

文章编号 1000-5013(2003)03-0275-06

# 结构-运动特性矩阵的 NC 程序验证及效果

王大镇<sup>①</sup> 韩荣第<sup>②</sup>

(① 集美大学机械工程学院, 福建 厦门 361021; ② 哈尔滨工业大学机电学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要** 提出一种基于微机实现加工中心运动仿真的有效方法,使几何验证环境按照由简到繁的层次化建模方式来实现.给出用于实现5轴数控加工中心运动仿真的二叉有向构造图,以及结构运动特性矩阵.将加工中心的几何结构信息和运动方式信息,有效地统一在一个矩阵中,方便了运动仿真算法对数据的处理.又给出了基于该环境的运动仿真实例和复杂曲面 NC 程序验证效果.运行结果表明,该解决方案是在微机上实现复杂曲面 NC 程序验证的有效方法,能拓展 NC 程序验证系统的应用范围.

**关键词** 加工中心, 结构-运动特性矩阵, NC 程序验证

**中图分类号** TG 519.1 TP 273+.5

**文献标识码** A

数控程序的自动化验证对于保证加工质量,提高加工效率具有重要意义<sup>[1~4]</sup>.尤其对于在5轴加工中心上进行复杂曲面的铣削加工,更是如此.复杂曲面数控铣削程序验证的基础是虚拟 NC 验证环境的建立.对此,研究人员已进行了一些有效的研究,比如文献[1]为了体现加工中心的层次装配关系以及方便加工中心几何建模的建立,就提出了基于体素-零件-部件-加工中心的层次式建模方法.但是,它并没有说明如何对加工中心进行有效的分解.加工中心的运动仿真在 NC 程序验证中的作用已引起许多科研工作者的高度重视,并开展了相关的研究工作,但尚有一些问题有待解决.首先,在运动学建模上,以往的建模方法过分着眼于运动的科学计算,不利于运动过程的可视化的实现<sup>[2]</sup>.其次,以图形工作站为硬件基础的运动仿真,导致硬件投资过于昂贵,因而限制了 NC 程序验证系统的推广应用<sup>[3]</sup>.针对这些问题,本文以复杂曲面 NC 程序验证为目的,以个人计算机为硬件基础,开展了多轴数控加工中心运动仿真建模方法的研究.

## 1 仿真验证系统的基本概念框架

NC 程序验证是对加工过程动态模型的试验,即虚拟 NC 验证模型在某些试验条件下被行为产生器驱动,产生模型行为.该 NC 验证系统主要包含3个成分:(1)模型及检验条件的描述;(2)行为产生器.它在规定的试验条件下驱动模型,从而产生模型行为,即系统模型中的

收稿日期 2003-02-25

作者简介 王大镇(1962-),男,讲师,博士, E-mail: dazhenwang@263.net

基金项目 福建省青年创新基金资助项目(2001J021)

© 2003 China Academic Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

状态变量随时间变化的轨迹行为。(3) 模型行为及处理. 对由行为产生器产生的模型行为进行处理、分析和输出。

根据上述 3 个要素的关系, 可以构成数控加工 NC 程序验证系统的基本概念框架。(1) 模型描述. 虚拟 NC 程序验证模型, 它包括由机床部件、卡具、刀具模型库和工件模型组成的几何模型, 以及数控加工设备的运动模型和以刀具为核心的加工过程动力学模型。(2) 行为产生器. 从 NC 代码中获取必要的信息, 进行碰撞干涉、精度检验和刀具负载的计算。(3) 行为处理器. 在复杂曲面 NC 验证系统中, 行为处理器的主要作用是实现行为数据的可视化处理。例如, 加工设备的运动仿真、发生碰撞时的警告提示以及过切或欠切区域的图形显示等等。

这种复杂曲面 NC 程序仿真验证环境具备下面几项主要功能. 它们分别是数控程序的解释功能、几何造型功能、加工设备的三维运动仿真功能、碰撞检测的功能、精度检测的功能、真实感图形显示的功能等。本文重点阐述基于结构-运动特性矩阵的加工中心运动仿真, 其它关键技术参见文献 [4]。

