

# 基于瞬时切削力和实体模型的三轴铣削仿真与试验

朱 虎<sup>1</sup> 李建雨<sup>2</sup>

(1. 沈阳航空工业学院机电工程学院, 沈阳 110136; 2. 国立首尔大学机械航空工学部, 首尔 151742, 韩国)

**【摘要】** 引入加工面生成点概念, 提出基于瞬时切削力的刀具变形计算和变形刀具移动扫描体的实体建模方法, 通过布尔运算生成包含有几何与物理误差的仿真加工模型, 以图形动态显示仿真加工模型的生成过程, 并给出精确测量仿真加工模型的方法; 采用 PARASOLID 建模核心和 OpenGL 对上述算法完成系统实现。仿真和实际加工试验结果表明, 最大仿真误差为 0.012 mm、最小仿真误差为 0.004 mm, 平均仿真误差为 0.008 mm。

**关键词:** 实体模型 瞬时切削力 数控加工仿真 刀具移动扫描体

**中图分类号:** TP391.73

**文献标识码:** A

## Simulation of 3-Axis Milling Based on Solid Model and Instantaneous Force

Zhu Hu<sup>1</sup> Lee KunWoo<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Shenyang Institute of Aeronautical Engineering, Shenyang 110136, China

2. School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University, Seoul 151742, Korea)

### Abstract

By introducing the concept of surface generation points, an instantaneous force based tool deformation calculation method and the solid modeling method of deformed tool swept volume were proposed, and the solid model of machining simulation including geometry and physical errors were generated. The machining process was shown by computer graphics dynamically and the measurement method for solid model of machining simulation was also presented. The whole system was implemented by using OpenGL and PARASOLID modeling kernel. The result of machining simulations case study and the actual machining experiments indicate that the maximum and minimum simulation errors were 0.012 mm and 0.004 mm respectively, and the average error was 0.008 mm.

**Key words** Solid model, Instantaneous force, NC machining simulation, Tool swept volume

### 引言

在数控加工中, 加工代码直接影响着加工质量和效率。因此, 在正式加工之前, 需要对加工代码进行验证, 以排除加工代码中可能存在的错误并予以优化。近年来, 有关替代试切而可进行加工代码验证的计算机仿真研究已取得了重要进展。然而, 目前的数控加工仿真技术还停留在加工过程的图形动态显示和干涉检查等几何仿真<sup>[1~2]</sup>阶段, 主要还是通过肉眼观察仿真加工模型来判断过切、欠切, 还没有定量检测仿真加工模型微小误差的方法。虽然

有一些关于物理仿真的研究, 但基本上限于切削力、刀具变形和振动等物理因素的计算<sup>[3~4]</sup>, 而没有把物理仿真和几何仿真有机地集成, 也就没能把物理因素的影响在仿真加工模型和图形动态显示上体现出来<sup>[5]</sup>; 又由于目前的物理仿真大多以平均切削力计算模型为基础, 因此仿真精度也比较低<sup>[6]</sup>。

本文以侧铣加工为研究对象, 引入加工面生成点概念, 以精确度较高的瞬时切削力<sup>[6]</sup>计算刀具变形, 以实体建模方法生成变形刀具移动扫描体的模型, 通过把几何仿真和物理仿真有机地集成, 进而生成包含有几何与物理因素的仿真加工模型, 同时给

出对最终仿真加工模型进行精确测量的方法,最后把仿真加工结果和实际加工结果进行比较,验证本研究的可行性。

### 1 数控加工仿真系统

数控加工仿真系统如图 1 所示。系统由数据输入、数据处理和数据输出组成。在数据输入部分主要进行刀具、工件和 NC 代码等数据的输入;数据处理部分由几何仿真、物理仿真和精度测量模块组成。几何仿真模块根据物理仿真模块所提供的刀具变形信息生成变形刀具移动扫描体模型,并通过布尔运算生成包含有刀具变形等物理因素影响的仿真加工形状,从而为在物理仿真模块中进行切削力、刀具变形等物理因素的计算提供必要的切削域信息。物理仿真模块根据几何仿真模块提供的切削域信息,计算出切削力和刀具变形并提供给几何仿真模块,以便在切削加工过程的图形动态显示和最终仿真加工模型中体现出来。精度测量模块可对仿真加工模型进行尺寸测量,以便定量检测加工误差。数据输出部分以文件、图形形式输出仿真结果或检测数据。

