

虚拟加工及其关键技术研究

郑 赟, 张林锺, 肖田元

清华大学自动化系, 国家 CIMS 工程技术研究中心, 北京 100084

[摘要] 虚拟加工的应用是当前产品零件加工的发展趋势。分析了虚拟加工的基本概念和内涵, 在此基础上探讨了其关键技术, 包括几何建模、数控代码翻译、干涉检验和材料切除仿真等, 进而提出了一个虚拟加工系统的典型体系结构。最后介绍了清华大学国家 CIMS 工程技术研究中心开发的一个虚拟加工软件系统——通用加工过程仿真器 (GMPS), 该系统已初步应用于工程实际项目并取得良好效果。

[关键词] 虚拟加工; 仿真; 数控代码; 通用加工过程仿真器 (GMPS)

[中图分类号] TP391.9

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-7857(2007)04-0025-06

Research on Virtual Machining and Its Key Techniques

ZHENG Yun, ZHANG Linxuan, XIAO Tianyuan

Department of Automation, National CIMS Engineering Research Center, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract: The virtual machining represents a trend in the machining of product parts. In this paper, based on the analysis of the concept and connotation of virtual machining, some of its key techniques are discussed, including geometry modeling, numeric control code translation, interference detection and material removal simulation. A typical architecture of virtual machining system is presented, based on which, a virtual machining system named as General Machining Procedure Simulator (GMPS) is implemented at the national CIMS Engineering Research Center (CIMS-ERC) in Tsinghua University. Now the system has been applied to practical engineering projects and some benefits are gained.

Key Words: virtual machining; simulation; numeric control code; GMPS

CLC Number: TP391.9

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2007)04-0025-06

0 引言

当前, 随着产品更新换代周期的不断缩短、市场竞争的日益加剧, 传统的少品种、大批量自动化作业的概念已不再适用于当前时代的产品制造潮流, 代之而起的是多品种、小批量的自动化生产。CAD/CAM 系统的应用, 给新的生产自动化带来了福音。然而在实际的制造系统中, 由于一般的 CAD/CAM 系统在零件设计时未能完全考虑因工件的复杂性和装夹变化带来的零件与刀具、刀具与夹具、刀具与工作台的干涉和碰撞, 经 CAD/CAM 设计、分析的零件在投入正式的加工之前要进行试切这一步骤, 而且随着数控 (以下简称 NC) 编程的复杂化, NC 代码的错误率也越来越高, 如果 NC 程序

生成不正确, 就会造成过切、少切, 或加工出废品, 也可能发生上述的各种干涉和碰撞, 一旦出错, 将会带来巨大的损失。

试切的过程也就是对 CAD/CAM 系统生成的 NC 程序的检验过程。传统的试切是采用塑模、蜡模或木模在专用设备上进行的, 需要技术人员在整个过程中进行监控。而且试切过程本身具有危险, 如刀具和夹具或工作台之间发生的碰撞、进给不合理导致的刀具破坏等。因此这种做法不但浪费人力物力, 而且延缓生产周期, 增加产品开发成本、降低生产效率, 极大地影响制造系统的性能。

另一方面, 由于计算机性能的不断改善以及计算

收稿日期: 2007-01-22

基金项目: 国家 863 计划项目 (863-511-030-003)

作者简介: 郑 赟, 男, 清华大学国家 CIMS 工程技术研究中心, 硕士研究生, 主要从事虚拟加工、面向装配与制造的设计 (DFMA) 等领域的研究; E-mail: y-zheng05@mails.tsinghua.edu.cn

张林锺 (通讯作者), 男, 清华大学国家 CIMS 工程技术研究中心, 副研究员, 主要从事虚拟制造、虚拟装配、面向装配与制造的设计、网络化制造等领域的研究; E-mail: lxzhang@tsinghua.edu.cn

机图形学技术的迅猛发展, 计算机仿真技术在制造系统中得到了广泛的应用。如果采用计算机上的仿真加工来替代或减少实际的试切工作, 就可以大大缩短产品的生产周期, 降低其制造成本, 增加整个产品的市场竞争力。在这样的背景之下, 虚拟加工应运而生。

