



全国本科院校机械类**创新型**应用人才培养规划教材

数控机床与编程



主编 张洪江 侯书林



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

全国本科院校机械类创新型应用人才培养规划教材

数控机床与编程

主 编 张洪江 侯书林

副主编 于春海 李 猛

参 编 王和平 赵清来



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书是全国本科院校机械类创新型应用人才培养规划教材,是根据教育部高等学校机械设计制造及其自动化专业本科教育培养目标、培养方案和课程教学大纲要求编写的。

本书的编写参考了多所高校相关课程的教学经验,内容全面、系统、重点突出,力求体现先进性、实用性、易懂性。基础理论以“必需、够用”为度,应用实例紧密结合生产实际。全书内容包括数控机床的基本知识、编程基础,数控铣床、数控车床、数控钻镗床、数控电火花线切割及加工中心的编程与操作,数控机床的结构、伺服系统、自动编程及应用。

本书可作为高等院校机械设计制造及其自动化专业、机电类专业、高等职业技术学院数控技术应用专业的教学用书,也可供相关专业的师生和从事相关工作的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

数控机床与编程/张洪江,侯书林主编. —北京:北京大学出版社, 2009.10

(全国本科院校机械类创新型应用人才培养规划教材)

ISBN 978-7-301-15900-2

I. 数… II. ①张… ②侯… III. 数控机床—程序设计—高等学校—教材 IV. TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 173687 号

书 名: 数控机床与编程

著作责任者: 张洪江 侯书林 主编

责任编辑: 郭穗娟

标准书号: ISBN 978-7-301-15900-2/TH · 0166

出版者: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://www.pup.cn> <http://www.pup6.com>

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

电子邮箱: pup_6@163.com

印刷者: 三河市欣欣印刷有限公司

发 行 者: 北京大学出版社

经 销 者: 新华书店

787 毫米×1092 毫米 16 开本 14.25 印张 330 千字

2009 年 10 月第 1 版 2009 年 10 月第 1 次印刷

定 价: 25.00 元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有 侵权必究

举报电话: 010-62752024

电子邮箱: fd@pup.pku.edu.cn

前 言

本书是根据教育部“高校机械设计制造及其自动化专业人才培养目标”的要求，并结合编者在数控机床方面的教学与实践经验编写的。

随着科学技术的高速发展，制造业发生了根本的变化。由于数控技术的广泛应用，高效率、高精度的数控机床已形成了巨大的生产力。专家们预言：21 世纪机械制造业的竞争，其实质是数控技术的竞争。

数控技术是制造业实现自动化、柔性化、集成化生产的基础，其已经成为衡量一个加工制造企业技术水平乃至一个国家工业化水平的重要标志之一。其中，数控机床是加工制造行业体现数控技术的重要组成部分，而数控编程则是数控机床实现数控加工的必要前提。因此，数控加工技术人员成为当前各制造行业的急需人才。编者从近年来选修该门课程的学生人数变化规律中深深体会到这一点。

本书编写的指导思想是使读者通过学习了解数控机床的工作原理和编程方法，掌握数控机床的基本操作技能，并能把学到的知识应用到生产实际中去。本书共分 10 章，主要包括：数控机床的基本认识、编程基础，数控铣床、数控车床、数控钻镗床、数控电火花线切割及加工中心的编程操作，数控机床的结构、伺服系统、自动编程及应用。

本书通俗易懂，涉及面广，内容丰富，可操作性强，适合高等工科院校使用。可作为高等院校机械设计制造及其自动化专业、机电类专业、高等职业技术学院数控技术应用专业的教学用书，也可供相关专业的师生和从事相关工作的科技人员参考。

本书在编写过程中得到了中国农业大学工学院侯书林教授的大力支持和帮助，侯书林教授审阅了书稿，并提出了宝贵意见；吉林大学机械学院也对本书的编写给予了大力支持；本书还借鉴了同类书刊的长处和精华。谨在此一并表示真诚的感谢！

