

doi: 10.11830/ISSN.1000-5013.201612013



四自由度组合柔性铰链的设计及性能分析

徐佳禄¹, 姜峰¹, 言兰²

(1. 华侨大学 制造工程研究院, 福建 厦门 361021;
2. 华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 设计一种由 3 个柔性铰链组成的, 用于高精密磨床的微位移工作平台. 通过 3 个柔性铰链对输入位移进行缩小, 呈线性地输出, 实现在工件定位过程中对 \vec{X} 平移、 \vec{Z} 平移、 \hat{X} 旋转、 \hat{Z} 旋转 4 个方向自由度的微小位移及角度调整的功能. 优选 3 个柔性铰链所使用的材料, 运用 ANSYS 仿真软件分析 3 个柔性铰链输入位移与输出位移、输出角位移之间的响应关系, 以及工作过程中各个柔性铰链内部的应力大小. 结果表明: 工作台 \vec{X} 方向、 \vec{Z} 方向的输出输入位移比分别为 $0.137, 0.286 \mu\text{m} \cdot \mu\text{m}^{-1}$; \hat{X} 旋转、 \hat{Z} 旋转的输出输入位移比分别为 $6.516 \times 10^{-4}, 2.180 \times 10^{-3} (^{\circ}) \cdot \mu\text{m}^{-1}$; 在零件最大加载位移以内, 输出响应与输入位移之间都呈现良好的线性关系, 误差均在 0.1% 以内.

关键词: 柔性铰链; 微位移; 四自由度; 工件定位; 磨床

中图分类号: TH 112 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2017)05-0608-06

Design and Performance Analysis of Flexible Hinges With Four Degrees of Freedom

XU Jialu¹, JIANG Feng¹, YAN Lan²

(1. Institute of Manufacturing Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;
2. College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: A micro-displacement worktable with three flexible hinges has been designed in this study. Its degrees of freedom along linear (\vec{X} , \vec{Z}) axes, around rotary (\hat{X} , \hat{Z}) axes can be adjusted for fine positioning of small parts machined by high-precision grinding machine. The materials of three flexible hinges have been selected under consideration of equal life design of parts. The response relationships between output linear/angular displacement and input displacement have been analyzed by using finite element software ANSYS. The ratios of output linear displacement along \vec{X} , \vec{Z} axes to input displacement are $0.137, 0.286 \mu\text{m} \cdot \mu\text{m}^{-1}$, respectively, and those of output angular displacement around \hat{X} and \hat{Z} axes to input displacement are $6.516 \times 10^{-4}, 2.180 \times 10^{-3} (^{\circ}) \cdot \mu\text{m}^{-1}$, respectively. Within the maximum load displacement range, the relationships between output displacement and input displacement are linear, and the linearity errors are less than 0.1%.

Keywords: flexible hinge; micro-displacement; four degrees of freedom; workpiece positioning; grinding machine

收稿日期: 2016-12-07
通信作者: 姜峰(1981-),男,副教授,博士,主要从事精密加工过程的材料去除机理和工艺方法的研究. E-mail: jiang-feng@hqu.edu.cn.
基金项目: 国家自然科学基金面上基金资助项目(51475173); 福建省高校杰出科研人才培育计划项目(JA14013); 华侨大学中青年教师科研提升资助计划项目(13J0521)

近年来,利用柔性铰链原理设计的微位移机构被人们广泛关注,国内外许多研究人员对基于柔性铰链的微位移工作平台进行了研究,提出了多种形式不同的微位移工作平台.张磊等^[1]、刘庆钢等^[2]、李扬民等^[3]设计的微位移工作平台由柔性铰链与压电陶瓷驱动器共同组成,可以达到较高的控制精度.Lin 等^[4]对压电陶瓷进行了优化,但系统总体成本也相应的提高.卜巾宴等^[5]设计的柔性铰链精密定位机构使用桥式柔性铰链机构对某一方向的输入位移进行缩小;Lee 等^[6],Cai 等^[7]等设计的微位移工作台可以实现 X,Y,Z 三个方向的位移调节,但在一定条件下无法满足工作要求;邱丽芳等^[8]设计的梳齿型柔性铰链只能对零件的角度进行调节,无法对位移进行调节;Zubir 等^[9]设计的微定位机构只能达到 100 μm 的精度,无法满足微小零件加工需求;王洪喜等^[10]设计的基于柔性机构的精密调平调心平台,在原理上满足微小机械加工工件定位的要求,但其工作台构造复杂,制造成本较高,其所能调节的位移范围也受到限制. 本文将具有两个方向(\vec{X} 和 \vec{Z})线性缩小特性的柔性铰链双平行四杆微位移结构和两个基于柔性铰链原理的角位移调整结构进行组合,设计出一种四自由度($\vec{X}, \vec{Z}; \hat{X}, \hat{Z}$)微小工件铰链式微位移调整支撑机构,用于超精密磨床加工微小工件螺旋槽时,对工件进行定位装夹.