## 2 验证环境的几何分解

虚拟验证环境由零件模型、卡具模型、刀具模型和加工设备模型组成。在数控加工过程中, 零件、卡具、刀具都是通过某种方式固联在加工设备上。因此, 可将零件、卡具、刀具看作加工设备的一部分。所以, 虚拟验证环境几何建模的核心是加工设备的几何建模问题。5 轴数控加工中心, 它在复杂曲面加工中是一种非常典型的加工设备。因此, 本文以 5 轴数控加工中心为例并采用面向对象的方式, 以说明虚拟验证环境的几何建模。

加工中心是一个层次式的装配体, 其组成部件的对象可分为两类。其中一类是具有运动特性的对象, 另一类是静止的对象。运动对象包括主动操作对象和被动操作对象, 是由多个具有自由度的对象组成。静止对象和部件对象则由零件对象组成。所有这些类型的对象实例, 都是具有明确物理意义的相对独立的实体。为了体现加工中心的层次装配关系以及方便加工中心几何模型的建立, 实现对加工中心有效的分解, 本文提出了 4 条分解准则。它们分别是系统分解准则、加工设备分解准则、部件分解准则和复杂零件分解准则。

按照上述 4 条层次化分解准则, 可以将虚拟 NC 验证环境最终分解成若干基本体, 如长方体、圆柱体、圆锥体和球等。这样, 以搭积木的方式, 将这些基本体组织在一起, 就可完成几何建模的工作。

## 3 加工设备的运动仿真

几何模型, 它仅反映了虚拟对象的静态特性; 而加工过程验证模型, 还要求能表现虚拟对象在加工环境中的动态特性。于是, 这就必然涉及到运动建模的问题。

### 3.1 加工中心的几何结构特点和运动特性分析

多轴数控加工中心在几何上一般采用模块化的设计方法<sup>[6]</sup>, 并具有一些几何结构特点。多轴数控加工中心各组成模块, 具有层次式的装配关系。在工作过程中, 各组成模块相互间的装配关系不变, 只有相对位置发生变化当被加工的零件及相应的卡具安装在工作台上后, 它们之间的装配及相对位置关系均不发生变化。加工中心各运动轴是由相应的伺服系统驱动的。当几

个轴同时进给时, 可以完成直线、平面、曲线或空间曲面的加工. 分析加工中心的工作过程, 可知其具有如下一些运动特性. (1) 各运动部件具有一定的运动范围, 且运动坐标系符合直角笛卡儿坐标系. (2) 每一个运动部件有且只有一种运动类型, 多轴数控加工是通过几个运动部件同时运作实现的. (3) 加工中心的运动轴具有层次化的相对运动关系, 即某一部件运动会带动另一部件及其上其它零部件的运动. (4) 由同一段数控程序控制的加工中心各部件的运动应同时开始, 同时结束, 即在相同的时间段内完成.

### 3.2 加工中心结构-运动模型的建立

针对如图 1 所示的 5 轴数控加工中心来说明其结构-运动模型的建立. 图中,  $A$  向转动的工作台随  $B$  向转动而转动, 具体结构相当于在  $B$  向转动的工作台固联了一个分度头. 不难理解, 加工中心的运动仿真, 实际上是要解决各运动部件如何按照数控程序的要求协调运动的问题.

