



毕 果

# 砂轮磨削振动对工件表面形貌特征的影响研究

毕 果, 郭隐彪, 郑茂江

(厦门大学 物理与机电工程学院 微纳米加工与检测联合实验室, 厦门 361005)

**摘 要:** 砂轮振动将会使得光学元件表面产生周期性波动, 从而降低后续抛光工序的加工效率, 增加光学元件表面的中频误差成分, 影响光学元件的使用性能。本文针对平行磨削方式, 研究了砂轮周期性强迫振动下的工件表面形貌特征, 分析了砂轮与工件表面的干涉现象, 以及加工参数对加工表面波纹度特征的影响。研究结果表明: 加工参数满足一定的条件下, 工件表面振纹小于砂轮本身振动振幅, 通过合理选择加工参数有利于改善工件表面波纹度, 提高加工表面质量。

**关 键 词:** 砂轮振动; 平行磨削; 表面形貌特征

中图分类号: TG58 文献标识码: A 文章编号: 1003-8728(2013)08-1118-06

## Effects of Grinding Wheel Vibration on Surface Topography

Bi Guo, Guo Yinbiao, Zheng Maojiang

(Unite Laboratory of Micro/nano Machining and Measuring, School of Physical and Mechanical and Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005)

**Abstract:** Grinding wheel vibration has big influence on optical lens manufacturing. It not only reduces the efficiency of the following polishing procedure but also results in mid-frequency error on the surface. All the work in this paper expanded on the forced vibration of grinding wheel in parallel grinding of flat surface. The interference between wheel and workpiece is studied under different processing parameters. The research results show that waveness on the workpiece surface is decided by processing parameters; once the value of them is out of the critical points, the amplitude of the waveness on the workpiece surface will be lower than that of the wheel vibration. Therefore, reasonable choice of processing parameters is helpful to the improvement of the smoothness of the grinding surface.

**Key words:** grinding (machining); grinding wheels; plastic lehses; polishing; spectrum analysis; surface topography; computer simulation; efficiency; errors; experiments; numerical methods; schematic diagrams; vibrations (mechanical); grinding wheel vibration; parallel grinding

军用及民用先进光学领域的迅猛发展, 对高端光学元件的表面质量提出了非常高的要求, 除了提升传统的低频和高频评价指标之外, 需要严格控制其波纹度等中频误差<sup>[1]</sup>。磨削加工阶段产生的元件表面规律性误差, 造成后续确定性可控抛光工序的工具驻留时间的不同, 是影响元件表面中频误差含量的主要原因<sup>[2]</sup>。

砂轮系统是磨削加工中机床内部的主要振源, 砂轮不平衡、质量偏心以及砂轮轴的不对中、原始弯曲、弹性变形、联轴器故障等情况都会引起砂轮系统周期性的强迫振动<sup>[3-4]</sup>。砂轮振动不仅会在工件表面形成振纹, 而且有可能引起砂轮与工件表面的轻微冲撞而产生表面与亚表面微裂纹, 还会造成砂轮的不均匀磨削, 从而诱发颤振<sup>[5-8]</sup>。虽然采取提高主轴刚度、砂轮动平衡等手段可以一定程度上控制振动量, 但是磨削加工方式决定了无法从根本上消除的砂轮振动。为了进一步提高加工质量, 有必要深入研究砂轮振动引起的工件表面微观形貌, 分析其对加工质量的影响。

收稿日期: 2012-06-11

基金项目: 福建省自然科学基金计划项目(2012J05098) 资助

作者简介: 毕 果(1978-), 讲师, 博士, 研究方向为精密加工设备状态监测和精密加工环境识别 guobi@xmu.edu.cn

目前, 圆弧金刚石砂轮平行磨削是精密非轴对称非球面加工的主要加工方式。加工中, 砂轮的切削方向和工件的运动方向相同, 工件磨削表面由砂轮外沿轨迹包络得到。加工过程中的砂轮振动造成砂轮与加工工件的接触线发生周期性改变, 从而使得砂轮振动不完全复印在工件表面, 这种现象称为砂轮与工件的几何干涉。砂轮与工件的干涉程度决定了砂轮振动与工件表面振纹的相似性, 而干涉现象又与各加工参数关系密切。因此, 本文以最基本的平面平行磨削为研究对象, 分析不同加工参数条件下, 砂轮与加工表面的干涉现象, 研究加工参数对工件表面波纹特征的影响, 通过仿真分析和实验研究指导实际非轴对称非球面平行磨削加工时的加工参数优化问题。

