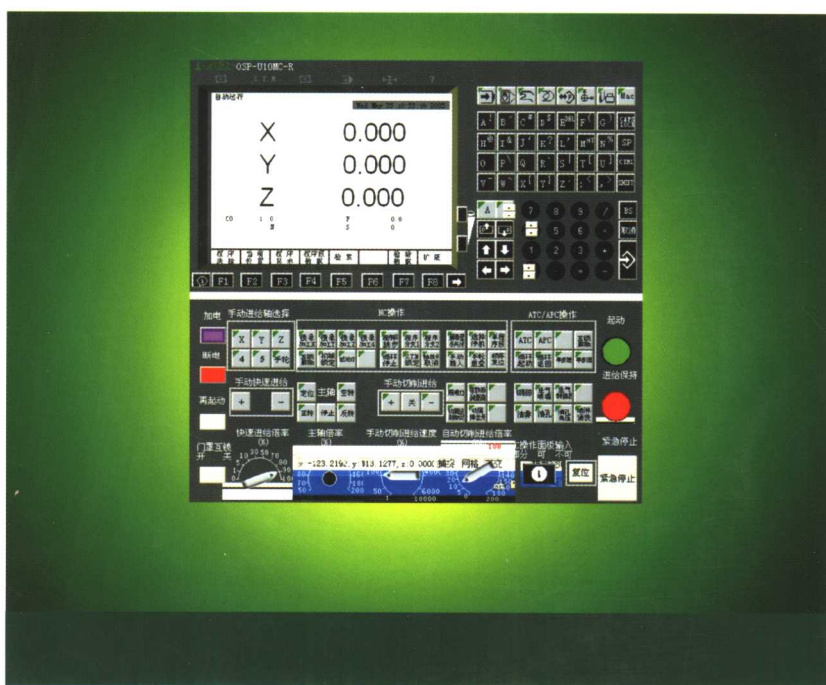


黄明吉 编著

虚拟数控技术及应用



Chemical Industry Press



化学工业出版社
工业装备与信息工程出版中心

虚拟数控技术及应用

黄明吉 编著



化学工业出版社
工业装备与信息工程出版中心

· 北 京 ·

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

虚拟数控技术及应用/黄明吉编著. —北京: 化学工业出版社, 2005. 4

ISBN 7-5025-6887-5

I. 虚… II. 黄… III. 虚拟技术-应用-数控机床
IV. TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 032420 号

虚拟数控技术及应用

黄明吉 编著

责任编辑: 张兴辉

责任校对: 洪雅姝

封面设计: 于 兵

*

化 学 工 业 出 版 社 出版发行
工业装备与信息工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京市彩桥印刷厂印刷

三河市前程装订厂装订

开本 787mm × 1092mm 1/16 印张 17½ 字数 423 千字

2005 年 6 月第 1 版 2005 年 6 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-6887-5

定 价: 42.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

虚拟制造技术是近 10 年来发展迅速、应用前沿的新兴学科，其中虚拟数控技术作为其核心内容，近几年来越来越成熟，越来越实用化，并涌现出好几款实用的商业软件。虚拟制造技术主要是研究利用计算机来模仿现实中的数控设备工作环境的一门技术。它以计算机仿真和数控加工技术为基础，集计算机图形学、人工智能、并行工程、网络技术、多媒体技术和虚拟现实技术等为一体，在虚拟的条件下，对数控设备的工作过程和工作环境进行全面的仿真。

全书共 8 章。详细介绍了虚拟数控技术的系统组成、算法及相关实现，主要内容包括虚拟数控技术的相关发展和技术、数控系统的软硬件组成、虚拟数控技术采用到的部分数据结构、轨迹控制原理、曲线曲面相关理论、曲线曲面生成及关键算法、虚拟数控车床、虚拟数控铣床、虚拟数控技术三维二次开发平台相关技术等。

本书的作者主要从事数控技术、计算机辅助设计与制造方面的教学与科研工作，本书作为笔者多年从事实际研究工作的总结而奉献给广大读者，其中部分内容参考国内外教材和资料编写而成，在此对相关作者表示深切的谢意。希望本书能对本学科知识的传播、推广应用和发展起到积极的作用。书中既注重讨论说明虚拟数控技术中应用最基本、最广泛的理论和算法，也力求反映 21 世纪以来国内外的一些重要科研新成果。

在学习本书之前，读者应先具有“程序设计基础”、“数控机床”等方面的基础知识。

本书由黄明吉编著。在编写的过程中陈玉海、王志勇、蒋国兴、熊家伟、潘爱民等同志帮助调试程序、绘制图例、录入文稿，在此对他们的辛勤劳动表示诚挚的感谢。由于作者水平有限，书中难免还存在缺点和不足，殷切希望广大读者批评指正。

为了推动本学科的发展，如有需虚拟数控技术三维二次开发平台最新版本的读者请与作者联系 (Email: huangmingji@263.net)

