

数控机床的编程及实例

数控机床的 编程及实例

于华 主编



机械工业出版社

711110

TG 659
/ 79

数控机床的编程及实例

于 华 主 编



机械工业出版社

本书概述了现代数控机床的结构、组成及特点,介绍了应用较广的加工中心、数控车床、数控磨床、数控电火花机床及线切割等机床。重点讲解了数控编程基础、手工编程、用户宏编程、自动编程、微机编程等方法。最后以实际应用实例,具体介绍了加工中心、数控车床、数控电火花机床及线切割机床的编程要点和编程实例。

本书可作为有关专业的大专院校学生及从事数控加工的工程技术人员学习参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

数控机床的编程及实例 / 马九荣编. - 北京: 机械工业出版社, 1996

ISBN 7-111-04793-1

I. 数… I. 于… III. 数控机床—程序设计 N. TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (95) 第 10401 号

出版人: 马九荣 (北京市百万庄南街 1 号 邮政编码 100037)
责任编辑: 钱飒飒 版式设计: 霍永明 责任校对: 杨兴祥
封面设计: 姚毅 责任印制: 王国光
北京市密云县印刷厂印刷 · 新华书店北京发行所发行
1996 年 3 月第 1 版第 1 次印刷
787mm×1092mm¹/₁₆ · 11 印张 · 262 千字
0 001—4 000 册
定价: 16.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

序 言

近年来由于研究工作和培养研究生的需要，经常要查阅数控机床的结构原理和数控编程基础方面的书籍。哈尔滨工业大学机械工程系博士生导师刘华明教授向我介绍，哈尔滨工业大学现代生产技术中心副主任于华副教授正在主编《数控机床的编程及实例》一书。或许由于多年从事这一领域工作的缘故，当我拿起这本书的书稿时，一种特别亲切的感觉油然而生。我高兴地集中精力和时间，阅读了本书的全文，受益匪浅。

现代制造业是国民经济和国防建设的基础性产业，数控技术是现代制造业的基础技术。它的发展与应用，提高了制造业的生产率，提供了更大的生产柔性。它已成为在激烈的市场竞争中取得优势的生产手段。

数控加工与普通加工的本质区别在于数控加工是用程序控制机床实现自动加工。由此可见，数控加工程序的编制在数控加工中所占的重要位置。而数控编程的工作效率取决于编程人员的理论基础和熟练的技巧，也取决于所用的编程手段的优劣。无论是为提高数控编程的工作效率还是为开发研制数控自动编程工具，掌握数控编程的原理和方法都是必要的。

虽然国内已有一些关于数控机床和数控技术的书籍出版，但是专门介绍数控编程的书籍却寥若晨星。本书作者于华副教授是在我所工作较长时间的中国科学院现代制造的 CAD/CAM 技术开放实验室的客座研究人员，在工作上 and 学术上和我都有较多的接触和交流。在数控技术研究领域，他是一位有很深造诣的青年学者。他在科研工作、教学实践和引进、使用国外数控机床的过程中积累了丰富的经验，经过系统的整理，精心编著的《数控机床的编程及实例》一书，具有很高的学术水平和使用价值。

本书内容丰富而详明，写得深入浅出，概念清晰准确，图文并茂。我多年的研究工作和自我进修的经验使我体会到要写一本好的编程方面的书籍，一定要在介绍规则和方法的同时，尽量辅以程序实例作解说。因此，本书实例丰富是一大特色。

本书的出版无疑是我们数控技术领域的一件喜事，它必将迎来数以万计的读者，或为他们进入数控技术编程的大门引路，或为他们提高数控编程的技术水平，或为他们在科研和教学工作中提供翔实的资料。

我盼望着本书的出版能为我国数控机床编程技术的发展做出新的贡献。

邹铁坚

1995年2月

前 言

数控机床已成为现代生产技术中不可缺少的加工手段，是实现 FMS（柔性制造系统）、CIMS（计算机集成制造系统）、FA（工厂自动化）的基础，而数控机床的编程又是数控加工中的重要组成部分。

本书主要以哈尔滨工业大学现代生产技术中心在引进、学习、使用国外数控机床的过程中积累的经验，对加工中心、数控车床、数控磨床、数控电火花机床及线切割机床作了概要性介绍；对数控编程作了较详细的讲解，主要包括编程基础、手工编程、用户宏编程、自动编程、微机编程。最后以实际应用为例，具体介绍了加工中心、数控车床、数控电火花机床及线切割机床的编程要点和编程实例。

参加本书编写的有于华（第一、二、三章、第五章的第一节、第七章的第一、二、三节），任秉银（第四章），王菊韵（第六章的第一、二、三节），焦建斌（第六章的第四、五、六、七节），太龙根（第五章的第二节），李小兵（第七章的第四节），全书由于华主编。

在本书的编写过程中得到了哈尔滨工业大学机械制造工艺系博士导师刘华明教授的大力支持和帮助，在此表示诚挚的感谢。

中国科学院沈阳计算技术研究所副所长邹铁坚研究员在百忙之中审阅了本书，并为本书作序，在此表示衷心的感谢。

限于编者水平，本书肯定会存在许多不足之处，敬请各位读者赐教。

作者 1994 年 10 月

目 录

序言		
前言		
第一章 数控机床概述	1	
第一节 数控机床的特点、产生和发展 ..	1	
第二节 数控机床的构成与功能	1	
第三节 数控机床的种类	16	
第二章 数控编程基础	26	
第一节 机床的坐标轴与运动记号	26	
第二节 设定单位	26	
第三节 绝对指令方式和增量指令 方式	27	
第四节 工件坐标系	27	
第五节 程序的构成	28	
第三章 手工编程	33	
第一节 直线进给编程	33	
第二节 圆弧进给编程	34	
第三节 Z轴移动指令	36	
第四节 刀具半径补偿	38	
第五节 刀具长度补偿	43	
第六节 子程序	45	
第七节 孔加工固定循环	47	
第八节 镜像功能(M21、M22、M23)	51	
第四章 用户宏编程	53	
第一节 概念	53	
第二节 宏调用命令	54	
第三节 宏主体的作成方法	57	
第四节 用户宏程序及其应用实例	62	
第五章 自动编程	69	
第一节 APT语言	69	
第二节 FAPT	73	
第六章 微型计算机辅助编程	79	
第一节 常用的曲线	79	
第二节 自由曲面	88	
第三节 多坐标数控编程中的图形 设计	91	
第四节 曲面三坐标数控加工计算	96	
第五节 曲面四、五坐标加工计算	99	
第六节 后置处理程序设计	100	
第七节 本章所用程序	101	
第七章 编程加工实例	116	
第一节 加工中心的编程加工	116	
第二节 数控车床的编程加工	123	
第三节 数控电火花编程加工	150	
第四节 数控线切割编程实例	161	
参考文献	168	

