

数控技术应用专业系列教材编委会

主 任

覃 岭

副主任

冯建雨 唐义锋 苑章义

委 员

(按姓氏汉语拼音排序)

常红梅	陈粟宋	程时甘	洪 凯
黄劲枝	孔 杰	龙光涛	麻 艳
毛卫秀	孙贵杰	吴新腾	徐建高
杨永平	尹玉珍	赵俊生	钟江鸿

第一章 概 述

第一节 数控机床控制系统的构成

一、数控技术

数字控制 (Numerical Control) 技术, 简称数控 (NC) 技术, 是指用数字指令来控制机器的动作。

数控技术是采用数字代码形式的信息, 按给定的工作程序、运动速度和轨迹, 对被控制的对象进行自动操作的一种技术。如果一种设备的控制过程是以数字形式来描绘的, 其工作过程是可程序的, 并能在程序控制下自动地进行, 那么这种设备就称为数控设备。换句话说, 采用了数控技术的控制系统称之为数控系统, 采用了数控系统的设备称之为数控设备。数控机床是一种典型的数控设备。由于数控技术是与机床控制密切结合而发展起来的, 因此, 以往讲数控即是指机床数控。本书数控设备均以数控机床为例。随着数控技术的发展, 它的应用范围不仅限于机械加工行业, 在仪器仪表、纺织、印刷、包装等众多行业中, 都出现了许多数控设备。新近推出的数控设备, 在结构上、功能上以及实现的技术手段上都与传统的数控设备有很大的差异, 性能指标也有很大的提高。

二、数控设备的组成

数控设备是由数控系统和被控对象组成。但从组成一台完整的数控机床上讲, 一般由控制介质、数控系统、伺服系统、强电控制柜、机床本体和各类辅助装置组成, 其框图如图 1-1 所示。

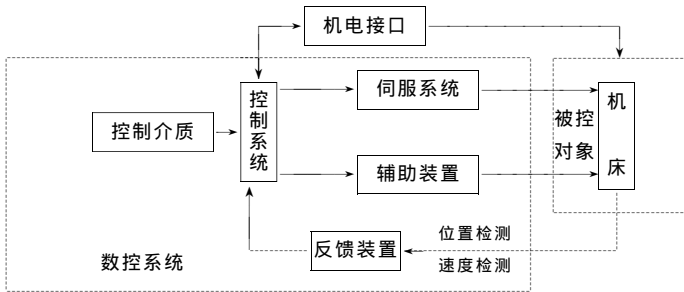


图 1-1 数控设备组成示意

(一) 控制介质

控制介质又称信息载体, 是人与数控机床之间的媒介物质, 反映了数控加工中全部信息。控制介质有多种形式, 它随着数控装置的类型不同而不同, 常用的有穿孔纸带、穿孔卡、磁带、磁盘等。还有的采用数码拨盘、数码插销或利用键盘直接将程序及数据输入。另外, 随着 CAD/CAM 技术的发展, 有些数控设备利用 CAD/CAM 软件在其计算机上编程, 然后通过计算机与数控系统通信, 将程序和数据直接传送给数控装置。

(二) 数控装置

数控装置是数控系统的核心。现代的数控装置普遍采用通用计算机作为数控装置的主要

硬件，包括微型机系统的基本组成部分，CPU、存储器、局部总线以及输入输出接口等；软件部分就是我们所说的数控系统软件。数控装置的基本功能是，读入零件加工程序，根据加工程序所指定的零件形状，计算出刀具中心的移动轨迹，并按照程序指定的进给速度，求出每个微小的时间段（插补周期）内刀具应该移动的距离，在每个时间段结束前，把下一个时间段内刀具应该移动的距离送给伺服单元。

（三）伺服系统

伺服系统是数控机床的执行结构，是数控系统和机床本体之间的电气联系环节。主要由伺服电动机、驱动控制系统和位置检测与反馈装置等组成。伺服电动机是系统的执行元件，驱动控制系统则是伺服电动机的动力源。数控系统发出的指令信号与位置反馈信号比较后作为位移指令，再经过驱动控制系统的功率放大后，驱动电动机运转，通过机械传动装置拖动工作台或刀架运动。

目前数控机床的伺服系统中，常用的控制对象可以是步进电动机、直流伺服电动机或交流伺服电动机（后两者带有光电编码器等位置测量元件），每种伺服电动机的性能和工作原理都不同。步进电动机是最简单的伺服电动机，随着交流电动机调速技术的发展，交流伺服系统用得越来越普遍。

（四）强电控制柜

强电控制柜主要用来安装机床强电控制的各种电气元件，除了提供数控、伺服等一类弱电控制系统的输入电源，以及各种短路、过载、欠压等电气保护外，主要在 PLC 的输出接口与机床各类辅助装置的电气执行元件之间起连接作用，控制机床辅助装置，如各种交流电动机、液压系统电磁阀或电磁离合器等。此外，它也与机床操作台有关手动按钮连接。强电控制柜由各种中间继电器、接触器、变压器、电源开关、接线端子和各类电气保护元器件等构成，如图 1-2 所示。它与一般普通机床的电气类似，但为了提高对弱电控制系统的抗干扰性，要求各类频繁启动或切换的电动机、接触器等其中的电磁感应器件中均必须并联 RC 阻容吸收器；对各种检测信号的输入均要求用屏蔽电缆连接。

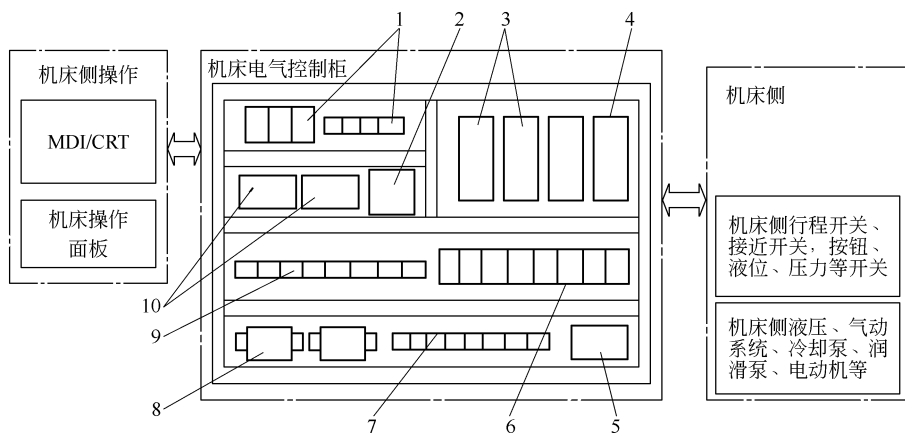


图 1-2 数控机床电气控制柜的示意

- 1—熔断器及断路器；2—开关电源；3—主轴及进给驱动装置；4—CNC 装置；5—接地排；
6—接触器；7—接线排；8—机床控制变压器；9—中间继电器；10—输入输出 (I/O)

