

数控机床编程及应用

陈俊◎主编



 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

TG659/261

2008

数控机床编程及应用

陈俊 主编

李世蓉 马志诚 杜红东 副主编

 北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书是根据高等院校培养技术应用型专门人才的教学需要编写的。全书共7章,主要包括数控机床的基本知识、数控机床编程基础、数控车床编程、加工中心程序设计、数控线切割机床编程、数控机床的操作及应用实例、数控机床的使用与维护等方面的内容。每章均附思考题与习题。本书内容全面系统,实用性强,层次清楚。通过数控加工仿真系统配合大量实例的讲述,图文并茂、直观易懂,便于学生把握学习要点,提高解决实际问题的能力。

本书可作为高等院校数控技术及应用、机电一体化、机械制造与自动化等相关专业的教材,也可作为从事数控编程、数控机床应用的工程技术人员的参考书。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

数控机床编程及应用/陈俊主编. —北京:北京理工大学出版社,2008.7
ISBN 978-7-5640-1556-5

I. 数… II. 陈… III. 数控机床-程序设计-高等学校:技术学校-教材 IV. TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 078781 号

出版发行 / 北京理工大学出版社

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(办公室) 68944990(批销中心) 68911084(读者服务部)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京国马印刷厂

开 本 / 787 毫米×960 毫米 1/16

印 张 / 14

字 数 / 288 千字

版 次 / 2008 年 7 月第 1 版 2008 年 7 月第 1 次印刷 责任校对 / 陈玉梅

定 价 / 22.80 元 责任印制 / 李绍英

图书出现印装质量问题,本社负责调换

编写委员会

主 编 陈 俊

副 主 编 李世蓉 马志诚 杜红东

编写人员 (以姓氏笔划为序)

马志诚 方 毅 邓宇翔 邢 薇

杜红东 李世蓉 陈 俊

前 言

制造业是各种产业的支柱工业，数控技术和数控机床是制造工业现代化的重要基础，数控机床作为一种精密、高效的加工设备，越来越成为机械制造业技术的首选设备。它的广泛应用，给机械制造业的产业结构、产品种类和档次及生产方式带来了根本性的变革，并直接影响着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。21世纪机械制造业的竞争，在某种程度上是数控技术的竞争。随着制造设备的大规模数控化，企业急需一大批掌握数控机床应用技术的人员。但目前数控技术人才奇缺，严重制约着数控机床的使用，影响了制造业的发展。加快数控人才的培养，已成为我国制造业的当务之急。

本教材共分7章，主要包括数控机床的基本知识、数控机床编程基础、数控车床编程、加工中心程序设计、数控线切割机床编程、数控机床的操作与应用实例、数控机床的使用与维护等方面的内容。第1章介绍数控机床的基本知识，让读者了解数控机床的基本概念、数控机床的组成和工作原理、数控机床的分类和加工特点等。第2章主要论述数控机床编程基础，包括插补的基本知识、数控编程的工艺处理、数控系统的刀具补偿功能与数值计算、数控编程的内容和方法、常用的数控加工程序标准，同时还对常用数控指令及用法进行了详细介绍。第3章讲述的是数控车床编程。第4章和第5章分别讲述加工中心和数控线切割机床的编程。第6章讲述数控机床的操作与应用实例，通过数控加工仿真软件结合实例，使学生掌握数控机床的操作和编程。第7章讲述数控机床的使用、日常保养与维护。为帮助学生能更好地理解教学内容，每章后都附有思考题与习题。

在本教材编写过程中，得到了许多老师的关心、支持和帮助，并提出了许多宝贵意见，在此表示衷心的感谢！

由于编者的水平和经验有限，加上编写时间紧迫，书中难免存在疏漏之处，恳请广大读者批评指正。

编 者

目 录

第 1 章 数控机床的基本知识	(1)
1.1 数控机床的基本概念	(1)
1.2 数控机床的组成和工作原理	(1)
1.3 数控机床的分类	(4)
1.4 数控机床加工的特点和应用范围	(8)
1.5 数控技术的现状和发展趋势	(9)
思考题与习题	(12)
第 2 章 数控机床编程基础	(13)
2.1 插补的基本知识.....	(13)
2.2 数控编程中的工艺处理.....	(15)
2.3 数控系统的刀具补偿功能及编程中的数值计算.....	(34)
2.4 数控编程的内容和方法.....	(41)
2.5 常用的数控加工程序标准.....	(44)
2.6 常用数控指令及用法.....	(52)
思考题与习题	(69)
第 3 章 数控车床编程	(72)
3.1 数控车床的加工特点.....	(72)
3.2 数控车床的坐标系与编程特点.....	(74)
3.3 数控车床的编程指令及用法.....	(75)
3.4 数控车床编程实例	(102)
思考题与习题.....	(104)
第 4 章 加工中心程序设计	(106)
4.1 加工中心的特点与分类	(106)
4.2 加工中心的程序编制	(109)

