

文章编号 1004-924X(2002)05-0497-07

超精密车削下刀具相对振动的辨识

尹自强, 李圣怡

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:在金刚石超精密车削加工中,刀具与工件之间不可避免地存在一定的振动,从而影响工件表面质量。本文对在具有振动情况下工件表面的三维形貌进行了仿真,并从理论上对工件表面形貌的径向、周向与刀具螺旋轨迹方向的截面轮廓进行了分析,结果表明不同的截面具有不同的信息特征,并据此对仿真得到的工件表面三维形貌数据进行了振动辨识。

关键词:仿真;微观形貌;超精密车削;表面分析
中图分类号:TG51 文献标识码:A

1 引言

由于工件表面质量对产品的使用性能产生重要影响,因此许多学者对工件加工的表面形貌进行了研究。Shuhei Takasu^[1]分析了振动对金刚石车削表面粗糙度的影响,C F Cheung^[2]则在此基础上对超精密加工三维表面形貌进行了建模,T. Sata^[3]采用频谱分析的方法研究了车削加工过程中影响表面粗糙度形成的各种因素,Dong-Sik Kim^[4]在获得工件表面三维形貌数据的基础上对工件与刀具之间的相对振动进行了辨识,并通过实验证明该方法具有很好的可靠性。本文依据文献[1]中的理论,参考并改进了文献[2]中的建模方法,并在仿真基础上采用FFT的方法沿工件表面的径向、圆周方向、刀具进给螺旋轨迹方向对金刚石超精密车削表面形貌进行了较文献[4]更深入的分析,以确定各种截面轮廓中所含频谱分量的物理意义,从而可以指导实际加工中对振动参数进行辨识。

2 工件表面形貌的仿真

单点金刚石车削加工中,刀具通过预定的进给速度、切深和主轴转速等切削条件按照理想的螺旋轨迹运动。工件的表面形貌是金刚石刀具将其切削刃轮廓通过刀具与工件之间的相对运动复映到工件表面上而形成的。

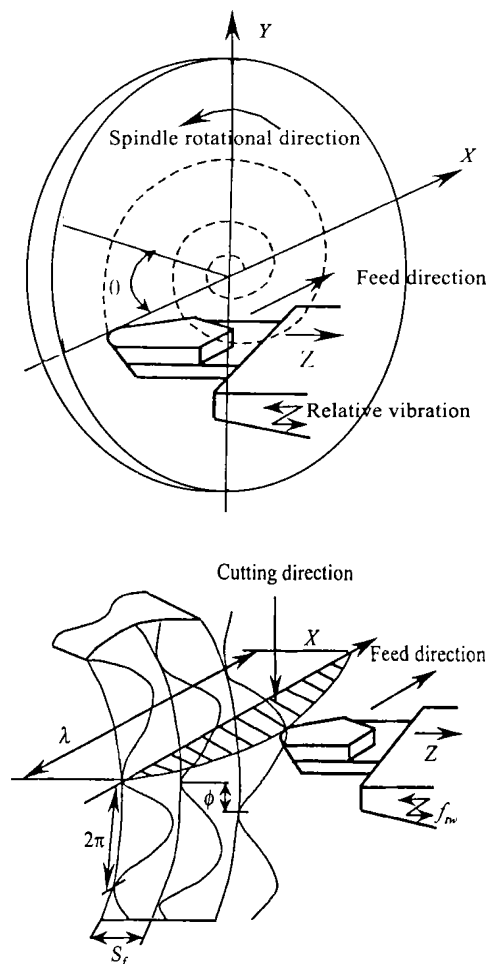


图1 刀具与工件相对振动引起的工件表面振纹
Fig. 1 Modulated surface profile induced by relative vibration.

