

高职高专机电工程类规划教材

数控编程 与加工技术

张晓东 王小玲 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



高职高专机电工程类规划教材

数控编程与加工技术

主 编 张晓东 王小玲
参 编 王执忠 聂小春 田先亮
主 审 姜莉莉

图书在版编目(CIP)数据

数控编程与加工技术 / 张晓东, 王小玲主编. — 北京: 机械工业出版社, 2008.1

2008.1

高职高专机电工程类规划教材

ISBN 978-7-111-25912-2

I. 数… II. ①张… ②王… III. ①数控机床—教材 ②数控加工—教材 IV. TG659

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第182415号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑: 李欣 封面设计: 王静

文字编辑: 王静 责任印制: 杨 静

北京理工大学印刷厂印刷(兴华路11号)

2008年1月第1版第1次印刷

184mm×260mm·12.52印张·378千字

0 001—4 000册

标准书号: ISBN 978-7-111-25912-2

定价: 24.00元



机械工业出版社

本书以数控加工工艺和数控编程为主线,介绍数控机床的基本概念、原理及结构知识。其中,第一章为数控机床的基本知识,第二章为数控编程基础,第三章为数控加工工艺规程,第四、五、六章为数控车床、铣床和加工中心的程序编制,第七章为数控技术的发展趋势。其中第三章的主要对象是非机制专业的读者,机制专业的读者可以只学习此章后两节。教材每章中都有大量的实例和习题,以方便读者自学。

本书主要作为高等职业技术学院“数控技术应用”、“机电一体化”、“模具设计与制造”等专业的教材,也可作为职工大学、中专、技工学校的教材,并可供有关技术人员、数控机床操作人员学习、参考和培训使用。

图书在版编目(CIP)数据

数控编程与加工技术/张晓东,王小玲主编. —北京:机械工业出版社, 2008.1

高职高专机电工程类规划教材

ISBN 978-7-111-22915-5

I. 数… II. ①张…②王… III. ①数控机床—程序设计—高等学校: 技术学校—教材②数控机床—加工—高等学校: 技术学校—教材
IV. TG659

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第182412号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:王海峰 责任编辑:李欣欣 责任校对:李秋荣

封面设计:马精明 责任印制:杨曦

北京机工印刷厂印刷(兴文装订厂装订)

2008年1月第1版第1次印刷

184mm×260mm·15.25印张·378千字

0 001—4 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-22915-5

定价:24.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
销售服务热线电话:(010) 68326294
购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643
编辑热线电话:(010) 68354423
封面无防伪标均为盗版

前 言

“数控编程与加工技术”是一门集理论性、实践性、灵活性、综合性于一体的专业课程。学习前要求具备切削原理、加工工艺、工艺处理、数值计算、刀具等基础知识,本课程还涉及毛坯、金属材料、热处理、极限配合及加工设备等多方面的知识。

本书试图将传统的“金属切削原理与刀具”和“数控加工工艺”等先行课程的主要内容进行必要的整合,以形成新的课程体系,从而适应现在高职高专推行的“2+1”基本教学要求。

本书的主要特点:一是根据高等职业教育的培养目标和教育特点,将数控加工必备的数控加工工艺规程的制定与数控编程有机地联系在一起,培养学生正确、合理编制零件数控加工程序的能力;二是选材注意实用性和代表性,尤其典型零件的编程实例是从相应工种的中级操作工和高级操作工试题库中选材,全面介绍中等复杂零件从分析零件图到编制数控加工程序的整个过程,突出了数控加工工艺的分析。

全书以数控加工工艺和数控编程为主线,介绍数控机床的基本概念、原理及其结构知识。其中,第一章为数控机床的基本知识,第二章为数控编程基础,第三章为数控加工工艺规程,第四、五、六章为数控车床、铣床和加工中心的程序编制,第七章为数控技术的发展趋势。其中第三章的主要对象是非机制专业的读者,机制专业的读者可以只学习此章后两节。教材每章中都有大量的实例和习题,旨在方便读者自学。

本书在体系上力求新颖,文字力求准确,选图力求简练;在内容的取舍与深度的把握上,注重重点突出,理论联系实际,并注重学生在编程技术应用能力与工程素养两方面的培养。

本书由广东白云学院张晓东、广州市技师学院王小玲任主编。全书共七章,其中第一章的第一节、第三章由张晓东编写;第二章、第五章、第六章的前四节由王小玲编写;第一章的第二节和第三节、第六章的第五节由王执忠编写;第四章由聂小春编写;第七章由田先亮编写。

本书由广东工业大学姜莉莉副教授主审,她对全书进行了仔细审阅,并提出了许多宝贵的修改意见。

本书在编写过程中得到了李龙根、黄春曼和李彦霞等老师以及北京精雕科技有限公司魏海兵工程师的大力帮助,在此对所有帮助过本书编写的人及本书参考文献的作者表示衷心的感谢。

由于编者水平和经验有限,本书虽经反复修改、审校,但仍可能有欠妥或疏漏之处,恳请广大读者和同仁批评、指正,以使本书更加完善。

编 者

目 录

前言

第一章 数控机床的基本知识	1
第一节 概述	1
第二节 数控机床的数控系统	6
第三节 数控机床的伺服系统	14
思考题与习题	18
第二章 数控编程基础	19
第一节 数控编程概述	19
第二节 数控加工程序的结构与格式	21
第三节 数控机床的坐标系	25
第四节 数控程序的指令代码概述	30
思考题与习题	35
第三章 数控加工工艺规程	37
第一节 机械加工工艺基础	37
第二节 数控加工工艺概述	51
第三节 数控加工工艺规程的制定	53
第四节 数控编程中的数学处理	72
第五节 数控加工工艺设计实例	76
思考题与习题	78
第四章 数控车床的程序编制	79
第一节 数控车床的功能与分类	79
第二节 数控车床的编程特点	83
第三节 GSK980T 系统的数控车床编程指令概述	83
第四节 GSK980T 系统的数控车床编程	85
第五节 数控车床编程实例	110

