

超精密非球面磨削加工微振动试验系统研究

杨小帆^{1,2}, 郭隐彪²

(1. 集美大学机械工程学院, 福建 厦门 361021; 2. 厦门大学机电工程系, 福建 厦门 361005)

摘要: 分析超精密磨削加工中砂轮微小振动对工件表面质量的影响, 建立磨削中振动引起工件表面轮廓误差的数学模型, 设计相应的超精密磨削加工微振动试验系统, 用以模拟磨削过程中砂轮径向、横向的微小振动和摆动。结果表明: 合理选择砂轮振动频率或工件主轴转速能有效提高工件表面精度, 降低表面波纹度。

关键词: 砂轮; 磨削; 振动; 主轴; 加工精度

中图分类号: TG58

文献标识码: A

Study on microvibration experiment system of ultra - precision grinding optical aspheric surfaces

YANG Xiao - fan^{1,2}, GUO Yin - biao²

(1. College of Mechanical Engineering, Jimei University, Xiamen, Fujian 361021, China; 2. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China)

Abstract: Analysed the influence of the abrasive wheel microvibration to the workpiece surface quality on ultra - precision grinding process, and established a mathematical model describing how vibration led to the error of workpiece surface profile. Designed the corresponding microvibration experiment system of grinding process, which can simulate radial vibration, transverse vibration and oscillation of wheel on machining process. The results showed that, with appropriate wheel vibration frequency or appropriate workpiece rotate speed, the surface precision of workpiece can be improved.

Key words: wheel; grinding; vibration; spindle vibration; machining accuracy

现代光学设计通常采用非球面光学零件。为获得高精度的非球面零件, 常采用超精密磨削、珩磨、研磨及抛光等方法^[1,2]。珩磨、研磨及抛光等方法加工光学玻璃等脆性材料时不可避免地具有生产率低、加工表面的面形精度不高等缺点^[3], 超精密磨削加工技术的发展提高了零件的加工精度和效率^[4,5]。本研究主要分析超精密磨削加工中砂轮微小振动对工件表面质量的影响, 并设计了相关的试验系统。

1 砂轮振动对工件表面形状的影响

砂轮振动是影响工件表面质量的关键因素之一。其原因主要是砂轮未能充分平衡由主轴周期性旋转而引起的砂轮振动和摆动。砂轮不平衡量会引起主轴系统振动, 影响磨削效率、磨削质量、砂轮和轴承寿命, 可使主轴平动、摆动, 使加工表面产生波纹度, 还将影响表面粗糙度。

在超精密磨削加工中, 垂直切削工件表面的金刚石砂轮在工件表面留下的切削痕迹与它的外轮廓形状是一致的。如果砂轮和工件之间存在相对振动, 那么势必影响工件的表面形状。以切非球面零件为例, 工件以主轴旋转频率 f_w 旋转, 砂轮在进给方向上的每转进给量为 s 。如果不受振动的影响, 那么在进给方向上的截面是一个周期性表面, 如图 1 所示。但在实际加工过程中, 砂轮和工件之间总是存在着相对振动, 对于图 1 所示截面轮廓有影响的振动是垂直于工件表面的。图 2 所示为砂轮振动引起表面轮

收稿日期: 2004 - 12 - 30

作者简介: 杨小帆(1972 -), 女, 硕士, 讲师。

基金项目: 国家 863 计划资助项目(8638042416)

廓的原理简图.

