

文章编号: 1006-4710(2013)04-0481-04

机床用组合铰链微进给平台静动特性分析

杨力, 杨静, 庞亚娜

(西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 为了提高加工机床进给机构的精度及刚度,设计了一种基于柔性铰链的精密机床用组合微进给平台。利用能量守恒原理分析了进给平台刚度,在此基础上对微进给平台的静、动特性进行了测试。实验结果表明,平台刚度的理论分析与实验结论一致,且微进给平台的动特性满足机床加工精度要求。

关键词: 组合铰链; 微进给平台; 静刚度; 动特性

中图分类号: TH123.3 **文献标志码:** A

The Dynamic Characteristic Analysis of Combination Hinge Micro Feeding Platform for Machine Tools

YANG Li, YANG Jing, PANG Yana

(Faculty of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to improve the accuracy and rigidity of the Machine tool feed mechanism, in this paper, a kind of micro feed platform based on flexure hinge is designed. By using the theory of conservation of energy principle, the rigidity of feed platform is analyzed on the basis of which the static and dynamic characteristics of platform are tested. The experiment results show that the theoretical analysis on the rigidity of platform is basically identical with the experimental results, and that the dynamic characteristic of the micro feeding platform can meet the requirements of machining precision by machine tool.

Key words: combination hinge; micro feed platform; the static stiffness; dynamic characteristics

随着对机械加工精度要求的提高,微进给机构在精密加工中占有越来越重要的地位。机床进给方式中常见的伺服电机驱动高精度滚珠丝杠传动,以及静压丝杠传动,其精度受到丝杠螺母副制造精度的制约;直线电机驱动方式传动,虽有反应速度快、随动性好、分辨率可达 $0.01 \mu\text{m}$ 等优点,但因其效率低、发热量大、在低速运动时会产生非线性摩擦力,而主要应用于高速、轻载的设备上^[1]。

近年来,超精密加工技术中宏微组合驱动方式得到广泛关注^[2],该驱动方式中,宏动台通过伺服驱动滚珠丝杠满足机床行程的要求,微动台则采用压电陶瓷或磁致动器驱动微进给平台实现机床微进给的精度要求。本文设计了一种用于宏微组合驱动的组合铰链微进给机构,利用柔性铰链体积小、无

隙、无机械摩擦、定位精度高^[3-5]等优点,以满足机床精密加工的精度以及刚度要求,并对微进给平台的静动特性进行了分析与测试。

1 组合铰链微进给机构静特性分析

图1为笔者设计的精密机床用宏微组合驱动的组合铰链微进给机构^[6]。微进给铰链机构通过螺栓固定在宏动台上,机床加工刀具固定在微进给平台上,8个直圆型铰链^[7]对称分布在微进给平台两侧,在驱动力作用下,柔性铰链发生变形,微进给平台沿Z向(进给方向)作精密进给。切削加工过程中,作用在平台上的切削力F如图1所示。为了保证精密加工精度,微进给机构进给(Z)以及非进给(Y)方向都必须有足够的刚度。

收稿日期: 2013-08-25

基金项目: 陕西省教育厅项目(11JS072)。

作者简介: 杨力,男,硕士,主要研究方向为机床精密进给控制系统。E-mail: 15829557119@163.com。

杨静,女,副教授,博士,研究方向为机电系统检测与控制。E-mail: yjzhd@163.com。

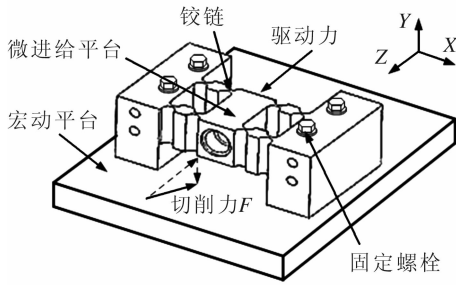


图1 机床微进给机构结构图^[6]

Fig.1 The structure chart of micro-feed mechanism in tool^[6]