第六节 华中 HNC-21T 系统编程介绍	126
思考题与习题	129

第五章 数控铣床的程序编制	131
第一节 数控铣床概述	131
第二节 数控铣床编程中的工艺处理	133
第三节 FANUC Oi-MA 系统的数控铣床编程概述	147
第四节 FANUC Oi-MA 系统的数控铣床的编程指令	150
第五节 数控铣床手工编程实例	184
思考题与习题	190

第六章 加工中心的程序编制	192
第一节 加工中心概述	192
第二节 加工中心的编程特点	198
第三节 FANUC Oi-MA 系统的加工中心编程指令	199
第四节 加工中心编程综合实例	213
第五节 SINUMERIK802S 系统的编程介绍	216
思考题与习题	224

第七章 数控技术的发展趋势	225
第一节 数控系统与数控机床的发展趋势	225
第二节 计算机辅助数控编程	230
思考题与习题	239

参考文献	240
------------	-----

第一章 数控机床的基本知识

第一节 概述

制造业是所有从事制造的企业机构的总体，它是一个国家国民经济的支柱产业，也是一个国家综合国力的重要体现。制造业是我国入世后有竞争优势的行业之一，它一方面为全社会生产日用消费品创造价值，另一方面为国民经济各个部门提供生产资料和设备。据估计，工业化国家约 70% ~ 80% 的物质财富来自制造业，约有 1/4 的人口从事各种形式的制造活动。可见，制造业对一个国家的经济地位和政治地位具有至关重要的影响，在 21 世纪的工业生产中具有决定性的地位与作用。

社会经济的发展对制造业的要求不断提高，随着科学技术特别是计算机技术的高速发展，传统的制造业已发生了根本性的变革，表现为产品的更新换代越来越快，生产批量越来越小、生产周期也越来越短，但产品的精度却越来越高。为适应这些变化，以数控技术为主的现代制造技术发挥了重要作用。因此，学好数控方面专业技术已成为当代机械工业从业人员的必备条件。

一、基本概念

1. 数控技术

数字控制技术就是用数字指令对一台或多台机械设备进行自动控制的技术，简称数控 (Numerical Control, 简称 NC)。

2. 数控机床

采用数控技术进行控制的机床称为数控机床 (Numerical Control Machine Tools)。

3. 数控加工

数控加工是指在数控机床上进行零件加工的一种工艺方法，数控加工的实质就是数控机床按照事先编制好的加工程序，自动地对工件进行加工。

4. 数控编程

数控编程 (NC Programming) 是指编制数控机床进行零件加工所用程序的过程。

数控机床是数控加工的硬件基础，其性能对加工效率、精度等方面具有决定性的影响。零件加工程序的编制 (数控编程) 是实现数控加工的重要环节，特别是对于复杂零件的加工。数控编程技术涉及制造工艺、计算机技术、数学、计算机几何、微分几何、人工智能等众多学科领域知识，它所追求的目标是更有效地获得满足各种零件加工要求的高质量数控加工程序，以便充分地发挥数控机床的性能，获得更高的加工效率与加工质量。

二、数控机床的组成

如图 1-1 所示，数控机床主要由输入/输出装置、计算机数控 (CNC) 系统、伺服系统和机床本体四部分组成。

1. 输入/输出装置

输入/输出装置主要用于实现编制程序、输入程序、输入数据，以及显示、存储和打印

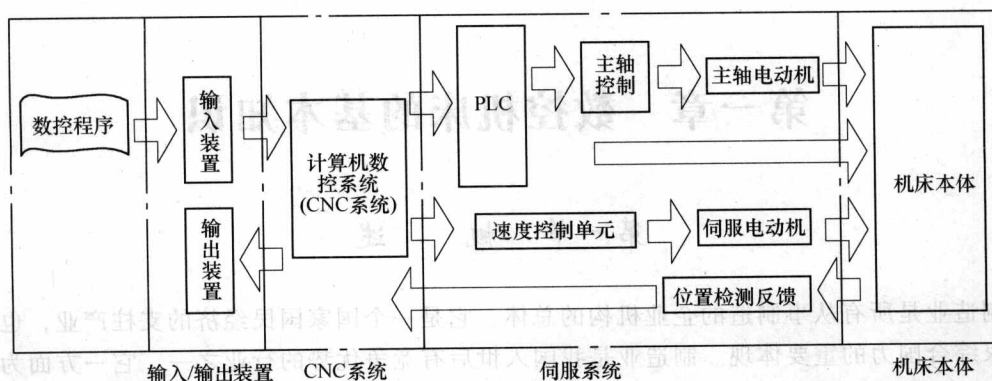


图 1-1 数控机床的基本结构框图

等功能，常用的输入/输出装置有键盘、软盘、显示器等，高级的数控机床还配有一套自动编程机或 CAD/CAM 系统。

2. 计算机数控系统

数控系统是数控机床的“大脑”和“核心”，它的功能是根据输入的程序和数据，经数控系统中的系统软件或逻辑电路进行译码、运算和逻辑处理后，发出相应的各种信号和指令给伺服系统。数控系统通常由一台通用或专用计算机、输入/输出接口，以及辅助控制装置等部分组成。