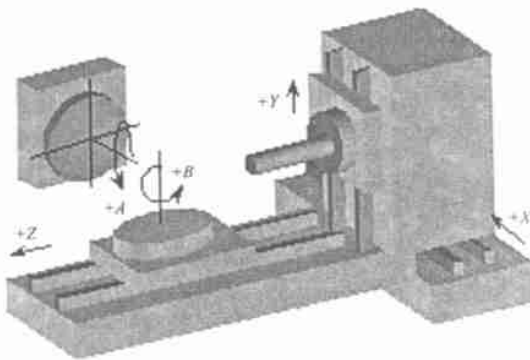


图 1 5 轴数控加工中心

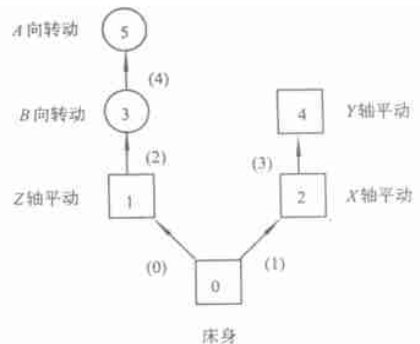


图 2 加工中心的二叉有向构造图

题. 因此, 加工中心运动仿真的基本研究对象是受数控程序控制的各运动部件. (1) 二叉有向构造图. 将图 1 所示的加工中心抽象为如图 2 所示的二叉有向构造图. 图中每一节点代表加工中心相应的运动部件. 之所以称其为二叉有向构造图, 是因为该图具备两个基本特点. (a) 图中具有两条分支. 不管加工中心的结构如何变化, 其运动的最终目的是要完成刀具对工件的加工, 即实现刀具和工件之间的相对位置关系的变化. 因此, 加工中心中存在两条运动链, 而刀具和工件则分别固定在两条运动链的端节点上. (b) 图中含有带箭头的线段. 这些带箭头线段的作用有两个: ( ) 表明加工中心运动的传递途径; ( ) 体现了加工中心各运动部件之间结构上的继承关系. 在二叉有向构造图中采用了两类节点, 用来表示各运动部件之间的运动方式. (a) 圆节点. 箭头指向的节点为圆节点, 表示该节点与同一箭头背离节点之间的运动副是转动副, 即两节点之间只存在绕销轴的转动. (b) 方节点. 箭头指向的节点为方节点, 表示该节点与同一箭头背离节点之间的运动副是移动副, 即两节点之间只存在沿滑枕的平动. 规定箭头指向的节点相对箭头背离的节点运动, 且各节点的编号遵循如下规则. (a) 假设图中的节点数为  $n$ , 沿箭头所指方向, 将两条分支的端点分别标为  $n-1$  和  $n-2$ . 然后, 去掉这两个端节点. (b) 按同样方法, 将两个新端点分别标为  $n-3$  和  $n-4$ , 以此类推. (c) 床身的标号为 0. 图中箭头的编号遵循同样的原则. 这种编号规则的优越性, 读者可从加工中心的结构-运动特性矩阵中体会到. (2) 结构-运动特性矩阵. 通过二叉有向构造图的绘制, 工程技术人员可以凭借一种更加简单、直观的方式了解加工中心的基本结构, 运动的传递途径和各运动部件相互间的运动方

式.但是,它却不利于计算机程序的处理.因此,我们提出加工中心结构-运动特性矩阵的概念来解决这个矛盾.对二叉有向构造图所包含的加工中心,其各部件结构之间的继承关系和运动方式信息进行抽象处理.这可用  $n \times n$  的矩阵( $n$  等于二叉有向构造图中的节点数)表示,如表 1 所示.这种  $n \times n$  的矩阵在数据的组织上有下列一些特点.(1) 每行代表二叉有向构造图

表 1 加工中心运动-结构特性分析

项 目	(0)	(1)	(2)	(3)	(4)	运动方式
0 (床身)	1	1	0	0	0	0
1(Z 轴平动)	- 1	0	1	0	0	Z
2(X 轴平动)	0	- 1	0	1	0	X
3(B 向转动)	0	0	- 1	0	1	B
4(Y 轴平动)	0	0	0	- 1	0	Y
5(A 向转动)	0	0	0	0	- 1	A