### 1 砂轮磨削振动

砂轮不平衡质量引起的砂轮周期性振动是磨削加工中最常见的振动现象。设砂轮系统的总质量、刚度和阻尼分别为  $M$ 、 $k$ 、 $c$ , 不平衡质量为  $m$ , 砂轮轴转动角频率为  $\omega_d$ , 仅考虑误差敏感方向的重力方向振动情况, 则砂轮中心位移的强迫振动方程可以表示为

$$M\ddot{y} + c\dot{y} + ky = me\omega_d^2 \sin(\omega_d t) \quad (1)$$

根据振动力学知识对式(1)求解得到砂轮中心的振动方程

$$y(t) = A \sin(\omega_d t - \phi) \quad (2)$$

式(2)中的初相位  $\phi$  和幅值  $A$  分别为

$$\phi = \arctan \frac{2\zeta r}{1 - r^2}$$

$$A = \frac{mer^2}{M \sqrt{(1 - r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} \quad (3)$$

其中:

$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{Mk}}, r = \frac{\omega_d}{\omega_n}, \omega_n = \sqrt{\frac{k}{M}} \quad (4)$$

对于精密与超精密磨削而言, 为了减小振动对加工质量的影响, 一般情况下, 砂轮轴转频远小于系统固有频率, 则  $r \ll 1$ 。因此, 砂轮轴中心振动幅值近似与砂轮转动角频率平方成正比

$$A = \frac{me}{M\omega_n^2} \cdot \omega_d^2 = C_{sys} \cdot \omega_d^2 \quad (5)$$

平面和非轴对称非球面磨削加工一般采用平行磨削方式, 砂轮的切削方向和工件的运动方向相同, 容易得到较好的加工表面。平行磨削原理示意图如图 1 所示,  $X$  轴、 $Y$  轴、 $Z$  轴分别为工件运动方向、重力方向和砂轮主轴方向。平行磨削时, 若砂轮存在

式(2)表示的振动形式, 则每条加工轨迹是一条空间波动曲线, 满足方程

$$y(x) = A \sin\left(\frac{\omega_d}{v_w} x - \phi\right) \quad (6)$$

式中:  $v_w$  为工件速度。因此, 在不考虑砂轮和工件干涉的情况下, 沿加工方向工件表面微观形貌是一条以  $A$  为振幅、以  $\frac{2\pi v_w}{\omega_d}$  为周期的空间正弦波动曲线。

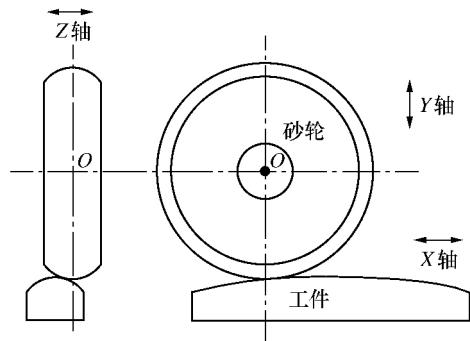


图 1 平行磨削原理

### 2 加工表面波纹度特征

砂轮振动会在工件表面产生振纹, 一般情况下这种振纹波动介于宏观几何形状误差和微观表面粗糙度之间, 称为工件表面的波纹度特征。本文以波纹度轮廓的最大高度  $A_{p-p}$  作为主要特征研究工件表面振纹。在不考虑砂轮和工件干涉的情况下, 式(6)所示的砂轮振动引起的工件空间波动峰峰值  $A_{p-p} = 2A$ 。实际上, 工件表面轮廓由加工过程中砂轮外沿轨迹包络得到, 由于砂轮和工件的干涉作用, 包络线不再等同于砂轮中心的相对振动轨迹。