第一章 数控机床概述

第一节 数控机床的特点、产生和发展

数控是数值控制 (Numerical Control) 的简称,其含义是用以数值和符号构成的数值信息自动控制机床的运转,数控机床也简称为 NC 机床。

与普通机床靠工人操作手柄进行加工相对应,数控机床的运动是由加工指令信息来进行自动控制的。对于用普通机床难于进行加工的复杂二维、三维形状,数控机床可利用 3 轴、4 轴甚至 5 轴以上同时控制,高精度地进行加工。数控机床也不需要操作人员始终不离周围,而是可以在加工的同时进行装夹、调整、编程等工作,收到省时省力的效果。而且对应于不同的零件,只需改变加工指令信息——程序即可,使之与以往的自动机床相比具有“柔性”。因此数控机床特别适合于多品种、中小批量生产。

1947 年,美国的 Parson 公司在生产直升机机翼检查样板时,为了提高精度和效率,提出了用穿孔卡片来控制机床的方案,这一方案迎合了美国空军为开发航天及导弹产品,需要加工复杂零部件的需求,于是得到了空军的经费支持,开始研究以脉冲方式控制机床各轴的运动,进行复杂轮廓加工的装置。1949 年与 MIT (麻省理工学院) 的伺服机构研究所开始共同研究,历时三年完成了能进行三轴控制的铣床样机,取名为“Numerical Control”,这就是数控机床的所谓第一号机。

从此以后,很多厂家都开展了数控机床的研制开发和生产。并在 1959 年,美国 Keaney&Treckre 公司开发成功了具有刀库、刀具交换装置、回转工作台,可以在一次装夹中对工件的多个面进行钻孔、镗孔、攻螺纹、镗削、平面铣削、轮廓铣削等多种加工的数控机床。由于它将钻、铣等多种机床的功能集一身,不但省却了工件的反复搬动、安装、换刀等手续而且使加工精度大为提高。从此,数控机床的一个新的种类——加工中心 (machining center) 诞生了,并逐步成了数控机床中的主力。

现在,数控技术已经应用在各种加工机床上,例如数控车床、数控铣床、数控冲床、数控齿轮加工机床、数控电火花、线切割、激光加工机床等等。

数控机床已发展到不但具有刀具自动交换装置,而且具有工件自动供给、装卸、刀具寿命检测、排屑等各种附加装置,可以进行长时间的无人运转加工。

当今的数控机床已经在机械加工部门占有非常重要的地位,是 FMS (Flexible Manufacturing System)、CIMS (Computer Integrated Manufacturing System)、FA (Factory Automation) 的基本构成单位。

第二节 数控机床的构成与功能

数控机床主要由机床主体、数控装置、伺服驱动装置和其它装置构成。

一、数控机床的主体

(一) 床身

对于数控机床的最重要要求之一是高精度而且具有持久性。尽管现在数控机床有多种机型，但机床主体的静、动几何特性对精度的影响是极大的。如主体的刚性、主轴的回转精度、工作台及床身等运动部件的平滑性、运动的直线度、运动与主轴中心线的平行度、垂直度、还有热变形的影响等等。为了保证以上各项精度要求，现在的数控机床厂家采取了许多措施，例如超精密数控车床就在主轴箱、主轴、轴承、滑动等部位使用了工程陶瓷，提高了机床的动、静特性。

(二) 主轴

要求数控机床的主轴，应在较大的转速范围内实现无级变速、并能承受较大的力矩。

下面以加工中心主轴为例，介绍主轴机构。

图 1-1 为交流伺服电动机加二级齿轮变速构成的主轴变速结构示意图。如图所示，可以利

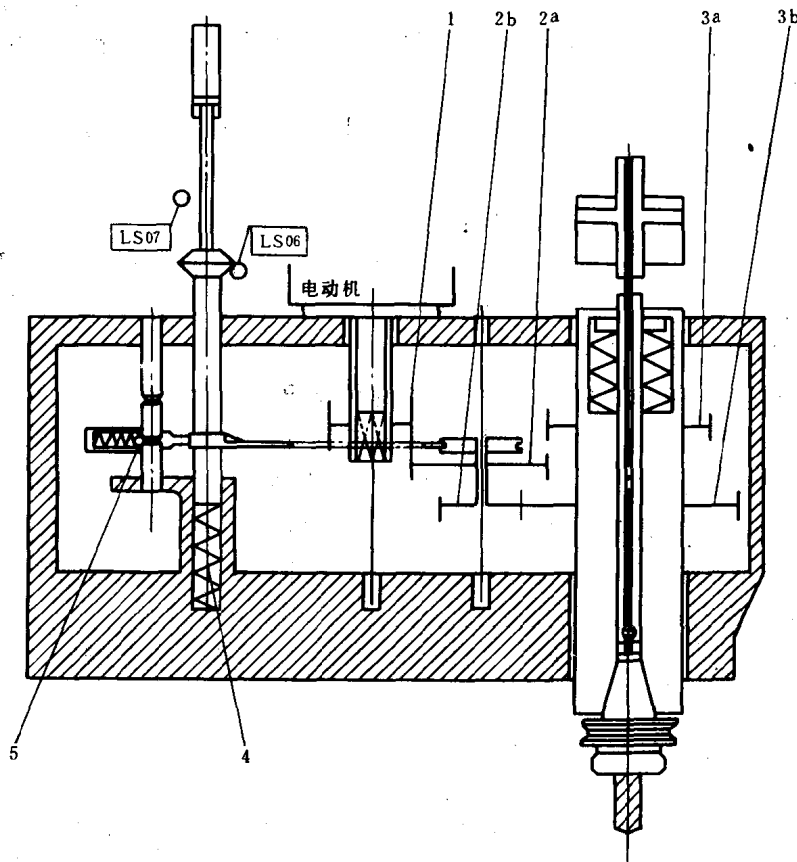


图 1-1 加工中心主轴变速机构

1、2a、2b、3a、3b—齿轮 4—弹簧 5—定位珠

用拨叉使齿轮 1 通过联轴器与电动机轴相连，齿轮 2a 和 2b 能在中间轴上滑动，而且 2a 不论在高速档或低速档都与齿轮 1 啮合。齿轮 3a 和 3b 是固定在主轴上的。LS06 和 LS07 分别为电磁阀的限位开关。当拨叉在油压作用下动作时，齿轮 2a 和 3a 或 2b 和 3b 啮合，可进行高速

