

# 虚拟加工技术研究

黄新燕, 李小宁

(南京理工大学机械工程学院, 江苏南京 210024)

**摘要:** 论文概要地介绍了虚拟加工技术的研究内容, 并对国内外在数控加工过程的几何验证的发展和研究概况及存在的问题作了论述。最后, 论文对虚拟加工平台的研究内容作了详细地介绍。

**关键词:** 几何验证; 物理验证; 虚拟加工; 仿真

**中图分类号:** TP391    **文献标识码:** B    **文章编号** 1001 - 3881 (2003) 3 - 119 - 2

## 0 引言

虚拟加工技术是利用计算机以可视化的、逼真的形式来直观表示零件数控加工过程, 对干涉、碰撞、切削力和变形进行预测和分析, 减少或消除因刀位数据错误而导致的机床损坏、夹具或刀具折断以及因切削力和切削变形造成的薄型或精密零件的报废。从而进一步优化切削用量, 提高加工质量和加工效率。

数控加工过程是一个极其复杂的过程, 涉及的因素很多, 开展对虚拟加工技术的研究要应用到微分几何、计算机图形学、仿真技术、金属切削理论及机床运动学和动力学等相关学科的知识 and 最新技术。因此, 虚拟加工技术研究的进展与这些领域中的研究和发展的紧密相关的。本文将就目前虚拟加工技术领域的研究内容及研究状况作一介绍。

## 1 研究内容及研究概况

目前, 对虚拟加工技术的研究可以分成两个大的方面: 其一是着重对虚拟加工硬件环境的研究; 其二是着重对加工过程的研究。

### (1) 虚拟加工硬件环境

该方面的研究着重于对实际的加工环境进行仿真, 追求逼真的效果<sup>[1]</sup>。

加工硬件环境研究分三个层次(如图1)车间层, 加工中心或机床层及刀具、夹具和毛坯层。硬件环境研究所涉及到的关键技术有: 几何建模, 运动建模及坐标系建模。车间层只是为了增加环境的真实感, 起到烘托和陪衬的作用, 几何建模的

核心在于模型数据结构简洁, 数据量少, 从而减少漫游时的计算量, 提高速度。加工中心和机床则是环境中的关键。因此, 在几何建模中侧重于床身、立柱、主轴和工作台这些主要的部件。加工中心和机床包含了大量的特征数据, 这需对模型作适当的简化。另外, 加工中心和机床得通过工作台的运动及刀具沿主轴方向的运动来加工工件的。因此, 除了进行几何建模, 还必须对其运动模型进行研究, 在模型中添加运动约束数据。刀具、夹具和毛坯在加工环境中是最灵

活的, 随加工对象、加工工艺的不同而变化。这三个元素还必须满足一定的约束条件, 准确地与环境对接, 融为一体, 因此须进行坐标系建模, 目前采用的方法是通过设计特殊的数据结构来实现。在数据结构中既记录几何信息、拓扑信息, 又记录运动约束和位置方向数据。

### (2) 加工过程验证

早期利用计算机对加工过程的研究是从数控加工仿真开始的。目前, 对加工过程的研究包括几何验证和物理验证两个方面: 在几何验证方法方面的发展是随着几何建模技术的发展而发展的。按建模方法的不同可分为直接实体建模法、光线表达法、离散矢量法和空间分割法<sup>[2]</sup>, 其特点是以刀具和工件几何体为主要检验对象, 目的是保证刀位数据的正确性, 减少或消除因刀位数据错误面导致的一系列问题, 加工过程的几何验证国外已经有相当成熟的数控加工仿真商品化软件问世, 现在几何验证的研究热点在5轴复杂曲面加工的几何验证, 关键在于精确地构造设计曲面的几何模型和刀具扫描的几何模型; 物理验证是以切削参数、切削力和其他物理因素对切削过程的影响为研究对象, 通过切削过程的动力学模型可实现切削变形、刀具破损的检测监控、切削振动的预报以及切削参数的调整与控制。但是, 由于数控加工过程的物理行为的高度非线性、不确定性, 使加工过程的物理模型建立非常困难, 物理验证还局限于3轴或3轴以下数控加工范围, 开展较多的是针对复杂曲面3轴端铣加工, 研究切削用量对切削力的影响, 从而达到优化切削用量的目的。另外, 由于切削振动对工件的表面质量会产生影响, 同时也会造成加工设备和刀具的损坏, 因此, 针对不同的刀建立其振动模型也是当前物理验证研究的热点之一。总之, 物理验证还处于研究阶段, 没有成熟的商品化软件问世。

