

超精密非球面磨削实验系统建模及实验*

杨小帆^{1,2}, 郭隐彪², 林飞龙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: 超精密磨削加工已广泛应用于轴对称非球面光学元件及硬脆材料的加工中, 加工过程中砂轮的不平衡量和机床主轴引起的砂轮微小振动和摆动将直接影响工件表面质量。本文分析了加工过程中产生的微振动现象, 建立磨削中振动引起工件表面轮廓误差的数学模型; 设计一套微振动实验系统, 建立系统动力学模型并进行实验研究。实验结果表明: 优化选择砂轮转速、工件转速和加工进给速度, 可有效减小砂轮振动, 提高工件表面精度。

关键词: 非球面加工; 微振动; 建模; 实验

中图分类号: TG58 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3881(2005)10-017-4

Modeling and Experimentation of Ultra-precision Grinding of A spherical System

YANG Xiao-fan^{1,2}, GUO Yin-biao², LIN Fei-long²

(1. Mechanical Engineering College, Jimei Univ., Xiamen 361021, China;

2. Dept of Mechanical and Electrical Engineering, Xiamen Univ., Xiamen 361005, China)

Abstract: Ultra-precision grinding is widely used in process on axis-symmetrical aspherical elements and hard-brittle material, the micro vibration and swing evoked by imbalance of the grinding wheel and principal axis of the machine tools affect the surface quality of the elements directly. Micro vibration phenomena appeared in the processing was analyzed, a mathematic model about the error of elements' surface figure evoked by vibration was built, a experiment system of micro vibration was designed and a dynamics model of the system was built. The result of experiment shows that choosing a reasonable grinding parameter can effectively reduce vibration of the grinding wheel and improve the precision of elements' surface.

Keywords: A spherical process; Micro vibration; Modeling; Experimentation

0 引言

非球面光学零件因其具有优良的光学性能, 在机载设备、卫星、惯性导航激光制导系统、红外探测系统等国防科技工业领域, 以及民用光电产品方面都有着重要而广泛的应用, 因而对高精度、高质量非球面零件的需求与日俱增。当前, 非球面零件的制造面临着制造难度大、成本高、加工效率低等难题。随着机械制造业的飞速发展, 一种新的加工非球面光学零件的方法——超精密磨削技术, 因可克服传统加工法的低效率、高成本等缺点而越来越受到人们的关注。但超精密磨削加工是一个多种因素综合作用的过程, 在加工过程中容易产生振动, 从而在工件表面形成振动波纹和形状误差, 并加剧了砂轮的磨损^[1-3]。本文分析了超精密磨削加工中砂轮微小振动对工件表面质量的影响, 设计相关的实验系统并建立系统的动力学模型, 为分析砂轮振动、加工参数与工件表面质量之间的关系奠定了实验基础^[4-6]。

1 微振动对加工精度的影响

1.1 砂轮微小振动的影响

在超精密磨削加工中, 砂轮的不平衡量会引起主轴系统振动, 影响磨削效率、磨削质量, 使加工表面产生波纹度, 影响非球面零件的表面粗糙度。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。图 1 所示为砂轮振动条件下非球面零件表面轮廓形成的原理简图。

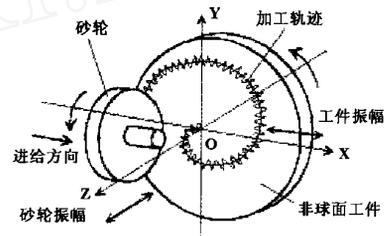


图 1 非球面磨削加工的表面轮廓形成

由图 1, 在振动条件下非球面零件表面轮廓可表示为

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

式中: R 为工件半径, v_c 为砂轮进给速度, f_w 为工件主轴的旋转频率, f_d 为砂轮的振动频率 (大小等于砂轮的转动频率), A 为砂轮振动振幅, ϕ 为相位角。

