

高等学校教材

数控技术

长春大学 张宝林 主编

机械工业出版社

7415
4
高等学校教材

数 控 技 术

主 编 张宝林

副主编 韩湘吉 张 健 曹国华

参 编 娄 颖 孙令贻

主 审 徐洪吉 郑 堤



机 械 工 业 出 版 社

前 言

本书是根据 1994 年召开的全国高等工科院校机电工程专业教学及教材研讨会通过的教学计划，由吉林工业大学、长春大学等五所院校联合编写，机械工业出版社计划出版的机电工程专业系列教材之一。

数控技术是现代机械系统、机器人、FMS、CIMS、CAD/CAM 等高新技术的基础，是采用计算机控制机械系统实现高度自动化的桥梁。发展数控技术是当前机械制造业实现技术改造、技术更新的必由之路，是现代工厂企业实现自动化的基础。由于数控技术在当代工业发展中具有十分重要的作用，几十年来，数控技术在国内外得到了迅猛的发展，同时也成为高等工科院校机电类教学的重要专业课程之一。

本书收集了近期国内外有关数控发展和应用的先进资料，结合我们多年的教学与科研的经验和成果，根据教学的需要编写了本教材，以供从事数控技术方面教学、科研、使用与维修等工作人员参考。

本书由长春大学等五所院校的有关教师协力编写。参加编写的有长春大学张宝林（第一章部分、第二章），吉林工业大学姜颖（第一章部分），长春光学精密机械学院曹国华（第三章、第六章），吉林工学院韩湘吉（第四章），长春大学张健（第五章部分），吉林职业师范学院孙令贻（第五章部分）。由张宝林任主编，韩湘吉、张健、曹国华任副主编，全书由张宝林统稿。

本书特请长春光学精密机械学院徐洪吉教授和吉林工业大学郑堤副教授主审。

本书编写时得到了长春大学于永芳教授及许多同行专家的帮助，此外，还参考了一些兄弟院校的教材和资料，在此谨表谢意。

限于编者的水平，书中定有许多错误与不妥之处，恳请读者批评指正。

编 者

1996 年 9 月

目 录

前言

第一章 概论	1
第一节 数控技术的产生	1
第二节 数控技术的基本原理	1
第三节 数控系统的分类	4
第四节 数控技术的发展	6
第二章 数控加工编程	10
第一节 数控加工编程的基础知识	10
第二节 数控加工编程的工艺处理	24
第三节 数控加工编程的数学处理	28
第四节 手工编程方法	37
第五节 自动编程	44
第三章 计算机数控系统	51
第一节 概述	51
第二节 CNC 硬件结构	56
第三节 CNC 软件结构	62
第四节 CNC 装置插补原理	66
第五节 可编程序控制器	73

第四章 数控机床的伺服驱动系统	83
第一节 概述	83
第二节 开环伺服系统	84
第三节 闭环伺服系统	103
第五章 数控机床的结构特点	133
第一节 数控机床的主运动	133
第二节 数控机床进给系统的机械传动	140
第三节 数控机床的自动换刀装置	153
第四节 数控机床导轨	180
第六章 柔性制造与计算机集成制造	189
第一节 柔性制造系统	189
第二节 自动化孤岛及计算机集成制造系统 (CIMS)	199
参考文献	202

第一章 概 论

第一节 数控技术的产生

随着科学技术和生产的不断发展,社会对各种产品的质量和生产效率提出了越来越高的要求。产品加工工艺过程的自动化是实现高质量、高效率最重要的措施之一。现在许多生产企业,如汽车、农业机械、家用电器等生产厂,已大部分采用了自动机床、组合机床和自动生产线,这对保证产品质量、提高生产效率和减轻操作者的劳动强度起到了很好的作用。

但是,在产品加工中,大批量生产的零件并不很多,据统计,单件与小批量生产的零件约占机械加工总量的80%以上。对这些多品种、加工批量小、零件形状复杂、精度要求高的零件的加工,采用专业化程度很高的自动机床和自动生产线就显得很不合适。在市场经济的大潮中,产品的竞争日趋激烈,为在竞争中求得生存与发展,各企业纷纷在提高产品技术档次、增加产品花样、缩短试制与生产周期和提高产品质量上下功夫。即使是批量较大的产品,也不可能是多年一成不变,必须经常开发新产品,频繁地更新换代,这种情况使不易变化的“刚性”自动化生产线在现代市场经济中暴露出致命的弱点。

已有的各类仿形加工设备在过去的生产中部分地解决了小批量、复杂零件的加工。但在更换零件时,必须重新制造靠模并调整设备,不但要耗费大量的手工劳动,延长了生产准备周期,而且由于靠模加工误差的影响,零件的加工精度很难达到较高的要求。

为了解决上述这些问题,一种灵活、通用、高精度、高效率的“柔性”自动化生产技术——数控技术在这种情况下应运而生。

1952年美国帕森斯公司和麻省理工学院在美国空军的委托下,合作研制出世界上第一台三坐标数控铣床,很好地完成了直升飞机叶片轮廓检查用样板的加工。这是一台采用专用计算机进行运算与控制的直线插补轮廓控制数控铣床。经过三年的试用、改进与提高,数控机床于1955年进入实用化阶段,在复杂曲面的加工中发挥了重要作用。

尽管这种初期数控机床采用电子管和分立元件硬接线电路来进行运算和控制,体积庞大而功能单一,但它采用了先进的数字控制技术,具有普通设备和各种自动化设备无法比拟的优点,具有强大的生命力,它的出现开辟了工业生产技术的新纪元。从此,数控技术在全世界得到了迅速的发展。

