

自动化数控纳米曲面磨床系统的设计

赵国性¹ 董婉娇²

(1 东富龙科技集团股份有限公司 上海 201100; 2 上海应用技术大学 上海 201418)

摘要: 为实现超精密工件的自动化磨削加工和检测, 设计并制造了自动化数控纳米曲面磨床系统。采用多种结构刚度对比和拓扑优化的方法设计确定了机床的支撑结构。采用闭式液体静压导轨和最大刚度滑块式结构实现静压导轨的最大刚度和运行精度。且该系统可以进行自动化加工及质量监控功能, 实现了实时监控加工过程和加工质量。纳米曲面磨床的XYZ滑台都满足重复定位精度小于100nm的设计要求。自动化数控纳米曲面磨床系统能够满足设计要求, 并应用于惯性导航关键的细筋加工中。

关键词: 超精密机床设计; 自动化加工监控; 静压滑台; 滑台精度测试

0 引言

作为零件加工最后一道工序的超精密机床, 其可靠性、精度和稳定性是零件加工质量的重要保证。近年来, 超精密机床的设计及其自动化问题被大量国内外学者作为研究方向。本文设计并制造了自动化数控纳米级曲面磨床系统来解决高精度零件的磨削问题。其中XY平台的设计要求为: 行程100mm, 定位误差为 $\pm 0.3\mu\text{m}$, 重复定位误差为 $0.1\mu\text{m}$; Z平台的设计要求为: 行程30mm, 定位误差为 $\pm 0.3\mu\text{m}$, 重复定位误差为 $0.1\mu\text{m}$ 。

1 自动化数控纳米曲面磨床系统设计

1.1 自动化数控纳米曲面磨床系统总体设计

自动化数控纳米曲面磨床系统能够实现高精度小尺寸零件的磨削加工, 该系统主要由数控纳米曲面磨床、工业机器人、物料架及机械手抓库、恒温恒湿防护罩组成, 如图1所示。

在机械加工过程中, 系统的静动态特性和热学特性对零件的加工精度起着决定性作用。英国伯明翰大学的J. Peclenik教授和垣野义昭教授对精密加工中误差产生原因的统计表明: 机床准静态误差占其总制造误差的70%左右。引起机床准静态误差的主要原因为热误差和几何误差。而热变形导致的加工误差, 识别和补偿难度较大。为了降低机床热变形问题, 本研究的自动化系统将机床防护罩与恒温恒湿环境室相结合, 形成具有恒温恒湿环境的防护罩。该防护罩保证了在整个加工过程中, 机床、工件、检测

装置都置于恒温恒湿的环境中, 从而能够降低由于温度变化而导致的精度误差。该恒温恒湿防护罩能够将温度控制在 $\pm 1^\circ\text{C}$ 之内。

数控纳米曲面磨床采用立式、三轴联动插补形式, 该曲面磨床由支撑系统、XY工作台、Z工作台及隔震系统组成。如今, 花岗岩材料由于其低摩擦系数、低热膨胀系数、低受力变形和高的隔震能力而被广泛应用于机床基座和导轨中。因此, 该机床中的支撑系统、Z滑台及导轨都采用花岗岩材料。无论是机床加工过程中的振动, 还是来自地面等外界环境的振动, 都会对产品的加工质量产生很大的影响, 同时也会影响机床的寿命和生产效率, 因此有效降低振动是非常有必要的。本研究中的机床支撑系统直接安装在TMC隔震器上, 能够有