1 微位移工作调整支撑机构的设计

微小工件柄部和螺旋槽部分直径大小不同,呈阶梯状. 针对大径比的微小工件刚度小的特点,在磨槽过程中,微小工件的柄部和螺旋槽部分均应设有支撑结构. 由于在加工过程中的定位精度是产品精度保证的关键,所以在螺旋槽加工过程中,微小工件的柄部与螺旋槽的同轴度的调整是微小工件几何精度、尺寸精度保证的关键.

微位移工作平台示意图,如图 1 所示. 图 1 中:a 为双平行四杆微位移结构;b,c 为和两个角位移调整结构 1, 2^[11-12],通过调整图 1 中各结构的线位移及角位移,保证微小工件柄部与螺旋槽加工部分的同轴度.

双平行四杆微位移结构、角位移调整结构 1,2 的结构原理,分别如图 2~4 所示.

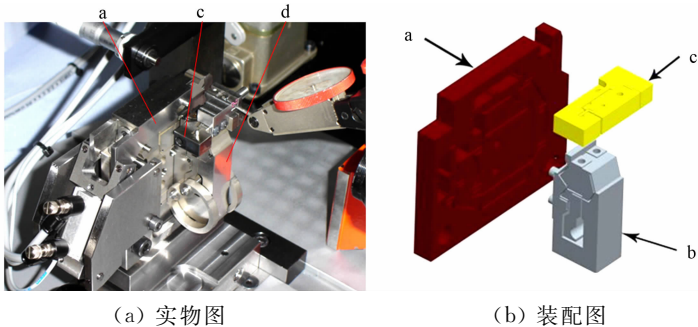


图 1 微位移工作平台
Fig. 1 Micro-displacement worktable

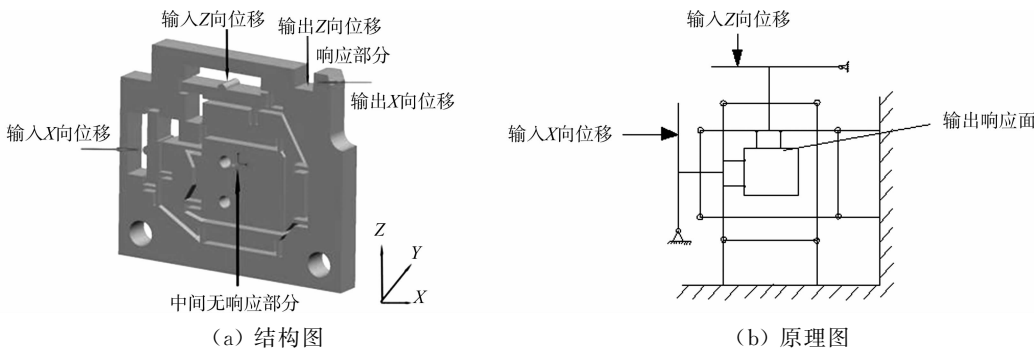


图 2 双平行四杆微位移结构

Fig. 2 Double parallel four-pole micro-displacement structure

由图 2 可知:柔性铰链的布置使机构的中间部分无响应,也就是输入 X 和 Z 向位移,中间部分的垂直水平位置不会起到变化,而外环部分是输出响应部分;施加 X 方向输入位移,支撑 V 形块(V 形块固定于柔性铰链块固上方,微小工件的柄部用 V 形块进行定位)的支撑面能实现 X 方向输出位移;施加 Z 方向输入位移,支撑 V 形块的支撑面能实现 Z 方向输出位移,且当输入 X 向位移时,不影响支撑面的 Z 方向位移. 在使用时可以先加载 Z 方向的位移,测量后,再加载 X 方向,这样就可以保证 X 方向和 Z 方向上的定位精度.