虽然, 加工过程的研究在几何验证和物理验证各自的领域中取得了许多成绩, 但几何验证和物理验证是分离的。而实际物理模型的建立是和几何模型分不开的, 例如: 切削力模型的建立和切削的几何尺寸有密切的关系, 而这些数据可以从几何验证中方便地获得。

对于薄型精密零件的加工, 由切削力引起的变形成为影响加工质量的主要因素, 进行物理验证时建立

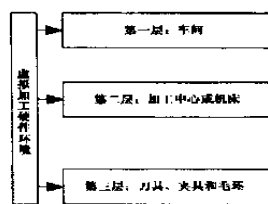


图1 虚拟加工硬件环境结构

常规的切削力模型已不能满足需求，必须借助有限元分析的手段。目前，在物理验证中利用有限元对切削变形进行分析不处于起步阶段。

### 2 虚拟加工技术平台课题研究得点

为了将几何验证和物理验证有机地结合起来，拟构建虚拟加工平台，利用该平台对薄型需采用三坐标铣削加工的零件的加工过程进行研究。

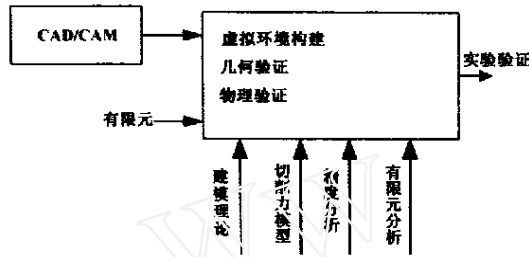


图2 虚拟加工平台

虚拟加工平台是指在数控机床上的切削加工过程在虚拟环境下的映射，虚拟加工平台为一些零件的加工提供一个试切环境，图2所示为虚拟加工平台总体框架示意图。该平台采用通用的CAD/CAM软件，来建立毛坯、刀具和零件的几何模型及生成零件的数控程序，分析平台也采用通用的软件Cosmos/Works。该平台侧重于对加工过程本身进行研究，通过对建模理论的研究构建零件加工中间模型，从而获取加工过程中和切屑有关的几何数据，建立切削力模型，将几何验证和物理验证紧密结合。并根据切削力和几何约束，利用有限元分析软件对变形进行分析、计算。

#### (1) 零件中间模型建模

在纯几何验证中通常并不记录零件加工过程中的几何和拓扑信息，只记录像素信息。几何验证与物理验证相结合，就必须记录加工过程中的几何信息和拓扑信息。因此，零件成型过程的中间模型的建立成为虚拟加工平台的关键之一。

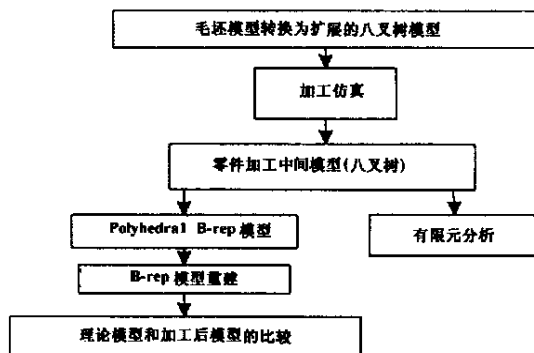


图3 零件中间模型建立

图3所示为零件中间模型的建模方案。首先将毛坯模型转换为扩展的八叉树模型，通过加工仿真，与刀具扫描体作布尔运算得到零件在加工过程中的中间模型，由于是八叉树模型所以可以为有限元分析所运用，同时，也可将零件加工过程模型转换为多面体B

