

模具数控加工及编程技术

MUJU SHUKONG JIAGONG JI BIANCHENG JISHU



陈炳光 陈昆 编著

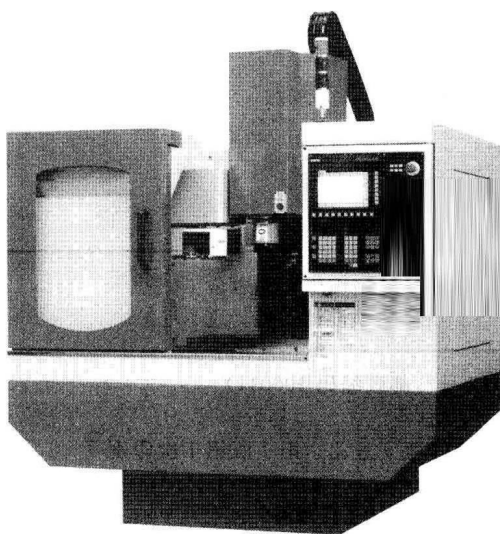


化学工业出版社

模具数控加工及编程技术

MUJU SHUKONG JIAGONG JI BIANCHENG JISHU

陈炳光 陈昆 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

模具数控加工及编程技术/陈炳光, 陈昆编著. —北京: 化学工业出版社, 2011.8

ISBN 978-7-122-11526-3

I. 模… II. ①陈…②陈… III. ①模具-数控机床-加工②模具-数控机床-程序设计 IV. TG76

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 110766 号

责任编辑: 王 烨 刘丽宏
责任校对: 蒋 宇

文字编辑: 谢蓉蓉
装帧设计: 韩 飞

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 北京市兴顺印刷厂

787mm×1092mm 1/16 印张 14½ 字数 356 千字 2011 年 9 月北京第 1 版第 1 次印刷

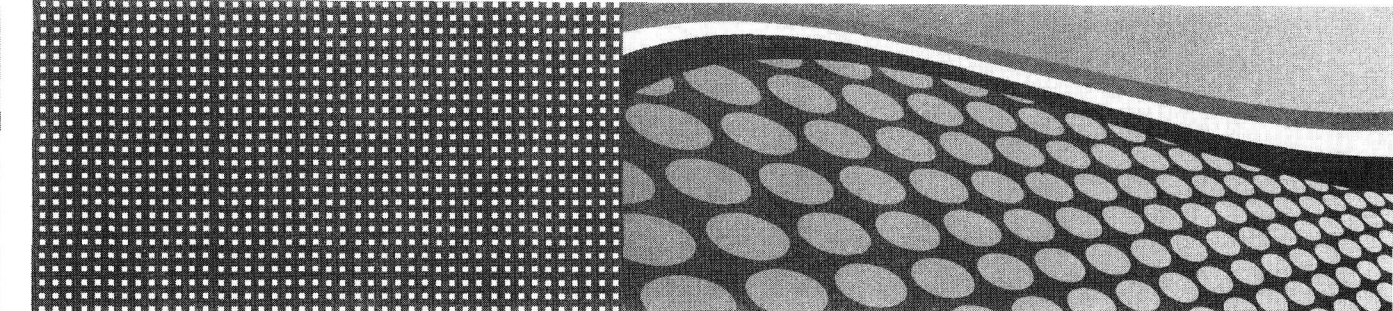
购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 46.00 元

版权所有 违者必究



前

言

现代化的工业生产中，模具工业是各种工业的基础。在工业制品中，各种金属、塑料、橡胶、玻璃、陶瓷、粉末冶金、复合材料等制品的生产都离不开模具。特别是在汽车、轻工、电子、航空等行业中，它们的新产品开发和生产更是依赖于模具生产技术的进步。

模具数控加工及编程技术是以数控机床为加工手段，以计算机软件进行编程的现代模具制造技术。数控机床已成为模具生产企业中必不可少的主要设备。作者通过多年在生产实践中的搜集、整理和总结，编写了本书，内容包括：数控加工中的各种工艺参数、刀具种类及材料的选择；模具加工中常用的数控车床、数控铣床、加工中心、线切割及模具雕刻等设备的主要结构、使用维修及编程方法；最新的 MastercamX 编程实例等。希望能对从事模具设计、模具加工的技术人员及操作者有所帮助。

