

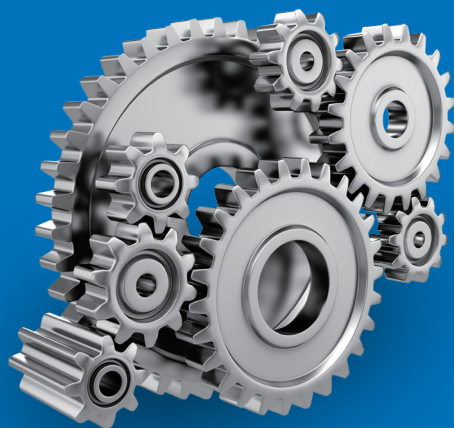
巍巍交大 百年书香
www.jiaodapress.com.cn
bookinfo@sjtu.edu.cn



策划编辑 刘子嘉
责任编辑 胡思佳
封面设计 黄燕美

数控机床 编程与操作

S HUKONG JICHUANG
BIANCHENG YU CAOZUO



数控机床编程与操作

主编 马喆 高帆

上海交通大学出版社

X-A



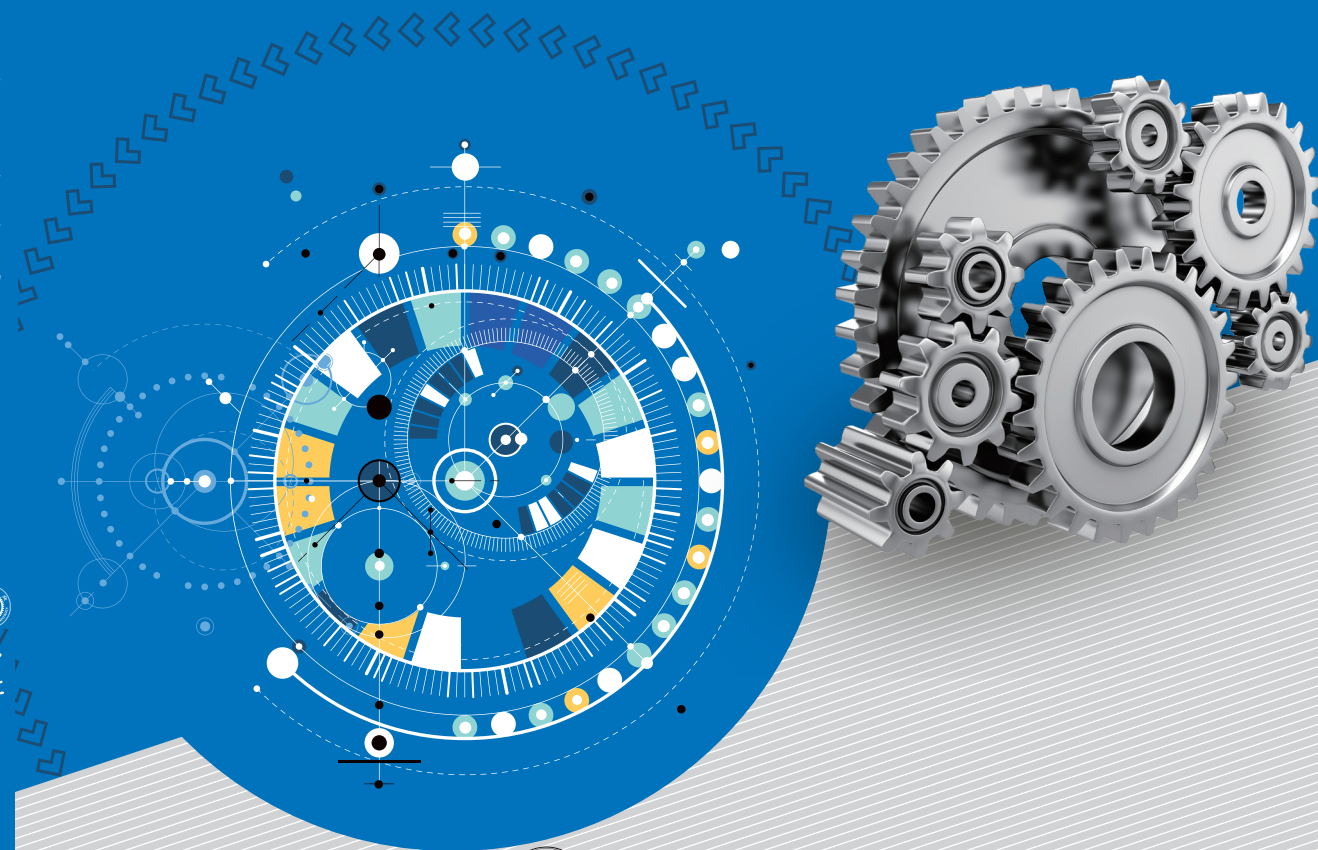
“十四五”职业教育国家规划教材



“十四五”职业教育河南省规划教材

数控机床 编程与操作

主编 马喆 高帆
主审 朱强 肖彦臣



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

免费提供

*** 精品教学资料包

服务热线: 400-615-1233
www.huatengzy.com



扫描二维码
关注上海交通大学出版社
官方微信

ISBN 978-7-313-25458-0



9 787313 254580 >

定价: 38.00元



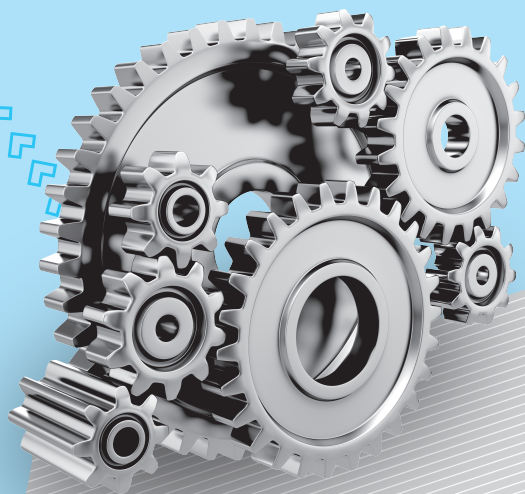
“十四五” 职业教育国家规划教材



“十四五” 职业教育河南省规划教材

数控机床 编程与操作

主 编 马 喆 高 帆
副主编 翟 磊 柴向峰 蒋丽丽
主 审 朱 强 肖彦臣



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书共四章,第一章为数控机床概述,第二章为数控加工基础,第三章为数控车床编程与操作,第四章为数控铣床/加工中心编程与操作。全书内容编排由浅入深,由易到难,有利于学生循序渐进地掌握数控加工技术的要点。

本书可作为中等职业学校机械相关专业的教材,也可供机械、数控等相关行业从业人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

数控机床编程与操作 / 马喆, 高帆主编. — 上海:
上海交通大学出版社, 2021. 9(2023. 8 重印)

ISBN 978-7-313-25458-0

I. ①数… II. ①马… ②高… III. ①数控机床—程
序设计—中等专业学校—教材 ②数控机床—操作—中等专
业学校—教材 IV. ①TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2021)第 189792 号

数控机床编程与操作

SHUKONG JICHUANG BIANCHENG YU CAOZUO

主 编:马 喆 高 帆

出版发行:上海交通大学出版社

邮政编码:200030

印 制:三河市龙大印装有限公司

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

字 数:240 千字

版 次:2021 年 9 月第 1 版

书 号:ISBN 978-7-313-25458-0

定 价:38.00 元

地 址:上海市番禺路 951 号

电 话:021-64071208

经 销:全国新华书店

印 张:11.5

印 次:2023 年 8 月第 2 次印刷

版权所有 侵权必究

告读者:如您发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话:0316-3655788



前言

Preface

为了贯彻落实党的二十大精神,增强“四个意识”、坚定“四个自信”、做到“两个维护”,全面推进习近平新时代中国特色社会主义思想 and 党的二十大精神融入教材,本书根据教育部中等职业学校数控技术应用专业领域技能型紧缺人才培养培训指导方案的要求和数控加工的国家职业技能鉴定标准,结合长期教学改革实践编写而成。针对中等职业教育“突出实际技能操作培养”的要求,考虑中等职业教育“教学做一体化”的特点,在编写本书时编者注重突出以下特色:

(1)体现以素质为基础、以就业为导向、以能力为本位、以学生为主体的课程改革指导思想。

(2)淡化理论,强化应用,使理论内容为操作技能服务,突出中等职业教育的特色。

(3)形式新颖多样、生动活泼,内容由浅入深、系统衔接,语言通俗易懂、简洁明了。

(4)大量采用视觉信息,图文并茂,直观清楚。

(5)每章配备综合练习题,以帮助读者巩固、强化所学知识与技能。

(6)采用技术先进、占市场份额较大的 FANUC 0i 数控系统编程。

本书共四章,内容包括数控机床概述、数控加工基础、数控车床编程与操作、数控铣床/加工中心编程与操作。

本书由安阳市中等职业技术学校马喆、高帆任主编,翟磊、柴向峰、蒋丽丽任副主编,孔艳莉、李效利、谷子平、杨海亮参编,由朱强、肖彦臣担任本书的主审。

本书在编写时参阅了国内出版的相关教材,在此对有关作者表示衷心的感谢。由于编者水平有限,书中难免存在疏漏之处,敬请读者批评指正。



Contents

第一章	数控机床概述	1
	第一节 数控机床的产生与发展	2
	一、数控机床的产生	2
	二、数控机床的发展	2
	第二节 数控机床的加工特点、技术指标与工作原理	6
	一、加工特点	6
	二、主要技术指标	7
	三、工作原理	9
	第三节 数控机床的分类	12
	一、按工艺用途分类	12
	二、按进刀与工件相对运动的方式分类	13
	三、按可控制联动的坐标轴分类	14
	四、按数控装置的类型分类	16
	五、按控制方式分类	16
	六、按加工方式分类	18
	七、按功能水平分类	18
	第四节 典型数控机床	19
	一、数控铣床	19
	二、数控车床	20
	第五节 数控加工常用刀具	22
	一、数控加工常用刀具的类型	22
	二、数控加工刀具的特点	24
	第六节 数控加工常用工具	25
	一、钻夹头	25
	二、刀柄、弹簧夹头与拉钉	26
	三、对刀工具	27



四、卸刀座	28
第七节 数控加工常用夹具	28
一、通用夹具	29
二、专用夹具	31
三、可调夹具	31
四、组合夹具	31
第八节 数控加工常用量具	32
一、钢直尺	32
二、游标卡尺	32
三、外径千分尺	34
四、内径千分尺	35
五、万能游标角度尺	36
六、表面粗糙度工艺样板	36
七、螺纹检测量具	36
第二章 数控加工基础	38
第一节 数控编程概述	39
一、数控编程的步骤及内容	39
二、数控编程的方法	40
第二节 数控加工工艺内容的拟定	41
一、数控加工工艺设计的主要内容	42
二、数控加工工艺路线分析	45
第三节 数控机床坐标系	50
一、数控机床坐标系相关规定	50
二、坐标轴方向的确定	51
三、机床原点与机床参考点	52
四、工件坐标系	53
五、绝对坐标系与相对坐标系	54
第四节 数控加工程序的基本格式	55
一、数控加工程序的组成	55
二、主程序和子程序	57
第五节 数控加工工艺技术文件的编制	57
一、加工工序卡的编制	57
二、刀具卡的编制	58
三、加工程序单的编制	58



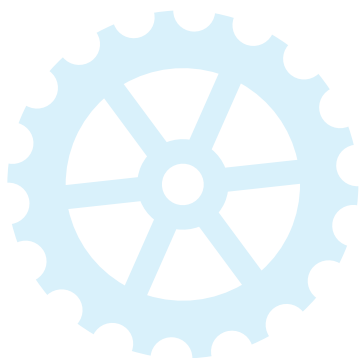
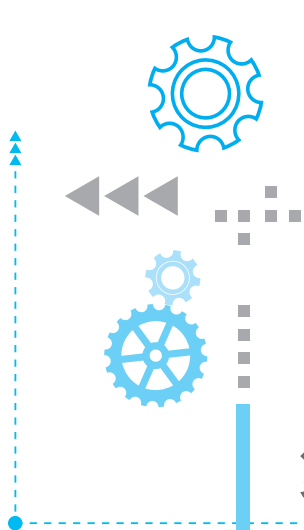
第三章	数控车床编程与操作	60
	第一节 数控车床的基本操作	61
	一、数控车床操作面板的名称及功能	61
	二、常用基本操作	62
	第二节 数控编程指令	69
	一、数控系统常用辅助功能 M 指令	69
	二、F、S、T 功能指令	70
	三、FANUC 0i Mate-TC 数控系统 G 指令	71
	第三节 典型数控车床编程与加工实例	85
	一、简单轴类工件加工	85
	二、锥面轴类工件加工	88
	三、圆弧工件加工	90
	四、复杂轴类工件加工	93
	第四节 安全文明生产与安全操作	96
	一、安全文明生产	96
	二、安全操作规程	97
	三、安全操作注意事项	97
	四、车床的清洁与保养	98
第四章	数控铣床/加工中心编程与操作	102
	第一节 数控铣床/加工中心编程指令	103
	一、数控铣床/加工中心辅助功能指令	103
	二、数控铣床/加工中心准备功能 G 指令	104
	第二节 典型零件的数控铣削编程与加工实例	135
	一、外轮廓零件(凸台)加工	135
	二、内轮廓零件加工	140
	三、型腔零件加工	143
	第三节 FANUC 0i 系统数控铣床的基本操作	150
	一、认识数控铣床的控制面板	150
	二、数控铣床的基本操作方法	155



第四节 数控铣削实训	160
一、认识数控铣床和加工中心	160
二、平面轮廓类零件铣削加工	163
三、挖槽类零件铣削加工	164
四、铣削综合练习	166
第五节 数控铣床安全操作规程	168
一、开机前的检查	168
二、操作过程中的要求	169
三、关机步骤	169
四、安全操作守则	170

参考文献

175



第 一 章

数控机床概述

机械制造业是国民经济的支柱产业,其现代化程度决定了国家的发展步伐,而数控技术和数控装备是机械制造业现代化的重要基础。数控机床具有高效率、高精度、高柔性等特点,在机械制造业中的应用越来越广泛。因此,加深对数控机床的结构和工作原理的了解是进行现代化生产实践的坚实基础。





第一节

数控机床的产生与发展

一、数控机床的产生

在机械制造业中,并不是所有的产品零件都具有很大的批量,单件与小批量生产的零件(批量为 10~100 件)约占机械加工总量的 80%以上,尤其是在造船、航天航空、机床、重型机械以及国防工业等方面更是如此。

为了满足多品种、小批量的自动化生产,迫切需要一种灵活的、通用的、能够适应产品频繁变化的柔性自动化机床。数控机床就是在这样的背景下诞生与发展起来的。它为单件、小批量生产的精密复杂零件提供了自动化加工手段。

国家标准《工业自动化系统 机床数值控制 词汇》(GB/T 8129—2015)规定:

(1)数值控制,即用数值数据的控制装置(简称数控装置),在运行过程中,不断地引入数值数据,从而对某一生产过程实现自动控制,简称数控(numerical control,NC)。

(2)计算机数值控制,即用计算机控制加工功能,实现数值控制,简称计算机数控(computerized numerical control,CNC)。

数控机床即采用了数控技术的机床,或者说装备了数控系统的机床。从应用来说,数控机床就是将加工过程所需的各种操作(如主轴变速、松夹工件、进刀与退刀、开车与停车、选择刀具、供给切削液等)和步骤,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,通过控制介质将数字信息输入专用的或通用的计算机,计算机对输入的信息进行处理与运算后输出各种指令来控制机床的伺服系统或其他执行元件,使机床自动加工出所需要的零件。

二、数控机床的发展

1. 数控系统的发展

从 1952 年第一台数控机床问世后,数控系统已先后经历了两个阶段共六代的发展,所谓六代是指电子管、晶体管、集成电路、小型计算机、微处理器和基于工控 PC 机的通用 CNC 系统。其中,前三代为第一阶段,称为硬件连接数控,即 NC 系统;后三代为第二阶段,称为计算机软件数控,即 CNC 系统。

2. 数控机床的应用范围

数控机床有一般机床所不具备的许多优点,其应用范围正在不断扩大,但它并不能完全代替普通机床,也还不能以最经济的方式解决机械加工中的所有问题。

数控机床最适合加工具有以下特点的零件。

- (1)多品种、中小批量生产的零件。
- (2)形状结构比较复杂的零件。
- (3)需要频繁改型的零件。



(4)价值昂贵、不允许报废的关键零件。

(5)设计制造周期短的急需零件。

(6)批量较大、精度要求较高的零件。

根据国外数控机床的应用实践,数控加工的适用范围可用图 1-1 粗略表示。

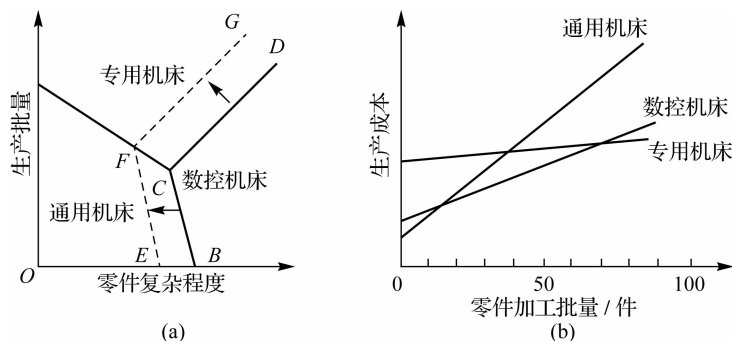


图 1-1 数控加工的适用范围

图 1-1(a)所示为随零件复杂程度和生产批量的不同,3 种机床的应用范围的变化。当零件不太复杂,生产批量又较小时,宜采用通用机床;当生产批量很大时,宜采用专用机床;而随着零件复杂程度的提高,数控机床越加适用。目前,随着数控机床的普及,数控加工的应用范围正由 BCD 线向 EFG 线复杂性较低的范围扩大。