由图 3 可知:施加 Y 方向输入位移,输出响应面能实现 \hat{X} 角位移输出. 由图 4 可知:施加 Y 方向输

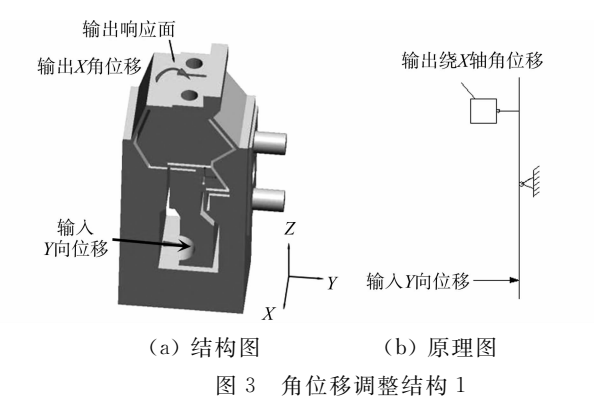


Fig. 3 Angular displacement adjustment structure 1

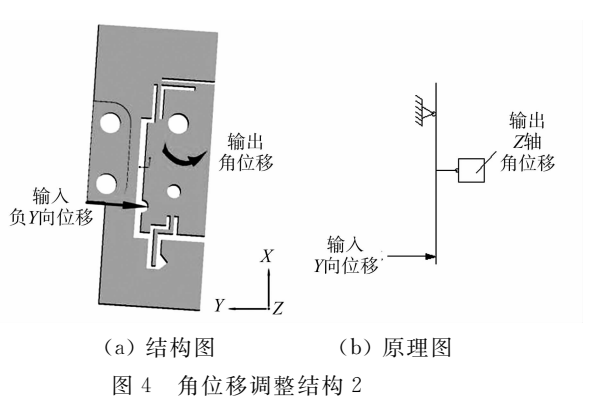


Fig. 4 Angular displacement adjustment structure 2

入位移,输出响应面能实现 \hat{Z} 角位移输出。

将图 2~4 的 3 个柔性铰链机构组合在一起,制定出一种四自由度 $(\vec{X}, \vec{Z}; \hat{X}, \hat{Z})$ 微小工件铰链式微位移调整支撑机构的设计方案. 调整双平行四杆微位移结构的 X, Z 向位移,起到对 V 形块与小 V 形块(与角位移调整结构 2 进行装配,支撑微小工件螺旋槽部分)的相对水平垂直距离的调整作用,即微小工件柄部和螺旋槽部分的水平垂直距离. 结合角位移调整角位移调整结构 1,2 的角位移调整功能,实现微小工件柄部和螺旋槽部分同轴度的调整.

为了保证整个机构安全有效地工作,通过设置柔性铰链与定位部分之间的间隙,设置柔性铰链的最大输出位移. 这样避免在工作台工作过程中因为机器故障或操作人员操作不正确,使得输出位移与本身设定的位移差距过大,导致加工事故的发生,从而达到对零件整个加工过程的保护作用.

2 柔性铰链材料的选择及其性能分析

柔性铰链材料选择是整个机构设计的关键. 采用柔性铰链作为机构的运动副,靠材料的弹性变形来实现微小的位移,如果柔性铰链材料发生塑性变形就会造成功能失效. 在柔性铰链材料的选择上,柔性铰链的运动范围与所用材料的屈服强度成正比.