辅助控制装置主要完成与逻辑运算有关的动作，包括完成程序中的 M、S、T 指令等辅助功能所规定的动作（如主轴电动机的起停、冷却泵的开关等），对机床的状态进行监视（如监测是否超行程、电动机是否过热等），以及对操作面板的开关、按键和按钮的状态进行扫描。辅助控制装置的这些工作通常与机床的强电部分有关，控制对象是继电器、交流接触器、电磁阀等执行元件，控制的往往是开关量信号。

由于可编程序控制器（PLC）具有响应快、性能可靠、易于编程和修改等优点，并可直接驱动机床电器，目前已普遍用作辅助控制装置。CNC 和 PLC 协调配合，共同完成对数控机床的控制。用于数控机床的 PLC 一般分为两类：一类是 CNC 的生产厂家为实现数控机床的顺序控制，而将 CNC 和 PLC 综合起来设计，称为内装型（或集成型）PLC，内装型 PLC 是 CNC 装置的一部分；另一类是以独立专业化的 PLC 生产厂家的产品来实现顺序控制功能，称为独立型（或外装型）PLC。

3. 伺服系统

伺服系统是机床工作的动力装置，包括伺服单元和驱动装置两大部分。伺服系统接收来自数控系统的指令信息，并按照指令信息的要求驱动机床的运动部件或执行部分，以加工出符合要求的零件。指令信息是以脉冲信息体现的，每一脉冲使机床运动部件产生的位移量叫脉冲当量。

伺服系统有开环、半闭环和闭环之分。在半闭环和闭环伺服系统中，还需配有位置检测装置，直接或间接测量执行部件的实际位移量，并将其转变成电信号反馈给 CNC 装置，供 CNC 装置与指令值比较产生信号，以控制机床向消除该误差的方向运动。

4. 机床本体

机床本体是数控机床完成加工运动的实际机械部件，它是在原普通机床的基础上改进而

得到的，具有以下特点：

- 1) 采用了高性能的主轴及伺服传动系统，机械传动结构简化，传动链较短。
- 2) 机械结构具有较高的刚度、阻尼精度及耐磨性，热变形小。
- 3) 更多地采用高效传动部件，如滚珠丝杠、直线滚动导轨等。

此外还有一些辅助装置，如冷却、润滑、转位和夹紧装置等。对加工中心类数控机床，还有存放刀具的刀库、交换刀具的机械手等部件。与传统机床相比，数控机床的外部造型、整体布局、传动系统、刀具系统的部件结构以及操作机构等都发生了很大的变化，这种变化的目的是为了满足不同数控技术的要求和充分发挥数控机床的特点。

三、数控机床的分类

1. 按工艺用途分类

(1) 金属切削类数控机床 这类数控机床包括数控车床、数控铣床、数控镗床、数控磨床、数控钻床、数控切断机床以及加工中心等。据调查，在金属切削机床中除插床外，国内外都已开发了相应的数控机床，而且品种越来越多。

(2) 金属成形类数控机床 这类数控机床包括数控板料折弯机、数控直角剪板机、数控冲床、数控弯管机、数控压力机等。这类机床起步较晚，但目前发展很快。

(3) 特种加工类数控机床 这类数控机床包括数控线（电极）切割机床、数控电火花切割机床、数控电火花成形机床、带有自动换电极的电加工中心、数控激光切割机床、数控激光板材成形机床、数控等离子切割机床、数控火焰切割机等。

(4) 其他类型的数控机床 其他类型的数控机床包括数控三坐标测量机等。

2. 按控制运动的轨迹分类

(1) 点位控制数控机床 这类数控机床只控制运动部件从一点移动到另一点的准确定位，即只保证行程终点的坐标值。而对点到点之间的移动速度和运动轨迹没有严格要求，可以沿多个坐标同时移动，也可以沿各个坐标先后移动。在移动过程中，刀具不进行切削加工，如数控钻床、数控冲床、数控坐标镗床和数控测量机等。

(2) 直线控制数控机床 这类数控机床不仅要控制点到点的准确定位，而且要控制两点之间移动的轨迹，使其为一条直线，且要求在运动过程中刀具按规定的进给速度进行切削，如简易数控车床、数控镗铣床和数控磨床等。

(3) 轮廓控制数控机床 这类机床又叫连续控制或多坐标联动数控机床，其特点是能够对两个或两个以上运动坐标轴的位移及速度进行连续相关的控制，使刀具和工件按规定的平面或空间轮廓轨迹进行相对运动，从而加工出合格的产品。这类机床的数控装置一般要求有直线和圆弧插补功能，有较高速度的数字运算和信息处理功能，以便加工出形状复杂的零件。目前，大多数数控机床，如数控车床、铣床、磨床、加工中心，以及其他数控设备（如数控绘图机、测量机等）均具有轮廓控制功能。

3. 按控制轴数和联动轴数分类

控制轴数和与工件成形有关的运动数相联系，如某数控铣床有工作台沿 X、Y 向的直线运动和主轴箱沿 Z 向的运动，机床上的运动越多，控制轴数就越多，功能就越强，机床的复杂程度和技术含量也就越高。实现了对机床运动的控制并不意味着就可以加工任何零件，在许多情况下，需要对机床的多个运动同时、协调地进行控制，才能达到加工要求，即同时控制多个轴。这就是所谓的联动轴。联动轴数越多，机床控制和编程难度就越大，控制轴数和