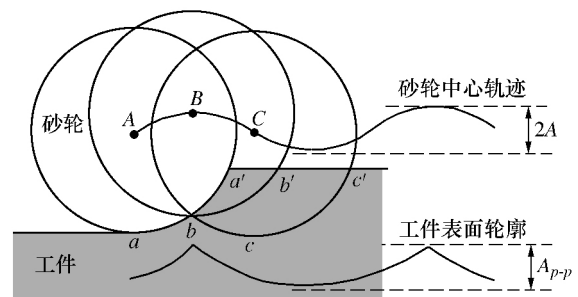


图 2 砂轮与工件的干涉

如图 2 所示, 实际加工过程中砂轮和工件具有一定的接触弧长。弧线  $\widehat{ABC}$  为砂轮振动时砂轮中心相对工件的进给路径。工件表面轮廓由砂轮外沿包络得到, 图中用  $\widehat{abc}$  表示。砂轮中心在  $A$ 、 $B$ 、 $C$  点时, 其接触弧长分别为  $aa'$ 、 $bb'$  和  $cc'$ 。显然, 砂轮振动

使得砂轮有可能与已加工表面发生干涉,在加工路径各点上,砂轮与工件的接触弧长不断发生改变,形成工件表面波纹。工件表面波动始终与砂轮振动信号周期相同,且始终保持同步,但工件表面波动 $\widehat{abc}$ 不再等同于砂轮中心的运动轨迹 $\widehat{ABC}$ 。峰谷值点一一对应,相应谷点间距恰好等于砂轮半径 $R_s$ ;相应峰点间距与干涉作用的强弱有关,数值大于或等于砂轮半径。干涉作用越强,峰点间距越大,遗留在工件表面的振纹越微弱。

首先研究,砂轮中心相对于工件的运动轨迹一定,仅砂轮半径不同造成的干涉现象。当砂轮中心的空间运动轨迹满足式(6)时,在任何情况下都有工件表面波纹峰峰值 $A_{p-p} \leq 2A$ 。砂轮半径 $R_s = 0$ 的极端情况下,包络线等同于中心轨迹线,显然砂轮中心轨迹与工件表面波纹的峰点间距等于 $R_s$ ,满足 $A_{p-p} = 2A$ 。当砂轮半径 $R_s \rightarrow \infty$ 的极端情况下,包络线近似一条直线,满足: $2A \gg A_{p-p} \rightarrow 0$ 。因此,当砂轮中心振动轨迹一定时,必然存在某一砂轮半径值 $R_{s\_limit}$ ,使得 $A_{p-p}$ 处于由 $A_{p-p} = 2A$ 到 $A_{p-p} < 2A$ 的临界处。

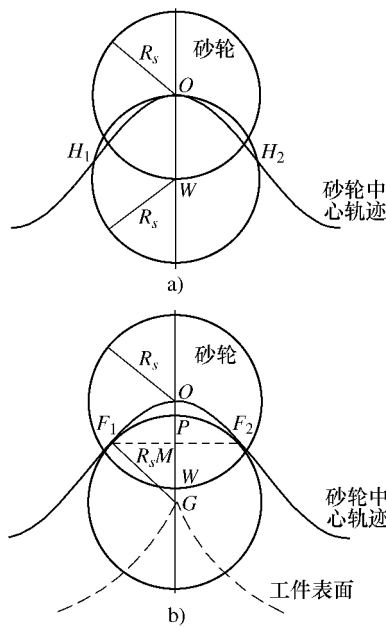


图 3 工件空间波纹顶点图解

由上述分析可知 $A_{p-p}$ 与 $2A$ 的关系取决于两条空间曲线相对峰点间距与砂轮半径的关系,分析较大砂轮半径条件下,砂轮和工件干涉作用较强的情况。如图 3a) 所示,砂轮中心位于轨迹峰点 $O$ 处,直线 $\overline{OW}$ 为砂轮振动方向,点 $W$ 位于砂轮圆周上。以 $W$ 点为圆心,以 $R_s$ 为半径做圆 $\widehat{W}$ 交轨迹与 $H_1$ 、 $H_2$ 两点。显然,以轨迹线 $\widehat{H_1OH_2}$ 段内任意一点 $J$ 为