（五）辅助装置

辅助装置主要包括自动换刀装置 ATC (Automatic Tool Changer)、自动交换工作台机构 APC (Automatic Pallet Changer)、工件夹紧放松机构、回转工作台、液压控制系统、润

滑装置、切削液控制装置、排屑装置、过载和保护装置等。

（六）机床本体

数控机床的本体是指机械结构实体。可以在普通机床的基础上改装，也可以单独设计。与传统的普通机床相比较，数控机床的机械部分具有以下一些特点。

① 数控机床采用了高性能的主轴及伺服传动系统，具有机械传动结构简化，传动链较短，传动精度高等特点。

② 数控机床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，一般采用滚珠丝杠副、直线滚动导轨副或塑料涂层导轨等。具有完善的刀具自动交换及管理系统。

（七）位置检测装置

位置检测装置也称反馈元件，通常安装在机床的工作台上或丝杠上，用来检测工作台的实际位移或丝杠的实际转角。在闭环控制系统中这个实际位移或转角有的要反馈给数控装置，由数控装置计算出实际位置和指令位置之间的差值，并根据这个差值的方向和大小去控制机床，使之朝着减小误差的方向移动。位置检测装置的精度直接决定了数控机床的加工精度。

三、数控机床控制系统的构成

数控机床进行加工时，首先必须将工件的几何数据和工艺数据按规定的代码和格式编制成数控加工程序，并用适当的方法将加工程序输入数控系统。数控系统对输入的加工程序进行数据处理，输出各种信息和指令，控制机床各部分按规定有序地动作。这些信息和指令最基本的包括：各坐标轴的进给速度、进给方向和进给位移量，各状态控制的 I/O 信号等。伺服系统的作用就是将进给位移量等信息转换成机床的进给运动，数控系统要求伺服系统正确、快速地跟随控制信息，执行机械运动，同时，位置反馈系统将机械运动的实际位移信息反馈至数控系统，以保证位置控制精度。

总之，数控机床的运行在数控系统的控制下，处于不断地计算、输出、反馈等控制过程中，从而保证刀具和工件之间相对位置的准确性。与其他加工方法相比，数控机床有以下优点。

① 数控系统取代了普通机床的手工操纵，具有充分的柔性，只要编制成零件程序就能加工出零件。

② 零件加工精度一致性好，避免了普通机床加工时人为因素的影响。

③ 生产周期较短，特别适合小批量、单件的加工。

④ 可加工复杂形状的零件，如二维轮廓或三维轮廓加工。

⑤ 易于调整机床，与其他制造方法（如自动机床、自动生产线）相比，所需调整时间较少。

从数控机床最终要完成的任务看，主要有以下三个方面内容。

1. 主轴运动

主轴运动和普通车床一样，主轴运动主要完成切削任务，其动力约占整台机床动力的 70%~80%。基本控制是主轴的正、反转和停止，可自动换挡及无级调速；对加工中心和有些数控车床还必须具有定向控制和 C 轴控制。

2. 进给运动

这是数控机床区别于普通车床最根本的地方，即用电气驱动替代了机械驱动，数控机床的进给运动是由进给伺服系统完成的。伺服系统包括伺服驱动装置、伺服电动机、进给传动链及位置检测装置，如图 1-3 所示。

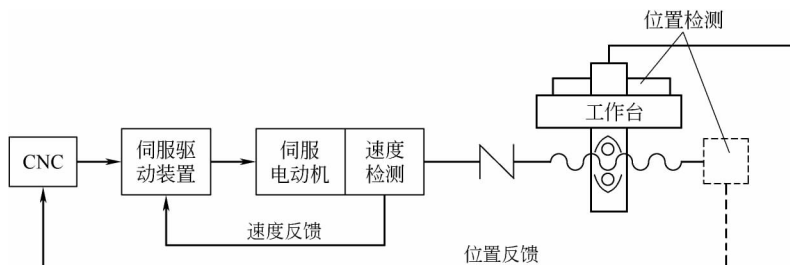


图 1-3 数控机床的进给伺服系统

伺服控制的最终目的就是机床工作台或刀具的位置控制，伺服系统中所采取的一切措施，都是为了保证进给运动的位置精度，如对机械传动链进行预紧和反向间隙调整；采用高精度的位置检测装置；采用高性能的伺服驱动装置和伺服电动机，提高数控系统的运算速度等。

3. 输入/输出 (I/O)

数控系统对加工程序处理后输出的控制信号除了对进给运行轨迹进行连续控制外，还要对机床的各种状态进行控制，这些状态包括主轴的变速控制，主轴的正、反转及停止，冷却和润滑装置的启动和停止，刀具的自动交换，工件夹紧和放松及分度工作台转位等。例如，通过对机床程序中的 M 指令、机床的操作面板上的控制开关及分布，在机床各部位的行程开关、接近开关、压力开关等输入元件的检测，由数控系统内的可编程控制器 (PLC) 进行逻辑运算，输出控制信号驱动中间继电器、接触器、电磁阀及电磁制动器等输出元件，对冷却泵、润滑泵、液压系统和气动系统进行控制。

根据国际标准《ISO4336—1981 (E) 机床数字控制——数控装置和数控机床电气设备之间的接口规范》的规定，接口分为四类。图 1-4 所示为数控装置、数控设备和机床间的连接关系。

① 第 I 类 与驱动命令有关的连接电路，主要是与坐标轴进给驱动和主轴驱动的连接电路。

② 第 II 类 数控装置与测量系统和测量传感器之间的连接电路。

第 I 类和第 II 类接口传送的信息是数控装置与伺服驱动单元、伺服电动机、位置检测和速度检测之间的控制信息及反馈信息，它们属于数字控制及伺服控制。

③ 第 III 类 电源及保护电路，由数控机床强电线路中的电源控制电路构成。强电线路由电源变压器、控制变压器、各种断路器、保护开关、接触器、熔断器等连接而成，以便为辅助交流电动机（如冷却泵电动机、润滑泵电动机等）、电磁铁、离合器、电磁阀等功率执行元件供电。强电线路不能与低压下工作的控制电路或弱电线路直接连接，只有通过断路器、中间继电器等器件，转换成直流低电压下工作的触点的开合动作，才能成为继电器逻辑电路和 PLC 可接收的电信号，反之亦然。