本书力求能够反映数控机床新技术在模具加工中的应用，尽量做到先进性，实用性。

本书第 1、2 章由陈炳光教授编写，第 3~7 章由陈昆博士编写。由陈炳光教授校核全书。

本书可作为高等院校模具专业的本科教材，也可作为高等职业学校、高等专科学校、成人高校相关课程教材。

限于作者水平有限，不足之处，敬请读者批评指正。

编著者

第1章 模具数控加工概述 1

1.1 模具概述	1
1.1.1 模具在现代生产中的作用	1
1.1.2 现代化工业对模具的要求	1
1.1.3 模具工业的发展趋势	2
1.2 模具的分类及编码	2
1.2.1 按便于生产管理的原则对模具分类	2
1.2.2 按便于模具设计、制造的原则对模具分类和编码	2
1.3 模具数控加工系统	4
1.3.1 实现模具数控加工所需的硬件条件	4
1.3.2 实现模具数控加工所需的软件条件	5
1.3.3 实现模具数控加工所需的人才条件	6
1.4 模具数控加工设备概述	6
1.4.1 数控机床的结构特点及要求	6
1.4.2 数控机床的主传动系统及主轴部件	10
1.4.3 数控机床的进给传动系统及其部件	14
1.4.4 机床导轨	19
1.4.5 排屑装置	22

第2章 数控加工基础 24

2.1 数控加工概述	24
2.1.1 数控机床加工过程简介	24
2.1.2 数控机床分类及控制方式	25
2.2 数控加工的基本指令代码	26
2.2.1 加工程序简介	26
2.2.2 数控系统功能指令代码	27
2.3 数控机床的坐标系	29
2.3.1 坐标系的运动方向	29

2.3.2	数控机床的坐标系	30
2.3.3	绝对坐标和相对坐标	31
2.4	数控编程与工艺参数	31
2.4.1	编程的一般步骤	31
2.4.2	切削用量的选择原则	32
2.5	数控加工工艺过程	36
2.5.1	数控机床加工工艺过程分析	36
2.5.2	数控加工工艺路线设计	38
2.6	刀具材料	40
2.6.1	数控机床对刀具的要求	40
2.6.2	常用刀具材料	41
2.7	数控车床刀具	42
2.7.1	数控车床刀具类型	42
2.7.2	可转位刀片型号及 ISO 表示规则	43
2.7.3	可转位刀片型号的选用	45
2.8	数控铣床刀具	50
2.8.1	数控铣刀与刀具系统	50
2.8.2	数控铣加工对刀具的要求	52
2.8.3	数控铣加工常用刀具的种类	52
2.8.4	数控铣床刀具的选用	53
2.8.5	常用数控铣刀	53
2.9	数控机床的保养及维修	54
2.9.1	正确操作和使用数控系统的步骤	54
2.9.2	故障处置	55
2.9.3	故障检查方法	57
2.9.4	故障排除的一般方法	58

第3章 模具数控车床加工与编程

60

3.1	数控车床加工的基本指令	60
3.1.1	数控车床编程概述	60
3.1.2	F、S、T 指令功能	61
3.1.3	G 指令应用	61
3.1.4	刀尖圆弧半径补偿	67
3.2	数控车床循环指令应用	68
3.2.1	单一固定循环指令	68
3.2.2	多重复合循环指令 (G70~G76)	72
3.3	数控车床结构概述	79
3.3.1	数控车床的组成	79
3.3.2	数控车床的结构特点	80
3.3.3	数控车床的分类	81

3.3.4	数控车床的布局	81
3.3.5	数控车床的传动系统	82
3.3.6	数控车床的自动换刀装置	84
3.3.7	卡盘	86
3.3.8	尾座	86
3.4	FANUC0-TC 系统的数控车床简介	87
3.4.1	数控车床操作面板	87
3.4.2	数控车床操作	92
3.5	模具数控车床加工实例	94
3.5.1	零件加工工艺分析	94
3.5.2	编程与操作	95
3.6	数控车床加工 CAM 处理	97
3.6.1	数控车床加工 CAM 处理的方法	97
3.6.2	使用 Mastercam X 软件进行车削编程实例	97