档和低速档变速。由于有弹簧 4 及定位珠 5 的作用，在油压解除后，也能保持其拨叉的定位。通过这样的变速机构和电动机的调速，使机床主轴转速达到在 10~5000（或 7000）r/min 的范围内以 1r/min 的间隔进行无级变速。现在在精密数控机床上，以主轴转速超过 10000r/min 来进行镜面切削的事例也很多。

为了进行高精度加工，机床的主轴还配备有润滑油温度自动控制装置，在为主轴头内提供润滑的同时，吸收主轴头内产生的热量，并进行散热。

由图 1-2 中可看出，由泵 1 吸入主轴头内的润滑油，加压后送入热交换器 2，油在此处经过冷却后通过过滤器 3 送入主轴。同时，由温度传感器 4 检测出回油温度，与设在机床床身上的另一个温度传感器测得的温度加以比较，当油温高于机床床身温度 1℃ 时，冷冻压缩机开始动作，从热交换器内部的冷却圈内，将气化的冷媒吸入，并加压至 1.5~1.8MPa（15~18kg·f/cm²）使之变成容易液化的状态，送入冷凝器 6。在冷凝器中液化的冷媒经干燥过滤网 7 将灰尘、水分除去后，进入毛细管 8。在这里，受到阻力的冷媒在出口处膨胀，一部分气化，使冷媒自身冷却。冷媒在热交换器的冷却圈中全部气化，使润滑油得到冷却，直到温度传感器检测到的温度比机床床身低 1℃ 时，冷冻压缩机 5 才停止工作。由此将主轴头内温度控制在与机体温度相差 ±1℃ 之内。

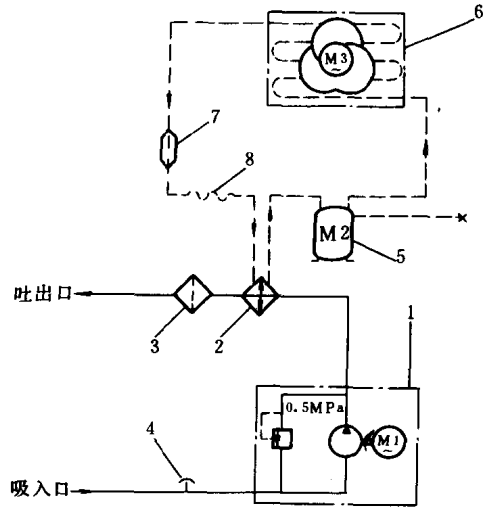


图 1-2 主轴冷却装置动作示意图

- 1—泵 2—热交换器 3—过滤器 4—温度传感器
5—冷冻压缩机 6—冷凝器 7—干燥过滤网 8—毛细管
←—润滑油循环回路 ←·····冷媒循环回路

由此可知，对主轴的温控是精细而复杂的，所以应定期对温控装置进行维护，注意清扫保养。

（三）进给机构

现在的进给机构均已采用了精密的滚珠丝杠，使丝杠的旋转运动变为床身的直线运动。滚珠丝杠的构造如图 1-3 所示。

这种结构形式是滚动轴承的变形应用，精度很高，而且为了消除背隙还对其进行了预紧（例如对 Y 轴的预紧力可达 7000N）。

导轨的滑动面采用了具有低摩擦、较高的振动衰减特性的氟化物树脂材料（图 1-4）。

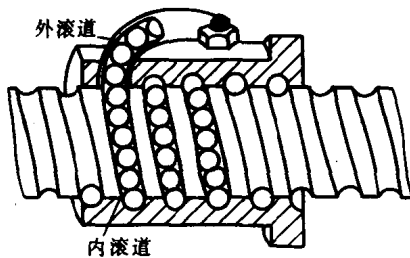


图 1-3 滚珠丝杠的构造

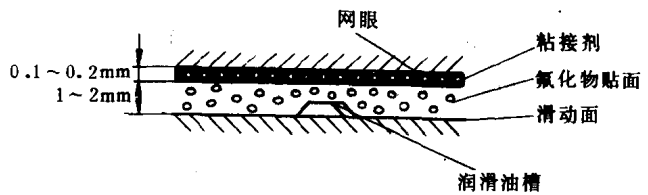


图 1-4 氟化物滑动面

为了保持机床精度，对机床的进给轴、滚珠丝杠、滑动面及平衡链条等还必须进行润滑，现在机床上广泛使用润滑油自动给油装置，对各部分进行定时、定量的润滑。图 1-5 是该装置的动作原理图。电动机 1 转动带动齿轮 2、3，使运动传递到凸轮 4，凸轮转一周时带动活塞 5 上升两次，这时油箱中的油就可通过过滤网 6 吸入阀 7，进入液压缸中。上升完了的活塞 5 在弹簧 8 的作用下被压下，与此同时，润滑油也通过止回阀 9 后被送入各处。还可通过提升手动输油按钮 10 进行手动给油。13 为浮标开关，当油面降低到警戒线以下时，此开关接通，产生报警信息。