在零件设计的过程中,通过仿真分析可以发现:角位移调整结构 1 在凸台底部会发生一个较大的应力集中. 根据等寿命设计思想理念,在综合成本、加工难度及柔性铰链等各个方面的原因,决定双平行四杆微位移结构和角位移调整结构 2 选用较为普通的 40Cr 作为其原材料,而结构 b 则使用屈服强度较高的 60Si2CrA 作为其原材料,使得整个工作机构各部分之间的安全系数相对平均. 40Cr 和 60Si2CrA 的化学成分(w)和物理特性,分别如表 1,2 所示. 表 2 中: E 为弹性模量; μ 为泊松比; σ_b 为抗拉强度; σ_s 为屈服强度; δ 为伸长率; ψ 为断面收缩率;HB 为硬度.

表 1 原材料的化学成分

Tab. 1 Chemical composition of raw materials

原材料	$w(C)$	$w(Mn)$	$w(Ni)$	$w(Si)$	$w(P)$	$w(S)$	$w(Cr)$	$w(Cu)$
40Cr	0.42~0.50	0.50~0.80	≤ 0.250	0.17~0.37	≤ 0.035	≤ 0.035	≤ 0.250	—
60Si2CrA	0.56~0.64	0.60~0.90	≤ 0.035	1.50~2.00	≤ 0.035	≤ 0.035	≤ 0.035	≤ 0.025

表 2 原材料的物理特性

Tab. 2 Physical properties of raw materials

原材料	E/GPa	μ	σ_b/MPa	σ_s/MPa	$\delta/\%$	$\psi/\%$	HB
40Cr	206	0.3	600	355	≥ 16	≥ 45	≤ 197
60Si2CrA	206	0.3	1 764	1 600	≥ 6	≥ 20	≤ 321

3 柔性铰链应力和最大加载位移分析

根据材料的力学特性、柔性铰链的工作环境及受力情况等方面因素,选择柔性铰链机构的最小安全系数为 1.3^[13]. 由此可以得出,柔性铰链 a, c 的最大工作应力不得超出 273 MPa,而柔性铰链 b 的最大

工作应力不得超过 1 230 MPa. 在 ANSYS 软件里建立 3 个柔性铰链模型, 分别对 3 个零件的工作及装配情况进行分析; 然后, 在 ANSYS 软件中对 3 个铰链的定位孔进行完全定位. 铰链输入位移都是通过曲面, 所以加载过程中对 3 个铰链的位移输入面施加均布位移载荷, 并分别计算得出各个铰链应力随加载位移的变化情况.

对于柔性铰链 a, 在零件设计过程中, 结合有限元软件的简单分析, Z 方向的输出输入位移比约为 X 方向的两倍. 为了使柔性铰链两个方向的性能相接近, 且都能达到一个较好的性能, 所以在应力分析的位移加载过程中, 设定 X 方向的加载位移是 Z 方向的两倍, 应力(σ)随着加载位移(Δ_L)的变化关系, 如图 5(a)所示. 柔性铰链 b, c 的应力随着加载位移的变化关系, 分别如图 5(b), (c)所示.

根据图 5 的分析结果, 对 3 个柔性铰链选择最大的加载位移. 即柔性铰链 a 在 Z 向的最大输入位移为 8 μm , 在 Z 轴已加载的情况下 X 向的最大输入位移为 16 μm ; 柔性铰链 b 在 Y 向的最大输入位移为 85 μm ; 柔性铰链 c 在 Y 向的最大输入位移为 30 μm .