第4章 模具数控铣床加工与编程

107

4.1	数控铣床加工的基本指令	107
4.1.1	数控铣床编程基础	107
4.1.2	数控铣机床基本指令	108
4.2	数控铣床加工的循环指令和子程序	116
4.2.1	孔加工固定循环	116
4.2.2	子程序	121
4.3	数控铣床结构概述	123
4.3.1	数控铣床的组成	123
4.3.2	数控铣床的结构特点	123
4.3.3	数控铣床的分类	124
4.3.4	数控铣床的布局	125
4.3.5	数控铣床的传动系统	126
4.3.6	万能铣头	127
4.3.7	回转工作台	127
4.4	数控铣床操作	129
4.4.1	数控铣床操作面板	129
4.4.2	数控铣床操作	129
4.5	模具数控铣床加工实例	136
4.5.1	子程序综合应用	136
4.5.2	固定循环指令综合应用	140
4.6	数控铣床加工 CAM 处理	141
4.6.1	数控铣床加工 CAM 处理的方法与数控车床加工 CAM 处理的方法	141
4.6.2	使用 MastercamX 软件进行铣削编程实例	142

5.1 概述	155
5.1.1 加工中心的特点	155
5.1.2 加工中心的结构组成	155
5.1.3 加工中心的分类	156
5.2 JCS-018A 立式加工中心	158
5.2.1 机床简介	158
5.2.2 机床的传动系统	161
5.2.3 加工中心的自动换刀装置	162
5.3 加工中心维护及安全操作规程	168
5.3.1 加工中心的维护	168
5.3.2 数控系统的维护	169
5.3.3 机械部件的维护	169
5.3.4 液压、气压系统的维护	170
5.3.5 机床精度的维护	170
5.3.6 加工中心的安全操作规程	170
5.4 加工中心编程	170
5.4.1 加工中心编程要点	170
5.4.2 加工中心编程举例	172
5.5 模具加工中心加工实例	172
5.5.1 加工中心手工编程实例	172
5.5.2 MastercamX 编程方法	175

6.1 数控线切割概述	178
6.1.1 数控线切割的基本原理	178
6.1.2 数控线切割加工的特点	178
6.2 数控线切割机床概述	179
6.2.1 数控线切割机床的类型	179
6.2.2 数控线切割机床的组成	180
6.3 数控线切割加工范围	185
6.4 数控线切割机床的技术参数	186
6.5 数控线切割加工工艺	186
6.5.1 数控线切割加工的操作	186
6.5.2 数控线切割加工时的注意事项	187
6.5.3 断丝的处理方法	188
6.6 大厚工件及锥度切割工艺及编程	188
6.6.1 切割大厚工件及锥度加工要点	188

6.6.2 锥度数控加工编程实例	189
6.7 数控线切割加工时常遇见的问题及解决方法	190
6.7.1 加工过程中的断丝	190
6.7.2 加工精度不好	191
6.7.3 速度太慢	192
6.8 精加工注意事项	192
6.8.1 偏移量的加工测试	192
6.8.2 精加工常见的问题及对策	192
6.8.3 凹模加工注意事项	193
6.8.4 拐角处理方法	194
6.9 数控线切割机床安全操作规程及维修保养	194
6.9.1 数控线切割机床的安全操作规程	194
6.9.2 数控线切割机床的日常维护及保养	195
6.10 数控线切割编程方法及指令	195
6.10.1 手工编程	195
6.10.2 自动编程	197
6.11 模具数控线切割加工实例	197
6.11.1 手工编程实例	197
6.11.2 MastercamX 软件编程实例	200



第7章 模具雕刻加工与编程

206

7.1 模具雕刻机	206
7.1.1 模具雕刻机的特点	206
7.1.2 小型模具雕刻机的技术参数	207
7.1.3 模具雕刻机安装前注意事项	207
7.1.4 模具雕刻机常见故障及维修	207
7.2 模具雕刻编程	210



参考文献

217

模具数控加工概述

模具数控加工技术是以数控机床为加工手段的模具制造技术。

1.1 模具概述

模具是一种能大批量地生产出相同形状和尺寸产品的工具。它对现代工业，特别是汽车、轻工、电子、航空等行业有着举足轻重的作用。

1.1.1 模具在现代生产中的作用

现代化的工业生产中，模具工业是各种工业的基础。在工业制品中，各种金属、塑料、橡胶、玻璃、陶瓷、粉末冶金、复合材料等制品的生产都离不开模具。特别是在汽车、轻工、电子、航空等行业中，它们的新产品开发和生产更是依赖于模具技术的进步。可以说，没有模具就不可能有现代的物质文明。

用模具进行生产具有如下优点。

① 生产率高 一台普通冲压设备每分钟可生产零件几十件，而高速冲床的生产率可达每分钟数百件甚至上千件。

② 质量好 用模具生产的产品成形性好，产品形状的几何尺寸一致性高，便于互换。一般地说，模锻件强度高；压铸件缺陷少；钣金件重量轻且表面光滑；塑料制品坚固耐用、式样新颖、形状变化无穷、日新月异。这些都是用其他方法生产所无法代替的。