参加本书编写的有张洪江、侯书林、于春海、李猛、王和平、赵清来老师。全书由张洪江、李猛统稿。

由于水平有限，书中难免存在缺点和疏漏，希望广大读者批评指正。

编 者
2009 年 8 月

目 录

第 1 章 数控机床概述.....1	2.3 空间曲线曲面加工的数值计算.....33
1.1 数控机床的基本工作原理.....1	2.3.1 规则立体型面加工的数值 计算.....33
1.1.1 数控机床的组成.....1	2.3.2 空间自由曲线曲面插补 节点的数值计算.....34
1.1.2 数控机床加工的基本 工作原理.....3	2.3.3 三维加工中刀具中心位置的 计算.....36
1.1.3 数控机床加工特点.....3	思考与练习.....37
1.1.4 数控机床的应用范围.....3	第 3 章 数控编程基础.....38
1.2 数控机床分类.....4	3.1 概述.....38
1.2.1 按控制刀具与零件相对 运动轨迹分类.....4	3.1.1 数控加工程序编制的概念.....38
1.2.2 按加工方式分类.....5	3.1.2 数控加工程序的内容.....39
1.2.3 按控制坐标轴数分类.....5	3.1.3 数控程序编制的步骤.....39
1.2.4 按驱动系统的控制方式分类.....6	3.1.4 数控程序编制的方法.....40
1.3 数控插补原理.....7	3.2 数控机床坐标系.....40
1.3.1 插补方法.....7	3.2.1 标准坐标系.....40
1.3.2 基准脉冲插补.....8	3.2.2 数控机床的两种坐标系.....42
1.4 数控机床发展概况.....23	3.2.3 绝对值的确定.....45
1.4.1 工业化国家数控机床的 发展概况.....23	3.3 数控加工程序格式与标准数控代码.....46
1.4.2 我国数控机床的发展概况.....25	3.3.1 数控加工程序格式.....46
1.4.3 数控机床的发展趋势.....25	3.3.2 程序字的功能.....47
思考与练习.....26	3.4 数控机床的几个重要设定.....51
第 2 章 数控编程中的数值计算.....27	3.4.1 有关单位的设定.....51
2.1 平面轮廓切削点的计算.....28	3.4.2 与坐标有关的指令.....53
2.1.1 基点的计算.....28	思考与练习.....54
2.1.2 节点的计算.....28	第 4 章 数控铣床编程.....55
2.2 平面轮廓刀具中心位置的计算.....32	4.1 数控铣床概述.....55
2.2.1 直线段的单位法矢.....32	4.1.1 数控铣床的主要功能及 加工对象.....55
2.2.2 圆弧段的单位法矢.....33	4.1.2 数控铣床的分类.....56
2.2.3 平面曲线上某切削点的 单位法矢.....33	4.2 数控铣床常用编程指令.....57

4.2.1 快速定位和直线插补	57	6.2.6 编程举例	120
4.2.2 圆弧插补	58	6.3 图形的数学处理	122
4.2.3 刀具半径补偿 (G40, G41, G42)	61	6.3.1 选择原点及尺寸的换算	122
4.2.4 刀具长度补偿 (G43, G44, G49)	63	6.3.2 基点坐标值的计算	124
4.2.5 子程序	64	6.4 典型零件的程序编制	125
4.2.6 比例缩放指令	66	6.4.1 轴承内圈的数控加工工艺 设计及程序编制	125
4.2.7 镜像编程指令	67	6.4.2 锥孔螺母套零件的数控加工 工艺设计及程序编制	128
4.2.8 旋转镜像编程指令	68	思考与练习	133
4.3 数控铣床编程实例	70	第 7 章 数控电火花线切割编程	135
思考与练习	72	7.1 数控线切割机床加工概述	135
第 5 章 数控钻镗床与加工中心编程	76	7.1.1 数控线切割机床加工原理	135
5.1 孔加工固定循环指令	76	7.1.2 加工工艺指标	141
5.1.1 固定循环指令调用格式	77	7.2 数控线切割编程的基本方法	143
5.1.2 固定循环指令简介	77	7.2.1 数控线切割机床编程基础	143
5.2 数控钻镗床编程实例	84	7.2.2 3B 编程	144
5.3 数控加工中心概述	87	7.2.3 ISO 代码编程	146
5.3.1 加工中心的主要功能及 加工对象	87	7.2.4 典型零件的程序编制	148
5.3.2 加工中心的分类	87	思考与练习	152
5.4 数控加工中心编程的特点	89	第 8 章 图形交互式自动编程应用	154
5.4.1 一般编程的方法步骤	89	8.1 图形交互式自动编程概述	154
5.4.2 加工中心常用指令代码	89	8.1.1 图形交互式自动编程的 基本概念	154
5.5 数控加工中心编程实例	92	8.1.2 CAD/CAM 集成数控编程 系统的原理与应用	155
思考与练习	96	8.2 典型零件 CAD/CAM 实例	159
第 6 章 数控车床编程	100	思考与练习	166
6.1 数控车床编程的基础	100	第 9 章 数控机床的结构	167
6.1.1 数控车床的主要功能	100	9.1 数控机床的结构设计	167
6.1.2 工艺装备特点	101	9.1.1 数控机床结构设计的要求	167
6.1.3 对刀	102	9.1.2 提高机床的结构刚度	168
6.2 数控车床编程的基本方法	104	9.2 数控机床主轴部件	172
6.2.1 F 功能	104	9.2.1 主轴部件的结构设计	172
6.2.2 S 功能	105		
6.2.3 T 功能	105		
6.2.4 M 功能	106		
6.2.5 G 功能	106		

9.2.2 自动换刀数控铣镗床的主轴 部件	176
9.2.3 主轴的准停装置	178
9.3 进给系统的机械传动结构	179
9.3.1 设计传动齿轮副应考虑的 问题	180
9.3.2 消除传动齿轮间隙的措施	180
9.4 数控机床导轨	187
9.4.1 对导轨的基本要求	187
9.4.2 静压导轨	188
9.4.3 滚动导轨	192
9.5 回转工作台	198
9.5.1 分度工作台	198
9.5.2 数控回转工作台	202
思考与练习	206

第 10 章 数控机床的伺服系统	207
10.1 概述	207
10.1.1 伺服系统的基本要求	207
10.1.2 伺服系统的分类	209
10.2 交流伺服电动机及其工作特性	213
10.2.1 交流伺服电动机的分类	213
10.2.2 永磁式交流同步电动机	213
10.2.3 交流感应式伺服电动机	214
10.3 步进电动机及其工作特性	215
10.3.1 步进电动机工作原理	215
10.3.2 步进电动机的运行特性及 性能指标	217
10.4 直线电动机简介	219
思考与练习	219
参考文献	220