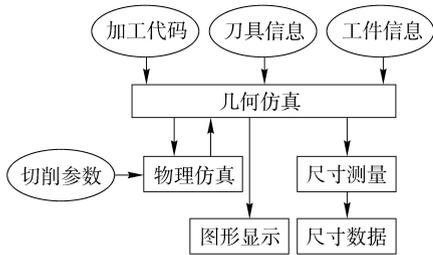


图 1 仿真系统结构原理图

Fig.1 Structure of simulation system

### 2 几何仿真

#### 2.1 切削加工仿真建模

利用实体模型表示刀具、工件以及最终仿真加工模型。首先根据输入的 NC 代码、刀具和工件等信息,进行刀具、工件和 2 个刀位点之间的刀具移动扫描体的建模,然后进行刀具移动扫描体和工件的交集运算,并从工件去除交集部分的材料来更新工件的形状。如图 2 所示,反复进行上述过程就可表现工件形状随着刀具的移动而被逐渐切削的过程,并得到仿真加工的最终实体模型。

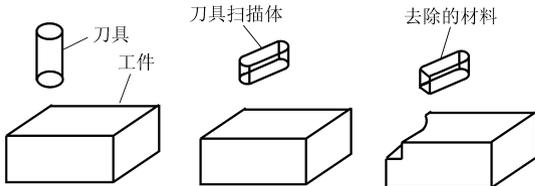


图 2 几何仿真

Fig.2 Geometry simulation

#### 2.2 刀具移动扫描体建模

在数控加工时,刀具常常因切削力发生弯曲变形而影响加工质量。为了在仿真加工中体现刀具弯曲变形的影响,需要把包含有刀具变形因素的刀具移动扫描体用实体模型精确地表示出来,本文以立式铣刀为例说明其建模方法。

由于立式铣刀上带有螺旋角,因此刀具最底端的微小切削刃最先与工件接触,并随着刀具的旋转,刀具与工件的接触点向上移动形成加工面。把刀具与工件的接触点定义为加工面生成点。本文把刀具轨迹划分成微小段,在各个刀位点上选取一系列加工面生成点,利用瞬时切削力计算出刀具变形量和加工面生成点的偏置点,并以偏置点为基础进行刀具扫描体建模。考虑到刀具旋转时,随着切削量发生变化,作用在刀具上的切削力和刀具变形状态也发生变化,所以应根据刀具旋转位置求出瞬时切削力和刀具的变形状态,并求出与此旋转位置相对应的加工面生成点的偏置点。为此,需要建立刀具旋转角  $\theta$  和加工面生成点位置  $h$  的关系,如图 3 所示。如果刀具最底端的微小切削刃开始形成加工面时的旋转角为零,则刀具旋转角  $\theta$  和加工面生成点位置  $h$  之间的关系可表示为

$$h = R\theta / \tan\alpha_{hx} \tag{1}$$

式中  $R$ ——刀具半径  $\alpha_{hx}$ ——刀具螺旋角

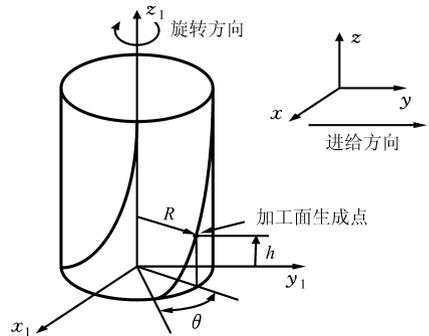


图 3  $\theta$  和  $h$  间关系示意图

Fig.3 The relation of  $\theta$  and  $h$

刀具移动扫描体的实体建模步骤：①如图 4 所示,当刀具在刀位点  $P_1$ 、 $P_2$  位置时,选取一系列的加工面生成点,并根据对应的刀具旋转角计算相应的瞬时切削力和刀具变形量。②把加工面生成点沿着刀具的径向方向偏置刀具变形量,并以 piecewise cubic curve 进行插补处理为 B-spline 曲线  $C_1$  和  $C_2$ 。③对曲线  $C_1$  和  $C_2$  进行 lofting 形成  $P_1$ 、 $P_2$  两个刀位点之间的曲面,并将其转换成 sheet body,然后使其沿着刀具的径向方向平行扫描移动刀具直径距离,生成如图 5 所示的“六面体”形状。④将曲线  $C_1$ 、 $C_2$  沿着刀具径向方向偏置刀具半径得到曲线