圆心,以 $R_s$ 为半径做圆 $\widehat{J}$ ,该圆与直线 $\overline{OW}$ 的交点必然位于 $W$ 点下方,因此砂轮包络线峰点将位于点 $W$ 之下,使得两条空间曲线对应峰点间距大于砂轮半径,则 $A_{p-p} < 2A$ 。

将图 3a) 中半径为 $R_s$ 的圆 $\widehat{W}$ 向下移动,直到与砂轮中心轨迹线相切于 $F_1$ 、 $F_2$ 两点如图 3b),此时圆心位置点即为工件表面波纹空间曲线上相应的峰点。圆 $\widehat{G}$ 与线段 $\overline{OW}$ 相交于点 $P$ 。线段 $\overline{WG}$ 或 $\overline{OP}$ 长度即为因干涉造成的工件波动幅度减小量

$$2A = A_{p-p} + |\overline{WG}| = A_{p-p} + |\overline{OP}| \quad (7)$$

如果减小图 3a) 中的砂轮半径值,直到等于 $O$ 点的曲率半径,此时圆 $\widehat{W}$ 与砂轮中心轨迹线恰好相切于 $O$ 点,则轨迹线上除了 $O$ 点之外的任意一点到 $W$ 点的距离都大于砂轮半径, $W$ 点为包络线最高点 $A_{p-p} = 2A$ 。砂轮半径继续减小, $O$ 点仍然是圆 $\widehat{W}$ 与轨迹线的唯一交点,则 $W$ 点始终为包络线峰点。因此,临界砂轮半径为砂轮中心轨迹线峰点处的曲率半径值。忽略式(6)中初相位的影响,砂轮中心轨迹曲线各点的曲率半径为

$$R = \left| \frac{(1 + y'^2)^{\frac{3}{2}}}{y''} \right| = \left| \frac{\left( 1 + \left( A \frac{\omega_d}{v_w} \right)^2 \sin^2 \left( x \frac{\omega_d}{v_w} \right) \right)^{\frac{3}{2}}}{A \left( \frac{\omega_d}{v_w} \right)^2 \cos \left( x \frac{\omega_d}{v_w} \right)} \right| \quad (8)$$

峰点 $O$ 处的曲率半径为轨迹曲线上曲率半径的最小值,此时 $x = k\pi \frac{v_w}{\omega_d}$ , ( $k \in Z$ ) ,代入式(8)得到

$$R_{s\_Limit} = R_{min} = R_{x = k\pi \frac{v_w}{\omega_d}} = \frac{\left( \frac{v_w}{\omega_d} \right)^2}{A} \quad (9)$$

$R_{s\_Limit}$ 为满足 $A_{p-p} = 2A$ 的砂轮半径临界值。

当砂轮轴角频率 $\omega_d$ 和工件速度 $v_w$ 一定的条件下, $\omega_d$ 确定时,根据式(5)可知振幅 $A$ 也为定值。由砂轮不平衡引起的工件表面波纹峰峰值与砂轮半径 $R_s$ 关系为

$$\begin{cases} A_{p-p} = 2A & R_s \leq \frac{\left( \frac{v_w}{\omega_d} \right)^2}{A} \\ A_{p-p} < 2A & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

工件速度是平面磨削中另一重要加工参数,当砂轮半径 $R_s$ 和砂轮轴角频率 $\omega_d$ 一定情况下,由式(10)推导得到 $v_w$ 对 $A_{p-p}$ 的影响

$$\begin{cases} A_{p-p} = 2A & v_w \geq \omega_d \sqrt{AR_s} \\ A_{p-p} < 2A & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