图 1-1(b)所示为通用机床、专用机床和数控机床零件加工批量与生产成本的关系。从图中看出,在多品种、中小批量生产情况下,采用数控机床生产成本更为合理。

3. 数控机床的发展趋势

目前,数控机床已朝着高柔性化、高精度化、高速化、复合化、制造系统自动化方向发展。

1) 高柔性化

柔性是数控机床最主要的特点,也是数控机床的各种发展趋势中体现在所有新开发技术中的主导思想。

柔性是指机床适应加工对象变化的能力。传统的自动化设备和生产线是机械或刚性连接和控制的,因此当被加工对象变化时调整困难甚至无法调整,有时只得全部更新、更换。数控机床的出现,开创了柔性自动化加工的新纪元,对于加工对象的变化已具有很强的适应能力。目前,在进一步提高单机柔性化的同时,正努力向单元柔性化和系统柔性化发展。柔性制造单元(flexible manufacturing cell, FMC)和柔性制造系统(flexible manufacturing system, FMS)发展迅速。美国 FMC 安装的平均增长率达到 72.85%,日本 FMS 安装的平均增长率为 24.26%。

近年来,不仅中、小批量的生产方式在努力提高柔性化能力,而且大批量的生产方式也在积极向柔性化方向转向。如出现了可编程控制器(programmable logical controller, PLC)控制的可调组合机床、数控多轴加工中心、换刀换箱式加工中心、数控三坐标动力单元等具有柔性的高效加工设备和介于传统自动线与 FMS 之间的可调组合自动线(flexible transfer line, FTL)。



2)高精度化

高精度化一直是数控机床技术发展追求的目标。数控机床的精度包括机床制造的几何精度和机床使用的加工精度两方面。从 1950 年至 2000 年的 50 年内,普通精度加工由 0.3 mm 提升至 0.003 mm,精密加工由 3 μm 提升至 0.03 μm ,超精密加工则由 0.3 μm 提升至 0.003 μm ,机床的加工精度提高了两个数量级,平均每 8 年提高约 1 倍的精度。

提高数控机床的加工精度,一般是通过减小数控系统误差、提高数控机床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。在减小数控系统误差方面,通常采用提高数控系统分辨率、使 CNC 控制单元精细化、提高位置检测精度,以及在位置伺服系统中为改善伺服系统的响应特性采用前馈与非线性控制等方法。在采用补偿技术方面,采用齿隙补偿、丝杠螺母误差补偿及热变形误差补偿技术等。通过上述措施,机床的加工精度得以提升。

3)高速度化

提高生产率是机床技术发展追求的基本目标之一。实现这个目标的最主要、最直接的方法就是提高切削速度和减少辅助时间。

提高主轴转速是提高切削速度的最有效方法。数控机床的主轴转速和功率的大幅度提高为高速切削提供了良好的条件。在不同的年代,随着切削方法和被加工材料的不同,高速切削的界限的数值也不尽相同。例如,在实际生产中车、铣 45 号钢,1950 年的切削速度为 80~100 m/min,而 2000 年的切削速度已经达到 500~600 m/min,50 年内切削速度提高了 5 倍左右。

对现有数控机床的使用情况统计显示,数控机床有效切削时间仅占全部工时的(机床利用率)25%~35%,其余的 65%~75%均是消耗在机床调整、程序运行检查、空行程、启停空运转、工件上下料和装夹等上的辅助时间、待加工时间(由于技术准备和调度不及时引起的非工作时间)及故障停机时间。因此,需通过提高各轴快速移动速度和加速度、主轴变速的角加速度、刀具(工件)自动交换速度,改善数控系统的操作方便性和监控功能,以及加强信息管理来全面压缩辅助时间和待加工时间,使数控机床的利用率达到60%~80%。

表 1-1 列出了中型立、卧式加工中心的主要工作参数的发展过程,显示了数控机床向全面高速化发展的趋势。

表 1-1 中型立、卧式加工中心的主要工作参数的发展过程

速度指标	20 世纪 80 年代	20 世纪 90 年代前期	20 世纪 90 年代后期	21 世纪初	2010 年至今
主轴最高转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	4 000~6 000	8 000~12 000	12 000~18 000	18 000~24 000	30 000~42 000
静止至最高转速的启动时间/s	3	2	1.5	1.0~1.2	≤ 1
最高进给速度/($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	5 000~10 000	10 000~20 000	20 000~30 000	30 000~50 000	40 000~60 000
快移速度/($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	12~24	20~32	40~80	60~120	80~160
加(减)速度	0.3g	0.5g	1.0g~1.2g	1.5g~2.0g	$\geq 3g$
直接换刀时间/s	6~8	4.5~6.0	4~5	3~4	2~3
机械手换刀时间/s	3.5~5.0	2~3	1.5~2.0	0.8~1.2	0.6~1.0

注:中型加工中心规格为工作台宽度 400~630 mm,主轴锥孔 ISO40 或 HSK63,材料切除率 $\geq 200 \text{ cm}^3/\text{min}$ (45 号钢),刀具最大重量 $\leq 10 \text{ kg}$ 。



4) 复合化

复合化包括工序复合化和功能复合化。数控机床的发展也模糊了粗、精加工工序的概念。加工中心(包括车削中心、磨削中心、电加工中心等)的出现又把车、铣、镗、钻等类的工序集中到一台机床来完成,打破了传统的工序界限和分开加工的工艺规程。一台具有自动换刀装置、自动交换工作台和自动转换立卧主轴头的镗铣加工中心,不仅一次装夹便可以完成镗、铣、钻、铰、攻螺纹和检验等工序,而且可以完成箱体件 5 个面的粗、精加工的全部工序。

复合机床可以在一台机床上实现或尽可能完成从毛坯至成品的全部加工。复合机床根据结构特点分为以下两类:

(1) 功能复合型机床。功能复合型机床为跨加工类别的复合机床,如车铣中心,车铣镗型多用途制造中心,激光铣削加工机床,车铣磨复合机床,冲孔、成型与激光切割复合机床,金属烧结与镜面切削复合机床、等离子加工与冲压复合机床等。其复合含义为加工方法和工艺的复合。

(2) 工序复合型机床。工序复合型机床应用切具(铣头)自动交换装置、主轴立卧式转换头、双摆铣头、多主轴头和多回转刀架等配置增加工件在一次安装下的加工工序数,如多面多轴联动加工的复合机床和主副双主轴车削中心等。

增加数控机床的复合加工功能将进一步提高其工序集中度,不仅可以减少多工序加工零件的上下料时间,而且可避免零件在不同机床上进行工序转换而增加的工序间输送和等待时间。复合数控机床具有良好的工艺适应性,避免了在制品的储存和传输等环节上的工时浪费,提高了加工效率。

5) 制造系统自动化

自 20 世纪 80 年代中期以来,以数控机床为主体的加工自动化已从“点”(单台数控机床)发展到“线”(FMS、FTL)和“面”(柔性制造车间)的自动化,结合信息管理系统的自动化,逐步形成整个工厂“体”的自动化。在国外已出现工厂自动化和计算机集成制造(computer-integrated manufacturing, CIM)的雏形实体。尽管这种高自动化的技术还不够完备,有投资过大、回收期较长等缺陷,但数控机床的高自动化及向 FMC、FMS 集成方向发展的趋势,仍是机械制造业发展的主流。

制造系统的自动化除了进一步提高其自动编程、自动换刀、自动上料下料、自动加工等自动化程度外,在自动检测、自动监控、自动诊断、自动对刀、自动传输、自动调度、自动管理等方面也得到进一步发展,同时也提高了其标准化和适应能力,达到“无人化”管理正常生产的目标。

4. 国内数控机床发展现状概述

国内的数控机床近几年发展十分迅速,各种各样的数控加工机床如雨后春笋般被不断被研发。低端机床的研制量很大,但是对于高端机床设备的研发却始终依靠引进与复制模式。总体上对国外技术依赖性太强,缺乏独立的高端机床知识产权。

国内机床行业——一直肩负着研制高端数控机床,支撑国内重点项目与军品项目的建设。国产 XN2D2415 五轴机床,综合传统机床与并联机床各自的特点,技术革新方面也开了一个



先河。拥有自己的安全可靠的控制系统,能很好地实现人机互动,较高精度的实现五轴联动。并且,机床的作业范围很广,实用性很强。国内铣床也实现了五轴联动技术,采用刀具内冷却与应力控制等高新技术。可用于潜艇涡轮,复杂型腔模具与天、军工等高难度、高质量要求的加工。国内柔性制造系统也有了长足发展,采用模拟加工与实际加工想结合方式,不仅能够提高加工质量与效率,还大大降低了加工的成本与周期。

