

# 虚拟加工过程的建模与仿真\*

柳卓之 李圣怡 王罗 唐罗生

(国防科技大学机械电子与仪器系 长沙 410073)

魏桂林 刘西杰

(航天总公司一院 230 厂 北京 100854)

**摘要** 提出并建立了虚拟加工过程来对实际加工状况进行仿真, 从而在零件正式生产之前就能预见和评估其加工过程中可能出现的问题, 并加以解决。文中还介绍了虚拟加工过程的结构、建模技术和仿真过程。

**关键词** 虚拟制造, 虚拟加工过程, 建模, 仿真

**分类号** TH165

---

## Modelling and Simulation of Virtual Machining Process

Liu Zhuozhi Li Shengyi Wang Luo Tang Luosheng

(Department of Mechatronics Engineering and Instrumentation,  
NUDT, Changsha, 410073)

Wei Guilin Liu Xijie

(No. 230 Factory, Beijing, 100854)

**Abstract** In this paper, a virtual machining process which can simulate the real process is advanced and established, so the problems in the machining process can be predicted, evaluated and solved before cutting parts. Its structure, modelling technology and simulation process are also described.

**Key words** Virtual manufacturing, virtual machining process, modelling, simulation

---

某厂生产的零件具有结构复杂、精度高、壁薄、加工面多、加工工艺复杂(需多次从多个方位,采用多种加工方法方能完成)、NC编程困难、毛坯制造成本高等特点。因此,如何在这些零件正式生产之前就能预见和评估其加工过程中可能出现的问题并加以解决,对确保NC加工程序的合理性和正确性,保证产品质量,缩短生产周期,避免毛坯报废,降低生产成本均具有非常重要的作用。为此我们采用了国际上近年来提出的一种新型的制造技术—虚拟制造技术,通过对零件虚拟加工过程的建模和仿真来达到上述目的。

虚拟制造技术就是利用计算机仿真、多媒体、传感器等技术将现实的产品设计制造过程虚拟化,使人们在产品投产之前就能预见和评估所设计的产品性能和设计制造过程<sup>[1]</sup>。虚拟制造系统是基于虚拟制造技术实现的制造系统,虚拟制造系统的建模分为目标系统层、虚拟制造模型层和模型构造层三个层次<sup>[2]</sup>,其中模型构造层用于提供描述制造活动及其对象的基本模型结构,主要有两种模型<sup>[3]</sup>:产品/过程模型和活动模型。活动模型描述人和系统的各种活动,如生产准备、生产管理、生产过程等。产品/过程模型则按自然规律描述可实现的每一物品(或过程)的特征、功能、属性和动作等。笔者认为在产品/过程模型中,虚拟加工过程的建模及仿真是最基础的工作,涉及面也最广。因此,对该问题的研究具有十分

---

\* 1998年2月27日收稿

第一作者:柳卓之,男,1964年生,博士生

重要的意义。

## 1 虚拟加工过程 VMP(Virtual Machining Process)

虚拟加工过程是指在数控机床上进行的加工过程在虚拟环境下的映射。为追求“身临其境”的逼真性和“超越现实”的虚拟性<sup>[4]</sup>,虚拟加工过程应满足如下要求:

- (1) 全面、逼真地反映现实的加工环境和加工过程;
- (2) 能对加工中出现的碰撞、干涉提供报警信息;
- (3) 能对产品的可加工性和工艺规程的合理性进行评估;
- (4) 能对产品的加工精度进行评估、预测;
- (5) 必须具有处理多种产品和多种加工工艺的能力。

图 1 所示为虚拟加工过程的建模过程。图中也反映了虚拟加工过程的构成。

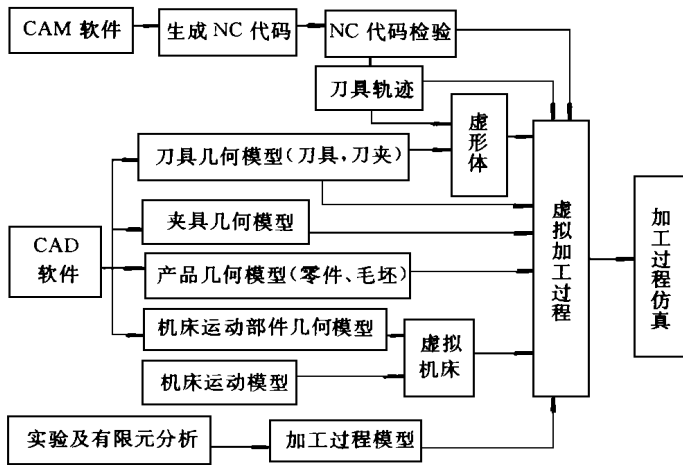


图 1 虚拟加工过程的建模过程

## 2 虚拟加工过程的建模

### 2.1 产品建模

产品模型是加工过程中各类实体对象的集合,包括毛坯、中期产品模型、目标产品模型、刀具、夹具、机床以及其他制造资源和环境物,它们的三维数字模型可采用通用的 CAD/CAM 软件来建立。