第二节 数控技术的基本原理

一、概念

数字控制(Numerical Control——NC)简称为数控,它是用数字化信号对设备运行及其加工过程进行控制的一种自动化技术。NC装置由各种逻辑元件、记忆元件组成随机逻辑电路,是固定接线的硬件结构,由硬件来实现数控功能。

计算机数控 (Computer Numerical Control——CNC)，它用一个存储程序的计算机 (从小型计算机到目前广泛采用的微型计算机)，由控制程序 (软件) 来实现部分或全部数控功能，并通过接口与各种输入输出的外围设备进行联系。即由计算机硬件、存储程序软件和各种接口组成的数控装置称为 CNC 装置。这种将计算机本身作为控制单元的数控系统称为计算机数控系统，它靠更换不同的控制软件来实现不同的控制功能。现代的数控系统几乎都是 CNC 系统。

二、数控系统的组成

数控系统一般由控制介质、数控装置、伺服系统、测量装置和工作本体组成，如图 1-1 所示。

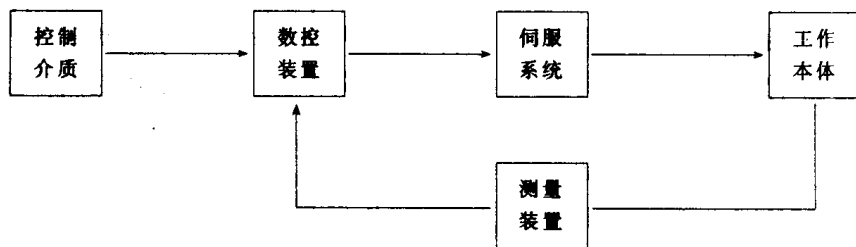


图 1-1 数控系统的组成

(一) 控制介质

数控设备工作时，不需要操作者直接进行手工加工，但设备必须按人的意图进行工作，这就必须在人与设备间建立某种联系，这种联系的中间媒介物称之为控制介质。它也称为信息载体，它可以是穿孔带、穿孔卡、磁带、软磁盘等。目前使用最为普遍的是八单位标准穿孔纸带。

在控制介质上存储着加工零件所需要的全部操作信息，它是数控系统用来指挥和控制设备进行加工运动的唯一指令信息。这种指令信息是通过纸带上每一行八个孔位上不同孔的位置和孔的数量来表示，这些孔是由自动穿孔机根据数控加工程序单的内容按指定的代码逐行打出的。

(二) 输入装置

它是将控制介质上的程序代码变成相应的电脉冲信号，传送并存入数控装置中。根据不同的控制介质，输入装置可以是光电读带机、录音机或软盘驱动器。现在有很多数控设备不用任何控制介质，而是将数控加工程序单上的内容通过数控装置上的键盘直接输入给数控装置，这称为 MDI 方式。有的还可将数控加工程序由编程计算机用通信方式传送给数控装置。

(三) 数控装置及强电控制装置

数控装置是数控设备的核心，它接受输入装置送来的脉冲信号，经过数控装置的控制软件和逻辑电路进行编译、运算和逻辑处理，然后将各种信息指令输出给伺服系统，使设备各部分进行规定的、有序的动作。这些指令主要是经插补运算决定的各坐标轴的进给速度、进给方向和位移量；主运动部件的变速、换向和起停信号；选择和交换刀具的指令信号；切削液的开停信号；工件的松夹、分度工作台的转位等辅助指令信号。

强电控制装置是介于数控装置与设备之间的系统。主要作用是接收数控装置输出的主运动变速、刀具选择交换、辅助装置动作等指令信号，经过必要的编译、逻辑判断和功率放大

后直接驱动相应的电器、液压、气动和机械部件，以完成指令所规定的各种动作。

（四）伺服驱动系统

伺服驱动系统包括伺服驱动电路和伺服驱动元件，它们与工作本体上的机械部件组成数控设备的进给系统。其作用是把数控装置发来的速度和位移指令（脉冲信号）转换成执行部件的进给速度、方向和位移。每个作进给运动的执行部件，都配有一套伺服驱动系统。而相对于每一个脉冲信号，执行部件都有一个相应的位移量，称为最小设定单位，又称为脉冲当量，其值越小，加工精度越高。数控装置可以以足够高的速度和精度进行计算并发出足够小的脉冲信号，关键在于伺服系统能从多高的速度与精度去响应执行，所以整个系统的精度与速度主要取决于伺服系统。

在伺服系统中，伺服驱动电路要把数控装置发出的微弱电信号（5V 左右，毫安级）放大成强电的驱动电信号（几十、上百伏，安培级）去驱动执行元件——伺服电动机。

伺服系统的执行元件主要有功率步进电动机、电液脉冲马达、直流伺服电动机和交流伺服电动机等，其作用是将电控信号的变化，转换成电动机输出轴的角速度和角位移的变化，从而带动机械本体的机械部件作进给运动。

（五）测量反馈装置

测量反馈装置是将运动部件的实际位移、速度及当前的环境（温度、振动、摩擦和切削力等因素的变化）参数加以检测，转变为电信号后反馈给数控装置，通过比较，得出实际运动与指令运动的误差，这时发出误差指令，纠正所产生的误差。测量反馈装置的引入，有效地改善了系统的动态特性，大大提高了零件的加工精度。

