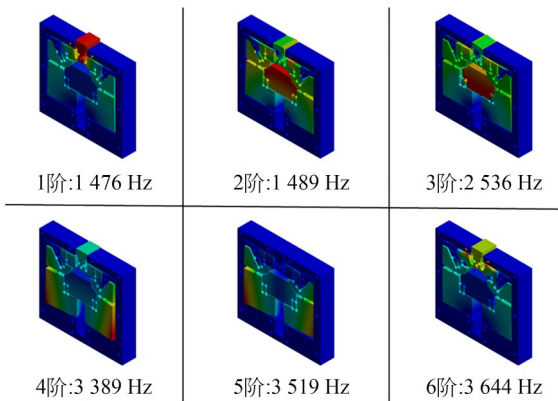


图 9 参数优化模型的模态云图

Fig. 9 Modal cloud of the parameter optimized model

3.2 拓扑优化

参数优化后的导向平台,已经具备长行程和较高频率的特点,但其结构内部杆块过于臃肿,惯性力较大。为减小惯性力影响和进一步提高工作频率,采用多工况拓扑优化在参数优化基础上进行模块优化。在 ANSYS Workbench 中搭建多工况拓扑优化模块,设定最小柔度和最大固有频率为优化目标。

利用搭建好的优化模块进行拓扑优化,图 10 展示的为保留质量 30% 和 20% 的结果。

观察优化结果可知,输出端和输入端不符合

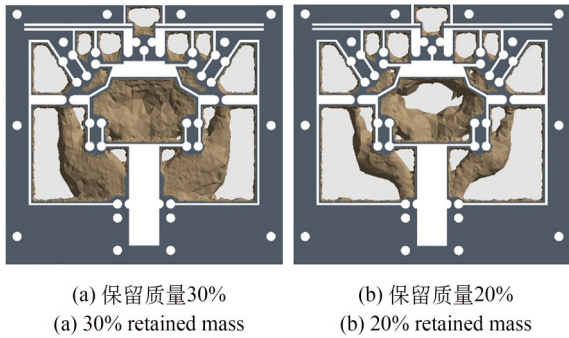


图 10 拓扑优化结果

Fig. 10 Topology optimization results

实际需求,因此对输出端和输入端单独进行优化目标为最小柔度的拓扑优化。其固定约束、施加的力、优化结果如图 11 所示。依据拓扑优化结

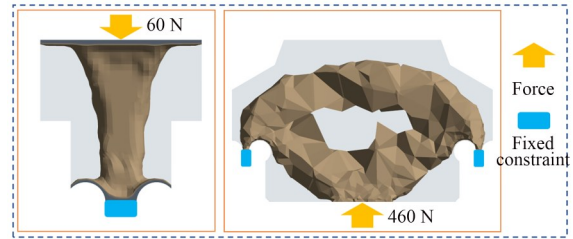


图 11 输入端和输出端拓扑优化结果

Fig. 11 Input and output topology optimization results

果,建立拓扑优化后的导向平台。在保证功能的基础上,为简化平台结构,模型重新建立后的顶部固定孔数量由 4 个减为 2 个。

对拓扑优化后的模型进行有限元仿真,其 Y 轴输出性能、X 轴寄生位移如图 12 所示。

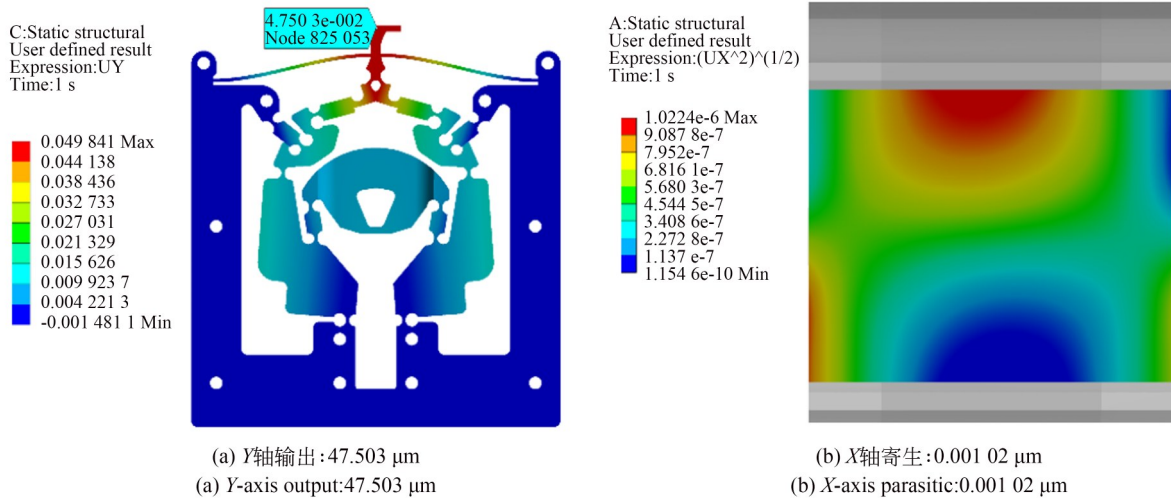


图 12 拓扑优化模型的 X 轴, Y 轴位移仿真结果

Fig. 12 Simulation results of X- and Y-axis displacements of topology optimized model

根据图 12(a)、(b)可知,拓扑优化后,放大比为 4.750 3, X 轴寄生误差为 0.002 2%。除此以外,仿真的输入刚度为 22.5 N/μm,输出刚度为 0.505 N/μm。对拓扑优化后的模型进行模态分析,给出前六阶模态如图 13 所示。

