

文章编号: 1001-2486(2003)01-0078-06

# 振动影响下金刚石车削表面的形貌仿真<sup>\*</sup>

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:** 超精密车削加工中, 影响工件表面形貌的主要因素有刀具的几何形状、进给速度、主轴转速、刀具与工件的相对振动等, 考虑这些因素, 对超精密加工的三维表面形貌进行建模, 并通过仿真分析刀具轮廓在工件径向截面内可能发生的剪切现象。验证结果表明, 用该模型仿真超精密端面车削的工件表面能得到较好的效果。利用该模型可以模拟刀具切削运动的轨迹、预测工件表面三维微观形貌及二维截面轮廓形状等表面特征, 并可将其作为实际切削加工中切削参数优化的理论指导。

**关键词:** 仿真; 表面形貌; 金刚石车削; 振动

**中图分类号:** TH161; TP391.9 **文献标识码:** A

## Simulation of the Surface Topography in Diamond Turning under the Effect of Vibration

YIN Zi-qiang, LI Sheng-yi

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** In ultra-precision machining, the major factors influencing the surface topography of workpieces include many parameters of cutting process such as the tool geometry, feed rate, the speed of spindle and relative vibration between the tool and the workpiece. A surface topography simulation model of ultra-precision machining is established considering these factors. Trimming phenomenon of the tool edge profile is also analyzed at the radial section of the workpiece by the simulation program. It is experimentally shown that good effect is obtained by using the model to simulate the surface topography of ultra-precision face turning. The model can also be used for simulating the traces of tool motion, predicting the three-dimension microscopic surface topography and two-dimension section profile, and optimizing the cutting parameter for diamond turning process.

**Key words:** simulation; surface topography; diamond turning; vibration

在超精密镜面车削中, 工件表面质量的好坏直接影响到产品的使用性能, 因此有必要在加工前对工件表面的形貌进行仿真, 以预测或确定工件表面的质量。影响工件表面质量的因素主要包括切削过程的各种参数, 如切削刃的形状、进给量、主轴转速以及刀具与工件之间的相对振动等。国内外许多学者采用多种不同的方法对如何提高表面加工质量进行了大量的研究, 这些方法包括有限元法、回归分析法<sup>[4]</sup>、分子动力学模拟<sup>[5]</sup>等。香港理工大学的李荣彬教授和张志辉博士等运用机床运动学和切削理论对单点金刚石端面车削的工件三维表面形貌进行了建模<sup>[2,3]</sup>, 该方法能较好地预测工件表面三维形貌, 本文将在这基础上试图改进与完善建模过程, 并对工件表面形貌进行仿真和分析, 以便和同行们商榷、探讨。

## 1 工件表面形貌仿真的方法

笔者参考了文献[2, 3]中的建模原理并改进了其仿真算法, 为对比, 先对仿真过程描述如下:

在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。工件的表面形貌是由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

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2002-09-15

基金项目: 国家部委基金项目资助(2000J18.2.2KG0130)

作者简介: 尹自强(1969—), 男, 讲师, 在职博士生。

成的。理论表面粗糙度为:

$$R_t = R_{dt} - \sqrt{R_{dt}^2 - S_f^2/4} \quad (1)$$

式中  $R_{dt}$  为刃口半径,  $S_f$  为刀具每转进给量。

图 1 所示为在理想情况下, 采用圆弧刃刀具加工时, 工件表面的截面轮廓。

在车削过程中, 存在许多干扰, 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等。

Shuhei Takasu 等<sup>[1]</sup>认为, 在低频振动时, 由于表面粗糙度在进给方向上比在主切削方向上具有更短的波长和更大的峰谷值, 从而刀具进给方向上的表面粗糙度要比主切削方向上明显(如图 2 所示)。

仿真金刚石端面车削三维表面形貌时, 刀具在垂直于理想主轴轴心线的平面内相对于工件做螺旋式的运动, 同时垂直于该平面做单频小幅值振动。忽略切削刃粗糙度及被加工材料等的影响。取仿真面积为矩形区域, 形貌数据是均匀分布于该区域内各点的轮廓高度值。

