

大专学校教学用书

孙奎武 朱维治 王子贵 编

微计算机 与数控技术



上

华中工学院出版社

659

1

微计算机与数控技术（上册）

孙奎武 朱维治 王子贵 编
责任编辑 朱 洪

华中工学院出版社出版发行

（武昌喻家山）

新华书店湖北发行所经销

华中工学院出版社沔阳印刷厂印刷

开本：787×1092 1/16 印张：11.5 插页2 字数 262,000

1987年8月第1版 1987年8月第1次印刷

印数：1—2 500

ISBN 7-5609-0041-0/TP·6

统一书号：15255-101 定价：2.14 元

内 容 简 介

本书较详细、全面地阐述了微机原理、应用及其与数控技术的结合。分上、下两册出版。

上册，主要阐述计算机基础知识、微机原理及如何应用于数控方面，并附有大量实用程序。

下册，主要阐述数控技术中的插补原理及其实现方法、程序编制、输入、输出和检测装置，最后以MNC数显装置、MNC数控车床和小型计算机CNC数控车床为实例作了综合的论述。

本书内容丰富、实用性强，能使读者获得微机应用与数控技术较全面的知识，为设计微机软硬件打下良好的基础。

本书既可作为大专、职工大学、电视大学的教材，也可供广大工程技术人员参考。

前 言

本书是为了适应工科大专学校的教学改革而编写的。目前,多数大专学校的有关专业已设置微机应用与数控技术课程,但还没有适当的教材。本书就是为满足这些专业的教学需要而编写的,全书分两篇,其中第一篇详细地介绍了Z80微计算机的程序设计方法、接口技术及在工业方面的应用,并附有大量的实例,以便为数控软硬件设计打下良好的基础;第二篇着重讲解数控插补计算、输入输出装置、检测技术等基本原理和软件设计方法;最后又通过MNC数控车床实例综合论述了通用设备自动化技术方面问题,为利用微机控制通用机床打下基础。

本书既是大专学校教学用书,又是工程技术人员的自学参考书。授课时数为60~80学时。

本书由孙奎武同志任主编,朱维治同志任副主编。张弛同志编写了第八、九、十章和第十一章的后半部内容。王子贵同志编写了大量的数控程序。吴斌和徐艳秋两同志为此书编写作了大量工作。

本书在试用期间,承蒙北京机械管理学院副教授李庆寿同志主持了讨论。参加讨论的还有郑州纺织专科学校,山东淄博职工大学,哈尔滨电机专科学校,长春汽车厂职工大学和沈阳兴华电器厂等十几所大专学校和工厂,他们都提出了宝贵的意见。另外,本书在编写期间,沈阳第一机床厂高级工程师车明颖同志、沈阳第三机床厂王选圣主任工程师等为本书提供了大量技术资料 and 意见,在此表示感谢。

本书由于编者水平所限和时间仓促,错误之处在所难免,欢迎广大读者批评指正。

1986. 4. 编者

目 录

概论	(1)
第一篇 微计算机基础及应用	(8)
第一章 基础知识	(8)
§ 1-1 进位计数制	(8)
§ 1-2 原码、反码和补码	(10)
§ 1-3 逻辑元件	(12)
§ 1-4 逻辑部件	(17)
第二章 微处理机简介	(26)
§ 2-1 微处理机及其组成	(26)
§ 2-2 Z80的CPU	(27)
§ 2-3 CPU的引脚及其作用	(32)
§ 2-4 Z80-CPU的指令译码及定时	(34)
§ 2-5 存储器	(35)
第三章 Z80-CPU指令系统	(39)
§ 3-1 寻址方式	(39)
§ 3-2 Z80指令的分类	(42)
§ 3-3 传送指令	(43)
§ 3-4 数据操作指令	(46)
§ 3-5 程序控制指令	(51)
§ 3-6 CPU控制指令和位操作指令	(53)
第四章 汇编语言程序设计	(57)
§ 4-1 程序设计的步骤和方法	(57)
§ 4-2 简单程序设计	(61)
§ 4-3 分支程序设计	(66)
§ 4-4 循环程序设计	(70)
§ 4-5 代码转换程序设计	(74)
§ 4-6 查表及列表程序设计	(79)
§ 4-7 调用子程序的程序设计	(81)
§ 4-8 编制程序的一些经验	(85)

第五章 可编程芯片的程序设计	(87)
§ 5-1 可编程I/O接口芯片Z80-PIO	(87)
§ 5-2 计数器/计时器芯片 CTC.....	(101)
§ 5-3 数/模和模/数转换芯片.....	(114)
第六章 单板微型计算机的使用及对外设的控制	(122)
§ 6-1 单板微型计算机的组成.....	(122)
§ 6-2 单板微型计算机的存储器及I/O接口	(123)
§ 6-3 单板微型计算机的键盘及键控程序.....	(125)
§ 6-4 显示器及显示程序.....	(132)
§ 6-5 EPROM的写入.....	(134)
§ 6-6 利用盒式录音机转贮和输入程序.....	(138)
§ 6-7 单板微型计算机的应用实例.....	(139)
附 录	(147)
一、ASCII码表.....	(147)
二、Z80指令表	(148)
三、PIO编程摘要	(165)
四、CTC编程摘要.....	(166)
五、Z80助记符指令与机器码对照表	(167)
六、Z80单板计算机线路原理图	(176)