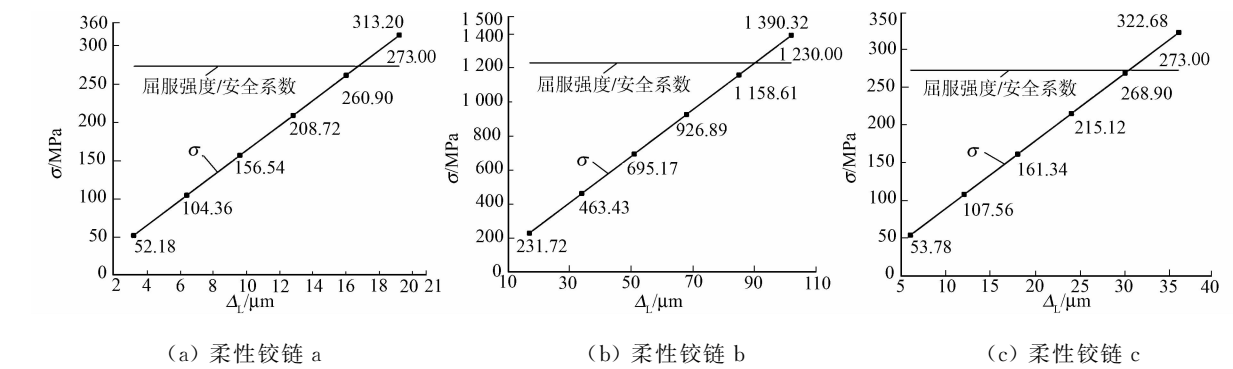
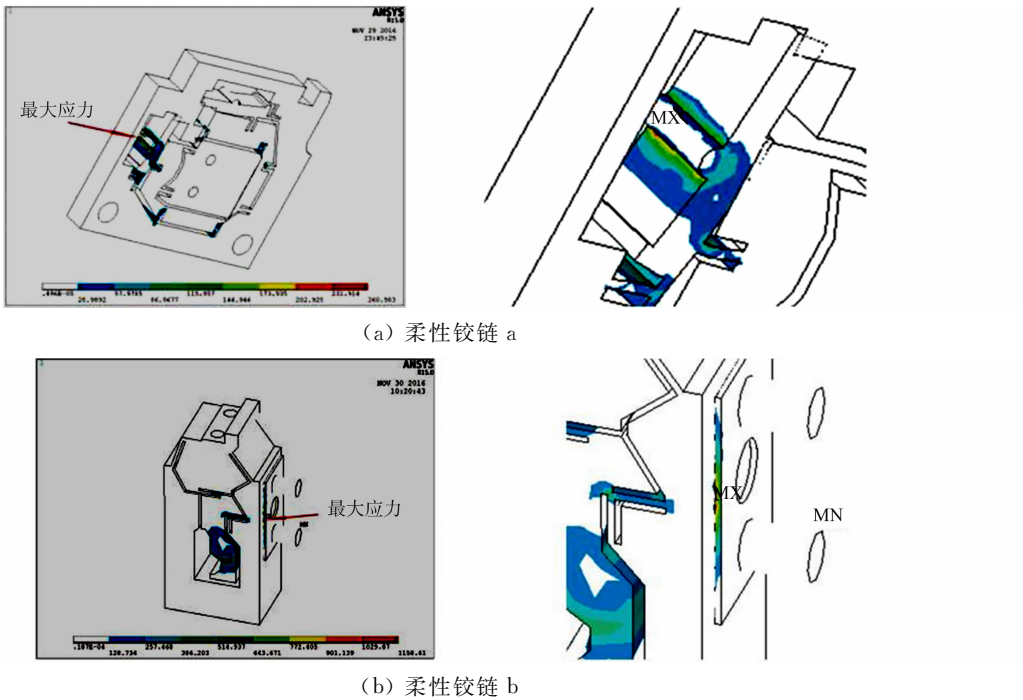


图 5 柔性铰链结构应力与加载位移的对应关系

Fig. 5 Corresponding relationship between stress and load displacement of flexible hinge structure

柔性铰链 a 在 X 向, Z 向均为最大输入位移, 以及柔性铰链 b, c 在 Y 向最大输入位移下的应力分布, 分别如图 6 所示.

由图 6 的应力分布的结果及应力大小分析可知: 柔性铰链 a 在加载过程中, 最大应力约为 260 MPa, 出现在 X 向位移加载位置; 柔性铰链 b 在加载过程中, 最大应力约为 1 158 MPa, 出现在与柔性铰链 a 连接的凸台处; 柔性铰链 c 在加载过程中, 最大应力约为 279 MPa, 出现在位移加载位置. 此外, 构件的安全系数均满足最初设定的值且互相接近, 符合寿命设计需求.



