

数控加工 实用手册

SHUKONG JIAGONG
SHIYONG SHOUCHE

徐 峰 苏本杰 主编

本书包括数控机床的概述、数控编程基础、数控加工的工艺知识和数控机床维修基础知识。



时代出版
APR TIME

时代出版传媒股份有限公司
安徽科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

数控加工实用手册/徐峰,苏本杰编著. —合肥:安徽科学技术出版社,2010.1

ISBN 978-7-5337-4544-8

I. 数… II. ①徐…②苏… III. 数控机床-加工-技术手册 IV. TG659-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 227794 号

数控加工实用手册

徐 峰 苏本杰 编著

出 版 人: 黄和平

责任编辑: 刘三珊 叶兆恺

封面设计: 王 艳

出版发行: 安徽科学技术出版社(合肥市政务文化新区圣泉路 1118 号
出版传媒广场, 邮编: 230071)

电 话: (0551)3533330

网 址: www.ahstp.net

E - mail: yougoubu@sina.com

经 销: 新华书店

排 版: 安徽事达科技贸易有限公司

印 刷: 合肥晓星印刷有限责任公司

开 本: 850×1168 1/32

印 张: 20.5

字 数: 803 千

版 次: 2010 年 1 月第 1 版 2010 年 1 月第 1 次印刷

定 价: 45.00 元

(本书如有印装质量问题,影响阅读,请向本社市场营销部调换)

内 容 提 要

本书是一本数控加工技术工人常用的综合性工作手册,主要内容包括数控机床的概述、手工编程中的数学处理、数控加工的工艺知识、数控编程的基础、数控车削加工、数控铣削加工、数控加工中心加工、数控电火花线切割加工、数控机床维修基础等知识。手册中所列的技术资料和加工实例大多都来自生产第一线,有较强的实用性和参考价值,突出了应用性、实用性、综合性和先进性,体系新颖,内容翔实。

本手册可以供广大数控加工技术人员阅读参考,也可以作为高职、大专、中专及本科院校数控专业师生及有关技术人员的培训教材和学习资料。

前 言

改革开放 20 多年来,我国机床消费额和国民经济 GDP 增长值几乎同步,十年翻了一番。20 世纪 80 年代初,我国机床消费额为 10 亿美元,20 世纪 90 年代初达 20 亿美元,2000 年为 37.88 亿美元。当年世界机床最大消费国美国,消费额为 68 亿美元,原预计 2010 年中国将成为世界最大机床消费市场,令人意想不到的是,2003 年美国发表的一项调查统计报告称:全世界机床产值 2002 年约 310 亿美元,比上年减少 14.2%,但中国比上年增加 20%,达 56.96 亿美元。我国首次成为世界第一机床消费大国和全球第一机床进口大国。

无论从数控机床的增长速度,还是从进口数量的膨胀,无论从数控化率的国际比较,还是从技术等级的水平,我们都能发现一个显而易见的事实:数控机床的广泛应用,急需大量的数控技术人才,急需在短期内培养出一大批高能型人才。

随着 WTO 的日益深入,我国制造企业已开始广泛使用先进的数控技术,而掌握数控技术的机电复合人才奇缺。2003 年,国家数控系统工程技术研究中心的一项调研结果显示,仅数控机床的操作工就短缺 60 多万人。

调研同时显示,我国目前的数控人才不仅表现在数量上的短缺,而且质量、知识结构也不能完全满足企业需求。根据 2004 年 2 月国家劳动和社会保障部、教育部等六部门调查研究和分析预测,数控技术应用是我国劳动力市场技能型人才最为短缺的 4 类人才之一,并列榜首。

为加快和推动数控加工专业的发展,安徽科学技术出版社特邀请长三角地区知名先进制造企业、职业院校及长三角国家高技能人才培养中心的有关专家组织编写了《数控加工实用手册》。