（六）工作本体

数控系统的工作本体是加工运动的实际执行部件，主要包括主运动部件，进给运动执行部件、工作台、拖板及其部件和床身立柱等支撑部件，此外还有冷却、润滑、转位和夹紧等辅助装置，存放刀具的刀架、刀库及交换刀具的自动换刀机构等。对工作本体的要求应有足够的刚度和抗振性，还要有足够的精度，传动系统结构要简单，便于实现自动控制。

三、数控系统的工作原理

数控系统加工零件是按照事先编制好的加工程序单来进行的。

首先应分析零件图样，根据图样中对材料、尺寸、形状、加工精度及热处理要求来确定工艺方案，进行工艺处理和数值计算。在此基础上，根据数控系统规定的功能指令代码和程序段格式编写数控加工程序单。

根据加工程序单的内容，用自动穿孔机制作控制介质（穿孔纸带）。通过读带装置将穿孔带的代码逐段输入到数控装置，也可以用键盘输入方式（MDI）将加工程序单内容直接输入数控装置。

数控装置将输入指令进行译码、寄存和运算后，向系统各个坐标的伺服系统发出指令信号，经驱动电路的放大处理，驱动伺服电动机输出角位移和角速度，并通过工作本体的传动系统转换为工作台的直线位移，实现进给运动。

同时，数控装置通过强电控制装置——可编程序控制器（PLC）实现系统其它必要的辅助动作，如自动变速、冷却润滑液的自动开停、工件的自动松夹及刀具的自动更换等，配合进给运动完成零件的自动加工。

第三节 数控系统的分类

一、按数控装置类型分类

按数控装置类型分类，数控系统可分类如下。

(一) 硬件式数控系统（即 NC 系统）

这是早期的数控系统。在这种系统的数控装置中，输入、译码、插补运算、输出等控制功能均由分立元件硬线联接的逻辑电路来实现。一般来说，不同的数控设备需要设计不同的硬件逻辑电路。这类数控系统的通用性、灵活性等功能较差。

(二) 软件式数控系统（即 CNC 系统）

70 年代中期，随着微电子技术的发展，芯片的集成度越来越高，利用大规模及超大规模集成电路组成 CNC 装置成为可能。在此装置中，采用小型计算机或微型计算机作为控制单元，其主要功能几乎全由软件来实现；对于不同的系统，只需编制不同的软件就可以实现不同的控制功能，而硬件几乎可以通用。这就为硬件的大批量生产提供了条件。数控系统硬件的批量生产有利于保证质量、降低成本、缩短周期、迅速推广和扩展应用，所以现代数控系统都无例外地采用 CNC 装置。

二、按功能水平分类

可以把数控系统分为高、中、低档三类。

(一) 高档数控系统

这类数控系统是目前发展最完善的系统。其特点是：分辨率可达 $0.1\mu\text{m}$ ；进给速度可达 $15\sim 100\text{m/min}$ ；伺服系统采用闭环控制方式；能达到五轴以上的联动轴数；具有 MAP（制造自动化协议）通信接口及其它接口，并具有通信联网功能；具有三维图形显示；有较强功能的内 PLC，并具有轴控制的扩展功能；选用 64 位 CPU 及具有精简指令集的中央处理单元，以提高运算速度。

(二) 中档数控系统

这类数控系统的特点是：分辨率为 $1\mu\text{m}$ ；进给速度为 $15\sim 24\text{m/min}$ ；伺服进给采用半闭环控制方式；联动轴数可达四轴；可以具有 RS-232 或 DNC 通信接口；有内装可编程序控制器 PLC；具有较齐全的 CRT 显示，有图形，有字符及人机对话与自诊断功能；中央处理单元采用 16 位进而向 32 位过渡。

(三) 低档数控系统

这种系统也称为经济型数控系统。其特点是：分辨率为 $10\mu\text{m}$ ；进给速度为 $4\sim 15\text{m/min}$ ；伺服进给采用开环控制方式、步进电动机进给系统；联动轴数不超过三轴；无通信功能，只有简单的数码管显示或 CRT 显示字符；无内装 PLC，数控装置采用 8 位 CPU 作为中央处理单元。

我们习惯上把功能齐全的数控系统称为全功能数控系统，或称为标准型数控系统；而把同单板机、单片机和步进电动机组成的数控系统以及其它功能简单、价格低廉的数控系统称为经济型数控系统。经济型数控系统主要用于车床、线切割机床及老式机床的数控化改造上，它属于低档数控系统，目前我国有一定的生产和应用。

三、按用途分类

按用途可分类如下。

(一) 金属切削类数控系统

金属切削类数控系统有数控车床、数控铣床、数控钻床、数控镗床、数控磨床、数控齿轮床等。

加工中心是带有刀库和自动换刀装置的一机多序的数控加工机床。它的出现打破了一台机床只能加工一种工序的传统观念，它利用大型刀库的多个刀具（一般为 20~120 把）和自动换刀装置对一次装夹的工件进行铣、镗、钻、扩铰和攻螺纹等多工序加工。它主要用来加工箱体零件或棱形零件。近年来又出现了许多车削加工中心，几乎可以完成回转体零件的所有加工工序。加工中心机床实现了一次装夹、一机多工序的加工方式，有效地避免了零件多次装夹造成的定位误差，减少了机床台数和占地面积，大大提高了加工精度、生产效率和自动化程度。