1 虚拟加工概述

结合目前国内外的研究, 本文对虚拟加工作如下定义。

虚拟加工是实际加工过程在计算机上的本质实现^[1], 即采用计算机仿真技术, 对加工中心进行建模, 由此在计算机上实现如车、镗、铣、钻等实际产品加工的本质过程, 为虚拟制造建立一个真实的可视化的加工环境。

由此可见, 虚拟加工虽然不是实际的加工, 但却能实现实际加工的本质过程, 并且可以全面逼真地反映现实的加工环境。在计算机仿真技术的支持下, 虚拟加工可以实现实际加工过程在虚拟环境中的完全映射, 同时无需消耗额外的实际资源。因此可以通过在计算机上实现虚拟加工环境, 用以仿真和评测各加工过程对产品性能和质量的影响, 以消除设计中的不合理成分, 增强对产品加工的预测能力和决策水平, 提高加工质量和加工效率, 最终提高产品的加工和制造水平。

从开发实现的角度来说, 虚拟加工系统的实现主要集中在加工过程仿真。加工过程仿真的研究一直是 CAD/CAM 技术的一个研究热点。根据在 CAD/CAM 中的不同阶段, 加工过程仿真系统可以分为 3 种: 编程过程中的图形检验、刀位驱动的切削过程图形仿真和 NC 驱动的加工过程仿真。在这 3 个方面国外都有相应的软件系统, 如 IDEAS-GNC 中采用了第 1 种图形仿真检验方法, 利用动态显示刀具来对整个走刀轨迹进行总体检查, 为了方便判断, 可灵活选择所要显示的型面图、观察视点, 利用窗口放大部分细节等。Cimplex 采用第 2 种仿真方法, 采用了加工件的逐步成型技术, 技术细节还不可知; Command 软件采用了第 3 种方法, 利用形体定义法可检验运动中的干涉问题。

由于目前的实际加工制造过程中大多采用数控系统进行控制, 而控制的输入则是 NC 代码, 因此在上述 3 种方法中, 适用范围比较广泛的是第 3 种, 即 NC 驱动的加工过程仿真。实际的虚拟加工软件系统则往往是以 NC 驱动的加工过程仿真系统, 即采用三维实体仿真技术, 以 NC 代码为驱动, 数控指令翻译器对输入的 NC 代码进行语法检查、翻译; 根据指令生成相应的刀具扫描体, 在指令的驱动下, 刀具扫描体与被加工零件的几何体进行求交运算、碰撞干涉检查、材料切除等, 并生成指令执行后的中间结果。所有这些虚拟加工过程均可以在计算机屏幕上通过三维动画显示出来。指

令不断执行, 每一条指令的执行结果均可保存, 以便查验, 直到所有指令执行完毕, 虚拟加工任务结束。

2 虚拟加工关键技术

结合前文对虚拟加工内涵的分析, 笔者认为虚拟加工的几个主要关键技术是几何建模技术、数控代码翻译、碰撞干涉检验以及材料切除过程仿真技术。

2.1 几何建模技术

虚拟加工要在计算机上实现加工过程, 那么必然需要对相关的机械设备进行几何建模, 包括零件的几何建模和加工设备的几何建模。

在单个零件的几何建模方面, 一般以 CSG 和 B-Rep, 或两者的混合表示为基础。建模方法中有简洁易行的平扫法、回转法, 还有特征造型和参数化造型方法, 在这方面, 现在已有许多的商用 CAD/CAM 软件, 如 UG, Pro/Engineer 等, 还有不少开源的 CAD 内核代码, 如 Open Cascade 等。它们往往都有一套成熟的零件几何建模方法, 可供参考。