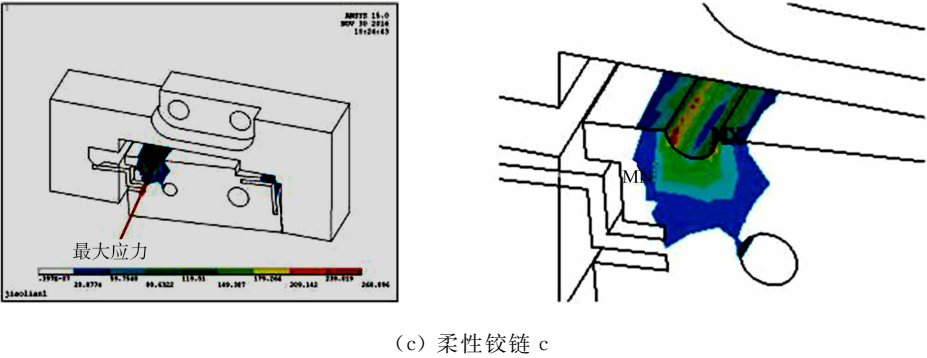


图 6 最大输入位移下的应力分布

Fig. 6 Stress distribution under maximum input displacement

4 各构件输入输出比的计算

在 ANSYS 软件中,分别对 3 个零件进行位移加载,计算随着输入位移变化,输出响应的变化情况,如图 7 所示.图 7 中: Δ_o, θ_o 分别为输出位移、输出角度; Δ_L 为加载位移.

由图 7 可知:3 个柔性铰链机构在其最大输出位移范围内,输出位移(角度)和输入位移呈现良好的线性比.对于柔性铰链 a 而言,其 X 方向上的输出输入位移比约为 $0.137 \mu\text{m} \cdot \mu\text{m}^{-1}$,Z 方向上的输出输入位移比约为 $0.286 \mu\text{m} \cdot \mu\text{m}^{-1}$;柔性铰链 b 的输出输入位移比约为 $6.516 \times 10^{-4} (^{\circ}) \cdot \mu\text{m}^{-1}$;柔性铰链 c 的输出输入位移比约为 $2.180 \times 10^{-3} (^{\circ}) \cdot \mu\text{m}^{-1}$.