第 1 章 数控机床概述

教学提示: 根据数控机床的基本工作原理和工作特点, 数控机床可有不同的分类方法, 以突出数控机床的特点。为了满足不同加工工艺的过程, 数控机床控制系统的工作过程强调对输入的控制参数, 通常由伺服系统控制机械量进行描述, 即插补方法来实现。

教学要求: 根据数控机床的基本工作原理, 工作特点, 知道数控机床的不同分类方法, 明确数控机床控制系统描述的含义, 重点理解数控机床工作原理的概念, 包括数控系统的基本功能和数控系统的工作过程, 掌握数控系统的发展趋势, 包括计算机直接控制系统、自适应控制系统、计算机集成制造系统等。掌握典型数控机床的特点, 并能灵活地应用。

1.1 数控机床的基本工作原理

数字控制(Numerical Control, NC)简称数控, 在机床领域指用数字化信号对机床运动及其加工过程进行控制的一种自动化技术。它所控制的一般是位置、角度、速度等机械量, 但也有温度、流量、压力等物理量。

计算机数控(Computerized Numerical Control, CNC, 又称 Microcomputerized Numerical Control, MNC)是用专用计算机通过控制程序来实现部分或全部基本控制功能, 并能通过接口与各种输入/输出设备建立联系的一种自动化技术。更换不同的控制程序, 可以实现不同的控制功能。

数控机床是一种灵活、通用、能够适应产品频繁变化的柔性自动化机床。

1.1.1 数控机床的组成

数控机床主要由机床本体、数控系统、驱动装置、辅助装置等几个部分组成。

机床本体是数控机床加工运动的机械部分, 主要包括支承部件(床身、立柱)、主动部件(主轴箱)、进给运动部件(工作台滑板、刀架)等。

数控系统(CNC 装置)是数控机床的控制核心, 一般是一台专用的计算机。

驱动装置是数控机床执行机构的驱动部分, 包括主轴电动机、进给伺服电动机等。

辅助装置指数控机床的一些配套部件, 包括刀库、液压装置、气动装置、冷却系统、排屑装置、夹具、换刀机械手等。

机床数控系统的基本工作流程如图 1.1 所示。机床数控系统是由加工指令程序、计算机控制装置、可编程逻辑控制器、主轴进给驱动装置、速度控制单元及位置检测装置等组成, 其核心部分是计算机控制装置。

计算机控制装置由硬件和软件两部分组成。硬件的主体是计算机, 包括中央处理器、输入/输出部分和位置控制部分。软件有管理软件和控制软件。管理软件包括输入/输出、显示和诊断程序等; 控制软件包括译码、刀具补偿、速度控制、插补运算和位置控制等程序。

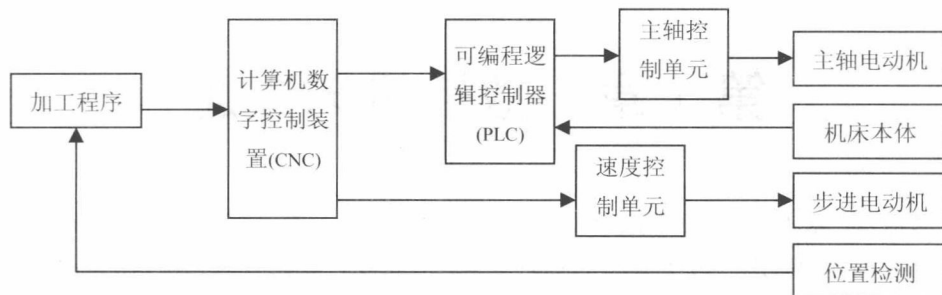


图 1.1 机床数控系统基本工作流程

1. 数控系统的基本功能

数控系统即位置控制系统，具有 3 个基本功能：

(1) 输入功能：指零件加工程序和各种参数的输入。

(2) 插补功能：在加工零件的实际轮廓或轨迹的已知点之间确定一些中间点的方法。通常在给定直线或圆弧的起点和终点之间插补中间点。插补方法主要有两种：

① 脉冲增量法。其特点是：每次插补运算产生一个进给脉冲，输出脉冲的最大速率取决于执行一次插补运算所需要的时间，这种方法适用于步进电动机驱动的开环数控系统，进给速率比较低。

② 数字增量法。其特点是：整个控制系统通过计算机形成闭环，计算机定时采样反馈的实际位置，将采样结果与插补生成的指令数据进行比较，求得误差信号，进而给出主轴进给速度指令，这种方法适用于直流、交流伺服电动机驱动的位置采样控制系统。