联动轴数是表达机床加工能力的重要参数。

按照控制轴数,数控机床可分为两轴数控机床、三轴数控机床以及多轴数控机床。控制轴数有时也称为坐标数,因此也称两坐标数控机床、三坐标数控机床以及多坐标数控机床。

按照联动轴数,数控机床可分为两轴联动、两轴半联动、三轴联动以及多轴联动等。两轴半联动是指三个主要控制轴(X、Y、Z轴)中,任意两个轴联动,另一个是点位或直线控制。一般数控机床的联动轴数少于控制轴数。

4. 按数控机床的功能水平分类

按功能水平分类,可以把数控机床分为高、中、低档三类。该种分法没有一个确切的定义,但可以给人们一个清晰的概念。

(1) 低档型数控机床 低档型数控机床又称为经济型数控机床或简易型数控机床。经济型数控机床的一般含义指的是用单片机进行控制,机械部分是在普通机床的基础上改进设计的机床。它结构简单,成本较低,但自动化程度较低,功能都较差,仅能满足一般精度要求的加工,能加工形状较简单的零件。不同时期、不同国家对经济型数控的定义是不一样的。经济型数控机床是根据实际机床的使用要求,合理地简化系统功能、降低成本的产物。

(2) 中档型数控机床 区别于经济型数控机床,通常把功能较齐全、价格适中的数控机床称为中档型数控机床,也称为普及型数控机床,或称为全功能型数控机床或标准型数控机床。

(3) 高档型数控机床 高档型数控机床是指能加工复杂形状工件的多轴控制或工序集中、自动化程度高、高度柔性化的数控机床。

四、数控机床加工零件的过程

普通金属切削机床加工零件,是操作者根据图样要求手动控制机床操作系统,不断改变刀具与工件相对运动参数(位置、速度等)、使刀具从工件上切除多余材料,最终获得符合质量要求的合格零件。在数控机床上加工零件过程,如图1-2所示。

1. 准备阶段

根据加工零件的图样,确定有关加工数据(刀具轨迹坐标点、加工的切削用量、刀具尺寸信息等),根据工艺方案,选用夹具、选择刀具类型等,以及确定有关其他辅助信息。

2. 编程阶段

根据加工工艺信息,用机床数控系统能识别的语言编写数控加工程序,并填写程序单。程序就是对加工工艺过程的描述。

3. 准备信息载体

根据已编好的程序单,将程序存放在信息载体(如磁盘等)上,信息载体上存储着零件加工所需要的全部信息。目前,随着计算机网络技术的发展,可由计算机通过网络直接与机床数控系统通信。

4. 加工阶段

当执行程序时,机床NC系统将程序译码、寄存和运算,向机床伺服机构发出运动指令,以驱动机床的各运动部件,自动完成对工件的加工。



图 1-2 数控机床加工零件的过程

五、数控机床的特点和应用范围

1. 数控机床的特点

从宏观上看,同工艺类型的数控机床加工与普通机床加工并没有本质的区别,但数控机床本身具有高精度、高速度、高性能、自动化、柔性化、智能化等一系列特征,因此必然在加工使用中表现出一些新的特点。

(1) 具有复杂形状加工的能力 复杂形状零件常用于飞机、汽车、船舶、模具、动力设备和国防军工等制造部门,其加工质量直接影响整机产品的性能。数控加工运动的任意可控性使其能完成普通加工方法难以完成或者无法进行的复杂型面加工。

(2) 高质量 数控加工是用数字程序控制来实现自动加工,排除了人为误差因素,且加工误差还可以由数控系统通过软件技术进行补偿校正,因此,采用数控加工可以提高零件加工精度和产品质量。

(3) 高效率 数控机床可有效地减少零件的加工时间和辅助时间,数控机床的主轴转速和进给量的范围大,允许机床进行大切削量的强力切削。数控机床目前正进入高速加工时代,数控机床移动部件的快速移动和定位及高速切削加工,减少了半成品的工序间周转时间,提高了生产效率。与采用普通机床加工相比,采用数控加工一般可提高生产率2~3倍,在加工复杂零件时生产率可提高十几倍甚至几十倍,特别是五面体加工中心和柔性制造单元等设备,零件一次装夹后能完成几乎所有表面的加工,不仅可消除多次装夹引起的定位误差,还可大大减少加工辅助操作,使加工效率进一步提高。

(4) 高柔性 只需改变零件程序即可适应不同品种零件的加工,且几乎不需要制造专用工装夹具,因而加工柔性好,有利于缩短产品的研制与生产周期,适应多品种、中小批量的现代生产需要。

(5) 改善劳动条件 数控机床加工前经调整后,输入程序并启动,机床就能自动连续地进行加工,直至加工结束。操作者主要进行程序输入、编辑、装卸零件、刀具准备、观测加工状态、零件检验等操作,不需要进行繁重的重复性手工操作,劳动强度和紧张程度大为改善,劳动条件也相应得到改善,机床操作者的劳动趋于智力型工作。另外,机床一般是封闭式加工,清洁且安全。