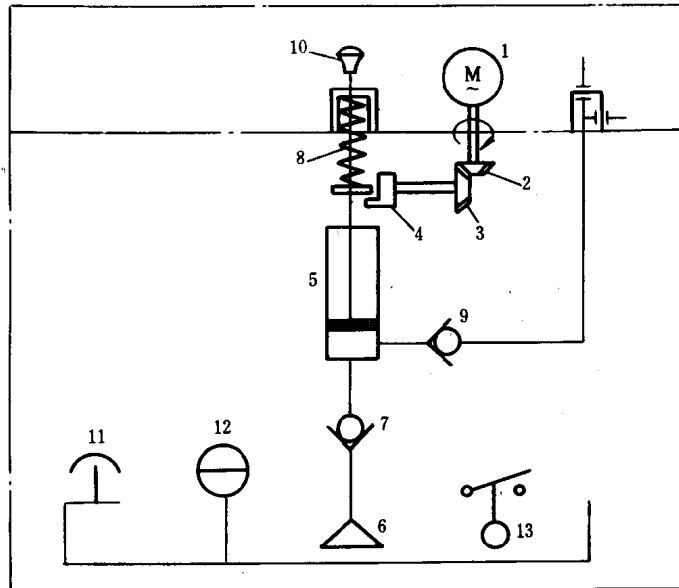


图 1-5 润滑油自动给油装置动作原理

1—电动机 2、3—齿轮 4—凸轮 5—活塞 6—过滤网 7—吸入阀
8—弹簧 9—止回阀 10—手动输油按钮 11—注油口 12—油标 13—浮标开关

二、控制装置

对于数控机床的控制是由数控 (NC) 和程控 (PC) 两组装置有机结合来实现的。数控装置是以数值信息对机床进行控制，即，进行数值信息的读入、存储、运算处理，产生表示移动量和速度的脉冲，去控制伺服电动机。而程控装置则是按所定的动作顺序，按照输入输出的条件使各机构动作，即：由程序中的辅助功能 M、刀具功能 T 等来控制主轴的正反转，切削液的开、停，刀具交换等动作。

随着计算机技术和半导体技术的发展，现在的数控装置都已经是 CNC (Computer Numerical Control) 形式，这种 CNC 装置一般使用多个微处理器，以程序化的逻辑电路完成数控功能，也就是以软件形式实现数控功能，被称为软件数控 (Softwared NC)，以区别于初期数控装置。初期数控装置就是靠各种电子元件及配线构成的电子电路来完成数控功能的所谓硬件数控 (Hardwared NC)。

图 1-6 表示了 CNC 装置的构成。

由图可知，它将硬件按功能分成各不相同的模块，在每个模块中都配置了微处理器以

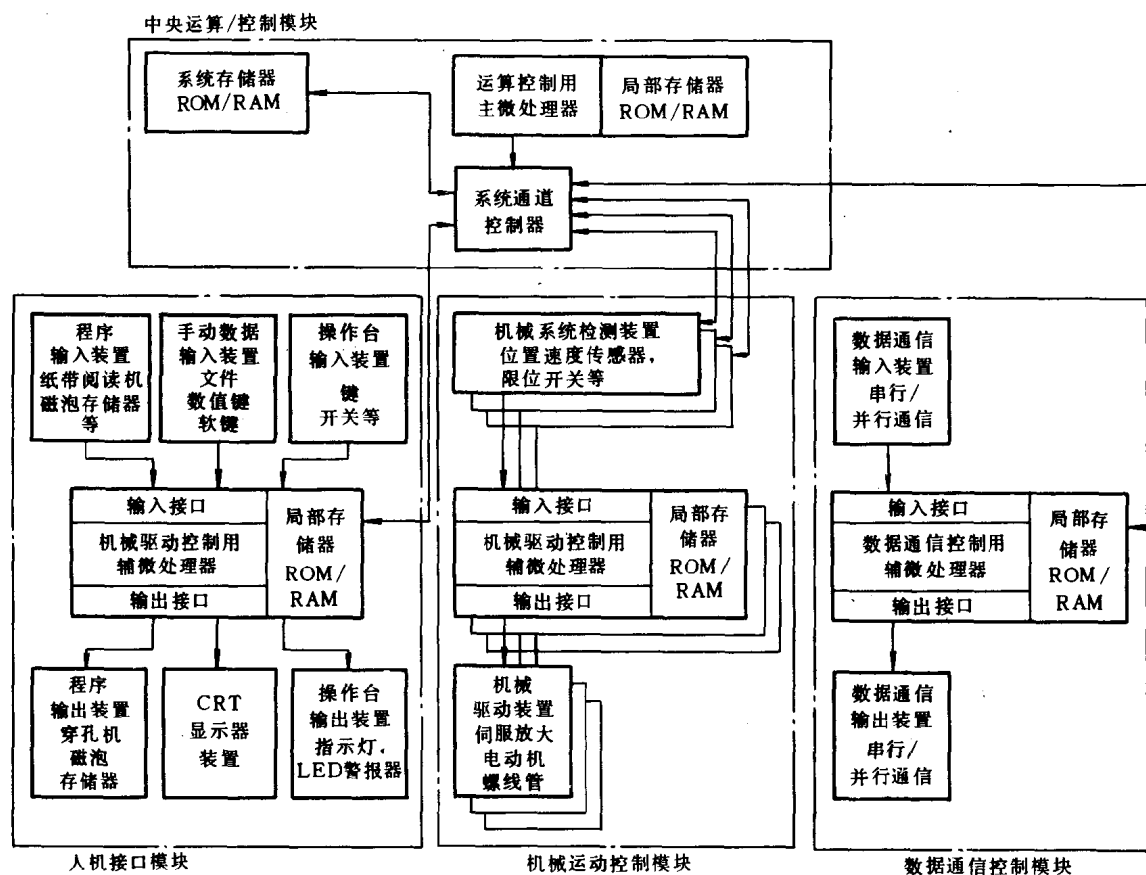


图 1-6 CNC 装置的构成

分散控制进行高速并行处理。

下面分别介绍数控系统的输入、运算处理、伺服驱动及检测等部分。

(一) 输入装置

为将 NC 指令输入 NC 装置，可采用以下三种方式：

1. 纸带输入 它是在特制的纸带上穿孔，用孔的不同位置的组合构成不同的数控代码，通过纸带阅读机将指令输入。穿孔纸带格式有两种：一种为 ISO（国际标准化组织）标准，另一种为 EIA（美国电子工业协会）标准。现在的数控装置都可以识别应用。图 1-7a 为穿孔纸带与数控代码的对照，图 1-7b 为纸带阅读机。