利用材料力学的弹性变形理论,可以得到图2所示单柔性铰链在Y方向、Z方向的刚度计算公式^[8]。

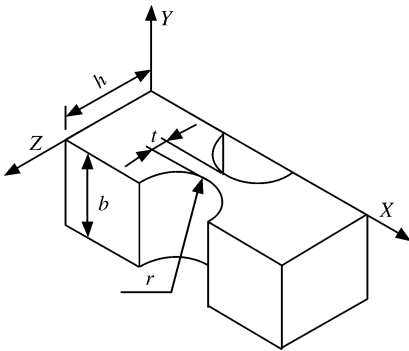


图2 单铰链结构

Fig.2 Structure chart of hinge

本文设计采用的铰链参数为:铰链半径 $r = 5$ mm,铰链宽度 $h = 12$ mm,铰链厚度 $b = 36$ mm,最薄处厚度 $t = 2$ mm,铰链中心点距离 $L = 20$ mm;Z方向的转角刚度、拉伸刚度及Y方向的刚度分别如式(1)、(2)、(3)所示。

$$K_{Z\alpha} = \frac{Ebr^2}{12 \left[\frac{s^3(6s^2+4s+1)}{(2s+1)(4s+1)^2} + \frac{6s^4(2s+1)}{(4s+1)^{\frac{5}{2}}} \arctan \sqrt{4s+1} \right]} \quad (1)$$

$$K_{Z\beta} = \frac{Eb}{\frac{2(2s+1)}{\sqrt{4s+1}} \arctan \sqrt{4s+1} - \frac{\pi}{2}} \quad (2)$$

$$K_Y = \frac{Eb^3}{6 \left[\frac{2(2s+1)}{\sqrt{4s+1}} \arctan \sqrt{4s+1} - \frac{\pi}{2} \right]} \quad (3)$$

式中, $s = r/t$,弹性模量 $E = 1.96 \times 10^{11}$ Pa。

将图1的组合铰链微进给机构简化为图3的平行四杆机构^[9],铰链中心距为L,设平台微进给位移为 δ ,转角 $\gamma \approx \delta/L$ 。于是,单个铰链由于发生机械变形而存储的总能量为:

$$E = K_{Z\alpha} \left(\frac{\gamma^2}{2} \right) + K_{Z\beta} \left(\frac{\Delta L_0^2}{2} \right) \quad (4)$$

其中, $K_{Z\alpha}$ 、 $K_{Z\beta}$ 分别为Z方向转角刚度以及拉伸刚度;由于铰链拉伸刚度对机构进给方向刚度影响不大,可以忽略。

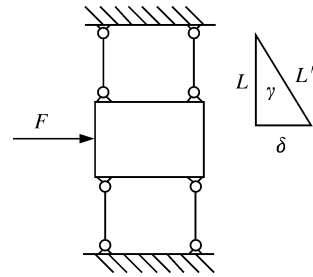


图3 平行四杆机构^[9]

Fig.3 Parallel four-bar mechanism^[9]

根据能量守恒原理,驱动力做功等于所有铰链存储能量,即:

$$W = 8E \quad (5)$$

于是:

$$F\delta = 4K_{Z\alpha} \left(\frac{\delta}{L} \right)^2 \quad (6)$$

组合铰链微进给平台进给方向Z刚度系数:

$$K_Z = 4K_{Z\alpha}/L^2 \quad (7)$$

将(1)式代入(7),计算平台进给(Z)方向刚度为:

$$K_Z = 2.663 \times 10^7 \text{ N/m}$$

在Y方向上做类似简化,利用能量守恒原理,可以得到组合铰链非进给Y向刚度:

$$K_Y = 4.995 \times 10^9 \text{ N/m}$$

由此可见,图1的组合铰链微进给平台虽然结构小,但在非进给方向(Y)以及进给方向(Z)的刚度都比较高,同时,Y向比Z向刚度高两个数量级,满足其在机床进给过程中的刚度要求。