在机械设备建模方面, 由于机械设备往往是较为复杂的装配体, 故需要采用合适的模型来表示其装配关系。一般采用两种方法来表示装配体中组成元件之间的相互关系。一种是直接存储元件之间的相互位置信息, 一般采用关联矩阵(Relationship Matrix), 另一种方法是只存储组件之间的配合、连接等装配信息。相比之下, 第 1 种方法所需存储的信息较多, 而且会产生浮点数累计误差, 但通用性较好, 可以表示任何的装配关系; 第 2 种方法要存储的信息较少, 而且较为精确, 但是只能表示已知的装配关系, 限制较大。从目前的研究和应用情况来看, 两种方法之中, 第 1 种方法更为普及, 例如在研究方面, Yu 等人采用关联矩阵的方法来表示装配关系^[2], 在实际应用方面, Pro/Engineer 等著名商用软件业也采用这种方法。

对数控机床的几何表示目前还没有一个公认的标准模型, 数控机床有它自己的结构特点, 它的几何模型既要适应加工过程中的快速显示, 又要便于描述它的运动, 建立其运动模型, 而且还应包含对几何误差建立的模型。在这一方面, 国内外学者也有相关的研究成果, 如 Lin 等^[3]在如何将误差模型集成到加工仿真过程方面进行了研究, 上海交通大学的刘国良等^[4]提出了一种针对三轴加工中心的数控机床几何误差的综合模型, 等等。

2.2 数控代码翻译

数控代码是指在数控加工程序中用来描述工艺过程的各种操作和运动特征的各种准备功能的 G 指令和辅助功能的 M 指令及其他一些指令。为了能在计算机中实现虚拟数控机床的加工过程, 需要对 NC 代码进行正确的翻译, 因此 NC 代码翻译器成为虚拟加工系统中

必不可少的核心模块。NC 代码翻译器用于指挥虚拟机床的动作和状态,机床的一切动作和状态都要受 NC 代码翻译器的控制。20 世纪 70 年代以来,随着数控图形编程和实体显示技术的迅速发展,对 NC 代码翻译器的需求也日益强烈。因此 NC 代码翻译成为了虚拟加工系统实现时首要考虑的关键技术。

一个完整的 NC 代码翻译器需要完成两个基本功能:NC 代码的检错和翻译^[5]。检错,即按照该数控系统的编程规定和有关数控加工的常识,对 NC 代码进行词法分析、语法分析、语意分析,从而检查出该 NC 代码的词法错误、语法错误、逻辑错误(其中包括数据不合理、加工状态不合理等)。经过检错阶段,若 NC 代码未被查出错误,则进入翻译阶段。翻译指的是从 NC 代码中提取控制机床部件运动的有关命令动作和状态信息,将运动的数据按照位移和速度的变化划分成一系列时间片段,计算出各时间段机床坐标的位移,从而驱动机床模型的运动,实现 NC 代码驱动的加工过程仿真。

NC 代码翻译包括 5 个方面的基本功能,即机床初始化和预处理、词法分析、语法分析、语意分析、翻译执行。其功能结构如图 1 所示^[5]。

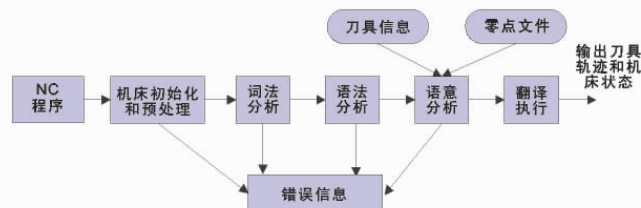


图 1 NC 代码翻译系统结构图

Fig. 1 Block diagram for NC code translation

1) 机床初始化和预处理:机床初始化包括读入 NC 代码、打开机床输出文件以及设置机床的必要参数,预处理则是要删除 NC 代码中不必要的字符如空格、注释语句、空语句等,同时,也进行一些错误检查,如注释符号匹配等。

2) 词法分析:识别出各程序段中各基本词法的单位——字,同时进行数据的合法检查。

3) 语法分析:按 NC 代码的语法规则进行语法检查;语法规则是在规则库中的,当某程序段需要进行语法分析时,翻译子系统会查询规则库中与该段中的 G 代码、M 代码相联系的语法规则,判断该段中的各代码、各地址是否符合该语法规则,从而完成语法分析。