本书是一本数控加工技术工人常用的综合性工作手册,主要内容包括数控机床的概述、手工编程中的数学处理、数控加工的工艺知识、数控编程的基础、数控车削加工、数控铣削加工、数控加工中心加工、数控电火花线切割加工、数控机床维修基础等知识。手册中所列的技术资料和加工实例大多都来自生产第一线,有较强的实用性和参考价值,突出了应用性、实用性、综合性和先进性,体系新颖,内容翔实。本手册可以供广大数控加工技术人员阅读参考,也可以作为高职、大专、中专及本科院校数控专业师生及有关技术人员的培训教材和学习资料。

本手册由徐峰、苏本杰高级工程师主编并统稿,参加编写人员主要有张能武、周斌兴、黄芸、程美玲、段传林、吴红梅、邱立功、桂旺生、刘述芳、楚宜民、马建民、陈忠民、王元龙、满维龙、张道霞、许佩霞、陶荣伟、杨光明、唐亚鸣、任志俊、薛国祥、戴

胡斌、徐森、周宇辉、崔俊、袁黎、赵海娟、余丰茹、余莉、汪强、王军、杜辛、张军、赵玲、刘春玲、程国元、夏红民、薛川、王洁、谷丰、李子豪等同志。全书由唐继艳、吴娟录入校对。

本手册在编写过程中得到上海模具协会、江苏模具协会、江南大学机械学院、常州职业技术学院、韩国机床设备销售服务中心、上海现代模具技术培训中心、长三角国家高技能人才培养中心的大力支持和帮助,并得到众多专家的指导和鼎力相助;同时参考了大量的企业内训资料和图书出版资料,谨在此表示衷心的感谢和崇高敬意!

因编者水平有限,加上时间仓促,书中难免有错误和不妥之处,恳请读者批评指正。

编 者

目 录

第 1 章 数控加工技术概述	1
第 1 节 数控技术基础知识	1
1.1 数控技术基本概念	1
1.2 数控加工的特点和应用范围	3
1.3 数控技术的发展趋势和研究方向	4
第 2 节 数控机床概述	11
2.1 数控机床的产生与发展	11
2.2 数控机床的基本组成原理	15
2.3 数控机床的分类	17
第 3 节 数控机床的安装、调试及验收	22
3.1 数控机床的安装与调试	22
3.2 数控机床的验收	27
第 2 章 数控加工编程基础	38
第 1 节 数控加工编程概述	38
1.1 数控编程基本概念	38
1.2 数控编程的步骤与方法	38
1.3 数控编程的插补原理	39
第 2 节 数控机床的坐标系统	41
2.1 坐标系及运动方向的规定	41
2.2 坐标轴及其运动方向	41
2.3 坐标原点	43
2.4 程序原点的设置与偏移	44
2.5 绝对坐标编程及增量坐标编程	45
第 3 节 程序编制基础知识	47
3.1 数控加工程序的格式	47
3.2 数控编程的代码	49
第 4 节 常用数控指令及用法	58
4.1 常用准备功能指令及用法	58
4.2 常用辅助功能指令及用法	70
4.3 其他常用编程指令及用法	71

第3章 数控加工工艺与数值计算	77
第1节 数控加工工艺分析	77
1.1 机床的合理选用	77
1.2 数控加工工艺性分析	78
1.3 加工方法和加工方案的确定	80
1.4 工序和工步的划分	85
1.5 零件的定位和安装	86
1.6 数控加工刀具	87
1.7 切削用量的确定	98
1.8 数控加工路线的确定	99
1.9 工艺文件的制定	107
第2节 数控编程中的数值计算	109
2.1 平面轮廓切削点的计算	110
2.2 平面轮廓加工中刀具中心位置的计算	115
2.3 空间曲线曲面加工的数值计算	117
第4章 数控车削加工	122
第1节 数控车削加工基础	122
1.1 数控车床概述	122
1.2 数控车削加工基础	139
第2节 数控车床加工工艺分析	144
2.1 数控车床加工工艺概述	144
2.2 数控车床加工工艺分析	145
2.3 工件在数控车床上的定位与装夹	152
2.4 数控车床加工工序的设计	167
2.5 典型零件的数控车削加工工艺分析	177
第3节 数控车削加工编程	189
3.1 数控车床的程序编制	189
3.2 数控车削编程实例	230
3.3 车削中心的程序编制	244
第4节 数控车削加工综合实例	252
第5章 数控铣削加工	272
第1节 数控铣床概述	272
1.1 数控铣床的分类及应用	272
1.2 数控铣床的结构组成	277
第2节 数控铣床加工工艺分析	290
2.1 数控铣床加工工艺概述	290