2 微进给平台静特性测试

图4为微进给平台的静刚度测试图。力传感器为FUTEK LCM500,BENTLY电涡流传感器1、2检测组合铰链微进给平台在力作用下产生的位移。

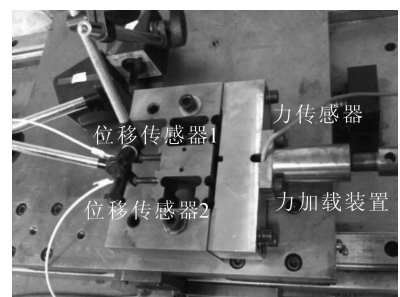


图4 微进给平台静刚度测试

Fig.4 The Stiffness testing of hinge

图5给出了力加载器从0 N 逐渐增大到3 500 N,再依次卸载过程中,微进给平台产生的位移响应曲线。

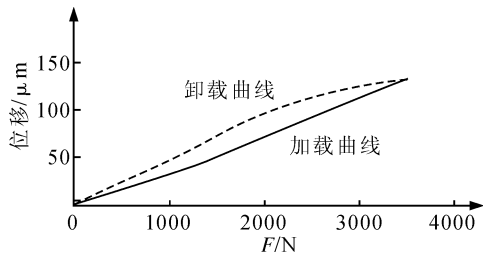


图5 铰链静刚度特性曲线

Fig.5 The static stiffness characteristic curve of hinge

由此可得:①微进给平台进给方向平均刚度为26.429 0 N/μm,与理论计算相差0.75%;②组合铰链微进给平台力与位移响应呈现回程非线性,最大回程误差23.39 μm。该非线性与铰链材质以及热处理有关,在精密机床宏微组合进给平台控制中,为了提高加工刀具进给定位精度,微动平台的控制需要采用非线性控制策略。

3 组合铰链微进给平台动特性测试

采用脉冲响应对组合铰链微进给平台动特性进行测试。实验装置如图6所示,平台自由悬挂,加速度传感器DYTRAN 3263M8贴于微进给平台上。脉冲敲击锤086B20沿Z向敲击平台,平台所受脉冲信号如图7所示;利用M+P测试软件对平台冲击振动响应进行频谱分析(见图8),微进给平台前1、2、3、4阶固有频率分别为:1 047、1 227、2 453、2 888。