(6) 有利于生产管理现代化 数控机床的加工,可预先精确估计加工时间,所使用的刀具、夹具可进行规范化、现代化管理。数控机床使用数字信号与标准代码为控制信息,易于实现加工信息的标准化。数控加工技术的应用,使机械加工的大量前期准备工作与机械加工过程联为一体,使零件的计算机辅助设计(Computer Aided Design,简称CAD)、计算机辅助工艺规划(Computer Aided Process Planning,简称CAPP)和计算机辅助制造(Computer Aided Manufacturing,简称CAM)的一体化成为现实,有利于实现现代化的生产管理。

2. 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,但数控机床是一种高度机电一体化产品,技术含量高,成本高,使用和维修都有一定难度。若从最经济的角度考虑,数控机床适用于加工多品种小批量零件、形状复杂(如用数学方法定义的复杂曲线、曲面轮廓)或加工精度要求高的零件、需频繁换型的零件、价值高的零件、需最小生产周期的急需零件。

第二节 数控机床的数控系统

一、数控系统的组成

数控系统是数控机床的控制核心。现在的数控系统通常是计算机数控（Computer Numerical Control，简称 CNC）系统，即用计算机控制加工功能，实现数值控制。数控系统由专用软件与硬件两大部分组成，软件在硬件支持下运行。

（一）数控系统的软件

CNC 系统软件可分为管理软件与控制软件两部分。管理软件包括零件程序的输入/输出、状态显示、故障诊断和通信等功能软件；控制软件包括译码、刀具补偿、速度处理、插补运算和位置控制等功能软件，如图 1-3 所示。

CNC 系统软件具有多任务并行、多重实时中断处理的特点。

（二）数控系统的硬件

大多数 CNC 系统现在都由微处理器构成，故也可称为微处理器数控系统（MNC），一般由中央处理单元（CPU）和总线、存储器（ROM、RAM）、输入/输出（I/O）接口电路及相应的外部设备、PLC、主轴控制单元、速度进给控制单元等组成。



图 1-3 CNC 系统软件的组成

1. CNC 系统的硬件结构

按组成 CNC 装置的电路板结构特点专用计算机数控系统可分为大板式结构和模块化结构两类；按 CNC 装置内微处理器（CPU）数量，可分为单微处理机结构和多微处理机结构。

（1）单微处理机结构 这种结构只有一个微处理机，采用集中控制、分时方法处理数控的各个任务。在这种单微机结构中，所有的数控功能和管理功能都由一个微处理机来完成，因此 CNC 装置的功能将受到微处理器的字长、数据宽度、寻址能力和运算速度等因素的影响和限制。

（2）多微处理机结构 在多微处理机结构中，有两个或两个以上的微处理机构成处理部件，处理部件之间采用紧耦合，有集中的操作系统，并共享资源。有些多微处理机结构则有两个或两个以上的微处理机构成的功能模块，功能模块之间采用松耦合，有多重操作系统，能有效地实现并行处理。这种结构中的各处理机分别承担一定的任务，通过公共存储器或公用总线进行协调，实现各微处理机间的互联和通信。

（3）大板式结构 大板式结构 CNC 系统的 CNC 装置由主电路板、位置控制板、PLC 板、图形控制板和电源单元等组成。主电路板是大印制电路板，其他电路是小印制电路板，它们插在大印制电路板上的插槽内，共同构成 CNC 装置。

（4）功能模块式结构 在采用功能模块式结构的 CNC 装置中，整个 CNC 装置按功能划分为各模块。硬件和软件的设计都采用模块化设计方法，即每个功能模块被做成尺寸相同的印制电路板（称功能模块），而相应功能模块的控制软件也模块化。这样形成一个“交钥匙”CNC 系统产品系列，用户只要按需要选用各种控制单元母板及所需功能模板，再将各功能模板插入控制单元母板的槽内，就搭成了自己需要的 CNC 系统控制装置。另外，机床

操作面板的按钮箱（台）也是标准化的，上面有由用户定义的按键。用户只要按产品的型号、功能把各功能模块、外设、相应的电缆（带插头）及按钮箱（机床操作面板及 MDI、CRT）购买回来，经组装连接便可，从而大大方便了用户使用。

二、插补

在数控机床中，刀具是一步一步移动的，刀具移动一步的距离称为脉冲当量，脉冲当量是刀具所能移动的最小单位。刀具的运动轨迹是折线，而不是光滑的曲线。刀具沿什么样的折线进给，由机床的数控系统确定。数控系统按一定方法确定刀具运动轨迹的过程叫做插补，所依据的方法叫做插补方法。

根据输出信号方式，插补方法可分为脉冲插补法和增量插补法，脉冲插补法输出的是脉冲序列，如逐点比较法和数字积分法；增量插补法输出的是增量，如数据采样法。

早期数控机床广泛采用的是逐点比较插补法，通过了解其插补原理与方法有助于理解数控系统的控制思想和发展历程，因此这里以逐点比较插补法说明插补的原理。

顾名思义，逐点比较法就是每走一步，都要将加工点的坐标与图形轨迹相比较，判断偏差，然后决定下一步的走向，从而缩小偏差。它能实现直线插补、圆弧插补及其他曲线插补，运算直观，插补误差不大于一个脉冲当量，脉冲输出均匀，调节方便。

每个插补循环由偏差判别、进给、偏差函数计算和终点判别四个步骤组成。

1. 逐点比较法直线插补

(1) 偏差函数的构造 如图 1-4 所示，以第一象限的直线段为例。编程时给出要加工直线的起点和终点，若以直线的起点为坐标原点，则终点坐标为 (X_e, Y_e) ，点 $P(X, Y)$ 表示刀具的位置。