此时  $v_w - \text{Limit} = \omega_d \sqrt{AR_s}$  为满足  $A_{p-p} = 2A$  的工件速度临界值。

由式 (5) 可知, 砂轮不平衡引起的砂轮中心振动幅值与砂轮轴角频率平方近似成正比, 提高砂轮转速会显著增加砂轮振动量, 影响正常加工。因此, 精密磨床附带动平衡装置, 通过砂轮在线动平衡自动控制砂轮在不同转速下的振动量。

由上述分析可知, 基本参数中工件进给速度和砂轮半径的合理选择更有利于优化工件表面振纹。较大的砂轮半径和较慢的进给速度都有利于减弱砂轮振动引起的工件表面振纹。

由式 (7) 可知, 线段  $|OP|$  的长度即为工件表面波纹度相对于砂轮中心振动幅度的减小量, 方便起见表示为  $\Delta A_{p-p}$ 。如图 3b) 所示, 由几何知识可知

$$\begin{cases} \Delta A_{p-p} = \left( A - A \cos \frac{\omega_d}{v_w} x_F \right) - \left( R_s - \sqrt{R_s^2 - x_F^2} \right) \\ R_s = \left| \frac{\left( 1 + \left( A \frac{\omega_d}{v_w} \right)^2 \sin^2 \left( x_F \frac{\omega_d}{v_w} \right) \right)^{\frac{3}{2}}}{A \left( \frac{\omega_d}{v_w} \right)^2 \cos \left( x_F \frac{\omega_d}{v_w} \right)} \right| \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $x_F$  表示图 3b) 中点  $F_1$  或  $F_2$  处的自变量值, 用反函数的形式表示  $x_F = f^{-1}(R_s)$ , 则

$$\Delta A_{p-p} = A - A \cos \frac{\omega_d}{v_w} f^{-1}(R_s) - R_s + \sqrt{R_s^2 - [f^{-1}(R_s)]^2} \quad (13)$$

$$A_{p-p} = 2A - \Delta A_{p-p} = A + A \cos \frac{\omega_d}{v_w} f^{-1}(R_s) + R_s - \sqrt{R_s^2 - [f^{-1}(R_s)]^2} \quad (14)$$

无论如何, 砂轮不平衡振动在工件表面遗留振纹的极限高度为

$$A_{\text{Limit}} = \left( \frac{v_w}{\omega_d} \right)^2 / R \quad (15)$$

### 3 仿真分析

理论分析中的式 (13)、(14) 属于超越方程, 没有解析解。因此, 仿真分析中利用数值解法求解工件表面空间波纹度特征。

式 (6) 所示的砂轮中心振动  $(x, y)$ , 其外沿包络得到工件的加工表面轮廓, 表面轮廓的参数方程可以用参数方程表示

$$\begin{cases} x_w = x - R_s \cos \theta \\ y_w = y - R_s \sin \theta \end{cases} \quad \text{且 } y_w \leq - (R_s - A + \Delta A_{p-p}) \quad (16)$$

其中:  $\Delta A_{p-p} = \begin{cases} |WG| & G \text{ 点在 } W \text{ 点之下} \\ 0 & G \text{ 点在 } W \text{ 点之上} \end{cases}$

$|WG|$  如图 3b) 所示, 表示线段长度。  $\Delta A_{p-p} \neq 0$  时  $y_w = f(x_w)$  为多值函数, 表面轮廓为单值函数, 因此式 (16) 中对取值范围进行了限制, 当  $\Delta A_{p-p}$  确定之后即可由式 (16) 的参数方程得到工件表面空间振纹。根据图 3b) 可知, 点  $G$  位置是求解  $\Delta A_{p-p}$  的关键。考虑一个周期之内砂轮振动, 则

$$y = A \cos \frac{\omega_d x}{v_w}, \quad x \in \left[ -\frac{\pi v_w}{\omega_d}, \frac{\pi v_w}{\omega_d} \right] \quad (17)$$

设  $\hat{G}$  圆圆心坐标为:  $(0, y_G)$ , 利用砂轮振动信号各点  $(x, y)$  到  $\hat{G}$  圆圆心距离的最小值与  $R_s$  的关系, 采用变步长迭代法求解得到  $G$  点纵坐标。