$C_3$ 、 $C_4$ , 见图5。把半径为刀具半径的 sheet circle 沿着曲线  $C_3$ 、 $C_4$  平行扫描移动生成“圆柱体”形状。  
⑤进行2个“圆柱体”形状和1个“六面体”形状的并集运算, 得到如图5所示变形后的刀具移动扫描体。

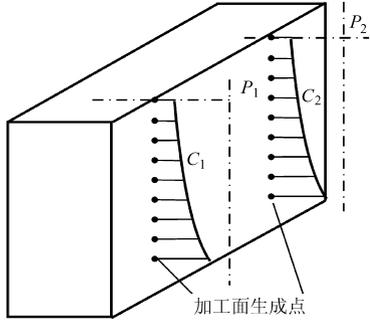


图4 加工面生成点示意图  
Fig. 4 Surface generation points

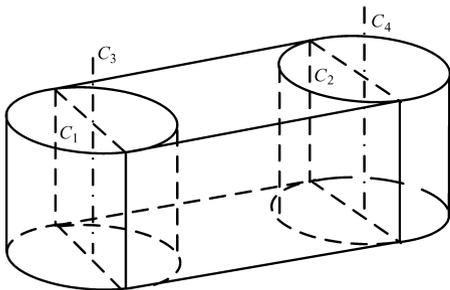


图5 刀具移动扫描体示意图  
Fig. 5 Tool swept volume

### 3 物理仿真

#### 3.1 切削力计算

为了准确而动态地描述切削过程, 本文计算了与刀具旋转角对应的瞬时切削力<sup>[7]</sup>。首先把切削刃分成微小片, 然后利用切削力和未变形切屑之间的关系求出作用在每个微小片上的微小切削力, 并通过计算微小切削力的矢量和来计算瞬时切削力。把刀具的切削刃沿着刀具轴向方向以  $D_z$  为间隔进行分割, 分割后所得微小切削刃参与切削时的切屑的截面积和微小切削刃上的微小切削力的分布状态如图6所示。

