



全国高等职业教育示范专业规划教材

数控技术专业



数控加工工艺与编程

关雄飞 主编

SHUKONG JIAGONG GONGYI YU BIANCHENG



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



配电子课件
教师免费下载

全国高等职业教育示范专业规划教材
数控技术专业

数控加工工艺与编程

主 编 关雄飞
副主编 王荪馨 呼刚义
参 编 杨 鹏
主 审 王彦宏



机械工业出版社

本书以 FANUC Oi 系统为研究对象, 内容包括数控加工技术基本概念、数控车床工艺编程、数控铣床及加工中心工艺编程和宏指令编程。本书内容安排合理, 循序渐进, 深入浅出, 综合训练采用项目教学, 目标明确, 选题恰当, 实用性和启发性较强, 有利于学生分析和解决问题能力的提高。在书后附有 SIEMENS 系统和华中世纪星系统指令对照表, 以供读者参考。

本书可作为高等职业院校机械类专业教材, 也可作为相关企业工程技术人员参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

数控加工工艺与编程/关雄飞主编. —北京: 机械工业出版社, 2011. 6
全国高等职业教育示范专业规划教材. 数控技术专业
ISBN 978-7-111-34509-1

I. ①数… II. ①关… III. ①数控机床-加工工艺-高等职业教育-教材
②数控机床-程序设计-高等职业教育-教材 IV. ①TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 081419 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
策划编辑: 王英杰 责任编辑: 王英杰 崔占军 王丹凤
版式设计: 霍永明 责任校对: 陈秀丽
封面设计: 鞠 杨 责任印制: 杨 曦
北京京丰印刷厂印刷

2011 年 8 月第 1 版·第 1 次印刷

184mm×260mm·13.25 印张·326 千字

0 001—3 000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-34509-1

定价: 25.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010)88361066

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销售一部: (010)68326294

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售二部: (010)88379649

读者购书热线: (010)88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

本书本着“以就业为导向，工学结合”的原则，以实用性为基础，根据企业的实际需求来进行课程体系设置和教材内容的选取，注重学生分析和解决生产实际问题的能力，努力提高教学效果，突出高等职业教育特色。

本书具有以下特点：

- 1) 编者充分考虑了零件加工工艺的合理性，把学生学过的机械制造工艺等相关知识应用到数控加工编程当中。本书的中心是数控加工编程技术。
- 2) 本书基本概念清晰，体现了知识的系统性和实用性。
- 3) 本书采用了基本理论讲解与项目式训练相结合的教材模式。对典型零件案例的解析，使学生对本课程要求的知识点和实操技能有一个全面、系统及较深的理解和掌握。
- 4) 本书中的例题多来自编者多年的教学经验积累，内容主题鲜明，深入浅出，趣味性和启发性较高。
- 5) 每一案例都配有与加工程序相一致的刀具轨迹示意图，对理解加工程序有很大的帮助。

本书由西安理工大学高等技术学院“数控加工编程技术”精品课程开发小组编写。全书共分4章。其中，杨鹏编写了第1章的1.1、1.2；关雄飞编写了第1章的1.3，第4章以及第2章和第3章的部分内容，呼刚义编写了第2章，王荪馨编写了第3章。关雄飞任本书的主编，负责全书的统稿和定稿。陕西工业职业技术学院的王彦宏任本书的主审。

由于编者水平有限，所以缺憾在所难免，恳请读者指正。邮箱：guanxiongfei@sina.com

编 者

目 录

前言

第1章 数控加工技术基本概念 1

- 1.1 基本概念 1
 - 1.1.1 数控技术及其发展 1
 - 1.1.2 数控机床的组成及工作原理 2
 - 1.1.3 数控机床的分类 4
 - 1.1.4 数控机床的特点及应用范围 6
 - 1.1.5 数控编程技术 7
 - 1.1.6 数控技术的发展趋势 9
 - 1.2 数控编程基本知识 10
 - 1.2.1 字的概念和功能指令 10
 - 1.2.2 程序格式 12
 - 1.2.3 数控机床的坐标系 14
 - 1.2.4 数控编程中的数学处理 18
 - 1.3 数控加工工艺基础 20
 - 1.3.1 数控加工的刀具及其选用 20
 - 1.3.2 切削用量及工艺参数的确定 25
 - 1.3.3 工艺路线的拟订 30
- 思考与练习题 34

第2章 数控车床工艺编程 35

- 2.1 基本编程指令 35
 - 2.1.1 工件坐标系的设定 35
 - 2.1.2 常用功能指令 38
 - 2.1.3 简单阶梯轴的精加工 44
 - 2.1.4 刀具半径补偿功能 45
 - 2.1.5 外沟槽的加工 49
 - 2.1.6 成形面的分层加工 51
- 2.2 循环功能指令 52
 - 2.2.1 单一固定循环指令 52
 - 2.2.2 复合循环指令 57
 - 2.2.3 轴类零件的加工 62
 - 2.2.4 套类零件的加工 64
- 2.3 螺纹加工指令 67
 - 2.3.1 螺纹加工的相关基本知识 67
 - 2.3.2 常见螺纹的数控加工编程指令 71
 - 2.3.3 三角形圆柱外螺纹的加工 74
 - 2.3.4 三角形圆锥外螺纹的加工 76