当砂轮振动频率和振幅以及工件速度确定时, 不同砂轮半径引起的振纹情况如图 4 所示, 图 4a) ~ 图 4c) 分别是  $R_s = R_{s\_Limit}/2$ 、 $R_{s\_Limit}$  和  $2R_{s\_Limit}$  的情况。由仿真结果可知, 当砂轮半径在式 (10) 所示的范围之内时, 砂轮半径越小, 工件振纹与砂轮振动越相似。当砂轮半径在式 (10) 所示的范围  $R_s \leq (v_w/\omega_d)^2/A$  之外时, 工件表面振纹由于空间滤波结果而小于砂轮振幅, 且砂轮半径越大, 对工件表面的平滑作用越强。

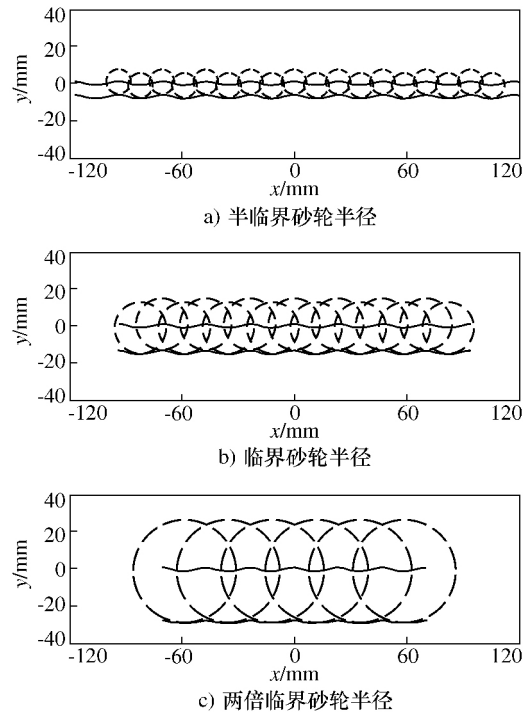


图 4 不同砂轮半径时砂轮振动引起的工件表面振纹

砂轮振动情况和砂轮半径一定时, 不同工件速度引起的振纹情况如图 5 所示, 图 5a) ~ 图 5c) 分别表示  $2v_w - \text{Limit}$ 、 $v_w - \text{Limit}$  和  $v_w - \text{Limit}/2$  的情况。通过对比可知, 当工件速度大于式 (11) 所示的临界值  $\omega_d$

$\sqrt{AR_s}$  时, 砂轮振动将完全反应在工件表面; 低于临界值时, 工件表面波纹小于砂轮振动振幅。

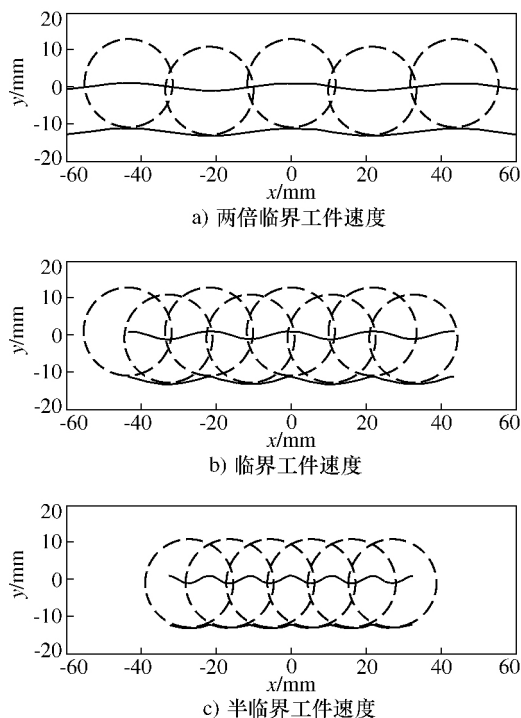


图 5 不同工件速度时砂轮振动引起的工件表面振纹

通过上述理论分析和仿真可知, 运行参数一定程度上决定了工件表面的波纹度特征。通过合理选择可以一定程度上减小振纹。砂轮和工件的干涉作用使得在工件表面遗留的振纹与砂轮本身振动形式有所不同, 如图 6a) 所示是砂轮振动和工件表面振纹空间波形, 砂轮相对于工件的空间振动形式是振幅为 0.5 mm, 周期为 14 mm 的余弦曲线, 其频谱  $f$  为  $[1/14 \text{ mm}]$  处的单一一条谱线。由于干涉作用的存在, 如图 6b) 所示。