4) 语义分析:按 NC 代码的语义规则进行语义检查,同时,翻译器要进行必要的数据处理,以便能使语义数据规则的检查得以进行。

5) 翻译执行:在前 4 步检查无错的情况下,执行所翻译的 NC 代码,将机床动作与状态信息输出给动画仿真部分,用来驱动机床模型进行动画仿真。

结合上述 5 个基本功能和合适的错误信息管理,就能构建一个良好的针对特定数控系统的专用 NC 代码翻译器,我国已有几家院校如华中理工大学、上海交通大学、哈尔滨工业大学等实现了某些数控系统的 NC 代码翻译器,应用情况良好。但是由于目前数控系统种类很多,各种数控代码之间差别很大,因此专用的翻译器适用面太窄。要解决这一问题,可以考虑基于模版的翻译方法,即由于各数控系统所完成的各个功能基本相同,可以按功能实现翻译器,并对各功能建立对应的函数库,里面存放不同数控系统中该功能的实现函数,这样实现的翻译器就可以动态地适用于多个数控系统,是一种通用 NC 代码翻译器。

2.3 实体碰撞干涉检验

计算机三维实体碰撞检测一直是计算机图形学领域的一个研究热点,从 20 世纪 70 年代以来,有许多专家学者对三维运动体碰撞检测方法作了大量的研究工作:1988 年 Canny^[6]提出了基于 B-Rep 多面体的动态体与静态间的碰撞检测方法;1989 年 Nobrio 等^[7]用八叉树实体表示检测动态与静态体间的碰撞问题;2004 年, Ding 等人^[8]研究了基于八叉树的碰撞检测算法并将其应用于 5 轴加工的干涉检测, Kim 等^[9]用球面矢量 Voronoi 图来解决高速运动中的碰撞检测问题;2005 年, Ilushin 等^[10]针对多轴加工过程提出了一种采用射线跟踪(Ray-tracing)来检测实体干涉碰撞的方法。总结这些研究不难发现,运动碰撞检测的算法可以分为 3 大类。

1) 离散样本检测法:对于运动物体,先取定一个时间样本,得到一个时间序列,再求出各运动物体在每个样本时刻的空间位置和方向,最后采用静态物体干涉检测算法来检测每一样本时刻各运动物体的相对状态。

2) 扫描体求交法:生成运动物体的空间扫描体,用扫描体来包含时间信息,通过扫描体间或扫描体与样本物体间的碰撞检测来完成整个样本空间、物体间的碰撞检测。

3) 连续检测法:把运动物体的特征数据(点线面)的运动轨迹表达成时间的函数,推导出满足碰撞条件的各几何元素的方程,通过求解方程来求得发生碰撞的位置和时间。

相比较而言,第 1 种方法的关键是样本空间的选取,若样本时间间隔太长,可能发生漏检,特别是对于高速运动状态下,漏检的可能性会很大,而若时间间隔短,则计算时间就会很长;第 2 种方法中的扫描体构造比较复杂,需要研究利用直线和扫描体交点问题来检测实体的碰撞;第 3 种方法比较适合于高速运动中的精确干涉检测,但是随着特征数据的增加,检测方程数量将急剧增加,检测时间会大大增加。从目前的应用情况看来,主要采用的还是前两种方法,但是随着计算机

性能的不提高,第3种方法的应用也会越来越多。

2.4 材料切除过程仿真

对于材料切除过程仿真,国内外也有一些研究成果,主要集中在相应的算法方面。如基于 Z-map 结构的算法^[11]、基于 Dixel 模型的快速成型算法^[12],等等。总的来说,材料切除过程的仿真主要有两个功能:一是检测是否过切、干涉、碰撞,以检测 NC 代码和刀位文件的正确性;二是通过逼真的三维动画来实现可视化仿真,为虚拟制造提供支撑环境。图 2 为一个典型的材料切除仿真子系统的功能结构图。