- 2.3.5 三角形圆柱内螺纹的加工 76
 - 2.3.6 多线螺纹的加工 77
 - 2.3.7 梯形圆柱外螺纹的加工 81
 - 2.4 综合加工实例 85
 - 项目一 零件综合加工训练一 85
 - 项目二 零件综合加工训练二 88
 - 项目三 零件综合加工训练三 93
- 思考与练习题 95

第3章 数控铣床及加工中心工艺

编程 100

- 3.1 基本功能指令 101
 - 3.1.1 工件坐标系的建立 101
 - 3.1.2 常用的功能指令 102
 - 3.1.3 刀具半径补偿功能 107
 - 3.1.4 刀具长度补偿功能 112
 - 3.2 坐标变换功能指令 113
 - 3.2.1 比例缩放功能指令 113
 - 3.2.2 镜像功能指令 116
 - 3.2.3 旋转功能指令 118
 - 3.2.4 极坐标 120
 - 3.3 平面轮廓加工应用实例 122
 - 项目一 平面外轮廓的加工实例 122
 - 项目二 平面内轮廓的加工实例 126
 - 项目三 凹槽的加工实例 129
 - 3.4 孔加工循环指令 131
 - 3.4.1 钻孔加工循环指令 132
 - 3.4.2 螺纹加工循环指令 135
 - 3.4.3 镗孔加工循环指令 136
 - 3.4.4 孔加工循环功能的应用 138
 - 3.5 综合加工实例 140
 - 项目一 十字凸台零件加工实例 140
 - 项目二 转接盘零件加工实例 148
 - 项目三 配合件加工实例 153
- 思考与练习题 158

第4章 宏指令编程 164

- 4.1 FANUC Oi 系统宏程序编程基础知识 164

4.1.1 变量与赋值	165	4.3.7 球头铣刀加工四棱台斜面	182
4.1.2 运算指令	167	4.3.8 内球面粗加工	184
4.1.3 转移与循环指令	167	4.3.9 内球面精加工	186
4.1.4 用户宏程序调用指令	168	4.4 宏程序综合应用实例	188
4.2 数控车床宏指令编程	171	项目一 手柄轴车削加工编程	188
4.2.1 椭圆曲线轮廓轴的加工	171	项目二 凸模零件铣削加工编程	190
4.2.2 其他非圆曲线轮廓轴的加工	172	思考与练习题	195
4.3 数控铣床及加工中心宏指令编程	173	附录	198
4.3.1 圆柱孔的轮廓加工	173	附录 A FANUC、SIEMENS、华中世纪星	
4.3.2 多个圆孔（或台阶圆孔）的轮廓		数控车床指令对照表	198
加工	174	附录 B FANUC 0i-MC、SIEMENS 802D、	
4.3.3 孔口倒圆角	176	华中世纪星 HNC-22M 数控铣床	
4.3.4 圆柱体倒角	178	指令对照表	203
4.3.5 螺纹铣削加工	179	参考文献	206
4.3.6 椭圆内轮廓铣削加工	181		

第 1 章 数控加工技术基本概念

基本要求

1. 了解数控技术、数控机床、数控加工、数控机床组成与分类及数控机床的产生及发展现状等基本知识。
2. 了解数控机床的工作过程和数控机床加工工艺的特点。
3. 理解数控机床坐标系的概念，了解数控编程的内容和编程方法。
4. 理解数控加工程序的格式、结构及常用指令的功能及应用。
5. 能够合理选用常用加工刀具、切削用量。
6. 学会一般零件加工工艺路线的设计。

学习重点

1. 数控加工程序的格式、结构及常用指令的功能及应用。
2. 合理选用常用内、外轮廓，孔及螺纹加工的刀具。
3. 零件加工顺序、进给路线及切削用量的确定。

学习难点

1. 合理选用常用内、外轮廓，孔及螺纹加工的刀具。
2. 零件加工顺序、进给路线及切削用量的确定。

1.1 基本概念

1.1.1 数控技术及其发展

1. 数控技术

数控即数字控制 (Numerical Control, NC), 是使用数字化信息, 按给定的工作程序、运动轨迹和速度, 对控制对象进行控制的一种技术。数控系统所控制的一般是位移、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, 而且可经 A/D 或 D/A 转换器转换。

现代数控技术综合运用了微电子、计算机、自动控制、精密测量、机械设计与制造等技术的最新成果, 具有动作顺序的程序自动控制, 位移和相对位置坐标的自动控制, 速度、转速及各种辅助功能的自动控制等功能, 在许多领域得到了越来越广泛的应用。

2. 数控机床

采用了数控技术的设备被称之为数控设备。其操作命令是用数字或数字代码的形式来描述, 工作过程是按指令程序自动进行。数控机床就是一种典型的数控设备, 它是装备了数控系统的金属切削机床。

3. 数控加工

数控加工也可称为机械加工, 在这里特指在数控机床上进行零件加工的一种工艺方

法, 数控加工的实质就是数控机床按照事先编制好的加工程序, 对零件进行自动加工的过程。

4. 数控技术的产生与发展

数控机床是为了满足现代生产对机械产品精度、生产效率、形状复杂的零件轮廓、改型频繁等日益提高的需求而产生的。自 1952 年美国帕森斯公司与美国空军合作, 研制出第一台数控铣床之后, 人们对数控技术的研究、改进和应用取得了很大的发展, 在数控系统的发展方面, 一般将其划分成以下五代产品:

1952 年出现的第一代数控系统, 采用电子管和继电器的数控装置。

1959 年出现的第二代数控系统, 采用晶体管的数控装置。

1965 年出现的第三代数控系统, 采用小规模集成电路的数控装置。

1970 年出现的第四代数控系统, 采用大规模集成电路及小型计算机的数控装置。

1974 年出现的第五代数控系统, 采用微处理器或微型计算机技术的数控装置。

前三代数控系统是采用专用控制计算机的硬接线(硬线)数控系统, 简称 NC。20 世纪 70 年代初, 随着计算机技术的发展, 小型计算机的价格大幅下降, 采用小型计算机代替专用控制计算机的第四代数控系统应运而生, 不仅在经济上更为合算, 而且许多功能可用编制的专用程序来实现, 将它存储在小型计算机的存储器中, 构成控制软件, 使系统的可靠性和功能有了很大的提高和发展, 这种数控系统又称为软接线(软线)数控系统, 简称 CNC (Computerized NC)。1974 年出现了以微处理器为核心的第五代数控系统, 简称 MNC (Microcomputerized NC), 我们将 CNC、MNC 统称为计算机数控系统, 即 CNC。

计算机数控系统的控制功能大部分由软件技术来实现, 不仅使硬件得到大大简化、系统可靠性大大提高, 功能更加强大和完善, 而且价格也大幅下降。

在数控系统不断更新换代的同时, 数控机床的机械结构、品种规格也得到不断地发展, 1958 年美国卡尼-特雷克公司研制出带自动换刀装置的加工中心 MC (Machining Center)。随着计算机技术、信息技术、网络技术以及系统工程学的发展, 在 20 世纪 60 年代末期出现了由一台计算机直接管理和控制数台数控机床的计算机数控系统, 即直接数控系统 DNC (Direct NC)。1967 年出现了由多台数控机床连接成可调的加工系统, 它是以为网络为基础、面向车间开放式集成制造系统, 即柔性制造系统 FMS (Flexible Manufacturing System), 20 世纪 80 年代初又出现以 1~3 台加工中心为主体, 再配上工件自动装卸的可交换工作台及监控检验装置的柔性制造单元 FMC (Flexible Manufacturing Cell)。进而又出现包括市场分析、经营决策、产品设计及制造、生产管理、销售等全过程均由计算机集成管理和控制的计算机集成制造系统 CIMS (Computer Integrated Manufacturing System)。

在数控机床全面发展的同时, 数控技术在机械行业中的应用得以迅速发展, 如数控绘图机、数控坐标测量机、数控激光与火焰切割机、数控线切割机数控设备等。

1.1.2 数控机床的组成及工作原理

1. 数控机床的组成

数控机床的组成框图如图 1-1 所示, 主要由输入输出装置、数控装置、伺服驱动系统、检测反馈装置和机床本体组成。

(1) 输入输出装置 输入输出装置的主要功能是编制程序、输入程序和数据、打印和

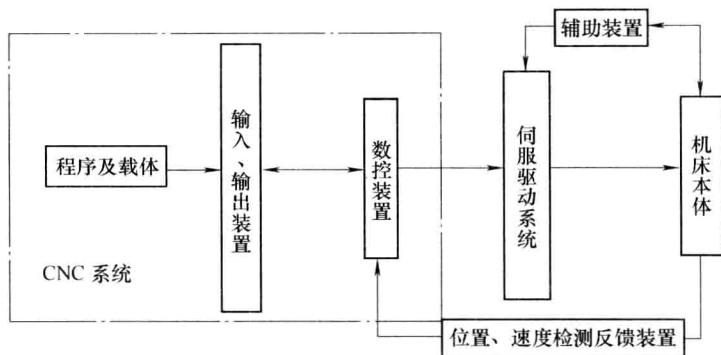


图 1-1 数控机床组成框图

显示。这一部分的硬件，简单的情况下可能只有键盘和发光二极管显示器；一般的可再加上纸带、光电读带机、磁带、磁盘输入机、人机对话编程操作键盘和 CRT 显示器；目前通常还包含一套自动编程机或 CAD/CAM 系统。

(2) 数控装置 数控装置是数控设备的控制核心。它是接收操作者输入的程序和数据，进行分类、译码和存储，并按要求完成数值计算、逻辑判断、输入输出控制、轨迹插补等功能。数控装置一般由一台专用计算机或通用计算机、输入输出接口以及机床控制器（可编程程序控制器）等部分组成。机床控制器主要用于实现对机床辅助功能（M）、主轴转速功能（S）和换刀功能（T）的控制。

(3) 伺服驱动系统 伺服驱动系统包括伺服控制电路、功率放大电路、伺服电动机。其主要功能是接收数控装置插补运算产生的信号指令，经过功率放大和信号分配，驱动机床伺服电动机运动。伺服电动机可以是步进电动机、直流伺服电动机或交流伺服电动机。

(4) 检测反馈装置 该装置由检测部件和相应的检测电路组成，其作用是检测速度和位移，并将信息反馈给数控装置，构成闭环控制系统。常用的检测部件有脉冲编码器、旋转变压器、感应同步器、光栅和磁尺等。