③ 材料消耗低 用模具生产的产品，其切削加工量少，有些甚至不需要加工，故其材料利用率甚高。以模锻代替自由锻，以挤压件代替机加工件，以塑代木，以塑代钢以及弯钣金件，对减少材料的消耗均起着非常显著的作用。

④ 成本低 由于生产率高、质量好和材料消耗低，因此，用模具来生产的成本，在一定的批量下是各种加工方法中成本最低的。

1.1.2 现代化工业对模具的要求

为了适应现代化工业的大批量生产高精度产品的需要，模具应满足如下要求。

① 高精度 为了适应汽车、电器、仪表、信息、航天等行业产品的要求，模具必须比传统的具有较高的精度。模具的精度要达 $0.003\sim 0.006\text{mm}$ ，有些甚至还更高。

② 寿命长 长寿命是保证模具能正常生产的必要条件之一。目前模具的寿命要比传统的模具高 $5\sim 10$ 倍。例如，冲模的寿命达 500 万次以上；硬质合金多工位级进模的寿命可达

20000 万~60000 万次；注塑模达 40 万~60 万件；压铸模达 45 万~100 万件。此外，模具寿命长，分摊到每件产品的费用低，从而降低了产品的制造成本。

③ 模具更新及制造的周期短 随着物质文明的程度越来越高，产品的数量和品种也越来越多。同时，由于市场竞争的加剧，为了产品在很短的时间内投入市场，就要求模具能以极高的速度更新和制造出来。

④ 成本低 模具的成本直接影响到产品的价格。为了保证模具的高精度和长的寿命，模具所用的材料较好，加工较难，所以模具一般都是较昂贵的。为此使模具的结构标准化和系列化，采用先进的模具设计和模具加工技术以缩短模具的设计和加工时间等措施，是降低模具成本的有效方法。

1.1.3 模具工业的发展趋势

为适应现代化工业的需要，模具工业正朝着下面所述的方向发展。

① 建立独立的工业体系 在模具工业中，建立具有标准化、系列化模具零件生产和供应的厂商、优质模具材料的生产与供应系统、具有高级模具专业人才和先进加工工艺装备的模具生产厂，从而使模具工业在国民经济体系中成为一个独立的工业体系。

② 从劳动密集型产业向知识密集型转变 加大模具企业的投资，更新模具加工设备，培养具有现代科学技术的模具设计和模具制造人才，使模具企业从劳动密集型向技术密集、人才密集和资金密集的产业转变。

③ 开发数控模具加工技术 模具数控加工技术是在模具数控设计的基础上，通过采用数控控制机床来对模具零件进行加工。

1.2 模具的分类及编码

模具的种类很多，其分类方法也很多。模具分类的目的是便于模具的设计、制造和生产管理。

1.2.1 按便于生产管理的原则对模具分类

为了便于生产管理，对模具可按如下原则分类。

① 按制品的材料分：可分为塑料件模具、橡胶件模具、玻璃件模具、陶瓷件模具和金属件模具等。

② 按模具的大小分：可分为大型模具、中型模具、中小型模具、小型模具和微细型模具等。

③ 按制品要求的精密度等级分：可分为低精密度模具、一般精密度模具和精密模具等。按上述原则区分模具后，可便于仓库储存、保管和组织生产时调用。

1.2.2 按便于模具设计、制造的原则对模具分类和编码

不同的制品，所用的加工方法不同，其模具结构及设计原理就不同。所以，为了模具的标准化和系列化设计，通常按制品的加工方法来对模具进行分类和编码，如图 1-1~图 1-7 所示。

上述是常见并多用的模具，此外还有轧制模（ZH）、压延模（Y）和拉拔模（L）等。模具还可按其工作状态分为冷作模（如冷冲压模、冷锻模、冷拔模等）和热作模（如压铸模、注塑模、锤锻模等）。

