

数据机床电气控制

主 编 狄 丽

西北大学出版社



随着科学技术的发展,数控机床电气控制的应用越来越广泛。在机床设备的控制中,数控机床电气控制比其他的控制方法使用得更加普遍。然而,数控机床电气控制应用领域缺乏较高素质技能型人才现状,阻碍了我国制造业的发展和提高。本课程贯彻教育为社会主义现代化建设服务的方针,以提高学生的职业能力和职业素养为宗旨,为制造业培养技能型数控机床电气控制的紧缺人才。

本书介绍常用电气控制系统的基本电路、典型机床通用电气控制系统分析、PLC 控制原理及应用、数控系统及原理、数控机床的信息传递、数控机床伺服系统、数控机床的位置检测元件。为了进行岗位综合实践训练,使学生积累岗位工作经验,加强了各种典型的实训环节,突出了实践性教学环节,将理论课与实践课融为一体。

本书在编写上结合技能型数控机床电气控制技术人才培养特点,力求突出针对性、适用性和先进性。叙述方法由简到繁、深入浅出、详略得当,尽量突出专科教材的特色。

本书适用于高等专科学校数控专业、机电一体化专业、工业自动化专业、机制专业及其他相关专业,对于机电相关专业的本科生和工程技术人员来说也是一本较好的自学教材和参考书。

本书由西安航空技术高等专科学校狄丽担任主编,周武、邓利红,以及陕西国防工业职业技术学院侯晓方,陕西工业职业技术学院苏宏志担任副

前 言

主编。狄丽编写第三章,周武编写第一、六章,邓利红编写第四章,侯晓方编写第五章,苏宏志编写第七章,西安铁路运输职工大学刘家军编写第二章,西安航空职业技术学院陈荷编写第八章,全书由狄丽、邓利红统稿。

由于编者水平有限,时间仓促,书中的不妥之处,恳请读者批评指正。

编 者

2005年3月

【内容提要】 全书共分八章,系统介绍了电气控制技术、数控技术的概念、CNC 装置及系统、PLC 控制技术、自动调速系统、数控机床伺服系统等内容。在编写时,注重反映电气控制技术和数控技术的现状,特别是在此领域中的新技术和新发展,使该书具有一定的先进性;同时既注重基础理论,又注重实用技术和实用技能的培养。书中共编写了五个实训部分,供读者使用,以提高应用技能。教材适用于数控技术、机电一体化及相关专业,也可作为从事数控技术、数控机床、机电一体化技术等工作的工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

数控机床电气控制/狄丽主编. —西安:西北大学出版社,2005. 8

ISBN 7-5604-2020-6

I. 数... II. 狄... III. 数控机床 - 电气控制 - 高等学校 - 教材 IV. TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 083427 号

书 名 数据机床电气控制
主 编 狄 丽
出版发行 西北大学出版社
通信地址 西安市太白北路 229 号 邮编: 710069 电话: 029 - 88302590
经 销 新华书店经销
印 刷 陕西向阳印务有限公司
开 本 787mm × 960mm 1/16
印 张 17.25
字 数 290 千字
版 次 2005 年 8 月第 1 版 2005 年 8 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 7-5604-2020-6/TH· 9
定 价 26.00 元

目 录

第1章 概 述	/1
1.1 机床电气控制简介	/1
1.2 数控技术	/5
1.3 数控机床的分类与发展	/10
小 结	/15
习题与思考题	/15
第2章 常用低压控制电器	/16
2.1 低压电器的基本知识	/16
2.2 闸刀开关和主令电器	/22
2.3 接触器	/31
2.4 继电器	/34
2.5 自动开关	/46
2.6 熔断器	/48
小 结	/53
习题与思考题	/53
第3章 电气控制系统的基本控制电路及典型设备分析	/55
3.1 电气图	/55
3.2 笼型异步电动机启动控制电路	/58
3.3 笼型异步电动机制动控制电路	/69
3.4 直流电动机控制电路	/73
3.5 电气控制线路的逻辑代数分析方法	/75
3.6 电气控制线路的其他基本环节	/77
3.7 车床的电气控制	/80
3.8 铣床的电气控制	/85