近几年我国的机床行业产值早已突破千亿,特别是技术加工机床,占总产值的三分之一左右。中国继日、德、意成为第四大机床销售国。

第二节

数控机床的加工特点、技术指标与工作原理

一、加工特点

(一)优点

1. 对加工对象改型的适应性强

在数控机床上改变加工零件时,只需要重新编制程序,更换新的控制介质或者手动输入程序就能实现对零件的加工,它不同于传统的机床,不需要制造、更换许多工具、夹具和模具,更不需要重新调整机床,因此,数控机床可以快速地加工一种零件转变为加工另一种零件,这为单件、小批量以及试制新产品提供了极大的便利。

2. 加工精度高

数控机床是按数字形式给出的指令进行加工的,因此,数控机床能达到比较高的加工精度。对于中、小型数控机床,定位精度普遍可达到 0.03 mm,重复定位精度为 0.01 mm。此外,数控机床的传动系统与机床结构都具有很高的刚度、热稳定性和制造精度,特别是数控机床的自动加工方式避免了生产者的人为操作误差,同一批加工零件的尺寸一致性好,产品合格率高,加工质量十分稳定。

3. 加工生产率高

零件加工所需要的时间包括机动时间与辅助时间两部分。减少机床辅助时间,提高机床的效率,通常采取如下措施:

(1)缩短换刀时间,现在数控机床的换刀时间最短仅为 0.5 s。

(2)研制新的刀库和换刀机械手,使选刀动作与机动时间重合,或使用全机械式换刀机械手,以保证换刀快速可靠。

(3)使用各种形式的交换工作台,使装卸工件的时间与机动时间重合,同时缩短工作台的交换时间。

(4)广泛采用脱机编程、图形模拟等技术,实现后台输入、修改、编辑程序,前台加工,缩短新的加工程序在机调试时间。



(5)采用快换夹具、刀具装置,采取对工件原点快速定位等措施,缩短机床调整时间。

数控机床的加工精度比较稳定,在控制介质校验完成以及刀具完好的情况下,一般只做首件检验或工序间关键尺寸的抽样检验,故而可以减少停机检验的时间。数控机床的利用系数比一般机床高得多。

在使用带有刀库和自动换刀装置的数控加工中心时,在一台机床上实现了多道工序的连续加工,减少了半成品的周转时间,生产效率的提高就更为明显。

4. 操作者的劳动强度低

数控机床对零件的加工是按事先编好的程序自动完成的,操作者除了安放控制介质或操作键盘、装卸零件、进行关键工序的中间测量及观察机床的运行之外,不需要进行繁重的重复性手工操作,劳动强度与紧张程度均可大为减轻,劳动条件也得到相应的改善。

5. 经济效益良好

使用数控机床加工零件时,分摊在每个零件上的设备费用是较昂贵的。但在单件、小批量生产的情况下,可以节省许多其他方面的费用,因此能够获得良好的经济效益。

使用数控机床,在加工之前节省了划线工时,在零件安装到机床上之后可以减少调整、加工和检验时间,减少了直接生产费用。另外,由于数控机床加工零件不需要手工制作模型、凸轮、钻模板及其他工、夹具,因而节省了工艺装备费用,并且数控机床的加工精度稳定,减少了废品率,使生产成本进一步下降。

6. 有利于生产管理的现代化

用数控机床加工零件,能准确地计算零件的加工工时,并有效地简化检验和工、夹具及半成品的管理工作,这些特点都有利于实现生产管理现代化。

7. 易于建立计算机通信网络

数控机床使用数字信息,因此它易于与计算机建立通信网络,便于与计算机辅助设计系统连接,而形成计算机辅助设计与制造紧密结合的一体化系统。

(二)缺点

1. 价格较高

数控机床是以数控系统为代表的新技术对传统机械制造产业渗透而形成的机电一体化产品,它涉及机械、信息处理、自动控制、伺服驱动、自动检测、软件技术等许多领域,尤其是采用了许多高、新、尖的先进技术,这使得数控机床的整体价格较高。

2. 调试和维修较复杂,需专门的技术人员

数控机床结构复杂,调试与维修人员应经过专门的技术培训,如此才能胜任此项工作。

二、主要技术指标

1. 主要规格尺寸

数控车床的主要规格尺寸有床身与刀架最大回转直径、最大车削长度、最大车削直径



等;数控铣床的主要规格尺寸有工作台、工作台 T 形槽、工作台行程等的尺寸。

2. 主轴系统

数控机床主轴采用直流或交流电动机驱动,具有较宽的调速范围和较高的回转精度,主轴本身刚度与抗振性比较好。现在数控机床主轴普遍达到 5 000~10 000 r/min 甚至更高的转速,对提高加工质量和各种小孔加工极为有利。主轴转速可以通过操作面板上的转速倍率开关直接调整,每挡间隔 5%,其调节范围为 50%~120%。在加工端面时主轴具有恒定切削速度。

3. 进给系统

该系统有进给速度范围、快进(空行程)速度范围、运动分辨率(最小移动增量,又称脉冲当量)、定位精度和螺距范围等主要技术参数。

1) 进给速度范围

进给速度是影响加工质量、生产效率和刀具寿命的主要因素,其范围直接受数控装置运算速度、机床动特性和工艺系统刚度限制。数控机床的进给速度范围一般为 10~30 m/min,其中最大进给速度为加工的最大速度(注意区分最大快进速度为不加工时移动的最快速度)。进给速度可通过操作面板上的进给倍率开关调整,每挡间隔为 10%,其调节范围为 10%~200%。

2) 脉冲当量

脉冲当量是数控机床的重要精度指标,包括两方面的内容:一是机床坐标轴可达到的控制精度(可以控制的最小位移增量),表示数控机床每发出一个脉冲时坐标轴移动的距离,称为实际脉冲当量或外部脉冲当量;二是内部运算的最小单位,称为内部脉冲当量。一般内部脉冲当量比实际脉冲当量设置得要小,为的是在运算过程中不损失精度。数控系统在输出位移量之前,自动将内部脉冲当量转换成外部脉冲当量。

实际脉冲当量取决于丝杠螺距、电动机每转脉冲数和机械传动链的传动比,其计算公式为

$$\text{实际脉冲当量} = \text{传动比} \times \frac{\text{丝杠螺距}}{\text{电动机每转脉冲数}}$$

数控机床的加工精度和表面质量取决于脉冲当量数的大小。普通数控机床的脉冲当量一般为 0.001 mm,简易数控机床的脉冲当量一般为 0.01 mm,精密或超精密数控机床的脉冲当量一般为 0.000 1 mm。脉冲当量越小,数控机床的加工精度和表面质量越高。

4. 定位精度和重复定位精度

定位精度是指数控机床工作台或其他运动部位实际运动位置与指令位置的一致程度,其不一致的差量即为定位误差。引起定位误差的因素包括伺服系统、检测系统、进给系统误差,以及运动部件如导轨的几何误差等。定位误差直接影响加工零件的尺寸精度。

重复定位精度是指在相同的操作方法和条件下,完成规定操作次数过程中得到结果的一致程度。重复定位精度一般是呈正态分布的偶然性误差,它会影响批量加工零件的一致性,是一项非常重要的性能指标。



一般数控机床的定位精度为 $\pm 0.01\text{ mm}$,重复定位精度为 $\pm 0.005\text{ mm}$ 。

5. 刀具系统

数控车床刀具系统技术指标包括刀架工位数、工具孔直径、刀杆尺寸、换刀时间、重复定位精度等各项内容。加工中心刀库容量与换刀时间直接影响其生产率,通常中小型加工中心的刀库容量为16~60把,大型加工中心的可达100把以上。换刀时间是指自动换刀系统将主轴上的刀具与刀库刀具进行交换所需要的时间。换刀一般可在0.5~20 s内完成。

6. 电气系统

电气系统技术指标包括主电动机、伺服电动机的规格型号和功率等。

7. 冷却系统

冷却系统技术指标包括冷却箱容量、冷却泵输出量等。

8. 外形尺寸

外形尺寸表示为长 $\times$ 宽 $\times$ 高。

三、工作原理

数控机床由控制介质、人机交互设备、计算机数控(CNC)装置、进给伺服驱动系统、主轴驱动系统、辅助控制装置、可编程控制器(PLC)、反馈系统和自适应控制系统等部分组成,如图1-2所示。