(二) 金属成形类数控机床

金属成型类数控机床有数控折弯机、数控弯管机、数控压力机等。

(三) 数控特种加工机床

数控特种加工机床有数控线切割机床、数控电火花加工机床、数控激光加工机等。

四、按运动方式分类

(一) 点位控制系统

点位控制系统的特点是加工移动部件只能实现从一个位置到另一个位置的精确移动，在移动和定位过程中不进行任何加工，而且移动部件的运动路线并不影响加工孔距的精度。数控系统只需精确控制行程终点的坐标值，而不控制点与点之间的运动轨迹。为了尽可能地减少移动部件的运动与定位时间，通常先以快速移动到接近终点坐标，然后减速准确移动到定位点，以保证良好的加工精度。这类数控系统主要有数控坐标镗床、数控钻床、数控冲床、数控点焊机及数控弯管机等。

(二) 点位直线控制系统

点位直线控制系统的特点是加工移动部件不仅要实现从一个位置到另一个位置的精确移动，而且能实现平行于坐标轴的直线切削加工运动及沿与坐标轴成 45° 的斜线进行直线切削加工，但不能沿任意斜率的直线进行切削加工。数控车床、数控镗铣床和数控加工中心等，均采用点位直线控制系统。

(三) 轮廓控制系统

该系统可以使刀具和工件按平面直线、曲线或空间曲面轮廓进行相对运动，加工出任何形状的复杂零件。它可以同时控制 2~5 个坐标轴联动，功能较为齐全。在加工中，需要不断进行插补运算，然后进行相应的速度与位移控制。数控铣床、数控凸轮磨床和功能完善的数控车床都是典型的轮廓控制系统。此外，较先进的数控火焰切割机、数控线切割机及数控绘图机等，也都采用了轮廓控制系统。它们取代了各种类型的仿形加工，提高了精度和生产效率，因而得到了广泛的应用。

五、按控制方式分类

(一) 开环控制系统

开环控制系统就是不具有任何反馈装置的数控系统。这种系统通常使用功率步进电动机

作为执行机构。数控装置输出指令脉冲通过环形分配器和驱动电路，不断改变供电状态，使步进电动机转过相应的步距角，再通过图中齿轮箱带动丝杠旋转，把角位移转换为移动部件的直线位移。移动部件的移动速度与位移量是由输入脉冲的频率和脉冲数所决定的。

由于没有反馈装置，开环系统的步距误差及机械部件的传动误差不能进行校正补偿，所以控制精度较低。但开环系统结构简单、运行平稳、成本低、价格低廉、使用维修方便，可广泛应用于精度要求不高的经济型数控系统中，在中小企业中有较广泛的应用。

（二）半闭环控制系统

半闭环控制系统是在伺服电动机输出轴端或丝杠轴端装有角位移检测装置（如感应同步器或光电编码器等），通过测量角位移间接地检测移动部件的直线位移，然后反馈至数控装置中。

由于角位移检测装置比直线位移检测装置结构简单，安装方便，稳定性能好，价格便宜，精度高于开环控制系统，应用还是较为广泛的。但这种系统的丝杠螺母副、齿轮传动副等传动装置未包含在反馈系统中，故其控制精度还不算很高。如果使用时选择精度较高的滚珠丝杠和消除间隙的齿轮副，再配以具有螺距误差和反向间隙补偿功能的数控装置，还是能够达到较高的加工精度。正因为如此，半闭环控制系统在生产中得到了广泛的应用。

（三）闭环控制系统

闭环控制系统是在移动部件上直接装有直线位置检测装置，将测量的实际位移值反馈到数控装置中，与输入的位移值进行比较，用差值进行补偿，使移动部件按照实际需要的位移量运动，实现移动部件的精确定位。

由于闭环控制系统有位置反馈装置，而这种反馈又包含有丝杠螺母副和齿轮传动副所带来的误差，都可以给予补偿，因而可达到很高的控制精度，可广泛地应用在高精度的大型精密数控系统中。

理论上，闭环控制系统的精度主要取决于测量元件的精度和数/模转换器的精度。但由于该系统受进给丝杠的拉压刚度、扭转刚度、摩擦阻尼特性和间隙等非线性因素的影响，给调试工作带来很大困难。若各种参数匹配不适当，会引起系统振荡，造成系统工作不稳定，影响定位精度，所以闭环控制系统安装调试非常复杂，价格昂贵，从而在一定程度上限制了对其更广泛的应用。

第四节 数控技术的发展

一、高速化

（一）选用高速微处理器

微处理器是现代数控系统的核心部件，即担负着运算、存储与控制的多重任务，其位数及运行速度直接关系到提高数控机床的加工速度。采用 32 位微处理器和多微处理机系统是提高生产率的最直接的手段。

高速 32 位微处理器的采用，使得数控系统的输入、译码、计算、输出等环节都在高速下完成，并可提高数控系统的分辨率及实现连续小程序段的高速、高精度加工。

目前正在开发主 CPU 为 64 位的新型数控系统（如 FANUCFT-1、FM-1 及 FS15 等系统），增强了插补运算和快速进给的功能，可成倍地提高处理速度。例如，当指令为 1mm 微

小程序段,加工速度达 120m/min,每 1mm 程序段处理时间为 0.5ms,即每秒钟可处理 2000 个移动 1mm 的程序段。

(二) 提高多轴控制水平

新型数控系统都具有多轴控制功能。为了提高加工效率,可以采用多刀具同时加工的多刀架控制;在柔性制造单元(FMC)上实现自动换刀装置(刀库)及自动交换工件的交换工作台的控制;对曲线、曲面及特殊型面的加工,实现多轴联动控制等。现代数控系统一般可控制轴数为 3~15 轴,有的多达 20~24 轴,同时控制轴数(联动)为 3~6 轴。

