



高职高专机电类专业工学结合“十二五”规划教材

GAOZHI GAOZHUAN JIDIANLEI ZHUANVE GONGXUE JIEHE “SHIERWU” GUIHUA JIAOCAI

数控编程与加工技术

SHUKONG BIANCHENG YU JIAGONG JISHU

主编 刘光定 冯金广



郑州大学出版社



高职高专机电类专业工学结合“十二五”规划教材
GAOZHI GAOZHUAN JIDIANLEI ZHUANYE GONGXUE JIEHE “SHIERWU” GUIHUA JIAOCAI

数控编程与加工技术

SHUKONG BIANCHENG YU JIAGONG JISHU

主编 刘光定 冯金广



郑州大学出版社

郑州

图书在版编目(CIP)数据

数控编程与加工技术/刘光定,冯金广主编. —郑州:郑州大学出版社,2014.5
ISBN 978-7-5645-1148-7

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 222843 号

郑州大学出版社出版发行

郑州市大学路 40 号

出版人:王 锋

全国新华书店经销

河南省诚和印制有限公司印制

开本:787 mm×1 092 mm 1/16

印张:29.5

字数:700 千字

版次:2014 年 5 月第 1 版

邮政编码:450052

发行部电话:0371-66966070

印次:2014 年 5 月第 1 次印刷

书号:ISBN 978-7-5645-1148-7

定价:50.00 元

本书如有印装质量问题,由本社负责调换

作者名单

主 编 刘光定 冯金广

副主编 黄胜银 杨彬彬

编 委 (以姓氏笔画为序)

冯金广 刘 原 刘光定 杨彬彬

郭艳丽 黄胜银 程改兰

内 容 简 介

本书是根据项目教学和基于工作过程的要求编写的,从数控技能的应知、应会两方面入手,全面系统地介绍了数控加工及相关的基础知识和操作技能。全书主要内容包括:数控机床概述、数控机床加工基础知识、数控车床、数控铣床、加工中心、数控线切机床编程与加工等。本书力求紧密联系生产实际,以解决实际工作任务为目标,以培养学生能力为中心,突出实用性,理论浅显,通俗易懂,案例丰富,每个项目中均附有自测习题。

本书可作为高职高专数控、机械制造、模具、机电一体化等专业的教材,也可作为技能鉴定的参考用书。

前言

我国从 20 世纪 80 年代开始进行课程改革,直到现在,基本确定了这样的观念:项目课程应当成为当前高等职业教育专业课程改革的方向,因为它符合职业教育的规律,容易激发学生的学习兴趣,培养学生的综合应用能力。高职的教学目标是使学生获得相应职业领域的职业能力。因而,形成职业能力是课程的出发点,也是课程的终结点。

21 世纪是知识经济的时代,科学技术发展迅速,日新月异。现代高新技术企业急需大量的既有扎实的理论基础,又有较强的动手能力的数控技术应用技能型人才。根据这一要求,同时结合国内高职高专教育的实际情况,为培养具有数控加工工艺、数控编程和数控机床的实际操作能力的高素质技能型专门人才,编者在多年教学实践的基础上按照项目教学和基于工作过程的思路编写了本书。

本书由郑州电力职业技术学院刘光定、河南职业技术学院冯金广共同担任主编,商丘工学院黄胜银、新乡职业技术学院杨彬彬担任副主编,郑州信息科技职业学院程改兰、永城职业学院郭艳丽、郑州航空工业管理学院刘原参加编写。教材具体编写分工如下:项目一、二、九、十二、十三、十四、十五由刘光定编写,项目三、十八、十九、二十、二十一、二十二由冯金广编写,项目七、八、十一、十七由黄胜银编写,项目四、五由程改兰编写,项目六、附录由郭艳丽编写,项目十、十六由刘原编写,项目二十三、二十四、二十五由杨彬彬编写。全书由刘光定统稿。

本书在编写的过程中得到了有关专家和兄弟院校的大力支持和帮助,在此一并表示感谢。在编写过程中还参考并引用了有关文献和插图等,在此对有关文献和插图的作者表示由衷的感谢!