④ 第 IV 类 开/关信号和代码信号连接电路，是数控装置与外部传送的输入、输出控制信号。当数控机床不带 PLC 时，这些信号直接在数控装置和机床间传送；当数控装置带有 PLC 时，这些信号除极少数的高速信号外，均通过 PLC 传送。

四、数控机床的分类

数控机床的种类规格很多，分类方法也各不相同，常见的分类有以下几种方式。

(一) 按被控制对象运动轨迹进行分类

1. 点位控制的数控机床

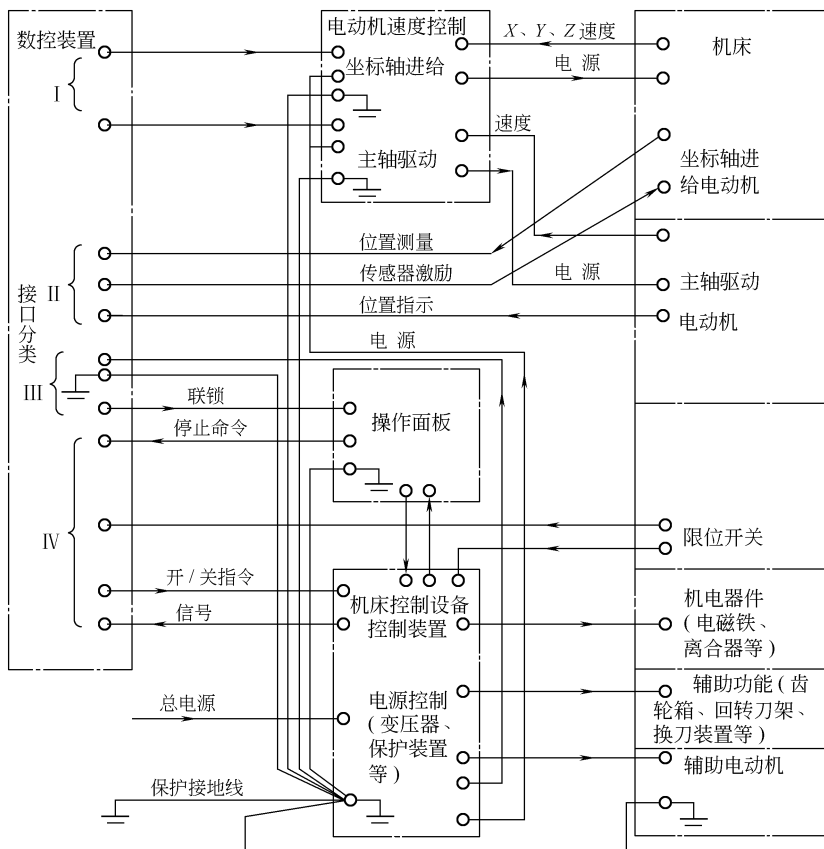


图 1-4 数控装置、数控设备和机床间的连接关系

点位控制数控机床的数控装置只要求能够精确地控制一个坐标点到另一个坐标点的定位精度，而不管从一点到另一点是按什么轨迹运动，在移动过程中不进行任何加工。为了精确定位和提高生产率，系统首先高速运行，然后按 1~3 级减速，使之慢速趋近于定位点，减小定位误差。这类数控机床主要有数控钻床、数控坐标镗床、数控冲床、数控点焊机、数控折弯机和数控测量机等。

2. 直线控制的数控机床

直线控制数控机床一般要在两点间移动的同时进行切削加工，所以不仅要求有准确的定位功能，还要求从一点到另一点之间按直线规律运动，而且对运动的速度也要进行控制，对于不同的刀具和工件，可以选择不同的进给速度。这一类机床包括简易数控车床、数控铣床、数控镗床等。一般情况下，这些机床可以有两到三个可控轴，但一般同时控制轴数只有两个。

3. 轮廓控制的数控机床

轮廓控制又称连续控制，大多数数控机床具有轮廓控制功能。其特点是能同时控制两个以上的轴，具有插补功能。它不仅控制起点和终点位置，而且要控制加工过程中每一点的位置和速度，加工出任意形状的曲线或曲面组成的复杂零件。轮廓控制的数控机床的例子有两坐标及两坐标以上的数控铣床、可以加工回转曲面的数控机床、加工中心等。

(二) 按控制方式分类

1. 开环控制数控机床

这类数控机床没有检测反馈装置，数控装置发出的指令信号流程是单向的，其精度主要决定于驱动元件和伺服电机的性能，开环数控机床所用的电动机主要是步进电动机。移动部件的速度与位移是由输入脉冲的频率和脉冲数决定，位移精度主要决定于该系统各有关零部件的制造精度。

开环控制具有结构简单、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，一般位置精度通常为 $\pm 0.01 \sim \pm 0.02 \text{mm}$ 。一般适用于经济型数控机床和旧机床数控化改造。图 1-5 所示为开环数控系统的示意。

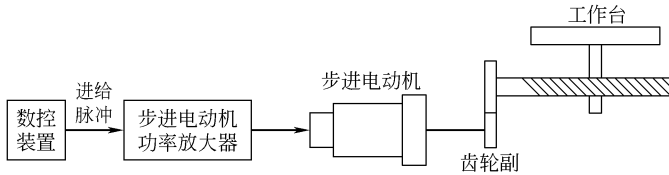


图 1-5 开环数控系统的示意

2. 闭环控制系统

闭环控制系统是指在机床的运动部件上安装位置测量装置（位置测量装置有光栅、感应同步器和磁栅等），如图 1-6 所示。加工中将测量到的实际位置值反馈到数控装置中，与输入的指令位移相比较，用比较的差值控制移动部件，直到差值为零，即实现移动部件的最终精确定位。从理论上讲，闭环控制系统的控制精度主要取决于检测装置的精度，它完全可以消除由于传动部件制造中存在的误差给工件加工带来的影响，所以这种控制系统可以得到很高的加工精度。闭环控制系统的设计和调整都有较大的难度，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。

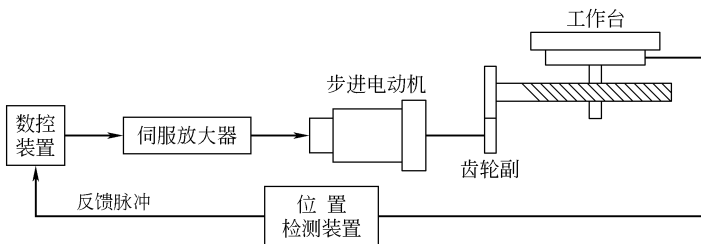


图 1-6 闭环控制系统的示意

3. 半闭环控制系统

半闭环控制系统是在开环系统的丝杠上或进给电动机的轴上装有角位移检测装置，如圆光栅、光电编码器及旋转式感应同步器等。该系统不是直接测量工作台位移量，而是通过检测丝杠转角间接地测量工作台位移量，然后反馈给数控装置，如图 1-7 所示。这种控制系统实际控制的是丝杠的传动，而丝杠的螺母副的传动误差无法测量，只能靠制造保证。因而半

