

精密车削二维微位移刀架研究*

丁金福 鄂世举 曾 平 孙明礼 张克华

(浙江师范大学工学院, 金华 321004)

【摘要】 设计了一种微米级切削加工的微位移刀架,该刀架可满足数控车床精密加工的需要。该刀架以压电微位移致动器为动力源,以双平行四杆柔性铰链为弹性导轨,以最大输出位移为主要参数,设计了微位移刀架的结构,计算和选择了微位移刀架的结构参数。通过理论建模和有限元分析,对该铰链机构的系统刚度进行了计算,并对二维微位移刀架的输出位移进行实验测试。实验结果表明:理论计算结果、有限元仿真计算结果与实验测试数据吻合,验证了设计方法的可行性。

关键词: 刀架 微位移 车削 柔性铰链 压电致动器

中图分类号: TH112; TG519.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2012)04-0230-05

2-D Micro-displacement Turret of Ultra-precision Lathe

Ding Jinfu E Shiju Zeng Ping Sun Mingli Zhang Kehua

(College of Engineering, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China)

Abstract

The micro-displacement turret of ultra-precision CNC lathe was designed, which could meet the needs for precision machining. The power source of the turret was piezoelectric displacement actuators. The guide of the turret was double parallel four-pole flexible hinge institution. The main parameters of the turret were the maximum output displacement. The structure of micro-displacement turret was designed and calculated. The stiffness of flexible hinge institution was calculated by theoretical modeling and finite element analysis, and the output displacement of 2-D micro-displacement turret was tested. The results showed that the results theoretical calculations, finite element simulation coincided with experimental data, which could verify the reliable of the design method.

Key words Turret, Micro-displacement, Turning, Flexible hinge, Piezoelectric actuator

引言

目前绝大多数数控车床,均采用伺服或步进驱动滚动丝杆及滑动(或滚动)导轨,再利用电动刀架的切削方式,虽然目前数控系统稳定性日趋成熟,几乎所有的数控系统细分精度都能达到微米级,但由于机械传动中往往存在着阻尼、爬行等缺点,因此很难实现微米级乃至亚纳米级的加工。然而,采用压电致动器的驱动方式则能较好地解决这一问题,压电陶瓷驱动器以其体积小、质量轻、驱动电压不高、精度和位移分辨率高、频率响应快、不发热、不产生噪

声和承载力大等特性,成为微定位控制领域应用最广的驱动元件之一^[1~2],并已成为实现微位移技术十分有效的方法。本文设计一种能实现2个方向微米级进给的微位移刀架,该结构以压电致动器为动力源,为实现横、纵向各自的微位移,设有2个压电致动器,以柔性铰链结构为弹性导轨的微位移刀架。着重分析柔性铰链结构尺寸对微动刀架刚度的影响,且利用有限元仿真分析方法验证结构设计的一致性,将理论分析、有限元计算和实验测试相结合,以达到满足车削加工中实现微米级进给的切削加工方法。

收稿日期: 2011-07-11 修回日期: 2011-08-18

* 浙江省自然科学基金资助项目(Y1110529)

作者简介: 丁金福,副教授,主要从事精密/超精密加工应用技术研究,E-mail: zsdif@zjnu.cn

1 二维微位移刀架结构

设计的微位移刀架可执行横向与纵向的独立进给,可实现零至微米级的微进给切削加工。设计中选用 PST50 型压电致动器作为动力源,压电致动器末端由紧定螺钉固定与调节,可方便调节致动器的预紧力。刀架体采用整体式结构,由 65Mn 钢板经线切割加工制作而成。为实现机构运动无间隙、无摩擦,在纵向(X 轴)和横向(Y 轴)分别采用双平行柔性四连杆机构为弹性导轨,柔性铰链具有无滑动摩擦、无迟滞、不需润滑以及运动平滑、运动分辨率高等优点^[3]。