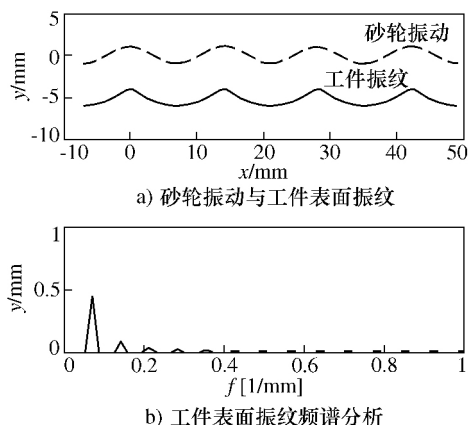


图 6 砂轮空间振动与工件振纹频谱性的对比

振纹频谱分析出现多个高倍频, 但主要特征仍为一倍频  $[1/14 \text{ mm}]$ , 反映了砂轮的振动特征。因此, 可以由工件表面形貌特征判断误差主要影响因素。

#### 4 实验研究

图 7 所示的高精度磨床为目前课题组在研的立柱移动式数控卧轴矩台平面磨床, 砂轮主轴用伺服电机经联轴器驱动, 在未使用动平衡仪对砂轮进行在线动平衡的情况下, 对工作台基准进行磨削实验, 研究磨床内部振动对工件表面形貌的影响。砂轮参数和基本加工参数如表 1 所示。由表 1 数据计算得到砂轮轴转频振动相对于工件表面的空间波动周期  $T = v_w/v_d = 18 \text{ mm}$ 。

表 1 砂轮参数与加工参数

参数名称	数值及单位
金刚石砂轮半径	400 mm
砂轮转速 $v_d$	1 000 r/min
圆弧半径	0
工件速度 $v_w$	18 m/min

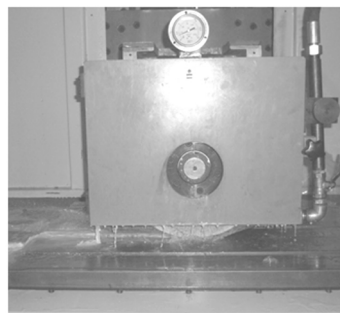


图 7 高精度平面磨床



图 8 检测装置

卸下砂轮, 在砂轮座上固定测量仪, 利用图 8 所示的 KEYENCE LK-G10 非接触激光测量仪, 以

2 mm 间距沿  $x$  轴方面进行多个磨削加工轨迹的扫描式工件表面信息采集, 加工轨迹和其频谱分析分别如图 9 和图 10 所示。任意选择一条加工轨迹进行频谱分析结果如图 11 所示, 图中可以明显识别出 4 个的谱峰, 数值分别为: 0.055 [1/mm]、0.111 [1/mm]、0.166 [1/mm] 和 0.222 [1/mm], 其空间波动周期分别为: 18 mm、9 mm、6 mm 和 4.5 mm, 分别对应砂轮轴的 1~4 倍频, 说明在加工中, 砂轮系统振动是影响加工表面质量的主要振动形式。图 10 所示的每条加工轨迹具有相似的频率特征和相当的振幅形式, 说明加工过程振源稳定。