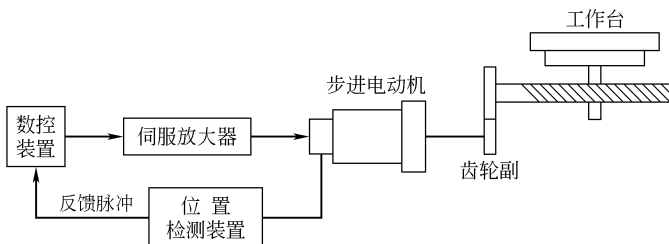


图 1-7 半闭环控制系统的示意

闭环控制系统的精度低于闭环系统。但由于角位移检测装置比直线位移检测装置结构简单、安装调试方便，因此配有精密滚珠丝杠和齿轮的半闭环系统正在被广泛地采用。目前已逐步将角位移检测装置和伺服电动机设计成一个部件，使系统变得更加简单，安装调试都比较方便，中档数控机床广泛采用半闭环控制系统。

（三）按功能水平分类

按数控系统的功能水平分类，通常把数控系统分为低、中、高档三类。如：金属切削类数控机床、金属成型类数控机床、数控特种加工机床、其他类型的数控机床及低档数控机床（脉冲当量 $0.01\sim 0.005\text{mm}$ ，快进速度 $4\sim 10\text{m/min}$ ）、中档数控机床（脉冲当量 $0.005\sim 0.001\text{mm}$ ，快进速度 $15\sim 24\text{m/min}$ ）、高档数控机床（脉冲当量 $0.001\sim 0.0001\text{mm}$ ，快进速度 $15\sim 100\text{m/min}$ ）等。

经济型低档数控系统一般采用单板机、单片机作为控制机，用步进电机作为执行元件，其系统结构简单，价格便宜，适用于自动化程度要求不高的场合。普及型（中档）的数控系统，其系统结构都向系列化、模块化、高性能和成套方向发展，内存容量较大，采用了高精度、高响应特性的交流或直流伺服单元，装置的可靠性指标较高。这类机床功能较全、价格适中、应用较广。高档型数控系统，一般用于多轴车削中心、多轴铣削中心、自动生产线的多轴控制、柔性加工单元、计算机集成制造系统等。这类数控机床的功能齐全，价格较贵。

五、数控设备的工作原理

数控机床加工过程可以分为以下几个步骤。

1. 程序编制

程序编制是将零件的加工工艺、工艺参数、刀具位移量及位移方向和有关辅助操作，按指令代码及程序格式编制加工程序单，然后，将加工程序单以代码形式记录在信息载体上。程序编制可以是手工编制，也可以是自动编制。对于自动编程，目前已较多地采用计算机 CAD/CAM 图形交互式自动编程，通过计算机有关处理后，自动生成的数控程序，可通过接口直接输入数控系统内。

2. 数控代码和译码

数控代码是用来表示数控系统中的符号、字母和数字的专用代码，并组成数控指令。对数控代码进行识别，并翻译成数控系统能用于运算控制的信号形式称为译码。在计算机数控中，译码之前，先将零件程序存放在缓冲器里。译码时，译码程序依次将一个个字符和相应的数码与缓冲器中零件程序进行比较，若两者相等，说明输入了该字符。译码程序是串行工作的，它有一定的译码速度。

3. 刀具轨迹的计算

刀具轨迹的计算是根据输入译码后的数据段参数，进行刀具补偿计算、绝对值与相对值的换算等，把零件程序提供的工件轮廓信息转换为系统认定的轨迹。

4. 插补运算

插补运算是根据刀具中心点沿各坐标轴移动的指令信息，以适当的函数关系进行各坐标轴脉冲分配的计算。只有通过插补运算，使两个或两个以上坐标轴协调的工作，才能合成所需要的目标位置的几何轨迹，或加工出需要的零件形状。

第二节 现代控制技术及发展

一、数控技术的发展史

由于计算机的诞生，在 1952 年产生了世界上第一台 3 坐标立式数控铣床，标志着数控

技术发展的开始。因此，数控技术的发展历史同计算机的发展历史息息相关，也同数控机床的发展历史息息相关。

1. 数控技术的发展

从数控系统的发展看数控技术的发展，大概分为以下几个阶段。

第一阶段 1952~1970年，这一阶段的数控系统采用由硬件电路组成的专用计算机装置，这种数控系统经历了三个时代，即电子管、晶体管和小规模集成电路时代。所采用的器件经过电子管、晶体管和小规模集成电路等几次变革，但各种控制功能，如输入装置、插补运算、控制器等，都是由硬件逻辑电路来实现。控制功能比较简单，使用灵活性较差。

第二阶段 1970~1974年，由于计算机的迅速发展，性能价格比不断提高，小型计算机代替了数控系统中硬件构成的专用计算机装置。这即是第四代数控系统，即计算机数控系统（CNC）。计算机数控用软件实现了许多数控功能，使数控系统具有更大的适应性、柔性好，计算机的优势在数控系统中得到充分发挥。

第三阶段 1974年开始，随着采用大规模集成电路的微处理器迅速发展，数控系统开始采用微型计算机，数控系统发展到第五代。由于微处理器的集成度不断提高，运算速度越来越快，功能越来越丰富。今后微处理器的速度还会提高，数控的功能会有更大的提高，因此除了有特殊要求的系统外，中小型计算机数控均可用微型计算机数控来代替。

微机数控系统的发展，使得数控技术在整个20世纪80年代得到大规模的发展和应用，但是这种数控系统一直由系统制造厂家进行封闭垄断性生产，使得这类数控产品专用性强，与标准计算机不兼容，通用性、软件移植性和组网通讯能力较差。尤其从20世纪90年代开始，个人计算机即PC机的发展迅猛，它带来的众多成果不能被第五代数控系统及时采用。为了摆脱数控系统的这种局面，现在正在向开放式数控系统方向发展，目前朝该方向发展的一个具体表现是基于PC机的开放式数控系统，即第六代数控系统。这种系统从20世纪80年代初开始提出研制，直到20世纪90年代初得以实现。这类系统结合了PC机的分析运算能力、大容量存储功能、图文显示优势及组网的灵活性，使得数控系统的使用具备了较为开放的模式。但是由于PC计算机能力的限制，阻碍了这类数控系统朝高速和高精度方向的发展步伐。