(3) 伺服控制。将计算机送出的位置进给脉冲或进给速度指令，经变换和放大后化为伺服电动机(步进或直、交流电动机)的转动，从而带动机床工作台移动。

2. 数控系统的工作过程

数控系统对输入的零件加工程序、控制参数、补偿数据等进行识别和译码，并执行所需要的逻辑运算，发出相应的指令脉冲，控制机床的驱动装置，操作机床实现预期的加工功能。

3. 主轴控制单元

主轴控制单元主要控制机床主轴的旋转运动。

4. 速度控制单元

进给驱动装置是由交、直流电动机、速度检测元件和速度控制元件组成。速度控制单元主要控制机床各坐标轴的切削进给运动。

5. 可编程逻辑控制器

可编程逻辑控制器是一种专为在工业环境下应用而设计的数字运算操作电子系统。可编程逻辑控制器(PLC)处于计算机控制装置与机床之间，对计算机控制装置和机床的输入/输出信号进行处理，实现辅助功能 M、主轴转速 S 及刀具功能 T 的控制和译码。即按照预先规定的逻辑顺序对诸如主轴的启动、停止、转向、转速、刀具的更换、零件的夹紧松开、

液压、冷却、润滑、气动等进行控制。

1.1.2 数控机床加工的基本工作原理

数控机床加工时,是根据零件图样要求及加工工艺过程,将所用刀具及机床各部件的移动量、速度及动作先后顺序、主轴转速、主轴旋转方向及冷却等要求,以规定的数控代码形式编制成程序单,并输入到机床专用计算机中。然后,数控系统根据输入的指令,进行编译、运算和逻辑处理,输出各种信号指令,控制机床各部分进行规定的位移和有顺序的动作,加工出各种不同形状的零件。

1.1.3 数控机床加工特点

1. 适应性强

数控机床灵活、通用、万能,可加工不同形状的零件,能完成钻、镗、铰、铰、铣削、车削、攻螺纹等加工。

2. 精度高

目前数控装置的脉冲当量(每输出一个脉冲后滑板的移动量称为脉冲当量)一般为0.001mm,高精度的数控系统可达0.0001mm。而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,一般可达0.005~0.1mm。对于中、小型数控机床,定位精度普遍可达到0.03mm,重复定位精度为0.01mm。数控机床的自动加工方式不但可避免人工操作误差,使零件加工的质量稳定,更重要的是可进行复杂曲面的加工。

3. 效率高

数控机床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10倍,甚至几十倍。

4. 减轻劳动强度、改善劳动条件

利用数控机床进行加工,只需按图样要求编制加工程序,然后输入并调试程序,安装坯件进行加工,观察监视加工过程并装卸零件。除此之外,不需要进行繁重的重复性手工操作,劳动强度与紧张程度可大为减轻,劳动条件也相应得到改善。

1.1.4 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,使用维修都有一定难度,若从最经济的方面考虑,数控机床适用于加工:

- (1) 多品种小批量零件(合理生产批量为10~100件之间);
- (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) 需要频繁改型的零件;
- (4) 钻、镗、铰、铰、攻螺纹及铣削工序联合进行的零件,如箱体、壳体等;
- (5) 价格昂贵,不允许报废的零件;