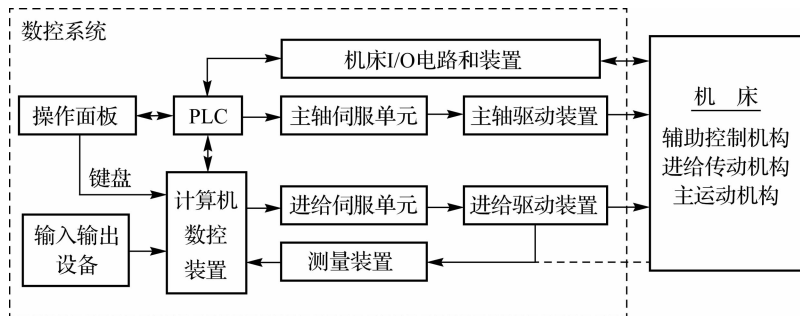


图 1-2 数控机床的组成

1. 控制介质

要对数控机床进行控制,就必须在人与数控机床之间建立某种联系,这种联系的中间媒介物就是控制介质,又称信息载体。在使用数控机床之前,先要根据零件图上规定的尺寸、形状和技术条件编出工件的加工程序,将加工工件时刀具相对于工件的位置和机床的全部动作顺序按照规定的格式和代码记录在信息载体上。当需要在数控机床上加工该工件时,就把信息载体上存放的信息(即零件加工程序)输入计算机数控装置。目前主要的信息载体有磁盘、U盘、移动硬盘等。早期使用的穿孔纸带、磁带等,现已基本淘汰。数控加工程序还可直接通过数控系统操作键盘手动输入存储器,或通过RS-232C、DNC接口输入。



2. 人机交互设备

在数控机床加工运行中,通常都需要操作人员对数控系统进行状态干预和程序输入,并对输入的加工程序进行编辑、修改和调试,同时数控系统要显示数控机床的运行状态等,也就是说数控机床要具有人机联系的功能。具有人机联系功能的设备统称为人机交互设备。

键盘和显示器(见图 1-3)是数控系统不可缺少的人机交互设备,操作人员可通过键盘和显示器输入简单的加工程序、编辑修改程序和发送操作命令,即进行手工数据输入(manual data input, MDI)。简单的显示器是由若干个数码管构成的,能显示的信息有限;高级的数控系统一般都配有 CRT 显示器或点阵式液晶显示器,显示信息丰富。低档 CRT 显示器或液晶显示器只能显示字符,高档 CRT 显示器还能显示加工轨迹图形。



图 1-3 键盘和显示器

3. 计算机数控装置

计算机数控装置是数控机床的中枢,目前,绝大部分数控机床采用微型计算机控制。计算机数控装置由硬件和软件组成。没有软件,计算机数控装置就无法工作;没有硬件,软件就无法运行。计算机数控装置由运算器、控制器(运算器和控制器构成 CPU)、存储器、输入接口、输出接口等组成。

输入接口接收由控制介质输入设备输入的代码信息,经过识别与译码之后送到指定存储区,作为控制与运算的原始数据。简单的加工程序可用手动数据输入方式(MDI)输入,即在键盘控制程序的控制下,操作人员直接通过键盘把工件加工程序输入存储器。

4. 进给伺服驱动系统

进给伺服驱动系统的作用是把来自 CNC 装置的位置控制移动指令转变成机床工作部件的运动,使工作台按规定轨迹移动或精确定位,加工出符合图样要求的零件。因为进给伺服驱动系统是 CNC 装置和机床本体之间的联系环节,所以它必须把 CNC 装置送来的微弱指令信号放大成能驱动伺服电动机的大功率信号。

5. 主轴驱动系统

机床的主轴驱动系统和进给伺服驱动系统差别很大,机床主轴的运动是旋转运动,机床



进给运动主要是直线运动。早期的数控机床一般采用三相感应式同步电动机配上多级变速箱作为主轴驱动的主要方式。现代数控机床对主轴驱动系统提出了更高的要求,要求主轴具有很高的转速和很宽的无级调速范围,能实现正反方向的转动和加减速,主传动电动机能输出大的功率,主轴结构简单。

为了使数控车床进行螺纹车削加工,要求主轴和进给驱动实现同步控制,还要求主轴能实现正反方向和加速、减速控制;在加工中心上为了保证每次自动换刀时刀柄上的键槽对准主轴上的端面键,以及精镗孔后退刀时不会划伤已加工表面,要求主轴能进行高精度的准停控制;为了保证端面加工质量,要求主轴具有恒线速度切削功能;有的数控机床还要求具有角度分度控制功能。现代数控机床绝大部分采用交流主轴驱动系统,由可编程控制器进行控制。

6. 辅助控制装置

辅助控制装置包括刀库的转位换刀控制电路,液压泵、冷却泵等的控制接口电路,含有换向阀电磁铁、接触器等强电电气元件的电路。现代数控机床可采用可编程控制器进行控制,因此辅助装置的控制电路变得十分简单。

7. 可编程控制器

可编程控制器的作用是对数控机床进行辅助控制,其作用是把计算机送来的辅助控制指令转换成强电信号,用来控制数控机床的顺序动作、定时计数、主轴电动机的启动和停止、主轴转速调整、冷却泵启停以及转位换刀等动作。可编程控制器本身可以接收实时控制信息,与数控装置共同完成对数控机床的控制。

数控机床上使用的 PLC 可以分成两类:一类是 CNC 产品厂家为实现数控机床的顺序动作控制,而将 CNC 产品和 PLC 综合起来设计成的内装型 PLC,内装型 PLC 是 CNC 装置的一部分;另一类是独立专业化的 PLC 生产厂家的产品,用于实现数控机床的顺序控制功能,称为独立型 PLC。

8. 反馈系统

反馈系统包括位置反馈系统与速度反馈系统等,它们的作用是通过测量装置将机床移动的实际位置、速度参数检测出来,转换成电信号,并反馈到 CNC 装置中,使 CNC 装置能随时判断机床的实际位置、速度是否与指令一致,并发出相应指令,纠正所产生的误差。测量装置安装在数控机床的工作台或丝杠上,相当于普通机床的刻度盘和人的眼睛。

9. 自适应控制系统

数控机床工作台的位移量和速度等过程参数可在编写程序时用指令确定,但是有一些因素在编写程序时无法预测,如加工材料力学特性的变化引起的切削力变化、加工现场的温度变化等,这些随机变化的因素也会影响数控机床的加工精度和生产效率。自适应控制系统的职责,就是把加工过程中的温度、转矩、振动、摩擦、切削力等因素的变化与最佳参数比较,一旦有误差就及时补偿,以期提高加工精度或生产效率。目前自适应控制系统仅用于生产效率和加工精度要求高的数控机床,在一般数控机床上很少采用。



10. 机床本体

数控机床本体由床身、立柱和工作台等大件组成,是数控机床的基础结构。由于数控机床是高精度和高生产效率的自动化加工机床,与普通机床相比,应具有更好的抗振性和刚度,要求相对运动面的摩擦因数要小,进给传动部分之间的间隙要小,因而其设计要求比普通机床更严格,加工制造要求更精密,并要采用加强刚性、减小热变形、提高精度的设计措施。

第三节

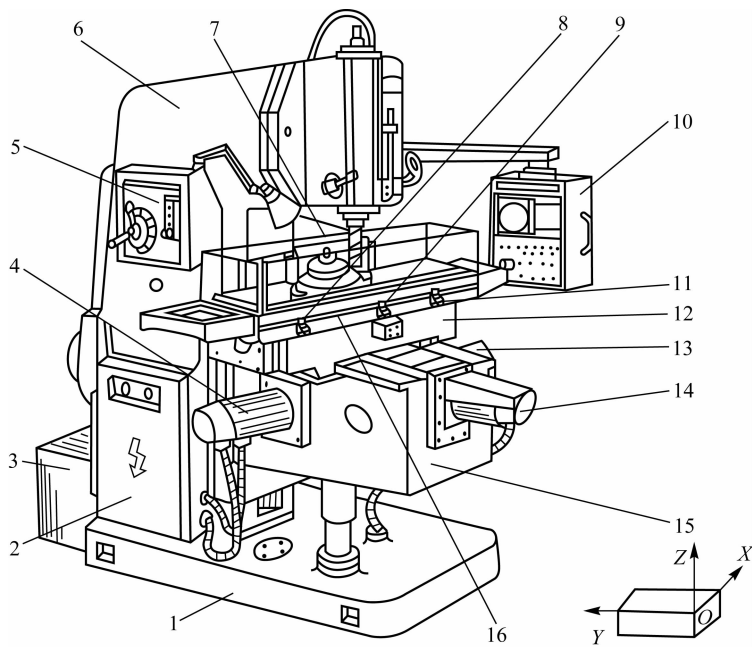
数控机床的分类

目前,数控机床的品种很多,通常按下面几种方法进行分类。

一、按工艺用途分类

1. 一般数控机床

最普通的数控机床有钻床、车床、铣床、镗床、磨床和齿轮加工机床。图 1-4 所示为 XK5040A 型数控铣床。



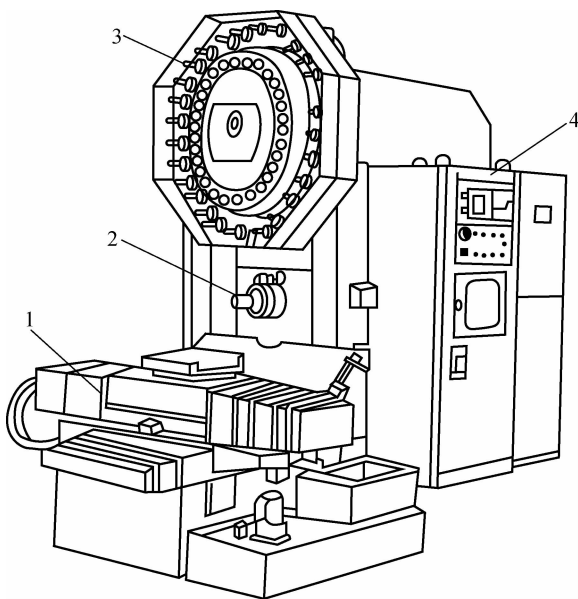
- 1—底座; 2—强电柜; 3—变压器箱; 4—升降进给伺服电动机; 5—主轴变速手柄和按钮板;
6—床身立柱; 7—数控柜; 8、11—纵向行程限位保护开关; 9—纵向参考点设定挡铁;
10—操纵台; 12—横向溜板; 13—纵向进给伺服电动机; 14—横向进给伺服电动机;
15—升降台; 16—纵向工作台。