2.2 数控铣床加工工艺分析	291
2.3 工件在数控铣床上的定位与装夹	305
2.4 数控铣床加工工序的设计	323
2.5 典型零件数控铣削加工工艺分析	335
第3节 数控铣削加工编程	345
3.1 数控铣床的程序编制	345
3.2 数控铣床综合编程实训	372
第4节 数控铣削加工综合实例	381
第6章 数控加工中心加工	394
第1节 数控加工中心加工基础	394
1.1 数控加工中心概述	394
1.2 加工中心的结构组成	399
第2节 加工中心的加工工艺分析	418
2.1 加工中心加工工艺概述	418
2.2 加工中心加工工艺方案的制订	421
2.3 典型零件的加工中心加工工艺分析	449
第3节 数控加工中心加工编程	466
3.1 加工中心加工程序的编制	466
3.2 加工中心综合编程实例	495
第4节 数控加工中心加工综合实例	505
第7章 数控电火花线切割加工	519
第1节 数控电火花线切割加工基础	519
1.1 数控电火花线切割加工概述	519
1.2 数控电火花线切割加工设备	523
第2节 数控电火花线切割加工工艺	539
2.1 电火花线切割加工的步骤及要求	539
2.2 穿丝孔、起切点及走丝路线确定	542
2.3 线切割工艺参数的选择	545
2.4 常用夹具及工件的正确装夹	553
2.5 线切割加工工艺影响因素分析	562
2.6 穿丝孔加工及其影响	566
2.7 电火花线切割加工的某些工艺技巧	570
第3节 数控线切割加工编程	574
3.1 典型化编程法	575
3.2 数控线手工切割编程	581
3.3 数控线切割编程实例	591

第4节 数控线切割加工综合实例	600
第8章 数控机床维修基础	607
第1节 数控机床维修概述	607
1.1 数控机床故障诊断与维修的意义	607
1.2 数控机床的故障特点及分类	608
1.3 数控机床维修基本要求	612
1.4 数控机床常用典型故障分析仪器	614
第2节 数控机床故障诊断与维修技术	624
2.1 故障诊断流程	624
2.2 数控系统的自诊断技术	631
2.3 数控机床常见故障检查方法	636
参考文献	640

第1章 数控加工技术概述

第1节 数控技术基础知识

制造业是所有与制造有关的企业机构的总体,是一个国家国民经济的支柱产业。它一方面为全社会生产日用消费品,创造价值,另一方面为国民经济各个部门提供生产资料和装备。据估计,工业化国家 70%~80% 的物质财富来自制造业,约有 1/4 的人口从事各种形式的制造活动。可见,制造业对一个国家的经济地位和政治地位具有至关重要的影响,在 21 世纪的工业生产中具有决定性的地位与作用。

由于现代科学技术日新月异的发展,机电产品日趋精密和复杂,且更新换代加快,改型频繁,用户的需求也日趋多样化和个性化,中小批量的零件生产越来越多。这对制造业的精度、效率和柔性提出了更高的要求,希望市场能提供满足不同加工需求、迅速高效、低成本地构筑面向用户的生产制造系统,并大幅度地降低维护和使用的成本。同时还要求新一代制造系统具有方便的网络功能,以适应未来车间面向任务和订单的生产组织和管理模式。

随着社会经济发展对制造业的要求不断提高,以及科学技术特别是计算机技术的高速发展,传统的制造业已发生了根本性的变革。以数控技术为主的现代制造技术占据了重要地位,数控技术集微电子、计算机、信息处理、自动检测、自动控制等高新技术于一体,是制造业实现柔性化、自动化、集成化、智能化的重要基础。这个基础是否牢固直接影响到一个国家的经济发展和综合国力,关系到一个国家的战略地位。因此,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。在我国,数控技术与装备的发展亦得到了高度重视,近年来取得了相当大的进步,特别是在通用微机数控领域,基于 PC 平台的国产数控系统,已经走在了世界前列。