收稿日期:2002-02-17;修订日期:2002-09-26

基金项目:国防预研基金项目(2000J18.2.2KG0130)

在超精密车削加工中,不可避免地存在振动,从而使得刀具偏离预定的路径,影响已加工表面形貌的主要因素包括切削刃的几何形状、进给速度、主轴转速及刀具与工件间的相对振动。图 1 所示为刀具与工件间存在相对振动时引起的工件表面振纹。

为方便起见,选取刀具切削刃的顶点为切削刃参考点。

刀具与工件间相对振动的频率 f_{tw} 与主轴旋转频率 f_{sp} 之比为

$$\frac{f_{tw}}{f_{sp}} = I_f + D_f, \quad (1)$$

式中, I_f 为非负整数, D_f 为小数,且 $-0.5 < D_f < 0.5$ 。

设刀具与工件间的相对振动在时域中为一简谐运动,可表示为

$$Z(t) = A_{tw}(1 - \cos(2f_{tw}t + \varphi)), \quad (2)$$

式中, A_{tw} 为刀具与工件间相对振动的振幅 (μm), t 为加工时间 (s), φ 为初始相位,不失一般性,设 $\varphi = 0$ 。

在工件表面的 r - θ 极坐标平面内,有:

$$\begin{cases} r = R_w - S_f \cdot f_{sp} \cdot t \\ \theta = 2f_{sp}t, \end{cases} \quad (3)$$

式中, R_w 为工件半径 (mm), S_f 为刀具每转的进给量 (mm/rev) 此时 $t \in [0, 2N]$, 其中, N 为主轴转数, $N = R_w/S_f$ 。

计算在 r - θ 截面上所有切削刃参考点经历的半径

$$r_k = R_w - S_f \cdot \left(k + \frac{1}{2} \right) \quad (k = 0, 1, \dots, N), \quad (4)$$

式中取 $\theta \in [0, 2\pi]$ 。

工件表面形貌是由切削刃轮廓发生剪切后的最低轮廓边所构成的,故需计算在某一截面上所有切削刃轮廓发生剪切的结果,从而得出工件该截面的轮廓。计算式如下:

$$h_k = A_{tw} \left\{ 1 - \cos \left[I_f \cdot \frac{2\pi}{L} \cdot \left(R_w - S_f \cdot \left(k + \frac{1}{2} \right) \right) + D_f \cdot \frac{2\pi}{L} \cdot \left(R_w - S_f \cdot \left(k + \frac{1}{2} \right) \right) \right] \right\} + R \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{r - r_k}{R} \right)^2} \right] \quad (k = 0, 1, \dots, N), \quad (5)$$

取最小值:

$$Z_{i,j} = \min(h_k), \quad (6)$$

这样,沿周向计算出各个截面的轮廓后,就可以作出工件表面的三维轮廓形貌图。

进行表面轮廓的 FFT 分析时,采样频率为在 1mm 内的采样数据点数,周期对应为波长 λ_n (mm),工件表面轮廓波形的频率 f_n (cycles/mm) 对应为单位时间长度内出现的波的个数。存在以

下关系式。

$$f_n = \frac{1}{\lambda_n} = \frac{L}{\lambda_n}, \quad (7)$$

当粗糙度轮廓由 $Z(x)$ 表示时(其中 x 代表位置),粗糙度曲线幅值谱的离散形式为:

$$|Z(f_n)| = \frac{1}{N_p} \sum_{k=0}^{N_p-1} z(k) \exp \left[-j \frac{2\pi}{L} k n \right], \quad (8)$$

其中 n 为整数, L 为粗糙度曲线的测量长度。 N_p 为仿真的工件轮廓位置点数。

为防止混叠,应遵循 Shannon 采样定理,使采样频率高于信号最高频率的 2 倍以上。

3 工件截面轮廓特征的理论分析

本节主要从理论上对各种截面轮廓的频谱构成进行分析,以得出各种截面的特征。

3.1 工件表面径向轮廓分析

当刀具与工件间存在相对振动时,工件截面轮廓是由进给量形成的理论表面轮廓叠加上刀具与工件间相对振动在工件表面的径向波纹而形成的,生成的工件表面空间频率则是由进给量分量频率的 m 倍加上刀具与工件间相对振动在工件径向的频率分量的 n 倍而形成的,其表达式如下:

$$f_{\text{surface}} = m \cdot v_f + n \cdot v_s, \quad (9)$$

式中, v_s : 径向振动频率, $v_s = |D_f| \cdot v_f$

$m, n = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$

采用在表 1 中仿真组号 1 的切削条件进行仿真,由式(1)有:

$$\frac{f_{tw}}{f_{sp}} = \frac{42}{2000/60} = 1 + 0.26, \quad (10)$$

此时, $I_f = 1, D_f = 0.26$ 。而

$v_f = 2000/50 = 40$, 则

$v_s = |D_f| \cdot v_f = 0.26 \times 40 = 10.4$

工件表面轮廓及频谱如图 2 所示,图中,

$f_1 = v_s = 10.4, f_2 = v_f - v_s = 29.6,$

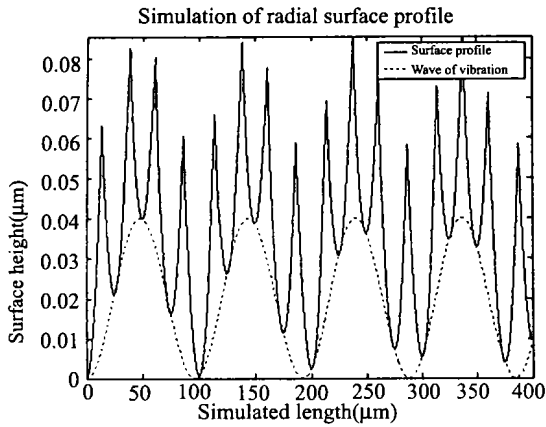
$f_3 = v_f = 40, f_4 = v_f + v_s = 50.4,$

$f_5 = 2v_f - v_s = 69.6, f_6 = 2v_f = 80,$

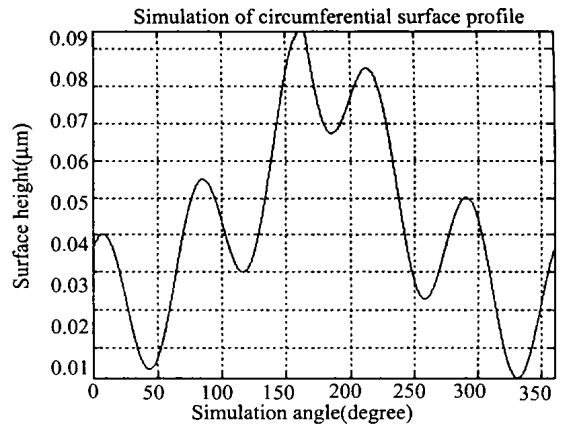
$f_7 = 2v_f + v_s = 90.4,$

$f_8 = 3v_f - v_s = 109.6, f_9 = 3v_f = 120 \dots \dots'$

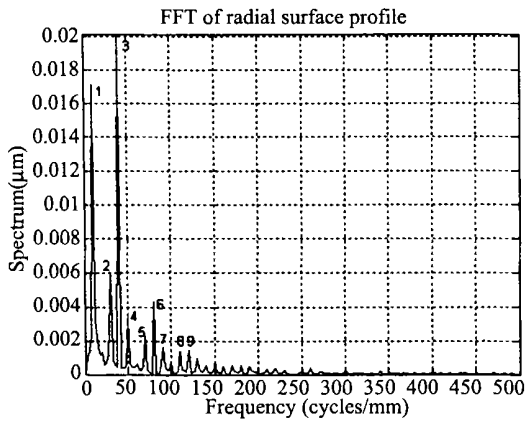
工业上常用触针式测量仪测量工件径向轮廓来判别工件表面质量,而由以上分析可知,通过识别径向振动频率谱线,只能得出式(1)中的小数部分 $|D_f|$,得不到整数部分 I_f 。