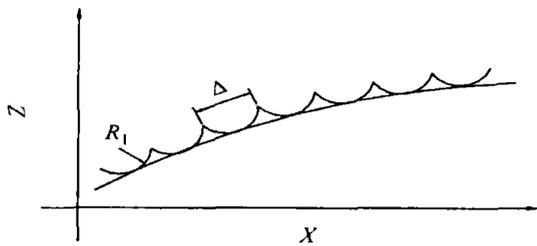


图 1 不受振动干扰的理想表面

Fig. 1 The ideal surface of non - interfere by vibration

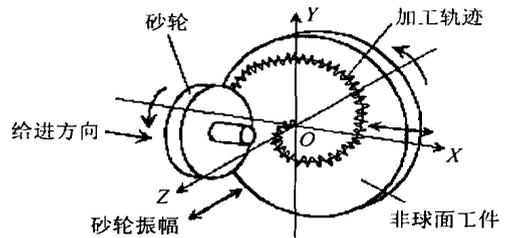


图 2 非球面磨削加工的表面轮廓形成

Fig. 2 The formation of surface figure by grinding optical aspheric surface

假设砂轮振动的频率为 f_d ，那么工件每转一周所经历的振动周期数为： $T = f_d/f_w = a - b$ 。式中： a 为频率比的整数部分 (0 或正整数)； b 为频率比的小数部分 $b = \text{int}(f_d/f_w) - f_d/f_w$ 。如果砂轮振动频率是工件主轴旋转频率的整倍数，即 $b = 0$ 时，刀具在工件上切削到最深处和最浅处的位置在每旋转一周后是不变的。但如果 $b \neq 0$ ，则在工件旋转一周后，会产生一个相移， $\phi = \omega_w \cdot b \cdot T_d$ ，其中： ω_w 为工件主轴旋转的角速度， $\omega_w = 2\pi f_w$ ； T_d 为砂轮的振动周期， $T_d = 1/f_d$ 。

由此可见，由于振动的作用，刀具的切削深度在不断变化，给表面轮廓带来影响，并且振动频率和主轴旋转频率比值的小数部分发生变化时，会得到完全不同的表面轮廓。

2 振动条件下表面的形成

2.1 表面空间频率的形成

在振动条件下磨削得到的表面，其各个点的位置一方面取决于砂轮形状和磨削位置，另一方面又要受到振动的影响。图 1 中不受振动干扰的截面轮廓是一周期表面。砂轮在工件表面上留下的加工痕迹间距为每转进给量，因此表面波长 $\lambda = v_c / f_w$ 。在沿进给方向上，砂轮每隔一个时间周期 $T_w = 1/f_w$ 切削到加工表面上，因此表面波长 $\lambda = v_c \times T_w = v_c / f_w$ ， v_c 是进给速度，表面的空间频率 $f = f_w$ 。在振动条件下加工时，砂轮的位置要受到振动的影响而发生变化。假设砂轮相对于工件表面方向上的振动是一正弦曲线 $A \sin(2\pi f_d t)$ ，那么砂轮上参与切削的任一点的运动轨迹也是这条曲线。因此在振动条件下非球面工件表面轮廓可表示为：

$$\begin{cases} x(t) \\ y(t) \\ z(t) \end{cases} = \begin{cases} (R - v_c \cdot t) \cos(2\pi f_w t) \\ (R - v_c \cdot t) \sin(2\pi f_w t) \\ A \sin(2\pi f_d t - \phi) \end{cases} \quad (1)$$

由方程(1)可绘出工件表面的立体轮廓，如图 3 所示。

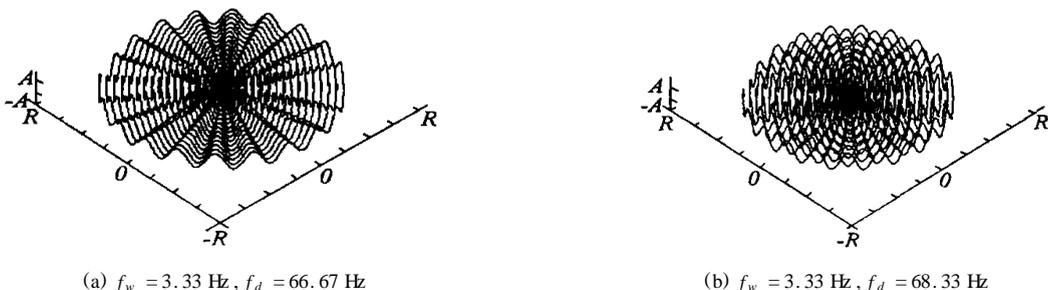


图 3 不同频率下工件的表面轮廓

Fig. 3 The surface figure of workpiece under different frequency

方程(1)中:

$$z(t) = A \sin[2 f_w (a - b) t - \omega_w \cdot b \cdot T_d] = A \sin[2 f_w (1 - b) t - 2 b / (a - b)] \quad (2)$$

由方程(2)可以得到在振动条件下加工出的进给方向上的截面轮廓中包含有这样一个空间频率 $f = (1 - b) f_w$, 与不受振动干扰的表面进行比较可以发现, 振动对表面频率的影响仅仅与振动频率和主轴旋转频率的比值的小数部分 b 有关. 不同的 b 值会得到不同的表面轮廓. 因此改变主轴旋转频率或振动频率都会使表面的空间频率发生变化.