1.1 数控技术基本概念

1. 数控技术

数控(Numerical Control)技术是指用数字化的信息对某一对象进行控制的技术,控制对象可以是位移、角度、速度等机械量,也可以是温度、压力、流量、颜色等物理量,这些量的大小不仅是可测量的,而且可以经 A/D 或 D/A 转换,用数字信号来表示。数控技术是现代发展起来的一种自动控制技术,是机械加工现代化

的重要基础与关键技术。

2. 数控加工

数控加工是指采用数字信息对零件加工过程进行定义,并控制机床进行自动运行的一种自动化加工方法。数控加工技术是20世纪40年代后期为适应加工复杂外形零件而发展起来的一种自动化技术。1947年,美国帕森斯(Parsons)公司为了精确地制作直升机机翼、桨叶和飞机框架,提出了用数字信息来控制机床自动加工外形复杂零件的设想。他们利用电子计算机对机翼加工路径进行数据处理,并考虑到刀具直径对加工路径的影响,使得加工精度达到 ± 0.0015 英寸(0.0381 mm)。1949年美国空军为了能在短时间内制造出经常变更设计的火箭零件,与帕森斯公司和麻省理工学院(MIT)伺服机构研究所合作,于1952年研制成功世界上第一台数控机床——三坐标立式铣床,可控制铣刀进行连续空间曲面的加工,揭开了数控加工技术的序幕。

数控加工是一种高效率、高精度与高柔性特点的自动化加工方法,可有效解决复杂、精密、小批多变零件的加工问题,充分适应现代化生产的需要。数控加工必须由控制机床来实现。

3. 数控机床

数控机床就是采用了数控技术的机床。数控机床将零件加工过程所需的各种操作和步骤(如主轴变速、主轴启动和停止、松夹工件、进刀退刀、冷却液开或关等)以及刀具与工件之间的相对位移量都用数字化的代码来表示,由编程人员编制成规定的加工程序,通过输入介质(磁盘等)送入计算机控制系统,由计算机对输入的信息进行处理与运算,发出各种指令来控制机床的运动,使机床自动地加工出所需要的零件。

现代数控机床综合应用了微电子技术、计算机技术、精密检测技术、伺服驱动技术以及精密机械技术等多方面的最新成果,是典型的机电一体化产品。

4. 数控编程

数控编程(NC Programming)就是生成用数控机床进行零件加工的数控程序的过程。数控程序是由一系列程序段组成,把零件的加工过程、切削用量、位移数据以及各种辅助操作,按机床的操作和运动顺序,用机床规定的指令及程序格式排列而成的一个有序指令集。例如:

```
N01 G00 X200 Y-39 M03;
```

该程序段表示一个操作:命令机床以设定的快速运动速度,以直线方式移动到 $X=200\text{ mm}$, $Y=-39\text{ mm}$ 处后,主轴正转。其中N01是程序段的行号;G00字段表示机床快速定位; $X200$ 和 $Y-39$ 表示沿 x 轴和 y 轴的位移坐标值;M03表示主轴正转。

零件加工程序的编制(数控编程)是实现数控加工的重要环节,特别是对于复杂零件的加工,其编程工作的重要性甚至超过数控机床本身。此外,在现代生产

中,产品形状及质量信息往往需通过坐标测量机或直接在数控机床上测量来得到,测量运动指令也有赖于数控编程来产生。因此,数控编程对于产品质量控制也有着重要的作用。数控编程技术涉及制造工艺、计算机技术、数学、计算几何、微分几何、人工智能等众多学科领域知识,它所追求的目标是如何更有效地获得满足各种零件加工要求的高质量数控加工程序,以便充分地发挥数控机床的性能,获得更高的加工效率与加工质量。

1.2 数控加工的特点和应用范围

1. 数控加工的特点

1) 具有复杂形状加工能力

复杂形状零件在飞机、汽车、造船、模具、动力设备和国防军工等制造部门具有重要地位,其加工质量直接影响整机产品的性能。数控加工运动的任意可控性使其能完成普通加工方法难以完成或者无法进行的复杂型面加工。