概 论

一、微处理机的发展和应用

近四十年,电子计算机的发展日新月异。自从1946年第一台真空管电子计算机投入使用以来,它经过了晶体管、中小规模集成电路以及大规模集成电路的几代变化,目前已进入微计算机普遍应用的时代。

1971年美国的INTEL公司首先制成了INTEL4004型号的四位微处理机,这是世界上第一台微处理机。它采用大规模集成电路技术、把几千个晶体管集中制作在一块硅片上,这就使电子计算机的体积大为减少、而且它的功耗小,可靠性和运算速度都得到提高,因而引起民用和军用部门的极大重视。继之,1972年INTEL8008八位微处理机研制成功,这是第一代微处理机。1973~1974年又出现了各种类型的第二代微处理机,例如MOTOROLA 6800、INTEL8080、ROCKWELLPPS8等。它标志着微处理机的设计和制作技术日趋成熟,而且微机系统部件也日益齐全。1975~1976年又出现了集成度更高、性能更强的Z80和INTEL8085微处理机及一系列单片机,这是微处理机的第三代。它已能将中央处理器(CPU)、存储器、输入/输出电路分别制作在一块硅片上,结果使微处理机的结构大为简化。运算速度显著提高,便于微处理机在生产上使用。在1977年后、超大规模集成电路研制成功,因而1978年出现了能同过去的中档小型计算机相比拟的16位微处理机。如INTEL8086、Z-8000、M68000等,这是第四代微处理机。从80年代开始微处理机已向32位和几十K字节存储器的单片机发展,而微机的价格日趋低廉、性能更加优异、可靠性更能提高、应用日益广泛。

微处理机不单是一性能优异的运算机器,而且也是强有力的控制装置。目前它已运用到仪表制造、工业控制、交通运输、测量技术、医学、军事技术及生产管理等各种领域,有力地促进了生产技术的发展。机械制造业用微机控制的数控机床大量出现,这将使我国的机械制造技术向前迈进一大步。

二、数控机床的原理

为了加工形状复杂的工件,过去一直使用电动或液压仿形机床,这对大批量生产是比较合适的。但仿形机床的结构比较复杂,需要制作样件或模板,机床调整时间长而且加工质量也不高。

数控机床是数字计算机自动控制机床的简称、也叫作NC机床。它是自动机床的一种。它适合于加工结构形状复杂的工件,不需制作仿形样件,调整使用容易,因而能适应单件小批量生产或大批量生产的自动化加工。

数控机床如图1所示,它是在机床的机械部分之外,增加了数控装置。通过数控装置的控制信号输出,使机床随动机构工作,使机床的执行部分(例如工作台)按指令要求产生相应的动作。

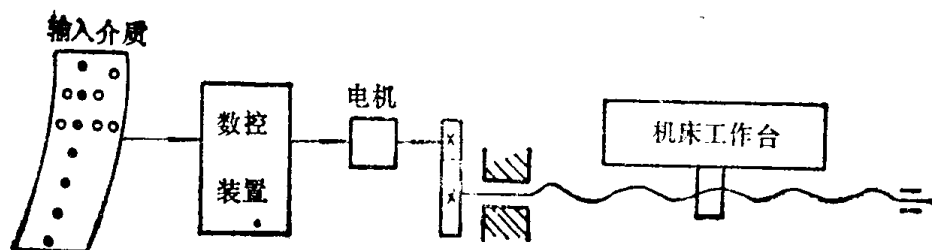


图1

加工有关工件的尺寸、形状、切削用量等数据以及操作命令等，都以符号或数字形式记录在输入介质上。输入介质一般使用纸带、磁带或存贮器，有时也使用磁盘等。加工时应将输入介质装入数控装置，开动机床后即可按指令要求自动进行加工。

数控装置是这类机床的核心部分。它由输入装置、运算器、控制器和输出装置等部分构成。它能将加工指令变成对机床进行自动控制的电信号，使机床完成需要的操作。过去的数控装置都是用中小规模集成电路按加工要求设计组装而成，但现在已被微处理机加上接口电路代替。这不但使数控装置体积大为缩小，同时也提高了可靠性。