中的一个节点,并按序号递增顺序从上到下依次排列.(2) 前  $n-1$  列分别代表二叉有向图中的一个箭头,并按序号递增顺序从左到右依次排列.(3) 在每一列,箭头指向的节点标为  $-1$ ,箭头背离的节点标为  $1$ ,其它节点标为  $0$ .(4) 最后一列为运动方式列,除床身标  $0$  外, $X,Y,Z,A$  和  $B$  是数控程序提供的运动参数.该矩阵能够忠实地反映出在二叉有向构造图中,蕴含的加工中心的基本结构和各部件之间的运动方式信息.因此,我们将其称为加工中心的结构-运动特性矩阵.可以看出,由后  $n-1$  行和前  $n-1$  列组成的子矩阵是一个比较规整的上三角阵.这是由二叉有向构造图中节点的编号原则决定的,在数值处理时会带来许多方便.这样,在一个  $n \times n$  矩阵中包含了加工中心运动仿真所需要的几何结构信息和运动方式信息,方便了运动仿真程序的处理.

3.3 结构-运动特性矩阵的运动仿真算法

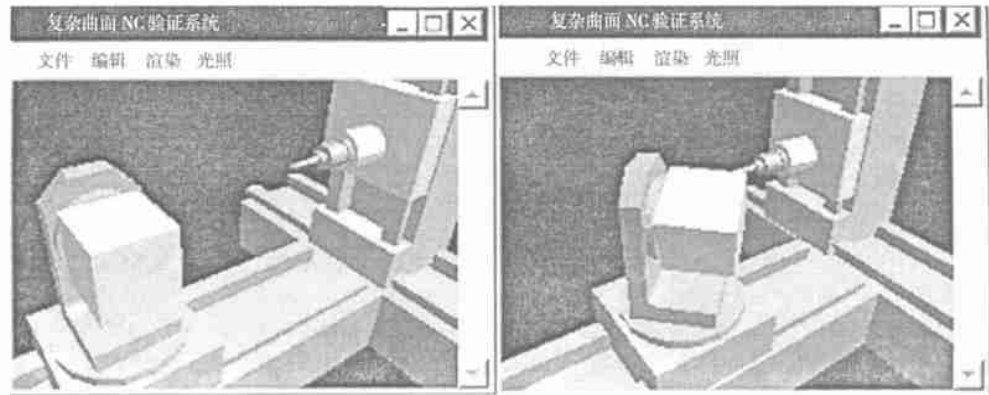
在结构-运动特性矩阵的基础上,开发了加工中心的运动仿真算法,下作具体描述.(1) 根据矩阵中运动方式列提供的运动参数,可构造相应的平移或旋转齐次变换矩阵  $T_j$  (第  $j$  行对应的齐次变换矩阵).(2) 考查结构-运动特性矩阵提供的几何结构信息,即前  $n-1$  列,后  $n-1$  行构成的子矩阵,确定齐次变换矩阵的作用对象.具体过程,可用伪码描述为

```
For(j = 1; j < n; j++) //j 行变量
  For (k= j+ 1; k< n; k++) //k 行变量
  {
    For(i= 0; i< 4; i++) //i 列向量
    {
      if(元素[j][i] = 1)
        if(元素[k][i] = - 1 && k> j) //说明 k 行对应的运动部件是 j 行
          //对应运动部件的子部件, Tj 同时
          //作用于 j 行和 k 行
          //对应的运动部件;
        else //说明 j 行对应的部件相对于床身运动, Tj 只作用于 j 行对应的
          //运动部件;
```

}  
至此,通过(1),(2)两步的处理,就可以很方便的将数控程序中的运动数据传递给相应的运动部件,实现加工中心的运动仿真.

### 3.4 运动仿真应用实例及 NC 程序验证效果分析

在介绍运动仿真应用实例和分析 NC 程序验证效果,我们将引入图 3,4 加以说明.(1) 应



(a) N30 执行前的图像 (b) N30 执行结束后的图像

图3 WAHLI 200 加工中心的运动仿真

用实例 以上面所述的算法为基础,利用 Visual C++ 6.0,编写了用于曲面加工的应用软件.下面叙述运动仿真应用实例.(a) 加工中心.瑞士 Bevilard 公司的 5 轴加工中心 WAHLI 200,如图 1 所示.(b) 毛坯.正方体,边长 160 mm.(c) 刀具.球头锥铣刀  $\alpha=5^\circ$ ,  $r=3\text{ mm}$ ,  $a=0$ ,  $h=120\text{ mm}$ .(d) 运行环境.奔腾 个人电脑,256 M 内存.(e) 测试运动仿真的数控代码为

N20, G01, X0.126, Y0.273, Z1.769, A0.000, B0.000,  
N30, X21.612, Y-10.000, Z-15.872, A20.000, B45.000.