微位移刀架结构如图 1 所示。通过 4 个沉头孔,利用螺钉将微位移刀架安装固定于车床滑板上,刀具固定于中间凸台面。安装时,采用激光干涉仪进行微切削对刀,实现刀架的精确定位。 X 、 Y 向的压电陶瓷驱动器由压电陶瓷驱动电源进行驱动及控制。加工时,根据不同的微切削要求施加相应的电压信号,使刀架产生相应的微位移进给量。该微位移刀架可满足:①具有较高的精度和位移分辨率,以保证较高定位精度及稳定性。②能实现几微米到几十微米(给出确定的微位移范围)工作行程的要求。③针对微位移刀架的微位移进给量进行柔性铰链结构的刚度设计,同时保证内部应力远小于材料的许用应力,以确保微位移刀架有良好刚度。④微位移进给系统便于控制,响应速度快。

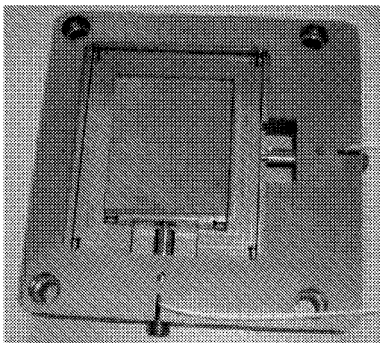


图 1 微位移刀架样件

Fig. 1 Practicality of micro-displacement turret

2 微位移刀架设计

为实现微米级的微切削加工,微位移刀架的输出位移、分辨率、定位精度等是关键影响因素,其中输出位移是微位移刀架的主要性能指标。因此,在设计中主要围绕最大输出位移进行分析,着重研究刀架体铰链机构的结构设计、系统刚度等影响因素。

2.1 双平行柔性四杆铰链机构

微位移刀架要实现微米级的进给,必须具备导

轨面间移动无间隙、无摩擦和位移分辨率高等特点,采用柔性铰链结构是最为有效的方法之一。设计时运用单个半圆形柔性铰链的基本特性及其理论依据,为克服柔性铰链机构因交叉耦合产生的位移误差,机构中采取了一对上、下对称的平行四杆机构,如图 2 所示。当水平方向受到外力作用时,因其结构具有对称性,在几何约束作用下,在垂直方向产生的内力可以相互抵消,垂直方向引起的交叉耦合便由柔性铰链杆长受拉后产生的弹性变形来弥补,这在理论上克服了柔性铰链机构因交叉耦合产生的位移误差^[4-6],也大大提高该方向的系统刚度,并确保了运动方向的精度。

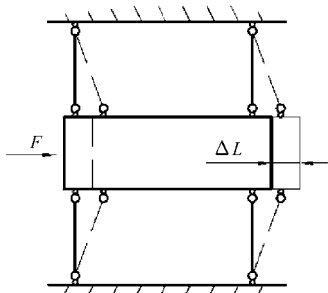


图 2 双平行柔性铰链

Fig. 2 Double parallel flexible hinge

2.2 铰链机构的刚度

合理的设计柔性铰链机构对微位移刀架的输出位移参数十分关键,其中柔性铰链的刚度对微位移刀架至关重要,设计的微位移刀架体结构如图 3 所示。单柔性铰链的刚度设计计算公式为^[7-9]

$$K_{\theta 1} = \frac{2Ebt^{5/2}}{9\pi R^{1/2}} \quad (1)$$

式中 E ——弹性模量 b ——铰链宽度
 R ——铰链半径
 t ——铰链中心最小厚度

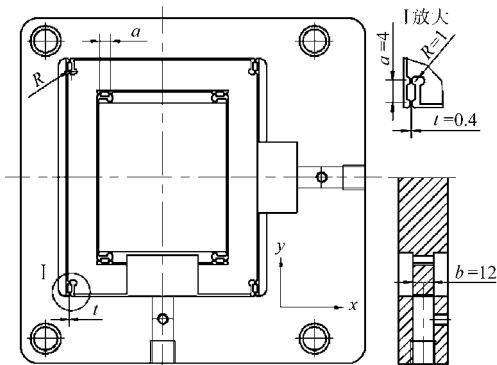


图 3 微位移刀架体示意图

Fig. 3 Schematic diagram of micro-displacement turret

由单柔性铰链的刚度计算公式,再结合材料力学知识可推导出双平行弹性铰链的刚度及工作行程为^[10-11]