在使用时，可以用纸带阅读机读入的程序直接控制机床运动，也可以将纸带内容读入到内存中，用内存中存储的程序控制机床。

2. 手动输入 操作者可以利用机床上的显示屏及键盘输入加工程序指令，控制机床的运动。其方法分三种：一种是 MDI（手动数据输入），它适用于一些比较短的程序，只能使用一次，机床动作后程序就消失。当给定对刀时的主轴转速、一般手动进行简单加工时的自动换刀等场合常使用这种方式。另一种是在控制装置的编辑（EDIT）状态下，用软键输入加工程序，存入控制装置的内存中。用这种方式可以对程序进行修改，并可重复使用。一般手工编制的程序采用这种方法。除此之外，在具有会话编程功能的数控装置上，可以按照显示屏上

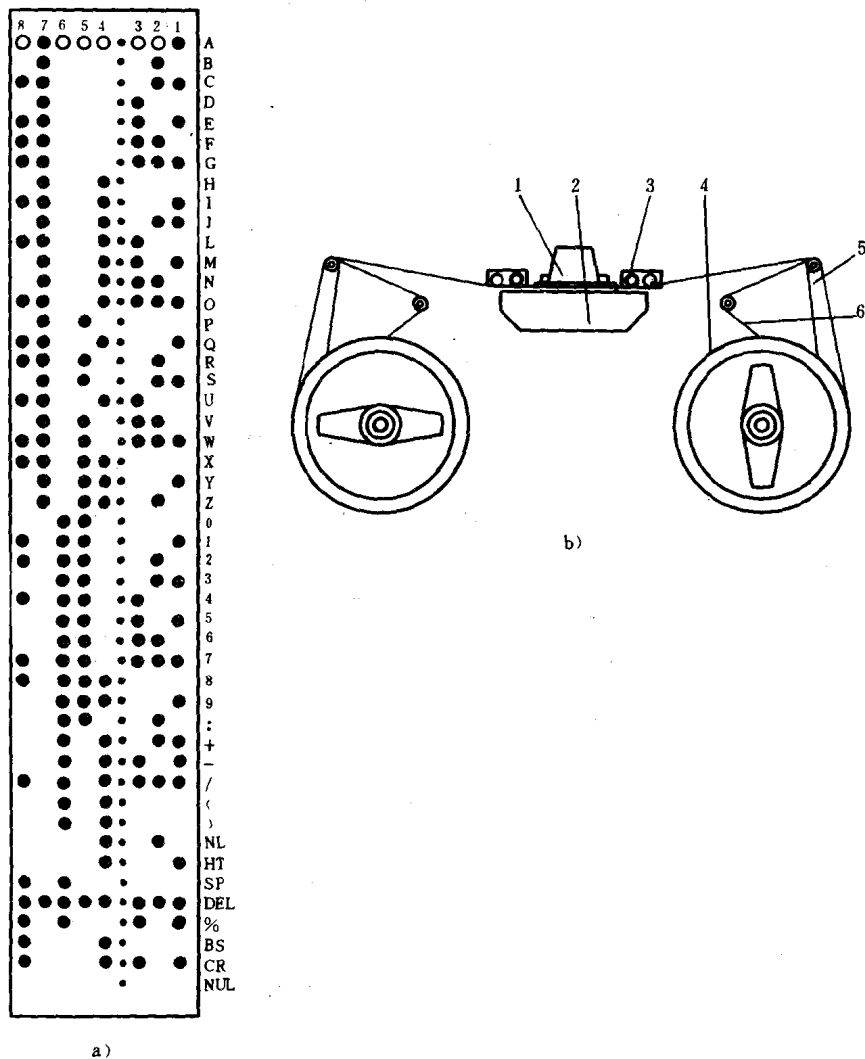


图 1-7 穿孔纸带与纸带阅读机

a) 穿孔纸带与数控代码对照 b) 纸带阅读机

1—光源部 2—光学读入头 3—输带辊 4—卷盘 5—张紧臂 6—纸带

提示的问题，选择不同的菜单，只需将图样上指定的有关尺寸数字等输入，就可自动生成加工程序。这种输入方式虽然是手动输入，但应属于自动编程方法。

3. 直接输入存储器 利用这种方式可以使用 CNC 装置的串行口等，通过对有关参数的设定直接读入在自动编程机上或其它计算机上编制的程序。

(二) 运算处理及控制方式

1. 运算处理 运算处理主要是由主微处理器来进行的，其中最基本的运算是插补运算。所谓插补就是求取直线或曲线加工路径的坐标数据，用来控制机床坐标轴的运动。

插补方式主要有直线插补和圆弧插补。直线插补就是根据所给出的终点的 X 及 Y 坐标值，计算出加工路径，并给出移动指令。圆弧插补是由终点的 X 及 Y 坐标值、圆心的坐标或半径值以及顺时针或逆时针旋转的方向，计算出加工路径，并给出移动指令。

插补算法主要分成两大类：一类是脉冲增量法插补，一类是数字增量法插补。

(1) 脉冲增量法插补 主要有两种方法。

1) 按照刀具的实际位置(以指令位置坐标表示)与规定图形的位置偏差,引导刀具跟踪规定图形。这是一种由运动偏差产生运动信息的间接方法。主要有逐点比较法等方式。图 1-8 表示了利用逐点比较法对直线 OA 进行插补时的路径和 X, Y 轴的移动指令。

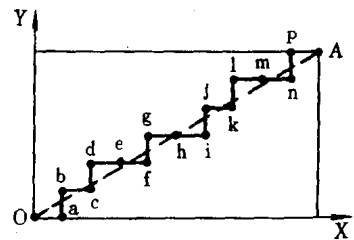


图 1-8 逐点比较法直线插补
----理想轨迹 O——>A
——实际轨迹 OabcdefghijklmnpA

2) 按照给定曲线的方程,逐点求得曲线上点的坐标,这些坐标的集合就是刀具相对于工件运动的轨迹。这是一种由曲线方程产生运动信息的直接方法。主要有 DDA (Digital Differential Analyzer) 方式等。图 1-9 表示了利用 DDA 进行圆弧插补时的路径。

(2) 数字增量法 主要有时间分割法等。

采用这一方法时,首先将进给速度 (mm/min) 分割成一个插补周期 T 内的插补进给量 f (mm/ms),然后再进行插补计算出各轴的进给量。它是利用软件和硬件结合的方式来完成的,在闭环数控系统中主要采用的是这种方法。