编者

2005 年 3 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 数控技术的定义	1
1.2 数控技术的发展历史	1
1.3 数控技术的重要性和发展现状	1
1.4 数控技术的发展趋势	2
1.5 虚拟数控技术主要内容	4
1.6 虚拟数控技术的发展历程	6
1.7 虚拟数控技术国内外研究现状	7
1.8 虚拟数控技术发展趋势	8
1.9 影响虚拟数控技术发展的相关技术	9
1.9.1 先进制造技术的发展	9
1.9.2 虚拟制造技术的发展及相关技术	12
1.9.3 人工智能的发展及相关技术	15
第 2 章 计算机数控系统	19
2.1 概述	19
2.1.1 CNC 系统的组成	19
2.1.2 CNC 系统的工作过程	19
2.2 CNC 系统的硬件体系结构	21
2.3 CNC 系统的软件结构	23
2.3.1 概述	23
2.3.2 CNC 装置软件结构	24
2.3.3 速度计算和加减速控制	27
2.3.4 插补程序、位置控制和故障诊断	33
2.4 典型数控系统	34
2.4.1 FANUC6 系统	34
2.4.2 SINUMERIK3 系统	37
第 3 章 虚拟数控技术轨迹控制原理	40
3.1 虚拟数控技术编程中的数据处理	40
3.1.1 基点坐标计算	40
3.1.2 节点坐标计算	40
3.1.3 刀位点轨迹的坐标计算	42
3.2 虚拟数控技术插补原理与实现	44
3.2.1 逐点比较法	45
3.2.2 数字积分法	48
3.2.2.1 数字积分法基本原理	48

3.2.2.2	数字积分法直线插补	49
3.2.2.3	数字积分法圆弧插补	51
3.2.2.4	数字积分法插补的象限处理	53
3.2.3	数据采样法	53
3.2.3.1	插补周期与位置控制周期	53
3.2.3.2	插补周期与精度、速度之间的关系	53
3.2.3.3	数据采样法直线插补	53
3.2.3.4	数据采样法圆弧插补	55
3.3	虚拟数控技术补偿原理与实现	56
3.3.1	刀具半径补偿原理与实现	56
3.3.2	刀具长度补偿原理与实现	59
第4章	复杂形体三维几何建模技术	62
4.1	曲线曲面基本理论	62
4.1.1	曲线曲面的参数表示	62
4.1.2	曲线论	63
4.1.3	曲面论	65
4.2	曲线曲面生成	69
4.2.1	Bezier 曲线	69
4.2.2	Bezier 曲面	72
4.2.3	B 样条曲线	74
4.2.4	B 样条曲面	77
4.2.5	NURBS 曲线曲面	78
4.3	曲面建模中的关键技术	78
4.3.1	曲面求交	78
4.3.2	过渡曲面	82
4.4	曲面离散及其算法	83
4.4.1	曲面离散	83
4.4.2	散乱数据插值曲面	86
4.5	几何建模中常用的形体表示方式	87
4.5.1	物体的 CSG 树表示	87
4.5.2	物体的边界表示	88
4.5.3	八叉树表示	90
4.5.4	基于参数化、特征的实体造型	91
第5章	虚拟数控机床	96
5.1	数控车床的机械结构	96
5.1.1	数控车床的布局形式与基本构成	96
5.1.2	主要技术参数	98
5.2	数控车编程基础	98
5.2.1	数控车床的坐标系和运动方向	98
5.2.2	主要功能指令的使用	101

5.3	虚拟数控车削加工系统的总体设计	112
5.4	虚拟数控车削加工系统各功能模块	113
5.5	数控车削加工编程以及仿真的特点	118
5.5.1	数控车削加工仿真的数据结构	119
5.5.2	数控车削加工仿真显示的主要算法	120
5.6	小结	123
第6章	虚拟数控铣床	124
6.1	数控铣床的基本知识	124
6.1.1	数控铣床的分类	124
6.1.2	数控铣床的主要技术参数	125
6.2	数控铣编程基础	125
6.2.1	数控铣床的坐标系	125
6.2.2	主要功能指令	127
6.3	虚拟数控铣削加工系统的整体设计	133
6.3.1	虚拟数控铣削加工系统的总体设计方案	133
6.3.2	虚拟数控铣削加工系统各功能模块	134
6.3.2.1	机床模型的建立	134
6.3.2.2	虚拟操作面板的构造	135
6.3.2.3	机床刀具库和夹具库的建立	138
6.3.2.4	加工过程仿真控制	138
6.3.2.5	在线帮助功能的建立	139
6.3.2.6	数控加工仿真的建模方法	139
6.4	数控加工仿真中的几何建模方法	140
6.4.1	线框建模	140
6.4.2	表面建模	140
6.4.3	实体建模	140
6.4.4	基于图像空间建模	141
6.4.5	离散矢量建模	142
6.4.6	优化离散矢量模型的建立	143
6.4.6.1	优化离散矢量模型简介	143
6.4.6.2	优化离散矢量模型的建立	144
6.5	数控加工仿真中的数学求交计算	145
6.5.1	毛坯体建模	145
6.5.2	刀具体与零件体建模	150
6.5.3	毛坯体与刀具扫描体的几何求交运算	150
6.5.4	球头刀的求交运算	150
6.5.5	平底刀的求交运算	152
6.5.6	圆角刀的求交运算	153
6.5.7	毛坯体数据的更新	154
6.6	总结	154