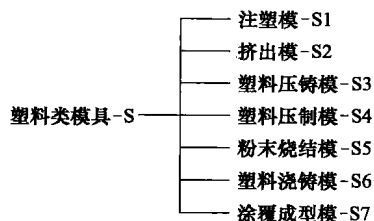


图 1-1 塑料类模具分类

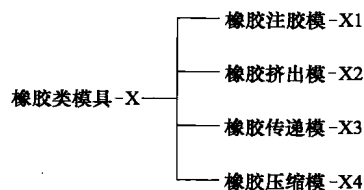


图 1-2 橡胶类模具分类

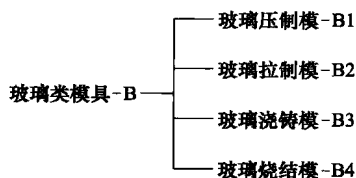


图 1-3 玻璃类模具分类

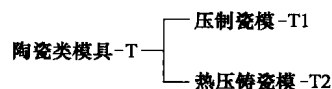


图 1-4 陶瓷类模具分类

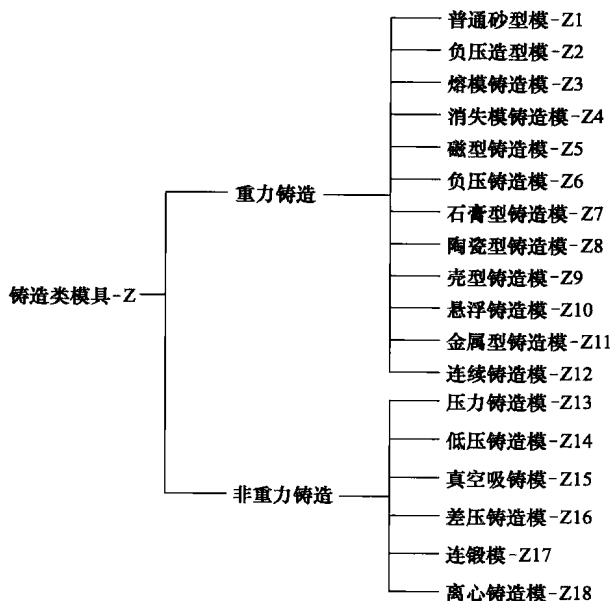


图 1-5 铸造类模具分类

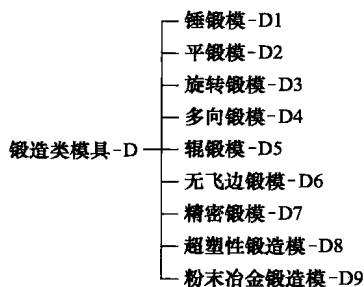


图 1-6 锻造类模具分类

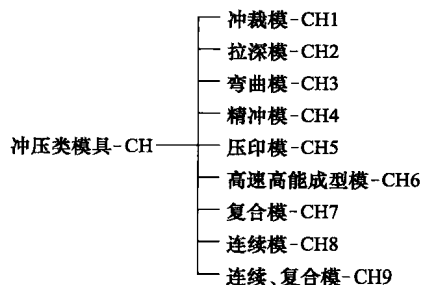


图 1-7 冲压类模具分类

1.3 模具数控加工系统

模具数控加工系统，包括实施计算机自动编程和数控加工所需要的硬件系统、软件系统和人才系统。

1.3.1 实现模具数控加工所需的硬件条件

实现模具数控加工的硬件包括计算机系统和各种数控加工设备（简称数控设备）。

计算机系统是实现模具数控加工系统的核心，包括计算机及各种处理系统、图形工作站、大容量的存储器、图形输入和输出设备，以及各种接口等。

数控设备采用的是先进的、自动化程度高、高精度的加工设备，这部分硬件投资巨大。它主要包括各种类型的专用数控机床及各类由电子计算机控制的加工设备及控制机，如加工中心、数控车床、数控钻床、数控铣床、数控磨床、工业机器人等。

根据各个企业或工厂的具体条件不同，计算机系统有：以大型或中型计算机为主的主机系统；小型计算机组成的 Turnkey（转匙）系统；工作站系统；以微机为主的低价系统。

① 主机系统 以大型或中型计算机为核心的主机系统，是由中央处理机、存储器、操作终端、打印机和绘图机等组成。它的优点是可运行大型 CAD/CAM 软件，享用统一数据库，所开发的软件具有很好的继承性。但投资巨大，不适合中、小型企业。其系统构成如图 1-8 所示。