2 数控机床编程及应用

4.3 加工中心的操作	(122)
4.4 加工中心程序设计典型实例	(129)
思考题与习题	(137)
第5章 数控线切割机床编程	(140)
5.1 数控线切割机床的基本原理及加工特点	(140)
5.2 数控线切割机床的编程特点与常用指令	(141)
5.3 线切割编程实例	(153)
思考题与习题	(156)
第6章 数控机床的操作及应用实例	(157)
6.1 数控车床的操作及应用实例	(157)
6.2 数控铣床的操作及应用实例	(172)
6.3 数控加工中心应用实例	(182)
第7章 数控机床的使用与维护	(203)
7.1 数控机床的选用	(203)
7.2 数控机床的基本操作规程	(209)
7.3 数控机床的维护与保养	(212)
思考题与习题	(217)
参考文献	(218)

第1章 数控机床的基本知识

随着科学技术的飞速发展,社会对产品多样化的需求日益强烈,产品更新速度越来越快,多品种、中小批量生产的比例明显增加;同时,随着航空工业、汽车工业和轻工业消费品生产的高速增长,复杂形状的零件越来越多,精度要求也越来越高;此外,激烈的市场竞争要求产品研制的生产周期越来越短,传统的加工设备和制造方法已难以适应这种多样化、柔性化与复杂零件的高效高质量的加工要求。因此,近半个世纪以来,能有效解决复杂、精密、小批多变零件加工问题的数控加工技术得到了迅速发展和广泛应用。

本章主要介绍数控机床的基本概念、数控机床的组成和工作原理、数控机床的分类、数控机床加工的特点和应用范围。通过对本章的学习,能让读者对数控机床的基本概貌有一定的了解,为后续学习打下基础。

1.1 数控机床的基本概念

数控机床是数字控制机床(numerically controlled machine tool)的简称,亦称 NC 机床,就是通过数字化的信息对机床的运动及其加工过程进行控制,实现要求的机械动作,自动完成加工任务的机床。数控机床是典型的技术密集且自动化程度很高的机电一体化加工设备,是为了满足单件、小批、多品种自动化生产的需要而研制的一种灵活、通用的能够适应产品频繁变化的柔性自动化机床,具有适应性强、加工精度高、加工质量稳定、生产效率高、降低加工成本、改善工人劳动条件等优点。它综合应用了电子计算机、自动控制、伺服驱动、精密测量和新型机械结构等多方面的技术成果。随着机床数控技术的迅速发展,数控机床在机械制造业中的地位也越来越重要。