2) 高质量

数控加工是用数字程序控制实现自动加工,排除了人为误差因素,且加工误差还可以由数控系统通过软件技术进行补偿校正。因此,采用数控加工可以提高零件加工精度和产品质量。

3) 高效率

与采用普通机床加工相比,采用数控加工一般可提高生产率2~3倍,在加工复杂零件时生产率可提高十几倍甚至几十倍。特别是五面体加工中心和柔性制造单元等设备,零件一次装夹后能完成几乎所有表面的加工,不仅可消除多次装夹引起的定位误差,还可大大减少加工辅助操作,使加工效率明显提高。

4) 高柔性

只需改变零件程序即可适应不同品种的零件加工,且几乎不需要制造专用工装夹具,因而加工柔性好,有利于缩短产品的研制与生产周期,适应多品种、中小批量的现代生产需要。

5) 减轻劳动强度,改善劳动条件

数控加工是按事先编好的程序自动完成的,操作者不需要进行繁重的重复手工操作,劳动强度和紧张程度大为改善,劳动条件也相应得到改善。

6) 有利于生产管理

数控加工可大大提高生产率,稳定加工质量,缩短加工周期,易于在工厂或车间实行计算机管理。数控加工技术的应用,使机械加工的大量前期准备工作与机械加工过程联为一体,使零件的计算机辅助设计(CAD)、计算机辅助工艺规划(CAPP)和计算机辅助制造(CAM)的一体化成为现实,宜于实现现代化的生产管理。

2. 数控加工的主要应用范围

数控加工是一种可编程的柔性加工方法,但其设备费用相对较高,故目前数控加工多应用于加工零件形状比较复杂、精度要求较高,以及产品更换频繁、生产周期要求短的场合。具体地说,下面这些类型的零件最适宜于数控加工:

- (1)如用数学方法定义的复杂曲线、曲面轮廓、加工精度要求高的零件;
- (2)公差带小、互换性高、要求精确复制的零件;
- (3)用普通机床加工时,要求设计制造复杂的专用工装夹具或需要很长调整时间的零件;
- (4)价值高的零件;
- (5)小批量生产的零件;
- (6)需一次装夹加工多部位(如钻、镗、铰、攻螺纹及铣削加工联合进行)的零件。

可见,目前的数控加工主要应用于以下两个方面:

一方面的应用是常规零件加工,如二维车削、箱体类镗铣等,其目的在于:提高加工效率、避免人为误差,保证产品质量;以柔性加工方式取代高成本的工装设备,缩短产品制造周期,适应市场需求。这类零件一般形状较简单,实现上述目的的关键在于提高机床的柔性自动化程度,高速高精加工能力,以及加工过程的可靠性与设备的操作性能。同时合理的生产组织、计划调度和工艺过程安排也非常重要。

另一方面的应用是复杂形状零件加工,如模具型腔、涡轮叶片等。这类零件型面复杂,用常规加工方法难以实现,它不仅促使了数控加工技术的产生,而且也一直是数控加工技术主要研究及应用的对象。由于零件型面复杂,在加工技术方面,除要求数控机床具有较强的运动控制能力(如多轴联动)外,更重要的是如何有效地获得高效优质的数控加工程序,并从加工过程整体上提高生产效率。

1.3 数控技术的发展趋势和研究方向

数控技术的应用不但给传统制造业带来革命性的变化,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,它对国计民生等一些重要行业(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现代工业发展的大趋势。当前世界上数控技术及其装备的发展呈现如下发展趋势。

1. 高速、高精密化

新一代数控机床(含加工中心)只有通过高速化大幅度缩短切削工时才可能进一步提高其生产率。这与超高速加工特别是高速加工中心的开发应用紧密相关。20世纪90年代以来,德、美、日各国争相开发应用新一代高速数控机床,加快机床高速化发展步伐。高速主轴单元(电主轴,转速 $15\,000\sim 100\,000\text{ r/min}$)、高速且高加/减速度的进给运动部件(快移速度 $60\sim 120\text{ m/min}$,切削进给速度高达 60 m/min)、高性