- rep模型，再通过模型重建转换成通用CAD建模软件采用的B-rep模型，将该模型与同CAD建模得到的理论模型相比较，从而可以对加工精度进行预测。

多面体(Polyhedral) B-Rep模型是B-Rep模型的一种特例，在这种表示方法中，所有的面都是平面，所有的曲线都是直线段，所需保存的几何信息仅仅是点的坐标，拓扑信息可以建立这些点的正确的顺序。

以立方体为例，其数据结构为：

```

BLOCK {
Faces:
    (face . ID : 1, (connected . face : 3 4 5 6), (loop .
edge - ID : 1 2 9 10))
    (face . ID : 2, (connected . face : 3 4 5 6), (loop .
edge - ID : 3 4 11 12))
    .....
    (face . ID : 6, (connected . face : 1 2 3 4), (loop . edge -
ID : 2 8 10 12))
Edges:
    (edge . ID : 1, (connected . face : 1 3, (connected .
vertex - ID : 1 2))
    (edge . ID : 2, (connected . face : 1 4), (connected .
vertex - ID : 3 4))
    .....
    (edge . ID : 12, (connected . face : 2 6), (connect-
ed . vertex - ID : 6 7))
Vertices:
    (vertex . ID : 1, (connected . face : 1 3 5), (connect-
ed . edge : 1 5 9), (coordinate : x, y, z))
    (vertex . ID : 2, (connected . face : 1 3 6), (connect-
ed . edge : 1 7 10), (coordinate : x, y, z))
    .....
    (vertex . ID : 8, (connected . face : 2 4 5), (connect-
ed . edge : 4 6 11), (coordinate : x, y, z))
}

```

#### (2) 切削力模型

早期的切削力仿真系统所依据的都是切削力的经验公式，这些经验公式的特点之一是：认为切削力和材料切除率(MRR)有关。这在早期的文献中可以看到。但用材料切除率只能计算平均切削力而无法求得瞬时切削力，而瞬时切削力在切削变形和加工误差分析中是很关键的。本虚拟加工平台对薄壁类零件的铣削加工的切削力模型进行了研究。

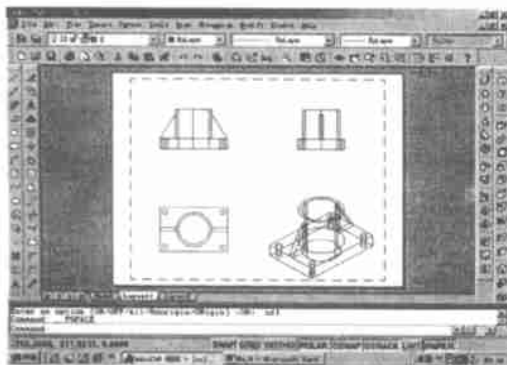
铣刀在铣削时，由于切屑的变形摩擦，铣刀的刀齿受到切削力的作用。通常，将切削力分解为两个方

(下转第144页)