### 2.2 虚拟机床建模

虚拟机床是虚拟加工过程的具体实施者,由几何模型和运动模型构成。虚拟机床的几何模型由床身和各运动部件的几何模型组装而成。各构件的三维数字模型根据其实际形状和大小分别建模。如图 2 为一四坐标卧式加工中心的简化模型。图中虚拟机床中有两个坐标系,一个是机床的绝对坐标系  $X'Y'Z'$ ,另一个是虚拟环境的图形显示坐标系  $XYZ$ 。由于加工中心的刀具换刀位置是固定的,故将机床坐标系的原点定在换刀位置的中心。为了方便安装工件和夹具,将图形坐标系的原点定在工作台安装面的中心。两者之间为平移关系,平移矩阵  $B$  见后。

虚拟机床中一个运动部件对应一个坐标,如图 2 所示,工作台、部件 1、2、3 分别对应于坐标  $B$ 、 $X$ 、 $Z$ 、 $Y$ 。各运动部件及床身按一定规律构成一运动链,并规定运动链为起始于工作台,终止于机床主轴,如图 3 所示。运动链中相邻部件间存在接触关系,床身为不动件,以其为界将运动链分为两段,每一段均具有层次结构。即每段中离床身近者运动时,离床身远者均将随之而动。如部件 2 沿  $Z$  坐标运动时,工作台和部件 1 将随之沿  $Z$  坐标运动;而部件 3 沿  $Y$  坐标运动时,主轴将随之而动。

虚拟机床的虚拟运动由各运动部件的平动、转动及相互间的联动构成。多个运动部件的联动采用类似实际数控机床的插补算法<sup>[6]</sup>可转化为单运动部件的平动或转动。因此,虚拟机床的运动可通过对部件

进行平移和旋转变换来实现。虚拟运动速度由平移和旋转的步距值来控制。

由于不同数控系统对某些 G 指令如点位加工指令 G81~G89 的功能的设置不同, 刀具的补偿算法也不同, 因此虚拟机床应设计成能适应不同数控系统的开放式结构。

### 2.3 仿真过程建模

虚拟加工过程是由 NC 指令控制刀具运动完成的。在执行每一段 NC 指令的过程中, 刀具从某一起始位置经某一路径运动到另一位置。在此过程中, 刀具在空间扫过了一定的体积, 可以把刀具在运动过程中包络的空间形体称之为“虚形体”(Swept Volume Solid)。如图 4 所示, 图 4(a) 中的圆柱铣刀(切削刃部分)沿刀具轨迹 AB 运动后形成如图 4(b) 所示的虚形体。与实际形体相对而言, 它并非真实形体, 但在计算和建模时, 可以把它作为真实形体来处理。虚形体与刀具本身的几何形状、刀具运动的轨迹以及刀具运动的起始位置都有着密不可分的联系。由于虚形体是由静态物体在运动过程中形成的, 因此采用静态物体(刀具)边界曲面在运动中形成包络面的方法对虚形体进行建模。

将虚形体与其它静态形体进行求交运算, 可检查加工过程中的碰撞和干涉; 而将毛坯与虚形体进行求差运算, 可仿真材料的去除过程。因此, 通过对虚形体的建模, 可实现对加工过程的仿真。

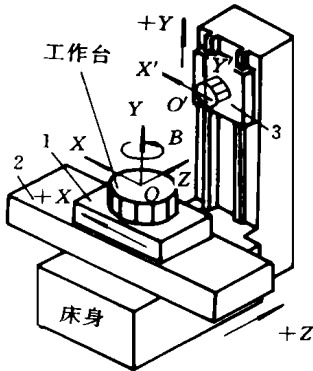


图 2 四坐标虚拟机床

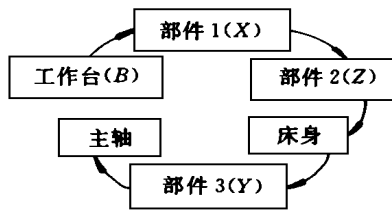


图 3 虚拟机床运动链

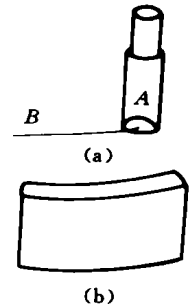


图 4 虚形体建模

## 2.4 加工过程的建模

加工过程模型表示所有用于代表产品行为和制造过程的物理模型, 包括各种加工方法对应的切削过程中的热变形、切削力作用下系统刚性变形、夹紧变形及振动模型等。加工过程模型是评估和预测产品加工精度和可加工性的主要依据, 它们的建立与加工方法、切削条件(刀具结构形状、刀具材料、工件材料等)和切削用量等有关。具体的数学模型可通过实验或有限元分析建模来建立。如文献[7]介绍了一种铣削过程中在铣削力作用下的二维振动模型, 并以图形仿真方式分析了其对加工精度的影响。

## 3 加工过程仿真

### 3.1 仿真的目的:

(1) 使设计者能够在设计阶段了解其所设计的产品的加工工艺过程和通过所形成的数控指令的模拟加工过程显示, 了解该产品的可加工性, 并以此为依据, 改进所进行的产品的设计, 使设计在满足性能要求的前提下, 减少制造成本。