限于编者水平,对书中不当之处,敬请读者提出宝贵意见。

编者

2012 年 5 月

目 录

学习领域一：数控编程与加工技术基础	1
项目一 数控机床的基础认识.....	1
项目二 数控机床的应用认识	18
项目三 数控机床坐标系与编程规则	30
学习领域二：数控车床编程与加工技术	53
项目四 数控车床编程与加工入门	53
项目五 数控车床编程与加工预备工作	75
项目六 阶梯轴类零件加工	96
项目七 成型面类零件加工.....	112
项目八 螺纹类零件加工.....	128
项目九 内/外轮廓加工循环	145
项目十 槽加工与子程序.....	160
项目十一 车削宏程序类零件加工.....	171
项目十二 车削配合件加工.....	193
学习领域三：数控铣床编程与加工技术	213
项目十三 数控铣床编程与加工入门.....	213
项目十四 数控铣床加工预备工作.....	240
项目十五 平面及外轮廓类零件加工.....	259
项目十六 槽类零件加工.....	276
项目十七 孔系零件加工.....	294
项目十八 零件型腔表面加工.....	313
项目十九 铣削综合件加工.....	328
学习领域四：加工中心编程与加工技术	339
项目二十 加工中心典型零件加工.....	339
项目二十一 铣削宏程序类零件加工.....	359

项目二十二 配合件加工	372
学习领域五:数控线切割编程与加工技术	390
项目二十三 数控线切割编程与加工入门	390
项目二十四 数控线切割编程与加工预备工作	410
项目二十五 数控线切割典型零件加工	426
附录	444
附录 I 常用材料及刀具切削参数推荐值	444
附录 II 数控车床操作工(高级)国家职业技能鉴定标准	447
附录 III 数控铣床操作工(高级)国家职业技能鉴定标准	450
附录 IV 加工中心操作工(高级)国家职业技能鉴定标准	454
附录 V 数控机床操作工国家职业标准	459
参考书目	463

学习领域一

数控编程与加工技术基础

项目一 数控机床的基础认识

一、项目导入

图 1-1 所示为数控机床,已知毛坯规格为 $\phi 52 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 的棒料,材料为 45# 钢,要求制定零件的加工工艺,编写零件的数控加工程序,并通过数控仿真加工调试、优化程序,最后进行零件的加工检验。

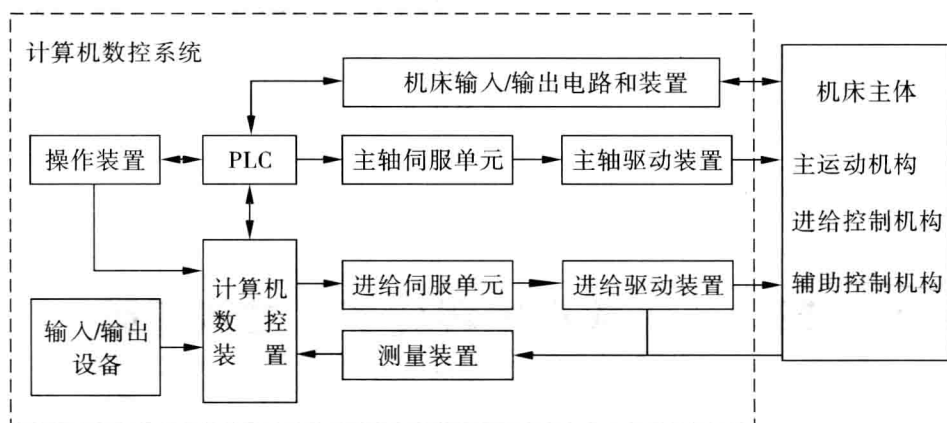
二、项目目标

1. 知识目标

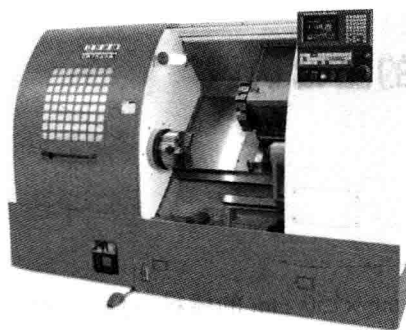
- (1) 了解数控机床的布局、基本结构及其功用;
- (2) 了解数控机床的结构特点及其发展;
- (3) 理解数控机床的基本运动;
- (4) 掌握数控机床的基本操作;
- (5) 理解数控机床的加工过程;
- (6) 了解数控机床的加工对象及其用途。