- (6) 要求百分之百检验的零件;
- (7) 需要最小生产周期的急需零件。

1.2 数控机床分类

数控机床种类很多,如铣削类、钻铰类、车削类、磨削类、线切割、加工中心等(见图 1.2),其分类方法也很多,大致有以下几种。

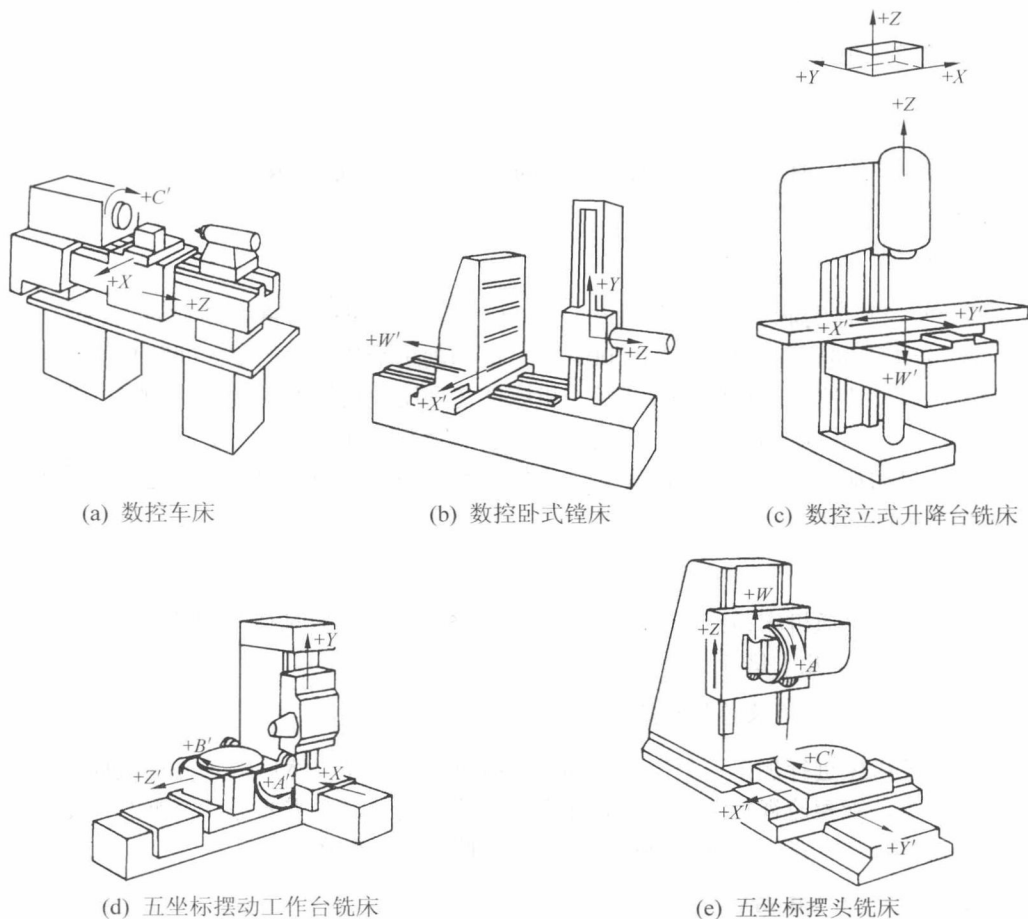


图 1.2 常用数控机床

1.2.1 按控制刀具与零件相对运动轨迹分类

1. 点位控制或位置控制数控机床

点位控制或位置控制数控机床只能控制工作台或刀具从一个位置精确地移动到另一位置,在移动过程中不进行加工,各个运动轴可以同时移动,也可以依次移动,如图 1.3(a)所示。如数控镗、钻、冲,数控点焊机及数控折弯机等均属此类机床。

2. 轮廓控制数控机床

轮廓控制数控机床能够同时对两个或两个以上坐标轴进行连续控制，具有插补功能，工作台或刀具边移动边加工，如图 1.3(b)、(c)所示，如数控铣、车、磨及加工中心等是典型的轮廓控制数控机床，数控火焰切割机、数控线切割及数控绘图机等也都采用轮廓控制系统。

1.2.2 按加工方式分类

- (1) 金属切削类：如数控车、钻、镗、铣、磨、加工中心等。
- (2) 金属成形类：如数控折弯机、弯管机、四转头压力机等。
- (3) 特殊加工类：如数控线切割、电火花、激光切割机等。
- (4) 其他类：如数控火焰切割机、三坐标测量机等。

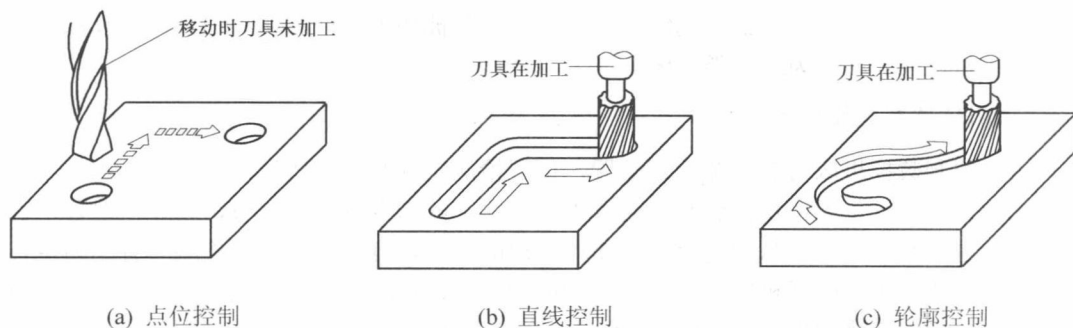


图 1.3 运动轨迹控制

1.2.3 按控制坐标轴数分类

- (1) 两坐标数控机床：两轴联动，用于加工各种曲线轮廓的回转体，如数控车床。
- (2) 三坐标数控机床：三轴联动，多用于加工曲面零件，如数控铣床、数控磨床。
- (3) 多坐标数控机床：四轴或五轴联动，多用于加工形状复杂的零件。图 1.4 所示为两种不同类的四轴联动数控机床。

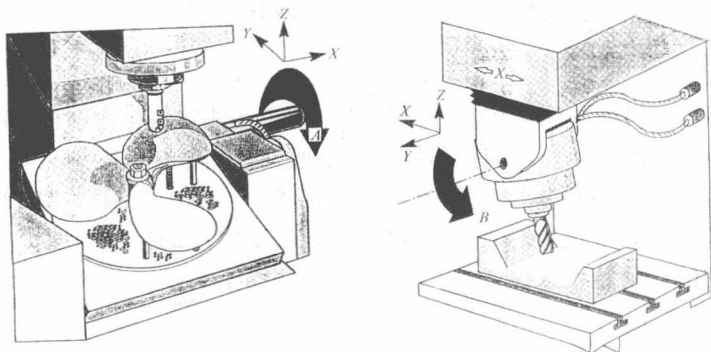


图 1.4 四轴联动数控机床

1.2.4 按驱动系统的控制方式分类

1. 开环控制数控机床

开环控制数控机床的工作原理如图 1.5 所示。



图 1.5 开环驱动控制系统

开环控制数控机床不带位置检测反馈装置，通常使用功率步进电动机或电液脉冲马达作为执行机构，数控装置输出的脉冲通过环形分配器和驱动电路，使步进电动机转过相应的步距角，再经过减速齿轮带动丝杠旋转，最后转换为移动部件的直线位移。其反应快，调试方便，比较稳定，维修简单。但系统对移动部件的误差没有补偿和校正，步进电动机的步距误差、齿轮与丝杠等的传动链误差都将反映到被加工零件的精度中去，所以精度比较低。此类数控机床多为经济类机床。