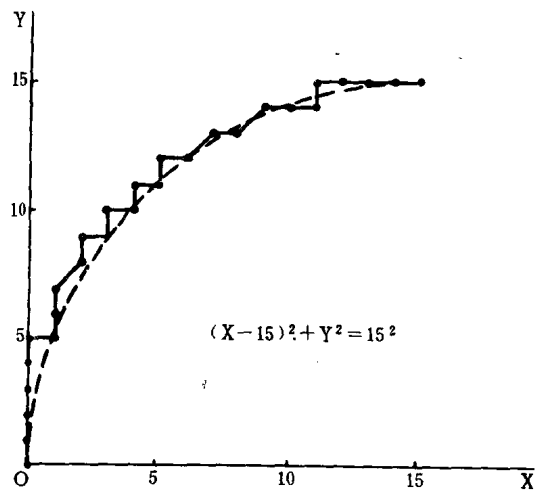


图 1-9 DDA 法圆弧插补
----理想轨迹 ——实际轨迹

2. 控制方式 控制方式主要有以下三种:

1) 点位控制 主要应用在钻床,冲床等。它需要的是准确地确定加工坐标位置,而在移动的途中不进行加工(图 1-10a)。

2) 直线控制 在这种方式下,切削路径只沿着任一个轴的方向运动,也就是说只进行平行于坐标轴的直线控制。主要应用在铣床、镗床上(图 1-10b)。

3) 轮廓控制 同时控制两轴以上的动作。例如在铣床上进行曲线圆弧等切削及复杂曲面切削时,就需要这种控制方式(图 1-10c)。

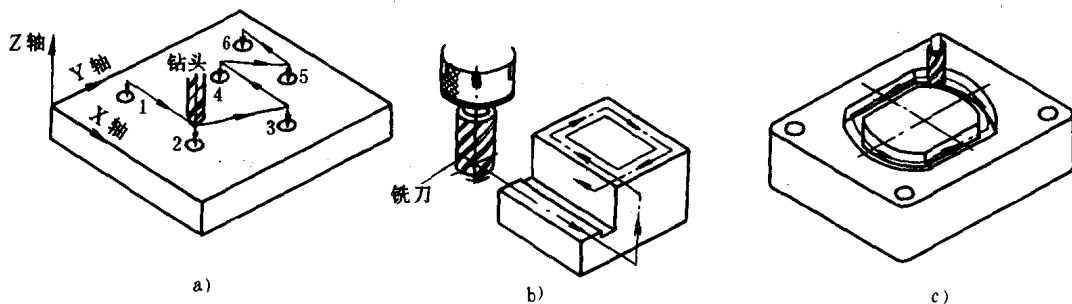


图 1-10 数控方式
a) 点位控制 b) 直线控制 c) 轮廓控制

(三) 伺服驱动系统

伺服驱动系统按反馈形式不同主要有以下几种方式：

1. 开环方式 如图 1-11a 所示，采用这种方式时，一般是用步进电动机，按指令脉冲驱动各轴进给。由于没有反馈回路和检测元件，使其构造简单。但步进电动机的转动精度、减速装置和滚珠丝杠的精度，都对驱动系统产生直接的影响。