2. 能力目标

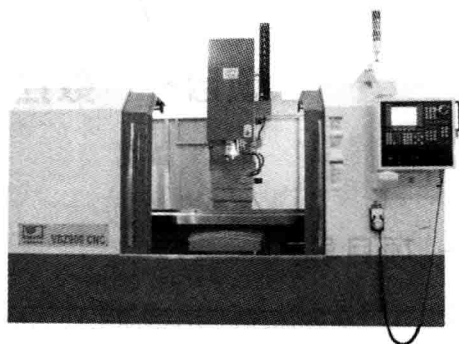
- (1) 熟悉数控机床安全文明生产及安全操作规程;
- (2) 能够进行数控机床的日常及定期的系统检查、维护保养;
- (3) 具有数控机床操作基本的自我保护意识与能力;
- (4) 能进行数控机床常用工具、夹具、量具的维护保养。



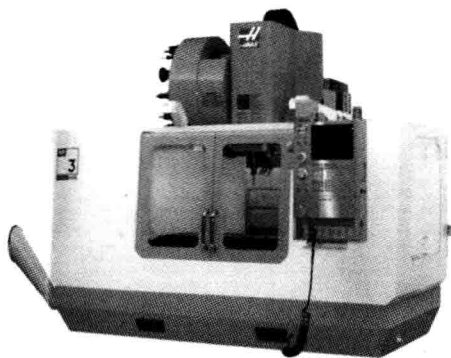
(a) 示意图



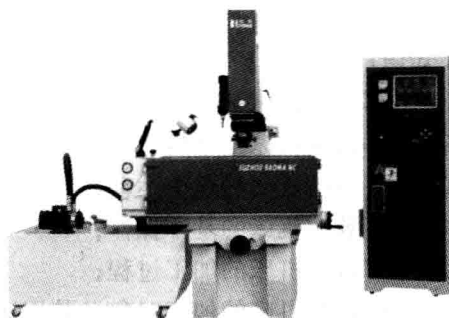
数控车床



数控铣床



加工中心



数控线切割机床

(b) 实物图

图 1-1 数控机床

3. 素质目标

(1) 具有较强的安全意识和质量意识;

- (2)具有良好的职业道德;
- (3)具有良好的沟通能力;
- (4)具有较强的协作能力;
- (5)具有较强的创新能力。

三、相关知识

(一)数控机床的产生与发展过程

数字控制(numerical control, NC),是用数字化信号进行控制的一种方法。

1947年,美国的Parsons公司为了提高生产飞机零件的靠模和机翼检查样板的精度及效率,提出了用穿孔卡来控制机床的设想,后与麻省理工学院(MIT)合作,于1952年研制出了世界上第一台试验性的三人材数控立铣床,控制装置由真空管组成。1954年生产出了第一台工业用的数控机床,1955年类似产品投产了100台。这些数控机床在复杂曲面零件加工中发挥了很大作用。

半个世纪以来,随着自动控制技术、微电子技术、计算机技术、精密测量技术及机械制造技术的迅速发展,数控机床也得到了快速发展,产品不断更新换代,品种不断增多。就数控装置而言,大致经历了以下几个发展过程:第一代数控装置由真空管组成;第二代采用晶体管和印刷电路;第三代采用小规模集成电路,并出现了直接数控(direct numerical control, DNC)控制方式;第四代采用大规模集成电路及小型通用计算机控制,被称为计算机数控(computerized NC, CNC);第五代采用微型计算机或微处理机(microcomputer NC, MNC)。现在,大多采用多个微处理器组成的微型计算机作为数控装置的核心,数控装置的各项功能被分配到各个微处理器,在主微处理器的统一控制和管理下,并行、协调地工作,使数控机床向高精度、高速度方向发展。

我国于1958年开始研制数控机床,“七五”期间,取得了长足的发展。此后,采取自主开发中、高档数控系统与购买国外先进数控系统相结合的方针,加速了我国数控机床生产的发展和使用水平的提高。数控机床产品已覆盖了车、铣、镗、钻、磨、齿轮加工、线切割加工、电火花加工等机床,另外各种机电产品或设备如加工中心、弯管机、火焰切割机、三坐标测量机、工业机器人、绘图机以及激光快速成型机等均采用数控技术原理进行控制,数控机床产品品种已达300多种。