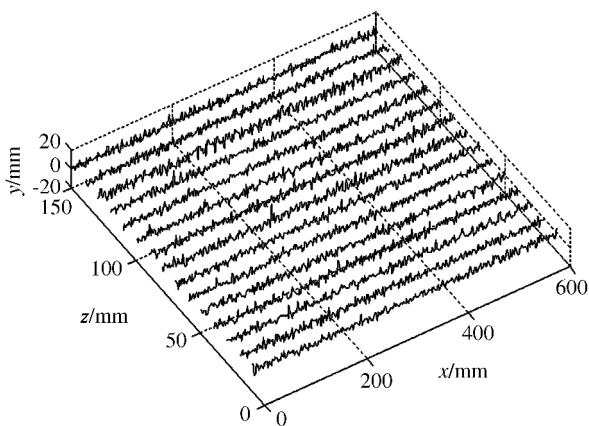


图 9 加工轨迹

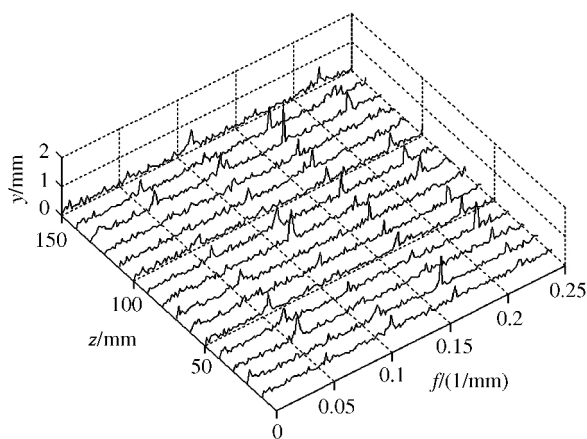


图 10 加工轨迹频谱分析

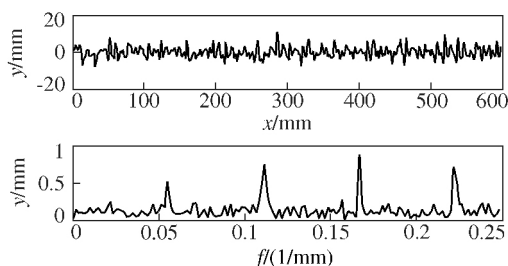


图 11 某一加工轨迹的工件表面振纹和频谱分析

## 5 结论

本文中针对平行磨削法, 分析了砂轮系统周期性强迫振动对工件表面微观形貌的影响。理论分析和实验表明通过对加工表面沿加工方向上的微观形貌特征进行频谱分析, 可以判断影响工件表面形貌特征的主要振动形式。

工件表面的波纹度特征与加工参数关系密切, 波动频率由砂轮振动频率和工件速度决定, 波动幅值受到砂轮半径和工件速度等基本加工参数的影响, 增大砂轮半径和降低工件速度都有利于改善工件表面的波纹度特征。加工参数存在临界值, 当其超越临界值时, 砂轮与工件表面的干涉作用将很大程度上削弱工件表面的波纹度特征, 砂轮振动在工件表面形成的振纹幅值将小于砂轮本身的振动幅值。

## [参考文献]

- [1] Brinksmeier E, Mutlugünes Y. Ultra-precision grinding [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2010, 59: 652~671
- [2] 周旭升, 李圣怡, 戴一帆等. 光学表面中频误差的控制方法-确定区域修正法 [J]. *光学精密工程*, 2007, (11): 1668~1673
- [3] Hassui A, Diniz A E. Correlating surface roughness and vibration on plunge cylindrical grinding of steel [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2003, 43(8): 855~862
- [4] 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, (3): 17~20
- [5] Tonshoff H K, Friemuth T, Becker J C. Process monitoring in grinding [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2002, 51(2): 551~571
- [6] Li Y, Gracewski S M, et al. Analysis of chatter in contour grinding of optical materials [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2002, 42: 1095~1103
- [7] Inasaki I, Karpuschewski T, Lee H S. Grinding chatter-origin and suppression [J]. *CIRP Annals Manufacturing Technology*, 2001, 50(2): 515~534
- [8] 吴晓君, 孙树栋, 喜田义宏. 面素法加工自由曲面的研究与实验 [J]. *机械科学与技术*, 2006, (8): 905~908