20世纪80年代末基于DSP(Digital Signal Processor)的运动控制技术的突破，为开放式数控系统的发展创造了新的条件。基于DSP的运动控制器为核心，融合PLC功能，与标准PC集成的新一代开放式数控系统有可能成为第六代数控系统的主导产品。

2. 从NC到CNC

数控系统实质上是一台专门用于机床信息处理的计算机。20世纪50~60年代的通用计算机在处理速度和结构上满足不了机床加工的要求，不得不用电子元件来构成专门的逻辑部件，组成专用计算机来实现机床加工的要求，故称之为Hard-Wire NC（硬线连接数控），一般简称为NC。到60年代后期，小型计算机走向成熟并被引入数控，从此NC进化为CNC，NC部分功能开始改由软件来实现。到70年代初，由于微电子技术的发展，由大规模集成电路构成的微处理器引入数控并取代了小型计算机。但由于当时CPU的位数少、速度低（4位、8位，到70年代末才有16位，时钟频率16位也只有4.77M），数控系统一些实时性很强的功能，如插补运算、位置控制等不得不仍旧依靠硬件来实现，故当时硬件品质的高低就决定了CNC品质的高低，进入80年代中期及以后，由于微电子技术的飞跃发展，数控系统在高速化、多功能化、智能化、高精度化和高可靠性等方面得到了提高。现在所说的CNC系统实际上就是微机数控系统（CNC）。CNC系统从价格、功能、使用等综合性指标考虑有标准型数控系统和经济型数控系统。标准型数控系统也称全功能数控系统，功能齐

全，控制精度和运行精度都比较高，基本上都是闭环或半闭环控制系统；经济型数控系统功能比较简单，在我国，经济型数控通常和步进驱动器组成开环控制系统。

随着微机技术的发展，用通用微机技术开发数控系统可以得到强有力的硬件和软件支持，这些软件和硬件技术是开放式的，此时的通用微机除了具备本身的功能外，还具备了全功能数控系统的所有功能，这是一条发展数控技术的途径。当前全功能数控系统的特点如下。

① 选用高速微处理器 微处理器是现代数控系统的核心部件，担负着运算、存储和控制等多重任务，其位数和运行速度直接关系到加工效率和加工精度。高速 32 位微处理器的采用，使得数控系统的输入、译码、计算和输出等环节都在高速下进行，同时提高了多轴联动、进给速度和分辨率等指标。现代数控系统控制轴数为 3~15 轴，有的多达 20~24 轴，同时控制轴数（联动）为 3~6 轴。快速进给速度及切削进给速度已达到 100m/min（1 μ m 分辨率）和 24m/min（0.11 μ m 分辨率）。

② 配置高速、功能强的可编程序控制器（PLC） 数控系统除了对位置进行信息控制外，还要对 I/O 状态量进行控制，数控系统中高速和强功能的可编程控制器能满足数控机床这方面的需要。同时，PLC 输入/输出点数和 PLC 容量的增加可满足直接数字控制系统（DNC）和柔性制造单元（FMC）的控制要求。

③ CRT 图形显示、人机对话功能及自诊断功能 大多数现代数控系统采用 CRT 与手动键盘配合，实现程序的输入、编辑、修改和删除等功能，具有前台操作、后台编辑的功能及用户宏程序等；可以有二维图形轨迹显示，有的还可以实现三维彩色动态图形的显示。由于采用菜单选择操作方式，操作简单明了。系统具有硬件、软件及机床故障的自诊断功能，提高了可维修性。

④ 具有多种监控、检测及补偿功能 为了提高数控机床的效率及加工精度，有些数控机床配置了各种测量装置，如刀具磨损的检测、机床精度及热变形的检测等，与之相适应，数控系统则具有刀具寿命管理、刀具参数补偿、反向间隙及丝杠螺距误差补偿、热变形补偿等功能。

⑤ CNC 的智能化 在现代数控系统中，引进了自适应控制技术。数控系统能检测对机床本身有影响的信息，并自动连续调整有关参数，以达到系统运行的最优化。如测量工件状态、调整刀具切削用量、进行尺寸控制，以满足加工精度及表面粗糙度的要求等。在有的 CNC 系统中，还建立了切削率的数据库及切削用量的专家系统等。大多数现代数控系统都具有学习及示教功能。

⑥ 通信功能 一般数控系统都有简单的通信功能，如采用 RS-232C 串行接口与编程机、微机等外设通信。现代数控系统还要与其他数控系统或者上级计算机通信，所以除了 RS-232C 接口外，还有 RS-422 和 DNC（直接数控）等多种通信接口。数控系统要单机进入柔性制造系统（FMS）进而形成计算机集成制造系统（CIMS），就要求数控系统具有更高的通信功能，为此，有的数控系统开发了符合 ISO 开放系统互联七层网络模型的通信规则，如 MAP（制造自动化协议），为自动化技术发展创造了条件。

⑦ 标准化、通用化和模块化 现代数控系统的性能越来越完善，功能越来越多样化，促使数控系统的硬件和软件结构实现标准化、通用化和模块化。选择不同的标准化模块可以组成各种数控机床的控制系统，能方便地移植计算机行业或自动化领域的成果，也便于现有的数控系统进一步扩展及升级。

⑧ 开放性 基于 PC 机的开放式数控系统已成为数控技术发展的重要方向，通过制定必要的技术规范，在通用 PC 机的基础上，一方面使硬件的体系结构和功能模块具有兼容性；

另一方面使软件、接口等技术规范化和标准化，为机床制造厂或用户提供一个良好的开放性和开发环境。

⑨ 高可靠性 这是一项硬指标，现代数控系统的平均无故障时间（MTBF）已达到30000h以上。数控系统与微机只是专用机和通用机及生产批量大小的区别，其制造过程，包括元器件筛选、印制电路板、焊接和贴附、生产过程及最终产品的检测和出厂前整机的考机等措施保证了数控系统有很高的可靠性。

二、数控技术的发展趋势

随着生产技术的发展，对产品的性能要求越来越高，产品改型频繁，采用多品种小批量生产方式的企业越来越多，这就要求数控机床向着高速化、高精度化、复合化、系统化、智能化、环保化方向发展。要求数控技术满足这些要求，数控技术正向以下方面发展。

1. 高速化和高精度化

目前数控机床正向着高速化和高精度化方向发展，主轴转速可达10000~40000r/min，进给速度可达30m/min，快速移动可达100m/min，加速度可达1g，换刀时间可达1.5s，加工中心的定位精度约为 $\pm 5\mu\text{m}$ ，有的可达到 $\pm 1\mu\text{m}$ 。