(二)数控机床的基本组成和分类

数控机床是采用数控技术对工作台运动和切削加工过程进行控制的机床,是典型的机电一体化产品,是数控技术的最典型应用。

1. 数控机床的组成

典型数控机床的组成如图1-1所示。由图1-1可知,数控机床主要由零件加工程序、输入装置、数控装置、伺服驱动装置、辅助控制装置、检测反馈装置、机床本体等七部分组成,其中数控装置、伺服驱动装置、辅助控制装置、检测反馈装置又合称为数控系统。

实际上,零件加工程序并非数控机床的物理组成部分,但从逻辑上讲,数控机床加工过程必须按数控加工程序的规定进行,数控加工程序是数控机床加工的一个重要环节,因

此常将数控加工程序作为数控机床的一个组成部分。

(1) 输入装置 数控机床的零件加工程序是通过程序输入装置输入数控机床的。输入装置与输入方法有关。

1) 控制介质输入 所谓控制介质就是零件加工程序存储介质即程序载体。通常程序载体有穿孔纸带、磁带、磁盘、光盘等,与之相应的输入装置为光电纸带阅读机、录音机、磁盘驱动器、光驱等。早期的数控机床常用穿孔纸带存储加工程序,即在特制的纸带上穿孔,孔的不同位置的组合构成不同的数字或数控代码。通过光电纸带阅读机将纸带上的零件加工程序转换为相应的二进制代码输入数控装置中的存储器。虽然现在很多数控机床上仍附带有纸带阅读机、长磁带录音机,但由于微型计算机的普遍使用,穿孔纸带和磁带控制介质的应用已越来越少。

2) 手工输入 利用键盘输入控制机床运动和刀具运动的指令。具体有三种情况:

① 手动数据输入(manual data input, MDI),通过数控系统操作面板上的相应按键,把数控程序指令逐条输入存储器中。这种方法一般只适用于一些较为简短的程序。

② 在数控显示的程序编辑界面,通过数控系统操作面板上的相应按键,输入程序指令,存于内存中。后面有关章节的手工编程主要就是采用这种输入方法。用这种方法还可以调出已存入的数控程序并对其进行编辑修改。

③ 在具有对话功能的数控装置上,根据软件的逻辑格式和显示屏上的对话提示,选择不同的菜单,输入有关的数字和信息后,可自动生成控制程序存入内存。这种方法虽然是手工输入,但却是自动编程。

3) 通信方式输入存储器 从自动编程机上、计算机上或网络上,将编制好的数控加工程序通过通信接口直接输入数控装置的存储器。

(2) 数控装置 数控装置是数控机床的核心部件,由硬件和软件两大部分组成。硬件包括通用 I/O 接口、CPU、存储器、可编程序控制器(programmable logic controller, PLC)及数字通信接口等。软件包括管理软件和控制软件。管理软件用来管理零件程序的输入、输出,显示零件程序、刀具位置、系统参数及报警,诊断数控装置是否正常并检查故障原因。控制软件则完成译码、插补运算、刀具补偿、位置控制等。

数控装置的主要功能为读入数值并存储、对程序进行译码及数据处理、插补运算、位置控制和 I/O 处理,产生控制指令控制机床各部件协调运动,按确定的顺序和设定的条件完成零件加工程序。

辅助控制装置是介于数控装置和机床的机械与液压部件之间的各种开关执行电器的控制装置。主要实现各种辅助功能控制,如机床的启停、换刀、冷却液开关等控制,目前多由数控装置内置的可编程序控制器来实现。

(3) 伺服驱动装置 伺服驱动系统由驱动装置、执行机构及位置、速度检测反馈装置三个部分组成。伺服电机是伺服系统的执行机构,驱动装置则是伺服电机的动力源。来自数控装置的控制指令脉冲经伺服驱动装置进行功率放大,驱动伺服电机,进而通过机械传动装置带动机床主轴、工作台或刀架等机床运动部件运动,其输入为电信号,输出为机床的位移、速度和力。