能数控和伺服系统以及数控工具系统都出现了新的突破,达到了新的技术水平。随着超高速切削机具、超硬耐磨长寿命刀具和磨料磨具、大功率高速电主轴、高加/减速度直线电机驱动进给部件以及高性能控制系统(含监控系统)和防护装置等一系列技术领域关键技术的解决,应不失时机地开发应用新一代高速数控机床。为了实现高速、高精加工,与之配套的功能部件如电主轴、直线电机得到了快速的发展,应用领域进一步扩大。

依靠快速、准确的数字量传递技术对高性能的机床执行部件进行精密度、高响应速度的实时处理。由于采用了新型刀具,当分辨率为 $1\text{ }\mu\text{m}$ 时切削速度在 100 m/min (有的可达 200 m/min)以上,分辨率为 $0.1\text{ }\mu\text{m}$ 时切削速度在 24 m/min 以上;自动换刀速度在 1 s 以内;小线段插补进给速度达到 12 m/min 。由于高效率、大批量生产需求和电子驱动技术的飞速发展,以及高速直线电机的推广应用,已开发出一批高速、高效及高速响应的数控机床。

从精密加工发展到超精密加工(特高精度加工),是各工业强国致力发展的方向。其精度从微米级乃至纳米级($<10\text{ nm}$),其应用范围日趋广泛。超精密加工主要包括超精密切削(车、铣)、超精密磨削、超精密磨研抛光以及超精密特种加工(微细电火花加工、微细电解加工和各种复合加工等)。随着现代科学技术的发展,对超精密加工技术不断提出了新的要求。新材料及新零件的出现,更高精度要求的提出等,都需要超精密加工工艺,发展新型超精密加工机床,完善现代超精密加工技术,以适应现代科学技术的发展。

现代科学技术与生产的发展,对机械加工和测量提出了越来越高的精度要求。加工精密化不只是发展新技术的需求,而且也是提高普通机电产品性能质量、寿命和可靠性的需要,同时还是减少机械产品装配的修配工作量,提高装配效率的需要。故机床的加工精度有提高的趋势。如近 10 年来,普通级数控机床的加工精度已由原来的 $\pm 10\text{ }\mu\text{m}$ 提高到 $\pm 5\text{ }\mu\text{m}$ 和 $\pm 2\text{ }\mu\text{m}$;精密级减为 $\pm 5\text{ }\mu\text{m}$,最高可达 $\pm 1\text{ }\mu\text{m}$ 。主轴回转精度为 $0.02\sim 0.05\text{ }\mu\text{m}$ 、加工圆度为 $0.1\text{ }\mu\text{m}$,表面粗糙度 R_a 为 $0.003\text{ }\mu\text{m}$ 的超精密机床,已有多种产品在市场上出现。2000 年普通加工和精密加工的精度与 1980 年比,分别提高了 4~5 倍,定位精度达到微米级、纳米级。

效率、质量是先进制造技术的主体。高速、高精密度加工技术可极大提高效率,提高产品质量和档次,缩短生产周期和提高市场竞争能力。为此日本先端技术研究会将其列为 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。如在轿车工业领域,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。在航空和航天工业领域,由于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,因此只有在高切削速度和切削力很小的情况下,才能对这些零件进行加工。近来采用对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、螺钉和其他联结方式拼装大型零部件,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、高精度和高柔性的要求。

从2001年国际机床展览会(EMO)情况来看,高速加工中心进给速度可达80 m/min,甚至更高,空运行速度可达100 m/min左右。目前世界上许多汽车厂,已经采用以高速加工中心组成的生产线替代部分组合机床。美国CINCINNATI公司的Hyper Mach机床进给速度最大达60 m/min,快速为100 m/min,加速度达21 g,主轴转速已达60 000 r/min。加工一薄壁飞机零件,只用30 min,而同样的零件在一般高速铣床加工需要3 h,在普通铣床加工需8 h。德国DMG公司的双主轴车床的主轴速度及加速度分别达到12 000 r/min和1 g。