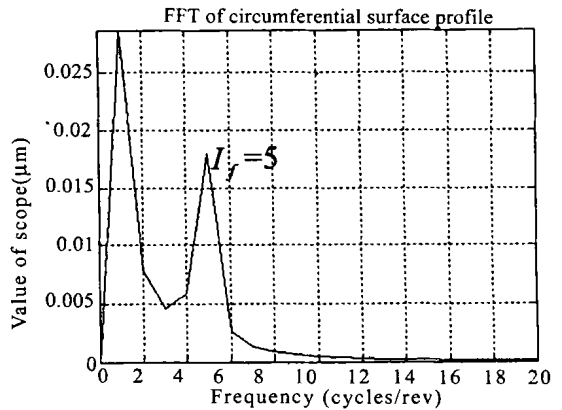
(a) 轮廓
(a) Profile



(a) 轮廓
(a) Profile



(b) 空间频谱
(b) Spatial spectrum



(b) 空间频谱
(b) Spatial spectrum

图 2 振动影响下工件表面径向轮廓及频谱 ($D_f = 0.26$)

Fig. 2 Radial surface profile and spectrum under relative vibration ($D_f = 0.26$).

图 3 振动影响下工件表面圆周截面轮廓及频谱 (半径为 0.15mm 处)

Fig. 3 Circumferential surface profile and spectrum under relative vibration (at radius 0.15mm).

3.2 工件表面周向轮廓分析

工件圆周截面上的轮廓形状与该圆周所在的半径有关,采用表 1 中仿真组号 2 的切削条件在半径为 0.15mm 处进行仿真时,得到如图 3 所示的结果,其中图 3(a)为轮廓形状图,图 3(b)为在此半径的圆周截面上做 FFT 分析的结果。由式(1)得

$$\frac{f_{tw}}{f_{sp}} = \frac{48}{600/60} = 5 - 0.2, \quad (11)$$

此时, $I_f = 5, D_f = 0.2$ 。

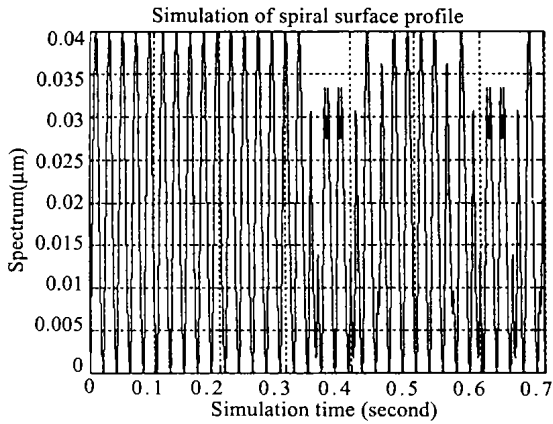
图 3(b)中有两个明显的频率分量,其中 1Cycles/ rev 为刀具进给速度分量,5Cycles/ rev 为振动通过主轴旋转频率转化的整数部分 I_f 值。

故对工件表面圆周截面轮廓的频谱进行分析时,可以判断出式(1)中的整数部分 I_f ,但得不到小数部分 $|D_f|$ 。

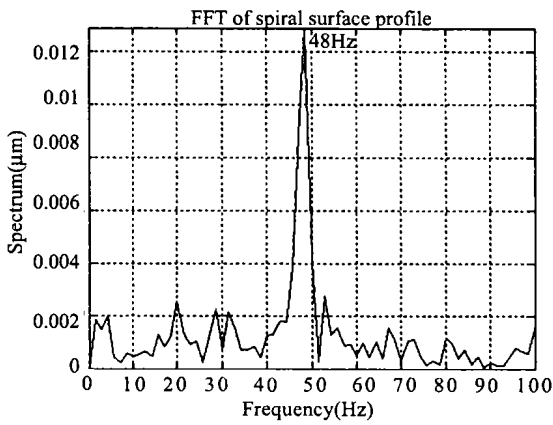
3.3 工件表面螺旋切削截面轮廓分析

沿刀具螺旋切削轨迹分析工件表面轮廓时,其轮廓形状和频谱与刀具在一个进给量 S_f 内的起始点有关。当在切削刃参考点的位置沿刀具螺旋轨迹分析时,此时的轮廓形状主要是由刀具在时域内的振动形成的,频谱图中可看到明显的振动频率谱线。图 4 为采用表 1 中仿真组号 2 切削条件的仿真结果,此时仿真数据的起始点在切削刃参考点,图中有明显的振动频率谱线 48Hz,可较好地对比刀具与工件间的振动频率 f_{tw} 进行辨识,若分析数据的起始点偏离刀具切削刃参考点时,频谱图中会出现包括振动分量在内的许多谱