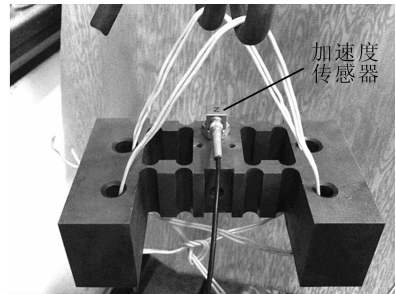


图6 微进给平台脉冲响应实验

Fig.6 Micro-feed platform impulse response experiment

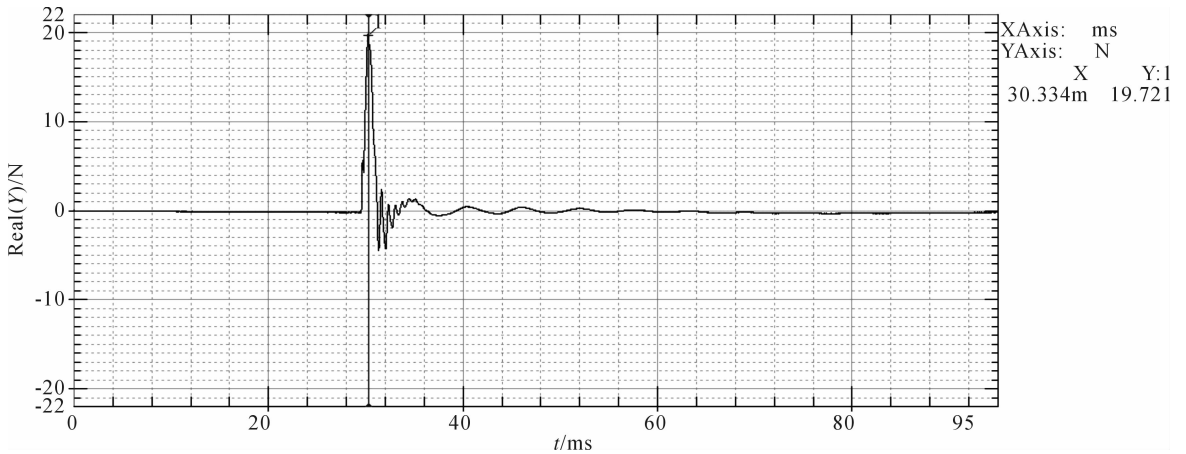


图7 平台所受脉冲力信号

Fig.7 The signal in the pulse force

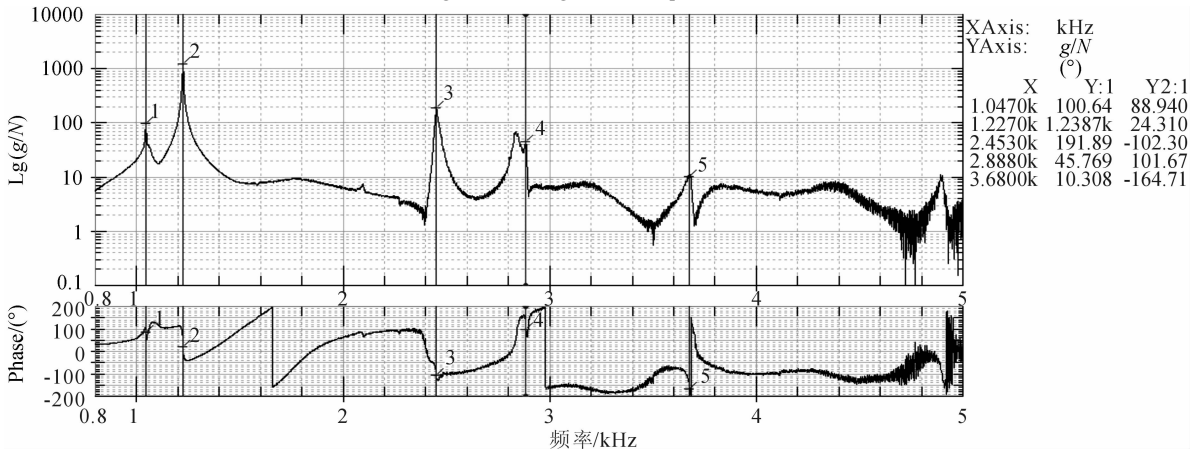


图8 微进给平台振动频谱

Fig.8 The vibration spectrum of micro-feed platform

一般高精度机床的转速为 25 000 rpm。因此,加工过程中,刀具所受切削力最高频率为 500 Hz,而组合铰链微进给平台的一阶固有频率 1 kHz,远远高于输入信号的频率,因此该微进给平台在加工中振动小,有利于提高加工精度。

4 结 论

宏微组合进给平台的行程、刚度以及定位精度等综合性能优于普通单驱动进给系统,可在精密机床加工中得到广泛应用。利用柔性铰链的无间隙、无机械摩擦优点,本文设计了一种精密机床用组合铰链微进给平台,在对组合铰链进给平台的刚度进行理论分析基础上,对组合铰链微进给平台的静、动特性进行了测试。实验结果表明:组合铰链微进给平台在进给以及非进给方向都有足够的刚度,进给方向的一阶固有频率远远高于高速精密机床的转速,加工过程中主轴振动小,满足精密加工要求。目前仍不足的是平台进给方向存在回程误差,在平台控制中必须考虑。

参考文献:

- [1] 刘春光,刘海涛. 大行程高精度驱动进给机构研究综述[J]. 华章,2011, 36:367.
- [2] 节德刚. 宏/微驱动高速高精度定位系统的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006.
- Jie Degang. Research of the high-speed/high-precision positioning system of macro/micro driving[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2006.
- [3] 任宁,王长路,欧开良,等. 倒圆角直梁型柔性铰链应力分析[J]. 机械传动,2012,36(4):87-89.
- Ren Ning, Wang Changlu, Ou Kailiang, et al. Analysis of stress of corner-filletted flexural hinges[J]. Journal of Me-

chanical Transmission,2012,36(4):87-89.

- [4] Nicolae Lobontiu, Jaffrey S N Paine, Ephrahim Garcia, et al. Design of symmetric conic-section flexure hinges based on closed-form compliance equations[J]. Mechanism and Machine Theory, 2002,37:477-498.
- [5] 许辉焱. 六自由度宏/微一体化并联操作台系统研究[D]. 上海:上海交通大学,2009.
- Xu Huiyan. The research about the integrated 6-dof macro/micro-moving parallel manipulator[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University,2009.
- [6] 金鑫. 基于磁致伸缩材料精密进给平台模型研究[D]. 西安:西安理工大学,2012.
- Jin Xin. Research on precision feed platform based on the magnetostrictive material[D]. Xi'an:Xi'an University of Technology,2012.
- [7] 李玉和,李庆祥,陈璐云,等. 单轴柔性铰链设计方法研究[J]. 清华大学学报:自然科学版,2002, 42(2): 172-174.
- Li Yuhe, Li Qingxiang, Chen Luyun, et al. Study on design method of one-axis flexure hinge[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2002, 42(2): 172-174.
- [8] 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.
- [9] 黄金永,娄月海,魏燕定. 基于柔性铰链的二维微动平台特性研究[J]. 机械设计,2009,26(4):21-23.
- Huang Jinyong, Lou Yuehai, Wei Yanding. Characteristic research of 2D jiggle platform based on flexible hinges[J]. Journal of Machine Design, 2009,26(4):21-23.

(责任编辑 王卫勋)