数控装置中的输入装置是识别输入介质中加工数据和操作命令等信息的装置，而后把这些信息转存到各有关寄存器，作为控制和运算的依据。

控制器是数控装置产生一系列控制信号的部分，它根据加工要求有条不紊地指挥运算器、输入装置和输出装置进行工作。

运算器是对加工的数据进行换算和插补运算的部分，它在控制信号作用下，经输出装置发给操作机床工作台的进给脉冲，以完成工件的成形加工。

输出装置是将运算器的输出脉冲经接口电路向机床输出操作信号的部分，它经过功率放大、驱动伺服系统，使机床按规定要求进行正确操作。

由以上可知：数控机床不用工人对机床进行直接操作，由数控装置对机床发出各种操作命令。因而加工时只要根据图纸编制数控加工程序，并记入输入介质中，将它装入输入装置，即可由数控装置指挥机床进行自动加工。

数控机床有以下一些特点：

1. 数控机床对加工零件适应性强

数控机床的操作是按输入的数据和命令进行的。当加工对象改变时，只要根据零件图纸要求重新编制加工程序即可，因而它适合于多品种小批量的生产加工。而且机床调整特别容易，工人容易掌握。

2. 具有较高的加工精度能可靠地保证质量

数控机床能减少机床的传动环节、减少传动误差，而且驱动工作台移动的脉冲当量也小、因而能提高加工精度。

3. 具有较高的生产率

数控机床操作自动可使每道加工工序选择最有利的切削用量进行加工。另外数控机床具有自动变速、自动换刀、自动循环操作等功能，因而能有效地缩短机动时间和辅助时间。有的机床还带有自动测量尺寸装置，这既能控制质量又能减少机床的启停时间。因而，数控机床的生产率要比一般机床高。

表1是加工阶梯轴时使用数控机床和一般机床的加工时间对比。由表可知它比一般机床的生产率高。尤其在加工形状复杂的工件时更能体现数控机床的优点。

表1 加工时间对比

机 床	加工时间(分)		准备时间 (分)
	切削时间	操作时间	
通用车床	3.5	6.7	7
仿形车床	3.0	4.8	60
自动车床	2.9	1.7	90
数控车床	2.9	1.7	50

4. 减轻工人劳动强度、节省劳力

由于数控机床能自动循环加工，因而就不用水平比较高的工人进行操作。工人只作一些简单的操作，如启停机床、装卸工件、更换输入指令和监视机床等。这大大地减轻了工人劳动强度。

三、数控技术^注的发展

数控技术是随电子技术和计算机技术的发展而逐渐完善的。从数控机床的出现到现在已有30多年的历史，数控机床已在工厂中得到广泛使用。

早在四十年代就有了用触点开关控制的程序控制机床，这是数控机床初型。以后由于航空和导弹技术的发展需要，数控机床得到迅速地发展。

1947年美国的拍森斯(PARSONS)公司，为了制作检查飞机螺旋桨的样板，首先在坐标镗床上采用了数控技术，精确地作出了样板。以后美国空军系统为了适应导弹和飞机变型的需要，在美国麻省理工学院成立了伺服系统研究所，开始了对数控机床的研究。1952年该研究所根据真空管电子计算机原理，研制出三维数控铣床。这是世界上第一台数控机床，也叫作MIT式数控铣床。这种机床是按数字乘法器插补原理进行直线和曲线加工的，在加工精度和生产率方面确比一般机床大有提高。但这种数控机床使用的都是真空管元件和一般的开关电路，因而它的数控装置体积较大、计算速度不高、可靠性低等，这就限制了它的广泛使用。

五十年代由于半导体电子计算机出现，使数控机床的数控装置向小型和普及方向发展，数控车床、铣床、钻床等数控机床大量出现。1956年美国IBM公司的恩吉扣特工厂研制的自动换刀装置取得成功，并首先制成了能自动换刀的数控镗床。接着1958年美国卡尼·特雷克工厂研制出功能完善、带有刀库、能自动换刀的数控机床，这就是现在所说的加工中心。由于它综合利用了数控技术，从而使数控机床发展到一个新的阶段。以后，随着中小规模集成电路的电子计算机出现，加工中心功能日益完善。它有能容纳10~100把各类刀具的刀库，有换刀和自动装卸工件的机械手，有对加工情况进行控制的监视系统等。它已成为一种很受用户欢迎的高效自动机床。

1962年美国的BENDIX公司在空军要求下，对适应控制进行了研究。使数控机床能根据工件的表面状态自动改变切削用量进行加工。终于在1964~1967年先后研制成了多种适应控制的数控机床。

六十年代末期，由于中规模、大规模集成电路的出现，数控机床的数控装置就有了用小型电子计算机代替的可能，因而就有CNC和DNC的使用。CNC是用小型电子计算机控制一

注：数控技术可用于各方面，这里仅讲数控机床。

台机床的数控机床，DNC是用小型电子计算机控制几台机床的NC机床，它也叫作群控。因而70年代以后数控机床多使用小型计算机代替一般的数控装置，这不但降低了成本也提高了可靠性。