(三) 配置高速、强功能可编程序控制器(PLC)

配置并提高可编程控制器的运行速度也是提高数控机床加工速度的重要手段。新型的 PMC 具有专用的 CPU,基本指令运作速度可达到 μs /步级。强功能的内装可编程控制器能满足 CNC 系统的控制要求,可编程步数扩大到 8000~12000 步;满足直接数字控制系统(DNC)和柔性制造单元(FMC)的控制要求,可实现 CNC 系统多轴联动以外的工件装卸或传递、测量、刀具储存和交换,以及 CNC 其它辅助装置的专用控制功能。

二、多功能

(一) 具有多种监控、检测及补偿功能

为了提高数控系统的效率及运行精度,对现代数控系统配置了各种检测装置,如刀具磨损的检测、系统精度及热变形的检测等。与之相适应,现代数控系统要具备工具寿命管理、刀具长度补偿、刀尖补偿、爬行补偿、实时变形补偿等多种补偿功能。

(二) 彩色 CRT 图形显示

大多数现代数控系统都采用 CRT 图形显示,可以进行二维图形的轨迹显示,有的还可以实现三维彩色动态图形的显示。

(三) 人机对话功能

借助 CRT,利用键盘可以实现程序的输入、编辑、修改和删除等功能,此外还具有前台操作、后台编辑的功能。大量采用选择操作方式,使操作更加简便。

(四) 自诊断功能

现代数控系统已具有硬件、软件及故障的自诊断功能,提高了可维修性及系统的使用效率。

(五) 很强的通信功能

现代数控系统,除了能与编程机、绘图机等外部设备通信外,还能与其它 CNC 系统通信,或与上级计算机通信,以实现柔性制造系统(FMS)进线的要求。所以除了 RS-232 串行接口外,还有 RS-422 和 DNC 等多种通信接口。

数控设备要由单机进入 FMS 进而形成计算机集成制造系统(CIMS),就需要数控系统具有更高的通信功能。最新的数控系统,开发了符合 ISO 开放系统互联七层网络模型的通信规约,为自动化技术发展创造了条件。

三、智能化

在现代数控系统中,引进了自适应控制技术。自适应控制(Adaptive Contro 简称 AC)技术是能调节在加工过程中所测得的工作状态特性,且能使切削过程达到并维持最佳状态的技术。在系统工作中,大约有 30 余种变量直接或间接影响加工效果,如工件毛坯余量不匀、材料硬度不一致、刀具磨损、工件变形、机床热变形、化学亲合力的大小、切削液的粘度等因

素。这些变量事先难以预知,编制加工程序时常依据经验数据。实际加工时,很难用最佳参数进行切削。而自适应控制技术则能根据切削条件的变化,自动调整并保持最佳工作状态,从而得到高的加工精度、较小的表面粗糙度,同时也能提高刀具的使用寿命和设备的生产效率。

现代数控系统智能化的发展,目前主要体现在以下几方面:

- 1) 工件自动检测、自动定心。
- 2) 刀具折损检测及自动更换备用刀具。
- 3) 刀具寿命及刀具收存情况管理。
- 4) 负载监控。
- 5) 数据管理。
- 6) 维修管理。
- 7) 利用前馈控制实时补偿失动量的功能。
- 8) 根据加工时的热变形,对滚珠丝杠等的伸缩进行实时补偿功能。

另外,国外正在研究根据人的语言声音进行控制的技术,由系统自己辨识图样并进行自动 CNC 加工的技术等,向着使系统具有更高人工智能的方向发展。

四、高精度化

以加工中心为例,其主要精度指标——直线坐标的定位精度和重复定位精度,都有了明显地提高;定位精度由 $\pm 5\mu\text{m}/\text{m}$ 提高到 $\pm 0.15\sim 3\mu\text{m}/\text{m}$;重复定位精度由 $\pm 2\mu\text{m}$ 提高到 $\pm 1\mu\text{m}$ 。

为了提高加工精度,除了在结构总体设计、主轴箱、进给系统中采用低热胀系数材料、通入恒温油等措施外,在控制系统方面采取的措施是:

- 1) 采用高精度的脉冲当量。从提高控制精度入手,来提高定位精度和重复定位精度。
- 2) 采用交流数字伺服系统。伺服系统的质量直接关系到 CNC 系统的加工精度。采用交流数字伺服系统,可使伺服电动机的位置、速度及电流环路等参数都实现数字化,因此也就实现了几乎不受负载变化影响的高速响应的伺服系统。
- 3) 前馈控制。所谓前馈控制,就是在原来的控制系统上加工指令各阶导数的控制。采用它,能使伺服系统的追踪滞后减少 $1/2$,改善了加工精度。
- 4) 机床静止摩擦的非线性控制。对于具有较大静止摩擦的数控设备,过去没有采取有效地控制,使圆弧切削的圆度不好。而新型数字伺服系统具有补偿机床驱动系统静摩擦的非线性控制功能,可改善圆弧切削的圆度。

五、高可靠性

数控系统工作的可靠性一直是人们经常关注的重要性能指标。为提高数控系统的可靠性,人们采取了下面的一些措施:

- 1) 提高数控系统的硬件质量。选用高质量的集成电路芯片、印制线路板和其它元器件,建立并实施从元器件筛选、稳定产品的制造及装配工艺、性能测试等一系列完整的质量保证体系。

最新的数控系统,如日本 FANUC16 系统采用了三维插装技术,与平面高密插装技术相比,进一步提高了印制电路板上电子零件的插装密度,使控制装置更加小型化,进而将典型的硬件进行集成化,做成专用芯片,为提高数控系统的可靠性、提供了保证。