(5) 机床本体 机床本体是被控制的对象，是实现零件加工的执行部件，是数控机床的主体，包括床身、立柱、主轴、进给机构等机械部件。

另外，为了保证数控机床功能的充分发挥，还有一些配套的辅助控制装置（如冷却、排屑、防护、润滑、照明、储运、程编机和对刀仪等）。

2. 数控机床的工作原理

当使用机床加工零件时，通常需要对机床的各种动作进行控制，一是控制动作的先后次序，二是控制机床各运动部件的位移量和运动速度。采用数控机床加工零件时，只需要将零件图形和工艺参数、加工步骤等以数字信息的形式，编成程序代码输入到机床控制系统中，再由其进行运算处理后转换成驱动伺服机构的指令信号，从而控制机床各部件协调动作，自动地加工零件。当更换加工对象时，只需要重新编写加工程序，即可由数控装置自动控制加工的全过程，能较方便地加工出不同的零件。数控加工的原理如图 1-2 所示。

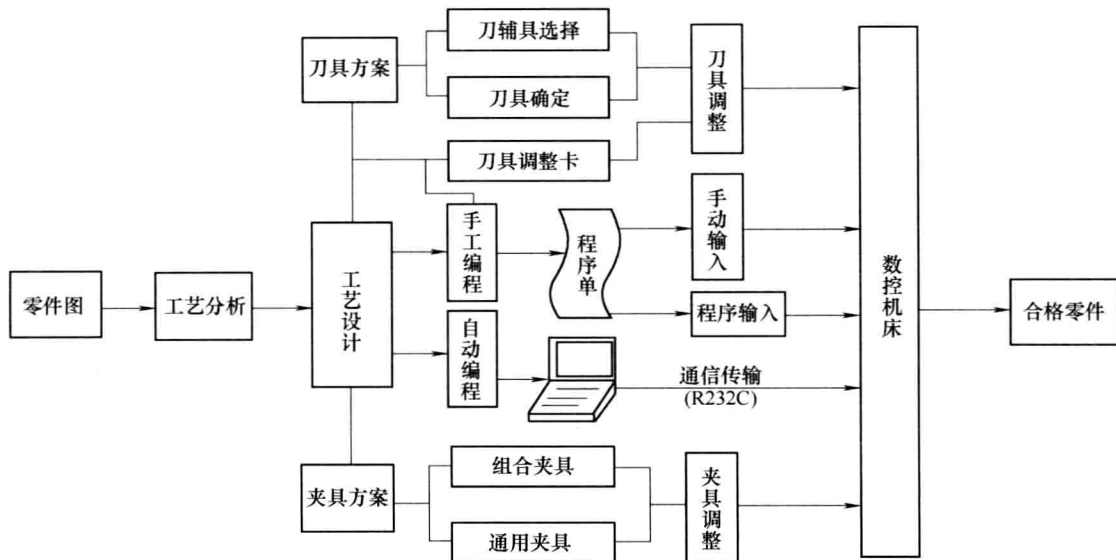


图 1-2 数控加工原理框图

从图 1-2 可以看出，数控加工过程总体上可分为数控程序编制和机床加工控制两大部分。数控机床的控制系统一般都能按照数字程序指令控制机床实现主轴自动起停、换向和变速，能自动控制进给速度、方向和加工路线，进行加工，能选择刀具并根据刀具尺寸调整进给量及运动轨迹，能完成加工中所需要的各种辅助动作。

1.1.3 数控机床的分类

1. 按工艺用途分类

- 1) 金属切削类，如数控车床、数控铣床、数控钻床、数控镗床、数控磨床、数控滚齿机、加工中心等。
- 2) 金属成形类，如数控折弯机、数控弯管机、数控压力机等。
- 3) 特种加工类，如数控线切割、数控电火花、数控激光切割机等。
- 4) 其他类，如数控等离子切割机、数控三坐标测量机等。

2. 按运动轨迹控制分类

(1) 点位控制数控机床 这类机床只控制运动部件从一点移动到另一点的准确定位，在移动过程中不进行加工，对两点间的移动速度和运动轨迹没有严格要求，可以沿多个坐标同时移动，也可以沿各个坐标先后移动。为了减少移动时间和提高终点位置的定位精度，一般先快速移动，当接近终点位置时，再减速缓慢趋近终点，以保证定位精度。图 1-3 所示为点位控制加工示意图。采用点位控制的机床有数控钻床、数控坐标镗床、数控冲床和数控测量机等。

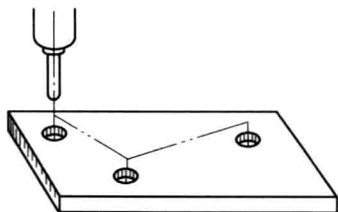


图 1-3 点位控制加工示意图

(2) 直线控制数控机床 这类机床不仅要控制点的准确定位，而且要控制刀具（或工作台）以一定的速度沿与坐标平行的方向进行切削加工。机床应具有主轴转速的选择，

控制、切削速度与刀具的选择以及循环进给加工等辅助功能。图 1-4 所示为直线控制加工示意图。这种控制常用于简易数控车床、数控镗铣床等。

(3) 轮廓控制数控机床 这类机床能够对两个或两个以上运动坐标的位移及速度进行连续相关的控制,使合成的平面或空间的运动轨迹能满足零件轮廓的要求。其数控装置一般要求具有直线和圆弧插补功能、主轴转速控制功能及较齐全的辅助功能。这类机床用于加工曲面、凸轮及叶片等复杂形状的零件。图 1-5 所示为轮廓控制加工示意图。轮廓控制数控机床的有数控铣床、数控车床、数控磨床和加工中心等。