如果用  $i$  和  $j$  分别表示微小片的轴向位置和旋

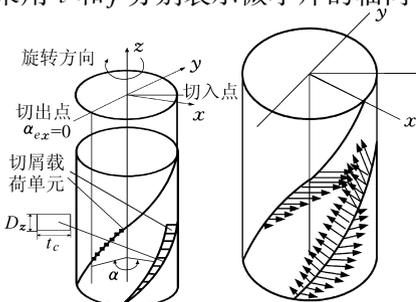


图6 切削载荷单元和微小切削力

Fig. 6 Cutting load cell and micro cutting force

转位置, 那么在  $N_f$  个刀刃中位于第  $k$  个刀刃上的微小片的位置可表示为

$$\alpha(i, j, k) = [-\theta(j) + \gamma(k-1)] +$$

$$\left[ (i-1)D_z + \frac{D_z}{2} \right] R^{-1} \tan \alpha_{hx}$$

$$(i=1, 2, \dots, N_z; j=1, 2, \dots, N_\theta; k=1, 2, \dots, N_f) \quad (2)$$

其中  $\gamma = 360^\circ / N_f$   $\theta(j) = j\gamma / N_\theta$

式中  $\theta(j)$ ——刀具的旋转位置角

$N_\theta$ ——等分刀刃之间角度的个数

$N_z$ ——微小片个数

$\gamma$ ——刀刃角间距

作用在  $\alpha(i, j, k)$  微小片上的径向切削力  $dF_r$  和切向切削力  $dF_t$  可分别计算为

$$dF_r(i, j, k) = K_r dF_t(i, j, k) \quad (3)$$

$$dF_t(i, j, k) = K_t f D_z \sin \alpha(i, j, k) \quad (4)$$

式中  $K_t, K_r$ ——与刀具、工件材料相关的参数

$f$ ——刀刃的进给量

作用在微小片上的切削力转换成  $x, y$  轴方向的切削力, 则有

$$dF_x(i, j) = \sum_{k=1}^{N_f} [-dF_r(i, j, k) \sin \alpha(i, j, k) + dF_t(i, j, k) \cos \alpha(i, j, k)] \quad (5)$$

$$dF_y(i, j) = \sum_{k=1}^{N_f} [dF_r(i, j, k) \cos \alpha(i, j, k) + dF_t(i, j, k) \sin \alpha(i, j, k)] \quad (6)$$

刀具旋转位置为  $j$  时的径向瞬时切削力和切向瞬时切削力分别为

$$F_x(j) = \sum_{i=1}^{N_z} \sum_{k=1}^{N_f} [-dF_r(i, j, k) \sin \alpha(i, j, k) + dF_t(i, j, k) \cos \alpha(i, j, k)] \quad (7)$$

$$F_y(j) = \sum_{i=1}^{N_z} \sum_{k=1}^{N_f} [dF_r(i, j, k) \cos \alpha(i, j, k) + dF_t(i, j, k) \sin \alpha(i, j, k)] \quad (8)$$

#### 3.2 刀具变量量计算

把立式铣刀看作一个悬臂梁如图7所示, 利用半静态解析方法, 刀具的变形量为<sup>[8]</sup>

$$\delta(z) = \frac{F}{6EI} [(Z_F - z)^3 - (L - z)^3 + 3(L - z)^2(L - Z_F)] \quad (9)$$

式中  $Z_F$ ——集中力中心  $I$ ——惯性模量

$F$ ——加工面法线方向切削力

$L$ ——刀具有效长度

$\delta(z)$ ——轴方向上  $z$  处发生的刀具变形量

$E$ ——刀具的弹性模量

圆柱体的惯性模量可用  $I = \pi D^4 / 64$  来计算 ( $D$  为刀具公称直径), 但考虑到刀具上有螺旋槽, 刀具的有效直径  $D_e$  可用  $D_e = 0.8D$  近似计算<sup>[9]</sup>, 所以刀具惯性模量由  $I = \pi(0.8D)^4 / 64$  来计算。

为进行刀具移动扫描体的建模, 需要知道刀具变形量和变形方向, 为此建立如图 8 所示的刀具坐标系  $x_1O_1y_1$  ( $y_1$  为加工面的法线方向,  $x_1$  为刀具移动方向) 来求出各刀位点上刀具的变形量  $\delta(z)$ 。

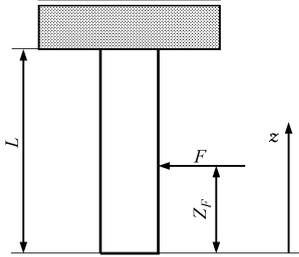


图7 刀具变形模型  
Fig.7 Model of tool deflection

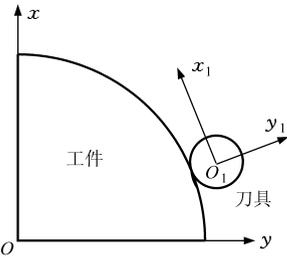


图8 刀具坐标系  
Fig.8 Coordinate system of tool

#### 4 仿真加工模型的测量

为了使仿真加工模型的测量方式符合现场上对实际加工工件的测量方式, 本文仿照三坐标测量仪的测量方式, 只要给出基准点和测量方向就可测出加工表面上点的坐标。

利用 PARASOLID 的 API 函数 PK-BODY-pick-topols(), 本文实现了上述坐标测量方式。如图 9 所示, 该函数在由某一点沿着某一方向向实体模型发射光线时, 可计算出光线交于面的所有交点 A、B 的坐标。其算法实现程序如下:

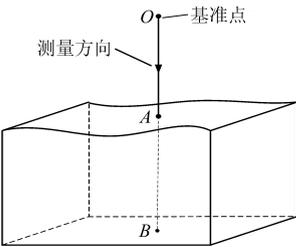


图9 尺寸测量原理  
Fig.9 Principle of dimension measurement

```
int no_bodies;
PK-PART-t bodies[1];
PK-TRANSF-t body_transfs;
PK-AXIS1-sf-t ray;
PK-BODY-pick-topols-o-t option;
PK-BODY-pick-topols-r-t picked;
```

//定义测量基点

```
ray.location.coord[0] = callmeabox.m-Location-x;
ray.location.coord[1] = callmeabox.m-Location-y;
ray.location.coord[2] = callmeabox.m-Location-z;
```

//定义测量方向

```
ray.axis.coord[0] = callmeabox.m-Direction-x;
```

```
ray.axis.coord[1] = callmeabox.m-Direction-y;
ray.axis.coord[2] = callmeabox.m-Direction-z;
PK-BODY-pick-topols-o-m(option);
option.max_faces = 1;
option.ignore_back_faces = PK-LOGICAL-false;
//调用拓扑信息获取函数
PK-BODY-pick-topols(no_bodies, bodies,
&body_transfs, &ray, &option, &picked);
//拓扑信息中取出交点坐标
result-object.m-result-x =
picked.faces[0].intersect.coord[0];
result-object.m-result-y =
picked.faces[0].intersect.coord[1];
result-object.m-result-z =
picked.faces[0].intersect.coord[2];
```

#### 5 仿真加工实例和实际加工试验

##### 5.1 仿真加工实例

在 Windows XP 环境下, 利用 Visual C++、PARASOLID 和 OpenGL 完成了上述仿真加工算法的系统实现。图 10 所示的是根据前述算法, 以实体建模方法生成的 2 个相邻刀位点之间的变形刀具移动扫描体模型; 图 11 为仿真加工过程的图形动态显示; 图 12 显示的是利用尺寸测量功能对仿真加工模型进行测量的过程。

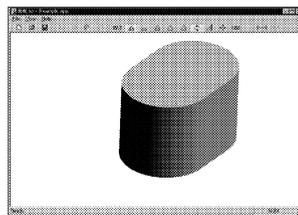


图10 变形刀具移动扫描体  
Fig.10 Deformed tool swept volume

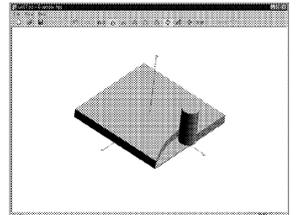


图11 加工仿真  
Fig.11 Machining simulation

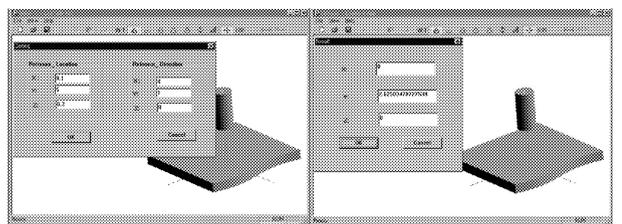


图12 尺寸测量  
Fig.12 Dimension measurement

##### 5.2 实际加工试验

为验证本文提出的仿真算法的有效性, 在大禹

ACE-V30 立式铣床上, 利用直径为 10 mm 的 2 刃平底铣刀, 以如图 13 所示工件模型 (材料为 KP-4M 模具钢) 为对象进行了实际加工试验, 其加工精度用三坐标测量仪进行测量, 并把实际加工结果与

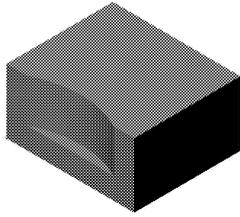


图 13 试验用零件模型  
Fig. 13 Part for experiment

仿真加工结果进行比较。在试验中采用了下向铣削方式, 主轴转速 800 r/min、进给速度 160 mm/min、轴向深度 9 mm。

图 14 显示了在上述加工条件下, 仿真加工模型和实际加工模型在  $x$  为 40.5、41.0 和 41.5 mm 截面位置沿着  $z$  轴方向进行测量的结果。可以看出, 最大仿真误差 0.012 mm, 最小仿真误差 0.004 mm, 平均仿真误差 0.008 mm。