第7章 虚拟数控技术开发基础	156
7.1 走进 Visual C++	156
7.1.1 理解 VC 工程	156
7.1.2 MFC 编程特点	157
7.1.3 使用 Wizard	157
7.2 MFC 程序结构分析	167
7.2.1 Windows 程序工作原理	167
7.2.2 建立应用程序	167
7.2.3 程序结构剖析	168
7.3 深入 MFC 类库	173
7.4 VC 程序调试	180
7.4.1 VC 调试工具	180
7.4.2 高级调试技术	193
7.5 动态链接库	196
7.5.1 动态链接库的基本知识	196
7.5.2 一个简单的 DLL	197
第8章 虚拟数控技术三维开发平台	201
8.1 虚拟数控三维开发平台简介	201
8.2 相关类库	206
8.2.1 纯几何类库	206
8.2.2 参数几何类库	206
8.2.3 边界表示曲线曲面类库	208
8.2.4 显示实体类库	209
8.3 数据字典	210
8.4 自定义实体	221
8.4.1 交互实体基类介绍	221
8.4.2 自定义交互实体	223
8.5 相关例程	236
附录	239
附录 1 虚拟数控技术三维开发平台主要函数	239
附录 2 光盘内容介绍	268
参考文献	269

第 1 章 绪 论

1.1 数控技术的定义

数控技术是指用数字信号对一台或一台以上机械设备的运行及其加工过程进行控制的一门自动化技术,简称 NC (Numerical Control)。数控技术集传统的机械制造技术、计算机技术、成组技术与现代控制技术、传感检测技术、信息处理技术、网络通信技术、液压气动技术、光机电技术于一体,是现代先进制造技术的基础和核心。

1.2 数控技术的发展历史

计算机及控制在机械制造设备中的应用是 20 世纪制造业发展的最重大的技术进步。在 1946 年诞生了世界上第一台电子计算机,表明人类创造了可增强和部分代替脑力劳动的工具。6 年后,即在 1952 年,计算机技术应用到了机床上,在美国诞生了第一台数控机床。从此,传统机床产生了质的变化。近半个世纪以来,数控系统经历了两个阶段和六代的发展。

(1) 数控 (NC) 阶段 (1952~1970 年)

早期计算机的运算速度低,对当时的科学计算和数据处理影响还不大,不能适应机床实时控制的要求。人们不得不采用数字逻辑电路“搭”成一台机床专用计算机作为数控系统,被称为硬件连接数控 (HARD-WIRED NC),简称为数控 (NC)。随着元器件的发展,这个阶段历经了三代,即 1952 年的第一代——电子管;1959 年的第二代——晶体管;1965 年的第三代——小规模集成电路。

(2) 计算机数控 (CNC) 阶段 (1970 年至今)

到 1970 年,通用小型计算机已成批生产。于是将它移植过来作为数控系统的核心部件,从此进入了计算机数控 (CNC) 阶段 (把计算机前面应有的“通用”两个字省略了)。到 1974 年微处理器被应用于数控系统。由于微处理器是通用计算机的核心部件,故仍称为计算机数控。到了 1990 年,PC 机 (个人计算机,国内习惯称微机) 的性能已发展到很高的阶段,可以满足作为数控系统核心部件的要求。数控系统从此进入了基于 PC 的阶段。总之,计算机数控阶段历经了三代,即 1970 年的第四代——小型计算机;1974 年的第五代——微处理器和 1990 年的第六代——基于 PC (国外称为 PC-BASED)。

1.3 数控技术的重要性的发展现状

数控技术的问世已有 40 多年的历史,它是由多门基础学科发展起来的一门综合性的新型学科。数控技术是数控机床的关键技术。数控机床是工厂实现自动化的基础。大力发展、推广应用数控技术,用数控技术改造传统产业,特别是对军工企业的武器制造、航空航天事业的发展、恶劣及危险环境的作业等,都会起着关键性的作用。

正是由于数控技术在一个国家拥有如此重要的战略地位,世界上各工业发达国家均采取重大措施来发展自己的数控技术及其产业。世界各国大力发展数控技术的结果,使数控

技术发生根本性变革,由专用型封闭式开环控制模式向通用型开放式实时动态全闭环控制模式发展。在集成化基础上,数控系统实现了超薄型、超小型化;在智能化基础上,综合了计算机、多媒体、模糊控制、神经网络等多学科技术,数控系统实现了高速、高精、高效控制,加工过程中可以自动修正、调节与补偿各项参数,实现了在线诊断和智能化故障处理;在网络化基础上,CAD/CAM与数控系统集成为一体,机床联网,实现了中央集中控制的群控加工。

从20世纪50年代末期,我国就开始研究数控技术,开发数控产品。经过多年来不断地调整、优化、重组、开拓,通过自行研究、合作引进、独立开发、推进产业化的方式,国产数控系统目前已经取得了重大突破。80年代以来,国家对数控机床的发展十分重视,经历了“六五”、“七五”期间的消化吸收引进技术,“八五”期间科技攻关开发自主知识产权数控系统两个阶段,已为数控机床的产业化奠定了良好基础,并取得了长足的进步。“九五”期间数控机床发展已进入产业化阶段。新开发数控机床品种300个,已有一定的覆盖面。新开发的国产数控机床产品大部分达到国际80年代中期水平,部分达到90年代水平,为国家重点建设提供了一批高水平数控机床。在技术上也取得了突破,如高速主轴制造技术(12000~18000r/min)、快速进给(60m/min)、快速换刀(1.5s)、柔性制造、快速成形制造技术等为下一步国产数控机床的发展奠定了基础。当前,我国数控系统正处在由研究开发阶段向推广应用阶段过渡的关键时期,也是由封闭型系统向开放型系统过渡的时期。