图 1-4 XK5040A 型数控铣床



2. 数控加工中心

数控加工中心是在一般数控机床上加装一个刀库和自动换刀装置形成的。这类数控机床的出现打破了一台机床只能进行单工种加工的传统概念,可在一次安装定位后完成多工序加工。图 1-5 所示为 XH754 型卧式数控加工中心。



1—工作台；2—主轴；3—刀库；4—数控柜。

图 1-5 XH754 型卧式数控加工中心

3. 特种加工机床

特种加工机床有数控电火花成型机床、数控电火花线切割机床、数控激光加工机床等。

二、按进刀与工件相对运动的方式分类

数控机床按进刀与工件相对运动的方式可以分为点位控制式、直线控制式和轮廓控制式,如图 1-6 所示。

1. 点位控制机床

点位控制方式就是刀具与工件相对运动时,只控制从一点运动到另一点的准确性,而不考虑两点之间的运动路径和方向,如图 1-6(a)所示。这种控制方式多应用于数控钻床、数控冲床、数控坐标镗床和数控点焊机等。它的运动特点是先快后慢。

2. 直线控制机床

直线控制方式就是刀具与工件相对运动时,除控制从起点到终点的准确定位外,还保证平行于坐标轴的直线切削运动,如图 1-6(b)所示。它只做平行于坐标轴的直线进给运动,因此不能用于加工复杂的零件轮廓。这种控制方式用于简易数控车床、简易数控铣床、简易数控磨床等。



有的直线控制的数控机床可以加工与坐标轴成 45° 角的直线。

3. 轮廓控制机床

轮廓控制方式就是刀具与工件相对运动时,能同时对两个或两个以上坐标轴的运动进行控制,如图 1-6(c)所示,因此可以加工平面曲线轮廓或空间曲面轮廓。采用这类控制方式的数控机床有数控车床、数控铣床、数控磨床、加工中心等。

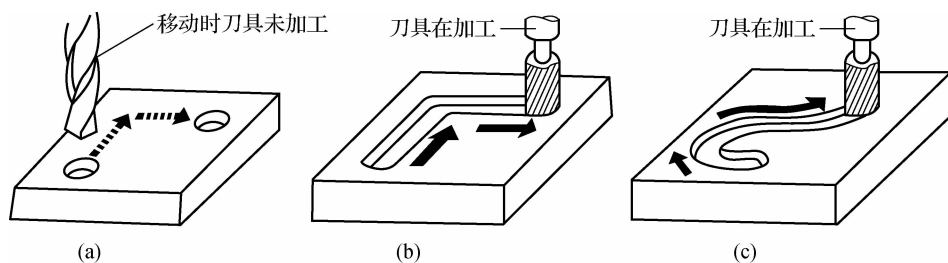


图 1-6 数控机床进刀与工件相对运动的方式

(a) 点位控制 (b) 直线控制 (c) 轮廓控制

三、按可控制联动的坐标轴分类

所谓数控机床可控制联动的坐标轴,是指数控装置控制几个伺服电动机,可同时驱动机床移动部件运动的坐标轴数目。

1. 两轴联动数控机床

两轴联动数控机床能同时控制两个坐标轴联动,即数控装置同时控制 X 和 Z 方向的运动,可用于加工各种曲线轮廓的回转体类零件。或机床本身有 X 、 Y 、 Z 三个方向的运动,数控装置只能同时控制两个方向,实现两个坐标轴联动,但在加工中能实现坐标平面的变换,可用于加工图 1-7(a)所示的零件沟槽。

2. 三轴联动数控机床

三轴联动数控机床能同时控制三个坐标轴联动。此时,若是铣床则称为三轴数控铣床,可用于加工曲面零件,如图 1-7(b)所示。

3. 两轴半联动数控机床

两轴半联动数控机床本身有三个坐标轴,能做三个方向的运动,但控制装置只能同时控制两个坐标轴,而第三个坐标轴只能做等距周期移动,可用于加工空间曲面。对于图 1-7(c)所示的零件,数控装置在 ZX 坐标平面内控制 X 、 Z 两坐标轴联动,加工垂直面内的轮廓表面,控制 Y 坐标轴做定期等距移动,即可加工出零件的空间曲面。

4. 多轴联动数控机床

多轴联动数控机床指能同时控制四个以上坐标轴联动的数控机床。多轴联动数控机床的结构复杂,精度要求高,程序编制复杂,主要用于加工形状复杂的零件,如五轴联动铣床加工复杂空间曲面零件,如图 1-7(d)所示。六轴联动加工中心示意图如图 1-8 所示。

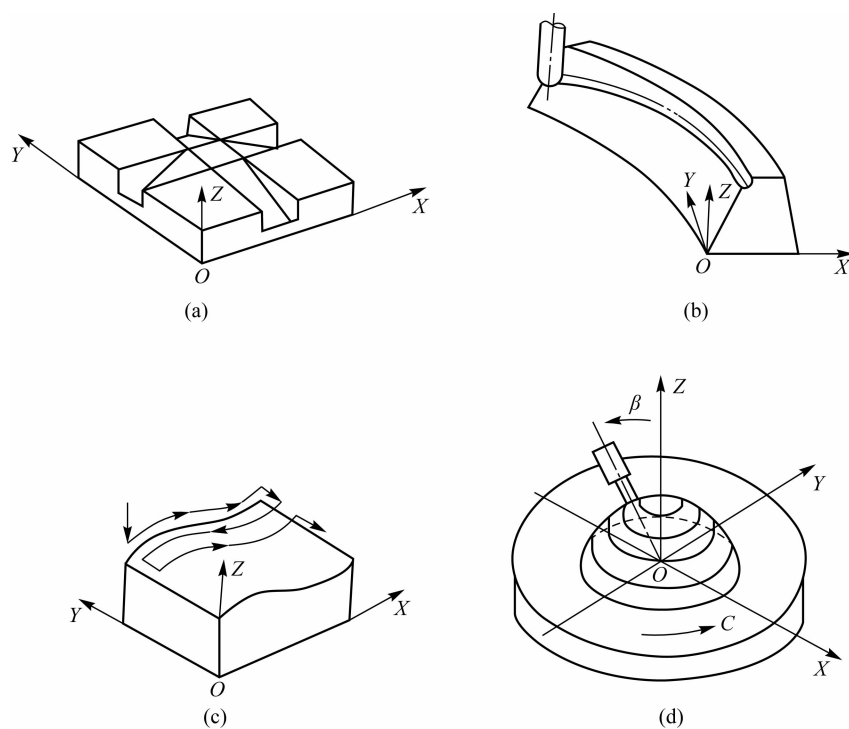


图 1-7 空间平面和曲面的数控加工

(a)两轴联动数控机床加工零件沟槽 (b)三轴联动数控机床加工曲面
(c)两轴半联动数控机床加工曲面 (d)五轴联动数控机床加工复杂空间曲面

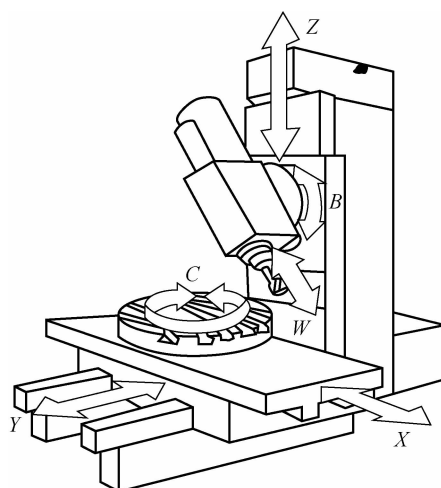


图 1-8 六轴联动加工中心示意图



四、按数控装置的类型分类

1. 硬件数控机床

早期的数控装置基本上都属于硬件数控类型,通过固化的数字逻辑电路处理数字信息实现控制,于 20 世纪 60 年代投入使用。工作原理是先根据应用程序(根据零件工艺编制的程序)制备穿孔纸带,纸带阅读机将穿孔纸带上的信息读入数控装置,由数控装置控制机床加工出合格产品。由于其功能少、线路复杂和可靠性低等缺点,这类机床现在已经基本上被淘汰了。