为方便, 选取刀具切削刃的顶点为切削刃参考点

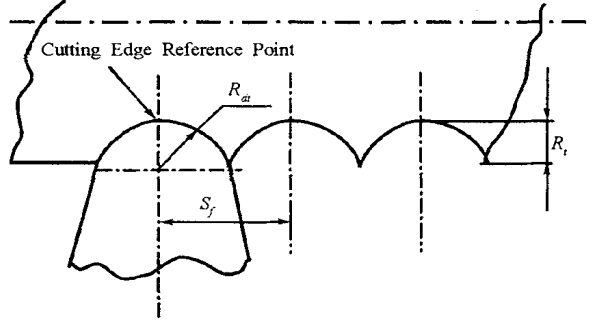


图 1 理想情况下工件表面的截面轮廓

Fig. 1 Ideal surface profile of workpieces

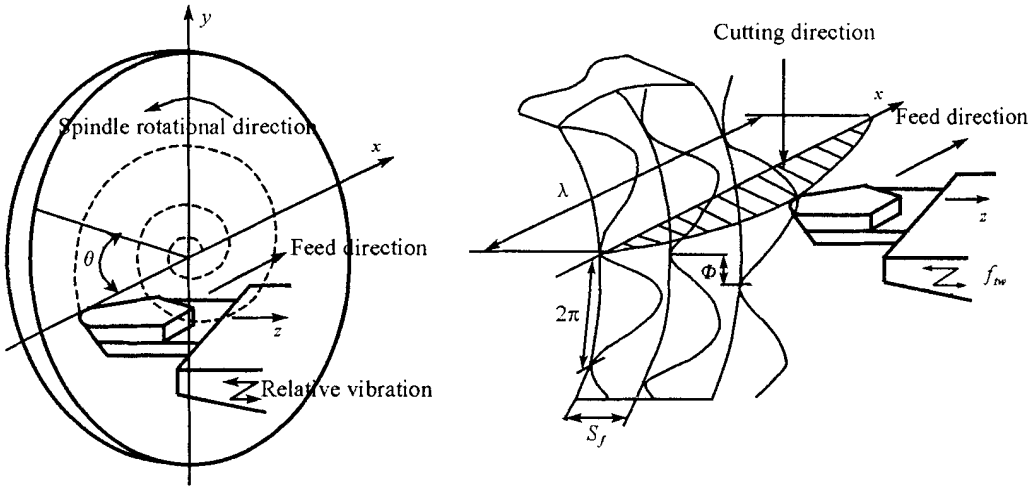


图 2 刀具与工件相对振动引起的工件表面振纹

Fig. 2 Modulated surface profile induced by relative vibration

点, 如图 1 所示。

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

$$\frac{f_{tw}}{f_{sp}} = I_f + D_f \quad (2)$$

式中,  $I_f$  为非负整数,  $D_f$  为小数, 且  $-0.5 < D_f \leq 0.5$ 。则振动在工件相邻转数之间产生振纹的相位偏移  $\Phi$  可定义为

$$\Phi = 2\pi D_f \quad (3)$$

刀具与工件间相对振动在工件表面沿刀具进给方向上形成的振纹的波长  $\lambda$  可表示为  $\Phi$  与刀具每转的进给量  $S_f$  (mm/r) 的函数:

$$\lambda = \frac{2\pi}{|\Phi|} S_f = \frac{S_f}{|D_f|} \quad (4)$$

假设刀具与工件间的相对振动在时域中为一单频简谐运动,可表示为

$$z(t) = A_{tw}(1 - \cos(2\pi f_{tw}t + \varphi)) \quad (5)$$

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

在工件表面的  $r-\theta$  极坐标平面内,有:

$$\begin{cases} r = R_w - S_f \cdot f_{sp} \cdot t \\ \theta = 2\pi f_{sp} t \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $R_w$  为工件半径,此时取  $\theta \in [0, 2N\pi]$ , 其中,  $N$  为主轴转数,  $N = R_w/S_f$ 。

其在  $x-y$  平面上对应的坐标为

$$\begin{cases} x = r \cos(\pi - \theta) \\ y = r \sin(\pi - \theta) \end{cases} \quad (7)$$

式(5)、(6)和式(7)描述了切削过程中刀具三维运动的轨迹。

设仿真区域的长度和宽度分别为  $L_x$ 、 $L_y$ , 分辨率分别为  $m_x$ 、 $m_y$ , 如图3所示。仿真区域的中心为工件圆心,则第  $(i, j)$  点的坐标为

$$\begin{cases} X_{i,j} = i \cdot m_x - L_x/2 \\ Y_{i,j} = j \cdot m_y - L_y/2 \end{cases} \quad (8)$$