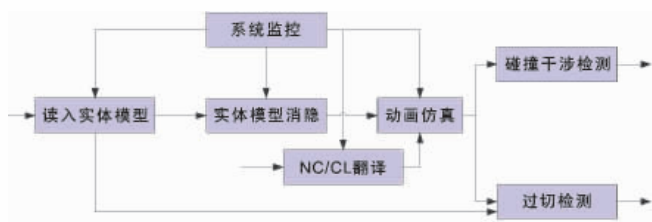


图 2 材料切除仿真系统结构图

Fig. 2 Block diagram for material removing simulation

材料切除过程仿真一般包括 7 个功能模块:系统监控模块、NC/CL(即刀位)文件翻译模块、读取实体模型模块、动画仿真模块、碰撞检测模块、过切检测模块、实体消隐模块。系统的输入是 NC 代码或 CL 文件,还有带有夹具、托盘的上线毛坯以及成型零件的实体模型文件(最常用实体的模型是 SLA 模型,即三角面片模型,其为商用 CAD 软件的通用实体输出格式标准)。在进行材料切除仿真之前,先由消隐模块对实体模型进行消隐预处理。在系统监控模块的控制下,由 NC 代码/刀位文件翻译器逐条解释加工指令并进行毛坯与刀具的布尔差运算;以动画的形式实时地仿真材料切除过程,并同时检测是否过切或有碰撞干涉,若有则提示相应的错误信息,并将其记录到相应的日志文件。

3 虚拟加工系统的体系结构

目前国际上已有不少较为成熟的商用虚拟加工软件,例如 VERICUT, MasterCAM, Deneb VNC 等。这些软件或为专门的虚拟加工软件,或带有加工仿真模块,在技术上比较成熟,已有较多的应用客户。

VERICUT 是由 CGTech 公司开发的一个加工仿真软件系统,结合该软件所提供的资料^[13],其简化的系统结构可以用图 3 表示。

如图 3 所示,VERICUT 可以从 CAD/CAM 中导入零件的加工模型和 NC 代码或刀位文件,并可以在软件内部进行加工设备建模和定义,并将完整的加工模型和 NC 代码输入到其核心的 VERICUT Verification (即

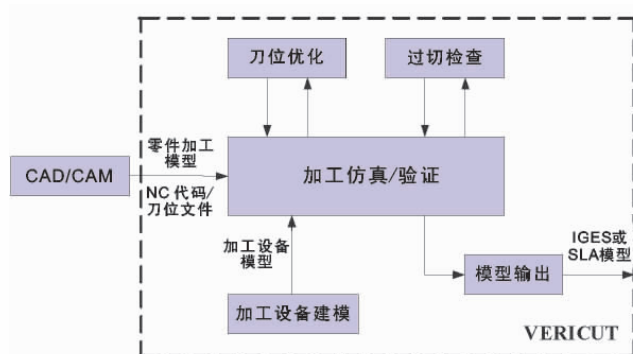


图 3 VERICUT 软件系统结构框图

Fig. 3 Flowchart of software VERICUT

加工仿真/验证)模块进行加工过程仿真和验证,同时进行刀位优化、过切检查等辅助处理,最后将仿真后的模型导出为常用的 IGES 格式或 SLA 格式的模型。

MasterCAM 是由 CNC 软件公司开发的一套 CAD/CAM 软件系统,其核心功能便是虚拟加工过程仿真。该软件系统的模块结构如图 4 所示。

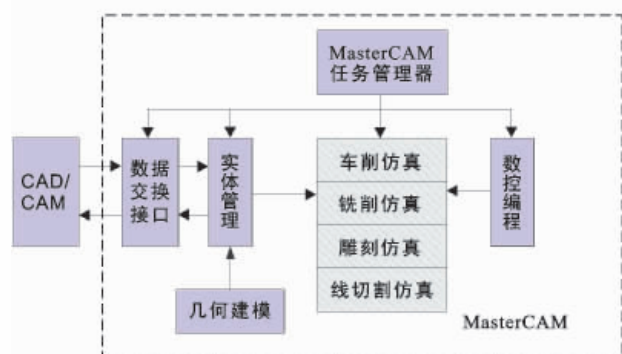


图 4 MasterCAM 软件系统结构框图

Fig. 4 Flow chart of software MasterCAM

MasterCAM 主要采用曲面建模技术来对加工零件和刀具进行建模,并有着优秀的 NC 刀位轨迹计算、编辑、验证和后置处理功能^[14]。该系统由其任务管理器来控制软件工作,通过数据交换接口与其他的 CAD/CAM 软件进行数据的导入和导出。其自带的实体管理模块,可以进行实体模型的定义、编辑等操作;数控编程模块,可以进行 NC 编程;在任务管理器的控制下,可将实体加工模型和 NC 代码输入到相应的仿真模块进行仿真验证。