若点 P 恰好在直线上，则下式成立

$$Y/X = Y_e/X_e, \text{ 即 } XY_e - YX_e = 0$$

若点 P 在直线上方，则

$$Y/X > Y_e/X_e, \text{ 即 } XY_e - YX_e > 0$$

若点 P 在直线下方，则

$$Y/X < Y_e/X_e, \text{ 即 } XY_e - YX_e < 0$$

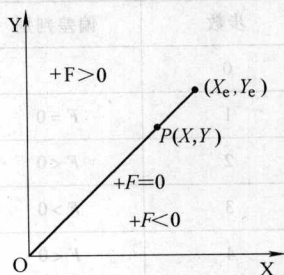


图 1-4 偏差函数构造

由上所述，可以取函数 $F = XY_e - YX_e$ 作为偏差判别的一个函数，此函数称为偏差函数。由偏差函数 $F(X, Y)$ 的数值就可以判别当前点与直线的相对位置，即

当 $F(X, Y) = 0$ 时，刀具在直线上；

当 $F(X, Y) > 0$ 时，刀具在直线上方；

当 $F(X, Y) < 0$ 时，刀具在直线下方。

(2) 偏差函数的递推计算 采用偏差函数的递推式（迭代式），即由前一点计算后一点。设点 (X_m, Y_m) 为当前所在位置，其 F 值为 $F_m = X_e Y_m - X_m Y_e$ 。

若 $F_m \geq 0$ ，沿 $+X$ 方向走一步，则新的坐标和偏差为

$$X_{m+1} = X_m + 1, Y_{m+1} = Y_m$$

$$F_{m+1} = X_e Y_m - (X_m + 1) Y_e = X_e Y_m - X_m Y_e - Y_e = F_m - Y_e$$

若 $F_m < 0$ ，沿 $+Y$ 方向走一步，则新的坐标和偏差为

$$X_{m+1} = X_m, Y_{m+1} = Y_m + 1$$

$$F_{m+1} = X_e(Y_m + 1) - X_m Y_e = X_e + X_e Y_m - X_m Y_e = F_m + X_e$$

(3) 终点判别 刀具每进给一步,都要进行一次终点判别,若已经到达终点,插补运算停止,并发出停机或转换新程序段的信号,否则继续进行插补循环。终点判别通常采用以下两种方法。

1) 总步长法。将被插补直线在两个坐标轴方向上应走的总步数求出,即 $\Sigma = |X_e| + |Y_e|$,刀具每进给一步,就执行 $\Sigma - 1 \rightarrow \Sigma$,即从总步数中减去1,这样当总步数减到零时即表示已到达终点。

2) 终点坐标法。刀具每进给一步,就将动点坐标与终点坐标进行比较,即判别 $X_m - X_e = 0$ 和 $Y_m - Y_e = 0$ 是否成立,若等式成立,插补结束,否则继续。

例 1-1 现欲加工第一象限直线段 OA ,设起点位于坐标原点 $O(0,0)$,终点坐标为 $X_e=6, Y_e=4$,试用逐点比较法对该直线进行插补,并画出刀具运行轨迹。

解: 插补从直线起点 O 开始,故 $F_0 = 0$ 。终点判别是判断进给总步数 $N = 6 + 4 = 10$ 。插补运算过程见表 1-1,插补轨迹如图 1-5 所示。

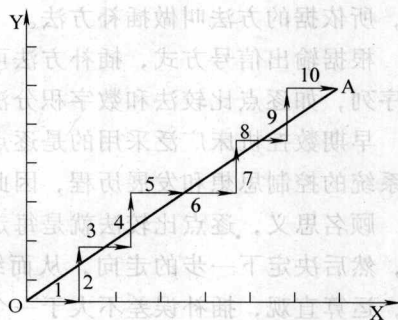


图 1-5 直线插补实例

表 1-1 直线插补运算过程

步数	偏差判别	坐标进给	偏差计算	终点判别
0			$F_0 = 0$	$\Sigma = 10$
1	$F = 0$	$+X$	$F_1 = F_0 - Y_e = 0 - 4 = -4$	$\Sigma = 10 - 1 = 9$
2	$F < 0$	$+Y$	$F_2 = F_1 + X_e = -4 + 6 = 2$	$\Sigma = 9 - 1 = 8$
3	$F > 0$	$+X$	$F_3 = F_2 - Y_e = 2 - 4 = -2$	$\Sigma = 8 - 1 = 7$
4	$F < 0$	$+Y$	$F_4 = F_3 + X_e = -2 + 6 = 4$	$\Sigma = 7 - 1 = 6$
5	$F > 0$	$+X$	$F_5 = F_4 - Y_e = 4 - 4 = 0$	$\Sigma = 6 - 1 = 5$
6	$F = 0$	$+X$	$F_6 = F_5 - Y_e = 0 - 4 = -4$	$\Sigma = 5 - 1 = 4$
7	$F < 0$	$+Y$	$F_7 = F_6 + X_e = -4 + 6 = 2$	$\Sigma = 4 - 1 = 3$
8	$F > 0$	$+X$	$F_8 = F_7 - Y_e = 2 - 4 = -2$	$\Sigma = 3 - 1 = 2$
9	$F < 0$	$+Y$	$F_9 = F_8 + X_e = -2 + 6 = 4$	$\Sigma = 2 - 1 = 1$
10	$F > 0$	$+X$	$F_{10} = F_9 - Y_e = 4 - 4 = 0$	$\Sigma = 1 - 1 = 0$