由图 13 可知,拓扑优化后模型一阶固有频率为 1 995 Hz,相较于参数优化后模型提高 35%,能够实现更高频率的工作。参数优化模型和拓扑优化模型的重要性能对比,如表 4 所示。

相较于参数优化模型,虽然拓扑优化后放大比降低,但模型仍然具备完成长行程工作的性

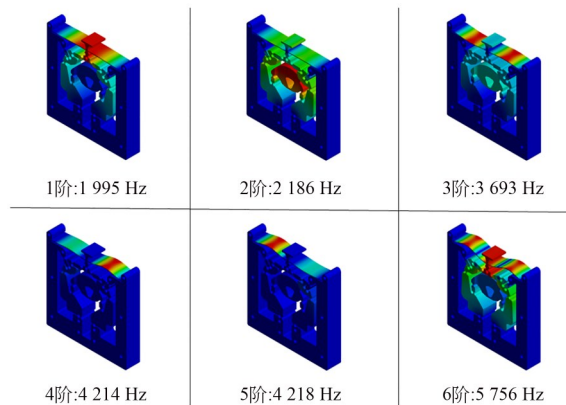


图 13 拓扑优化模型的模态云图

Fig. 13 Modal cloud of topology optimized model

表 4 优化模型性能对比

Tab. 4 Optimized model performance comparison

对比项	参数优化	拓扑优化
放大比	5.312 5	4.750 3
固有频率	1 476 Hz	1 995 Hz
X轴寄生误差	0.006 9%	0.002 2%
输入刚度	26 N/ μm	22.5 N/ μm
输出刚度	0.508 N/ μm	0.505 N/ μm

能。综合其他性能方面,可以说拓扑优化模型在参数优化模型的基础上进一步提升了导向平台的性能。

刀具导向平台采用铝合金线切割加工而成,高强度铝合金的疲劳强度约为其抗拉强度的1/3,本文采用的 AI (6061-T6) 抗拉强度约为 290 MPa,则疲劳强度约为 97 MPa。图 12 给出的是参数优化模型、拓扑优化模型应力值随输入位移的关系,同时给出拓扑优化模型输出位移随输入位移关系。

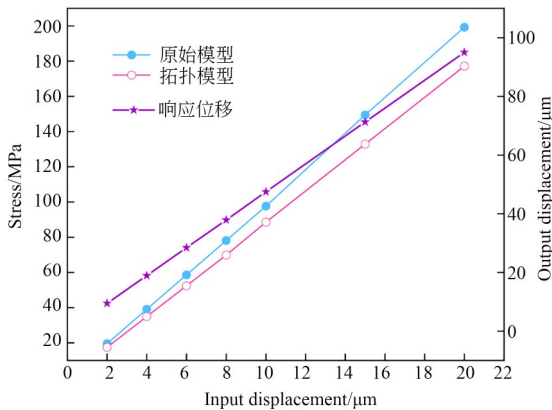


图 14 输入位移和应力、输出位移关系图

Fig. 14 Relationship between input displacement and stress, output displacement

从图 14 可知,拓扑优化模型最大应力小于参数优化模型最大应力,且随着输入位移的增大,差值逐渐增大。当输入位移为 0~10 μm 时,拓扑优化模型最大应力小于 90 MPa,因此能同时进行长行程、较高频响的工作。当输入位移超过 10 μm 时,出于安全因素考量,拓扑优化模型则只