计算机数字控制机床与 NC 系统的主要区别是该系统采用微处理器 CPU 作为数控装置的核心,CPU 的出现使数控系统的软件功能大幅度提高。

1.2 数控机床的组成和工作原理

1.2.1 数控机床的组成

作为一类典型的机电一体化产品,数控机床主要由程序载体、人机交互装置、数控装置、伺服驱动及检测装置和机床本体等部分组成,如图 1-1 所示。

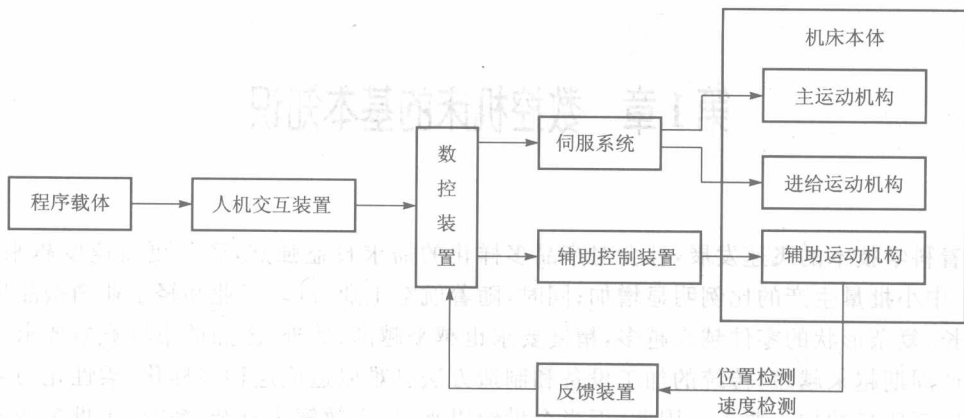


图 1-1 数控机床的组成框图

1. 程序载体

在数控机床上加工零件,首先要对零件图样上的几何形状、尺寸和技术条件进行工艺分析,并在此基础上确定加工顺序和走刀路线,确定主运动和进给运动的工艺参数,确定加工过程中的各种辅助操作,之后用标准格式和代码编制出零件的加工程序。要对数控机床进行控制,就必须把加工程序、各种参数和数据等相关信息通过输入设备送到数控装置,这就需要在人机之间建立某种联系,这种联系的中介物就是控制介质,也称为程序载体,如穿孔纸带、磁盘、键盘(MDI)、手摇脉冲发生器等。

目前常用的方法是用手动数据输入方式将加工程序输入到数控装置中,也可以将加工程序存储在程序载体上。

2. 人机交互装置

数控机床的操作人员通过人机交互装置对数控系统进行操作和控制。人机交互装置的作用是:将程序载体上的数控代码信息转换成电脉冲信号传送到数控装置的内存存储器;对输入的加工程序进行编辑和调试;显示数控机床运行状态;显示机床参数及坐标轴位置等。键盘和显示器是数控系统不可缺少的人机交互装置,现代数控机床可以利用机床上的显示器及键盘以手动方式输入加工程序,也可以通过计算机用通信方式将自动编程产生的加工程序传送到数控装置。

根据程序载体的不同方式,人机交互装置还可以是光电阅读机、磁带机或软盘驱动器等。

3. 数控装置

数控装置是一种专用计算机,是数控机床最重要的组成部分,一般由中央处理器、存储器、总线和输入/输出接口等组成。数控装置的作用是将人机交互装置输入的信息,通过内部的逻辑电路或系统的控制软件进行译码、存储、运算和处理,将加工程序转换成控制机床运动的信号和指令,以控制机床的各部件完成加工程序中规定的动作。数控装置是整个数控机床数控

系统的核心,决定了机床数控系统功能的强弱。

4. 伺服驱动及检测装置

伺服系统是由伺服控制电路、功率放大电路和伺服电动机组成的数控机床执行机构,其作用是把来自数控装置的位置信息转变为各坐标轴方向的进给运动和定位运动。检测装置随时检测伺服电动机或工作台的实际运动情况,进行严格的速度和位置反馈控制。伺服驱动及检测反馈是数控机床的关键部分,其控制精度和相应动态特性,对机床的工作性能、加工精度和加工效率有直接的影响。

5. 机床本体

机床本体是数控机床的主体,包括机床的主运动部件、执行部件以及底座、立柱、刀架、工作台等基础部件。数控机床是一种高精度、高生产率和高度自动化的加工机床,与普通机床相比,它应具有较高的精度和刚度、更好的抗振性和精度保持性,进给传动部件之间的间隙要小。所以其设计要求比通用机床更严格,加工制造要求更高。

1.2.2 数控机床的工作原理

当在普通机床上加工零件时,操作者是按照工艺设计人员事先制定好的工艺规程进行加工的。工艺规程中规定了零件加工的工艺路线、工序的内容、刀具的选择、切削用量等内容。在实际操作时,机床的启动和停止、主轴转速的改变、进给速度和进给方向的变化等,都是由操作者手工操纵的。由于操作者的操作水平不同等因素的影响,零件加工质量的稳定性很难保证。

在数控机床上加工零件则与在普通机床上的方式不同,它是按照事先编写好的程序自动地进行加工。编程人员必须把加工过程中的所有动作和信息(如主轴的转速、进给速度和方向、各坐标轴的运动坐标等),按照一定的顺序和格式编写在程序中,操作者无法临时改变加工过程。因此,编写数控加工程序比制定普通机床的加工工艺规程要复杂和细致得多。同时,由于数控机床是按编制好的程序自动加工的,不受操作者操作水平的影响,所以能够保证零件稳定的质量和很高的加工精度。图1-2所示是数控机床的工作原理。