(2) 检验加工过程可能发生的碰撞和干涉, 主要有以下情况:

- 刀具在非加工状态(如快进、快退、换刀等), 此时碰撞主要是刀具与工件、夹具及运动部件间的碰撞;
- 刀具在工进状态(如直线插补、圆弧插补等), 此时主要发生过切和欠切情况;
- 运动超程等。

### 3.2 仿真环境的建立

建立仿真环境主要包括定义虚拟机床、刀库和刀具, 安装夹具、毛坯和工件。

定义刀库包括按加工顺序定义刀号、确定刀具类型及其结构大小、刀夹等,对结构非标的刀具则从刀具模型库中选择刀具几何模型,结构为回转件的刀具则确定其直径、切削部分长度、总长等。

定义虚拟机床包括根据加工要求确定机床类型、坐标数、控制系统、机床坐标原点、图形坐标原点和编程原点。缺省状态下以图形坐标系的原点为编程原点(G54)。

产品(夹具、毛坯和工件)在工作台上的初始安装可通过将产品坐标系的原点与图形坐标系的原点重叠来实现,实际安装位置可通过对产品相对图形坐标原点进行平移变换得到。产品建模时坐标系一般是固定的,而对不同机床来说其坐标系是不一样的,因此当在工作台上安装夹具或毛坯时,其在图形坐标系中的位置由如下的坐标变换来确定:

$$(x, y, z, 1) = \mathbf{A} * \mathbf{B} * (x_1, y_1, z_1, 1)$$

式中 $(x_1, y_1, z_1)$ 为产品坐标系中的一点, $(x, y, z)$ 为虚拟环境中图形坐标系下的相应点。

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \mathbf{B} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ x_0 & y_0 & z_0 & 1 \end{pmatrix}$$

$a_{11} \sim a_{33}$ 取值为0或1,具体可通过选择产品坐标系的某一坐标面,如 $XOY, XOY, XOZ, XOZ, YOZ, YOZ$ 之一,与图形坐标系的坐标基面 $XOY$ 面重叠来确定。 $(x_0, y_0, z_0)$ 为工作台安装面的中心在机床坐标系中的坐标值,即机床坐标系相对图形坐标系沿 $X, Y, Z$ 三个方向的平移步距。

### 3.3 加工过程仿真

加工过程的仿真采用如下三种形式:

(1) 刀具运动轨迹仿真,此时只是刀具按运动轨迹围绕毛坯运动,目的是直观检验刀具运动轨迹的合理性。(2) 机床运动过程仿真,此时将工件安装在机床工作台上,刀具运动轨迹分解为机床各运动部件的运动,目的是直观检验刀具与机床部件及机床部件间的碰撞和干涉。(3) 材料去除过程仿真,此时刀具按其运动轨迹对毛坯进行材料切除,目的是模拟实际的切削过程,生成产品加工结果模型,对加工精度和可制造性进行评估。

### 3.4 加工误差的评估

将产品零件的理论模型与毛坯去除材料后得到的加工模型求差,可得到加工误差模型。加工误差模型中,加工区域按误差大小的不同以不同的颜色表示,通过对其进行直观检查,可对加工误差的大小及其可能产生的原因进行分析、判断,并为产品的可制造性评估提供依据。

## 4 结论

本研究工作以某厂某精密复杂零件的加工过程为对象,在高档微机上建立了其虚拟加工过程,模拟实际的加工状况,仿真结果与实际加工情况相符,从而有效地提高了生产效率,确保了产品质量。系统的几何建模和NC代码的生成采用法国Matra公司的Euclid Quantum软件完成。

建立虚拟加工过程不仅为未来建立虚拟制造系统奠定基础,而且还可以在以下几方面发挥现实的积极作用:(1)培训NC代码编程人员和数控机床操作人员;(2)数控设备选型;(3)评估加工精度;(4)检验NC代码正确性;(5)评估产品的可加工性;(6)评估工艺规程的合理性。

## 参考文献

- 1 雷源忠. 美国科学基金会设计与制造领域资助者会议. 中国机械工程, 1997, 8(3): 92 ~ 93
- 2 Kimora F. Product and Process Modelling as a Kernel for Virtual Manufacturing Environment. CIRP Annals, 1993, 42(1): 147 ~ 150
- 3 Iwata K. A modelling and Simulation architecture for Virtual Manufacturing Systems. CIRP Annals 1995, 44(1): 399 ~ 402
- 4 汪成为. 灵境技术: 对逼真性和虚拟性的追求. 科学, 1995, 48(4): 11 ~ 14
- 5 Wang W P, Wang K K. Geometric Modelling for Swept Volume Solids. IEEE Computer & Application, 1986, 6(12): 8 ~ 17
- 6 杨岳, 柳卓等. CAM 技术与应用. 北京: 机械工业出版社, 1996: 134 ~ 145
- 7 Tang Y S, Chang W S. Dynamic NC simulation of milling operation Computer-Aided Design, 1993, 25(12): 769 ~ 775