具备长行程输出的性能。

4 实验测试与结果

4.1 测试平台搭建

采用具有更优良性能的拓扑优化模型进行加工柔顺刀具导向平台。图 15 所示的即为线切割加工后组装好的待测试实物图。



图 15 实验样机

Fig. 15 Experimental prototype

搭建实验测试平台系统如图 16 所示。利用虎钳夹紧实验样机基座,同时将虎钳放置在光学平台上,减少外界环境对实验的干扰。测试时,信号发生器发出驱动信号,经过高速双极性电源放大信号驱动压电致动器作动。位移传感器监测位移变化,并传输数据至控制器,数据经过控制器内部滤波后上传至电脑端进行数据保存。

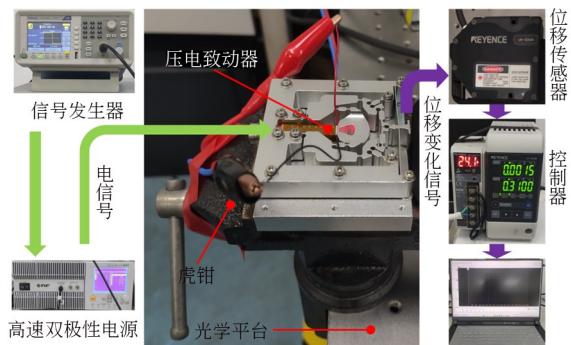


图 16 实验测试平台系统

Fig. 16 Experimental testbed system

4.2 性能测试

搭建开环测试系统,对样机进行模态、放大比、轨迹跟踪、滞后特性、分辨率多项性能测试。样机的输入端和输出端测量点,如图 17 所示。其中,通过仿真结果分析,为方便测量,输入端测量点设置在柔顺导向平台输入端杆块的中间空心处的底面。

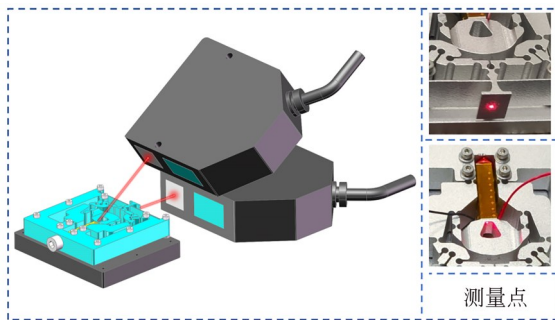


图 17 样机输入端和输出端测量点

Fig. 17 Measurement points of the prototype's inputs and outputs

利用锤击法敲击样机输入端,监测输出端位移变化,将监测数据进行时频转换,得到样机模态测试结果,如图 18 所示。实验测得样机一阶固有频率为 1 765 Hz,与仿真结果的误差为 13%。其主要原因是加工精度和边界约束条件设置,但实验结果已经证明样机存在能够进行高频率工作的能力。

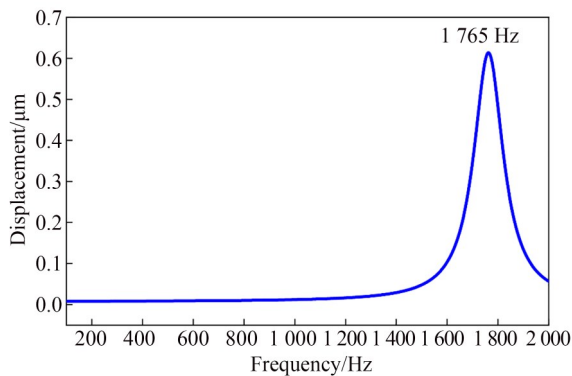
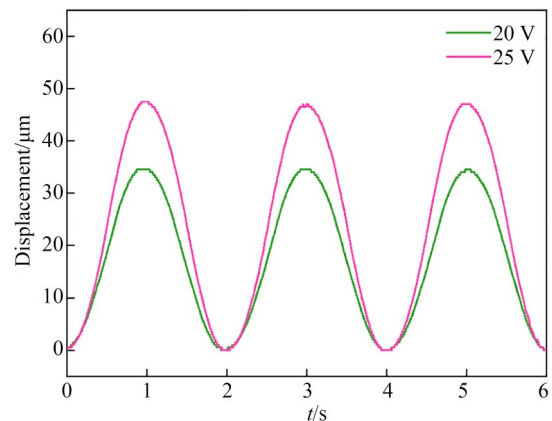