提高生产率的另一措施就是把非切削时间缩减到最短。主要体现在加快移动速度和缩短换刀时间与工作台交换时间。各坐标轴快速移动速度已由8~12 m/min提高到18~24 m/min,30~40 m/min的机床也稳定用于生产。意大利F. A. S公司S630V型5轴控制的立式加工中心的进给速度最高达到48 m/min,采用直线电动机进给速度达60~120 m/min,加速度达1 g。在缩短换刀时间和工作台交换时间方面也取得了较大进展,数控车床刀架转位时间已从1~3 s减少到0.4~0.6 s。加工中心由于刀库和换刀结构的改进,使换刀时间从5~10 s减少到1~3 s,如日本大阪机工的一台卧式加工中心换刀时间为0.6 s。工作台的交换时间也由12~20 s减少到6~10 s,有的在2.5 s以内。

数控机床长期以来一直采用高速钢和硬质合金的刀具材料,致使一般切削速度最多只有60~70 m/min。到了20世纪70年代末至80年代初期,涂层高速钢和涂层硬质合金刀具材料得到了广泛应用。由于其耐磨性和热硬性的提高,因而使切削速度提高到200~300 m/min或更高。近年来陶瓷刀具、聚晶金刚石刀具逐步实用化和普及,使切削速度高达每分钟数百至上千米。而采用CBN砂轮用于生产的磨削速度已达到120~250 m/min。

2. 高可靠性

数控机床的可靠性是数控机床产品质量的一项关键性指标。数控机床能否发挥其高性能、高精度、高效率,并获得良好的效益,关键取决于可靠性。

衡量可靠性重要的量化指标是平均无故障工作时间(Mean Time Between Failures, MTBF)。作为数控机床的大脑——数控系统的MTBF已由20世纪70年代的大于3 000 h,80年代的大于10 000 h,提高到90年代初的大于30 000 h。据日本近期介绍,FANUC的CNC系统已达到 $MTBF \approx 125$ 个月。

高可靠性是指数控系统的可靠性要高于被控设备的可靠性在一个数量级以上,但也不是可靠性越高越好,仍然要适度可靠。因为数控系统是商品,要受性能价格比的约束。对于每天工作两班的无人工厂而言,如果要求在16 h内连续正常工作、无故障率 $P(t) = 99\%$ 以上的话,则数控机床的平均无故障运行时间MTBF就必须大于3 000 h。MTBF大于3 000 h,对于由不同数量的数控机床构成的无人化工厂差别就大多了。若对一台数控机床而言如果主机与数控系统的失效率之比

为 10:1 的话(数控的可靠性比主机高一个数量级),此时数控系统的 MTBF 就大于 33 333.3 h。而其中的数控装置、主轴及驱动等的 MTBF 就必须大于 10 万小时。

在可靠性方面,国外数控装置的 MTBF 值已达 6 000 h 以上,伺服系统的 MTBF 值达到 30 000 h 以上,表现出非常高的可靠性。

目前,很多企业正在对可靠性设计技术、可靠性试验技术、可靠性评价技术、可靠性增长技术以及可靠性管理与可靠性保证体系等进行深入研究和广泛应用,以期使数控机床的整机可靠性提高到一个新水平。

3. 数控机床设计 CAD 化、功能多样化

随着计算机应用的普及及软件技术的发展,CAD(Computer Aided Design,计算机辅助设计)技术得到了广泛发展。CAD 不仅可以替代人工完成浩繁的绘图工作,更重要的是可以进行方案选拔和大件整机的静、动态特性的分析、计算、预测和优化设计,可以对整机各工作部件进行动态模拟仿真。在模块化的基础上,在设计阶段就可以看出产品的三维几何模型和逼真的色彩。采用 CAD,还可以大大提高工作效率,提高设计的一次成功率,从而缩短试制周期,降低成本,增加市场竞争能力。

数控机床的设计是一项要求较高、综合性强、工作量大的工作,故应用 CAD 技术就更有必要、更为迫切。

(1)结构设计模块化。任何一类机床都是由若干基础件、标准件和功能部件组成的。尽管在同一类机床中有规格大小和立、卧等形式之分,但大体上功能部件都是相似的。为便于发展同系列和跨系列变形品种,满足用户市场的需要,现在许多机床生产厂家都在发展自己产品的模块化结构设计。