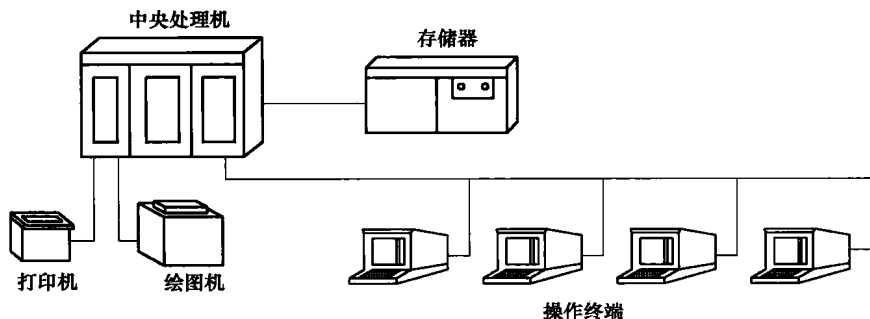


图 1-8 大型主机系统的构成

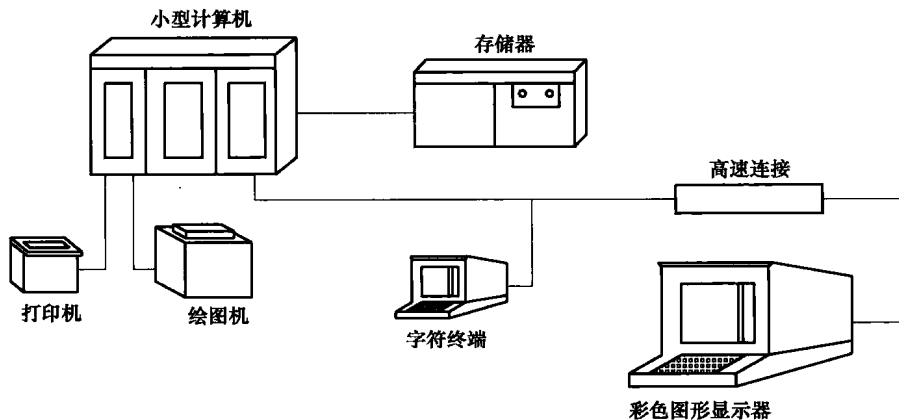


图 1-9 小型机成套系统



② 小型机成套系统 小型机的任务针对性较强,系统的软、硬件配套齐全,所以这种系统又称为“转匙”系统,有“拿来即用”的意思。其系统构成如图 1-9 所示。

③ 工作站系统 工作站是集计算、图形/图像显示、多窗口、多进程管理为一体的计算机设备。工作站系统由于每个用户单机独占资源,处理速度快,性能效率高,而且价格适中,不必一次性集中投资,具有良好的可扩充性,对大、中、小型企业均可应用。工作站系统示意如图 1-10 所示。

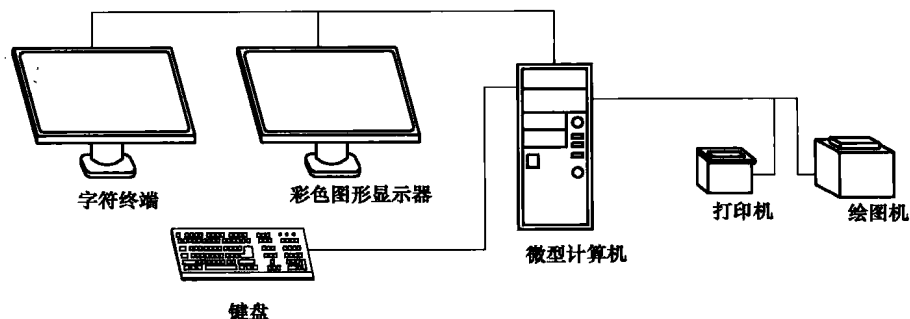


图 1-10 工作站系统的构成

④ 低价系统 低价系统是在个人计算机的基础上配置软盘、硬盘驱动器、鼠标、显示器、打印机或绘图机等组成的。它具有价格低廉、对运行环境要求低、维修服务方便、学习和使用容易、完全开放式设计等优点,发展很快。特别适用于中、小型企业。低价系统所使用的 CAD/CAM 软件很多,故在模具工业中得到广泛的应用。

微机数控加工系统的构成如图 1-11 所示。

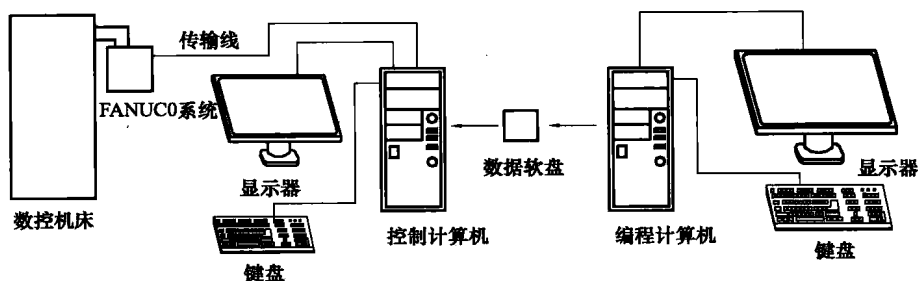


图 1-11 微机数控加工系统的构成

1.3.2 实现模具数控加工所需的软件条件

在实施模具数控加工的过程中,所需的软件条件和硬件条件一样重要。硬件是软件的工作平台,软件则是驱动硬件工作的系统核心,它对系统的总体功能起着决定性的作用。模具数控加工的软件由下面三种软件组成。