- 2) 模块化、标准化和通用化。现代的数控系统性能越来越完善,功能越来越丰富,促使

系统的硬件、软件结构实现了模块化、标准化和通用化。三化的实现,不仅便于组织开发、生产和应用,而且也提高了制做和运行的可靠性,并便于用户的维修和保养。

选择不同的功能标准化模块,便可组成各种不同的数控系统,并可方便地移植计算机行业或其它自动化领域的先进成果,便于现代数控系统进一步扩展和升级,促进数控技术向深度和广度方面发展。

六、多机控制系统

一机多序的数控加工中心的出现,加之网络控制技术、信息技术以及系统工艺流程学的发展,为单机数控自动化向计算机控制的多机控制系统自动化方向发展创造了必要的条件。已经出现的计算机群控系统即直接数控系统、柔性制造系统及计算机集成制造系统,就是在数控技术的基础上逐渐发展起来的多机控制系统。

(一) 计算机直接数控系统 (DNC)

计算机直接数控系统是将一组数控设备与存储有加工程序和设备控制程序的公共存储器相连,根据加工要求,向各设备分配数据和指令的系统,即用一台通用计算机直接控制和管理一群数控设备进行零件加工或装配的系统。

在 DNC 系统中,基本保留原来各数控设备的 CNC 系统,并与 DNC 系统的中央计算机组成计算机网络,实现分级控制管理。中央计算机并不取代各数控装置的常规工作。

DNC 系统具有计算机集中处理和分时控制的能力,具有现场自动编程和对零件程序进行修改的能力,使编程与控制相结合而且零件程序存储容量大。此外,DNC 系统还具有生产管理、作业调度、工况显示监控的刀具寿命管理等能力。

(二) 柔性制造系统 (FMS)

柔性制造系统是在 DNC 基础上发展起来的一种高度自动化加工形式。它是由统一的控制系统和输送系统连接起来的一组加工设备,包括数控机床、材料和工具自动搬运设备、产品零件自动传输设备、自动检测和试验设备等,它们不仅能进行自动化生产,而且还能在一定范围内完成不同工件的加工任务。柔性制造系统是由多台制造设备组成的加工系统,设备间自动传输材料、工具和产品零件的物流系统,由中央计算机执行整个系统的生产计划与作业调度、集中监控以及加工程序管理等工作的中央管理系统组成。

柔性制造系统是当前机械制造技术发展的方向,它具有高效率、高柔性和高精度的优点,是比较理想的加工系统,能解决机械加工中高度自动化和高度柔性化的矛盾,使两者有机地结合于一体,加快了机械行业现代化发展的步伐。

第二章 数控加工编程

第一节 数控加工编程的基础知识

一、数控加工编程概念

数控加工是按事先编制好的加工程序对工件进行高效加工的新方法。而程序编制，就是将零件的工艺过程、工艺参数、刀具位移量及位移方向、其它辅助动作（换刀、冷却、工件的松夹等），按运动顺序和所用数控系统规定的指令代码及程序格式编成加工程序单，再将程序单中的全部内容记录在控制介质上（如穿孔带、磁带、磁盘等），然后输给数控装置，从而指挥数控设备运动。这种从零件图样到制成控制介质的全过程，称为数控加工的程序编制。

理想的加工程序，不仅应保证加工出符合图样要求的合格零件，同时应能使数控设备的功能得到合理的应用与充分的发挥，以使数控设备能安全可靠并高效地工作。

二、数控加工编程的步骤

数控加工编程的一般步骤如图 2-1 所示。

数控加工编程的步骤包括分析零件图样、工艺处理、数学处理、编制程序单、制作控制介质及程序的检验与调试。

（一）分析零件图样

数控编程的首要工作是全面细致地分析零件图样。根据零件图样的技术要求，了解零件的材料、形状、尺寸、精度及热处理要求等，通过分析，确认该零件是否适宜在数控设备上加工，在何种数控设备上加工，加工哪些工序和哪些部位，这些是数控加工编程的基础和前提。

（二）工艺处理

在分析零件图样的基础上，确定零件的加工方案，确定零件加工工序的划分，确定加工路线，确定装夹方法及夹具，确定切削用量及刀具，确定工艺参数（主轴转速、进给速度、换刀及冷却润滑等）。

（三）数学处理

完成工艺处理后，即可进行数学处理。根据零件的几何尺寸，加工路线和所设定的坐标系来计算刀具运动轨迹的坐标值，以获得刀位的数据。一般的数控系统均具有直线插补和圆弧插补的功能。对于加工由圆弧和直线组成的简单的平面零件，只需