2. 闭环控制数控机床

闭环控制数控机床带有检测反馈装置，位置检测器安装在机床运动部件上，加工中将监测到的实际运行位置值反馈到数控装置中，与输入的指令位置相比较，用差值对移动部件进行控制，其精度高。从理论上说，闭环系统的控制精度主要取决于检测装置的精度，但这并不意味着可以降低机床的结构与传动链的要求，传动系统的刚性不足及间隙、导轨的爬行等各种因素将增加调试的困难，严重时会使闭环控制系统的品质下降甚至引起振荡。故闭环系统的设计和调整都有较大的难度，此类机床主要用于一些精度要求较高的镗铣床、超精车床和加工中心等。闭环控制数控机床的工作原理如图 1.6 所示。

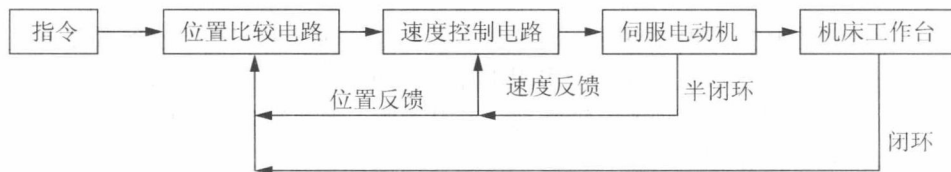


图 1.6 闭环与半闭环驱动控制系统

3. 半闭环控制数控机床

半闭环控制数控机床与闭环控制不同的是，检测元件安装在电动机的端头或丝杠的端头。该系统不是直接测量工作台的位移量，而是通过检测丝杠或电动机轴上的转角间接地测量工作台的位移量，然后反馈给数控装置。显然，半闭环控制系统的实际控制量是丝杠的转动，而由丝杠转动变换为工作台的移动，不受闭环的控制，这一部分的精度由丝杠-螺母(齿轮)副的传动精度来保证。其特点是比较稳定，调试方便，精度介于开闭环之间，被广泛采用。

1.3 数控插补原理

1.3.1 插补方法

1. 插补的基本概念

零件的形状轮廓由各种线型(如直线、圆弧、螺旋线、抛物线、自由曲线等)组成,因此控制刀具或零件的运动,使加工出的零件满足几何尺寸精度和表面粗糙度的要求,是数控系统的核心问题。如果要求刀具的运动轨迹完全符合零件形状轮廓,会使算法变得非常复杂,计算机的工作量大大增加。从理论上讲,如果已知零件的轮廓方程,如 $y=f(x)$,则 x 方向增加 Δx 时,可计算出 Δy 的值。只要合理控制 Δx 、 Δy 的值,就可以得到满足几何尺寸精度和表面粗糙度要求的零件轮廓。但用这种直接计算的方法,曲线次数越高,计算也就越复杂,占用 CPU 的时间也越多,加工效率也越低。另外,还有一些用离散数据表示的曲线、曲面等,无法用上述方法进行计算。因此,数控系统不采用这种直接计算的方法。

在实际加工过程中,常常用小段直线或圆弧来逼近(拟合)零件的轮廓曲线,在有些场合也可以用抛物线、椭圆、双曲线来逼近。所谓插补,就是指数据密化的过程,对输入数控系统的有限坐标点(例如起点、终点),计算机根据曲线的特征,运用一定的计算方法,自动地在有限坐标点之间生成一系列的坐标数据,以满足加工精度的要求。

数控系统(包括硬件 NC 系统和计算机 CNC 系统)必须具备插补功能,但采取的插补方式会有所不同。在 CNC 系统中,一般采用软件或软件和硬件相结合的方法完成插补运算,称为软件插补;在 NC 系统中,有一个专门实现插补计算的计算装置(插补器),称为硬件插补。软件插补和硬件插补的原理相同,其作用都是根据给定的信息进行计算,在计算过程中不断向各坐标轴发出相互协调的进给脉冲,使数控机床按指定的轨迹运动。

2. 插补功能的基本要求

插补计算是数控系统的主要功能之一,它直接影响数控机床的加工质量和加工效率。对插补功能的基本要求是:

(1) 必须保证插补计算的精度,插补结果没有累积误差,局部偏差不能超过允许的误差(一般小于规定的分辨率)。

(2) 对于硬件插补,要求控制电路简单可靠;对于软件插补,要求计算方法简洁,计算速度快。

(3) 控制系统运行速度快且输出脉冲均匀,使进给速度恒定且能满足加工要求。

(4) 插补计算所需的原始数据较少。

3. 插补方法的分类

根据插补运算所采用的基本原理和计算方法的不同,通常分为基准脉冲插补和数据采样插补两大类。

1) 基准脉冲插补

基准脉冲插补又称脉冲增量插补或行程标量插补,适用于以步进电动机为驱动装置的开环数控系统。其特点是每次插补结束后产生一个行程增量,以脉冲的方式输出到步进电

动机,驱动坐标轴运动。单个脉冲使坐标轴产生的移动量称为脉冲当量,一般用 δ 表示。脉冲当量是脉冲的基本单位,按加工精度选定,普通机床取 $\delta=0.01\text{mm}$,较精密的机床取 $\delta=0.005\text{mm}$ 、 0.0025mm 或 0.001mm 。由于基准脉冲插补算法只用加法和移位即可完成,故运算速度很快。一般用于中等精度(0.01mm)和中等速度($1\sim 3\text{m/min}$)的数控系统。