2. 逐点比较法圆弧插补

(1) 偏差函数 加工一个圆弧,很容易联想到把加工点到圆心的距离和该圆的名义半径相比较来反映加工偏差。圆弧分顺时针圆弧和逆时针圆弧两种,这里,仅以第一象限逆圆弧为例,导出其偏差计算公式。设要加工图 1-6 所示圆弧 $\widehat{AE}$,以原点为圆心,半径为 R ,起点为 A ,任意加工点 $P_i(X_i, Y_i)$ 与圆心距离为 R_p ,现讨论这一加工点的偏差。

若点 P_i 在圆弧上,则 $R_p = R$;

若点 P_i 在圆弧外,则 $R_p > R$;

若点 P_i 在圆弧内, 则 $R_p < R$ 。

取偏差函数为 $F_i = X_i^2 + Y_i^2 - R^2$

(2) 偏差函数的递推计算 若 $F_i \geq 0$, 规定向 $-X$ 方向走一步, 有

$$\begin{cases} X_{i+1} = X_i - 1 \\ F_{i+1} = (X_i - 1)^2 + Y_i^2 - R^2 = F_i - 2X_i + 1 \end{cases}$$

若 $F_i < 0$, 规定向 $+Y$ 方向走一步, 有

$$\begin{cases} Y_{i+1} = Y_i + 1 \\ F_{i+1} = X_i^2 + (Y_i + 1)^2 - R^2 = F_i + 2Y_i + 1 \end{cases}$$

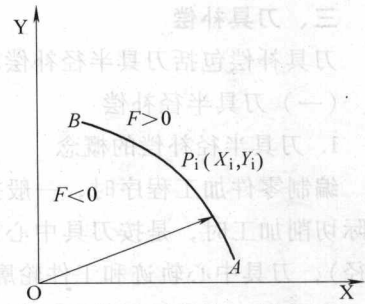


图 1-6 圆弧偏差函数

(3) 终点判别 与直线插补相同, 总的循环次数应与终点两坐标的总步数相等。即

$$i = N = X_c^2 - X_a^2 + Y_c^2 - Y_a^2$$

3. 逐点比较法的象限处理

以上所讨论的用逐点比较法进行直线和圆弧插补的原理和计算公式, 只适用于第一象限直线和第一象限逆时针圆弧。对于不同象限和不同走向的圆弧来说, 其插补计算公式和脉冲进给方向都是不同的。为了将各象限直线的插补公式统一成第一象限的公式, 并将各象限不同走向的圆弧的插补公式统一成第一象限逆时针圆弧的计算公式, 需要将坐标和进给方向根据象限等进行转换, 转换以后不管哪个象限的圆弧和直线都按第一象限圆弧和直线进行插补计算, 而进给脉冲的方向则按实际象限和线型决定。

图 1-7 分别给出了不同象限内 8 种圆弧和 4 种直线的插补运动方式, 据此可以得到表 1-2 的进给脉冲分配表。



图 1-7 四个象限圆弧、直线进给方向

表 1-2 象限与进给脉冲分配表

线型	脉冲	象限和坐标			
		I	II	III	IV
直线	ΔX	$+X$	$+Y$	X	$-Y$
	ΔY	$+Y$	$-X$	$-Y$	$+X$
顺时针圆弧	ΔX	$-Y$	$+X$	$+Y$	$-X$
	ΔY	$+X$	$+Y$	$-X$	$-Y$
逆时针圆弧	ΔX	$-X$	$-Y$	$+X$	$+Y$
	ΔY	$+Y$	$-X$	$-Y$	$+X$

三、刀具补偿

刀具补偿包括刀具半径补偿和刀具长度补偿。

(一) 刀具半径补偿

1. 刀具半径补偿的概念

编制零件加工程序时，一般按零件图样中的轮廓尺寸决定零件程序段的运动轨迹。但在实际切削加工时，是按刀具中心运动轨迹进行控制的，由于刀具总有一定的半径（如铣刀半径），刀具中心轨迹和工件轮廓线若是重合的，将会使工件过切，如图 1-8 所示。

为了加工出满足要求的工件轮廓，其加工程序要么偏离一个刀具半径值来编程，要么直接按工件轮廓编程，由系统自动偏离轮廓一个刀具半径，后者就是所谓刀具半径补偿功能。刀具半径补偿功能就是使系统能够根据零件轮廓信息和刀具半径值自动计算出刀具中心的运动轨迹，使其自动偏离零件轮廓一定距离。如图 1-9 所示，在加工外轮廓时，刀具中心向工件轮廓的外部偏移一个距离；而加工内轮廓时，刀具中心向工件的内侧偏移一个距离，这个偏移就是所谓的刀具补偿半径。图中粗实线为所需加工的零件轮廓（编程轨迹），点画线是使用了刀具半径补偿后的刀具中心轨迹（机床实际走刀路线）。