日本开发的超精密非球面加工机砂轮轴转速为40000r/min，采用系统控制，C轴分度为 0.0001° ，X、Y、Z轴控制分辨率达1nm。

北京机床研究所研制的纳米超精车床，采用气浮主轴轴承，加工最大直径为 $\phi 800\text{mm}$ ，长度为400mm，采用纳米级光栅尺全闭环控制，分辨率为5nm，加工零件的圆度为 $0.1\mu\text{m}$ ，面形精度为 $0.2\mu\text{m}/\phi 50\text{mm}$ ，表面粗糙度为 $R_a 0.008\mu\text{m}$ （铅材、无氧铜）。

达到这样的速度和精度，数控系统、伺服系统必须采取措施使其有相适应的速度和控制精度。

2. 数控系统智能化、信息化

由于微电子技术、超大规模集成电路等各种技术的发展，使数控系统实现智能化变为可能。智能化的数控系统可以解决数控机床的故障诊断和提出排除的方法，也可以更广泛地深入解决加工中的技术问题。

IT（信息技术）将成为21世纪的重要发展潮流，数控机床将会广泛地应用IT技术实现控制、监视、诊断、补偿、调整等功能，提高机床无人化、智能化、集成化水平，利用IT网络将机床与工段、车间、工厂、外界数据库等进行联系，进一步实现制造、管理、经营、销售、服务等方面之间的网络化，也即向计算机集成制造系统方向发展。

数控技术是CIMS的重要技术基础，今后要开发面向CIMS的新一代CNC系统，要研究面向CIMS的数控工作站。

三、数控伺服系统的发展

伺服系统是数控系统的重要组成部分，伺服系统的静态和动态性能直接影响数控机床的定位精度、加工精度和位移速度。当前伺服系统的发展趋势如下。

1. 全数字式控制系统

伺服系统传统的位置控制是将位置控制信号反馈至数控系统，与位置指令比较后输出速度控制模拟信号至伺服驱动装置，而全数字式数控系统的位置比较是在伺服驱动装置中完成的，数控系统仅输出位置指令的数字信号至伺服驱动装置。

另外，直流伺服系统逐渐被交流数字伺服系统所代替。在全数字式控制系统中，位置环、速度环和电流环等参数均实现了数字化，实现了几乎不受负载变化影响的高速响应的伺服系统。

2. 采用高分辨率的位置检测装置

现代数控机床的位置检测大多采用高分辨率的光栅和光电编码器，必要时采用细分电路，进一步提高分辨率。

3. 软件补偿

现代数控机床利用数控系统的补偿功能，通过参数设置对伺服系统进行多种补偿，如位置环增益、轴向运动误差补偿、反向间隙补偿及丝杠螺距累积误差补偿等。

4. 前馈控制

传统的伺服系统是将指令位置 and 实际位置的偏差乘以位置环增益作为速度指令，经伺服驱动装置拖动伺服电动机，这种方式总是存在着位置跟踪滞后误差，使得在加工拐角及圆弧时加工情况恶化。通过前馈控制，使跟踪滞后误差大为减小，提高了位置控制精度。

5. 机械静、动摩擦的非线性控制技术

机床的动、静摩擦的非线性会导致爬行现象。除采取降低静摩擦的措施外，新型的伺服系统还具有自动补偿机械系统静、动摩擦非线性的控制功能。

四、以数控机床为基础的自动化生产系统

加工中心、网络控制技术、信息技术的发展，为单机数控向计算机控制的多机控制系统发展创造了必要的条件。已经出现的计算机直接数控系统（DNC）、柔性制造系统（FMS）及计算机集成制造系统（CIMS），就是以数控机床为基础的自动化生产系统。

1. 计算机直接数控系统（DNC）

计算机直接数控系统就是用一台中央计算机直接控制和管理一群数控设备，进行零件加工或装配的系统，因此，也称它为计算机群控系统。在 DNC 系统中，各台数控机床都各自有独立的数控系统，并与中央计算机组成计算机网络，实现分级控制管理。中央计算机不仅用于编制零件的程序以控制数控机床的加工过程，而且能控制工件与刀具的输送，同时还具有生产管理、工况监控及刀具寿命管理等能力，形成了一条由计算机控制的数控机床自动生产线。

2. 柔性制造单元（FMC）和柔性制造系统（FMS）

柔性制造单元是由加工中心（MC）与工件自动交换装置（APC）组成，同时，数控系统还增加了自动检测与工况自动监控等功能，如工件尺寸测量补偿、刀具损坏和寿命监控等。柔性制造单元既可作为组成柔性制造系统的基础，也可用作独立的自动化加工设备。

柔性制造系统是在 DNC 基础上发展起来的一种高度自动化加工生产线，由数控机床、物料和工具自动搬运设备、产品零件自动传输设备、自动检测和试验设备等组成。这些设备及控制分别组成了加工系统、物流系统和中央管理系统。

柔性制造系统是当前机械制造技术发展的方向，能解决机械加工中高度自动化和高度柔性化的矛盾，使两者有机地结合于一体。

3. 计算机集成制造系统（CIMS）

CIMS 的核心是一个公用的数据库，对信息资源进行存储与管理，并与各个计算机系统进行通信。在此基础上，需要三个计算机系统：一是进行产品设计与工艺设计的计算机辅助设计与计算机辅助制造系统，即 CAD/CAM；二是计算机辅助生产计划与计算机生产控制系统，即 CAP/CAC，此系统对加工过程进行计划、调度与控制，FMS 是这个系统的主体；三是计算机工厂自动系统，它可以实现产品的自动装配与测试、材料的自动运输与处理等。在上述三个计算机系统外围，还需要利用计算机进行市场预测，编制产品发展规划，分析财政状况和进行生产管理与人员管理。虽然 CIMS 涉及的领域相当广泛，但数控机床仍然是 CIMS 不可缺少的基本工作单元。

思考与练习题

- 1-1 什么叫数控技术？
- 1-2 数控设备由哪几部分组成？数控装置一般由哪几部分组成？
- 1-3 伺服系统的作用是什么？
- 1-4 数控系统按被控对象运动轨迹分为哪几类？
- 1-5 数控机床电气控制系统由哪些装置组成？
- 1-6 和普通机床控制相比较，数控机床的控制有何特点？控制的对象有哪些？
- 1-7 轮廓控制、点位控制和点位直线控制各有何特点？
- 1-8 说明闭环、半闭环和开环伺服系统的组成及各自的特点。
- 1-9 简述现代全功能 CNC 系统的特点。
- 1-10 为什么说数控技术是 FMS、CIMS 的技术基础？

第二章 电气控制技术基础

随着科学技术的发展，机床电机的电气控制系统也在不断更新。最初采用手动控制，而后采用继电器接触器控制系统。继电器接触器控制系统的优点是结构简单、价格低廉、维护方便、抗干扰能力强，因此，在数控机床控制中仍然得到广泛、长期的应用。所以我们在本章中仍着重介绍继电器接触器控制系统的常用低压电器、笼型异步电动机典型电气控制线路等。