$$K=\frac{2K_{\theta 1}}{a^2}=\frac{4Ebt^{5/2}}{9\pi a^2R^{1/2}}\tag{2}$$

$$\Delta l_{\max}=F/K\tag{3}$$

式中 a ——铰链臂长 F ——弹性恢复力

由于式(2)中,刚度与铰链结构中的4个参数有关,因此很难直接用曲线图来表示。为简化分析,采用两两参数法分析与刚度之间的关系,并初选铰链臂长 a 为4 mm,铰链半径 R 为1 mm,铰链宽度 b 为12 mm,铰链中心最小厚度 t 为0.4 mm。

(1)当铰链厚度 t 、铰链半径 R 保持不变,取铰链臂长 $a=3.0、3.5、4.0、4.5、5.0$ mm 时,分析铰链刚度 K 随着铰链宽度 b 的变化曲线,如图4所示;同理,取铰链宽度 $b=10、11、12、13、14、15$ mm 时,铰链刚度 K 随着铰链臂长 a 的变化曲线,如图5所示。

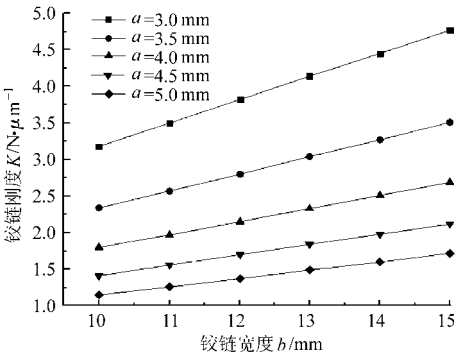


图4 铰链刚度 K 与铰链宽度 b 关系曲线
Fig.4 Curve of hinge stiffness K on hinge width b

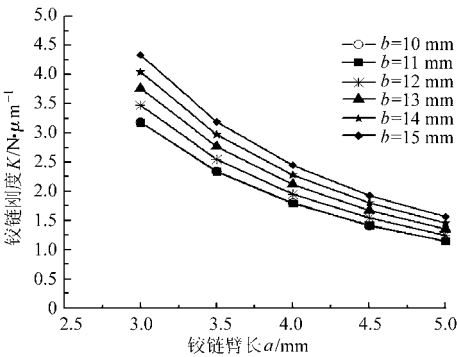


图5 铰链刚度 K 与铰链臂长 a 关系曲线
Fig.5 Curve of hinge stiffness K on hinge arm length a

(2)当铰链臂长 a 、铰链宽度 b 保持不变,取铰链半径 $R=0.8、1.0、1.2、1.4、1.6$ mm 时,铰链刚度 K 随铰链厚度 t 的变化如图6所示;同理,取铰链厚度 $t=0.30、0.35、0.40、0.45、0.50$ mm 时,铰链刚度 K 随铰链半径 R 的变化如图7所示。

由图4、5 结果表明,铰链刚度 K 随铰链宽度 b 虽然呈线性增加,但增加的幅度不大,但随铰链臂长 a 的增大而急剧减小。再根据图6、7 分析,铰链厚度 t 对铰链刚度的影响较大,增幅十分明显,但随铰链半径 R 的增大铰链刚度逐渐下降,并随铰链半径