2.2 表面空间幅值的形成

表面空间幅值的大小是由方程(1)中的 $z(t)$ 决定的, 且在进给方向 x 轴上 $R(t) = vt$. 综合方程(2), 振动波纹的表面空间幅值可由方程(3)描述:

$$A_s = z(R) = A \sin[2 f_w (1 - b) x / v_c - 2 b / (a - b)] \quad (3)$$

在不考虑相位角 ϕ 的情况下, 表面空间幅值的大小直接取决于砂轮振动幅值和砂轮的进给速度以及砂轮振动频率与工件主轴旋转频率.

图4所示为, 振动幅值相同情况下, 不同的振动频率对工件表面空间幅值的影响.

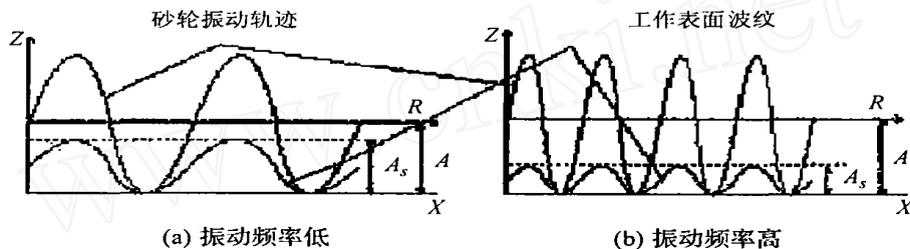


图4 不同振动频率时, 表面空间幅值变化

Fig. 4 The variation of surface space amplitude under different vibration frequency

3 微振动试验系统设计

为了进一步研究砂轮振动对工件表面质量的影响以及在不同的加工参数下砂轮的振动状况, 设计了一套超精密非球面磨削加工微振动试验系统. 由于精密磨床上砂轮主轴刚度大, 不易激振, 为了便于实验, 可在数控车床刀架上装上车刀使其进行径向、横向振动以及摆动, 模拟精密磨床上砂轮 x 轴、 Z 轴的微振动和 B 轴的微摆动, 在振动条件下用宽刃车刀切削非球面工件, 同样可达到试验目的.

3.1 微驱动刀架结构设计

微驱动刀架是整个试验系统的关键, 它要在保证精度的前提下达到模拟实际磨削过程中砂轮径向、横向的微小振动以及摆动. 基于以上考虑, 设计微驱动刀架结构如图5所示. 该结构由5个部分组成: 产生激振力部分、模拟径向振动部分、模拟横向振动部分、模拟摆动部分及与数控车床回转刀架联接部分. 由于滚动导轨具有摩擦系数小、定位精度高的优点, 当要求运动件产生精确微小的移动时, 通常采用滚动导轨. 目前, 市面上基本没有小直径的圆滚动导轨出售. 因此, 采用了两对型号为 MGN7C 的小型线性滚动导轨, 并用一对型号为 30205 的圆锥滚子轴承代替圆导轨.

车刀用螺旋压板机构夹紧在上导板上. 线性导轨1与线性导轨2呈垂直方向布置. 线性导轨1的滑块部分用螺钉与上导板底面连接, 其导轨部分与中间导板顶面连接; 线性导轨2的滑块部分与中间板底面连接, 导轨部分与下导板顶面连接, 下导板通过键与轴连接, 其底面的凸台支撑于轴承内圈, 轴通过轴承支撑于轴承座中, 轴承座固定在过渡安装板上, 通过轴上的双螺母可调整轴承的间隙. 三套激振器与弹簧装置分别按图5所示位置安装在三块导板的中间高度位置上.

在激振力的作用下, 车刀在上导板的带动下通过线性导轨1可沿中间板作直线往复微滑动, 实现刀尖的横向振动, 模拟砂轮 Z 轴方向振动; 同时中间板带动上导板及车刀通过线性导轨2沿下导板作

直线微滑动, 实现刀尖的径向振动, 模拟砂轮 x 轴方向振动; 下导板再带动其上部分绕轴的中心线微转动, 模拟 B 轴摆动. 整个结构通过过渡安装板安装在车床刀架上. 微驱动刀架设计时刀尖高度须控制在 110 mm 以下, 避免安装后车刀刀尖高度超过机床主轴中心高. 试验时若采用不同的车床, 可通过调整过渡安装板的高度来调整刀尖的高度, 改变过渡安装板的结构来调整系统与回转刀架的连接方式.