2. 计算机数控机床

计算机数控机床是用计算机处理数字信息的计算机数控(CNC)系统,如图 1-9 所示。数控机床的功能基本上是靠软件(称为系统软件)控制的,系统软件与应用程序存放在 ROM 中,关机后不会丢失;也有少数老式的 CNC 机床的应用程序存放在 RAM 中,这样在关机后就会丢失。当然,应用程序也可以存放在磁带、磁盘或 U 盘等程序载体上。计算机数控机床于 20 世纪 70 年代初期投入使用,随着微电子技术的迅速发展,微处理器功能越来越强,价格越来越低,现在的主流是微机数控系统(MNC)。根据数控系统微处理器(CPU)的多少,微机数控系统又可分为单微处理器数控系统和多微处理器数控系统。

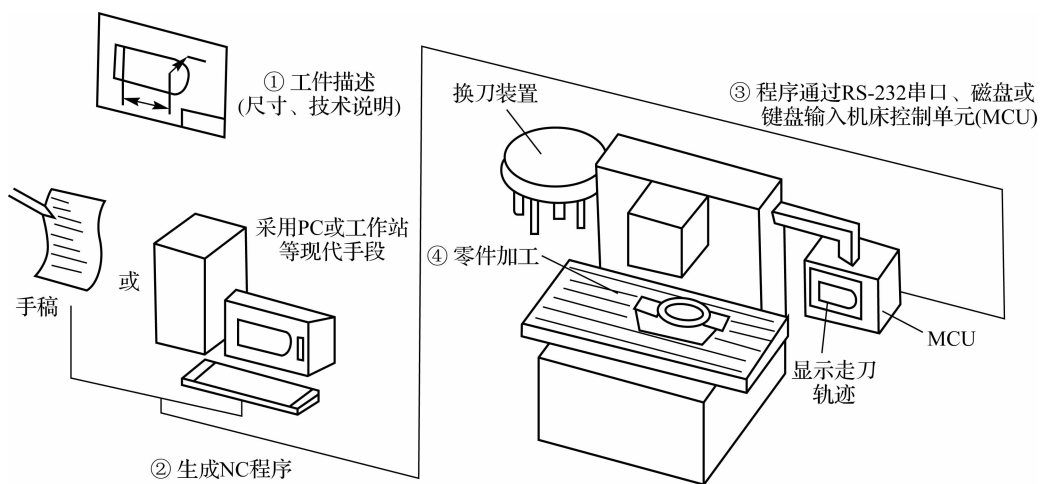


图 1-9 计算机数控系统图

五、按控制方式分类

数控机床按照对被控量有无检测反馈装置可分为开环控制和闭环控制两种。在闭环控制系统中,根据测量装置安放部位不同又分为全闭环控制和半闭环控制两种。

1. 开环控制数控机床

图 1-10 所示为典型的开环控制系统框图。开环控制系统中没有检测反馈装置。计算



机数控装置将工件加工程序处理后,输出数字指令信号给伺服驱动系统,驱动机床运动,但不检测运动的实际位置,即没有位置反馈信号。开环控制的伺服驱动系统主要使用步进电动机。插补器进行插补运算后,发出指令脉冲(又称进给脉冲),经驱动电路放大后,驱动步进电动机转动。一个进给脉冲使步进电动机转动一个角度,通过齿轮丝杠传动使工作台移动一定距离。因此,工作台的位移量与步进电动机转动角位移成正比,即与进给脉冲的数目成正比。改变进给脉冲的数目和频率,就可以控制工作台的位移量和速度。如图 1-10 所示,指令信息单方向传送,并且指令发出后不再反馈回来,故称开环控制。

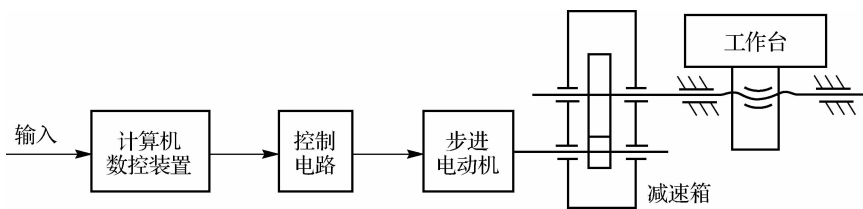


图 1-10 开环控制系统框图

受步进电动机的步距精度和工作频率以及传动机构的传动精度影响,开环控制系统的速度和精度都较低。但由于开环控制系统结构简单,调试方便,容易维修,成本较低,其仍被广泛应用于经济型数控机床上。

2. 闭环控制数控机床

开环控制系统的控制精度不高,主要是没有检测工作台移动的实际位置,也就没有纠正偏差的能力。图 1-11 所示为闭环控制系统框图,安装在工作台上的位置检测元件将工作台的实际位移量反馈到计算机数控装置中,将其与所要求的位置指令进行比较,用比较的差值进行控制,直到差值消除为止。可见,闭环控制系统可以消除机械传动部件的各种误差和工件加工过程中产生的干扰的影响,从而使加工精度大大提高。速度检测元件的作用是将伺服电动机的实际转速转换成电信号送到速度控制电路中,进行反馈校正,保证电动机转速恒定不变。

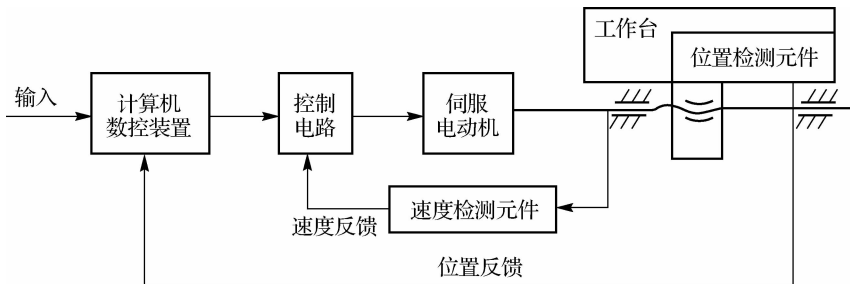


图 1-11 闭环控制系统框图

闭环控制的特点是加工精度高,移动速度快。这类数控机床采用直流伺服电动机或交流伺服电动机作为驱动元件,电动机的控制电路比较复杂,检测元件价格昂贵,故而调试和维修比较复杂,成本高。



3. 半闭环控制数控机床

半闭环控制系统框图如图 1-12 所示,它不是直接检测工作台的位移量,而是采用转角位移检测元件,如光电编码器,测出伺服电动机或丝杠的转角,推算出工作台的实际位移量,然后将其反馈到计算机数控装置中进行位置比较,用比较的差值进行控制。因为反馈环内没有包含工作台,故称之为半闭环控制。

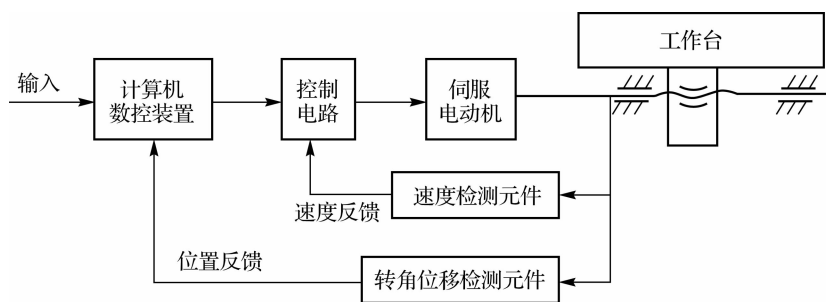


图 1-12 半闭环控制系统框图

半闭环控制系统精度较闭环控制系统差,但稳定性好,成本较低,调试维修也较容易,兼顾了开环控制系统和闭环控制系统两者的特点,因此应用比较普遍。

六、按加工方式分类

1. 金属切削类数控机床

如数控车床、加工中心、数控钻床、数控磨床、数控镗床等。

2. 金属成型类数控机床

如数控折弯机、数控弯管机、数控回转头压力机等。

3. 数控特种加工机床

如数控线(电极)切割机床、数控电火花加工机床、数控激光切割机等。

4. 其他类型的数控机床

如数控火焰切割机、数控三坐标测量机等。

七、按功能水平分类

按功能水平可以把数控机床分为高、中、低档(经济型)三类。

这种分类方法目前在我国用得很多,但是因为其分类标准没有一个确切的定义,所以含义不很明确。我国还有经济型数控系统的提法。所谓经济型数控系统,即低档数控系统,是指由单板机、单片机和步进电动机组成的数控系统以及其他功能简单、价格低廉的数控系统。它主要用于旧机床的改造。