1. 编制加工程序

根据被加工零件的图样进行工艺方案设计,用手工编程或自动编程方法,将加工零件所需的机床的各种动作及工艺参数等编写成数控系统能够识别的信息代码,即加工程序。

2. 加工程序的输入

可以通过手动输入方式、光电读带机输入、驱动器输入或用计算机和数控机床的接口直接进行通信等方法,将所编写的零件加工程序输入数控装置。

3. 数控装置对加工程序进行译码和运算处理

进入数控装置的信息代码经一系列的处理和运算变成脉冲信号,有的脉冲信号送到机床的伺服系统,经传动机构驱动机床相关部件完成对零件的切削加工;有的脉冲信号送到可编程序控制器中,按顺序控制机床的其他辅助部件,从而完成零件的夹紧、松开,切削液的开闭及刀具的自动更换等动作。

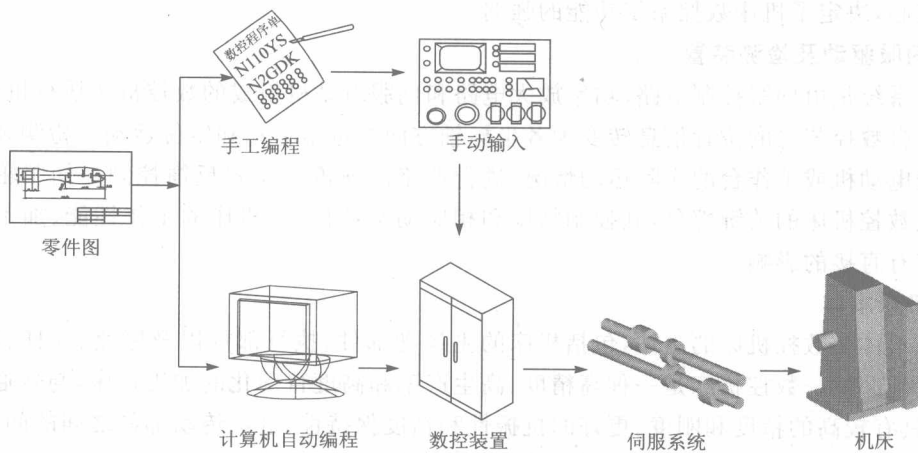


图 1-2 数控机床的工作原理

4. 加工过程的在线检测

机床在执行加工程序的过程中,数控系统需要随时检测机床的坐标轴位置、限位开关的状态等,并与程序的要求相比较,以决定下一步动作,直到加工出合格的零件。

1.3 数控机床的分类

数控机床的种类繁多,根据数控机床的功能和组成不同,可以从多种角度对数控机床进行分类。

1.3.1 按运动方式分类

1. 点位控制

点位控制的特点是只控制刀具相对于工件定位点的位置精度,不控制点与点之间的运动轨迹,在移动过程中刀具不进行切削,如图 1-3 所示。为了既提高生产效率又保证定位精度,机床工作台(或刀架)移动时采用机床设定的最高进给速度快速移动,在接近终点前进行分级或连续降速,达到低速趋近定位点,以减少因运动部件惯性引起的定位误差。最典型的点位控制数控机床有数控钻床、数控坐标镗床、数控点焊机等。

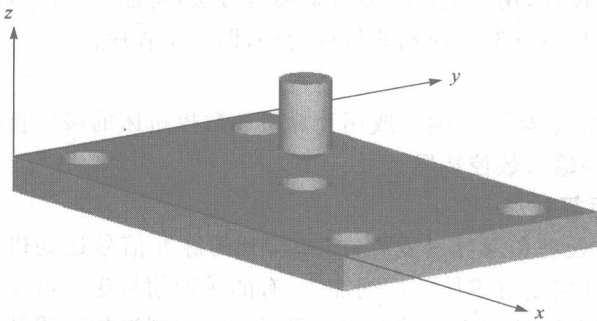


图 1-3 点位控制

2. 直线控制

直线控制的特点是除了控制起点与终点之间的准确位置外,还要求刀具由一点到另一点之间的运动轨迹为一条直线,并能控制移动的速度。因为这类数控机床的刀具在移动过程中要进行切削加工,直线控制系统的刀具切削路径只沿着平行于某一坐标轴方向运动,或者沿着与坐标轴成一定角度的斜线方向进行直线切削加工。采用这类控制系统的机床有数控车床、数控铣床等。图1-4所示为直线控制应用于加工阶梯轴的数控车床。