最近由于微处理机的发展，数控机床已向机电一体化方向发展，微计算机已能直接装在机床上。再不用一个体积较大的控制箱了。由于微处理机的容量逐渐扩大，出现了MNC数控机床，MNC除具有一般数控机床的控制位移、自动变速、自动换刀等功能之外，还增加了监视、自动诊断和显示、自动检测、人机对话等功能。使数控机床显示出优异的性能，并向无人化和高效化方向发展。不但这样，由于微处理机的价格低廉、可靠性高、易于操作，结果数控机床的产量逐渐扩大，数控机床在各工厂的设备中所占的比例逐渐增多。而且数控机床的种类也有所增加，除数控车床、铣床、钻床之外，数控齿轮加工机床、数控磨床、数控成型刨床、各式加工中心已大量出现，将有可能用它来代替一般机床。

我国早在1958年就制成了数控铣床，以后沈阳第一机床厂和北京第一机床厂也生产了数控车床和数控铣床。在1970年初也制成了加工中心。1984年以来，在推广南京和常州的微机控制车床后，数控机床的研制和使用进展很快，相信我国在近几年中会有较大的进展。

四、数控机床的种类

由数控的发展，数控机床的种类和规格是繁多的，一般作如下分类：

1. 按切削刀具相对于工件的移动轨迹的不同分为以下三类

1) 点位控制式数控机床

这类机床对切削刀具的坐标位置要求严格，但对它的移动路线和速度不作特殊限制。如图2(a)所示。

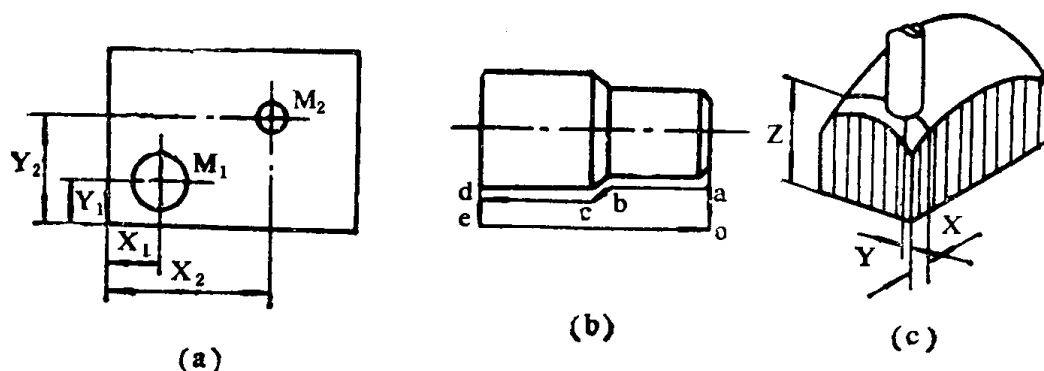


图2

在加工工件上的 M_1 、 M_2 两孔时，对孔中心位置有严格要求。当加工完孔 M_1 后，对切削刀具由 M_1 移动到 M_2 的路线不作严格控制，只需保证孔 M_2 的坐标位置准确即可。这种只控制孔位置准确的加工机床叫作点位式数控机床。数控钻床、数控镗床等多属于这一类机床，其特点是数控方式简单。

2) 直线控制式数控机床

这类机床不但要求点位准确，而且还须保证切削刀具移动轨迹的直线性。如图2(b)所示，在利用车床加工轴类工件时，不仅对轴表面的各点a、b、c、d的位置有严格要求，同时要使刀具移动路线ab、bc、cd保持直线性。数控车床、数控磨床多属于直线控制方式。

3) 轮廓控制式数控机床

这是对机床的两个以上的坐标轴同时进行控制的加工方式。加工旋转成形表面或立体轮

廓成形表面就属于这种情形。例如加工图 2 (c) 所示的曲面时, 不仅控制曲面的起点和终点, 而且对切削刀具沿三个坐标轴的移动轨迹要严加控制。例如数控立式铣床、数控车床、数控成型磨床就是采用这种数控方式。当加工锻模或特殊成型表面时会显示出这类数控机床的优越性。

2. 按有无检测装置分类

1) 开环式数控机床

图 1 所示的控制信号传递方式就属于开环控制。由图可知数控装置的控制信号直接驱使机床传动, 对工作台移动位置不作检测, 只由移动脉冲的总量决定移动量, 显然这种开环方式纠正不了传动误差, 不能保证移动位置的准确, 所以加工精度不高。但这类机床结构简单, 调试和维修方便, 造价低廉。目前我国正在推广的微机控制数控车床、铣床都属于这种开环控制方式。