(2)数控机床结构的创新。数控机床的结构技术重大突破突出表现是近年来已出现的所谓 6 条“腿”结构的加工中心。它是采用可以伸缩的 6 条“腿”(伺服轴)支撑并连接上平台(装有主轴头)与下平台(装有工作台)的构架结构形式,取代传统的床身、立柱等支撑结构,而没有任何导轨与滑板的所谓“虚拟轴机床”(Virtual Axis Machine)。它具有机械结构简单和运动轨迹计算复杂化的特征。其最显著的优点是机床基本性能高,精度相当于坐标测量机,比传统的加工中心高 2~10 倍,刚度为传统加工中心的 5 倍,而在 66 m/min 的轮廓加工速度下,效率相当于传统加工中心的 5~10 倍。6 条“腿”结构加工中心的实例有:英国 GIDDING & LEWIS 公司的 VARIAX(“变异型”)加工中心;瑞士 GEODETIES 公司的 HEXXAPOH(六足动物)加工中心;美国 INGERSOLL 的 OCTAHEDRAL HEXAPOD(“八面体的六足动物”)加工中心和俄罗斯 LAPIK 公司的 TM 系列加工中心。随着这种结构技术的成熟和发展,预示着数控机床技术将进入一个有重大变革的创新时代。

(3)数控机床功能的多样化。随着计算机技术的飞速发展,数控机床的功能越

来越多,具体体现在以下几方面:

a. 用户界面图形化。用户界面是数控系统与使用者之间的对话窗口。当前 INTERNET、虚拟现实、科学计算可视化及多媒体等技术也对用户界面提出了更高要求。图形用户界面极大地方便了非专业用户的使用,人们可以通过窗口和菜单进行操作,便于蓝图编程和快速编程、三维彩色立体动态图形显示、图形动态跟踪和仿真、不同方向的视图和局部显示比例缩放功能的实现。

b. 科学计算可视化。可用于高效处理数据和解释数据,使信息交流不再局限于用文字和语言表达,而可以直接使用图形、图像、动画等可视信息。可视化技术与虚拟环境技术相结合,进一步拓宽了应用领域,如无图纸设计、虚拟样机技术等。这对缩短产品设计周期、提高产品质量、降低产品成本具有重要意义。在数控技术领域,可视化技术可用于 CAD/CAM,如自动编程设计、参数自动设定、刀具补偿和刀具管理数据的动态处理和显示以及加工过程的可视化仿真演示等。

c. 插补和补偿方式多样化。多种插补方式如直线插补、圆弧插补、圆柱插补、空间椭圆曲线插补、螺纹插补、极坐标插补、2D+2 螺旋插补、NANO 插补、NURBS 插补(非均匀有理 B 样条插补)、样条插补(A、B、C 样条)、多项式插补等。多种补偿功能如间隙补偿、垂直补偿、象限误差补偿、螺距和测量系统误差补偿、与速度相关的前馈补偿、温度补偿、带平滑接近和退出以及相反点计算的刀具半径补偿等。

d. 内装高性能 PLC 数控系统。内装高性能 PLC 控制模块,可直接用梯形图或高级语言编程,具有直观的在线调试和在线帮助功能。编程工具中包含用于车床铣床的标准 PLC 用户程序实例。用户可在标准 PLC 用户程序基础上进行编辑修改,从而方便地建立自己的应用程序。

e. 多媒体技术应用。多媒体技术集计算机、声像和通信技术于一体,使计算机具有综合处理声音、文字、图像和视频信息的能力。在数控技术领域,应用多媒体技术可以做到信息处理综合化、智能化,在实时监控系统和生产现场设备的故障诊断、生产过程参数监测等方面有着重大的应用价值。

4. 智能化、网络化、柔性化、集成化

21 世纪的数控装备将是具有一定智能化的装备。智能化的内容包括在数控系统中的各个方面。

(1) 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。

(2) 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。

(3) 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。

(4) 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。

数控系统在控制性能上向智能化发展。随着人工智能在计算机领域的渗透和