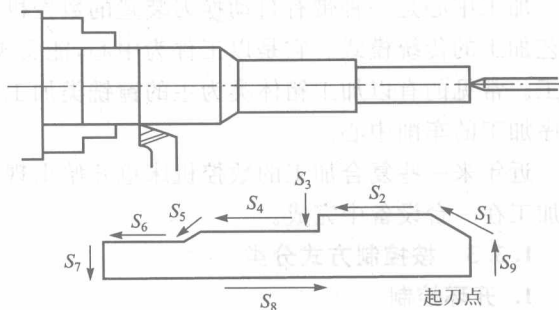


图 1-4 直线控制数控车床加工

3. 轮廓控制

轮廓控制又称连续控制。它的特点是能够对两个或两个以上的坐标方向同时进行连续控制,并能对移动速度进行严格的、不间断的控制。这类数控机床需要控制刀尖整个运动轨迹,使它严格地按加工表面的轮廓形状连续地运动,并在移动时进行切削加工,可以加工任意斜率的直线、圆弧和其他函数关系曲线。采用这类控制系统的机床有数控铣床、数控车床、数控磨床、加工中心及数控绘图机等。

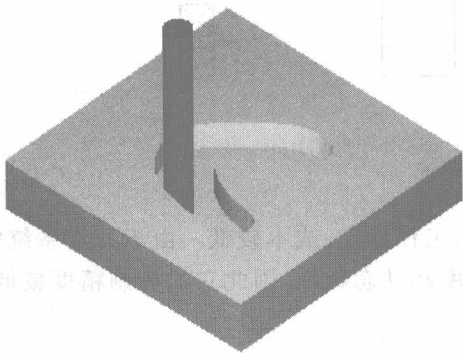


图 1-5 轮廓控制数控机床加工

这类数控机床绝大多数具有两坐标或两坐标以上的联动功能,不仅有刀具半径补偿、刀具长度补偿功能,而且还具有机床轴向运动误差补偿,丝杠、齿轮的间隙补偿等一系列功能。

近年来,随着计算机技术的发展,软件功能不断完善,可以通过计算机插补软件实现多坐标联动的轮廓控制。图1-5所示是轮廓控制数控机床加工示意图。

1.3.2 按工艺用途分类

按工艺用途分类,最常用的数控机床为数控钻床、数控车床、数控铣床、数控镗床、数控磨床和数控齿轮加工机床等金属切削类机床。尽管这些机床在加工工艺方面存在着很大差异,具体的控制方式也各不相同,但它们都适用于单件、小批量和多品种的零件加工,具有很好的加工尺寸的一致性、很高的生产率和自动化程度。除了金属切削加工的数控机床外,数控技术也大量用于冲床、压力机、弯管机、折管机、线切割机床、焊接机、火焰切割机、等离子切割机、激光切割机和高压水切割机等非金属切割机床。近年来在非加工设备中也大量采用数控技术,如数控测量机、自动绘图机、装配机、工业机器人等。

加工中心是一种带有自动换刀装置的数控机床,它的出现突破了一台机床只能进行一种工艺加工的传统模式。它是以工件为中心,能实现工件在一次装夹后自动地完成多种工序的加工。常见的有以加工箱体类为主的镗铣类加工中心和几乎能够完成各种同转体类零件所有工序加工的车削中心。

近年来一些复合加工的数控机床也开始出现,其基本特点是集中多工序、多刀具、复合工艺加工在一台设备中完成。

1.3.3 按控制方式分类

1. 开环控制

开环控制是指不带位置反馈装置的控制方式。由功率步进电动机为驱动器件的运动系统是典型的开环控制。数控装置根据所要求的运动速度和位移量,向环形分配器和功率放大器输出一定频率和数量的脉冲,不断改变步进电动机各相绕组的供电状态,使相应坐标轴的步进电动机转过相应的角位移,再经过机械传动链,实现运动部件的直线移动或转动。运动部件的速度与位移量是由输入脉冲的频率和脉冲数决定的。图 1-6 所示是开环控制系统的示意图。