1.2 工件主轴振动的影响

由于工件的更换和安装产生了工件回转中心与主轴回转中心的同轴度误差, 出现径向误差, 引起工件主轴径向周期性振动, 并且由于工件周期性振动的影响也使得工件与砂轮的相对位移发生变化而出现不连续磨削或不均匀磨削, 造成了磨削力的周期性变化, 因而也产生了振动。

综合考虑砂轮的轴向振动和工件主轴的径向振

* 基金项目: 国家“863”高科技资助项目 (8638042416)

动, 工件的表面轮廓可表示为:

$$\begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \\ z(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [R - v_c \cdot t + A_r \cos(2 f_r t + \alpha)] \cos(2 f_w t + \beta) \\ [R - v_c \cdot t + A_r \cos(2 f_r t + \alpha)] \sin(2 f_w t + \beta) \\ A_s \sin(2 f_d t - \gamma) + \tan \delta \cdot A_r \cos(2 f_r t + \alpha) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: A_r 为工件主轴振动的幅值, f_r 为工件主轴振动的频率, α 为加工相位角, β 为砂轮与工件径向所成的角度。

2 微振动实验系统设计

为进一步研究砂轮振动及工件主轴振动对工件表面质量的影响以及在不同加工参数下砂轮和主轴的振动状况, 设计了一套超精密非球面磨削微振动实验系统。由于精密磨床上砂轮主轴系统刚度大, 且在高速回转, 不易激振。为了便于实验, 可在数控车床刀架上装上宽刃车刀使其进行径向、横向的微小振动以及微摆动, 模拟精密磨床上砂轮产生 X 轴、Z 轴的微振动和 B 轴的微摆动, 在微振动条件下切削非球面工件, 同样可达到实验目的。

微驱动刀架是整个实验系统的关键, 它要在保证加工精度的前提下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 2 所示, 该结构由五个部分组成: 产生激振力部分、模拟 Z 轴方向振动部分、模拟 X 轴方向振动部分、模拟 B 轴方向摆动部分及与数控车床

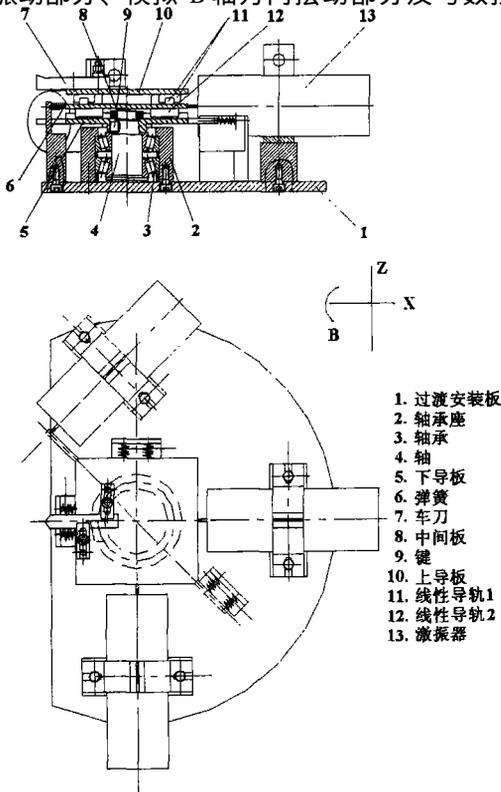


图 2 微驱动刀架结构简图

回转刀架联接部分。

实验的激振系统由谐波信号发生器、驱动电源和激振器组成, 通过三个激振器按图示方向激振不同的刀架导板, 可带动车刀模拟三轴的微振动。在刀刃附近装上测振传感器将采集到的振动信号经过放大、滤波、A/D 转换后输入计算机进行数据处理。

3 微振动系统动力学模型

由于磨削加工中最主要的周期强迫振动源是由砂轮和主轴回转不平衡造成的, 本文认为这是简谐强迫振动。对于所设计的微驱动刀架, 若刀刃同时模拟 Z 轴、X 轴方向的微振动以及 B 轴方向的微摆动, 则实验所采集到的振动波形将较为复杂, 不便分析。为了解决这一问题, 可将车刀模拟各向振动的实验分开进行, 分别采集数据, 处理振动信号波形, 再将三向振动信号的实验结果进行叠加, 同样可以得到预期的实验结果。