(4) 机床本体 机床本体是实现切削加工的主体,对加工过程起支撑作用。数控机

床的精度、精度保持性、刚性、抗震性、低速运动平稳性、热稳定性等主要性能均取决于机床本体。数控机床的机械部件包括:主运动部件,进给运动执行部件如工作台、拖板及其传动部件以及床身、立柱等支承部件,此外还有冷却、润滑、转位和夹紧等辅助装置。对于加工中心类的数控机床,还有存放刀具的刀库、刀具交换装置等部件。数控机床的机械部件的组成与普通机床相似,但传动结构要求更为简单,在精度、刚度、抗震性等方面要求更高,而且其传动和变速系统要便于实现自动控制。

2. 数控机床的工作原理

在数控机床上加工零件时,首先根据零件图样的要求,结合所采用的数控机床的功能、性能和特点,确定合理的加工工艺,编制相应的数控加工程序,并采用适当的方式将程序输入到数控装置。在数控机床加工过程中,数控装置对数控加工程序进行编译、运算和处理,输出坐标控制指令到伺服驱动系统,顺序逻辑控制指令到 PLC,通过伺服驱动系统和 PLC 驱动机床刀架或工作台按照数控加工程序规定的轨迹和工艺参数运动,从而加工出符合图纸要求的零件。

(三) 数控机床的分类

数控机床的种类很多,分类方法不一。根据数控机床的功能和组成,可以从如下几个不同的角度进行分类。

1. 按数控机床的加工工艺分类

(1) 普通数控机床 根据数控机床的加工工艺不同,并与传统机床的称谓相对应,可将数控机床分为数控车床、数控铣床、数控钻床、数控磨床、数控镗床等。

(2) 加工中心 将多种加工工艺内容集中在同一台机床上实现,并具有刀库和自动换刀装置,可在工件一次装卡后连续自动地完成铣削、钻削、镗削、铰孔、扩孔、攻丝等多道工序的加工,这样的数控机床叫加工中心(machining center, MC)。常见的加工中心机床有车削加工中心和钻铣镗加工中心。

(3) 特种加工机床 特种加工机床有数控电火花、数控线切割、激光快速成型机、数控等离子切割、火焰切割等。

(4) 其他 还有采用数控技术的其他设备如三坐标测量机、工业机器人、数控绘图仪等。

2. 按控制系统的功能特点分类

按数控机床运动轨迹的控制方式可将数控机床分成点位控制、点位直线控制和轮廓控制三类。

(1) 点位控制(point to point control, PTP) 点位控制的数控机床的特点是,只要求控制刀具相对于工件在机床加工平面内从某一加工点运动到另一加工点的精确坐标位置,而对两点之间的运动轨迹原则上不加以控制,且在运动过程中不做任何加工。典型的点位控制数控机床有数控钻床、数控镗床、数控冲床等。这类机床无须插补器,其基本要求是定位精度、定位时间和移动速度,对运动轨迹无精度要求。为了精确定位和提高移动速度,运动开始时,移动部件首先高速运动,在到达定位终点前减速以实现慢速接近定位点并最终准确定位。如图 1-2(a)所示。

(2) 点位直线控制(straight line control or paraxial control) 点位直线控制的数控机床

又简称为直线控制的数控机床。这类数控机床不仅可以控制刀具或工作台由一个位置点到另一个位置点的精确坐标位置,还可以控制它们以给定的速度沿着平行于某一坐标轴方向做直线运动并在移动的过程中进行加工。这类数控系统也可控制刀具或工作台两个坐标同时以相同的速度运动,从而加工出与坐标轴成 45° 的斜线。典型的点位直线控制的数控机床如简单的具有外圆、端面及 45° 锥面加工的数控车床。如图1-2(b)所示。

(3) 轮廓控制(contour control) 轮廓控制也称连续控制。这类机床的特点是,不仅要求刀具相对于工件在机床加工空间内从一点运动到另一点的精确坐标位置,而且要求对两点之间的运动轨迹及轨迹上每一点的运动速度进行精确控制,且能够边移动边加工。典型的连续控制数控机床有数控车床、数控铣床、加工中心等。这类机床用于加工二维平面轮廓或三维空间轮廓。这类机床的数控系统带有插补器,以精确实现各种曲线或曲面。能进行连续控制的数控机床,一般也能进行点位控制和点位直线控制。如图1-2(c)所示。