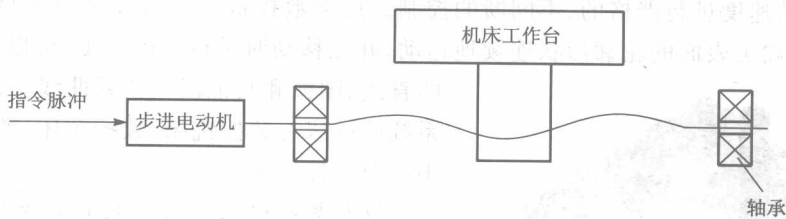


图 1-6 开环控制系统

开环控制系统的特点是系统简单、调试维修方便、工作稳定、成本较低。由于开环系统的精度主要取决于伺服元件和机床传动元件的精度、刚度和动态特性,因此它的控制精度较低。目前在国内用于经济型数控机床以及对旧机床的改造。

2. 闭环控制

闭环控制是在机床最终的运动部件的相应位置直接安装直线或回转式检测装置,将直接测量到的位移或角位移反馈到数控装置的比较器中与输入指令位移量进行比较,用差值控制运动部件,使运动部件严格按实际需要的位移量运动。闭环控制的主要优点是机械传动链的全部环节都包括在闭环之内,因而从理论上说,闭环控制的运动精度主要取决于检测装置的精度,而与机械传动链的误差无关。很明显其控制精度很高,这就为高精度数控机床提供了技术保障。但闭环控制除了价格昂贵之外,而且对机床结构及传动链还提出了严格的要求,传动链的刚度、间隙,导轨的低速运动特性,以及机床结构的抗振性等因素都会增加系统调试的困难,甚至使伺服系统产生振荡,降低了系统的稳定性。图 1-7 所示是闭环控制系统示意图。

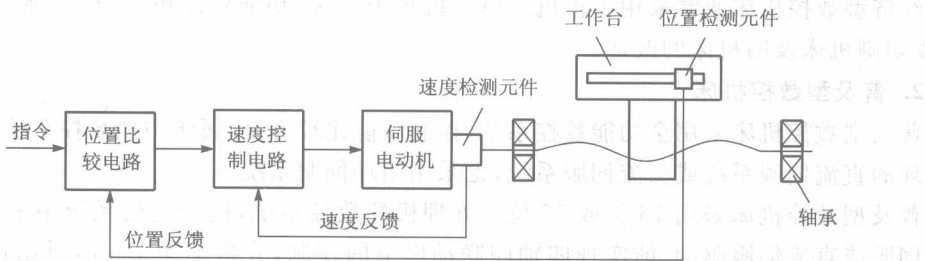


图 1-7 闭环控制系统

3. 半闭环控制

半闭环控制是在开环控制伺服电动机轴上装有角位移检测装置,通过检测伺服电动机的转角间接地检测运动部件的位移(或角位移),然后再反馈给数控装置的比较器,与输入指令进行比较,用差值控制运动部件。随着脉冲编码器的迅速发展和性能的不断改善,作为角位移检测装置可以方便地直接与交流伺服电动机同轴安装,特别是高分辨率的脉冲编码器的诞生,为半闭环控制提供了一种高性能价格比的配置方案。由于惯性较大的机床运动部件不包括在该闭环之内,控制系统的调试十分方便,并具有良好的系统稳定性。甚至可以把脉冲编码器与伺服电动机设计为一个整体,使系统变得更加紧凑,使用起来更为方便。半闭环伺服系统的加工精度显然没有闭环系统高,但是由于采用了高分辨率的测量元件,这种控制方式仍可获得比较满意的精度和速度。系统调试比闭环系统方便、稳定性好,成本也比闭环系统低,是一般数控机床常用的伺服控制系统。图 1-8 所示是半闭环控制系统示意图。

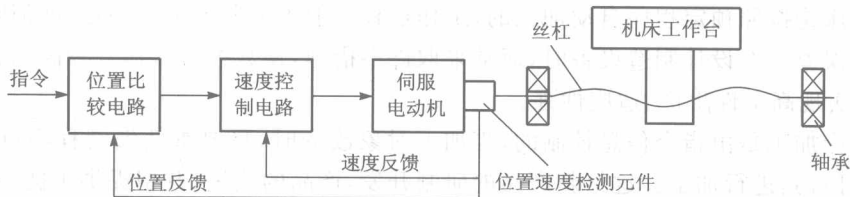


图 1-8 半闭环控制系统

1.3.4 按功能水平分类

按功能水平不同可以把数控机床分为以下几种。

1. 经济型数控机床

经济型数控机床的控制系统比较简单,通常采用以步进电动机为伺服驱动元件的开环控制系统,分辨率为 0.01 mm,进给速度在 8~15 m/min 之间,最多能控制 3 个轴,可实现三轴三联动以下的控制,一般只有简单的 CTR 字符显示或简单数码显示。数控系统多采用 8 位 CPU 制。程序编制方便,操作人员通过控制台上的键盘手动输入指令与数据,或直接进行操