3.9 实训一(X62W 铣床电气原理与故障分析)	/92
小 结	/98
习题与思考题	/99
第 4 章 PLC 控制原理及应用	/100
4.1 概述	/100
4.2 PLC 的基本原理	/103
4.3 欧姆龙 CPM1A 系列 PLC 概述	/107
4.4 欧姆龙 CPM1A 系列 PLC 的编程指令介绍	/110
4.5 PLC 编程规则及编程举例	/125
4.6 实训二(加工中心刀库控制)	/133
小 结	/136
习题与思考题	/136
第 5 章 数控原理及系统	/138
5.1 数控系统的插补原理	/138
5.2 CNC 系统中的刀具补偿	/149
5.3 CNC 系统的组成	/151
5.4 数控系统的硬件结构	/153
5.5 数控系统的软件结构	/160
5.6 典型数控系统介绍	/165
5.7 数控系统的参数设置及通信	/170
小 结	/177
习题与思考题	/178
第 6 章 自动调速系统	/179

6.1 速度控制的基本概念和指标	/179
6.2 三相异步电动机的变频调速	/182
6.3 实训三(变频器的设置与调试操作)	/188
小 结	/195
习题与思考题	/195
第7章 数控机床伺服驱动系统	/196
7.1 概 述	/196
7.2 步进电机	/200
7.3 开环伺服驱动系统	/207
7.4 伺服电动机工作原理	/214
7.5 闭环伺服驱动系统与位置控制	/224
7.6 进给伺服系统的性能分析	/229
7.7 实训四(步进电动机驱动系统的调试及使用)	/235
7.8 实训五(交流伺服系统的构成、调整及使用)	/242
小 结	/250
习题与思考题	/251
第8章 数控机床的位置检测元件	/252
8.1 概 述	/252
8.2 旋转变压器	/254
8.3 光栅测量装置	/257
8.4 脉冲编码器	/259
小 结	/262
习题与思考题	/262
附 录	/263
参考文献	/268

第 1 章 概 述

1.1 机床电气控制简介

1.1.1 机床在国民经济中的重要作用

工业、农业、科学和国防的现代化发展,要求机械产业不断地提供各种先进的设备,如电力机车、内燃机车、各种车辆、起重运输机械、装卸机械、工程机械、养路机械等设备。为制造和维修这些技术设备,就必须具备制造各种金属零件的设备,如铸造、锻造、焊接、冲压和切削加工设备。机械零件的形状精度、尺寸精度和表面粗糙度要求较高,主要靠切削加工来达到,特别是形状复杂、精度要求高和表面粗糙度要求高的零件,往往需要经过几道甚至几十道切削加工工序才能完成。

机床的性能直接影响机械产品的性能、质量和经济性,因此,它是国民经济中具有战略意义的基础工业,机床的拥有量及其先进程度将直接影响到国民经济各部门生产发展和技术进步的能力。

1.1.2 电气自动控制的地位和作用

自动控制是指在没有人力直接参与或仅有少量人力参与的情况下,利用自动控制系统,使被控对象或生产过程自动地按预定的规律去进行工作。如机床按规定的程序自动地启动和停车;机床按照可编程控制器中预先编制的程序,实现各种自动加工循环;数控机床按照计算机发出的程序指令,自动按预定的轨迹加工等。

实现自动控制的手段是多种多样的,可以用电气的方法实现,也可以用机械、液压、气动等方法实现。由于现代化的金属切削机床均采用交流或直流电动机作为原动机,因而电气自动控制是现代机床的主要控制手段。即使采用其他控制方法,也离不开电气自动控制的配合。而且电气自动控制化程度越高,机床的加工性能、质量、效率就越高。

机床电气自动控制的方法同样也适用于其他机器设备及生产过程。现代机床在电气自动控制方面综合应用了许多先进科学技术成果,如计算机技术、电子技术、传感技术、伺服驱动技术,使机床的自动化程度、加工效率、加工精度、可靠性不断提高,同时扩大了工艺范围,缩短了新产品的试制周期,对加速产品更新换代、降低成本和减轻工人劳动强度方面起到了重要作用。

由此可见,电气自动控制对于现代机床、其他机器设备及生产过程,有着极其重要的作用。

1.1.3 机床电气自动控制的基本概念

现代机床由工作机构、传动机构、原动机、自动控制系统组成。

自19世纪有了电动机以后,由于电力在传输、分配、使用和控制方面的优越性,使电动机拖动获得了广泛应用。现代机床的动力主要由电动机来提供,即由电动机来拖动机床的主轴和进给系统。电动机通过传动机构,来带动工作机构的拖动方式,就称为电力拖动。