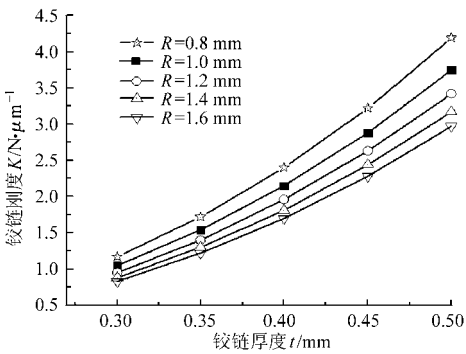


图6 铰链刚度 K 与铰链厚度 t 关系曲线
Fig.6 Curve of hinge stiffness K on hinge thickness t

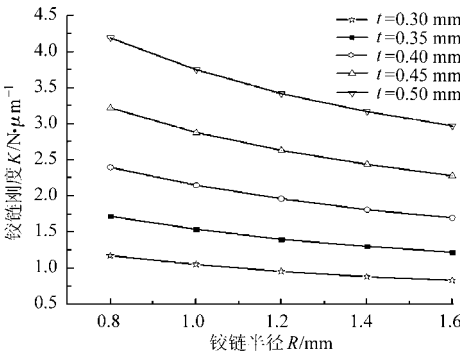


图7 铰链刚度 K 与铰链半径 R 关系曲线
Fig.7 Curve of hinge stiffness K on hinge radius R

R 逐渐减少时其刚度趋向稳定,影响较小。由此可见,铰链臂长 a 及铰链厚度 t 对铰链行程及铰链刚度的影响较大,铰链半径 R 影响相对较小,影响最小的是铰链宽度 b 。

2.3 微位移刀架的输出位移

微位移刀架刚度由铰链与压电致动器的刚度所组成,选定 PST50 型压电致动器最大位移为 40 μm ,其刚度为 12 $\text{N}/\mu\text{m}$ 。根据初选的柔性铰链结构参数计算出的柔性铰链刚度为 2.15 $\text{N}/\mu\text{m}$,再利用压电陶瓷致动器与微位移刀架之间的关系,求出微位移刀架的最大输出位移为^[11-12]

$$l_{\max}=\frac{K_{pzt}}{K+K_{pzt}}l_{pzt\max}\tag{4}$$

式中 K_{pzt} ——压电致动器刚度
 $l_{pzt\max}$ ——压电致动器最大输出位移

由式(4)计算出微位移刀架的最大输出位移为 33.92 μm ,可满足微米级位移的设计要求。

3 刀架体静态特性有限元分析

为验证双平行铰链机构的微位移刀架理论计算的正确性,本研究利用有限元分析软件进行参数化建模,先进行平面网格的划分,再拖拉生成体网格,创建的有限元模型如图8所示。按照铰链结构初选

值,取材料的弹性模量 E 为 206 GPa,泊松比为 0.3。选择压电致动器安放位置所对应的断面,对微位移刀架 Y 方向施加 14 N 的均匀的压力载荷。在刀架的 4 个螺栓孔处施加固定端约束的边界条件。选择合适的求解器进行求解,从后处理器可读出刀架的 Y 方向位移为 $6.78\text{ }\mu\text{m}$,图 9 为在载荷作用下的变形云图。

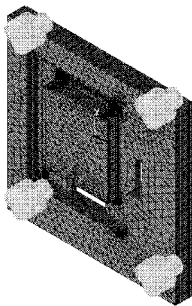


图 8 刀架有限元模型
Fig. 8 Finite element model of turret

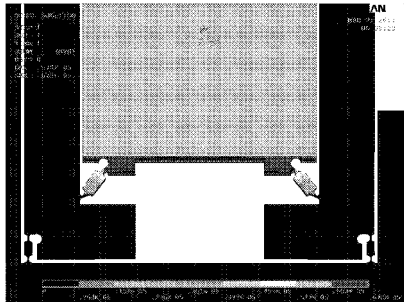


图 9 施加载荷下的变形云图
Fig. 9 Deformation cloud on load

根据式(2)、(3)求出仿真后的铰链刚度 K' 为 $2.065\text{ N}/\mu\text{m}$,与理论计算铰链刚度 K 为 $2.15\text{ N}/\mu\text{m}$ 进行比较,其铰链刚度的误差为 4%。

4 实验测试

实验测试刀架最大输出位移。利用压电陶瓷驱动电源对 PST150 型压电陶瓷致动器进行驱动与控制,利用 LK - G10/15 型激光位移传感器进行微位移测量。通过微调机构调整激光测量头的有效测量范围位置。在 0 ~ 150 V 的驱动电压内,以间隔 10 V 电压递增或递减进行驱动输出,输出位移可由激光位移控制器直接读取。实验中,为便于与压电陶瓷