2) 闭环式数控机床

图 3 所示的具有检测装置, 构成反馈比较控制方式叫作闭环式数控机床。

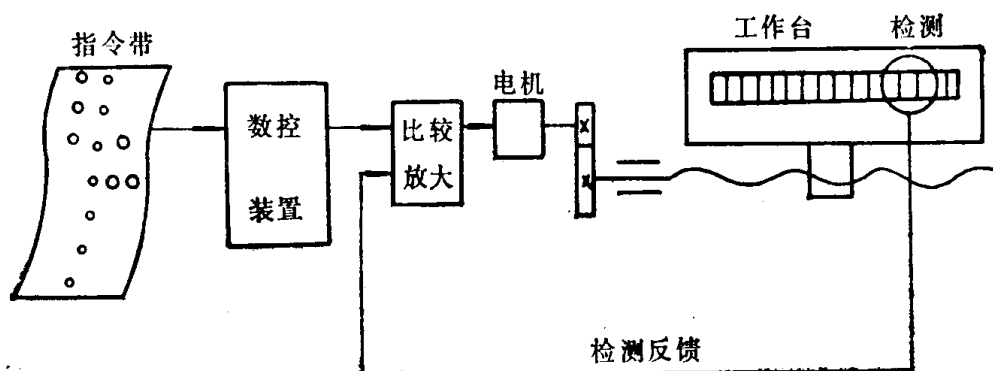


图3

由图可知机床工作台是按数控装置发出的脉冲进行移动。但工作台的移动量能由检测装置准确地测定出, 并转变为电信号反馈到比较部分, 同数控指令要求的量相比较, 用比较的差值去修正随动系统的传动, 也就是机床的移动量。如比脉冲当量规定值大时, 经反馈比较发出减小移动量的信号修正移动值; 反之就向增大移动量修正, 以便准确控制工作台的移动。这种闭环式数控机床有两个特点: 一是检测装置能直接表示出工作台的移动量, 二是检测的反馈信号送到比较部分后, 能修正工作台的移动, 保证工作台准确位移。由上可知它比开环式精度高, 适合于精密机床的控制。

3. 按工艺用途分类

1) 一般数控机床

这是在一般机床结构的基础上配备了数控装置的数控机床。如数控车床、数控铣床、数控磨床和数控镗床等。它的用途也同一般机床相似, 但能自动循环进行加工, 而且加工精度和生产率都高。

2) 带自动换刀的数控机床 (加工中心)

这是自动化程度高、工艺性能完善、并带有自动换刀装置的数控机床。它是组成自动线或无人车间的主要设备, 因为它附有刀库和换刀机械手, 可大大缩短辅助时间, 能高效地进行加工。

在加工中心机床上, 可连续地完成钻、铣、镗、铰、铰及攻丝等加工, 适合于壳类和箱

体类零件的加工。

3)多坐标数控机床

有些工件象螺旋桨或叶片等工件，需用多坐标机床进行加工，采用两个以上的坐标系就多属于多坐标加工。

4. 按插补方式分类

对复杂形状工件的加工、输入的数据只能是轮廓曲线的起点和终点坐标值。为了连续加工，还必须把曲线的起点和终点间的空白，按曲线轨迹逐点填补起来，使移动轨迹密化。这种密化填补工作叫作插补。因而加工直线、圆弧、特殊曲线等都要进行相应的插补运算，才能完成规定的线型加工。

数控机床按有无插补功能分为：

1)内插补式数控机床

数控装置中设有插补器，只靠数控装置完成各种线型的加工。

2)外插补式数控机床

指数控装置不带插补器，它须借助于外部插补器完成各种线加工。

数控机床按插补运算方式或器件分为：

1)数字乘法器（即脉冲分频器）

2)逐点比较法

3)数字积分器

4)最小偏差法

五、数控系统中的坐标系

为了加工复杂形状的工件，数控机床要控制几个坐标轴方向的运动，为此应对坐标系加以定义，在一台机床上有几个方向控制运动就称为几个坐标机床，例如三坐标数控铣床和两坐标数控车床等。

数控机床的坐标系习惯上用右手标准的坐标系，如图 4 所示。用X、Y、Z表示三 直线运动的第一坐标系；U、V、W表示第二坐标系；P、Q、R表示第三坐标系。同时又用A、B、C表示绕X、Y、Z轴回转的运动方向。X、Y、Z的正向是指尺寸增加 方向；A、B、C的正向应符合图 4 (c)所表示的右手定则的旋转方向。