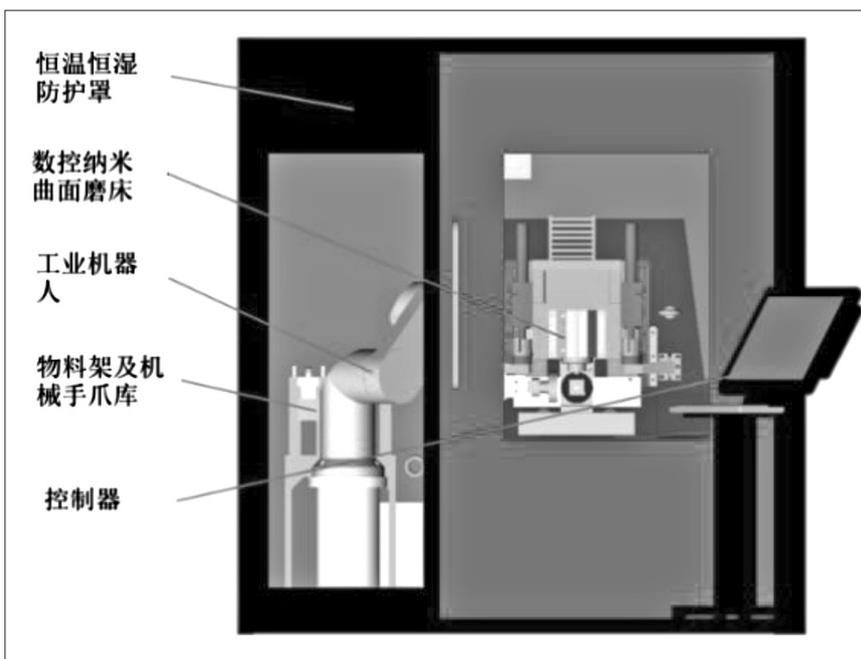


图1 自动化数控纳米曲面磨床系统

效隔绝加工过程和外界环境的振动, 保证加工质量。

为降低工件安装过程中, 由于人员经验等原因造成的不确定误差, 并提高生产效率, 本研究中的自动化数控纳米曲面磨床系统采用工业机器人代替人工劳动力, 并集成影响测量系统实现工件加工完成后的质量测量。这样能够有效提高产品加工效率和产品合格率。

1.2 纳米曲面磨床支撑结构设计

机床支撑系统主要用于导轨、主轴箱等部件的支撑, 其动态性能与机床的整体性能有着密切的关系。因此, 对其结构、外形、刚度进行合理、科学的设计, 对提高整个机床的稳定性、加工精度、抗震性、可靠性及寿命有很大的帮助。为了节约成本和降低能耗, 该机床采用紧凑型结构, 具有占地空间小、研制成本低等特点。

为保证导轨的变形量小, 采用Z工作台的安装接触面积较大的单立柱结构, 且该类型结构的立柱在安装时, 与床身有较大的接触面积。为获得高的加工稳定性及加工精度, 立柱结构优化设计的重点在于增强刚性和减少质量, 通过采用拓扑分析法可以获得最佳的立柱形态, 如图2所示。与龙门式立柱相比, 单立柱式的机床存在XY工作台行程小等问题。为解决该问题, 本机床采用一种沙发型床身结构(图2), 能够在不降低床身刚度的同时有效增加导轨的行程。

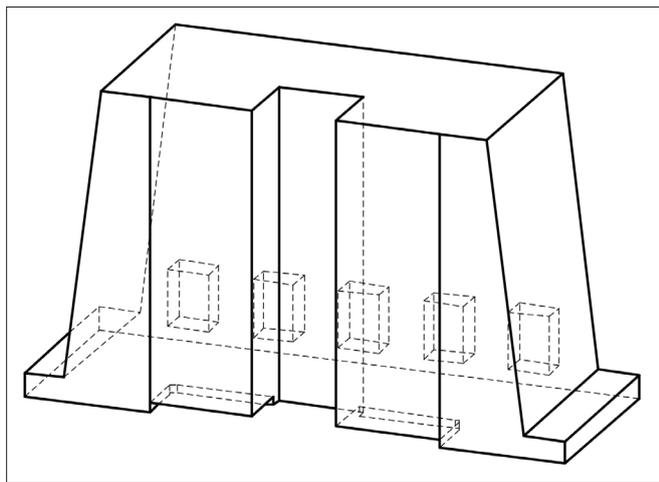


图2 立柱结构

通过仿真对比数控纳米曲面磨床支撑系统与传统单立柱式和龙门式结构, 在采用相同负重结构时的变形量大小。其中, 仿真时三种立柱底面的接触面积相同; 单立柱与斜立柱仿真时, 其立柱的体积相同, 而龙门立柱的宽度与斜立柱的底边最大宽度相同。床身、立柱导轨和动平台均为花岗岩材料, 材料密度为 $3000\text{kg}/\text{m}^3$ 弹性模量为 $1.3 \times 10^{10}\text{Pa}$, 泊松比为 0.4。

选取 y 方向的变形量进行比较, 可以看出, 最大变形量为平台的变形量, 而平台上安装的部件为主轴部件, 因此选取变形量最小的结构有益于保证机床加工精度。

可以看出图2所示的结构最大变形量最小, 因此可以说该种新型的斜立柱+沙发式的支撑结构在具有相同支撑面积时, 具有最好的支撑效果。

1.3 纳米曲面磨床液体静压导轨结构设计

为了实现机床的大负载、纳米级的重复定位精度, 本机床Z滑台采用由直线电机驱动的液体静压导轨, 来满足重复定位精度小于等于 100nm 和负重主轴及其夹具质量大于 35kg 的要求。