结合国家 863 计划的有关项目研究,笔者提出了一个完整的虚拟加工系统的典型结构^[15-16],如图 5 所示,其包含如下功能模块。

1) 几何建模:进行加工中心设备的几何建模,包括简单体素定义和装配,以形成构成加工中心设备的主轴(箱)、工作台、换刀机械手、导轨及其他部分几何模

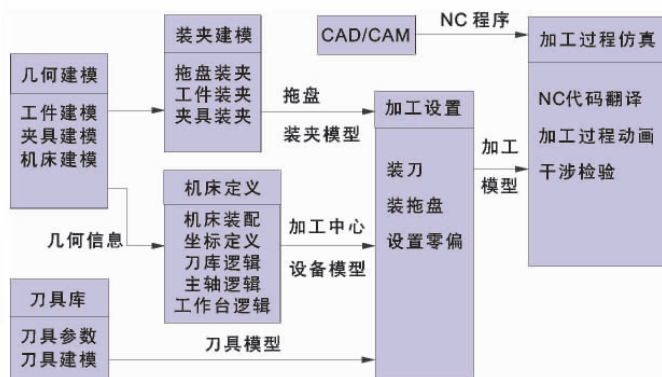


图 5 虚拟加工系统的典型结构框图

Fig. 5 Typical block diagram for a virtual machining system

型；对简单零件和毛坯进行几何建模或从其他 CAD/CAPP/CAM 系统转换零件的几何模型，实现工件毛坯及夹具在拖盘上的装夹定义。

2) 机床定义：对机床几何模型赋予加工轴、刀库、主轴、工作台等逻辑定义。

3) 刀库定义：对镗、铣、钻孔、车削等用的各类刀具参数进行定义和管理。

4) 加工任务设置：与加工相关的一些设置，包括刀库定义、工件装夹、零偏设置、NC 代码加载等。

5) NC 代码翻译转换：可支持多种控制器的 NC 代码解释，不仅可提取出驱动加工中心设备模型运动的数据，而且可提取各种加工状态信息和工作步骤信息，以支持工件材料切除的计算。

6) 加工过程仿真：用动画展现加工过程中材料切除的过程和设备的工作状态，并支持 NC 代码窗口调试能力，检查刀具与夹具和工作台的碰撞及过切、少切现象，检查无效的 NC 代码动作、进给和切削用量的合理性。

4 GMPS 系统简介

GMPS 系统是由清华大学虚拟制造和仿真实验室研发的一个虚拟加工仿真系统，全名为 General Machine Processing Simulator，即通用加工过程仿真器，其结构如图 6 所示^[1,17]。

GMPS 系统基本上采用了图 5 所示的虚拟加工系统的体系结构，并在各关键技术方面采用了合适的方法，使其具备了完善的功能和良好的性能。GMPS 是一个面向 NC 程序员和操作员设计的系统，基于完整的加工中心设备定义和工件的装夹模型进行图形仿真和检验，因而更接近于实际的试切过程。其可以支持三轴至五轴的镗铣类数控加工，支持的控制器类型有 MAHO、FANUC 系列。系统还提供了三轴立式加工中心和四轴卧式加工中心的样板。