1.4 数控技术的发展趋势

数控技术的应用不但给传统制造业带来了革命性的变化,使制造业成为工业化的象征,而且随着数控技术的不断发展和应用领域的扩大,它对关系国计民生的一些重要行业(IT、汽车、轻工、医疗等)的发展起着越来越重要的作用,因为这些行业所需装备的数字化已是当今发展的大趋势。从目前世界上数控技术及其装备发展的趋势来看,其主要研究热点有以下几个方面。

(1) 高速、高精加工技术及装备的新趋势

效率、质量是先进制造技术的主体。高速、高精加工技术可极大地提高效率,提高产品的质量和档次,缩短生产周期和提高市场竞争能力。为此日本某研究会将其列为5大现代制造技术之一,国际生产工程学会(CIRP)将其确定为21世纪的中心研究方向之一。

在轿车工业领域,年产30万辆的生产节拍是40秒/辆,而且多品种加工是轿车装备必须解决的重点问题之一;在航空和宇航工业领域,其加工的零部件多为薄壁和薄筋,刚度很差,材料为铝或铝合金,只有在高切削速度和切削力很小的情况下,才能对这些筋、壁进行加工。近年来采用大型整体铝合金坯料“掏空”的方法来制造机翼、机身等大型零件以替代多个零件通过众多的铆钉、螺钉和其他连接方式拼装,使构件的强度、刚度和可靠性得到提高。这些都对加工装备提出了高速、高精和高柔性的要求。

从EMO2001展会情况来看,高速加工中心进给速度可达80m/min,甚至更高,空运行速度可达100m/min左右。目前世界上许多汽车厂,包括我国的上海通用汽车公司,已经采用以高速加工中心组成的生产线部分替代组合机床。美国CINCINNATI公司的HyperMach机床进给速度最大达60m/min,加速度达2g(重力加速度),主轴转速已达

60000r/min。加工一薄壁飞机零件,只用30min,而同样的零件在一般高速铣床上加工需3h,在普通铣床上加工需8h;德国DMG公司的双主轴车床的主轴速度及加速度分别达12000r/min和1g。

在加工精度方面,近10年来,普通级数控机床的加工精度已由 $10\mu\text{m}$ 提高到 $5\mu\text{m}$,精密级加工中心则从 $3\sim 5\mu\text{m}$ 提高到 $1\sim 1.5\mu\text{m}$,并且超精密加工精度已开始进入纳米级($0.01\mu\text{m}$)。

在可靠性方面,国外数控装置的MTBF值已达6000h以上,伺服系统的MTBF值达到30000h以上,表现出非常高的可靠性。

为了实现高速、高精加工,与之配套的功能部件如电主轴、直线电机也得到了快速的发展,应用领域进一步扩大。

(2) 5轴联动加工和复合加工机床快速发展

采用5轴联动对三维曲面零件的加工,可用刀具最佳几何形状进行切削,不仅光洁度高,而且效率也大幅度提高。一般认为,1台5轴联动机床的效率可以等于2台3轴联动机床,特别是使用立方氮化硼等超硬材料铣刀高速铣削淬硬钢零件时,5轴联动加工可比3轴联动加工发挥更高的效率。但过去因5轴联动数控系统主机结构复杂等原因,其价格要比3轴联动数控机床高出数倍,加之编程技术难度较大,制约了5轴联动机床的发展。

当前由于电主轴的出现,使得实现5轴联动加工的复合主轴头结构大为简化,其制造难度和成本大幅度降低,数控系统的价格差距缩小,因此促进了复合主轴头类型5轴联动机床和复合加工机床(含5面加工机床)的发展。

在EMO2001展会上,日本的5面加工机床采用复合主轴头,可实现4个垂直平面的加工和任意角度的加工,使得5面加工和5轴加工可在同一台机床上实现,还可实现倾斜面和倒锥孔的加工。德国DMG公司展出DMUVoution系列加工中心,可在一次装夹下5面加工和5轴联动加工,可由CNC系统控制或CAD/CAM系统直接或间接控制。

(3) 智能化、开放式、网络化成为当代数控系统发展的主要趋势

21世纪的数控装备将是具有一定智能化的系统。智能化的内容包括在数控系统中的各个方面:为追求加工效率和加工质量方面的智能化,如加工过程的自适应控制,工艺参数自动生成;为提高驱动性能及使用连接方便的智能化,如前馈控制、电机参数的自适应运算、自动识别负载、自动选定模型、自整定等;简化编程、简化操作方面的智能化,如智能化的自动编程、智能化的人机界面等;还有智能诊断、智能监控方面的内容、方便系统的诊断及维修等。

为解决传统数控系统封闭性和数控应用软件产业化生产存在的问题,目前许多国家对开放式数控系统进行研究,如美国的NGC(The Next Generation Work-Station/Machine Control)、欧盟的OSACA(Open System Architecture for Control within Automation Systems)、日本的OSEC(Open System Environment for Controller),中国的ONC(Open Numerical Control System)等。开放式数控系统已经成为数控系统的未来之路。所谓开放式数控系统就是数控系统的开发可以在统一的运行平台上,面向机床厂家和最终用户,通过改变、增加或剪裁结构对象(数控功能),形成系列化,并可方便地将用户的特殊应用和技术诀窍集成到控制系统中,快速实现不同品种、不同档次的开放式数控系统,形成具有鲜明个性的名牌产品。目前开放式数控系统的体系结构规范、通信规范、配