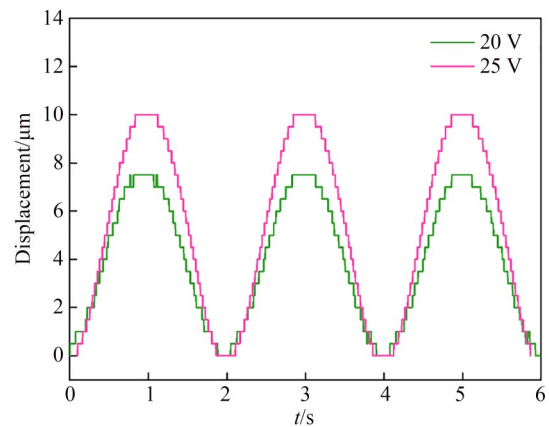
图 18 模态测试结果图

Fig. 18 Plot of modal test result

对样机分别输入幅值为 20 V, 25 V, 频率为 0.5 Hz 的正弦信号。输入端和输出端位移变化如图 19 所示。



(a) 输出端
(a) Outputs



(b) 输入端
(b) Inputs

图 19 位移变化图

Fig. 19 Plot of displacement changes

根据不同幅值正弦信号下的输出端和输入端的峰值的比值可知,放大比约为 4.67,与仿真数值误差约为 1.7%。

进一步,对样机输入幅值 25 V, 频率 10 Hz 的正弦信号进行轨迹跟踪测试。测试结果如图 20 所示。在该输入信号下,开环控制的信号跟踪最大误差值为 0.8 μm, 误差百分比为 2%。验证了样机具有良好的跟踪性能。

通过输入幅值分别为 15 V, 20 V, 25 V, 频率 0.5 Hz 的三角波进行测试,得到样机滞回曲线如图 21(a) 所示。图 21(b) 为实验采用的压电致动器滞回曲线。由测试结果可知,迟滞误差分别为 3 μm, 2 μm, 3 μm, 分别占最大工作行程的 12.2%, 5.9%, 7.2%。其主要原因是作为驱动

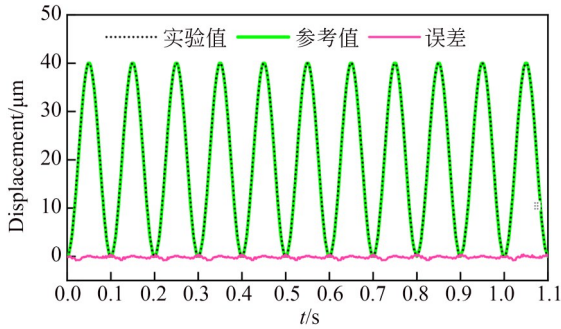
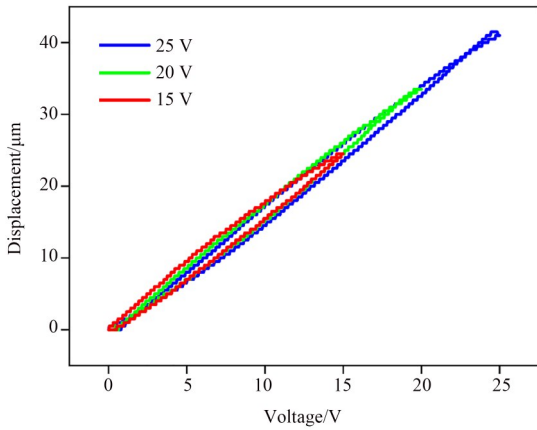