作。经济型数控机床通常采用单板机或单片机数控系统,功能较简单,价格低廉,主要用于车床、线切割机床及旧机床的改造。

2. 普及型数控机床

普及型数控机床采用全功能数控系统,控制功能比较齐全,属于中档数控系统。通常采用半闭环的直流伺服系统或交流伺服系统,也采用闭环伺服系统。

普及型数控机床采用 16 位或 32 位微处理机的数控系统,机床进给系统中采用半闭环的交流伺服或直流伺服驱动,能实现四轴四联动以下的控制,分辨率为 $1\ \mu\text{m}$,进给速度为 $15\sim 20\ \text{m/min}$,有齐全的 CTR 显示,能显示字符、图形和具有人机对话功能,具有 DNC(Direct Numerical Control) 直接数字控制通信接口。

3. 高级型数控机床

高级型数控机床在数控系统中采用 32 位或 16 位微处理机,进给系统中采用高响应特性的伺服驱动,可控制 5 个轴,能实现五轴五联动以上的控制,分辨率为 $0.1\ \mu\text{m}$,进给速度为 $15\sim 100\ \text{m/min}$,能显示三维图形,具有 MAP(Manufacturing Automation Protocol) 制造自动化通信接口和联网功能。

1.4 数控机床加工的特点和应用范围

1. 数控机床加工的特点

数控机床与通用机床和专用机床相比,具有以下主要特点。

(1) 提高加工零件的精度、稳定产品的质量。

数控机床是按照预定程序自动加工的,工作过程一般不需要人工干预,这就消除了操作者人为产生的误差。在设计制造设备时,通常采取许多措施,使数控机床达到较高的精度。

(2) 可实现高柔性生产、适应性强。

数控机床加工是由指令信息控制的,当加工对象改变时,只要重新编制程序,产生新的指令信息,便可对其进行加工。这给新产品的研制开发,产品的改进、改型提供了捷径,同时也适合多品种、小批量零件的加工,利于企业进行激烈的市场竞争。它能完成普通机床难以完成或根本不能加工的复杂零件加工。数控机床的数控系统可实现多坐标联动控制,能加工普通机床很难加工或无法加工的复杂曲线或曲面。

(3) 加工工序相对集中、生产率高。

由于数控机床可采用较大的切削用量,有效地减少了加工中的切削工时;数控机床还具有自动换速、自动换刀和其他辅助操作自动化等功能,并且无需工序间的检测与测量,使时间大为缩短;对于多功能的加工中心,它可实现在一次装夹下进行多工序的连续加工,这样不仅可减少装夹误差,而且还可减少半成品的周转时间。因此与普通机床相比,其生产效率可提高十几倍甚至几十倍。

(4) 减轻工人劳动强度、改善劳动条件。

利用数控机床进行加工,只要按图纸要求编制零件的加工程序清单,然后输入并调试程序,安装坯件进行加工,监督加工过程并装卸零件。这就大大减轻了操作者的劳动强度和紧张程度,减少了对熟练技术工人的需求,劳动条件也得到了相应改善。

(5) 有利于生产管理的现代化。

用数控机床加工零件,能准确地计算产品生产的工时,并有效地简化检验、工夹具和半成品的管理工作;采用数控信息的标准代码输入,有利于与计算机连接,构成由计算机控制和管理的生产系统,从而实现制造和生产管理的现代化。

2. 数控机床的应用范围

随着数控技术的不断发展,数控机床的应用范围也在不断扩大。由于计算机技术的高速发展,计算机的性能日益提高,而价格却不断下调,因而促使数控机床的价格也不断下降。在原来由于价格因素不能采用数控机床的部门,现在也开始大量采用数控机床了。