线,给辨识带来困难。此时需要综合径向与周向的分析结果,初步判断振动频率后,再根据螺旋方向的分析结果进行辨识。



(a) 轮廓
(a) Profile

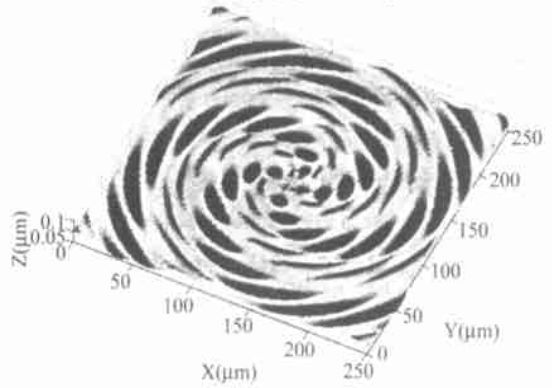


(b) 时域频谱
(b) Time spectrum

图 4 振动影响下工件表面沿刀具螺旋轨迹截面轮廓及频谱(起始点在切削刃参考点)

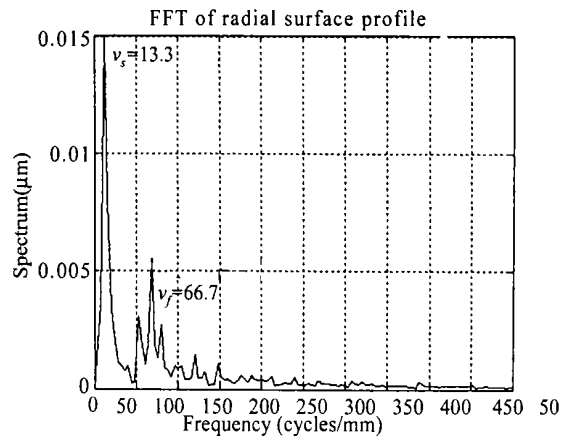
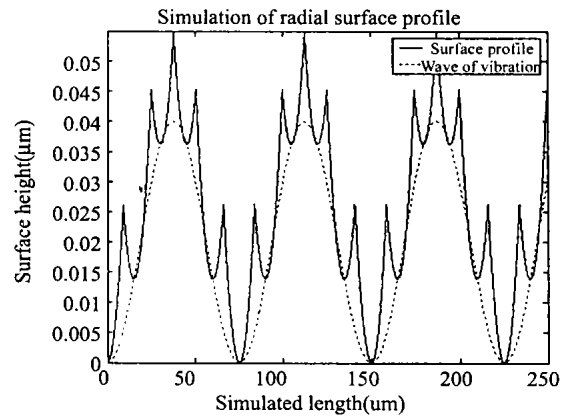
Fig. 4 Spiral surface profile and spectrum under relative vibration.