2) 数据采样插补

数据采样插补又称数字增量插补或时间标量插补,适用于交、直流伺服电动机驱动的闭环(或半闭环)控制系统。这类插补算法的特点是插补运算分两步进行。首先为粗插补,即在给定起点和终点的曲线之间插入若干点,用若干微小直线段来逼近给定曲线,每一微小直线段的长度 ΔL 相等,且与给定的进给速度有关。在每一插补周期中,粗插补程序被调用一次,因而每一微小直线段的长度 ΔL 与进给速度 F 和插补周期 T 成正比,即 $\Delta L = FT$ 。粗插补的特点是把给定的曲线用一组直线段来逼近。第二步为精插补,它在粗插补计算出的每一微小直线段的基础上再作“数据点的密化”工作。这一步相当于对直线的脉冲增量插补。在实际应用中,粗插补由软件完成,即通常所说的插补运算;精插补可以由软件完成,也可以由硬件完成。这类插补算法都是采用时间分割的思想,根据程序编制的进给速度,将轮廓曲线分割为采样周期的进给段(轮廓步长),即用直线或圆弧逼近轮廓曲线。

1.3.2 基准脉冲插补

基准脉冲插补最初是在 NC 装置中用硬件实现,现在在 CNC 系统中用软件来实现这种算法。其中,逐点比较插补法和数字积分插补法得到了广泛的应用。

1. 逐点比较插补法

逐点比较插补法又称代数运算法、醉步法,它是一种最早的插补算法,其原理是: CNC 系统在控制加工过程中,能逐点计算和判别刀具的运动轨迹与给定轨迹的偏差,并根据偏差控制进给轴向给定轮廓方向靠近,使加工轮廓逼近给定轮廓曲线。逐点比较法是以折线来逼近直线或圆弧曲线,它与给定的直线或圆弧之间的最大误差不超过一个脉冲当量,因此只要将脉冲当量即坐标轴进给一步的距离取得足够小,就可满足加工精度的要求。

1) 逐点比较直线插补

假设加工如图 1.7 所示第一象限的直线 OA 。直线的起点为坐标原点,直线的终点坐标 $A(x_e, y_e)$ 为已知。设 $P(x_i, y_i)$ 为任意一个加工点(动点),若 P 点正好在直线上,则

$$\frac{y_i}{x_i} = \frac{y_e}{x_e}$$

成立,即 $y_i x_e - y_e x_i = 0$;

若 P 点在直线的上方(图中 P' 点),则

$$\frac{y_i}{x_i} > \frac{y_e}{x_e}$$

成立,即 $y_i x_e - y_e x_i > 0$;

若 P 点在直线的下方(图中 P'' 点),则

$$\frac{y_i}{x_i} < \frac{y_e}{x_e}$$

成立,即 $y_i x_e - y_e x_i < 0$ 。

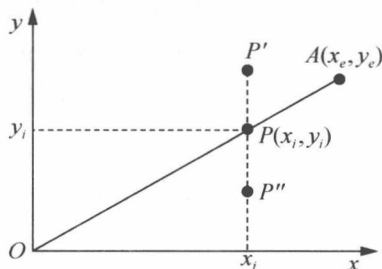


图 1.7 逐点比较直线插补

定义直线插补的偏差判别式 F_i 为

$$F_i = y_i x_e - y_e x_i$$

若 $F_i = 0$ ，则表明 P 点在直线 OA 上；

若 $F_i > 0$ ，则表明 P 点在直线 OA 的上方；

若 $F_i < 0$ ，则表明 P 点在直线 OA 的下方。

从图中可以看出：

当 $F_i \geq 0$ 时，刀具应向 $+x$ 方向进给一步，以逼近给定直线，此时的坐标值为

$$\begin{cases} x_{i+1} = x_i + 1 \\ y_{i+1} = y_i \end{cases}$$

则新加工点的偏差为

$$\begin{aligned} F_{i+1} &= y_{i+1} x_e - y_e x_{i+1} = y_i x_e - y_e (x_i + 1) \\ &= y_i x_e - y_e x_i - y_e = F_i - y_e \end{aligned} \quad (1-1)$$

当 $F_i < 0$ 时，刀具应向 $+y$ 方向进给一步，此时的坐标值为

$$\begin{cases} x_{i+1} = x_i \\ y_{i+1} = y_i + 1 \end{cases}$$

则新加工点的偏差为

$$\begin{aligned} F_{i+1} &= y_{i+1} x_e - y_e x_{i+1} = (y_i + 1) x_e - y_e x_i \\ &= y_i x_e + x_e - y_e x_i = F_i + x_e \end{aligned} \quad (1-2)$$

进给一步后，由前一点的加工偏差和终点坐标 (x_e, y_e) 可计算出新加工点的偏差，再根据新加工点偏差判别式的符号决定下一步的走向。如此下去，直到两个方向的坐标值与终点坐标 (x_e, y_e) 相等，发出终点到达信号，该直线段插补结束。