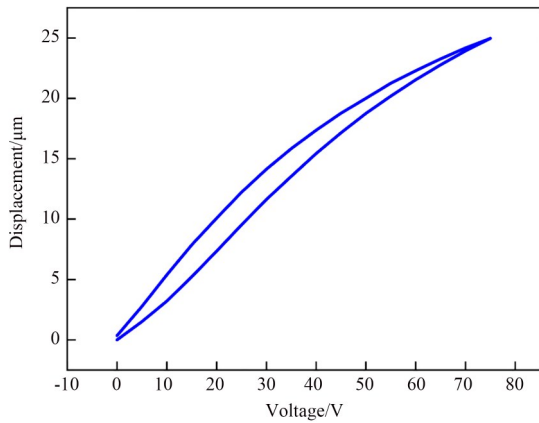
图 20 轨迹跟踪和误差

Fig. 20 Trajectory tracking and error



(a) 样机滞回曲线

(a) Prototype hysteresis curve



(b) 压电致动器滞回曲线

(b) Piezo actuator hysteresis curve

图 21 样机和压电致动器滞回曲线

Fig. 21 Prototype and piezoelectric actuator hysteresis curves

器的压电制动器本身存在迟滞。同时,与样机推出依靠致动器而回程则通过自身弹性构件的工作模式有关。

对样机输入频率为 0.2 Hz,不同幅值的台阶试验曲线,直至无法绘制出完整的台阶曲线,测试结果如图 22 所示。受限于激光传感器的精度限制(精度为 0.5 μm)以及周围环境干扰,分辨率测试结果为 1 μm。后续将升级试验设备并结合闭环控制,测量样机分辨率。

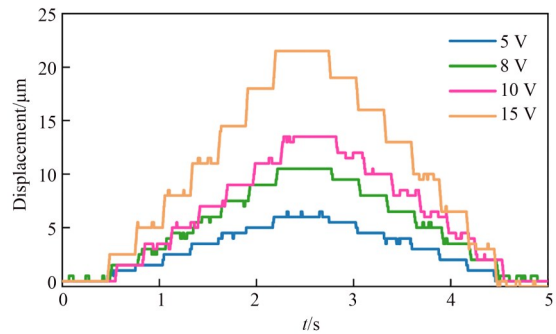


图 22 样机分辨率测试结果

Fig. 22 Sample resolution test result

5 结 论

本文通过观察青蛙运动姿态和后肢结构,提出了一种小型的低寄生性能均衡的柔顺导向平台,平衡了工作行程和频率,实现了能够进行长行程和较高频率的工作。同时,导向平台的 X 轴寄生误差为 0.002 2%,消除了寄生位移。针对所设计的刀具导向平台,进行初步模型的构建,并对导向平台进行多目标参数优化、熵权-TOPSIS 排序和多工况拓扑结构优化。同时,进行了有限元仿真和实验测试。实验结果表明,所设计的刀具导向平台放大比为 4.67,行程可达约 90 μm,一阶固有频率为 1 765 Hz,开环分辨率为 1 μm,轨迹跟踪误差为 2%。

本文设计的压电致动器驱动的具有长行程和较高工作频率的仿生柔顺刀具导向平台,对扩大快刀伺服装置的加工范围和设计新结构的刀具导向平台具有参考意义。

参考文献:

- [1] SUN X Q, WANG J, YI S C, *et al.* Design and analysis of a novel piezoelectric inertial actuator with large stepping displacement amplified by compliant mechanism [J]. *Microsystem Technologies*, 2022, 28(4): 1025-1035.
- [2] LYU Z K, XU Q S. Design and testing of a large-workspace XY compliant manipulator based on triple-stage parallelogram flexure [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2023, 184: 105287.
- [3] XU Z, YANG Z X, WANG K F, *et al.* A bionic inertial piezoelectric actuator with improved frequency bandwidth [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 156: 107620.
- [4] 李佳杰, 陈贵敏. 柔性二级差动式微位移放大机构优化设计 [J]. *机械工程学报*, 2019, 55(21): 21-28.
- LI J J, CHEN G M. Optimal design of a compliant two-stage differential displacement amplification mechanism [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(21): 21-28. (in Chinese)
- [5] LIU J K, LENG Y, CHEN W S, *et al.* Simulation of a piezoelectric micro-jet generator for high viscosity [C]. 2012 *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*. Chengdu, China. IEEE, 2012: 859-864.
- [6] 陈云壮, 赖磊捷, 李朋志, 等. 全簧片式空间大行程并联柔性微定位平台及其轨迹控制 [J]. *光学精密工程*, 2023, 31(18): 2675-2686.
- CHEN Y Z, LAI L J, LI P Z, *et al.* Full leaf-spring type spatial large-stroke parallel flexure micro-positioning stage and trajectory control [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(18): 2675-2686. (in Chinese)
- [7] 孙小庆, 忽伟, 刘宇程, 等. 超磁致伸缩定隔一体驱动系统集成设计与仿真 [J]. *系统仿真学报*, 2021, 33(2): 358-365.
- SUN X Q, HU W, LIU Y C, *et al.* Integrated design and simulation of a giant magnetostrictive driving positioning and vibration suppression system [J]. *Journal of System Simulation*, 2021, 33(2): 358-365. (in Chinese)
- [8] 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]. *Opt. Precision Eng.*, 2024, 32(1): 62-72. (in Chinese)
- [9] 胡笑奇, 张建辉, 黄毅, 等. 仿尾鳍式变截面摆动振子无阀压电叠堆泵的结构设计 [J]. *光学精密工程*, 2011, 19(6): 1334-1343.
- HU X Q, ZHANG J H, HUANG Y, *et al.* Structure design of caudal-fin-type piezoelectric-stack pump with variable cross-section oscillating vibrator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(6): 1334-1343. (in Chinese)
- [10] 任万飞. 基于NI控制器的单自由度快速刀具伺服装置设计与控制 [D]. 长春: 长春工业大学, 2017.
- REN W F. *Design and Control of Single Degree of Freeform Fast Tool Servo Apparatus Based on NI Controller* [D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [11] 张建国, 李江, 黄凯, 等. 高频高精快刀伺服系统优化 [J]. *光学精密工程*, 2022, 30(1): 78-88.
- ZHANG J G, LI J, HUANG K, *et al.* Optimal design of high frequency and high precision fast tool servo system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(1): 78-88. (in Chinese)
- [12] 桂堂军. 两自由度快速刀具伺服装置的服役性能研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- GUI T J. *Research on the Service Performance of 2-DOF Fast Tool Servo Mechanism* [D]. Changchun: Jilin University, 2017. (in Chinese)
- [13] NGUYEN V K, PHAM H T, PHAM H H, *et al.* Optimization design of a compliant linear guide for high-precision feed drive mechanisms [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2021, 165: 104442.
- [14] LIANG H, TANG H, HUANG L X, *et al.* A large-stroke flexure fast tool servo with new displacement amplifier [C]. 2017 *IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*. Munich, Germany. IEEE, 2017: 52-57.
- [15] 闫鹏, 李金银. 压电陶瓷驱动的长行程快刀伺服机构设计 [J]. *光学精密工程*, 2020, 28(2): 390-397.
- YAN P, LI J Y. Design of piezo-actuated long-stroke fast tool servo mechanism [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(2): 390-397. (in Chinese)
- [16] 李金银. 一类压电陶瓷驱动的长行程快刀伺服系

统设计与分析[D]. 济南: 山东大学, 2020.

LI J Y. *Design and Analysis of a Piezo-actuated Long Stroke Fast Tool Servo System* [D]. Jinan: Shandong University, 2020. (in Chinese)

- [17] ZHU Z W, DU H H, ZHOU R J, *et al.* Design and trajectory tracking of a nanometric ultra-fast

tool servo [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020, 67(1): 432-441.

- [18] ZHOU R J, ZHU Z H, KONG L B, *et al.* Development of a high-performance force sensing fast tool servo[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2022, 18(1): 35-45.

作者简介:



郑诚心(1999—),男,浙江衢州人,硕士研究生,主要从事柔顺机构、精密定位、压电喷墨等领域的研究。E-mail: 2221071@mail.dhu.edu.cn

通讯作者:



孙小庆(1987—),男,河南南阳人,博士,硕士生导师,2018年于上海交通大学获得博士学位,现为东华大学机械工程学院副教授,主要从事柔顺机构设计、超精密驱动和基于智能材料的微振动控制等领域的研究。E-mail: sunxq@dhu.edu.cn



孙志宏(1968—),女,上海人,博士,博士生导师,1996年获得博士学位,现为东华大学机械工程学院教授,主要从事现代机械设计理论及方法、机构设计与机构动力学等领域的研究。E-mail: zhsun@dhu.edu.cn