长期以来人们传统的观念认为数控机床只有用于加工多品种、小批量及结构复杂的零件时才能获得良好的经济效益。然而,目前人们的观念正在发生变化,一些大批量以及结构形状不太复杂的零件,在使用数控机床以后,同样也能获得很好的效益。最典型的大批量生产的汽车工业,目前已普遍使用数控机床和设备进行流水线生产。

正确的观点应该是在进行工艺分析和成本分析的基础上,认真做好综合经济效益的评估和对比,然后决定是否选用带数控系统的机床设备。

尽管如此,数控机床对于加工多品种、中小批量及结构形状复杂的零件,以及那些需要频繁改型的产品零件则更具有选用价值。

1.5 数控技术的现状和发展趋势

1.5.1 数控技术的发展历程

自1952年美国研制出世界上第一台数控升降台铣床,在世界上开创了数控机床发展的先河起,紧随其后,德国、日本和前苏联等国于1956年分别研制出本国第一台数控机床。1958年由清华大学和北京第一机床厂联合研制出了我国第一台数控铣床。20世纪50年代末期,美国的数控机床已进入了商品化生产。

20世纪60年代,日本、德国和英国等国的数控机床也进入了商品化生产。但是,由于20世纪60年代前期数控系统还处于电子管、晶体管时代,系统设备庞大复杂,成本高且可靠性低,所以,数控机床的发展速度相对缓慢,只有美国的生产批量较大。到20世纪60年代末期,美国年产数控机床达到2900多台,占据了当时世界总产量的一半。这个时期的数控机床主要以点位控制为主。据1966年的统计资料记载,当时全世界实际使用的6000台数控机床中,有85%是点位控制的数控钻床。日本在1964年以前生产的数控机床,其中有90%是数控

钻床。

20 世纪 70 年代初期,出现了大规模集成电路和小型计算机,特别是到了 20 世纪 70 年代中期,世界上第一台微处理器研制成功,实现了控制系统体积小、运算速度快、可靠性能高和价格低廉的目标,由此给数控机床的发展注入了新的活力。许多制造厂家投入大量的技术力量,对提高数控机床的主机结构特性、减少热变形及完善配套件质量等关键技术进行研究和改进,使数控机床的总体性能和质量有了很大提高。这一时期数控机床发展较快,全世界数控机床的产量从 1970 年的 6 700 台至 1980 年达到了 49 000 台,平均年增长率为 22%。日本、德国、前苏联和美国等国的平均年增长率分别达到 29.6%、20%、18.2% 和 18.1%。

20 世纪 80 年代以后,数控机床的发展进入了成熟期和普及期。数控系统的微处理器由 16 位向 32 位机过渡,运算速度加快,功能不断完善,可靠性进一步提高。同时监控、检测和换刀等配套技术及外围设备得到广泛应用,促使数控机床得到全面发展。不仅效率、精度和柔性有进一步的提高,而且门类扩展齐全,品种规格形成系列化,除发展较早的数控铣床、数控钻床、数控车床和加工中心外,起步较晚的数控磨床、数控齿轮加工机床、数控电加工机床、数控锻压机床和数控重型机床等领域也得到了较快的发展。这一时期,柔性制造系统(FMS)也进入了实用化阶段,在 FMS 诞生 8 年之后,出现了柔性制造单元(FMC),由于它更能适应市场的需求,很快就超过了 FMS 的发展速度。进入 20 世纪 90 年代,世界范围内以发展数控单机为基础,并加快了向 FMC、FMS 及 CIMS(计算机集成制造系统)全面发展的步伐。归纳起来,数控技术的发展大致经历了以下 4 个阶段,见表 1-1。

表 1-1 数控技术发展的 4 个阶段

阶段 特征	研究开发	推广应用	系统化	高性能集成化
年代	1952—1969	1970—1985	1982	1990
典型应用	数控车床、铣床、钻铣床	加工中心、电加工、锻压	柔性制造单元、柔性制造系统	计算机集成制造系统、无人化工厂
工艺方法	简单工艺	多种工艺方法	完整的加工过程	复合设计加工
数控功能	NC 控制、3 轴以下	CNC 控制、刀具自动交换、五轴联动,友好的人机界面	多台车床和辅助设备协同。多坐标控制,高精度、高速度,友好的人机界面	多过程、多任务调度、模板化和复合化
驱动特点	步进、液压电机	直流伺服电机	交流伺服电机	数字智能化、直线驱动