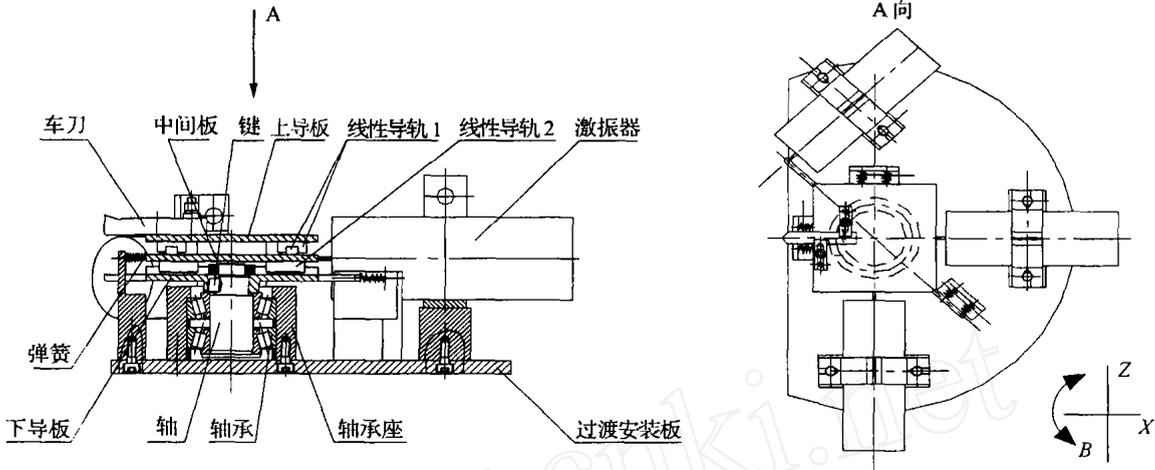


图 5 微驱动刀架结构简图

Fig. 5 Block of micro - drive cutting tools structure

3.2 微振动试验系统设计

图 6 为在数控车床上进行的超精密非球面磨削加工微振动试验系统原理图. 微驱动刀架通过过渡安装板装夹到数控车床回转刀架上, 由信号发生器发出连续正弦波, 经放大电路及压电陶瓷驱动电源与微驱动刀架上激振器对应的正负极相连, 自行设计的车刀直接安装在微驱动刀架的上导板上. 在车刀上靠近刀尖的地方装上测振传感器, 将拾取的信号经放大器、滤波器、A/D 转换板输送给计算机进行记录分析. 由于实际磨削过程中砂轮主轴的常用转速范围为 1 000 ~ 2 000 r/min, 工件主轴的常用转速范围为 500 ~ 800 r/min, 即振动频率通常在十几到几十赫兹范围内, 因此须选用低频正弦波信号发生器和低通滤波器. 试验激振系统选用“ZK-3VIC 型虚拟测试振动与控制实验装置”, SIF-3 型数字式激振信号源和 JZ-1 型电动式激振器. 信号采集系统为 LC0103IDE 型压电式加速度传感器和 PHOTON 型超轻便式动态信号分析器. 由于实际切削过程产生的切削力并不大, 因此所需激振力也不大, 可根据具体的切削用量大小调节激振信号源的输出电流.

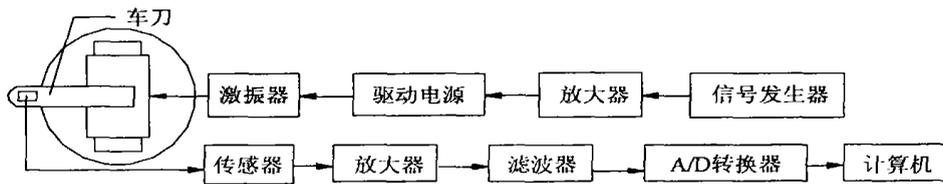


图 6 微振动试验系统原理图

Fig. 6 The principle diagram of micro-vibration testing system

3.3 实验参数

通过上述的微小振动试验系统, 可以测量出砂轮主轴不同频率、振幅的平动、摆动对工件表面质量的影响. 表 1 为实验的加工参数范围.