对应到极坐标平面为

$$\begin{cases} r = \sqrt{X_{i,j}^2 + Y_{i,j}^2} \\ \theta = \pi - \arctan(Y_{i,j}/X_{i,j}) \end{cases} \quad (9)$$

式中取  $\theta \in [0, 2\pi]$ 。

计算在每个  $\theta$  径向截面上所有切削刃参考点经历的半径

$$r_k = R_w - S_f \cdot \left[ k + \frac{\theta}{2\pi} \right] \quad (10)$$

$k = 0, 1, 2, \dots, N$

工件表面形貌是由切削刃轮廓发生剪切后的最低轮廓

所构成的,所以工件在  $\theta$  径向截面的表面轮廓可通过剪切掉高于交点的线段构造而成。而在该截面上所有切削刃参考点经历半径上的切削刃轮廓,都在一定的范围内可能对该点  $(i, j)$  产生影响,故需计算所有可能的切削刃参考点经历半径上的切削刃轮廓在该点产生的轮廓高度值,然后再进行比较,取最小值(下文中将对对此进行仿真,而文献[2、3]仅考虑了相邻刀具轮廓发生剪切这种特例),同时再与切削深度  $a_p$  进行比较,如果该点的最小轮廓高度值小于切削深度,则取计算值,否则取切削深度值(注:在超精密加工时一般为低频小幅值振动,故最小轮廓高度值小于切削深度)。计算式如下:

$$h_k = A_{tw} \left\{ 1 - \cos [I_f \cdot \theta + D_f \cdot (2k\pi + \theta)] \right\} + R \left[ 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{r - r_k}{R} \right)^2} \right] \quad (11)$$

式中  $\theta \in [0, 2\pi]$ , 取最小值:

$$Z_{i,j} = \min(h_k) \quad (12)$$

这样,根据式(8)~(12)即可计算出  $x-y$  平面上每个网格点的轮廓线高度,从而作出仿真区域内的三维轮廓形貌图。

另外,文献[2]、[3]将工件表面划分为网格面元,再将极平面上得到的数据映射到这些面元上,文中将这些网格节点按照相邻节点的数目不同,分成三种不同类型,具体如何映射尚未见详细说明,映射后的值与该点真实值会有多少差异也未见定性或定量分析,如上所述,本文对网格计算方法进行了改进,采用直接计算轮廓高度值的方法,计算简单,结果精确。图4所示为本文中所采用的仿真方法流程图