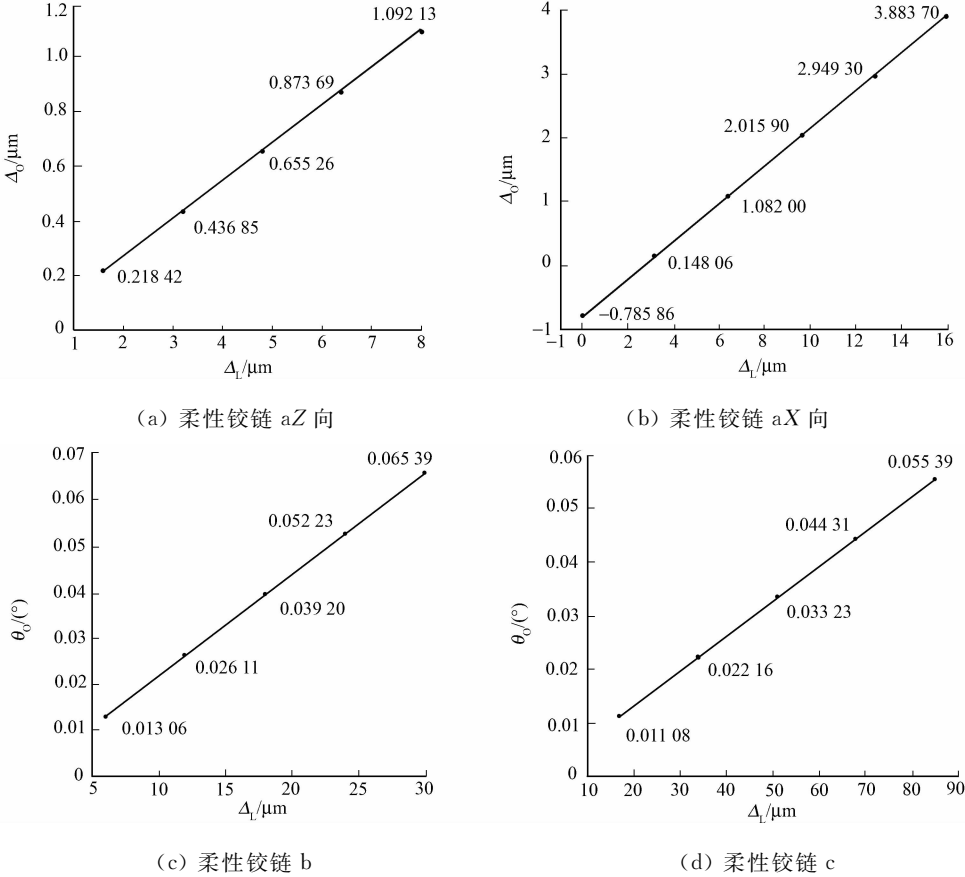


图 7 柔性铰链机构输出响应随着输入位移的变化

Fig. 7 Flexible hinge mechanism outputs response as input displacement changes

3 个机构组合而成的工作台在理想状态下,可以安全有效地在高精密加工过程中起到精密定位的作用,提高了零件的定位精度.但在实际使用中,柔性铰链的加工精度等因素将对工作台的性能造成一定的影响,这将是下一步所要进行的研究内容.

5 结论

运用有限元模拟软件,对微位移调整机构的平动和转动单元进行分析,研究了输入位移与输出位移、角位移之间的响应关系,验证了所设计柔性铰链的性能,得到如下3点主要结论.

1) 设计了一套四自由度组合柔性铰链,用于高精密磨床加工微小工件时,对工件的 \vec{X}, \vec{Z} 和 \hat{X}, \hat{Z} 四个自由度的高精度调节,有效地提高了零件的加工精度.

2) 通过有限元仿真软件确定了3个零件在弹性变形范围内所能承载的最大加载位移,以及零件各个位置应力分布情况.

3) 计算出3个零件在4个不同自由度上的输出输入位移比,并验证了输出响应与输入位移之间线性关系.结果表明,在零件最大加载位移以内,3个零件的输出响应与输入位移之间都呈现了良好的线性关系,其误差均小于0.1%.

参考文献:

- [1] 张磊,刘莹.基于柔性铰链的微位移机构设计[J].机床与液压,2010,38(5):87-89.
- [2] 刘庆纲,陈良泽,梁君,等.基于有限元的柔性铰链微位移机构研究[J].机械科学与技术,2015,34(7):985-988.
- [3] 李杨民,孟大帅.一种新型微位移放大机构设计与特性分析[J].天津理工大学学报,2015,31(5):5-9.
- [4] LIN C J, LIN Poting. Particle swarm optimization based feedforward controller for a XY PZT positioning stage[J]. Mechatronics, 2012, 22(5): 614-628.
- [5] 卜巾晏,何广平.柔性铰链精密定位机构的设计与分析[J].机械设计与研究,2009,25(3):44-47.
- [6] LEE J C, LEE K I, YANG S H. Development of compact three-degrees-of-freedom compensation system for geometric errors of an ultra-precision linear axis[J]. Mechanism and Machine Theory, 2016, 99: 72-82.
- [7] CAI Kunhai, TIAN Yanling, WANG Fujun, *et al.* Development of a piezo-driven 3-DOF stage with T-shape flexible hinge mechanism[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2016, 37: 125-138.
- [8] 邱丽芳,孟天祥,张九俏,等.梳齿形柔性铰链的设计与分析[J].东北大学学报(自然科学版),2014,35(9):1316-1320.
- [9] ZUBIR M N M, SHIRINZADEH B, TIAN Y. Development of a novel flexure-based microgripper for high precision micro-object manipulation[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2009, 150(2): 257-266.
- [10] 王洪喜,柴鹏,王冠伟,等.基于柔性机构的精密调平调心平台设计与分析[J].机械设计,2016,33(7):27-30.
- [11] 李啟定,李克天.微位移工作台柔性铰链参数分析和优化[J].机电工程技术,2015,14(1):72-75. DOI:10.3969/j.issn.1009-9492.2015.01.019.
- [12] NOVEANU S, LOBONTIU N, LAZARO J, *et al.* Substructure compliance matrix model of planar branched flexure-hinge mechanisms: Design, testing and characterization of a gripper[J]. Mechanism and Machine Theory Sep, 2015, 91: 1-20.
- [13] 王江林.简述机械可靠性设计的内涵和递进[J].中国机械,2015(21):186-187.

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 崔长彩)