试验时, 只要改变车刀横向的激振频率即可模拟砂轮的转速变化; 改变车刀径向的激振频率即可模拟工件的转速变化; 改变车刀圆周摆动的激振频率和振幅即可模拟砂轮主轴的转角变化; 砂轮主轴

刚度可由弹簧刚度模拟, 砂轮每转进给量由车刀的进给速度控制. 图 7 为试验时模拟砂轮转速 1 800 r/min, 即 $f_d = 30$ Hz; 砂轮主轴摆动频率 $f_c = 10$ Hz; 工件转速分别为 800、900 r/min, 即 f_w 分别为 13.33、15 Hz; 其它加工条件不变时工件表面的轮廓变化. 从图中可以看出: 在其它加工条件不变的情况下, 改变工件主轴的转速, 工件的表面空间频率和表面空间幅值都发生了变化. 由此可见, 在振动的条件下, 选择合适的加工参数, 工件表面质量将得到提高.

表 1 实验的加工参数范围

Tab. 1 The parameter range of experiment machining

$n_{\text{砂轮}} / \text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	$n_{\text{工件}} / \text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	砂轮主轴刚度/ $\mu\text{m} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\varphi / (^\circ)$	砂轮每转进给量/ $\mu\text{m} \cdot \text{r}^{-1}$
1 000	500	2	0.02	1
1 200	600	3	0.04	3
1 500	700	4	0.06	5
1 800	800	5	0.08	7
2 000	1 000	6	0.1	10

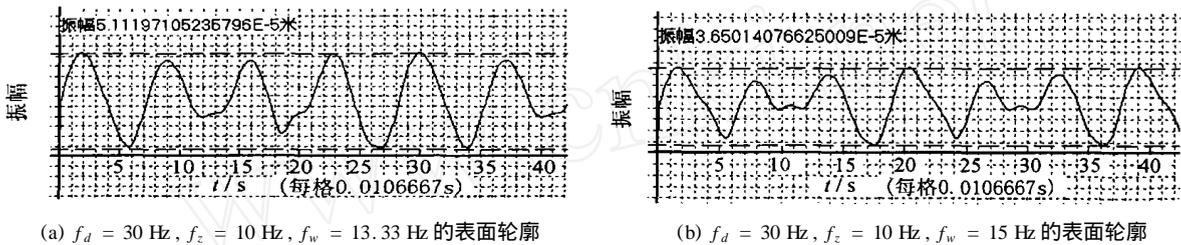


图 7 不同主轴转速时, 工件表面轮廓的变化

Fig. 7 The variety of workpiece surface figure under different spindle rotate speed

4 结语

在超精密磨削加工中, 砂轮的修正和更换引起的不平衡振动和摆动以及加工工件产生的主轴振动会在工件的表面形成振动波纹和形状误差, 从而恶化加工质量, 加剧砂轮的磨损. 而在振动条件下加工出的表面轮廓, 它的表面空间频率和表面空间幅值与砂轮振动频率和工件主轴旋转频率的比值有关, 因此改变振动频率或工件主轴旋转频率都会使表面轮廓发生变化. 本研究设计的超精密磨削加工微振动试验系统, 可模拟实际磨削过程中砂轮径向、横向不同频率、振幅的微小振动和摆动, 为研究不同加工参数下砂轮的振动特性及其对工件表面质量的影响提供实验基础. 通过优化加工参数, 使超精密磨削能在振动尽可能小的条件下进行, 间接地保证了产品的质量.

参考文献:

- [1] 陈明君, 张飞虎, 董 申. 光学非球曲面器件的超精密磨削加工技术研究[J]. 光学技术, 2001, 27(6): 512 - 515.
- [2] 张 军, 唐文彦, 强锡富. 切削振动条件下工件表面轮廓的形成机理[J]. 仪器仪表学报, 2000, 21(3): 225 - 228.
- [3] 张 翊, 郭隐彪, 庄司克雄. 微小振动影响超精密非球面加工精度的研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2003(6): 17 - 20.
- [4] Li Y, Gracewski S M. Analysis of chatter in contour grinding of optical materials[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2002, 42: 1 095 - 1 103.
- [5] Cheung C F, Lee W B. A theoretical and experimental investigation of surface roughness formation in ultra precision diamond turning[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2000, 40: 979 - 1 002.