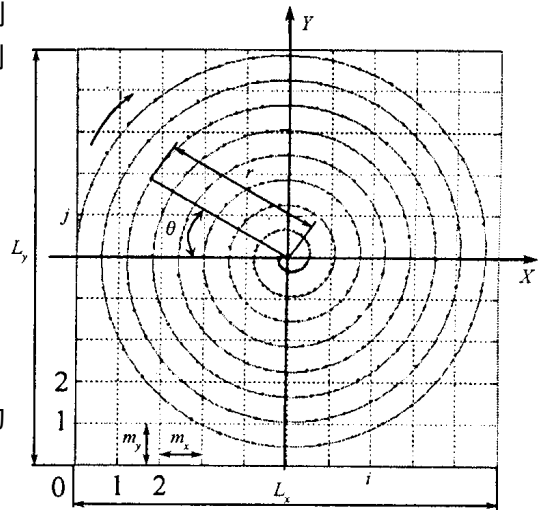


图3 刀具轨迹的坐标转换

Fig. 3 Coordinate transform of tool loci

图。

## 2 考虑刀具干涉情况下的径向截面轮廓仿真

如上所述, 在某个确定的径向截面内切削刃轮廓的剪切可能存在于相邻或非相邻的切削刃轮廓之

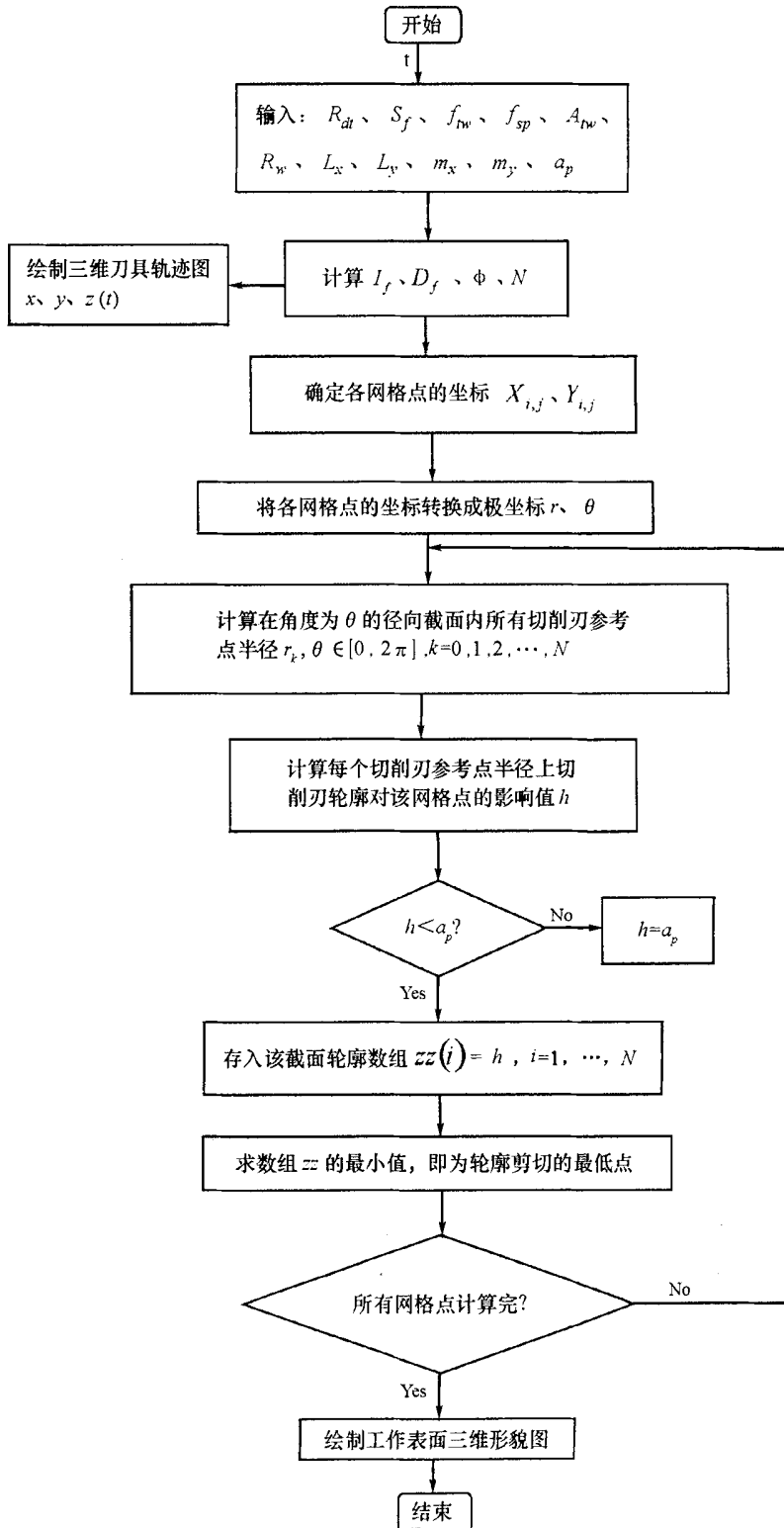


图 4 工件表面形貌仿真程序流程图

Fig. 4 The flow chart of surface topography simulation model

间,从而形成工件表面径向截面轮廓,同时,在一定条件下,还会出现刀具干涉(the interference of tool)现象,下文采用以上的仿真程序分别对这两种情况进行了研究,并同时考虑了刀具干涉现象。

Shuhei Takasu 等<sup>[1]</sup>认为评价圆弧切削刀具发生干涉的条件为当振动在工件径向截面内形成的振纹峰值被切削掉时,即

$$A_{tw} \left\{ 1 - \cos [I_f \cdot \theta + D_f \cdot (2k\pi + \theta)] \right\} + R \left[ 1 - \sqrt{1 - \left[ \frac{\pi}{\Phi} \frac{S_f - r_k}{R} \right]^2} \right] \leq 2A_{tw} \quad (13)$$