2. 半闭环方式 采用这种方式时，是用检测伺服电动机或滚珠丝杠的转角来进行位置检

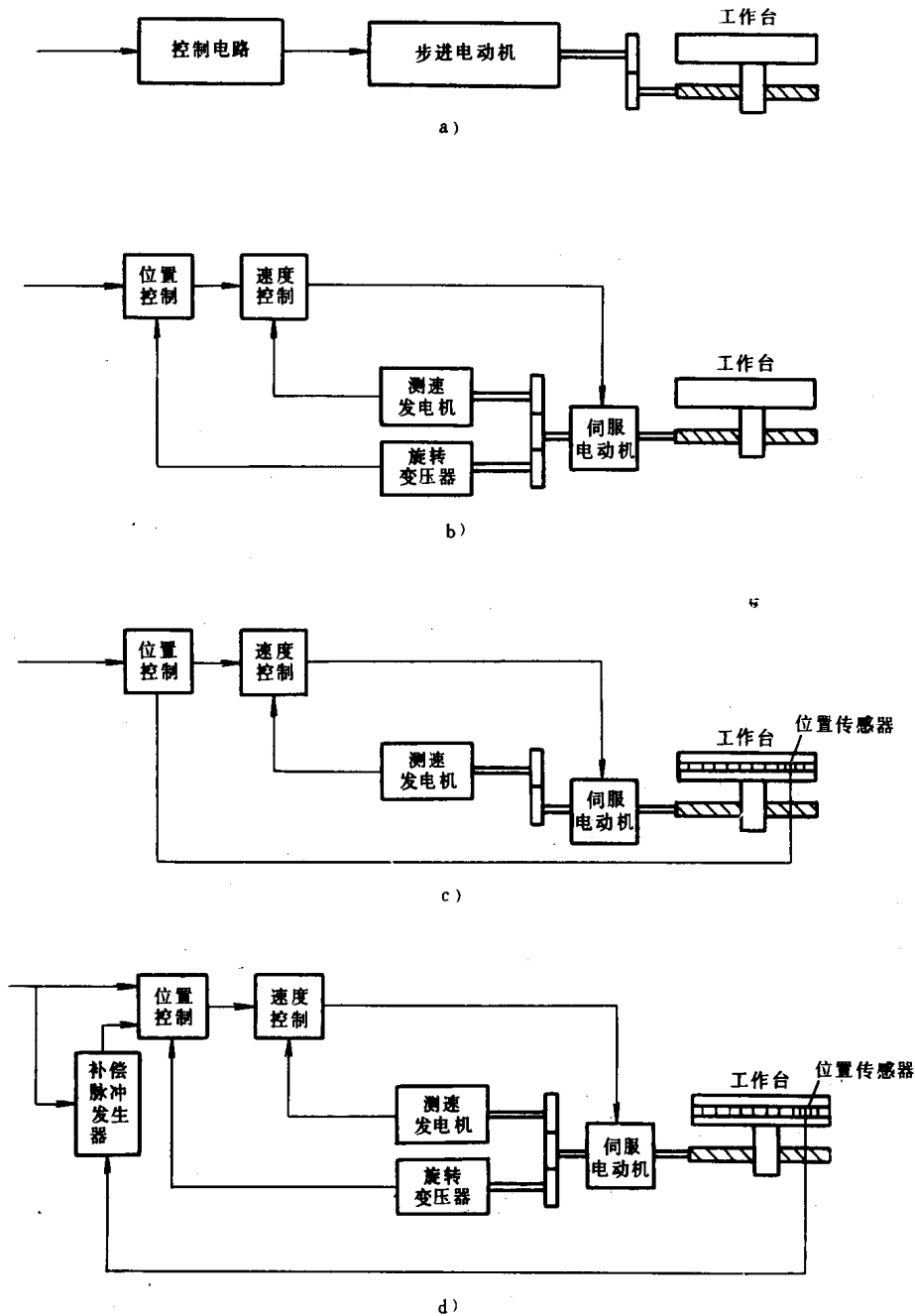


图 1-11 伺服驱动方式

a) 开环控制 b) 半闭环控制 c) 闭环控制 d) 混合环控制

测的。当滚珠丝杠精度不高或有侧隙时，位置检测是有误差的。但随着滚珠丝杠精度的提高、采用了侧隙补偿等方法，使精度已达到了实用要求，因而现在大部分数控机床均采用了此种方式（图 1-11b）。

3. 闭环控制 如图 1-11c 所示的闭环系统，主要用在精度要求较高，或大型机床上，从理论上讲，闭环控制的运动精度主要取决于检测装置的精度，而与传动链的误差无关。所以控制精度比半闭环时要高。但是由于机床床身也在位置检测装置反馈环中；系统受机床本身固有频率、阻尼、间隙等影响，容易引起伺服系统的不稳定。因此，采用闭环系统时，须提高机床的刚性、改善滑动部分的摩擦特性、减少失动等才能达到预期的精度。

4. 混合环控制 如图 1-11d 所示，这实际上是半闭环和闭环系统的混合形式，内环是速度环，控制进给速度。外环是位置环，主要对数控机床进给运动的坐标位置进行控制。现在的数控机床采用这种方式的越来越多。

（四）伺服电动机及其调速方式

1. 步进电动机 这是一种将脉冲信号变成角位移的电动机。角位移与输入脉冲个数成正比。主要应用在开环控制方式，它没有反馈机构，结构也较简单，使用方便。在 60 年代，还有一种电液步进电动机，曾作为数控驱动的主力，但随着数控机床向高精度化、高速化方向发展，现在已很少应用。但步进电动机在小型、轻型机床上或在驱动负荷小而稳定的情况下还有很多应用。

2. 直流伺服电动机 直流伺服电动机具有转矩大、过载能力强、动态响应好、良好的调速性能等很多优点。数控机床上应用的直流伺服电动机主要是永磁直流伺服电动机。

根据直流电动机的转速特性，对于速度的控制可采用改变外加电压的方式来实现。现在的直流速度控制单元主要采用晶闸管调速系统和晶体管脉宽调制调速系统（PWM：PULSE WIDE MODULATION）。而后者在速度、响应性、稳定性及精度方面具有很多优点，其应用越来越广泛。图 1-12 表示了晶体管 PWM 方式调速示意图。

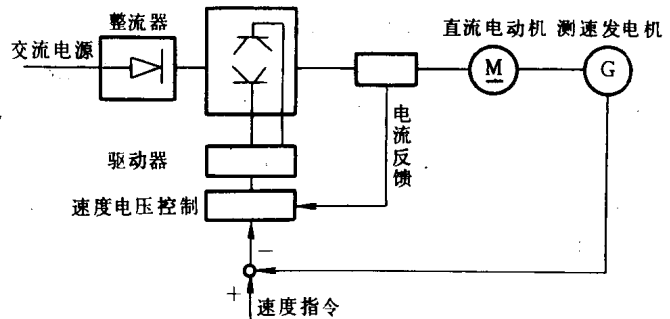


图 1-12 晶体管脉宽调制（PWM）方式

3. 交流伺服电动机 直到 80 年代中期，直流伺服电动机在数控机床的进给驱动中还占有绝对的位置，至今也仍然还在很多数控机床上使用着。但是它存在一些固有的缺点，例如其电刷和换向器易磨损，需经常维护，结构也比较复杂。随着微型计算机数字控制技术、大容量功率电子器件技术的进步，交流伺服电动机的应用已成为当今数控机床驱动系统的主流。图 1-13 为永磁交流伺服电动机结构示意图。

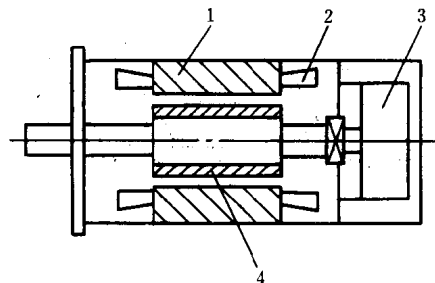


图 1-13 永磁交流伺服电动机结构

1—定子 2—转子

3—脉冲编码器 4—转子（永久磁铁）

交流电动机的速度控制有很多种类，应用最

多的是变频调速。一般采用先将交流电源变为直流，再变为可供给电动机的可调压、可调频的交流电。这种交一直一交的变换方法有很多种，但晶体管 PWM 方式，是利用脉宽调制得到等价的调压、调频。它是效率很高的一种方式，是交流伺服电动机调速的主要方式。