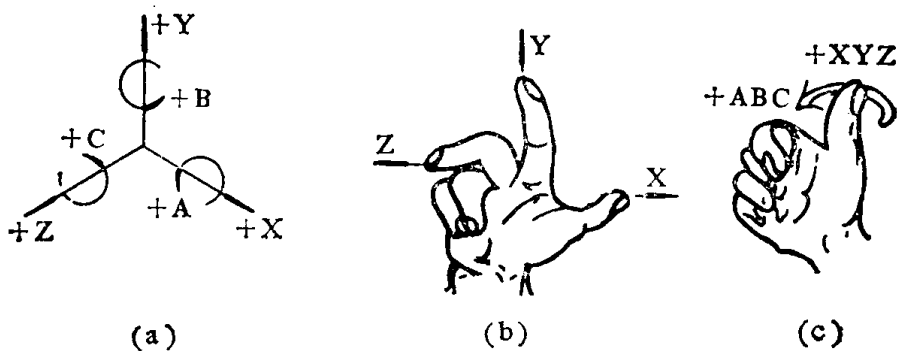


图4

在数控机床中常以Z轴表示平行于主轴的运动方向；X轴表示水平且平行工件夹紧 面的运动方向；Y轴表示这一坐标系的另一个运动方向。图 5 是数控机床坐标系标注的一例。

机械加工中常遇到具有平面轮廓和立体轮廓的零件，例如模具中的凹模和凸模、叶片、

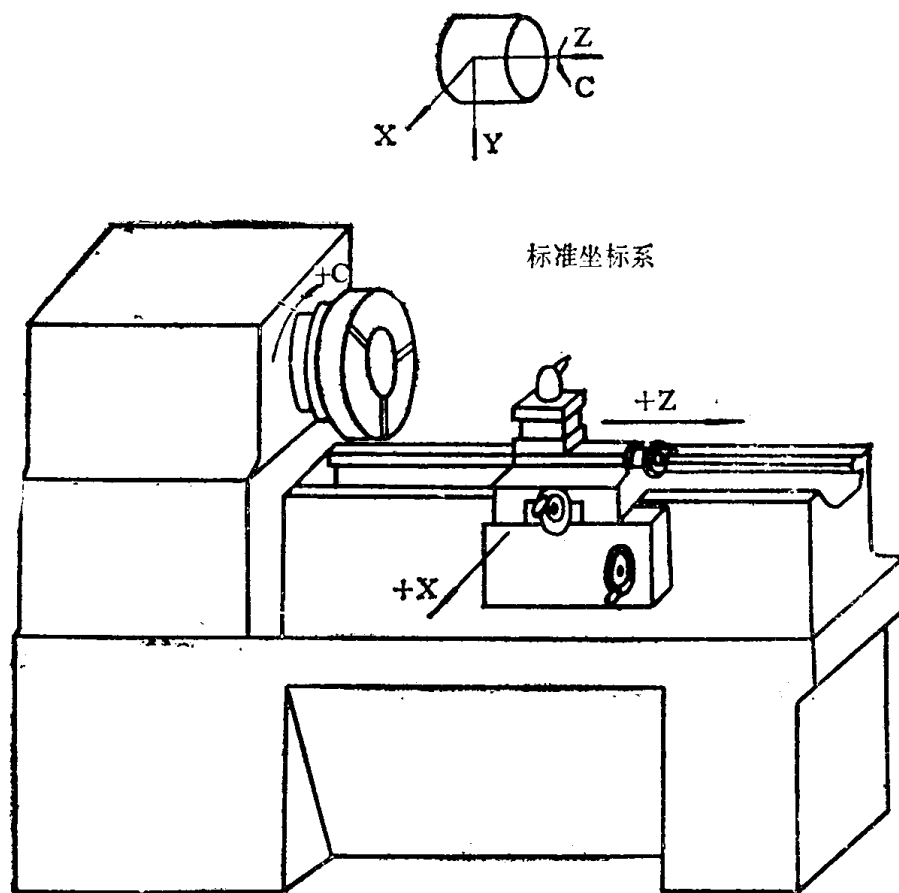


图5

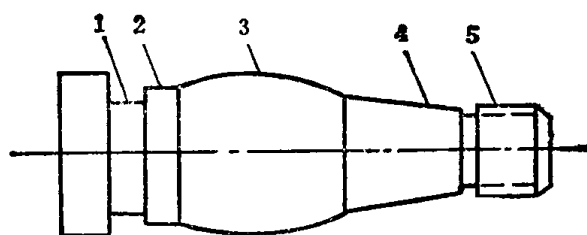


图6

螺旋桨等，其构成母线多为直线、圆弧或其它形状的曲线。加工这类工件一般采用2~3坐标就可以了，但个别的多达4~5坐标。象图6所示的工件，用两坐标联动具有直线插补和圆弧插补功能的数控车床即可加工。

第一篇 微计算机基础及应用

自从1972年出现微处理机以来，机床制造厂的设计师就一直努力把它应用在机床上。目前MNC机床已大量出现，而且正向机电一体化方向发展。我国在一般的CNC机床之后，也相继制成了微计算机控制的车床、铣床、磨床等，微机控制技术正在被机械制造部门广泛采用。

微计算机控制机床，可采用单板微计算机控制（如TP801、M6800单板机），或根据微机及大规模集成电路的原理自己组装微计算机控制机床的数控装置。这就需要机械设计者掌握逻辑电路和微计算机基础知识，以及它的应用技术。本篇就是为一般机械制造工程师编写的，它便于学机械制造的工程师在短期内掌握微机控制技术，为应用MNC数控技术打下良好基础。