3.1 刀刃 Z 轴微振动力学模型

当微驱动刀架的上导板在激振器与弹簧的共同作用下与中间导板间产生相对微振动, 而中间导板和下导板都固定不动时, 可单独实现车刀横向的微振动, 模拟实际磨削过程中砂轮在 Z 轴方向的微小振动。该运动系统为典型的谐波激励下单自由度线性系统的强迫振动, 可简化为图 3 所示的力学模型。

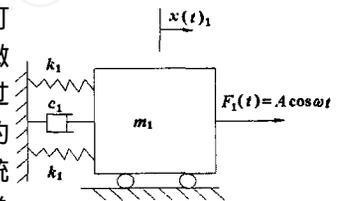


图 3 刀刃 Z 轴方向微振动的力学模型

假设上导板所带动的运动部件 (包括上导板和以上的车刀及夹紧装置、上导板下连接的滑块) 总质量和为 m_1 , 阻尼参数为 c_1 , 弹簧刚度为 k_1 , 作用于其上的简谐激振力为 $A \cos t$ 。根据牛顿第二定律建立系统振动的微分方程式为:

$$m_1 \ddot{x}_1(t) + c_1 \dot{x}_1(t) + 2k_1 x_1(t) = F_1(t) = A \cos t = 2k_1 f_1(t) = 2k_1 A_1 \cos t \quad (3)$$

式中: $F_1(t)$ 为简谐激振力, A 为简谐激振力的力幅, $A_1 = A / (2k_1)$, 是与简谐激振力的力幅 A 相等的恒力作用在系统上所引起的静位移。

$$\text{令: } n_1 = \sqrt{\frac{2k_1}{m_1}}, \quad \zeta_1 = \frac{c_1}{2m_1 n_1} = \frac{c_1}{2\sqrt{2m_1 k_1}}$$

代入方程式 (3) 中, 得:

$$\ddot{x}_1(t) + 2\zeta_1 n_1 \dot{x}_1(t) + n_1^2 x_1(t) = n_1^2 A_1 \cos t$$

该系统位移响应可用复向量形式表示:

$$x_1(t) = X_1 \cos t = X_1 e^{it}$$

$$\text{令 } H_1(\omega) = \frac{X_1}{A_1} = \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{n_1}\right)^2 + 2i\zeta_1 \frac{\omega}{n_1}}$$

用复指数的形式表示:

$$H_1(\omega) = |H_1(\omega)| e^{-i\phi_1(\omega)}$$

式中:

$$|H_1(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{[1 - (\omega/\omega_{n1})^2]^2 + (2\zeta_1/\omega_{n1})^2}}$$

$$\phi_1(\omega) = \arctan \frac{2\zeta_1/\omega_{n1}}{1 - (\omega/\omega_{n1})^2}$$

由此可得, 刀刃在 Z 轴方向谐波响应的微位移为:

$$x_1(t) = |H_1(\omega)| e^{-i\phi_1(\omega)} A_1 e^{i\omega t} = |H_1(\omega)| A_1 e^{i(\omega t - \phi_1(\omega))} \quad (4)$$

该方向的位移误差为:

$$x_1(t) = |H_1(\omega)| A_1 e^{i(\omega t - \phi_1(\omega) + \pi/2)} \times t \quad (5)$$

3.2 刀刃 X 轴微振动力学模型

当微驱动刀架的中间导板在激励器与弹簧的共同作用下与下导板间产生相对微振动, 而上导板与中间导板间、下导板与过渡安装板间都用螺钉连接固定不动时, 可单独实现车刀径向的微振动, 模拟实际磨削时砂轮在 X 轴方向的微小振动。X 轴力学模型与 Z 轴类似, 不做具体分析。同理可得刀刃在 X 轴方向谐波响应的微位移为:

$$x_2(t) = |H_2(\omega)| e^{-i\phi_2(\omega)} B_1 e^{i\omega t} = |H_2(\omega)| B_1 e^{i(\omega t - \phi_2(\omega))} \quad (6)$$