置规范、运行平台、数控系统功能库以及数控系统功能软件开发工具等是当前研究的核心。

网络化数控装备是近两年国际著名机床博览会的一个新亮点。数控装备的网络化将极大地满足生产线、制造系统、制造企业对信息集成的需求,也是实现新的制造模式如敏捷制造、虚拟企业、全球制造的基础单元。国内外一些著名数控机床和数控系统制造公司都在近两年推出了相关的新概念和样机,如在 EMO2001 展会中,日本山崎马扎克(Mazak)公司展出的“Cyber Production Center”(智能生产控制中心,简称CPC);日本大隈(Okuma)机床公司展出“IT plaza”(信息技术广场,简称IT广场);德国西门子(Siemens)公司展出的 Open Manufacturing Environment(开放制造环境,简称OME)等,反映了数控机床加工向网络化方向发展的趋势。

(4) 重视新技术标准、规范的建立

① 关于数控系统设计开发规范 如前所述,开放式数控系统有更好的通用性、柔性、适应性、扩展性,美国、欧盟和日本等纷纷实施战略发展计划,并进行开放式体系结构数控系统规范(OMAC、OSACA、OSEC)的研究和制定。世界3个最大的经济实体在短期内进行了几乎相同的科学计划和规范的制定,预示了数控技术的一个新的变革时期的来临。我国在2000年也开始进行中国的ONC数控系统的规范框架的研究和制定。

② 关于数控标准 数控标准是制造业信息化发展的一种趋势。数控技术诞生后的50年间的信息交换都是基于ISO 6983标准,即采用G、M代码描述如何加工,其本质特征是面向加工过程,显然,它已越来越不能满足现代数控技术高速发展的需要。为此,国际上正在研究和制定一种新的CNC系统标准ISO 14649(STEP-NC),其目的是提供一种不依赖于具体系统的中性机制,能够描述产品整个生命周期内的统一数据模型,从而实现整个制造过程,乃至各个工业领域产品信息的标准化。

STEP-NC的出现可能是数控技术领域的一次革命,对于数控技术的发展乃至整个制造业都将产生深远的影响。首先,STEP-NC提出了一种崭新的制造理念。传统的制造理念中,NC加工程序都集中在单个计算机上。而在新标准下,NC程序可以分散在互联网上,这正是数控技术开放式、网络化发展的方向。其次,STEP-NC数控系统还可大大减少加工图纸(约75%)、加工程序编制时间(约35%)和加工时间(约50%)。

目前,欧美国家非常重视STEP-NC的研究,欧洲发起了STEP-NC的IMS计划。参加这项计划的有来自欧洲和日本的20个CAD/CAM/CAPP/CNC用户、厂商和学术机构。美国的STEP Tools公司是全球范围内制造业数据交换软件的开发,它已经开发了用作数控机床加工信息交换的超级模型(Super Model),其目标是用统一的规范描述所有加工过程。目前这种新的数据交换格式已经在配备了SIEMENS、FIDIA以及欧洲OSACA-NC数控系统的原型样机上进行了验证。

1.5 虚拟数控技术主要内容

虚拟数控技术是利用计算机来模仿真实的数控设备工作环境的一门技术。它以计算机仿真和数控加工技术为基础,集计算机图形学、人工智能、并行工程、网络技术、多媒体技术和虚拟现实等技术为一体,在虚拟的条件下,对数控设备的工作过程和环境进行全面的仿真。

制造业的发展对产品性能、规格、品种不断提出新的要求,产品的生命周期越来越

短,新产品的开发时间是决定性因素。虚拟制造技术(VMT, Virtual Manufacturing Technology)可以模拟由产品设计、制造到装配的全过程,对设计与制造过程中可能出现的问题进行分析与预测,提出改进措施,实现产品从开发到制造整个过程的优化,达到降低产品开发周期、减小开发风险、提高经济效益的目的。而机械加工过程仿真在虚拟制造中占有重要地位,它通过对机床-工件-刀具构成的工艺系统中的各种加工信息的有效预测与优化,为实现实际加工过程的智能化创造了有利条件,同时它也是研究加工过程的重要手段。

数控加工过程隐含在数控程序中,数控程序中的错误不容易被发现,目前常采用计算机图形模拟刀具轨迹显示法和机床试切法对数控程序进行校验,但两者都有缺点。计算机图形模拟刀具轨迹显示法缺少真实感,刀具与工件的干涉和过切难以发现;试切法成本高,周期长。虚拟数控技术是指数控机床在虚拟环境中的映射,它集制造技术、机床数控理论、计算机辅助设计(CAD)、计算机辅助制造(CAM)和建模与仿真技术于一体,人能够凭直觉感知计算机产生的三维仿真模型的虚拟环境,在设计新的方案或更改方案时,就能够在真实制造运行之前进行数控机床的虚拟设计,在虚拟环境中进行零件的数控加工,并对数控程序加以检验,检查数控加工过程中可能出现的碰撞、干涉危险,分析零件的可加工性和工序的合理性。虚拟数控技术的采用可缩短产品的开发周期,降低生产成本,提高产品质量和生产效率。