(1) 系统软件

系统软件包括负责全面管理计算机资源的操作系统和用户接口管理软件;各种高级语言的编译系统;汇编系统;诊断系统;各种工具软件等。它是整个软件系统中最核心的部分,直接与计算机的硬件相联系,包括 CPU 管理、存储管理、进程管理、文件管理、输入输出管理和作业管理等操作。常用的系统软件有 WINDOWS、OS/2、UNIX 等操作软件。

(2) 支撑软件

支撑软件是在系统软件的基础上,实施模具数控加工所需的最基本的应用软件。它主要包括图形处理软件、动态模拟仿真软件、数控加工编程软件、检测与质量控制软件、数据库管理软件等。

支撑软件的作用是,建立起开发模具数控加工所需的应用软件平台,以缩短应用软件的开发周期,减少应用软件开发的工作量,使应用软件符合国家工业标准,并提高应用软件的水平。常用的支撑软件有 Mastercam、Unigraphics、SolidWorks、Pro/ENGINEER 等。这些支撑软件的版本更新很快,其功能越来越强大。可直接面向用户,对模具数控加工起着越来越重要的作用。

(3) 应用软件

应用软件是在选定的系统软件和支撑软件的基础上开发的,直接面向用户的软件。它一般由工厂、企业或研究单位,根据实际生产条件进行二次开发。其目的是提高模具的编程效率、缩短模具生产周期、提高产品质量,使软件更加符合工厂生产实际和便于技术人员使用。

1.3.3 实现模具数控加工所需的人才条件

实现模具数控加工,除硬件条件和软件条件外,还有一个同样重要的条件就是掌握这项技术,并能使其正常运转、发挥效益,开发应用的人才条件。这些人才应包括硬件维护、软件管理、数据库管理,尤其是那些熟悉模具设计制造专业业务、熟练操作计算机硬件和软件系统和数控控制加工设备操作的人才。

1.4 模具数控加工设备概述

1.4.1 数控机床的结构特点及要求

(1) 数控机床的结构特点

① 采用高性能的无级变速主轴及伺服传动系统,机械传动结构大为简化,传动链缩短。

② 采用刚度和抗振性较好的机床结构,如动静压轴承的主轴部件、钢板焊接结构的支承件等。

③ 采用在效率、刚度、精度等方面都优良的传动元件,如滚珠丝杠螺母副、静压蜗杆副以及塑料滑动导轨、滚动导轨、静压导轨等。

④ 采用多主轴、多刀架的结构,以及刀具与工件的自动夹紧装置、自动换刀装置和自动排屑、自动润滑冷却装置等,大大改善了劳动条件,提高了生产率。

⑤ 采取减小机床热变形的措施,保证了机床的精度稳定,获得了可靠的加工质量。

(2) 对数控机床的结构要求及措施

① 机床要有较高的静、动刚度 在数控机床加工过程中,加工精度除了取决于数控系统,还取决于数控机床本身的精度。机床床身、导轨工作台、刀架和主轴箱的几何精度或变形而产生的误差,取决于它们的结构刚度,并且这些误差在加工过程中不能进行人为的调整和补偿。因此,必须把移动件的重量和切削力引起的弹性变形控制在最小限度之内,以保证加工精度和表面质量。

为了提高机床的静刚度,在机床结构上常采用以下措施。

a. 为提高机床主轴的刚度,常采用三支承结构,并且选用刚性好的双列短圆柱滚子轴



承和角接触向心推力轴承，以减小主轴的径向和轴向变形。

b. 为提高机床整体的刚度，常采用筋板结构。表 1-1 给出了方形截面立柱在加筋前后的静刚度比值。从表中可以看出，加筋板后相对质量、相对弯曲刚度、相对扭曲刚度均提高。