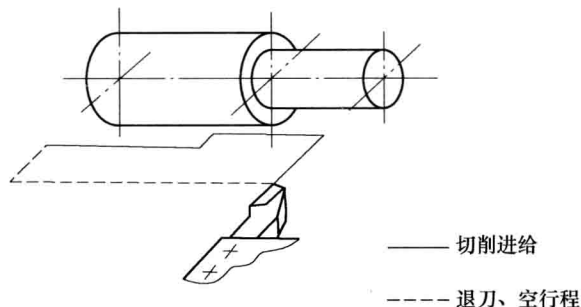


图 1-4 直线控制加工示意图

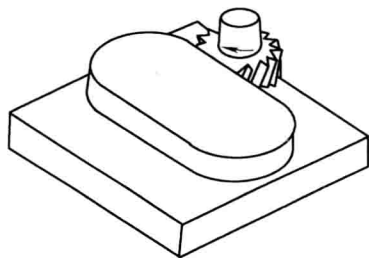


图 1-5 轮廓控制加工示意图

3. 按伺服驱动系统分类

(1) 开环控制系统 开环控制系统框图如图 1-6 所示。这类控制系统没有位置检测元件,伺服驱动部件通常为反应式步进电动机或混合式伺服步进电动机。数控系统每发出一个进给指令脉冲,经驱动电路功率放大后,驱动步进电动机旋转一个角度,再经传动机构带动工作台移动。这类系统信息流是单向的,即进给脉冲发出去以后,实际移动值不再反馈回来,所以称为开环控制。

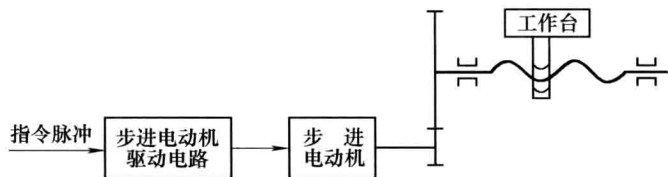


图 1-6 开环控制系统框图

开环控制系统的特点是结构较简单、成本较低、技术容易掌握,但由于受步进电动机的步距精度和传动机构的传动精度的影响,难于实现高精度的位置控制,进给速度也受步进电动机工作频率的限制。开环控制系统一般适用于中、小型经济型数控机床,特别适用于旧机床改造的简易数控机床。

(2) 闭环控制系统 闭环控制系统框图如图 1-7 所示。这类控制系统带有直线位移检测装置,直接对工作台的实际位移量进行检测。伺服驱动部件通常采用直流伺服电动机或交流伺服电动机。图 1-7 中 A 为速度检测元件, C 为位置检测元件。当位移指令值发送到位置比较电路时,若工作台没有移动,则没有反馈量,指令值使得伺服电动机转动,通过 A 将速度反馈信号送到速度控制电路,通过 C 将工作台实际位移量反馈回去,在位置比较电路中与位移指令值进行比较,用比较后得出的差值进行位置控制,直至差值为零时为止。这类控制系统,因为把机床工作台纳入了控制环节,故称闭环控制系统。该系统可以消除包括工作台传动链在内的传动误差,因而定位精度高。但由于工作台惯量大,对机床结构的刚性、传动部件的间隙及导轨副的灵敏性等提出了严格的要求,否则对系统稳定性会带来不利影响。

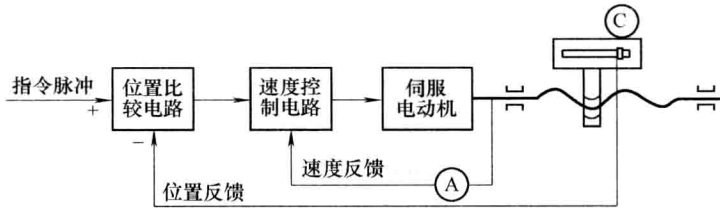


图 1-7 闭环控制系统框图

闭环控制系统的特点是定位精度高，但调试和维修都较困难，系统复杂，成本高，一般适用于精度要求高的数控设备，如数控精密镗铣床。

(3) 半闭环控制系统 半闭环控制系统框图如图 1-8 所示。这类控制系统与闭环控制系统的区别在于采用角位移检测元件，检测反馈信号不是来自工作台，而是来自与电动机输出轴相联系的角位移检测元件 B。通过测速发电机 A 和光电编码盘（或旋转变压器）B 间接检测出伺服电动机的转角，推算出工作台的实际位移量，将此值与指令值进行比较，用差值来实现控制。从图 1-8 可以看出，由于工作台没有包括在控制回路中，因而称之为半闭环控制系统。这类控制系统的伺服驱动部件通常采用宽调速直流伺服电动机，目前已将角位移检测元件与电动机设计成一个部件，使系统结构简单、方便。半闭环控制系统的性能介于开环控制系统和闭环控制系统之间，精度没有闭环控制系统高，调试却比闭环控制系统方便，因而得到广泛应用。

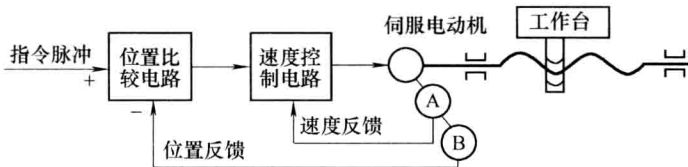


图 1-8 半闭环控制系统框图

1.1.4 数控机床的特点及应用范围

1. 数控机床的特点

(1) 适应性强 适应性也称为柔性，是指数控机床随生产对象的变化具有很强的适应性，加工零件的形状变化时，只需改变加工程序，而机床、夹具等工艺装备一般不需改变。另外，数控机床可以完成多种工序，比如，镗铣加工中心，能完成钻、镗、铳、铰、铣削、螺纹加工等加工工序。