该方向的位移误差为:

$$x_2(t) = |H_2(\omega)| B_1 e^{i(\omega t - \phi_2(\omega) + \pi/2)} \times t \quad (7)$$

3.3 刀刃 B 轴微振动力学模型

当微驱动刀架的下导板在激励器和弹簧的共同作用下与过渡安装板间产生相对微摆动, 而上导板与中间导板间、中间导板与下导板间都没有相对运动时, 可单独实现车刀 B 轴方向的微摆动, 模拟实际磨削过程中砂轮在 B 轴方向的微小摆动。系统可简化为如图 4 所示的力学模型。

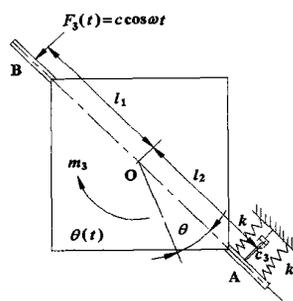


图 4 刀刃 B 轴方向微摆动的力学模型

假设下导板所带动的运动部件总质量和为 m_3 , 回转中心为 O, 阻尼参数为 c_3 , 弹簧刚度为 k_3 , 作用于下

$$|x(t)| = \sqrt{x_{13}(t)^2 + x_2(t)^2} = \sqrt{[|H_1(\omega)| A_1 e^{i(\omega t - \phi_1)} + |H_3(\omega)| c_1 l e^{i(\omega t - \phi_3)}]^2 + |H_2(\omega)|^2 B_1^2 e^{2i(\omega t - \phi_2)}} \quad (12)$$

同样可得系统微振动位移误差为:

$$|x(t)| = \sqrt{[|H_1(\omega)| A_1 e^{i(\omega t - \phi_1 + \pi/2)} + |H_3(\omega)| c_1 l e^{i(\omega t - \phi_3 + \pi/2)}]^2 + |H_2(\omega)|^2 B_1^2 e^{2i(\omega t - \phi_2 + \pi/2)}} \times t \quad (13)$$

4 系统实验及数据分析

导板上的简谐激励力为 $c \cos \omega t$ 可建立系统转动的微分方程式:

$$I \ddot{\theta}(t) + c_3 \dot{\theta}(t) + 2k_3 l_2^2 \theta(t) = F_3(t) l_1 = c l_1 \cos \omega t = 2k_3 f_3(t) l_1 = 2k_3 l_1 c_1 \cos \omega t \quad (8)$$

式中: I 是运动部件绕其回转中心转动的惯性矩。

$$\text{令 } \omega_{n3} = \sqrt{\frac{2k_3 l_2^2}{I}}, \quad \zeta_3 = \frac{c_3 l_1}{2I \omega_{n3}} = \frac{c_3 l_1}{2 \sqrt{2I k_3 l_2^2}}, \text{ 代入方程}$$

式 (8) 中, 得:

$$\ddot{\theta}(t) + 2\zeta_3 \omega_{n3} \dot{\theta}(t) + \omega_{n3}^2 \theta(t) = \frac{l_1}{I} c_1 \cos \omega t$$

复指数的形式为: $H_3(\omega) = |H_3(\omega)| e^{-i\phi_3(\omega)}$

式中:

$$|H_3(\omega)| = \frac{l_1}{\sqrt{[1 - (\omega/\omega_{n3})^2]^2 + (2\zeta_3/\omega_{n3})^2}}$$

$$\phi_3(\omega) = \arctan \frac{2\zeta_3/\omega_{n3}}{1 - (\omega/\omega_{n3})^2}$$

刀刃在 B 轴方向的微小摆动角为:

$$\theta(t) = |H_3(\omega)| e^{-i\phi_3(\omega)} c_1 e^{i\omega t} =$$

$$|H_3(\omega)| c_1 e^{i(\omega t - \phi_3(\omega))} \quad (9)$$

其响应位移为:

$$x_3(t) = l \theta(t) = |H_3(\omega)| c_1 l e^{i(\omega t - \phi_3(\omega))} \quad (10)$$