表 1-1 方形截面立柱加筋前后的静刚度比值

加 筋 形 式	相 对 质 量	相 对 弯 曲 刚 度	相 对 扭 曲 刚 度
	1	1	1
	1.24	1.17	1.38
	1.34	1.21	8.86
	1.63	1.32	17.7

c. 在大型数控机床中，移动载荷对机床变形有较大的影响。常采用液压平衡和重块平衡来减少构件的变形，如图 1-12 所示。利用重块有效地减小主轴箱左右移动对横梁变形的影响。

d. 在数控车床中，为了提高刀架的刚度，要合理设计转台的大小和刀具的数目，并且尽可能地减少 a/b （如图 1-13 所示， a 为支点到切削力的距离， b 为支点到夹紧力的距离）。此外，在刀具外伸量一定的情况下，增大刀架底座的尺寸是提高刚度的有效途径。

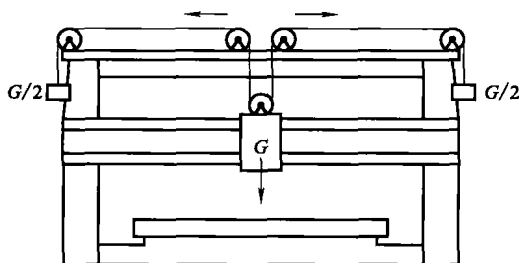


图 1-12 重块平衡结构示意图

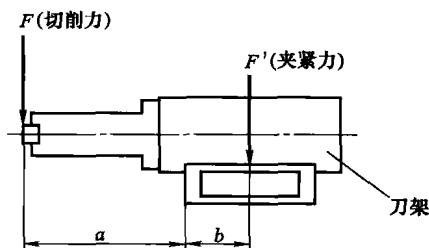


图 1-13 刀架受力图

e. 为了增加机床的承载能力，必须提高机床各部件的接触刚度，常采用的方法有：通过刮研增加单位面积上的接触点；在界面之间施加足够大的预加载荷来增加接触面积。

为了充分发挥数控机床的加工能力，并能够进行稳定切削，在保证静刚度的前提下，还必须提高其动刚度。在加工过程中机床的变形主要是由振动产生的。为提高动刚度，常采用抗振的方法如下。

- 采用了钢板焊接结构的床身、立柱、横梁和工作台来改善机床的抗振性。
- 调整机床各部件的质量和自振频率，使它远离工作范围内存在的强迫振动源的频率。
- 数控机床中的旋转零部件应尽可能进行良好的动平衡，以减少强迫振动源，或者用弹性材料隔离振源，以减少它对机床的影响。

② 减少机床的热变形 机床在内外热源的影响下，机床各部件将发生不同程度的热变形，使机床的几何精度下降，不能保证加工质量。机床产生热变形的主要原因是热源和机床各部分的温差。热源主要包括切削热、电机运转产生的热、传动件摩擦产生的热等。温差主要是由于机床各部件的材料、结构、形状和尺寸不一致而导致机床的热变形不同。为了减少热变形，在数控机床结构中通常采用以下措施。

a. 减少发热。机床内部发热是产生热变形的主要热源，应当尽可能地将热源从主机中分离出去。目前大多数数控机床的电机、变速箱、液压装置以及油箱等都已外置。对于不能与主机分离的热源，如主轴轴承、丝杠螺母副等，必须改善其摩擦特性和润滑条件，以减少机床内部的发热。

b. 控制温升。在采取了一系列减少热源的措施后，热变形的情况将有所改善。但要完全消除机床的内外热源通常是十分困难的，甚至是不可能的。所以必须通过良好的散热和冷却来控制温升，以减小热源的影响。其中比较有效的方法有两种：

第一种，在机床的发热部位强制冷却，如多坐标轴的数控机床，由于它在几个方向上都要求很高的精度，很难用补偿的方法来减少热变形，对于这类机床，采用冷冻机对润滑液进行强制冷却效果良好；

第二种，在机床低温部分通过加热的方法，使机床各点的温度趋于一致，这样可以减少由于温差造成的翘曲变形，某些大型的数控机床设有加热器，在加工之前通过加热来缩短机床的预热时间，以提高机床的生产率。

③ 改善机床结构 在同样发热的条件下，机床结构对热变形也有很大影响。基于热对称的原则，数控机床过去采用的单立柱结构，现在逐步被双立柱结构所代替。由于左右对称，双立柱结构受热后的主轴轴线除产生垂直方向的平移外，其他方向的变形很小，而垂直方向的轴线移动，可以用一个坐标的修正量进行补偿。对于数控车床的主轴箱，应尽量使主