(2) 加工精度高，质量稳定 对应数控系统每发出一个脉冲，机床工作台的位移量称为脉冲当量。目前数控装置的脉冲当量一般为 0.001mm，高精度的数控系统可达 0.0001mm。切削进给传动链的反向间隙与丝杠螺距误差等均可由数控装置进行补偿，因此，数控机床能达到比较高的加工精度。

数控机床切削加工常采用工序集中方式，减少了多次装夹对加工精度的影响，自动加工方式也可避免人工操作误差，使工件加工的质量稳定，同一批零件尺寸一致性好。

(3) 生产效率高，生产准备周期短 由于数控机床自动化程度高，并且综合应用了现

代科学生产技术成果,与普通机床相比可提高生产效率3~5倍。对于复杂成形面的加工,生产效率可提高十倍,甚至几十倍。同时,对于新零件的加工,大部分准备工作是针对零件工艺编制数控程序,而不是去准备靠模、钻镗模、专用夹具等工艺装备,而且编程工作可以离线进行,可以利用CAD/CAM系统自动编程,这样大大缩短了生产准备时间。因此,十分有利于企业产品的升级换代和新产品的开发。

(4) 能实现复杂的运动 数控机床可以完成复杂的曲线和曲面的自动加工,如螺旋桨、汽轮机叶片等空间曲面,也可以完成普通机床上很难、甚至根本无法完成的加工。

(5) 减轻劳动强度、改善劳动条件 利用数控机床进行加工,操作者只需按图样要求编制加工程序,然后输入并调试程序,机床即可进行自动加工。操作者观察和监视加工过程并装卸工件,除此之外,不需要进行繁重的重复性手工操作,其劳动强度与紧张程度可大为减轻,劳动条件也相应得到改善。

(6) 有利于实现制造和生产管理的现代化 数控机床使用数字信息与标准代码处理、传递信息,易于建立与计算机间的通信联络,从而形成由计算机控制和管理的产品研发、设计、制造、管理及销售一体化系统。

2. 数控机床的应用范围

数控机床是一种高度自动化的机床,有一般机床所不具备的许多优点,所以数控机床的应用范围在不断扩大,但数控机床的技术含量高,成本高,使用和维修都有一定难度。若从经济方面考虑,数控机床适用于加工:

- 1) 多品种小批量零件。
- 2) 结构较复杂,精度要求较高或必须用数学方法确定的复杂曲线、曲面等零件。
- 3) 需要频繁改形的零件。
- 4) 钻、镗、铰、铹、攻螺纹及铣削等多工序联合加工的零件,如箱体、壳体等。
- 5) 价格昂贵,废品率要求低的零件。
- 6) 要求全部检验的零件。
- 7) 生产周期短的急需零件。

1.1.5 数控编程技术

1. 数控编程的定义

把零件全部加工工艺过程及其他辅助动作,按动作顺序,用规定的标准指令、格式,编写成数控机床的加工程序,并经过检验和修改后,制成控制介质的整个过程称为数控加工程序编制,简称数控编程。使用数控机床加工零件时,程序编制是一项重要的工作。迅速、正确而经济地完成程序编制工作,对于有效地使用数控机床是具有决定意义的。

2. 数控编程的内容和工作过程

如图1-9所示,数控程序的编制应该有如下几个过程:

(1) 分析零件图、确定工艺过程 要分析零件的材料、形状、尺寸、精度及毛坯形状和热处理要求等,以便确定加工该零件的设备甚至要确定在某台数控机床上加工该零件的哪些工序或哪几个表面。确定零件的加工方法、加工顺序、走刀路线、装夹定位方法、刀具及合理的切削用量等工艺参数。

(2) 数值计算 根据零件图和确定的加工路线,计算数控机床所需输入数据,如零件

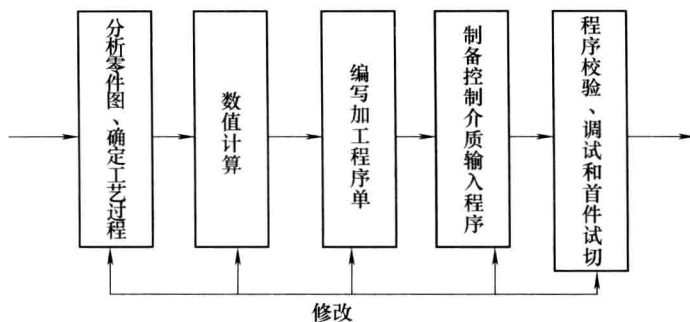


图 1-9 数控编程的内容和步骤

轮廓基点坐标、节点坐标等的计算。

(3) 编写加工程序单 根据加工工艺路线、零件轮廓数据和已确定的切削用量,按照数控系统规定的程序段格式编写零件加工程序单。此外,还应填写有关的工艺文件,如数控加工工序卡片、数控刀具卡片、工件安装和零点设定卡片等。

(4) 制备控制介质输入程序 按加工程序单将程序内容记录在控制介质(如穿孔纸带、磁盘等)上作为数控装置的输入信息。输入程序有手动数据输入、介质输入、通信输入等方式。