式中 l 表示刀刃到微驱动刀架回转中心的距离, l_1 、 l_2 可直接从微驱动刀架上测得。

3.4 系统微振动

图 5 所示为微驱动刀架上刀刃各向微振动的平面示意图。由于实际加工过程中砂轮在 B 轴方向的摆角非常小, 其位移响应近似于与 Z 轴方向平行的直线, 因此, 可将 Z 轴方向的位移响应与 B 轴方向的摆动位移响应直接进行线性叠加, 即

$$x_{13}(t) = x_1(t) + x_3(t) = |H_1(\omega)| A_1 e^{i(\omega t - \phi_1)} + |H_3(\omega)| c_1 l e^{i(\omega t - \phi_3)} \quad (11)$$

X 轴与 Z、B 两轴的位移响应方向互相垂直, 应进行矢量叠加。因此, 微驱动刀架系统中刀刃各向微振动叠加后总的位移响应为:

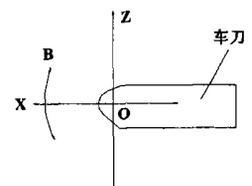


图 5 刀刃各向微振动示意图

由于实验时采用加速度传感器, 采集到的实验数

据为一组加速度数据，将其对时间积分两次，得到位移响应数据，滤波去除系统误差后，可分别绘出不同激振频率下刀刃各轴向的位移-时间曲线图，并进行刀刃三轴向微振动波形叠加。数据处理程序是在 Delphi 工作平台上开发的。程序流程图如图 6 所示。

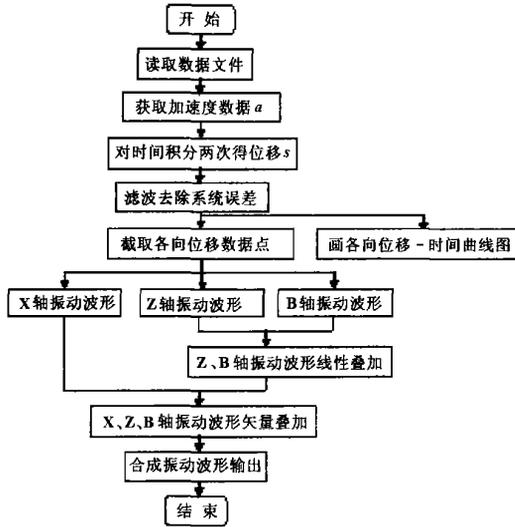


图 6 系统各向微振动叠加程序流程图

实验时，改变微驱动刀架上车刀 Z 轴方向的激振频率可模拟砂轮的转速变化，改变车刀 X 轴方向的激振频率可模拟工件的转速变化，改变车刀 B 轴方向的激振频率和激振电流大小可模拟砂轮主轴的摆动频率和振幅变化，砂轮每转进给量由车刀的进给速度控制。在超精密磨削加工中，砂轮 Z 轴方向微振动的频率范围通常为 16.67~33.33Hz，X 轴方向微振动的频率范围为 8.33~16.67Hz，砂轮主轴摆动的频率范围为 5~20Hz。根据表 1 所列的非球面加工参数以及所设计的微小振动试验系统，经过激振实验可获得表 2 所示的实验数据。

表 1 非球面加工参数

砂轮转动频率 f_d /Hz	工件转动频率 f_w /Hz	工件基础半径 R_s /mm	偏心系数 k
16.67~33.33	8.33~16.67	889.098	0.5
非球面系数 c_i		进给速度 v_c /(m·min ⁻¹)	加工相位角 γ /(°)
6.8 × 10 ⁻⁵ ~ 1.1 × 10		2, 3	0~180

表 2 实验数据处理

(a) 微驱动刀架 Z 轴方向激振频率 f_d 与刀刃振幅 x_1

频率 f_d /Hz	16.67	20	25	30	33.33
振幅 x_{11} /μm ($v_c = 2m \cdot min^{-1}$)	0.861	0.759	0.657	0.481	0.422
振幅 x_{12} /μm ($v_c = 3m \cdot min^{-1}$)	0.912	0.801	0.678	0.566	0.473