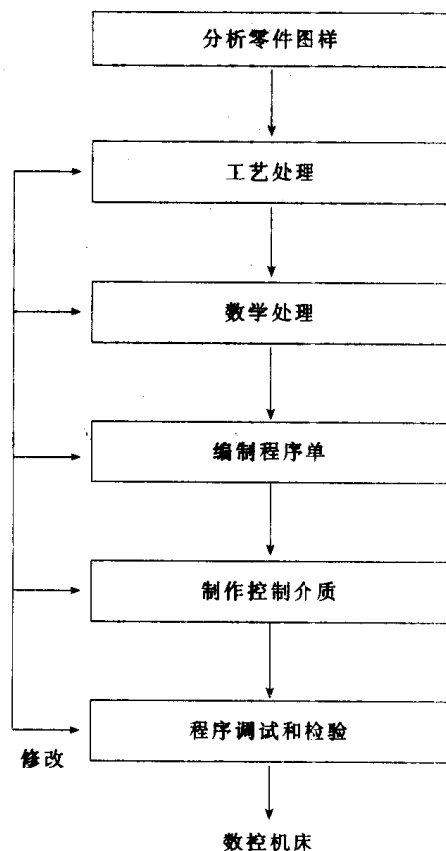


图2-1 数控编程流程图

计算出相邻几何元素的交点或切点的坐标值,得出各几何元素的起点、终点和圆弧的圆心坐标值。如果数控系统无刀具补偿功能,还应计算刀具运动的中心轨迹。对于较复杂的零件或零件的形状与数控系统的插补功能不一致时,就需要进行较复杂的计算。例如对非圆曲线(如渐开线、阿基米德螺旋线等),需要用直线段或圆弧段来逼近,在满足加工精度的条件下,计算出逼近线段交点或切点的坐标值。对于自由曲线、自由曲面、组合曲面的数值计算更为复杂,一般需利用计算机进行辅助计算,否则难以完成。

(四) 编写零件加工程序单

完成上述的工艺处理和数学处理后,根据所确定的各项工艺内容和计算出的运动轨迹的坐标值,按照数控系统规定使用的程序指令及程序格式,逐段编写零件加工程序单。数控程序单是数控加工的基础文件,十分重要,必须合理、准确。编程人员应熟悉数控设备的性能、程序指令及代码,才能编写出正确的加工程序。

(五) 制作控制介质及程序的校验

1. 制作控制介质 程序编好之后,需制作控制介质。控制介质大多采用穿孔纸带,将程序单上的程序按 ISO 标准代码或 EIA 代码穿孔制成数控纸带。穿孔纸带上的程序代码通过光电读带机被输入到数控系统,控制数控设备工作。

2. 校验 穿好孔的纸带通常需经校验和试切削之后才能使用。一般地,先利用穿孔机本身的复校功能检查穿孔是否有误,然后再将穿孔纸带上的信息输入数控系统进行空进给检验。对于平面零件,可用笔代替刀具,以坐标纸代替工件进行空运转画出刀具轨迹,以检验程序的对错。在具有图形显示的数控系统上,可通过进给轨迹或模拟刀具对工件的切削过程,对程序进行检查。对于复杂的零件,应采用铝、塑料等易切削材料进行试切。通过检查试件,不仅可确认程序是否正确,还可知道加工精度是否符合要求。当发现工件不符合要求时,可修改程序或采取尺寸补偿等措施。

经校验合格后的控制介质方可正式投入使用。

三、数控加工编程的方法

数控加工编程基本上有两种方法,即手工编程和自动编程。

(一) 手工编程

从分析零件图样开始,到工艺处理、数学处理、编写程序单、制作控制介质及程序校验的程序编制的全过程,均由人工完成的,即为“手工编程”。

对于零件几何形状不太复杂,计算量不大,程序不多,穿孔纸带也不长,出错机会较少,这时手工编程反而经济及时,而且简单、方便,所以广泛应用于形状较简单的点位加工及点位直线与圆弧轮廓的加工中。

但对于那些几何形状复杂,几何元素较多,程序量很大,计算量很大很繁琐,易出错,又很难校对的零件,手工编程很难胜任,即使能编出程序来,也耗时很多。据统计,采用手工编程时,一个零件的编程时间与加工时间之比为 30:1。这将使昂贵的数控设备在等待手工编程的过程中,因闲置而不能充分发挥作用。因此,为了缩短生产周期,提高数控设备的利用率,有效地解决复杂零件的加工问题,必须采用“自动编程”方法。

(二) 自动编程

自动编程亦称计算机零件编程,数控加工程序的编制工作大部分或全部由计算机完成的过程,称为自动编程。它是用一台通用计算机(或编程机)配上打印机和自动穿孔机即可完

成全部的编程内容。

编程人员只需根据图样要求，用一种直观易懂的数控语言手工编写出一个简短的零件加工源程序，并将其输入计算机中，则诸如划分工步、选择切削用量、计算运动轨迹、编制加工程序及制作穿孔纸带等，都由计算机及外围设备自动完成。所编的程序还可通过计算机屏幕显示和自动绘图仪进行刀具运动轨迹的图形检查，如程序有错，即可在屏幕上及时修改，以得到正确的程序。由于计算机自动编程代替编程人员完成了繁琐的数值计算工作，并省去了书写程序单及制作控制介质的工作，因而可将编程效率提高几十倍乃至上百倍，同时解决了手工编程无法解决的许多复杂零件的编程难题。目前，自动编程方法广泛应用于几何形状复杂、数值计算量大而繁琐、程序量大的零件编程中，可明显地提高技术经济效益。

按输入方式的不同，自动编程有语言输入方式、图形输入方式和语音输入方式三种。语言输入方式指将零件的几何尺寸、工艺要求、切削参数及辅助信息等先用数控语言编写成零件加工源程序，输入到计算机中，再由计算机进一步处理得到零件加工程序单。图形输入方式指用图形输入设备（如数字化仪）及图形菜单将零件图形信息直接输入计算机并在屏幕上显示出来，再进一步处理，最终得到加工程序及控制介质。语音输入方式又称语音编程，它是采用语音识别器，将操作者发出的加工指令声音转变为加工程序。