(5) 程序校验、调试和首件试切 可通过模拟软件来模拟实际加工过程,或将程序输入到机床数控装置后进行空运行,或通过首件试加工等多种方式来检验所编制的程序。若发现错误则应及时修正,直到程序正确无误为止。

3. 数控编程方法

数控程序的编制方法有手工编程和自动编程两种。

(1) 手工编程 从分析零件图及确定工艺过程、数值计算、编写加工程序单、制备控制介质输入程序直至程序的校验等各个步骤均由人工完成,即手工编程。对于点位加工或几何形状不太复杂的零件来说,编程计算较简单,程序量不大,可采用手工编程实现。这时,手工编程显得经济而且便捷。对于轮廓形状复杂的零件,计算工作量大且非常复杂,手工编程困难甚至无法实现,则必须采用自动编程的方法。

(2) 自动编程 编程工作的大部分或全部由计算机完成的过程称为自动编程,或称为计算机辅助编程。按照计算机辅助编程输入方式的不同,可分为语言输入方式和图形输入方式两种。语言输入方式是指加工零件的几何尺寸、工艺方案、切削参数等用数控语言编写成源程序后,输入到计算机或编程机中,用相应软件处理后得到零件加工程序的编程方式,如美国的 APT 系统等。图形输入方式是指将被加工零件的几何图形及相关信息直接输入到计算机并在显示器上显示出来,通过相应 CAD/CAM 软件,经过人与计算机图形交互处理,最终得到零件的加工程序。随着计算机技术的不断发展,CAD/CAM 软件技术体现出了更大的优越性。因此,它成为了现代数控加工编程的主流技术。目前,常见的 CAD/CAM 一体化软件有 CATIA、UG、Pro/E、MasterCAM、Solidworks、CAXA 制造工程师等。

自动编程的特点就在于编程效率高,减少编程误差,可解决复杂形状零件的编程难题,降低编程费用。

1.1.6 数控技术的发展趋势

1. 数控系统的发展趋势

(1) 开放式数控系统 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,面向机床厂家和用户,其硬件、软件和总线规范都是对外开放的。通过改变、增加或裁减结构对象(数控功能),形成不同品种、不同档次的系列化的数控系统,为用户的二次开发带来极大的方便,用户可通过升级或组合来构成不同档次的数控系统,通过扩展构成不同类型数控机床的数控系统。开放式体系结构的数控系统可以采用大量的通用计算机的先进技术,解决了数控系统封闭性问题,系统集成度更高,增强了通信功能,提高了进线、联网能力。数控系统开放式体系已成为数控系统的发展方向。

(2) 数控系统的智能化 数控系统的控制性能已趋向智能化方向发展,21世纪 CNC 系统将是一个高度智能化的系统,新一代数控系统在局部或全部实现加工过程的自适应、自诊断和自调整控制;可实现三维刀具补偿、运动参数自动补偿等功能;多媒体人机接口可使用户操作简单,人机界面交流极为友好;智能编程可实现加工数据、工艺参数的自动生成;智能数据库、智能监控、三维加工模拟功能及采用专家系统以降低对操作者的要求;伺服系统智能化的主轴交流驱动和智能化进给伺服装置;能自动识别负载并自动优化、调整参数等。

2. 数控机床的发展趋势

(1) 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。近些年来,已在数控机床产品中应用了可靠性技术,并取得了明显的进展。

衡量可靠性重要的量化指标是平均无故障工作时间(MTBF),作为数控机床的大脑——数控系统的 MTBF 值已由 20 世纪 70 年代的大于 3000h、20 世纪 80 年代的大于 10000h,提高到 20 世纪 90 年代初的大于 30000h。据日本近期介绍,FANUC 公司的 CNC 系统已达到 $MTBF \approx 125$ 个月。数控机床整机的可靠性水平也有显著的提高。

(2) 高速、高效化 受高生产率的驱使,高速化已是现代机床技术发展的重要方向之一。高速切削可通过高速运算技术、快速插补运算技术、超高速通信技术和高速主轴等技术来实现,其特点就是“高转速、小吃深、快走刀”。

提高主轴转速可减少切削力,减小切削深度,有利于克服机床振动,传入零件中的热量可大大减低,排屑加快,热变形减小,加工精度和表面质量得到显著改善。因此,经高速加工的工件一般不需要精加工。近 10 年来,主轴转速已翻了几番。20 世纪 80 年代中期,中等规格的加工中心主轴最高转速为 4000 ~ 6000r/min,90 年代初期提高到 8000 ~ 12000r/min,目前,有的已达到 10 万 r/min 以上。

(3) 高精度化 高精度化一直是数控机床技术发展追求的目标。它包括机床制造的几何精度和机床使用的加工精度控制两方面。

提高机床的加工精度,一般是通过减少数控系统误差,提高数控机床定位精度、基础大件结构特性和热稳定性,采用补偿技术和辅助措施来达到的。目前精密加工精度已提高到 $0.1\mu\text{m}$,并进入了亚微米级。

(4) 高柔性化 柔性是指机床适应加工对象变化的能力。目前,在进一步提高单机柔

性自动化加工的同时，正努力向单元柔性和系统柔性化发展。体现系统柔性化的 FMC（柔性制造单元）、FMS（柔性制造系统）和 CIMS（计算机集成制造系统）发展迅速。