为了说明刀具的干涉现象,采用表 1 中仿真组号 1 和 2 的切削条件分别进行仿真(其中仿真组号 1 参考了文献[2, 3]中的实验数据),得到如图 5、6 所示的仿真结果。在图 5 中可以看到,只是相邻切削刃的轮廓发生剪切,故文献[2, 3]在这种特定的条件下仿真得到的工件表面三维形貌与实验测得的结果能相吻合。此时工件的径向表面轮廓是由叠加在刀具径向振动波纹上的切削刃轮廓剪切而形成的,没有发生刀具干涉现象,仿真的粗糙度峰谷值  $R_t$  为 91.4nm,有:

$$R_t > 2A_{tw} = 2 \times 15(\text{nm}) \quad (14)$$

上式说明在没有发生刀具干涉的情况下,工件表面粗糙度值要大于刀具相对振动的峰谷值。

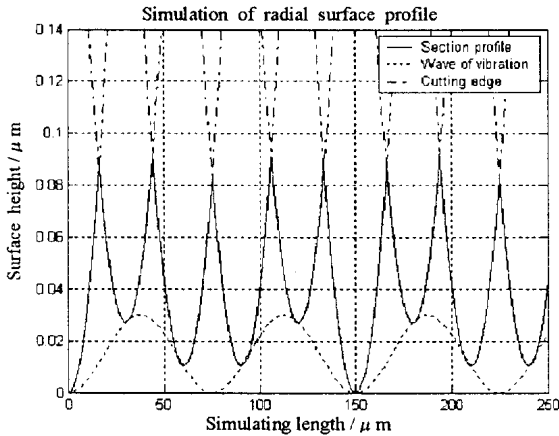


图 5 表 1 切削条件 1 的仿真结果

Fig. 5 Simulating result of Table 1 group number 1

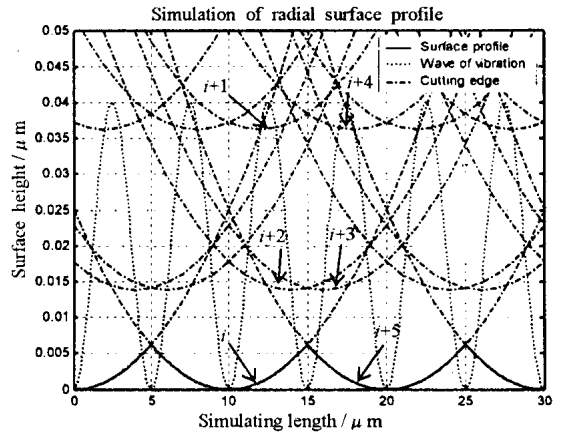


图 6 表 1 切削条件 2 的仿真结果

Fig. 6 Simulating result of Table 1 group number 2

在图 6 中可以看到,第  $i+1, i+2, i+3, i+4$  个切削刃轮廓已被第  $i+5$  个切削刃轮廓完全切掉,它们不影响工件表面的轮廓形成,工件的理论表面轮廓应是第  $i$  个切削刃轮廓与第  $i+5$  个切削刃轮廓剪切所形成的。此时工件表面由振动引起的振纹的一部分已经被刀具切削掉,发生了刀具干涉现象。可以看出,此时工件表面的波度并非完全由刀具与工件间相对振动所形成,这与文献[2]中所述亦有出入。仿真得到的粗糙度峰谷值  $R_t$  为 6.3nm,有:

$$R_t \ll 2A_{tw} = 2 \times 20(\text{nm}) \quad (15)$$

上式说明在发生刀具干涉的情况下,工件表面粗糙度值要小于刀具相对振动的峰谷值,从而减弱了刀具与工件间相对振动对工件表面轮廓的影响。

通过仿真及进一步的分析可以知道,在刀具与工件间具有相对振动的情况下进行超精密车削时,一定条件下会出现刀具干涉现象,刀具的干涉与切削参数,包括切削刃圆弧半径、刀具每转进给量,以及振动的频率和幅值有关。工件径向截面轮廓可能由相邻刀具的轮廓剪切而形成,也可能由非相邻刀具轮廓剪切而形成,在进行工件表面形貌仿真时应充分考虑这些因素。

### 3 仿真模型的验证

为了验证所建仿真模型的正确性,笔者采用文献[2, 3]中的实验参数(即表 1 中的仿真组号 1 参数)进行仿真,再与实际测得的工件三维表面形貌进行比较。仿真的结果如图 7、8 所示。图 7 为刀具相对