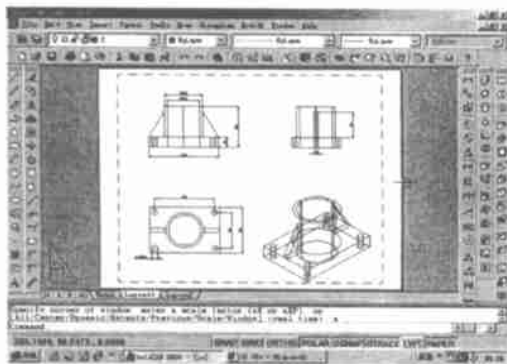
探讨的问题。

### 2 平面图形中内部结构实线的处理

机件图样规定：看不见的轮廓线用虚线表示，而 Auto CAD 中由立体图转换成平面三视图就目前而言，不管用哪种操作方法都不能满足这一规定，这就有待我们去探讨和开发。带着这个问题，我们不断实践，反复摸索，认为采取如下措施可以解决将实线改成虚线的问题。即用炸开 (Explode) 命令，将平面视图中需改图线的内形结构炸开，然后用“Erase”命令删去被修改的实线（此时，立体图上该部分图线被删去）。点击状态行的“Mode”转换开关进入图纸空间，在原图层上，选择点划线，用画线命令在平面视图上画出孔的轴线；选择虚线，用画线命令在平面视图上画出孔的素线；选择实线在立体图上画出孔的素线。如图 12。



(a)



(b)

图 11

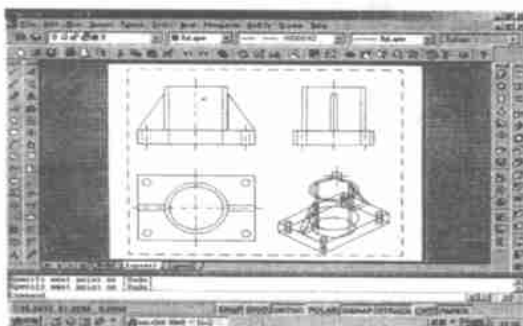


图 12

经过图形输出的验证，我们认为是可行的。在此提出主要是起一个抛砖引玉的作用，供热衷于 Auto CAD 软件研究与开发的仁人志士及同行们探讨，希望通过探讨，得到更行之有效且操作方便快捷的好方法。

### 3 结束语

Auto CAD 中由立体图转换成平面图的绘图方法是工程图学的一个发展方向。但在转换过程中还有一些不完善的地方，需要通过交流、探讨得到解决，以便更好地为社会生产实际和教学服务。

#### 参考文献

- 【1】孙宏江. Auto CAD2000. 机械工业出版社
- 【2】曾先君. Auto CAD2000. 北京希望电子出版社
- 【3】蔡汉民, 陈建国编. Auto CAD 三维造型实例详解. 人民邮电出版社

收稿时间：2002 - 06 - 07

(上接第 120 页)

向：切向切削力  $F_t$  和径向切削力  $F_r$ , 如图 4 所示。

$$F_t = K_t hb, F_r = K_r F_t$$

式中  $K_t$  称为单位切削力, 是一个常数, 与工件材料、刀具几何形状以及平均切削厚度有关。 $K_r$  是两个力的比例系数。对于平面铣削加工切削深度  $b$  通常为常数,  $h$  为切屑厚度, 且

$$h = S_r \sin \phi$$

$S_r$  为每齿进给量

$$S_r = f/z$$

其中,  $f$  为进给速度, 可以从数控程序中获得,  $z$  为齿数。

沿着刀具运动轨迹对切削力进行计算, 并绘制出切削力变化曲线, 依据该曲线就可针对切削力较大的点进行有限元分析, 同时, 通过改变切削参数也可直观地了解切削参数对切削力的影响。

### 3 结论

本文对虚拟加工技术的国内外研究状况作了概要的叙述, 针对目前将几何验证和物理验证分离的状况, 讨论了虚拟加工平台的结构, 重点讨论了将几何验证与物理验证结合在一起的零件中间模型的建模方法和数据结构, 以及物理验证中最关键的切削力模型。

#### 参考文献

- 【1】王知行, 梁宏宝. 虚拟加工技术的硬件环境建模研究 [J]. 计算机仿真, 2001 (9)
- 【2】李吉平, 张文铭, 黄田. NG 图形验证与仿真技术的研究概况 [J]. 计算机仿真, 2001 (9)
- 【3】U. Roy, Y. Xu. Computation of a geometric model of a machined part from its NC machining programs. Computer - Aided Design, 1999, 31

收稿时间：2002 - 07 - 05