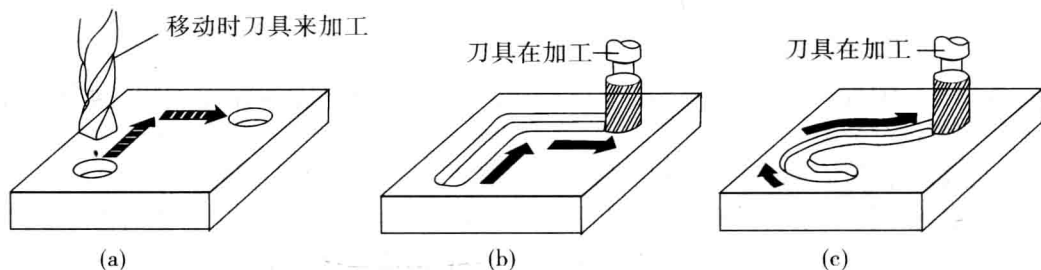


图1-2 数控系统控制方式图

3. 按伺服系统的功能特点分类

按所采用的伺服系统控制方式不同,可将数控机床分成开环、闭环和半闭环控制数控机床三类。

(1) 开环控制数控机床 开环控制系统是指不带位置反馈装置数控机床,其伺服系统由步进驱动和步进电机组成,如图1-3所示为开环控制系统的框图。机床的工作精度取决于步进电机的传动精度及变速机构、丝杠等机械传动部件的精度。

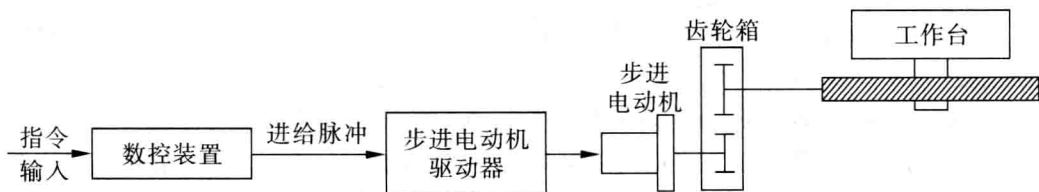


图1-3 开环控制系统框图

开环控制的数控机床具有结构简单、系统稳定、容易调试、成本低等优点。但是系统对移动部件的误差没有补偿和校正,所以精度低。一般适用于经济型数控机床和旧机床数控化改造。

部件的移动速度和位移量是由输入脉冲的频率和脉冲数决定。

(2) 闭环控制数控机床 闭环控制数控机床有位置和速度的检测装置,并且直线位移检测装置直接装在机床移动部件如工作台上,将测量的结果直接反馈到数控装置中,与输入指令进行比较控制,使移动部件按照指令要求运动,最终实现精确定位,如图1-4所示为闭环控制系统框图。因为把机床工作台纳入了位置控制环,故称为闭环控制系统。

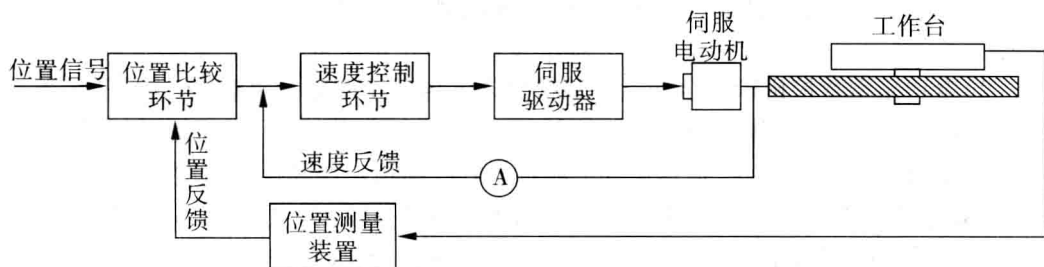


图 1-4 闭环控制系统框图

闭环控制数控机床其伺服系统由交流或直流伺服驱动和交流或直流伺服电机组成。与伺服电机同轴刚性连接的测速器件,随时检测电机转速反馈至数控系统,与速度指令信号进行比较,控制电机的转速。该系统定位精度高、调节速度快。但该系统调试困难,系统复杂并且成本高,故适用于精度要求很高的数控机床,如精密数控镗铣床、超精密数控车床等。