按程序编制系统（程编机）与数控系统紧密性的不同，自动编程又可分为离线编程和在线编程。与数控系统相脱离单独进行工作的程编系统称为离线编程系统。该编程系统可为多台数控设备编程，其功能往往多而强，且编程时不占用设备工作时间。另外，随着数控技术的不断发展，数控系统不仅可用于控制设备加工，还可用于自动编程，这种由数控系统与自动编程联在一起的方法，称为在线编程。有的数控装置具有会话与编程功能，就是将离线程编机的许多功能移植到数控系统上，使数控系统直接编程，如 FANUC3TF 和 FANUC11MF 系统等就是具有人机会话型程编功能的 CNC 系统。

四、数控加工编程常用标准

随着数控技术的发展，数控设备已成为各工业部门自动化加工的重要装备，数控技术已成为未来自动化工厂的基础技术。在数控设备的研究开发、设计生产、使用维护之间；在生产企业与用户之间；在管理与操作之间；在国内外的技术与设备的交往中，都要有统一的技术要求、术语、符号和图形，即应有统一的标准。

国际标准化组织（ISO）在数控技术方面制订了一系列相应的国际标准，各国也都根据各国的实际情况制订了各自的国家标准。我国鉴于 ISO 国际标准已为世界上大多数国家所承认并使用，决定在我国采用国际标准，同时根据我国的具体情况，制订了与国际标准等效的国家标准，于 1982 年后实施。这些标准是数控加工编程的基本准则。

在数控加工编程中常用的数控标准有以下几项：

- 1) 数控纸带的规格。
- 2) 数控机床坐标轴和运动方向。
- 3) 数控编程的编码字符。
- 4) 数控编程的程序段格式。
- 5) 数控编程的功能代码。

（一）数控纸带的规格及编码字符。

现在国内外广泛采用八单位穿孔纸带作为数控系统输入的控制介质。

纸带的规格按照 EIA (美国电子工业学会) RS-237 标准制订, ISO 标准中关于纸带的规格也采用这种规定。我国关于数控纸带的规格与 ISO 相同, 也采用此规定。规定内容见图 2-2 所示。

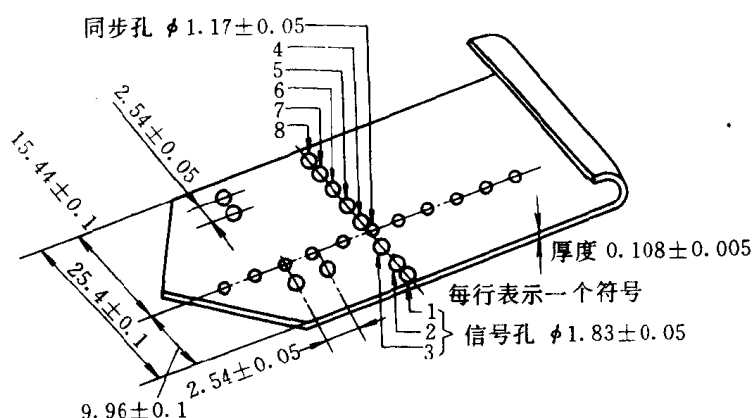


图 2-2 八单位标准穿孔纸带

纸带每行共有 9 个孔, 其中一个小孔称为“中导孔”或“同步孔”, 用来产生同步控制信号。其余 8 个孔称为“信号孔”, 用来表示数字、字母或符号信息。有孔表示二进制的“1”, 无孔表示二进制的“0”。在 ISO 标准中, 代码由 7 位二进制数及偶校验位组成, 其第 8 位用来补偶。当某个代码的孔数为奇数时, 就在第 8 位上穿孔, 使孔的总数为偶数; 在 EIA 标准中, 每个代码由 6 位二进制数及奇校验位组成。每个代码孔的个数必须为奇数, 第 5 位孔用来补奇, 称为补奇孔。数控设备的输入系统中有专门的奇偶校验电路, 当输入的代码与 ISO 或 EIA 标准规定的奇偶数不相符时, 控制系统立即发出奇偶校验错误信息, 并命令停机。

ISO 标准代码为七单位编码, 而 EIA 标准为六单位编码 (不包括奇偶校验位), 这样, ISO 代码的信息量要比 EIA 大一倍, 即 ISO 标准的代码信息量为 $2^7=128$, 而 EIA 标准的代码信息量为 $2^6=64$ 。ISO 代码的编码规律性强, 如所有数字字符在 b_5 和 b_6 处有孔; 字母字符 A~O 则在 b_7 有孔, 而 P~Z 在 b_5 和 b_7 有孔; 符号都在 b_6 处有孔, 这些规律为输入数据及数控装置逻辑设计带来方便。

从编码字符的构成看, ISO 代码共有 55 个穿孔代码, 其中有 10 个数字字符 0~9, 采用二进制; 有 26 个字母 A~Z, 表示坐标和各种功能; 还有 10 个运算符号和 10 个状态符号, 这 55 个编码字符表示了数控编程中所有的工艺内容。

我国于 70 年代设计使用的数控系统大都采用 EIA 编码。后来考虑到国际上趋向于采用 ISO 编码, 故我国根据 ISO 编码制订了 JB3050-82《数控机床用七单位编码字符集》部颁标准, 它与 ISO-840 标准等效。并规定新设计的产品一律采用 JB3050-82 标准。有关 ISO 编码字符及 EIA 编码字符列于表 2-1 和表 2-2 中, 表 2-3 为 ISO 代码特征表。

由于八单位穿孔纸带有固定的机械代码孔, 不易受环境影响而产生变形和干扰, 便于长期保存和重复使用, 且程序的存储量大, 故至今仍是数控系统主要的、常用的信息输入方式。