第一节 低压电器的基本知识

常用低压电器主要介绍低压电器的基本知识和分类，低压控制电器和低压保护电器的概念、结构与动作原理等内容，为以后数控机床强电柜配盘的正确使用与维护打下基础。

一、低压电器的定义及分类

凡是对电能的生产、输送、分配和使用起控制、调节、检测、转换及保护作用的电工器械称为电器。用于交流 50Hz 或 60Hz 额定电压 1200V 以下，直流额定电压 1500V 以下的电路内起接通、断开、保护、控制或调节作用的电器称为低压电器。常用的低压电器有刀开关、转换开关、自动开关、熔断器、接触器、继电器和主令电器等。

低压电器的种类较多，分类方法有多种，就其在电气线路中所处的地位、作用以及所控制的对象可分为低压配电电器、低压控制电器两大类。

（一）低压配电电器

主要用于低压配电系统中。对于这类电器的要求是系统发生故障时，动作准确、工作可靠，在规定的时间内，通过允许的短路电流时，其电动力和热效应不会损坏电器，如：刀开关、断路器和熔断器等。

（二）低压控制电器

主要用于电气传动系统中。对于这类电器的要求是有相应的转换能力，操作频率高，电寿命和机械寿命长，工作可靠，如：接触器、继电器、主令电器等。

二、电磁式电器

电磁式电器在低压电器中占有十分重要的地位，在电气控制系统中应用最为普遍，如接触器、自动空气开关（断路器）、电磁式继电器等。但它们的工作原理基本上相同。就其结构而言主要由电磁机构和执行机构所组成，电磁机构按其电源种类可分为交流和直流两种，执行机构则可分为触头系统和灭弧装置两部分。

（一）电磁机构

电磁机构由线圈、铁心（静铁心）和衔铁（动铁心）等部分组成。从常用铁心的衔铁运动形式上看，其结构形式大致可分为拍合式和直动式两大类，如图 2-1 所示。图 2-1（a）为衔铁沿棱角转动的拍合式铁心，其铁心材料由电工硅钢片制成，它广泛用于直流电器中；图 2-1（b）为衔铁沿轴转动的拍合式铁心，铁心形状有 E 形和 U 形两种，其铁心材料由电工硅钢片叠成，多用于触头容量较大的交流电器中；图 2-1（c）为衔铁直线运动的双 E 形直动式铁心，它也是由硅钢片叠压而成，也分为交、直流两大类。

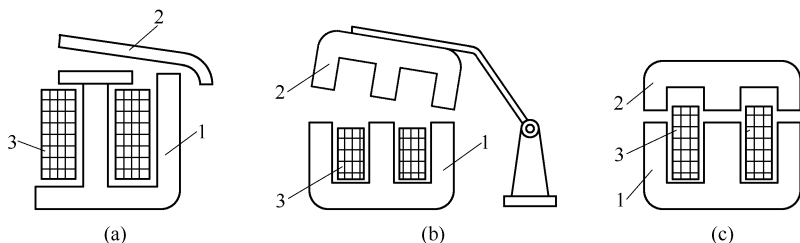


图 2-1 电磁机构几种结构形式

1—铁心；2—衔铁；3—吸引线圈

(二) 作用原理

当线圈中有工作电流通过时，电磁吸力克服弹簧的反作用力，使得衔铁与铁心闭合，由连接机构带动相应的触头动作。在交流电流产生的交变磁场中，为避免因磁通过零点造成衔铁的抖动，需要在交流电器铁心的端部开槽，嵌入一铜短路环，使环内感应电流产生的磁通与环外磁通不同时过零，使电磁吸力 F 总是大于弹簧的反作用力，因而可以消除交流铁心的抖动。

还应指出，对电磁式电器而言，电磁机构的作用是使触头实现自动化操作，但电磁机构实质上就是电磁铁的一种，电磁铁还有很多用途，例如，牵引电磁铁，有拉动式和推动式两种，可用于远距离控制和操作各种机构；阀用电磁铁，可以远距离控制各种气动阀、液压阀，以实现机械自动控制；制动电磁铁则用来控制自动抱闸装置，实现快速停车；起重电磁铁用于起重搬运磁性货物工件等。

三、电器的触头系统和灭弧装置

(一) 电器的触头系统

在工作过程中可以分开与闭合的电接触称为可分合接触，又称为触头，触头是成对的，一为动触头，一为静触头。触头有时又包含主触头、副触头和弧触头。

触头的作用是接通或分断电路，因此要求触头要具有良好的接触性能，电流容量较小的电器（如接触器、继电器）常采用银质材料作触头，这是因为银的氧化膜的电阻率与纯银相似，可以避免表面氧化膜电阻率增加而造成接触不良。

触头的结构有桥式和指式两类。图 2-2 (a) 所示为两个点接触的桥式触头，图 2-2 (b) 所示为两个面接触的桥式触头。两个触头串于同一电路中，电路的接通与断开由两个触点共同完成，点接触形式适用于电流不强且触头压力小的场合；面接触形式适用于电流较强的场合。图 2-2 (c) 所示为指形触头，其接触区为一直线，触头接通或分断时产生滚动摩擦，以利于去掉氧化膜，故其触头可以用紫铜制造，特别适合于触头分合次数多、电流大的场合。

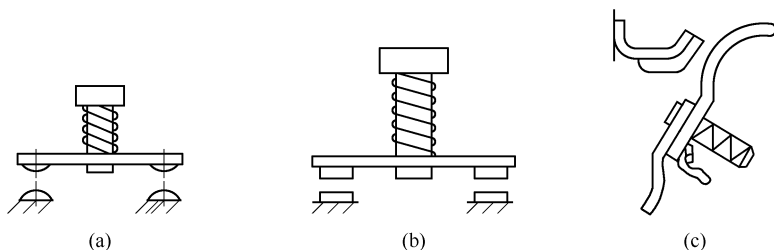


图 2-2 触头的结构形式

（二）灭弧系统

触头在分断电流的瞬间，在触头间的气隙中就会产生电弧，电弧的温度很高，能将触头烧损，并可能造成其他事故，因此，应采用适当措施迅速熄灭电弧。

熄灭电弧的主要措施有：①迅速增加电弧长度（拉长电弧），使得单位长度内维持电弧燃烧的电场强度不够而使电弧熄灭；②使电弧与流体介质或固体介质相接触，加强冷却和去游离作用，使电弧加快熄灭。电弧有直流电弧和交流电弧两类，交流电流有自然过零点，故其电弧较容易熄灭。低压控制电器常用的灭弧方法有以下几种。