(3) 半闭环控制数控机床 半闭环控制数控机床也有位置和速度的检测装置,只是其角位移检测装置装在交流或直流伺服电机的输出轴上,通过检测角位移间接地检测移动部件的位移,并反馈到数控系统中。由于惯性较大的机床移动部件不包括在控制环中,因而称作半闭环控制系统,如图1-5所示为半闭环控制系统框图。

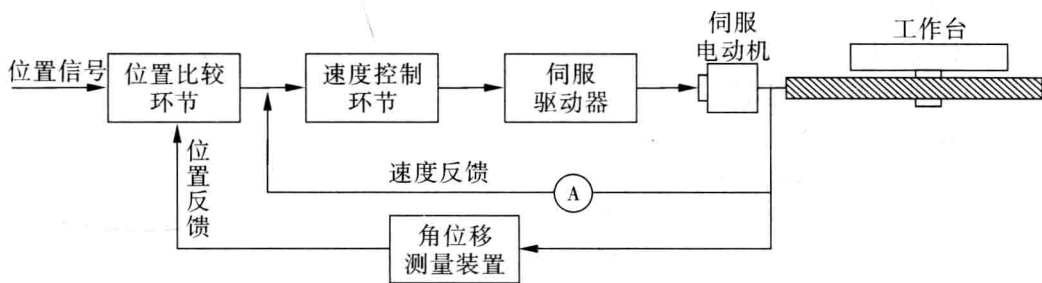


图 1-5 半闭环控制系统框图

由于系统闭环环路内不包括机械传动环节,可获得稳定的控制特性。另外,机械传动环节的误差可用误差补偿的办法消除,因此可获得满意的精度。半闭环控制数控机床精度较高,安装调试方便,广泛应用于各种数控机床中。

4. 按数控机床功能强弱分类

按数控机床功能强弱可将数控机床分为经济型数控机床、全功能型数控机床和高档

数控机床。

(1) 经济型数控机床 经济型数控机床又称简易数控机床,主要采用功能较弱、价格低廉的经济型数控装置,多为开环控制,其机械结构与传统机床机械结构差异不大,刚度与精度均较低。由于这类机床经济性好,因此在我国中小企业中应用广泛。目前国产数控仪表机床多为经济型数控机床,有些企业还用经济型数控装置对传统机床进行数控化改造,获得经济型数控机床。经济型数控机床的脉冲当量一般在 $0.001 \sim 0.01 \text{ mm}$ 范围内。

(2) 全功能型数控机床 全功能型数控机床又称普及型数控机床,采用功能完善、价格较高的数控装置,采用闭环或半闭环控制,直流或交流伺服电机,在机械结构设计上充分考虑了强度、刚度、抗震性、低速运动平稳性、精度、热稳定性和操作简便等方面的要求,能实现高速、强力切削。全功能型数控机床的脉冲当量一般在 $0.1 \sim 1 \mu\text{m}$ 范围内。

(3) 高档型数控机床 高档型数控机床是指三轴以上联动控制、能加工复杂形状零件的数控机床,或者工序高度集中、具备高度柔性的数控机床,或者可进行超高速、精密、超精密甚至纳米加工的数控机床。这类机床性能好、价格高,一般仅用在特别需要的场合。高档型数控机床的脉冲当量一般为 $0.1 \mu\text{m}$,甚至更小。

5. 按联动坐标轴数分类

按所能控制联动坐标轴数目的不同,数控机床还可分成两坐标、三坐标、四坐标、五坐标等数控机床。两坐标数控机床主要用于加工二维平面轮廓,三坐标数控机床主要用于加工三维立体轮廓,四坐标和五坐标数控机床主要用于加工空间复杂曲面或一些高精度、难加工的特殊型面。

(四) 数控机床的控制原理和插补算法

数控系统在处理轨迹控制信息时,用户编程时给出了轨迹的起点和终点以及轨迹的类型,并规定其走向,然后由数控系统在控制过程中计算出运动轨迹的各个中间点,这个过程称之为插补。