一个虚拟数控系统包括以下几个模块(图1-1)。

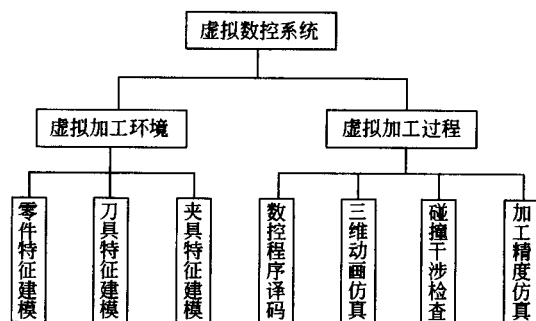


图 1-1 虚拟数控系统

(1) 虚拟加工环境

虚拟加工环境由机床、工件、刀具和夹具构成,可以采用比较底层的 OpenGL 技术对机床、夹具、刀具和工件进行特征造型,也可以采用 Pro/E、SolidWorks、MDT、UG、AutoCAD 等比较成熟的三维造型软件进行特征造型。

(2) 虚拟加工过程

包括数控程序译码、三维动画仿真、碰撞干涉检查、加工精度仿真四个模块。数控加工过程仿真包括几何仿真和物理仿真两个部分。几何仿真将刀具与零件视为刚体,不考虑切削参数、切削力及其他因素对切削加工的影响,只是对数控程序进行翻译,产生刀具位置数据,并以此数据驱动机床运动部件和刀架运动刀具对工件进行虚拟切削,同时检查是否有碰撞、干涉。物理仿真包括加工精度分析,切削过程的热变形,切削力作用下的系统弹性变形、夹紧变形,以及机床的动态、静态分析等。数控程序译码模块负责把手工输入或通过文件导入的 NC 代码翻译成数控机床的执行动作。三维动画仿真模块主要完成加工过程中的动画,使加工过程的仿真与实际加工更相似。碰撞干涉检查是虚拟数控技术最主要的功能之一,完成加工过程的碰撞干涉检查,检查 NC 代码的正确性。加工精度仿真则是进行加工过程中的精度分析,完成虚拟加工中比较高级的功能。

以上只是分析了虚拟加工系统的基本组成,一个完整的虚拟加工系统应该比上面的分析要复杂得多。上文中的系统模块划分只是包括最基本的功能,实际中的虚拟系统还有更细致的划分,每个模块还要划分为更小的模块。上面对虚拟加工系统的划分是属于逻辑上

的划分,要想实现该系统还涉及到一系列的工具和技术。其中,工具包括操作系统、编程软件等的选取。目前,由于 Windows2000 是基于图形的操作系统,它本身拥有完善的图形显示系统,对于虚拟系统的图形开发提供了很好的支持。编程软件比较多的选取 Visual C++,该软件采用的是面向对象的 C++ 编程语言,该语言是目前最流行的编程语言,而且,该软件本身还拥有一套功能强大的类库(MFC,微软基础类库),同时,它还有很好的扩展性。还有一些其他的工具软件需要选取,如数据库软件、仿真软件、建模软件等。除了这些工具,还涉及到很多的技术(如三维图形的建模技术),在以后的章节里会有详细的介绍和说明。

1.6 虚拟数控技术的发展历程

仿真就是利用相似性原理,使用计算机的软件工具来模拟和分析现实世界中系统行为的过程,这些被模拟的系统可以是自然界系统,也可以是一些制造系统(人为系统)。计算机中的数学模型描述系统是什么(即其性质),而计算机将显示该事物将要发生的动作(即其行为)。随着 CAD/CAM 技术的发展和数控机床性能、零件复杂度的不断提高,NC 程序变得越来越长和复杂,数控(NC)编程的难度日益增大,NC 程序的故障率也日益增高。由于 NC 程序的质量直接影响着零件的加工质量和加工成本,因此在 NC 程序输入机床正式加工之前都要经过正确性检验。

对 NC 程序的传统检查方法主要有两种。一种是人工检验,这种方法完全依靠工程师个人的经验,只能应用于检验简单的 NC 程序。第二种是以泡沫塑料、蜡模、铝模等材料代替真实材料在数控机床上加工即试切法,根据试切加工的结果来修改轨迹一直达到满意为止的方法来校验 NC 程序的正确性。这种方法不仅浪费时间、代价昂贵、危险性大,而且常常不能达到令人满意的结果。对于现代产品来说,其要求是加工效率高、产品更新换代快,生产的趋势是多品种、小批量,要降低成本、提高质量、缩短制造周期。这些都使得传统的数控机床试加工的方法越来越不能适应现代数控加工的要求,这就要求用一种新的手段来进行 NC 程序的检验。

虚拟数控技术是随着计算机技术、CAD/CAM 技术、计算机图形学和系统仿真学等几门学科的发展而发展起来的,是各门学科综合在数控加工技术中的具体应用。当前计算机硬件性能的迅速提升也为数控加工仿真系统提供了强大的硬件基础。利用计算机对 NC 程序进行图形仿真,检查刀具路径、动态模拟数控加工的全过程,以此检验加工方法和程序的正确性,从而节约大量的财力和时间,获得较好的经济效益。

现在几乎所有成熟的商业化 CAM 软件包中都提供数控加工仿真的功能,且其在 CAM 系统中所占的比重正逐渐提高。仿真性能的好坏已经成为评价一个 CAM 软件好坏的重要标准。目前国外的主流 CAM 软件如 UG、Pro/Engineer、CATIA、Cimatron、MasterCAM、Solidworks 等以及一些专门的数控加工仿真软件如 Vericut 和 Ncverify 等都提供了完善的仿真功能。计算机仿真正在数控加工所有方面发挥着越来越重要的作用。

数控加工仿真按仿真对象考察方式的不同一般可分为两种方式或者称为两个阶段:纯几何仿真(Purely Geometric Simulation)和物理仿真(Physical Simulation)。