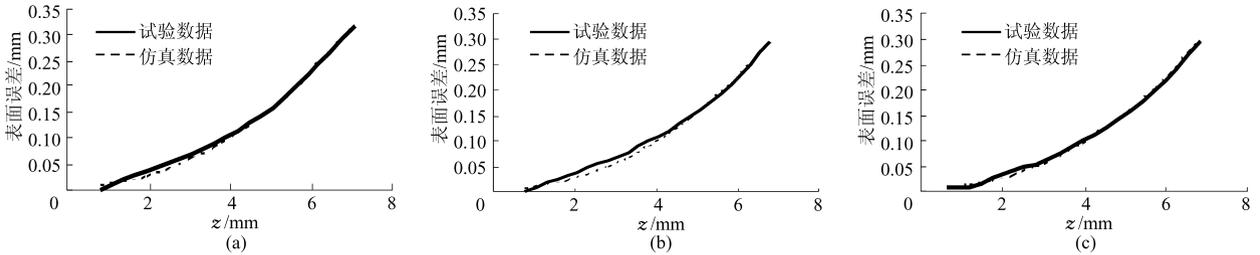


图 14 表面误差曲线

Fig. 14 Surface error

(a)  $x = 40.5$  mm (b)  $x = 41.0$  mm (c)  $x = 41.5$  mm

## 6 结束语

研究了可同时进行几何仿真与物理仿真的基于实体模型的数控加工仿真系统。该系统不仅能检查

几何误差, 还能检查由于刀具变形等引起的物理误差, 可对仿真加工模型进行尺寸测量。由于该系统采用实体模型和瞬时切削力计算模型, 因而具有较高的仿真精度。

## 参 考 文 献

- Spence A D, Abrari F, Elbestawi M A. Integrated solid modeller based solutions for machining[J]. Computer-aided Design, 2000, 32(8~9): 553~568.
- 于源, 张连凯. 离心泵整体叶轮流道数控加工误差的仿真[J]. 农业机械学报, 2006, 37(2): 55~57.  
Yu Yuan, Zhang Liankai. Simulation on NC machining error for flow passage of integral impeller of centrifugal pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(2): 55~57. (in Chinese)
- 何伟, 宾鸿赞, 张何军. 基于多层次细节模型的动态切削力仿真[J]. 中国机械工程, 2007, 18(12): 1 430~1 433.  
He Wei, Bin Hongzan, Zhang Hejun. Dynamic cutting force simulation based on LOD model of sculpture surfaces[J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(12): 1 430~1 433. (in Chinese)
- 廉哲满, 文学洙. 车削加工中振动对表面轮廓影响的仿真分析[J]. 中国机械工程, 2004, 15(23): 2 085~2 087.  
Lian Zheman, Wen Xuezhu. Analysis of the effects of vibration on the surface roughness generation using simulation model in turning operations[J]. China Mechanical Engineering, 2004, 15(23): 2 085~2 087. (in Chinese)
- 盛亮, 廖文和. 数控加工物理仿真关键技术的初探[J]. 系统仿真学报, 2003, 15(5): 631~633.  
Sheng Liang, Liao Wenhe. Initial study on key technology of physical simulation of numerically controlled machining[J]. Journal of System Simulation, 2003, 15(5): 631~633. (in Chinese)
- Smith S, Tlustý J. An overview of modeling and simulation of the milling process[J]. Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME, 1991, 113(2): 169~175.
- Kline W, Devor R, Lindberg J. The prediction of cutting forces in end milling with application to cornering cuts[J]. International Journal of Machine Tool and Manufacture, 1982, 22(1): 7~22.
- Bertok P, Ootsuka J, Sate T, et al. A system for monitoring the machining operation by referring to a predicted cutting torque pattern[J]. CIRP Annals, 1983, 32(1): 439~442.
- Kops L, Vo D T. Determination of the equivalent diameter of an end mill based on its compliance[J]. CIRP Annals, 1990, 39(1): 93~96.