GMPS 具有以下功能特点：

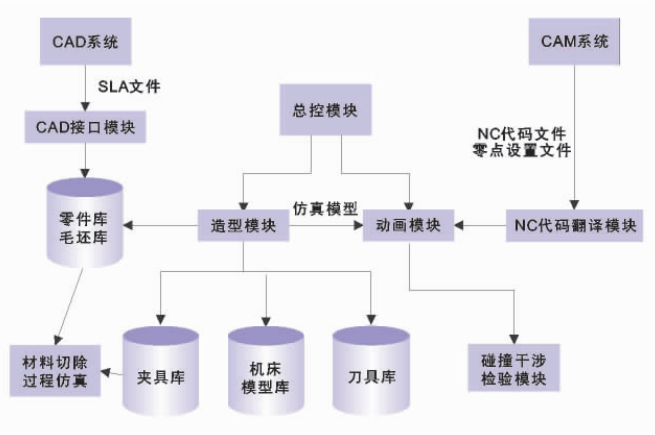


图 6 GMPS 系统结构图

Fig. 6 Flowchart of GMPS system

1) 提供便利的建模手段实现加工中心设备的几何建模，包括体素定义和装配，以形成构成加工中心设备的主轴(箱)、工作台、换刀机械手及其它部分几何模型；

2) 加工中心的逻辑定义，包括机床坐标系、各加工轴定义、刀库、主轴及加工工作台逻辑定义等；

3) 控制器的配置，NC 代码的检验及翻译转换成控制加工中心模型工作的数据；

4) 工件及夹具在拖盘上的装夹定义，以及机床刀库的定义，其中工件及毛坯的几何信息可以由本系统自行建立，也可以和其它 CAD 系统接口；

5) 加工过程中的各种破坏和危险的检验，主要指存在于刀具与工件、夹具和拖盘之间的碰撞、干涉现象和过切的检验；

6) 系统采用 OpenGL 图形接口、双缓冲区绘图方式进行绘图及显示，因此有着较好的图形显示性能，可以任意改变空间视角，也可以任意放大缩小画面。

GMPS 系统在数控加工行业有着良好的推广前景，曾成功地在多个企业实际应用，如山西经纬纺织机械有限公司、航天集团二院 283 厂等，取得了良好的成效，缩短了企业产品的生产周期，降低了制造成本，增强了企业产品的市场竞争力，直接促进了企业效益的增长。图 7 是采用 GMPS 进行虚拟加工的一个实例：虚拟机床在 NC 代码的驱动下，模拟对某零件的切削过程。该仿真包含了零件、夹具、机床和刀具，能完整地用动画模拟加工过程中的进刀、换刀、切削、托盘转动等加工细节，并能以声音报警和图形高亮的方式提示碰撞干涉。

5 结论和展望

虚拟加工是实际加工过程在计算机上的本质实现，是虚拟制造的一个强有力的支持工具。虚拟加工系统应用于实际的制造过程能增强产品的市场竞争力，

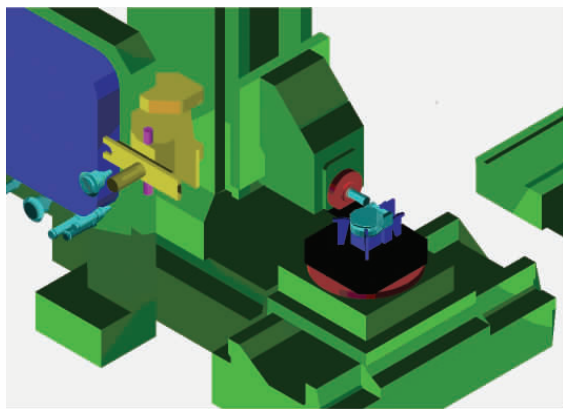


图 7 GMPS 虚拟加工实例

Fig. 7 An example of GMPS virtual machining

促进企业的发展,将成为推动制造业发展的有力工具。

虚拟制造系统常见的实现形式是在计算机图形学和实体建模技术的支持下,对整个加工环境进行建模和仿真,并在 NC 代码的驱动下对加工过程进行仿真,对此过程中可能出现的问题如碰撞干涉等进行监测和检查。因此,如何应用几何建模、数控代码翻译、干涉检测和材料切除仿真这几项技术则是决定虚拟加工系统性能的关键因素。