第一种方式是纯几何仿真,它不考虑切削参数、切削力及其他物理因素的影响,只仿真刀具-工件几何体的运动,以验证 NC 程序的正确性。第二种方式是物理仿真,它运用

物理规律去模拟被仿真的事件,此时要考虑力、速度、质量、密度、能量以及其他物理参数的影响,因此这种方法比较复杂,而且随着应用对象和目的的不同而有很大的不同。现在市场上的 CAM 软件大部分只提供几何仿真功能。对于物理仿真,由于涉及对刀具切削过程物理规律的研究,费用高,同时需要高校、研究所、工厂甚至国家的共同参与,大部分软件并没有提供相应的功能。但它是将来加工软件发展的一个重点。几何仿真根据检验目的不同分为两种。

① 刀具中心的运动轨迹仿真 这种仿真可在后置处理前进行,主要用于检查工艺过程中加工顺序的合理安排、刀具行程路径的优化、刀具与被加工工件轮廓的干涉,例如铣削时,刀具半径应小于被切轮廓的最大曲率半径等。若在后置处理后进行,则除上述作用外,还可检查数控编程的正确性,显示加工过程,使操作者方便地了解和监视加工状况,这在有冷却液的封闭加工状态时是十分必要的。这种仿真一般采用真实感动画显示的方法,该方法比较成熟而有效,应用普遍。

② 刀具、夹具、机床、工件间的运动干涉(碰撞)仿真 工艺系统由刀具、机床、工件和夹具组成。在加工中心上加工,有换刀和转位等运动,因此在加工时,应检查它们之间的干涉(碰撞)。由于加工是个动态过程,刀具与工件、夹具、机床之间的相对位置是变化的,工件从毛坯开始经过若干工序的加工,在形状和尺寸上均有变化,因此要进行动态仿真。这种仿真多采用三维实体几何模型仿真,并且要在工艺系统各组成部分均已确定的情况下进行,难度较大。

几何仿真中刀具运动的驱动数据一般也可分为两种:CL (Cutter Location) 数据即刀位点数据和 NC 代码。基于 CL 数据的仿真只仿真刀具的运动,不考虑切削参数、切削力等加工条件,主要是为了检验刀位轨迹的正确性,保证零件的加工质量。基于 NC 数据的仿真量大,难度也大于前者。

1.7 虚拟数控技术国内外研究现状

国外在数控加工过程仿真方面做了许多工作,美国 Maryland 大学开发了用于培训数控操作人员的虚拟数控机床仿真器。作为该计划的一部分,美国 NIST 也开展了虚拟机床的研究。韩国 Turbo-TEK 公司开发出面向培训的虚拟数控铣削加工环境,能够实现数控加工的几何仿真并配有声音信息。日本 SONY 公司研制的 FREDAM 系统可对球头铣刀加工自由曲面进行三维仿真,并进行干涉、碰撞检查。意大利 Bologna 大学用 B 样条曲面建立端铣刀与工作台模型,采用真实感图形显示机床精加工过程。由于数控加工在机械制造业中发挥着日益重要的作用,因此以其为背景出现了一批优秀的应用软件,这些软件基于已被生产实践检验的实体造型核心系统(如 Parasolid),具有先进的管理基础、强大的工程背景、完善的操作功能和专业化的技术服务,能够显著地提高制造业的整体经济效益,因此很快便赢得了广大 CAD/CAM 用户的青睐,成为制造业中真正的商业化软件,比较有代表性的有 Mastercam、Gibbs、UG、Pro/E 等。

国内在这方面也开展了诸多研究工作,并取得了重要成果。如华中理工大学开发的 NCPVSS 系统,具有数控铣削加工过程仿真功能,即通过生成刀具轨迹,由三维动画显示数控加工过程,以此发现数控程序错误。同济大学研制的数控程序微机动画仿真系统,以二维图形方式动态模拟加工过程,能满足生产现场实时性要求。哈尔滨大学的 NCMPs 系统,可建立集成的数控加工仿真环境,面向多轴数控加工中心,在图形工作站上实时显

示三维多轴数控加工过程。清华大学 CIMS 工程研究中心开发的“通用加工过程仿真器”已在多家企业得到应用。国内对数控加工仿真尚处于跟踪、消化阶段,所涉及的仿真系统主要集中在 2~2.5 轴、3 轴、3 轴以上的多轴数控加工仿真,一般仅局限于某一个或某一类特定实例上。目前数控加工过程仿真,尚属以理想几何图形来检验数控代码是否正确的几何仿真,此时刀具和工件均被视为仅具几何形状的刚体,不考虑切削参数、切削力及其他因素对切削加工的影响。物理仿真可决定每小时能生产的、满足质量控制要求的工件数量,直接影响切削加工的经济性,因此日益受到有关研究人员的关注。

1.8 虚拟数控技术发展趋势

在短短的几十年内,计算机硬件飞速发展,CPU 的运算速度从每秒几千次到现在的每秒几亿次。显卡、主板等其他硬件也得到极大的发展,操作系统的功能和稳定性都有了很大的提高。计算机图形学、人工智能、并行工程、网络技术、多媒体技术和虚拟现实技术也都得到了很大的发展,这些技术和设备的不断发展,也促进了虚拟数控技术的发展。