图 3(a) 所示为 N20 执行结束和 N30 执行前的图像,而图 3(b) 所示为 N30 执行结束后的图像.从图中不难看出,加工中心的运动仿真可使工程技术人员以一种更加直观的方式了解加工过程中各几何体间相互位置关系的变化.由于这里的几何体除了传统意义上的工件和刀具以外,还包括组成机床的各种运动部件以及卡具等.因此,它可提高验证过程的直观程度和 NC 验证结果的可靠性.(2) NC 程序验证效果分析.我们建立的 NC 程序验证仿真环境,不仅具有加工设备运动仿真的功能,而且还具有碰撞、精度和真实感显示等项功能.如图 4 所示,它是该仿真环境下的开式叶轮碰撞检测实例.其中,检验环境同上,工件为开式叶轮,它的检测数据(代码)为



图4 开式叶轮碰撞检测实例

$N40, G01, X2.370, Y0.563, Z1.890, A0.000, B0.000,$   
 $N50, X24.612, Y-10.126, Z-13.349, A25.000, B40.000.$

从图中可见,当数控程序由 N40 运行到 N50 的过程中,发生了碰撞.

## 4 结束语

本文介绍了一种用于实现复杂曲面 NC 程序验证新的仿真环境建立方法.它已应用于复杂曲面 NC 程序检验系统中,并证实是一种良好的解决方法.本方法与其它方法相比,具有如下 2 个特点.(1) 更有利于实现运动过程的可视化.(2) 在个人计算机上实现了复杂曲面 NC 程序的仿真检验,拓展了 NC 程序检验系统的应用范围,具有较大的推广价值.

## 参 考 文 献

- 1 刘卡林.面向加工中心的多轴数控加工仿真软件平台研究[D]:[博士学位论文].哈尔滨:哈尔滨工业大学机械工程系,1995.1~36
- 2 黎 坚,周艳红,龚 海.多坐标数控机床通用运动学模型的建立[J].中国机械工程,1998,10(1):4~6
- 3 Fu Chen, Hong Senyan. Configuration synthesis of machining centres with tool change mechanisms[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 1999, 62(39): 273~295
- 4 蒋英兰,王大镇,韩荣第等.分层索引模型的 NC 程序碰撞检测新方法[J].华侨大学学报(自然科学版), 2002, 23(2): 172~176

## NC Program Verification of Structure-Motion Characteristic Matrix and Its Effect

Wang Dazhen<sup>①</sup>      Han Rongdi<sup>②</sup>

(<sup>①</sup> College of Mech. Eng., Jimei Univ., 361021, Xiamen, China;

<sup>②</sup> College of Electromech. Eng., Harbin Inst. of Tech., Harbin, China)

**Abstract** A PC-based method is presented for realizing effectively motion simulation of machining center. The method is characterized prominently by the hierarchical modeling of the environment of geometric verification in a way from simple to complex. The authors give here the binary directed structural diagram and the structure-motion characteristic matrix for realizing motion simulation of 5 axis NC machining center, by which the information of geometric structure and the information of motion pattern from machining center can be effectively integrated into one matrix and the data processing by algorithm of motion simulation can thus be facilitated. In addition, the author give here an example based on motion simulation of this environment and also the effect of NC program verification of complex curved plane. As shown by result of operation, this settling plan is an effective method for realizing the NC program verification of complex curved plane on PC, it extends the application of NC program verification system.

**Keywords** machining center, structure-motion characteristic matrix, NC program verification