(b) 微驱动刀架 X 轴方向激振频率 f_w 与刀刃振幅 x_2

频率 f_w /Hz	9.17	11.35	13.33	15	17.5
振幅 x_{21} /μm ($v_c = 2m \cdot min^{-1}$)	0.581	0.492	0.389	0.332	0.228
振幅 x_{22} /μm ($v_c = 3m \cdot min^{-1}$)	0.602	0.510	0.409	0.351	0.245

(c) 微驱动刀架 B 轴方向激振频率 f_B 与刀刃振幅 x_3

频率 f_B /Hz	6	9	12	15
振幅 x_{31} /μm ($v_c = 2m \cdot min^{-1}$)	0.268	0.228	0.187	0.139
振幅 x_{32} /μm ($v_c = 3m \cdot min^{-1}$)	0.279	0.241	0.198	0.154

根据表 2 的实验数据以及建立的微振动系统的动力学模型，可以求出系统的各项参数 (n_1, n_1)、(n_2, n_2)、(n_3, n_3)，得到在不同的振动频率下刀刃的总响应位移，并绘出三轴振动同时存在的位移响应波形，图 7 所示为 $v_c = 2m/min$, $f_d = 16.67Hz$, $f_B = 12Hz$, $f_w = 13.33Hz$ 时刀刃的合成振动波形。由实验数据可以看出：随着进给速度的减小和激振频率的增大，刀刃微振动的振幅将越来越小。由此可见，在超精密磨削加工中，减小进给速度，提高砂轮转速或者工件主轴的转速，都可使砂轮振动的振幅降低，从而降低工件表面轮廓的空间幅值，并改变工件表面轮廓的空间振动波形。

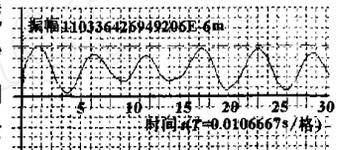


图 7 $f_d = 16.67Hz$, $f_B = 12Hz$, $f_w = 13.33Hz$ 时刀刃的合成振动波形

因此，在机床和砂轮条件允许的情况下，合理选择砂轮转速、工件转速和加工进给速度，优化加工参数，可以提高工件表面加工质量。

5 结论

(1) 建立轴对称非球面磨削中砂轮与工件加工时的数学模型，分析超精密磨削加工砂轮振动和工件主轴振动产生的原因，以及对工件表面质量产生的影响。(2) 设计一套微小振动试验系统，该系统可模拟精密磨床上砂轮 X 轴、Z 轴的微小振动以及 B 轴的微摆动，记录振动信号，对实验数据进行分析处理；同时建立微振动实验系统的动力学模型，导出系统各向微振动叠加后总的位移响应和位移响应误差。(3) 优化选择砂轮转速、工件转速和加工进给速度，可降低砂轮和工件主轴振动的振幅，提高工件表面加工质量。

参考文献

【1】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.
【2】王洪祥，董 申，李 旦，梁 风．通过切削参数的优选控制振动对超精密加工表面质量影响 [J]．中国

(下转第 58 页)

散曲面，然后用直线和曲面的离散结果求交。如UG、Pro/E等软件均采用该方法。

2.2.2 曲面边角投影点

网格点的疏密程度是不一致的，在曲面的边角处，要适当增加网格点的密度。Choi采用称之为EZmap结构的方法。该方法在网格的边上增加点，如图2所示。

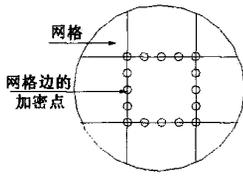


图2 EZmap结构

EZmap结构最大的缺点是没有记录网格内的曲面形状，因此无法满足精加工的需求。本文采用网格内细化算法，如图3所示，即在曲面的形状复杂处将网格细化，形成若干递归层次的子网络。这样处理，网格点阵可以在精度范围内再现曲面的真实形状，从而实现记录工件留置的目的。