(5) 高复合化 复合化包含工序复合化和功能复合化。工件在一台设备上一次装夹后，通过自动换刀等各种措施，来完成多种工序的加工。在一台数控设备上能完成多工序切削加工（如车、铣、镗、钻等）的加工中心，可以替代多台机床和多次装夹的加工，既能减少装卸时间，省去工件搬运时间，提高每台机床的加工能力，减少半成品库存量，又能保证和提高形位精度，从而打破了传统的工序界限和分散加工的工艺规程。从近期发展趋势看，加工中心主要是通过主轴的立-卧自动转换和数控工作台来完成五面和任意方位上的加工。此外，还出现了与车削或磨削复合的加工中心等。

另外，复合化还体现在 CNC 系统与加工过程作为一个整体，实现了机、电、液、气、光、声等综合控制，使测量造型、加工一体化、实时检测与修正一体化，机床主机设计与数控系统设计一体化。

(6) 网络化 实现多种通信协议，既满足单机需要，又能满足 FMS、CIMS 对基层设备的控制要求。配置网络接口，通过 Internet 可实现远程监视和控制加工，进行远程检测和诊断，使维修变得简单。建立分布式网络化制造系统，可便于形成“全球制造”。

1.2 数控编程基本知识

1.2.1 字的概念和功能指令

字即指令字，也称为功能字，由地址符和数字组成，是组成数控程序的最基本的单元。不同的地址符及其后续数字表示了不同的指令字及含义。例如，G01 是一个指令字，表示直线插补功能，G 为地址符，数字 01 为地址中的内容；X-200. 是一个指令字，表示 X 轴坐标为 -200mm，X 为地址符，数字 -200. 为地址中的内容。常用的地址符及其含义见表 1-1。

表 1-1 常用地址符及其含义

机 能	地 址 码	说 明
程序号	O、%、P	程序编号
程序段号	N	程序段号地址
坐标字	X、Y、Z、U、V、W、P、Q、R A、B、C、D、E R I、J、K	直线坐标轴 旋转坐标轴 圆弧半径 圆弧中心坐标
准备功能	G	指令机床动作方式
辅助功能	M	机床辅助动作指令
补偿值	H、D	补偿值地址
进给功能	F	指定进给速度
主轴功能	S	指定主轴转速
刀具功能	T	指定刀具编号
暂停功能	P、X	指定暂停时间
重复次数	L	指定子程序及固定循环的重复次数

一个指令字表达了一个特定的功能含义。在实际工作中，应根据不同的数控系统说明书来使用各个功能指令。

(1) 程序名功能字 程序名又称为程序号，每一个独立的程序都应有程序名，可作为识别、调用该程序的标志。程序名一般由程序名地址符（字母）和1~4位数字构成，不同的数控系统程序名地址符所用字母可能不同。例如，FANUC系统用“O”，华中系统则用“%”，具体可参阅机床使用说明书。

(2) 程序段号功能字 N 程序段号用来表示程序段的序号，由地址符 N 和后续数字组成，如 N10。数控加工中的顺序号实际上是程序段的名称，与程序执行的先后次序无关。数控系统不是按程序段号的次序来执行程序，而是按照程序段编写时的排列顺序逐段执行。一般情况下，程序段号应按一定的增量间隔顺序编写，以便程序的检索、编辑、检查和校验等。

(3) 坐标功能字 坐标字用于确定机床在各种坐标轴上移动的方向和位移量，由坐标地址符和带正、负号的数字组成。例如，X-50.0表示坐标位置是X轴负方向50mm。坐标地址字符较多（见表1-1），其具体含义见后续章节内容。

(4) 准备功能字 G 准备功能字的地址符是 G，后跟两位数字组成，准备功能字简称 G 功能、G 指令或 G 代码，它是使机床或数控系统建立起某种加工方式的指令。G 指令从 G00 至 G99 共有 100 种。表 1-2 为 FANUC 0i 数控铣床系统常用的 G 代码的定义。

表 1-2 FANUC 0i 数控铣床系统常用 G 功能指令

代码	组	意 义	代码	组	意 义	代码	组	意 义		
* G00	01	快速点定位	* G40	07	取消刀具半径补偿	G81	09	钻孔循环		
G01		直线插补	G41		刀具半径左补偿	G82		钻孔循环		
G02		顺时针圆弧插补	G42		刀具半径右补偿	G83		啄式钻深孔循环		
G03		逆时针圆弧插补	G43	刀具长度正补偿	G84	攻螺纹循环				
G04	00	暂停延时	G44	08	刀具长度负补偿	G85		镗孔循环		
* G17	02	选择 XY 平面	* G49	00	取消刀具长度补偿	G86		镗孔循环		
G18		选择 XZ 平面	G52		局部坐标系设置	G87		背镗循环		
G19		选择 YZ 平面	G54 ~ G59	14	零点偏置	G88		镗孔循环		
* G21	06	英制单位	G73	09	高速深孔钻削固定 循环	* G90		03	绝对坐标编程	
G20	米制单位	G74				左旋攻螺纹循环	G91		增量坐标编程	
G27	00	参考点返回检查				G76	精镗循环	* G98	10	返回初始点
G28		返回参考点				* G80	钻孔循环取消	G99		返回 R 点
G29		从参考点返回								
G30		返回第二参考点								

注：1. 表内 00 组为非模态指令；其他组为模态指令。

2. 标有 * 的指令为默认指令，即数控系统通电启动后的默认状态。

G 指令分为模态指令（又称续效指令）和非模态指令（又称非续效指令）两类。模态指令表示该指令在一个程序段中一旦出现，后续程序段中一直有效，直到有同组中的其他 G