Simulated surface topography for workpiece



(a) 工件表面的三维形貌

(a) Three-dimensional surface topography of workpiece

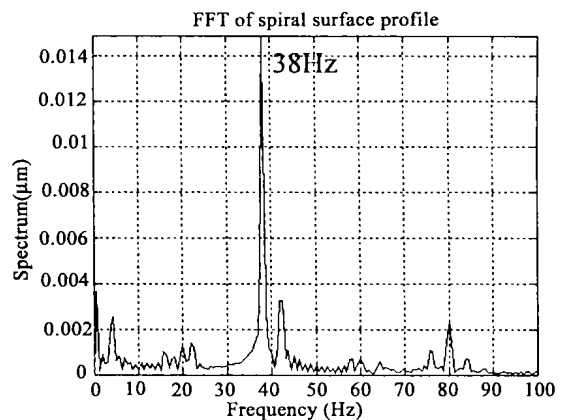
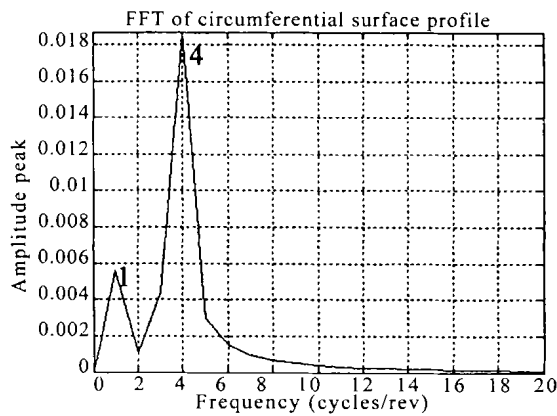
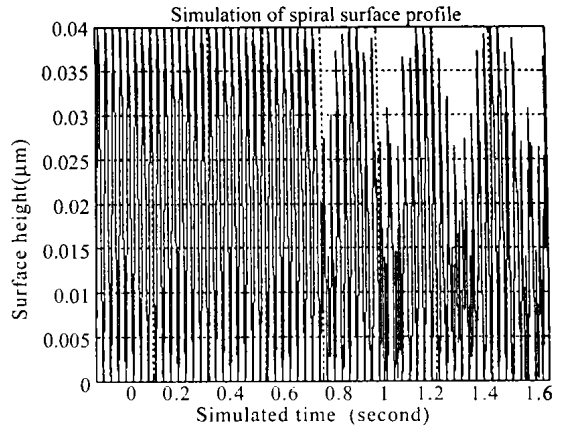
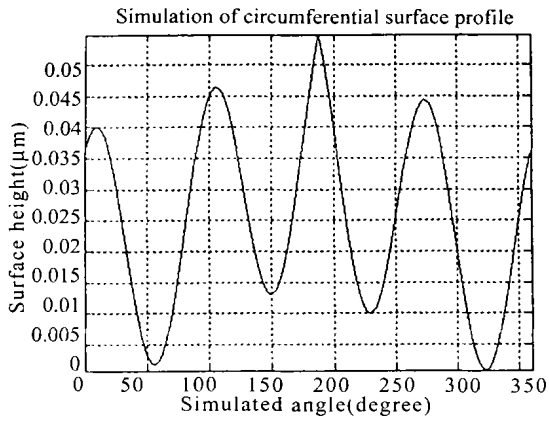


(b) 工件表面径向轮廓分析

(b) Analysis of radial surface profile

4 振动的辨识

下面给出一个完整的分析例子,仿真条件为表 1 中仿真组号 3。辨识过程为:先对工件表面形貌进行仿真,得到三维形貌数据,再对各种截面作 FFT 分析,然后根据上文的分析对刀具与工件之间的相对振动进行辨识,以识别出仿真条件中所采用的振动频率。



(c) 工件表面周向轮廓分析(半径为 0.205mm 处)
(c) Analysis of circumferential surface profile (at radius 0.205mm)

(d) 工件表面螺旋方向轮廓分析(起始点在切削刃参考点)
(d) Analysis of spiral surface profile (start point at the cutting edge reference point)

图 5 通过仿真辨识刀具与工件间的振动频率

Fig. 5 Identification of relative vibration between the tool and the workpiece by simulation.