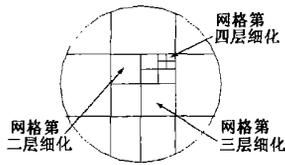


图3 网格内细化

2.3 基于留量加工技术的特点分析

采用留量模型加工的每一个工步，系统都能准确记录加工前的工件状态，系统可以实现如下计算：

- (1) 自动确定在没有材料的位置下刀和退刀。只要遍历当前网格点阵即可。
- (2) 对加工已完成的区域，刀具可以不切削，从而避免空走刀。
- (3) 在当前刀具条件下，有的区域因刀具半径较大而加工不到，可自动实现换小刀补切未加工区域。
- (4) 自动判断是否过切。
- (5) 刀具在走刀过程中，能清楚地知道当前的切削量是多少（加工前留量高度减去曲面当前点的高度），系统可以根据切削量自动调整走刀速度。
- (6) 切削过程的每一个加工用量，系统都能确切记忆，因此，能实现加工工艺过程文件的自动生成。

从上述基于留量模型加工特点分析可以看出，留

量加工不仅能生成满足高速加工的刀具轨迹，而且为智能加工提供了几何分析的条件。

3 结论与实例

本文对基于留量模型的高速精加工的CAM技术要求、留量加工的概念、留量加工模型建立的方法及特点进行了深入的探讨，指出留量加工不仅是实现高速加工的最好选择，而且是实现智能加工的新概念和新途径。可以看到，随着高速数控加工的各项关键技术的不断突破，在未来制造业中，高速加工极有可能成为最常采用的数控加工技术之一。图4为某铝合金压铸模的上模芯基于留量模型的精加工刀具轨迹。

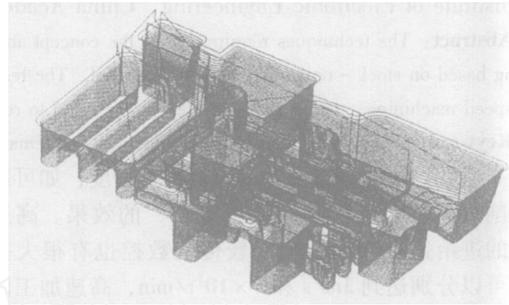


图4 基于留量模型的精加工刀具轨迹

参考文献

- 【1】Beard T. Interpolating curves [M]. Die/Mold, 2000.
- 【2】叶伟昌. 高速切削技术的现状与进展 [J]. 机械制造与自动化, 1999 (3): 9~12.
- 【3】NURBS interpolation; advanced technique takes out more cycle time [J]. competitive Mold Maker, 2000, 3 (2): 8~11.
- 【4】遇立基. 高速加工和超高速加工 [J]. 机械工人(冷加工), 1999 (1): 4~5.
- 【5】施法中. 计算机辅助几何设计与非均匀有理B样条(CAGD & NUBS). 北京: 北京航空航天大学出版社, 1994.
- 【6】张大涌. 先进制造技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000. 2: 438~451.

作者简介: 李建国, 男, 1965年生。中国工程物理研究院电子工程研究所工程师, 工学博士。

收稿时间: 2004 - 05 - 18

(上接第20页)

机械工程, 2000, 11 (4): 452~455.

- 【3】杨小麟, 郑琳, 郭隐彪. 超精密磨削加工微小振动模拟系统研究 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2004 (6): 1~2.
- 【4】C. F. Cheung, W. B. Lee. A theoretical and experimental investigation of surface roughness formation in ultra precision diamond turning [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2000, 40: 979~1002.

- 【5】O. B. Abouelatta, J. Madl. Surface roughness prediction based on cutting parameters and tool vibrations in turning operations [J]. Journal of materials processing technology, 2001, 118: 269~277.
- 【6】师汉民, 吴雅. 机械振动系统 [M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1996.

作者简介: 杨小麟, 女, 1972年10月出生, 集美大学机械工程学院讲师, 主要研究方向: 超精密非球面加工。

收稿时间: 2005 - 05 - 20