目前虚拟数控技术具有以下特点和趋势。

(1) 虚拟数控技术应用范围和对象都有了比较大的扩大

最早的虚拟数控技术的应用目的是检验 NC 代码的正确性。但由于计算机硬件的限制,刚开始,仿真的对象仅仅是刀具和工件的加工过程。随着计算机硬件计算速度的提高,仿真的对象已经扩大到了整个数控机床,包括机床床身、刀具、夹具、控制面板等。同时,仿真的机床对象也扩大了,以前大都集中在数控车床和数控铣床,现在几乎所有的数控机床都可以也已经虚拟化。同时,只要是采用数控技术的设备都可以应用虚拟数控技术。

(2) 虚拟的真实感要求越来越高

以前的计算机图形学还不成熟,人们对如何在计算机上表示具有高真实感的图形还不清楚,早期的虚拟数控系统中的模型都很粗糙。但随着计算机图形学的不断深入研究,人们发现了很多描述三维实体的方法,并通过增加光照等方法,大大提高了虚拟数控系统的真实感。

(3) 图形数据的交换越来越容易

在 CAD 的数据交换文件被规范前,各个虚拟系统只能使用自己的数据文件,这就大大地削弱了虚拟系统的功能,同时增加了虚拟系统的难度。以前,虚拟系统必须自己开发三维图形系统,用来制作机床模型、刀具模型、夹具模型等。而这个三维图形系统的开发是相当难的。现在,则可以利用成熟的三维造型软件(如 Pro/E、UG)制作数控机床床身、刀具等。只需要一个可以读懂数据交换文件的程序就行了,这就大大降低了开发的难度,同时,也使开发的虚拟系统具有更高的性能。

(4) 由几何仿真向物理仿真的方向发展

现在的虚拟系统都属于几何仿真的范畴,即不考虑切削参数、切削力及其他物理因素的影响,只仿真刀具-工件几何体的运动。而物理仿真由于涉及对刀具切削过程物理规律的研究,费用高且难于研究,目前还没有对刀具切削过程物理规律有很好的认识,所有目前的虚拟系统还无法完全地虚拟真实的加工情况。世界各国有许多实验室都在对加工过程中的物理规律进行研究,同时进行一些比较简单的物理仿真。但物理仿真是未来虚拟数控技术的主要发展方向。

1.9 影响虚拟数控技术发展的相关技术

1.9.1 先进制造技术的发展

自20世纪70年代以来,世界市场由过去传统的相对稳定逐步演变成动态多变的特征,由过去的局部竞争演变成全球范围内的竞争;同行业之间、跨行业之间的相互渗透、相互竞争日益激烈。为了适应变化迅速的市场需求,为了提高竞争力,现代的制造企业必须解决TQCS难题,即以最快的上市速度(T—Time to Market),最好的质量(Q—Quality),最低的成本(C—Cost),最优的服务(S—Service)来满足不同顾客的需求。

与此同时,信息技术取得了迅速发展,特别是计算机技术、计算机网络技术、信息处理技术等取得了人们意想不到的进步。20多年来的实践证明,将信息技术应用于制造业,进行传统制造业的改造,是现代制造业发展的必由之路。80年代初,以信息集成为核心的计算机集成制造系统(CIMS, Computer Integrated Manufacturing System)开始得到实施;80年代末,以过程集成为核心的并行工程(CE, Concurrent Engineering)技术进一步提高了制造水平;进入90年代,先进制造技术进一步向更高水平发展,出现了虚拟制造(VM, Virtual Manufacturing),精益生产(LP, Lean Production),敏捷制造(AM, Agile Manufacturing),虚拟企业(VE, Virtual Enterprise)等新概念。

目前对先进制造技术尚没有一个明确的、一致公认的定义,经过近年来在发展先进制造技术方面开展的工作,通过对其特征的分析研究,可以认为:先进制造技术是制造业不断吸收信息技术和现代管理技术的成果,并将其综合应用于产品设计、加工、检测、管理、销售、使用、服务乃至回收的制造全过程,以实现优质、高效、低耗、清洁、灵活生产,提高对动态多变的市场的适应能力和竞争能力的制造技术的总称。

从广义上来说,先进制造技术包括以下几方面:

① 计算机辅助产品开发与设计(如计算机辅助设计CAD、计算机辅助工程CAE、计算机辅助工艺设计CAPP、并行工程CE等);

② 计算机辅助制造与各种计算机集成制造系统(如计算机辅助制造CAM、计算机辅助检测CAI、计算机集成制造系统CIMS、数控技术NC/CNC、直接数控技术DNC、柔性制造系统FMS、成组技术GT、准时化生产JIT、精益生产LP、敏捷制造AM、虚拟制造VM、绿色制造GM等);

③ 利用计算机进行生产任务和各种制造资源合理组织与调配的各种管理技术(如管理信息系统MIS、物料需求计划MRP、制造资源计划MRP II、企业资源计划ERP、工业工程IE、办公自动化OA、条形码技术BCT、产品数据管理PDM、产品全生命周期管理PLM、全面质量管理TQM、电子商务EC、客户关系管理CRM、供应链管理SCM等)。

从狭义上来说,它是指各种计算机辅助制造设备和计算机集成制造系统。如果说机械化和自动化技术代替了人的四肢和体力的话,那么以计算机辅助制造技术和信息技术为中心的先进技术,则在某种程度和某些部分代替了人的大脑而进行有效的思维与判断,它对传统制造业所引起的是一场新的技术变革。

现逐一介绍先进制造技术的各种相关技术和理念。

(1) 计算机辅助设计(CAD)