第一章 基础知识

数控装置的控制量和运算数据，都是以数字形式加以接收、传递和运算，并用数字信号控制工作过程和机械设备。为此要熟悉数制和它的运算规律。另外人们在研究各种数量关系时，还必须使用不同的代码表示数量关系和某种信息，这就是码制。

由概论可知，数控装置也是一台专用的数字计算机，它由一些电子元件和部件组成逻辑电路，完成数字信号的接收、传递和运算等任务。因而，数制、码制、逻辑电路和逻辑部件是数控技术的基础。

§ 1-1 进位计数制

人们在长期的生产劳动过程中，创造了十进计数制。它是用0～9等十个数码的不同组合来表示数量的多少。数码处于不同位置，所代表的数量是不同的。例如4362这个十进制数，可写成下式：

$$4362 = 4 \times 10^3 + 3 \times 10^2 + 6 \times 10^1 + 2 \times 10^0 \quad (1-1)$$

十进制数有两个特点：一个是用0～9等十个数码的不同组合表示一定的数量，另一个是逢十进一。

十进计数制是日常使用最广泛的，但并不是唯一的进位制。在数控和电子计算机中还广泛使用二进制、八进制、十六进制等。按等式(1-1)的形式可写出各种进位制数的通用表达式如下：

$$S = K_n J^n + K_{n-1} J^{n-1} + \dots + K_1 J^1 + K_0 J^0 \quad (1-2)$$

式中:

S——任意数

$K_0 \sim K_n$ ——各进位制的数码

$J_0 \sim J_n$ ——各进位制的基数

二进制的基数为 2，数码 K 只有两个即 0 和 1。因而二进制数 S_2 的表达式为:

$$S_2 = K_n 2^n + K_{n-1} 2^{n-1} + \dots + K_1 2^1 + K_0 2^0 \quad (1-3)$$

例如: $101011 = 1 \times 2^5 + 0 \times 2^4 + 1 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 1 \times 2^0$

$= (43)_{10}$ 或写为 43D

$(43)_{10}$ 的下标 “10” 表示 43 是十进制数。D 也表示十进制数。一般二进制数后边附一 “B” 字, 例如 110101B 是表示二进制数, 以区别十进制数的 110101 (表示十一万一百零一)。

二进制数在电子计算机和数控中所以得到广泛使用, 是因为电平的高低、晶体管的导通或截止、信号的有无等都可以用 1 或 0 表示; 而且数据也是以二进制数形式参加运算或传递。

电子计算机中还应用八进制和十六进制。八进制是以前小型计算机常用的数码制。它有八个数码如 0 ~ 7 等, 是逢八进一。例如 43Q 表示 $4 \times 8^1 + 3 \times 8^0 = 35D$, 数字后边的 Q 表示八进制。

目前微机广泛使用十六进制。即它有十六个数码: 0 ~ 9 与十进制数码相同, 而 10 ~ 15 分别用 A、B、C、D、E、F 表示。它是逢十六进一, 在十六进制数的后边要附以 H。例如 43H 表示数值为 $4 \times 16^1 + 3 \times 16^0 = 67D$; 而 $2BA = 2 \times 16^2 + 11 \times 16^1 + 10 \times 16^0 = 698D$ 。下表是各进制数的比较对照, 应熟知二进制和十六进制数的表示方法。

表1-1 各种进制数对照表

十 进 制	二 进 制	八 进 制	十 六 进 制	十 进 制	二 进 制	八 进 制	十 六 进 制
0	0000	0	0	8	1000	10	8
1	0001	1	1	9	1001	11	9
2	0010	2	2	10	1010	12	A
3	0011	3	3	11	1011	13	B
4	0100	4	4	12	1100	14	C
5	0101	5	5	13	1101	15	D
6	0110	6	6	14	1110	16	E
7	0111	7	7	15	1111	17	F

十六进制使用广泛的原因在于它同二进制间地转换特别方便。一个二进制数自左向右每隔四位分成一组, 每一组即为一个十六进制数。

例如: 0010 1001 1010 1000B = 29A8H

同样, 一个十六进制数, 每位数字都以四个二进制数表示, 依次排列即成为二进制数。

尽管二进制十六进制数广泛使用于计算机, 但人们还是不习惯。为此又有二-十进制 (BCD) 的产生, 它是用二进制表示各位的十进制数。

例如: $437D = 0100\ 0011\ 0111BCD$

又如: $12D = 0001\ 0010BCD = 1100B$

$12H = 0001\ 0010B = 18D$

从上可见, 二-十进制数与二进制数是不同的, 弄清含义不要混淆。

二进制数的运算比较简单, 因只有 1 和 0 两个数码, 其运算规则如下:

加法规则

$$0 + 0 = 0 \quad 0 + 1 = 1$$

$$1 + 0 = 1 \quad 1 + 1 = 10$$

乘法规则

$$0 \times 0 = 0 \quad 0 \times 1 = 0$$

$$1 \times 0 = 0 \quad 1 \times 1 = 1$$

显然, 上边的运算基本上与十进制相同, 但 $1 + 1 = 10$ 表示逢二进一低位为 0, 而不是十进制的 $1 + 1 = 2$, 这要特别注意。二进制的减法和除法分别是加法和乘法的逆运算。若两个数相减, 某一位被减数小于减数时, 要向相邻的高位借位, 同样是借一当二。但一般计算机多将减法变为补码作加法运算。为此, 要介绍码制的知识。

§ 1-2 原码、反码和补码

上面讨论的二进制数是没有符号的, 如果运算的数带有正负符号, 应该在最高位把它区分开。因而要用到下面的一些码制。

一、原码

原码是由符号位和数的绝对值两部分组成, 正数时其符号位为 0, 负数时其符号位为 1。

例如 $X = +11001$ 和 $Y = -10101$ 时

$$[X]_{\text{原}} = [+11001]_{\text{原}} = 011001$$

$$[Y]_{\text{原}} = [-10101]_{\text{原}} = 110101$$

原码在乘法, 除法或相同符号的数加法运算时比较方便, 但在不同符号数的相加或者相减时, 其运算过程和运算装置就比较复杂, 因而要使用补码进行运算。

二、反码

正数的反码与原码相同, 即最高位为符号位 0, 其余为数值部分。

例如: $X = +11011$ 其反码表示如下:

$$[X]_{\text{反}} = [X]_{\text{原}} = 011011$$

负数的反码, 其符号位用 1 表示, 数值的各位数码是 1 就变成 0, 是 0 就变成 1。

例如: $X = -11011$ 其反码表示如下:

$$[X]_{\text{原}} = 111011$$

$$[X]_{\text{反}} = 100100$$

三、补码

为了理解补码的意义, 先用钟表的现象加以说明。例如钟上的时间指 0 点, 若时针转过

12小时,显然时针又回到0点。这时加12等于不加,这12叫作时钟的模。

即,时钟的 $X + \text{模}12 = X$ (12自动丢失)

同样,如现在时间是6点,而时钟指针为8点,若拨正时间,可倒拨2小时或正拨10小时,都可使时钟指向6点。即在时钟上:

$$8 - 2 = 6 \text{ 或 } 8 + 10 = 6 + \text{模}12$$

这时模12自动丢失,时钟也是6点。由上式知:

$$8 - 2 = 6 \text{ 而 } 8 + 10 = 8 + (12 - 2) = 6 + \text{模}12$$

式中的 $(12-2)$ 叫作 -2 的补码。即 $[-2]_{\text{补}} = (12-2) = 10$ 。显然 -3 的补码就是9。

同理对二进制的负数也可引入补码概念。如数值寄存器只有六位,此外还有一符号位,运算过程中,如数位超过六位就要溢出自动丢失,这时模为1000000。

例如:计算 $X - Y$ 、设 $X = 010011(19D)$ $Y = 0000101(5D)$

这时 $X - Y = 010011 - 0000101 = 001110$ 它也可变成如下的加法计算:

$$\begin{aligned} X - Y &= X - Y + \text{模}1000000 \\ &= X + [1000000 - Y] \\ &= 010011 + [1000000 - 0000101] \\ &= \boxed{1}001110 \\ &= 001110 \end{aligned}$$

$$\text{即} [-Y]_{\text{补}} = [1000000 - Y] = 2^6 - Y$$

上面用的是6位寄存器,若用 n 位时其补码 $[-Y]_{\text{补}} = [2^n - Y]$ 也就是模减去 Y 即变成补码。

考虑到微机将原码变成反码特别方便,因而补码也可如下确定:

$$1000000 - Y = 1000000 - 0000101 = 111011 = 111010 + 000001$$

上式说明将原码先变成反码再加1,就变成补码。即补码等于反码+1。

综上所述,补码应如下确定:

$$[X]_{\text{补}} = \begin{cases} X & \text{当 } X \geq 0 \\ 2^n - [X] & \text{当 } X < 0 \end{cases}$$

即, X 为正数时 $[X]_{\text{补}} = [X]_{\text{原}}$

X 为负数时 $[X]_{\text{补}} = [X]_{\text{反}} + 1$

为了区分正负数,在补码的前边要标明符号位。

使用补码可使减法运算变成带符号位的加法运算。不论 X 和 Y 是正数或负数,其补码的运算规则如下:

$$[X + Y]_{\text{补}} = [X]_{\text{补}} + [Y]_{\text{补}}$$

现分以下几种情况加以说明。

第一种情况: $X \geq 0, Y \geq 0$

因为 $X \geq 0, Y \geq 0$,那么 $X + Y \geq 0$

由于正数的补码就是原码的本身,故:

$$[X + Y]_{\text{补}} = X + Y$$

又因 $[X]_{\text{补}} = X, [Y]_{\text{补}} = Y$

$$[X + Y]_{\text{补}} = [X]_{\text{补}} + [Y]_{\text{补}}$$