在包括反馈系统的调频、调压控制方式中，矢量控制方式是一种发展很快而又很实用的方式。图 1-14 是交流伺服电动机速度控制系统的基本构成图。

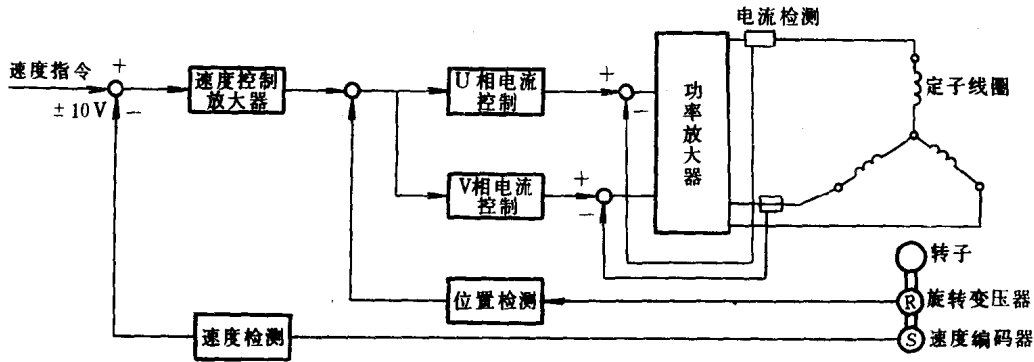


图 1-14 交流伺服电动机速度控制系统

(五) 检测装置

采用闭环控制的数控机床需要利用检测元件进行位置与速度检测，然后反馈给伺服控制系统。以下介绍在数控机床上常用的几种检测元件。

1. 速度检测元件 主要有直流测速发电机和脉冲编码器等。

(1) 直流测速发电机 其结构原理如图 1-15 所示。它利用了导体切割磁力线，就有电流流动，产生电压的原理，是一个电压与电机转速成正比的发电机。

(2) 脉冲编码器 也称为增量式脉冲编码器。其中数控机床上使用的光电式脉冲编码器的结构如图 1-16 所示。在它的光源和光敏元件之间，有两片刻有相同间距的明暗条纹的光栅。一个是标尺光栅，另一个是指示光栅。当标尺光栅是回转圆盘时，它是旋转式编码器；当是直尺形式时，它是直线编码器。

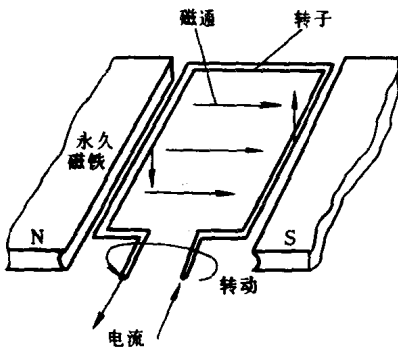


图 1-15 直流测速发电机示意图

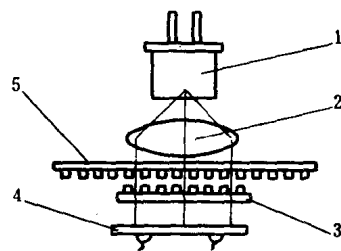


图 1-16 光电式脉冲编码器的结构
1—光源 2—聚光透镜 3—指示光栅
4—光敏器件 5—标尺光栅

当两个尺有相对位移时，照射在光敏元件上的光强发生周期性变化，产生如图 1-17a 所示

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
1
2
3
!

的近似正弦波的信号，因为这个波形的周期与光栅上的栅距一致，所以只要对信号周期计数就可知道位移量。

在指示光栅上一般刻有两组栅距相同，但错开 1/4 栅距的光栅，还设有零位信号标志，这样就可以得到两路相位差为 $\pi/2$ 的等幅正弦波，根据其相位关系可以判别标尺光栅的移动方向。两个正弦波形经整形、放大变成 A、B 方波，再经过反向后又可得到 C、D 两个方波，经微分电路处理后，在方波的上升跳变处形成微分脉冲，经整形合并后，就可以得到正、反四倍频脉冲信号。这样就使检测分解精度提高了四倍（图 1-17b）。

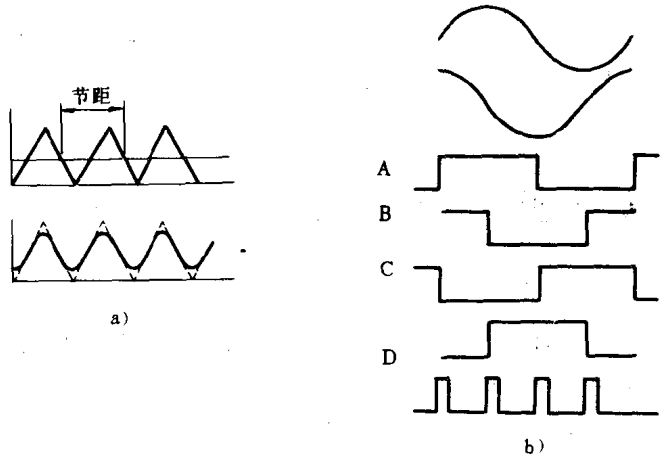


图 1-17 编码器信号波形
a) 正弦波形信号 b) 四倍频数字化波形

脉冲编码器原是为作为位置检测器而使用的，但是通过以上脉冲频率的计算也可得到速度检测值。

2. 位置检测元件 根据检测位置的不同，位置检测分为半闭环和闭环方式。半闭环方式是通过测量伺服电动机或滚珠丝杠的回转角来求得移动位置的，而闭环控制则是直接测量工作台的移动位置的。在半闭环方式中，位置检测主要使用脉冲编码器、旋转变压器、感应同步器等。在闭环控制方式中，位置检测主要使用感应同步器、磁栅、光栅、激光测距仪等。

(1) 旋转变压器 它是由转子上的一次绕组和定子上的二次绕组构成的（图 1-18）。

它是根据一次绕组和二次绕组之间的相对位置，也就是当两者相对角度发生变化而引起二次绕组电压变化这一原理测得回转角的。

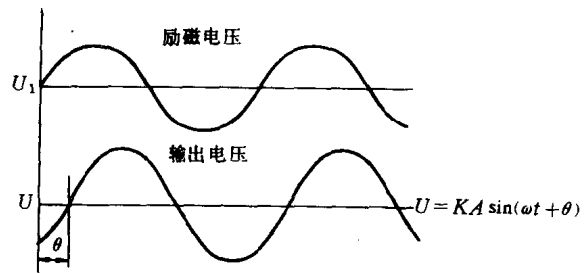
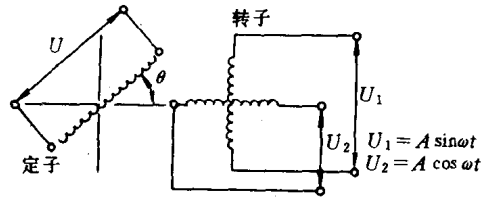


图 1-18 旋转变压器的原理

在图 1-18 中，定子绕组和转子绕组角度为 θ ，对相互垂直的一次绕组的励磁电压为：

$$U_1 = A \sin \omega t$$

$$U_2 = A \cos \omega t$$

则在定子绕组中感应电压为：

$$U = K(U_1 \cos \theta + U_2 \sin \theta) = KA \sin(\omega t + \theta)$$

式中 K ——电磁耦合系数；