多年来,结合国家 863 计划等相关项目,笔者对虚拟制造系统及其关键技术进行了研究探讨,提出并实现了一种典型的虚拟加工系统,并将其应用于实际工程项目,取得了初步成效。

尽管如此,虚拟加工技术的研究方兴未艾,其关键技术的研究、改进和深化应用仍将会是先进制造技术的一个重要分支和热门发展方向。

参考文献 (References)

- [1] 肖田元. 虚拟制造 [M]. 北京:清华大学出版社, 2004.
XIAO Tianyuan. Virtual manufacturing [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [2] YU J C, LI Y. Structure representation for concurrent analysis of product assembly and disassembly [J]. Expert Systems with Applications, 2006, 31(4): 705-714.
- [3] LIN Y Z, SHEN Y L. Enhanced virtual machining for sculptured surfaces by integrating machine tool error models into NC machining simulation [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2004, 44(1): 79-86.
- [4] 刘国良, 张宏韬, 任永强, 等. 数控机床几何误差综合建模及其专家系统 [J]. 现代制造工程, 2005, 7: 1-4.
LIU Guoliang, ZHANG Hongtao, REN Yongqiang, *et al.* Modeling principles and expert system for geometrical error synthesis model of NC machining centers [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2005, 7: 1-4.
- [5] 肖田元, 韩向利, 王新龙. 通用 NC 代码翻译技术 [J]. 系统仿真学报, 1998, 10(5): 1-7.
XIAO Tianyuan, HAN Xiangli, WANG Xinlong. General NC code translation techniques[J]. Journal of System Simulation, 1998, 10(5): 1-7.
- [6] CANNY J. Collision detection for polyhedral[J]. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1988: 200-209.
- [7] NOBRIO H, TANIMOTO S L. A new interference check algorithm using octree[J]. Advanced Robotics, 1989, 3: 12-18.
- [8] DING S, MANNAN M A, POO A N. Oriented bounding box and octree based global interference detection in 5-axis machining of free-form surfaces [J]. Computer-Aided Design, 2004, 36(13): 1281-1294.
- [9] KIM H S, KIM H O, SHIN S Y. Collision detection algorithm of a continuous type using spherical extreme vertex diagrams[J]. Computers & Mathematics with Applications, 2004, 47(8-9): 1363-1378.
- [10] ILUSHIN O, ELBER G, HALPERIN D, *et al.* Precise global collision detection in multi-axis NC-machining [J]. Computer-Aided Design, 2005, 37(9): 909-920.
- [11] HAO M H. A CAM system based on enhanced Z-map modeling system [C]. Proc of the 5th Sino-Japan Joint Seminar on Ultraprecision Machining, Harbin, 1994.
- [12] ZHU W H, LEE Y S. Dixel-based force-torque rendering and volume updating for 5-DOF haptic product prototyping and virtual sculpting [J]. Computers in Industry, 2004, 55(2): 125-145.
- [13] CGTech. VERICUT CNC machine simulation [EB/OL]. 2006-07-08, http://www.cgtch.com/machsim_frame.htm.
- [14] CNC. Mastercam family of products [EB/OL]. 2006-10-15, <http://www.mastercam.com/Products/Default.aspx>
- [15] 韩向利, 肖田元. CIMS 中的加工过程仿真技术 [J]. 高技术通讯, 1996, 6(9): 1-5.
HAN Xiangli, XIAO Tianyuan. Machining process simulation technique in CIMS [J]. Chinese High Technology Letters, 1996, 6(9): 1-5.
- [16] 肖田元, 韩向利, 王新龙, 等. 虚拟加工技术的研究[J]. 计算机集成制造系统, 1999, 6: 16-20.
XIAO Tianyuan, HAN Xiangli, WANG Xinlong, *et al.* Research on virtual machining technique[J]. CIMS, 1999, 6: 16-20.
- [17] 韩向利, 肖田元. 虚拟加工环境的开发和研究 [J]. 计算机应用, 2000, 20: 234-237.
HAN Xiangli, XIAO Tianyuan. Development and research on virtual machining environment[J]. Computer Applications, 2000, 20: 234-237.

(责任编辑 赵佳)