致动器位移输出特性比较,分别对压电致动器、微位移刀架的 X 、 Y 向位移输出特性的测试。从测试的结果可知,压电致动器、刀架 X 、 Y 向的最大输出位移分别为 36.6 、 31.5 、 $33.7\text{ }\mu\text{m}$ 。由测得的数据生成电压-输出位移特曲线,图 10 为压电致动器、微位移刀架 X 、 Y 向的电压-位移关系曲线。

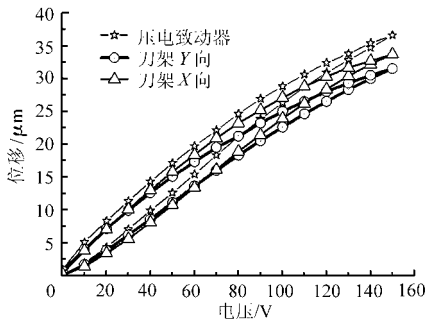


图 10 压电致动器及 X 向、 Y 向输出位移特性
Fig. 10 X & Y direction piezoelectric actuators output displacement characteristics

在微切削加工过程中,微位移刀架的驱动控制可采用开环控制和闭环控制等方法。本文采用的是开环控制方法,在满足控制精度及进给精度要求的条件下,开环控制方法简单易行。为获得更高的进给精度和稳定性,亦可采用闭环控制方法,即由压电陶瓷驱动电源配备相应位移传感器,实现反馈控制。

5 结论

- (1)通过理论计算、有限元仿真、实验测试的结果可知,微位移刀架的最大输出位移三者之间误差值较小,达到了精密车削微米级的进给设计要求,表明该方法是切实可行的。
- (2)利用铰链刚度 K 与铰链结构参数之间的关系分析,可得铰链臂长 a 及铰链厚度 t 对铰链行程及铰链刚度的影响较大,其次是铰链半径 R ,铰链宽度 b 影响最小。
- (3)实验结果表明,利用压电陶瓷驱动器驱动的微位移刀架,其刀架输出的位移也存在着迟滞特性,如果对于有严格精度要求的微切削进给,在施加电压时须采用位移传感器实现闭环控制,以满足实际需要。

参 考 文 献

1 邓辉,余晓芬,俞建卫. 钨青铜系列压电陶瓷驱动器迟滞特性的改善[J]. 仪器仪表学报,2003,24(8):585 ~ 591.
Deng Hui,Yu Xiaofen,Yu Jianwei. Improving the hysteresis characteristic of tungsten bronze ceramic piezoelectric actuators [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2003,24(8):585 ~ 591. (in Chinese)

2 刘定强,黄玉美,谢礼,等. 压电型宏微双驱动精密定位系统点位协调控制[J]. 农业机械学报,2011,42(4): 220 ~ 223,233.
Liu Dingqiang,Huang Yumei,Xie Li,et al. Positioning control of piezoelectric macro-micro dual drive[J]. Transactions of the

- Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(4): 220 ~ 223, 233. (in Chinese)
- 3 纪华伟, 杨世锡, 吴昭同. 一体化微操作器误差分析与建模[J]. 农业机械学报, 2007, 38(3): 136 ~ 140.
Ji Huawei, Yang Shixi, Wu Zhaotong. Error analysis and modeling of monolithic micro-manipulator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(3): 136 ~ 140. (in Chinese)
 - 4 胡小唐, 庄在龙, 姜晶, 等. 一种 5-D 压电驱动微位移工作台的设计[J]. 仪器仪表学报, 1996, 17(2): 301 ~ 305.
Hu Xiaotang, Zhuang Zailong, Jiang Jing, et al. A piezo-driven micro-displacement translation mechanism [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 1996, 17(2): 301 ~ 305. (in Chinese)
 - 5 毕树生, 宗光华. 柔性铰链微操作机构的误差源分析[J]. 机械科学与技术, 2003, 22(4): 591 ~ 594.
Bi Shusheng, Zong Guanghua. Error sources analysis of flexure hinge mechanism[J]. Mechanical Science and Technology, 2003, 22(4): 591 ~ 594. (in Chinese)
 - 6 丁金福. 精密二维微位移工作台的研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2011.
Ding Jinfu. Study on the micro-displacement actuator of the ultra-precision machine tools[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2011. (in Chinese)
 - 7 吴鹰飞, 周兆英. 柔性铰链的设计计算[J]. 工程力学, 2002, 19(6): 136 ~ 140.
Wu Yingfei, Zhou Zhaoying. Design of flexure hinges[J]. Engineering Mechanics, 2002, 19(6): 136 ~ 140. (in Chinese)
 - 8 高鹏, 袁哲俊, 姚英学. 基于柔性铰链结构的新型双向微动工作台的研究[J]. 仪器仪表学报, 1998, 19(2): 192 ~ 195.
 - 9 Fredric E Scire, E Clayton Teague. Piezodriven 50- μ m range stage with subnanometer resolution[J]. Review of Scientific Instruments, 1978, 49: 1 735 ~ 1 740.
 - 10 谭淑英. 超精密切削微位移系统的研制[D]. 天津: 天津大学, 2005.
Tan Shuying. Study on micro-positioning system for ultra-precision turning [D]. Tianjin: Tianjin University, 2005. (in Chinese)
 - 11 谭淑英, 张大卫, 许毅, 等. 弹性铰链设计[J]. 机械设计, 2005, 22(6): 56 ~ 58.
Tan Shuying, Zhang Dawei, Xu Yi, et al. Design of flexure hinge[J]. Journal of Machine Design, 2005, 22(6): 56 ~ 58. (in Chinese)
 - 12 李书环. 车削用微进给刀架设计[J]. 工程设计学报, 2005, 13(6): 410 ~ 415.
Li Shuhuan. Design of micro-feeding tool holder used in turning machining[J]. Journal of Engineering Design, 2005, 13(6): 410 ~ 415. (in Chinese)

(上接第 229 页)

参 考 文 献

- 1 肖人彬, 李洪杰, 李仁旺. 连杆曲线识别的进化方法[C]//第五届海内外青年设计与制造科学会议论文集, 2002, 2: 428 ~ 433.
Xiao Renbin, Li Hongjie, Li Renwang. Evolutionary approach to the identification of linkage curves[C]//Proceedings of the 5th International Conference on Frontiers of Design and Manufacturing, 2002, 2: 428 ~ 433. (in Chinese)
- 2 Smaili A A, Diab N A, Atallah N A. Optimum synthesis of mechanisms using tabu-gradient search algorithm[J]. ASME Journal of Mechanical Design, 2005, 127(5): 917 ~ 923.
- 3 郭卫东, 王鑫. 基于轨迹-速度双目标的平面连杆机构设计[J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 35(12): 1 483 ~ 1 486.
Guo Weidong, Wang Xin. Planar linkage mechanism design for bi-objective of trajectory and velocity[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2009, 35(12): 1 483 ~ 1 486. (in Chinese)
- 4 张彦斌, 吴鑫, 刘宏昭, 等. 齿轮五杆曲柄滑块机构的轨迹综合[J]. 农业机械学报, 2009, 40(2): 195 ~ 198.
Zhang Yanbin, Wu Xin, Liu Hongzhao, et al. Path synthesis of geared five-bar crank-slider mechanisms[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(2): 195 ~ 198. (in Chinese)
- 5 戚利勇, 高峰, 谭豫之, 等. 基于归一化椭圆傅里叶描述子的黄瓜形状识别[J]. 农业机械学报, 2011, 42(8): 164 ~ 167.
Qi Liyong, Gao Feng, Tan Yuzhi, et al. Cucumber shape description based on elliptic Fourier descriptor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(8): 164 ~ 167. (in Chinese)
- 6 李建, 王建新, 殷文齐, 等. 六连杆机械压力机传动机构优化设计[J]. 一重技术, 2011(1): 7 ~ 10.
Li Jian, Wang Jianxin, Yin Wenqi, et al. Optimization design of the six-link transmission mechanism used in mechanical press[J]. CFHI Technology, 2011(1): 7 ~ 10. (in Chinese)