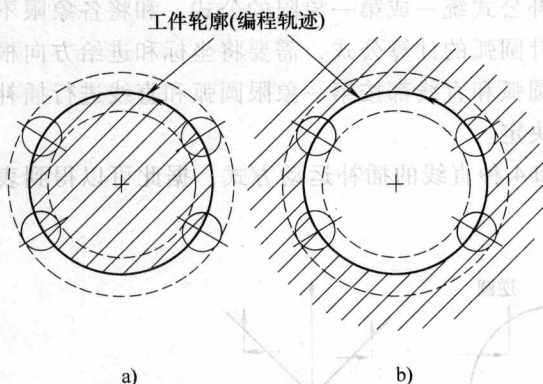


图 1-8 未使用刀具半径补偿的刀具路径
a) 外轮廓 b) 内轮廓

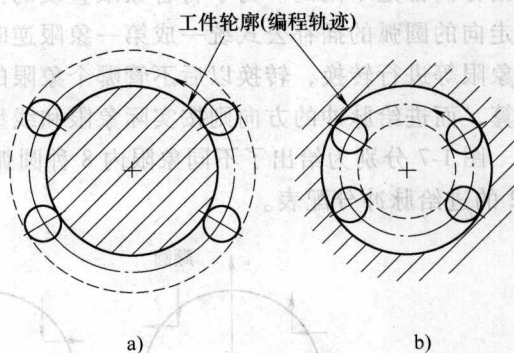


图 1-9 使用刀具半径补偿的刀具路径
a) 外轮廓 b) 内轮廓

2. 刀具半径补偿的执行过程

刀具半径补偿的执行过程分为刀补的建立、刀补的进行和刀补的取消三步，如图 1-10 所示。

(1) 刀补的建立 刀具从起刀点接近工件，刀具中心轨迹的终点不在下一个程序段指定的轮廓起点，而是在法线方向上偏移一个刀具补偿半径的距离。

(2) 刀补的进行 在刀具补偿进行期间，刀具中心轨迹始终偏离编程轨迹一个刀具补偿半径的偏移值。

(3) 刀补的取消 在刀具撤离工件返回原点的过程中取消这一个刀具补偿半径的偏移值。

3. 刀具半径补偿的形式

刀具半径补偿有 B 功能 (Basic) 和 C 功能 (Complete) 两种补偿形式。B 功能刀具半径补偿只能在本段程序内进行刀补计算，不能解决程序段之间的过渡问题，因此要求将工件

K 直角坐标系表示。当 C 点向 A 点移动时, 有

$$U_{CA} = (X_A - X_B) + I_{\text{补}}, W_{CA} = Z_A - Z_B + K_{\text{补}}$$

式中, $I_{\text{补}}$, $K_{\text{补}}$ 分别为刀补量。

当需要刀具复位, 如上述 2 号刀从 A 点返回 C 点时, 其过程正好与加工过程相反, 与 1 号刀尖从 A 点回到 B 点反方向相差一个刀补值, 因此这时需要一个绝对值相等符号相反的补偿量, 即

$$\begin{aligned} U_{AC} &= (X_B - X_A) - I_{\text{补}} = -[(X_A - X_B) + I_{\text{补}}] = -U_{CA} \\ W_{AC} &= (Z_B - Z_A) - K_{\text{补}} = -[(Z_A - Z_B) + K_{\text{补}}] = -W_{CA} \end{aligned}$$

这种补偿一个反量的过程称为刀具位置补偿撤消。

刀具位置补偿及撤消功能, 给编制程序、换刀、磨损的修正带来了很大的方便。使用不同的刀具时, 在换刀以前把原刀具的补偿量撤消, 再对新换的刀具进行补偿, 补偿量 (相对基准刀) 可通过实测获得。

3. 刀具位置补偿的处理方法

从上述刀补原理可知, 刀具位置补偿的最终实现是反映在刀架移动上。各把刀具位置的补偿量和方向可通过实测后通过面板或键盘输入, 存放在数控系统的刀具偏置寄存器中, 并在刀具更换时读取, 而且在补偿前必须处理前后两把刀具位置补偿的差别, 一般有两种处理方法。

- 1) 按上述刀补原理, 先把原来刀具的补偿量撤消, 然后根据新刀具的补偿量要求修正。
- 2) 先进行更换刀具补偿量的差值计算, 然后根据这个差值在原刀具补偿量的基础上进行刀具补偿, 这种方法称差值补偿法。

四、典型数控系统介绍

由于现代化生产发展的需要, 数控机床的功能和精度也在不断地发展, 这其中主要反映在数控系统的发展上。数控系统的发展由两个方面来促进, 一是生产发展本身的要求, 二是现代电子技术和软件技术的推动, 前者对系统功能提出要求, 后者为数控系统实现这些功能提供技术基础。

从数控技术诞生到现在已经有数十年的时间, 在这几十年间已经发展出很多种数控系统, 例如国外的数控系统有日本富士通公司的 FANUC 系统、日本三菱公司的 MELDAS 系统、德国西门子公司的 SINUMERIK 系统、西班牙的 FAGOR 系统、美国的 AB 系统和辛辛那提系统、法国的 NUM 系统等, 国内的数控系统有华中 HNC 系统、广州 GSK 系统、北京航天 CASNUC 系统等, 这些数控系统中尤以 FANUC 系统、SINUMERIK 系统市场占有率最高。

每一种数控系统都有自己的优缺点, 下面对 FANUC 系统、SINUMERIK 系统和华中 HNC 数控系统作一简要介绍。

(一) 日本 FANUC 数控系统

1. 主要特点

日本 FANUC 公司的数控系统具有高质量、高性能、全功能的特点, 适用于各种机床和生产机械, 市场占有率远远超过其他数控系统, 主要体现在以下几个方面:

- 1) 结构上较长时间采用了大板结构, 但新产品已采用模块化结构。模块化结构易于拆装, 各个控制板高度集成, 使可靠性有很大提高, 而且便于维修更换。
- 2) 具有很强的抵抗恶劣环境影响的能力, 其工作环境温度为 $0^{\circ} \sim 45^{\circ}$, 相对湿度为