第四节

典型数控机床

一、数控铣床

数控铣床一般由铣床主机、控制部分、驱动装置、辅助装置、控制面板、防护装置等几大部分组成。以 XK714B 数控铣床为例,其组成如图 1-13 所示。

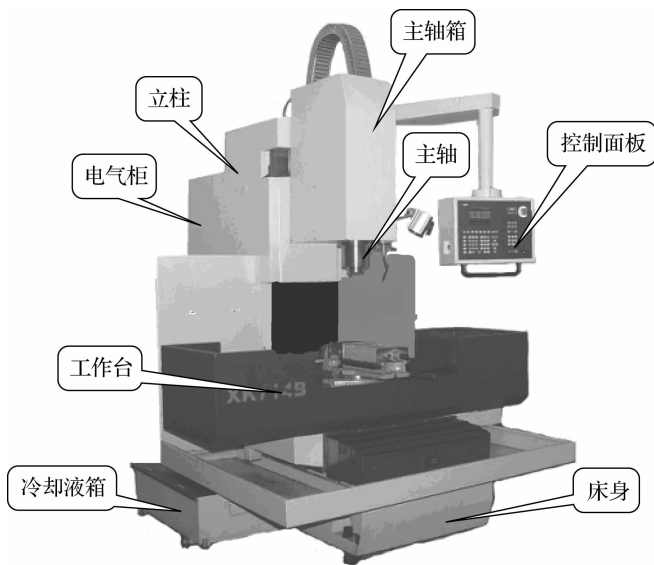


图 1-13 XK714B 数控铣床的组成

1. 铣床主机

铣床主机是数控铣床的机械部件,包括床身、主轴箱、工作台和进给机构等。

床身固定在底座上,是整个机床的基础和框架,用于安装与支承机床各部件。主轴箱包括主轴箱体和主轴传动系统,用于装夹刀具并带动刀具旋转。

2. 控制部分

控制部分即 CNC 装置,它是数控铣床运动的控制核心,执行数控加工程序,控制机床进行加工。

3. 驱动装置

驱动装置是数控铣床执行机构的驱动部件,包括主轴电动机、进给伺服电动机及进给执行机构等,其中进给执行机构按照程序设定的进给速度实现刀具和工件之间的相对运动(包括直线进给运动和旋转运动)。



4. 辅助装置

辅助装置如液压、气动、润滑、冷却等系统和排屑装置等。

5. 控制面板

控制面板即操纵台,其上有 CRT 显示器、机床操作按钮和各种开关及指示灯。

图 1-14 所示为数控铣床工作原理框图。其工作过程是:数控程序通过操作面板上的 MDI 键盘用手动方式直接输入,或者利用 CAD/CAM 软件在计算机上进行自动编程,然后通过机床与计算机直接通信的方式将程序传送到数控装置。数控装置发出脉冲信号控制进给伺服电动机转动,纵向工作台、横向溜板安装在升降台上,通过纵向进给(Y 轴)伺服电动机、横向进给(X 轴)伺服电动机和垂直升降进给(Z 轴)伺服电动机的驱动,完成 X、Y、Z 坐标进给运动,同时数控装置控制主轴电动机旋转完成主切削运动。

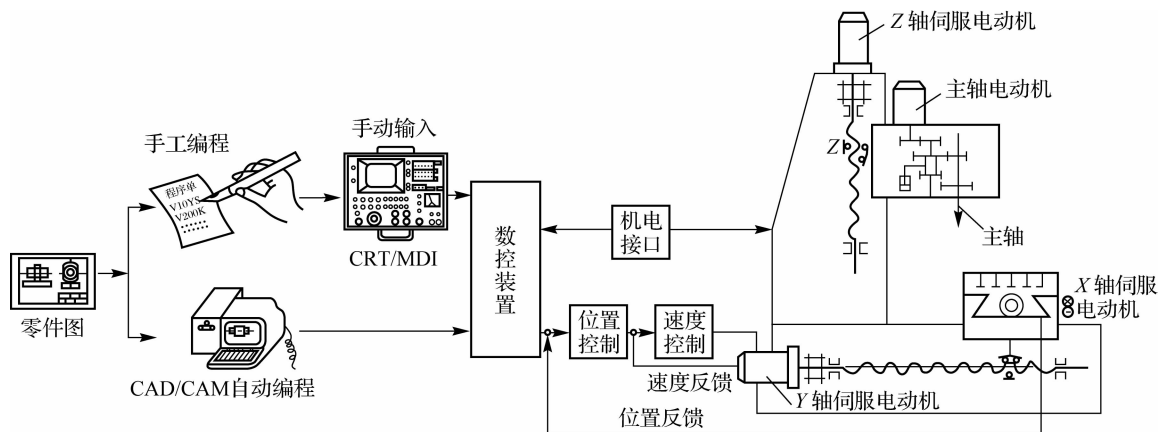


图 1-14 数控铣床工作原理框图

二、数控车床

数控车床是使用最广泛的数控机床之一,主要用于加工轴类、盘类等回转体零件,它能够通过程序控制自动完成内外圆柱面、锥面、圆弧、螺纹等工序的切削加工,并能进行切槽、钻孔、扩孔、铰孔等加工工作。图 1-15 所示为数控车床的加工内容。数控车床在一次装夹中能完成多个表面的连续加工,提高了加工质量和生产效率,特别适用于形状复杂的回转类零件的加工。

数控车床由数控系统(输入/输出设备及接口、数控装置、伺服系统、检测反馈装置、可编程控制器)和机床本体(组成机床本体的各机械部件)组成。一个档次较高的数控车床由数控装置、床身、主轴箱、回转刀架、进给系统、尾座、冷却系统、润滑系统、液压系统、排屑器等部分组成。图 1-16 所示为典型的卧式数控车床。

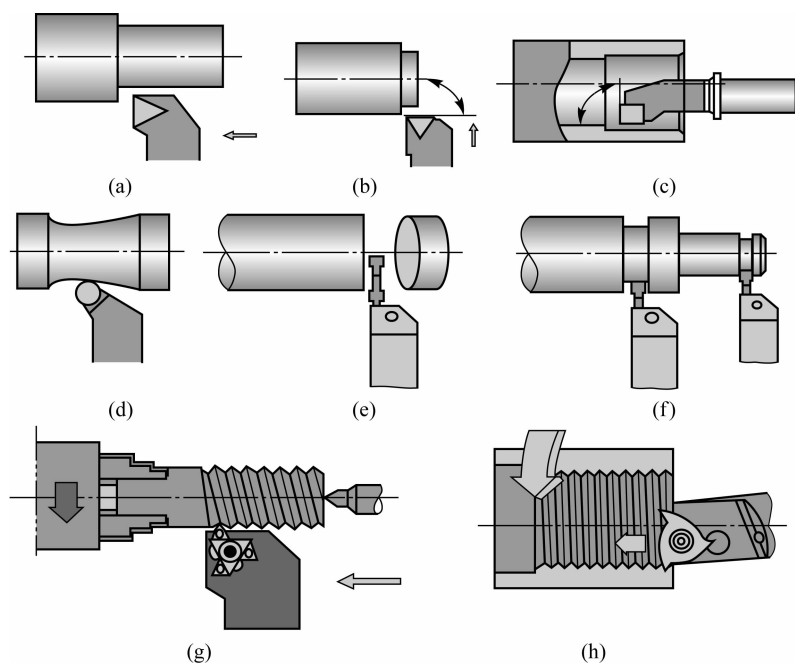


图 1-15 数控车床的加工内容

(a)车外圆 (b)车端面 (c)车内孔 (d)车外轮廓 (e)切断 (f)车槽 (g)车外螺纹 (h)车内螺纹

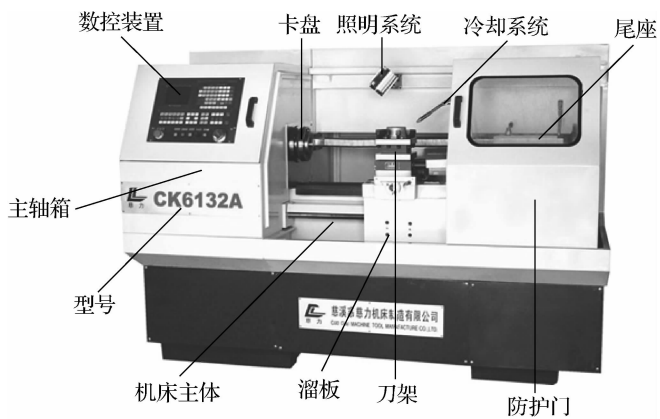


图 1-16 典型的卧式数控车床

数控车床的主要特征是具有强大的智能化的计算机数控系统,且机械结构比普通车床简单,因为它没有进给箱、挂轮箱和溜板箱。数控车床能加工各种螺纹,这是因为在主轴端部安装了与主轴同步运转的脉冲编码器,使主运动与进给运动建立起联系,严格保证了主轴回转运动与切削进给运动的运动关系。