工件的三维运动轨迹,图8为仿真的工件表面三维形貌,与文献[2]中测量所得到的表面形貌相比较可以看出,预测的表面形貌与实际的工作表面形貌比较吻合。由仿真模型预测出的表面粗糙度  $R_t$  值为 91.4nm,其测量值为 94.4nm,也非常接近,从而在一定程度上验证了所建模型的正确性。

表 1 仿真条件

Tab. 1 Simulating conditions

仿真组号	仿真范围 (mm)	主轴速度 (r/min)	进给速度 (mm/min)	切削深度 ( $\mu\text{m}$ )	刀具前角 ( $^\circ$ )	刀具圆弧 半径(mm)	振动频率 (Hz)	振动幅值 ( $\mu\text{m}$ )
1	f0.5	500	15	2	0	1.554	45	0.015
2	f0.5	500	1	2	0	2	45	0.02

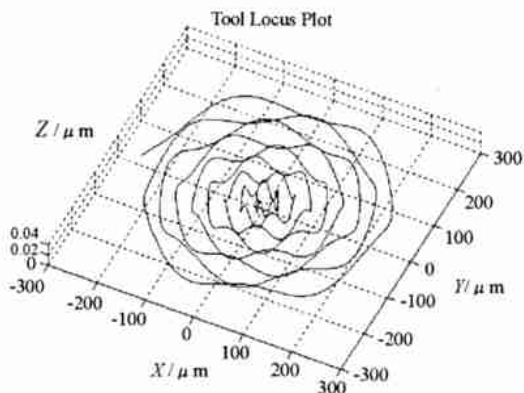


图 7 三维刀具轨迹图

Fig. 7 Three dimensional plot of the tool locus

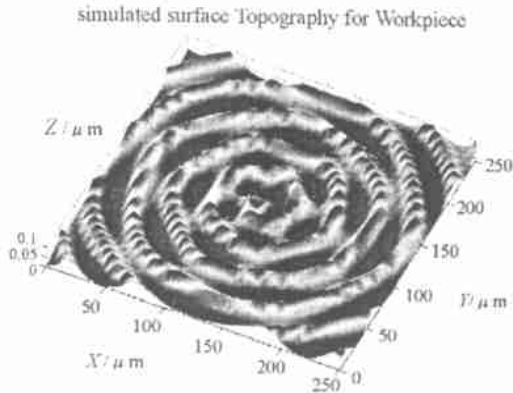


图 8 仿真表面形貌

Fig. 8 Simulating surface topography of the workpiece

## 4 结论

(1) 在考虑影响超精密车削加工工件表面形貌的几个主要因素(包括刀具的几何形状、进给速度、切削深度、刀具与工件的相对振动等)的条件下,参考文献[2,3]建立并改进了超精密加工的三维表面形貌的仿真模型。通过采用该文献的数据进行检验,由该模型仿真得到的三维工件表面形貌与实际测得的结果能够较好地吻合,该模型可用来模拟刀具切削运动的轨迹、预测工件表面三维微观形貌及工件截面轮廓形状等表面特征。

(2) 刀具轮廓的剪切现象在相邻切削刃轮廓及非相邻切削刃轮廓间均可能发生,仿真工件表面三维形貌时要充分考虑这些可能性。

(3) 在发生刀具干涉的情况下,工件表面粗糙度比振动幅值小;未发生刀具干涉时,工件表面粗糙度比振动幅值要大。故在一定的振动条件下,可以通过选择适当的切削参数以降低表面粗糙度。

## 参考文献:

- [1] Takasu S, Masuda M, Nishiguchi T. 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 [J]. Proc. Inst. Mech. Eng., J. Eng. Manuf. 2000, 214, Part B: 463-480.
- [3] 李荣彬, 张志辉, 李建广. 超精密加工的三维表面形貌预测[J]. 中国机械工程, 2000, 11(8).
- [4] Abouelatta O B, M1dl J. Surface Roughness Prediction Based on Cutting Parameters and Tool Vibrations in Turning Operations [J]. Journal of Materials Processing Technology 2001, 118(1-3): 269-277.
- [5] 罗熙淳. 基于分子动力学的纳米加工表面形成机理研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2002.