表 1 仿真条件

Table 1 Simulation condition

仿真组号	主轴速度 (rpm)	进给速度 (mm/min)	切削深度 (μm)	刀具前角(°)	刃口半径 (mm)	振动频率 (Hz)	振动幅值 (μm)
1	2000	50	2	0	1.5	42	0.02
2	600	20	2	0	2	48	0.02
3	600	9	2	0	1.5	38	0.02

仿真的结果如图 5 所示。图 5(a) 为工件表面的三维形貌。在图 5(b) 工件表面径向轮廓的分析中,由图中的 $v_s = 13.3$ (Cycles/mm) 及 $v_f = 66.7$ 可以辨识出 $|D_f| = 0.2$ 。在图 5(c) 工

件表面周向轮廓的分析中,可以验证 $I_f = 4$ 。在图 5(d) 工件表面沿刀具螺旋进给方向轮廓的分析中,就可以比较明显地辨识出振动频率 f_{tw} 为 38Hz。(此时起始点在切削刃参考点,当偏离参考点时的情况,由于篇幅所限在此略去)

5 结 论

本文在考虑切削参数、刀具几何形状、刀具与工件间相对振动等因素的影响情况下：

(1) 结合机床运动学和切削理论建立了超精密车削加工工件端面三维表面形貌的仿真模型，该模型可以预测各种截面轮廓和三维表面形貌。采用该模型可以直观地检查表面形貌的各个特征并有助于对机床误差的分析。

(2) 采用离散傅立叶变换的方法对仿真的各种截面轮廓进行了频谱分析，结果表明，工件径向截面轮廓的频谱主要受进给量、振动频率与主轴旋转频率之比的小数部分的影响，工件圆周方向的截面轮廓的频谱主要是由振动频率与主轴旋转频率之比的整数部分构成的，当沿刀具螺旋轨迹

方向分析工件截面轮廓时，其频谱包含有振动频率的全部信息，但它受数据分析起始点对切削刃参考点距离的影响。

(3) 在对刀具与工件表面间相对振动进行辨识时，由工件表面的径向轮廓的分析可以辨识出振动频率与主轴旋转频率之比的小数部分的绝对值，但辨识不出其正负符号；由工件表面的周向轮廓的分析可以对振动频率与主轴旋转频率比的整数部分值进行辨识；而对沿刀具螺旋进给轨迹方向的工件表面轮廓进行分析时，就可以较好地辨识出刀具与工件间相对振动的频率值，但它会受分析数据起始点的影响。

参考文献：

- [1] Shuhei Takasu, Masami Masuda, Takashi Nishiguchi, Influence of Study Vibration with Small Amplitude Upon Surface Roughness in Diamond Machining[J]. *Annals of the CIRP*, 1985, 34(1):463-467.
- [2] Cheung C F, Lee W B. Modelling and Simulation of Surface Topography in Ultra-precision Diamond Turning[A]. *Proc. Inst. Mech. Eng, J. Eng. Manuf[C]*. 2000, 214:463-480.
- [3] Sata T, Li M, Takata S. Analysis of Surface Roughness Generation in Turning Operation and its Applications[J]. *Annals of the CIRP*. 1985, 34(1):473-476.
- [4] Kim D S, Chang I Ch, Kim S W. Microscopic topographical analysis of tool vibration effects on diamond turned optical surfaces[J]. *Precision Engineering*, 26(2002):168-174.

Identification of relative vibration in ultra-precision turning

YIN Zi-qiang, LI Sheng-yi

(National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In diamond ultra-precision turning, there is unavoidably, a relative vibration between the tool and the workpiece, which influences the quality of workpiece surface. This paper simulates the influence of relative vibration between the tool and the workpiece, and theoretically analyzes the profile of radial section, circumferential section and spiral section along tool motion. The results show that different section possesses different characteristics. On the basis of analytical results, the article identifies the relative vibration between the tool and the workpiece through the data of three-dimensional topography obtained from the simulating model.

Key words: simulation; microscopic topography; diamond turning; surface analysis

作者简介:尹自强(1969-),男,国防科技大学机电工程与自动化学院机电工程研究所讲师,在职博士生,获全军科技进步二等奖一项,发表论文 10 余篇,研究方向为精密工程与计算机控制;
李圣怡(1946-),男,国防科技大学机电工程与自动化学院教授,博士生导师。