从上述过程可以看出，逐点比较法中刀具每进给一步都要完成以下 4 项内容：

(1) 偏差符号判别。确定加工点是在规定零件轮廓线外侧还是在内侧，即判断是否 $F \geq 0$ 。

(2) 坐标进给。根据偏差情况，控制 x 坐标轴或 y 坐标轴进给一步，使加工点向零件轮廓线靠拢，以缩小偏差。当 $F \geq 0$ 时，向 $+x$ 方向进给一步；当 $F < 0$ 时，向 $+y$ 方向进给一步。

(3) 新偏差计算。进给一步后，计算新加工点与零件轮廓的偏差，作为下一步偏差判别的依据。计算公式为式(1-1)或式(1-2)。

(4) 终点判别。判别终点的方法有两种：一是计算出 x 和 y 方向坐标所要进给的总步数，

即 $\sum N = (|x_e| - x_0) + (|y_e| - y_0) = |x_e| + |y_e|$ ，每向 x 或 y 方向进给一步，均进行 $\sum N$ 减 1 计算，当 $\sum N$ 减至零时即到终点，停止插补。另一种方法是分别求出 x 坐标和 y 坐标应进给的步数，即 $|x_e|$ 和 $|y_e|$ 的值，当沿 x 方向进给一步时， $N_x - 1$ ；当沿 y 方向进给一步时， $N_y - 1$ ；当 N_x 和 N_y 都为零时，达到终点，停止插补。

【例 1.1】 设在第一象限插补直线段 OA ，起点为坐标原点 $O(0, 0)$ ，终点为 $A(8, 6)$ 。试用点比较法进行插补，并画出插补轨迹。

解：用第一种终点判别法插补完这段直线，刀具沿 x 、 y 轴应进给的总步数为

$$\sum N = |x_e| + |y_e| = 8 + 6 = 14$$

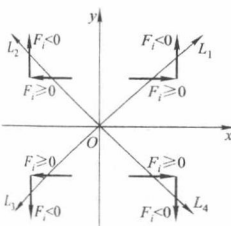
插补运算过程如表 1-1 所示。

表 1-1 逐点比较插补运算过程

偏差判断	进给方向	新偏差计算	终点判别
$F_0 = 0$	$+x$	$F_1 = F_0 - y_e = 0 - 6 = -6$	$\sum N = 14 - 1 = 13$
$F_1 = -6 < 0$	$+y$	$F_2 = F_1 + x_e = -6 + 8 = 2$	$\sum N = 13 - 1 = 12$
$F_2 = 2 > 0$	$+x$	$F_3 = F_2 - y_e = 2 - 6 = -4$	$\sum N = 12 - 1 = 11$
$F_3 = -4 < 0$	$+y$	$F_4 = F_3 + x_e = -4 + 8 = 4$	$\sum N = 11 - 1 = 10$
$F_4 = 4 > 0$	$+x$	$F_5 = F_4 - y_e = 4 - 6 = -2$	$\sum N = 10 - 1 = 9$
$F_5 = -2 < 0$	$+y$	$F_6 = F_5 + x_e = -2 + 8 = 6$	$\sum N = 9 - 1 = 8$
$F_6 = 6 > 0$	$+x$	$F_7 = F_6 - y_e = 6 - 6 = 0$	$\sum N = 8 - 1 = 7$
$F_7 = 0$	$+x$	$F_8 = F_7 - y_e = 0 - 6 = -6$	$\sum N = 7 - 1 = 6$
$F_8 = -6 < 0$	$+y$	$F_9 = F_8 + x_e = -6 + 8 = 2$	$\sum N = 6 - 1 = 5$
$F_9 = 2 > 0$	$+x$	$F_{10} = F_9 - y_e = 2 - 6 = -4$	$\sum N = 5 - 1 = 4$
$F_{10} = -4 < 0$	$+y$	$F_{11} = F_{10} + x_e = -4 + 8 = 4$	$\sum N = 4 - 1 = 3$
$F_{11} = 4 > 0$	$+x$	$F_{12} = F_{11} - y_e = 4 - 6 = -2$	$\sum N = 3 - 1 = 2$
$F_{12} = -2 < 0$	$+y$	$F_{13} = F_{12} + x_e = -2 + 8 = 6$	$\sum N = 2 - 1 = 1$
$F_{13} = 6 > 0$	$+x$	$F_{14} = F_{13} - y_e = 6 - 6 = 0$	$\sum N = 1 - 1 = 0$

上面介绍的是第一象限的插补过程。对于其他象限的直线进行插补时，可以用相同的原理获得。表 1-2 列出了 4 个象限的直线插补时，偏差和进给脉冲方向。计算时，终点坐标 x_e 、 y_e 和加工点坐标均取绝对值。

表 1-2 直线插补计算公式和进给方向

	线型	$F_i \geq 0$ 时，进给方向	$F_i < 0$ 时，进给方向	偏差计算公式 $F_i \geq 0$ 时： $F_{i+1} = F_i - y_e$ $F_i < 0$ 时： $F_{i+1} = F_i + x_e$
	L_1	$+x$	$+y$	
	L_2	$-x$	$+y$	
	L_3	$-x$	$-y$	
	L_4	$+x$	$-y$	