1. 对插补计算的要求

- (1) 插补所需要的数据最少。
- (2) 插补理论误差要满足精度要求。
- (3) 沿插补路线或称插补矢量的合成进给速度要满足轮廓表面粗糙度一致性的工艺要求,即进给速度变化要在许可范围内。
- (4) 控制联动坐标轴的能力强,即易实现多坐标轴的联动控制。
- (5) 插补算法简单可靠。

2. 插补算法的种类

- (1) 硬件插补 由专门的硬件接成的数字电路装置。
- (2) 软件插补 软件插补法可分成基准脉冲插补法和数据采样插补法(sampled-data)(也称数字增量插补法)两类。
- (3) 软硬件插补 数控系统将软件插补法与硬件插补法结合起来,软件插补完成粗插补,硬件插补完成精插补。

3. 插补算法介绍

(1) 用直线逼近零件轮廓曲线的节点计算 常用的计算方法有等间距法、等弦长法、等误差法和比较迭代法等。

等间距法就是将某一坐标轴划分成相等的间距。如图 1-6(a) 所示,沿 X 轴方向取 ΔX 为等间距长,根据已知曲线的方程 $Y=f(X)$,可由 X_i 求得 Y_i , $X_{i+1}=X_i+\Delta X$, $Y_{i+1}=f(X_i+\Delta X)$ 。如此求得的一系列点就是节点。将相邻节点连成直线,用这些直线段组成的折线代替原来的轮廓曲线。坐标增量 ΔX 取得愈小则 $\delta_{\text{插}}$ 愈小,这使得节点增多,程序段也增多,编程费用高,但等间距法计算较简单。

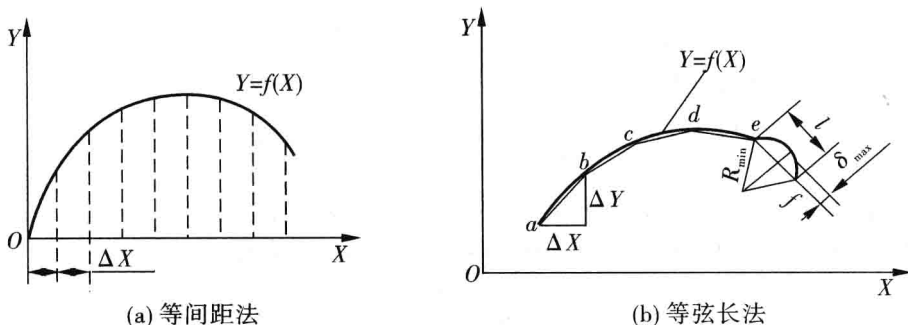


图 1-6 等间距法和等弦长法

等弦长法就是使所有逼近直线段长度相等,如图 1-6(b) 所示。由于零件轮廓曲线 $Y=f(X)$ 的曲率各处不等,因此首先应求出该曲线的最小曲率半径 $R_{\min}$,由 $R_{\min}$ 及 $\delta_{\text{允}}$ 确定允许的步长 l ,然后从曲线起点 a 开始,按等步长 l 依次截取曲线,得 $b, c, d, \dots$ 点,则 $ab=bc=\dots=l$,即为所求各直线段。

总的看来,此种方法比等间距法的程序段数少一些。但当曲线曲率半径变化较大时,所求节点数将增多,所以,此法适用于曲率变化不大的情况。

等误差法是使逼近线段的误差相等,且等于 $\delta_{\text{允}}$,所以此法较上两种方法合理,特别适合曲率变化较大的复杂曲线轮廓,如图 1-7 所示。下面介绍用等误差法计算节点坐标的方法。设零件轮廓曲线的数学方程为 $Y=f(X)$ 。

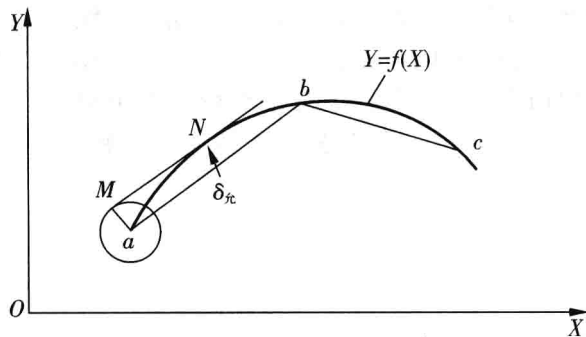


图 1-7 等误差法