① 速拉灭弧法 通过机械装置将电弧迅速拉长，从而加快电弧的熄灭。这种灭弧方法是开关电器中普遍采用的最基本的一种灭弧方法。

② 冷却灭弧法 降低电弧的温度，可使电弧中的热游离减弱，正负离子的复合增加，有助于电弧迅速熄灭。

③ 磁吹灭弧法 利用永久磁铁或电磁铁产生的磁场对电流的作用力来拉长电弧；或者利用气流使电弧拉长和冷却被熄灭。

④ 窄缝灭弧法 这种灭弧方法是利用灭弧罩的窄缝来实现的。灭弧罩内有一条纵缝，缝的下部宽些，上部窄些。当触头断开时，电弧在电动力的作用下进入缝内，窄缝可将电弧弧柱直径压缩，使电弧同缝壁紧密接触，加强冷却和去游离作用，使电弧熄灭加快。

⑤ 金属栅片灭弧法 利用栅片对电弧的吸引作用及磁吹线圈的作用将电弧引入栅片中，栅片将电弧分割成许多串联的短弧。这样每两片灭弧栅片可以看作一对电极，使整个灭弧栅的绝缘强度大大加强，而每个栅片间的电压不足以达到电弧燃烧电压，同时吸收电弧热量，使电弧迅速冷却，所以电弧进入灭弧栅片后就很快熄灭，如图 2-3 所示。

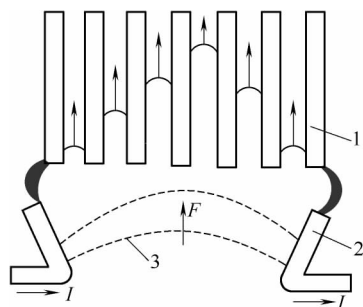


图 2-3 栅片灭弧示意
1—灭弧栅片；2—触点；3—电弧

四、低压电器的主要技术参数

电器要可靠地接通和分断被控制电路，而不同的被控制电路工作在不同的电压或电流等级、不同的通断频繁程度及不同性质负载的情况下，对电器提出了各种技术要求，如触点在分断状态时要有一定的耐压能力以防止漏电或介质击穿，因而电器有额定工作电压这一基本参数；触头闭合时，总有一定的接触电阻，负载电流在接触电阻产生的压降和热量不应过大，因此对电器触点规定了额定电流值，被控负载的工作情况对电器的要求有着重要的影响，如笼型异步电动机反接触制动及反向时的电流峰值约大两倍，所以电动机频繁反向时，控制电器的工作条件较差。于是，有些控制电器被制成能使用在较恶劣的条件下，而有些不能，这就使电器有不同的使用类别。配电电器担负着接通和分断电路电流的任务，相应地规定了极限通、断能力；电器在分断电流时，出现的电弧要烧损触点甚至熔焊，因此电器都有一定的使用寿命。

下面仅就控制电器的主要技术参数作一介绍，供选用电器时参考。

（一）使用类别

按国标 GB 2455—85，将控制电器主触点和辅助触点的标准使用列于表 2-1 中。

（二）主参数——额定工作电压和额定工作电流

① 额定工作电压 是指在规定的条件下，能保证电器正常工作的电压值，通常是指触点的额定电压值。有电磁机构的控制电器还规定了电磁线圈的额定工作电压。

② 额定工作电流 是指根据电器的具体使用条件确定的电流值，它和额定电压、电网

表 2-1 控制电器触点的标准使用类别

触 点	电流种类	使用类别	典型用途举例
主触点	交流	AC-1	无感或微感负载、电阻炉
		AC-2	绕线转子异步电动机的启动、分断
		AC-3	笼型异步电动机的启动、运转中分断
		AC-4	笼型异步电动机的启动、反接制动、反向、点动
	直流	DC-1	无感或微感负载、电阻炉
		DC-3	并励电动机的启动、点动与反接制动
DC-5		串励电动机的启动、点动与反接制动	
辅助触点	交流	AC-11	控制交流电磁铁
		AC-14	控制小容量($\leq 72V \cdot A$)电磁铁负载
		AC-15	控制容量大于 $72V \cdot A$ 电磁铁负载
	直流	DC-11	控制直流电磁铁
		DC-13	控制直流电磁铁,即电感与电阻的混合负载
		DC-14	控制电路中有经济电阻的直流电磁铁负载

频率、额定工作制、使用类别、触点寿命及防护等级等因素有关,同一开关电器可以对应不同使用条件,以规定不同的工作电流值,具体内容可参见表 2-2。

表 2-2 CJX2 系列小容量交流接触器技术数据

型 号	操作频率 次/h		通电持续率/%	AC-3 使用类别						辅助触点		吸引线圈		
				额定工作 电流 I_N/A		可控制三相异步 电动机的功率 P/kW				控制 功率		功率 P/W		额定 控制 电压 U_N/V
	AC-3	AC-4		380 V	660 V	220 V	380 V	500 V	660 V	AC ($V \cdot A$)	DC (W)	启动	吸持	
CJX2-9	1200	300	40	9	7	2.2	4	5.5	5.5	300	30	80	8	24,36
CJX2-12	1200	300		12	9	3	5.5	5.5	7.5			80	8	48,110
CJX2-16	600	120		16	12	4	7.5	9	9			100	9	127,220
CJX2-25	600	120		25	18.5	5	11	11	15			100	9	380,660

(三) 通断能力

通断能力以表 2-3 中非正常负载时能接通和断开的电流值来衡量。接通能力是指开关闭合时不会造成触点熔焊的能力。断开能力是指开关断开时能可靠灭弧的能力。

表 2-3 相应于使用类别的接通与分断条件

类 别	正 常 负 载						非 正 常 负 载					
	接 通			分 断			接 通			分 断		
	I/I_N	U/U_N	$\cos\phi$	I/I_N	U/U_N	$\cos\phi$	I/I_N	U/U_N	$\cos\phi$	I/I_N	U/U_N	$\cos\phi$
AC-1	1	1	0.95	1	1	0.95	1.5	1.1	0.95	1.5	1.1	0.95
AC-2	2.5	1	0.65	1	0.4	0.65	4	1.1	0.65	4	1.1	0.65
AC-3	6	1	0.35	1	0.17	0.35	10	1.1	0.35	8	1.1	0.35
AC-4	6	1	0.35	6	1	0.35	10	1.1	0.35	8	1.1	0.35

(四) 寿命

包括机械寿命和电寿命。机械寿命是指电器在无电流情况下能操作的次数;电寿命是指在所规定的使用条件下不需要修理或更换零件的负载操作次数。