直线运动的静压导轨, 其油腔多在动滑台上。采用滑块式结构的液压滑台具有液压管路布局合理和机床结构紧凑等优点, 且静压油路均在滑块内部。为了减少零件加工和安装环节的误差, 将立柱的前安装面作为导轨面, 有效降低了导轨变形量。导轨1、导轨2及立柱形成的闭式矩形导轨, 静压滑块在其中间沿Z方向运动, 此时滑块只有一个自由度, 称之为闭式静压导轨。本机床采用的静压控制器为德国HYPROSTATIK(海浮乐)公司生产的一种预压预调型单面薄膜反馈节流器。该流量控制器具有自适应能力, 当导轨受到外力作用时, 由于油膜厚度变化导致流量控制器内薄膜上下压力不同, 从而改变薄膜曲率, 调节油膜厚度以平衡外力的作用。

滑块上共有12个油腔。在滑块上下端面分别安装有8个测量块和PM流量控制器, 分别连接1~8号油腔。

为了满足静压滑台高刚度的设计要求, 将与立柱导轨接触的4个油腔直接与油泵连接, 其压力约为油泵压力, 即只要导轨与滑块间的间隙(油膜厚度)在能够形成油膜的间隙范围内, 其油腔内的压力就不会随油膜厚度的改变而改变。下面对置油腔进行分析。

根据受力平衡得到方程:

$$F_i = pr_1 \cdot A_1 - pr_2 \cdot A_2 \quad (1)$$

式中: F_i — 对置油腔所受的外载荷;

pr_1 — 油腔1的承载油压;

A_1 — 油腔1的有效承载面积;

pr_2 — 油腔2的承载油压;

A_2 — 油腔2的有效承载面积。

根据公式(1)可知, 当滑台所受外力不变时, 由于油腔9~12中的油膜压力 pr_2 不变, 使得其对置的油腔1~4中的油膜压力 pr_1 也不会发生变化。根据公式:

$$j_u = \frac{d(pr_1 \cdot A_1)}{dh_1} + \frac{d(pr_2 \cdot A_2)}{dh_2} \quad (2)$$

可知, 导轨的刚度随着油膜压力的增加而增大。而对于静压导轨而言, 油腔压力小于等于油泵压力, 所以, 此时静压导轨的刚度最大。

由于导轨在受到油腔压力时会产生变形, 当压力增



图3 自动化数控纳米曲面磨床系统

加时,变形量会增加。而采用立柱作为导轨可以有效地降低导轨的变形量。

2 机床运行及精度实验

根据上文中的结构设计及其他设计方法设计了自动化数控纳米曲面磨床系统,如图3所示。该系统的主要加工对象为精磨削小孔内圆,如惯性导航关键的细筋加工。该系统能够实现产品的自动化安装、加工、检测和拆卸。

XYZ工作台定位精度测试实验中直线电机驱动工作台分别沿X轴、Y轴、Z轴向导轨做进给运动,每步进给量为5mm,越程量为2mm,共往返运行5次。其中,XY工作台的行程为100mm,Z平台的行程为30mm。采用Renishaw XL-80激光干涉仪对运动进行监测,其测量分辨率为1nm。

其中,X平台的定位误差为0.124 μm ,重复定位误差为0.064 μm ;Y平台的定位误差为0.146 μm ,重复定

位误差为0.065 μm ;Z平台的定位误差为0.156 μm ,重复定位误差为0.048 μm 。从测量结果可以看出,XYZ工作台都满足设计要求。

3 结语

本文介绍了采用垂直静压导轨的数控纳米曲面磨床、工业机器人、隔震系统及恒温恒湿防护罩组合的方式设计的自动化数控纳米曲面磨床系统。该系统实现了超精密工件的自动化磨削加工和检测功能。并通过对不同的机床结构进行分析,给出了一种高刚度、大行程的床身和立柱形态。采用最大刚度的滑块式静压导轨作为Z平台的移动导轨,有效提高了导轨刚度。并针对该系统开发了自动化加工监控系统,该系统可以对加工过程进行实时监测,并在线评估工件加工质量。最后,对数控纳米曲面磨床的XYZ工作台进行了精确测试,测量结果均满足设计要求。目前,该自动化数控纳米曲面磨床系统已经应用于惯性导航关键的细筋加工中。

参考文献:

- [1] 李蓓智. 高速高质量磨削理论、工艺、装备与应用[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2012.
- [2] 垣野义昭. 机床热变形对加工精度的影响[J]. 机械与工具, 1997(10): 1841-1844.
- [3] 何剑, 李蓓智, 杨建国, 等. 微细加工机床立柱结构优化设计[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2015(05): 659-662+669.
- [4] 黎小华, 曾国平, 燕继明, 等. 数控机床智能监控CPS构建技术研究[J]. 航空制造技术, 2015, 477(8): 53-58.

作者简介: 赵国性(1979-), 男, 汉族, 山西朔州人, 硕士研究生, 研究方向: 创新药物制药装备制造平台的研发与应用。