电力拖动在速度调节方面,具有无可比拟的优越性和发展前途。采用直流或交流电动机驱动机床,实现无级调速控制,使结构复杂的变速箱变得十分简单,简化了机床结构,提高了效率、刚度和精度。如电机—主轴部件,将交流电动机转子直接安装在主轴上,完全代替了主轴变速齿轮箱,振动和噪音大大减小。

机床的控制任务是实现对主轴的转速和进给量的控制,有时还要完成像各种保护、冷却、照明等系统的控制。机床的电气自动控制系统就是用电气手段为机床提供动力,并实现上述控制任务的系统。

人们总是把电动机、传动机构及工作机构视为电力拖动部分;把为满足加工工艺要求,电动机启动、制动、反向、调速等的控制部分视为电气自动控制部分。

1.1.4 机床电气自动控制的发展概况

机床电气自动控制的发展与电力拖动和电气自动控制的发展紧密相联。

1. 电力拖动的发展过程

20世纪初,由于电动机的出现,使得机床的拖动发生了根本性的变革,电动机代替了蒸汽机,机床的电力拖动也随着电动机的发展而不断更新。

(1) 成组拖动 19世纪末,交、直流电动机相继出现,最初是由电动机直接代替



蒸汽机,即由一台电动机拖动一组机床,称之为成组拖动。电动机是通过拖动传动轴(天轴),再由传动轴经过皮带来实现能量分配与传递。这种拖动方式机构复杂、传递路径长、损耗大、生产灵活性小、工作中极不安全,在电动机成本逐渐下降后就被淘汰。

(2) 单电机拖动 20世纪20年代,出现了单独拖动形式,即由一台电动机拖动一台机床,称为单电机拖动。与成组拖动相比较,简化了传动机构、缩短了传动路径、降低了能量传递中的损失、提高了传动效率,同时也可充分利用电动机的调速性能,并易于实现自动控制。至今中小型通用机床仍有采用单电机拖动方式的。

(3) 多电机拖动 由于生产的发展,机床在结构上有所改变,机床的运动要求增多。如果各种辅助运动也用同一台电动机拖动,其机械传动机构将变得十分复杂,而且也不能满足生产工艺的需求,因此出现了多台电动机分别拖动不同的运动机构,这种多台电动机拖动一台机床就称为多电机拖动。

采用了多电机拖动以后,简化了机床的机械结构,提高了传动效率;各运动部件能够选择最合理的运动速度,缩短了加工时间;便于分别控制,易于实现各运动部件的自动化,提高机床整体的自动化程度。多电机拖动已经成为现代机床最基本的拖动方式。

2. 电气自动控制的发展历程

在电力拖动方式的演变过程中,电力拖动的控制方式也由手动控制逐步向自动控制方向发展。电气自动控制发展的历史,也就是电动机调速技术和电气控制技术发展的历史。

(1) 电动机调速技术的发展 一方面,为了提高机床的工作效率,在满足加工精度与光洁度的前提下,对于不同的工件材料和不同的刀具,应选择各自不同的最合理的切削速度。另一方面,机床的快速进刀、快速退刀和对刀调整等辅助工作,也需要不同的运动速度。因此,为了保证机床能在不同的速度下工作,要求包括主拖动和进给拖动在内的电力拖动系统,必须具备调节速度的功能。

现代机床一般采用下列调速系统:

① 机械有级调速系统。在机械有级调速系统中,电动机采用不调速的鼠笼式异步电动机,而速度的调节是通过改变齿轮箱的变速比来实现的。

在这种系统中,负载转矩是经机械传动机构传到电动机轴上,电动机轴上转矩只是负载转矩的传动比的数倍,可以选择转矩较小的电动机。但机械系统变得复



杂,影响了机床的加工精度。在普通车床、钻床、铣床中一般都采用这种机械有级调速系统。

② 电气—机械有级调速系统。在机械有级调速系统中,用多速鼠笼式异步电动机,就可简化机械传动机构,这样的系统就是电气—机械有级调速系统。多速电动机一般采用双速电动机,少数机床采用三速、四速电动机。中小型机床的主拖动系统多采用双速电动机。

③ 电气无级调速系统。通过直接改变电动机转速来实现机床工作机构转速的无级调节的拖动系统,称为电气无级调速系统。这种调速系统具有调速范围宽、可以实现平滑调速、调速精度高、控制灵活等优点,还可大大简化机床的机械传动机构,因而广泛应用于机床的主拖动和进给拖动系统中。

电气无级调速系统主要分为直流无级调速系统和交流无级调速系统两大类。

由于交流电动机具有结构简单、造价低及容易维护等特点,交流拖动系统在普通机床中占主导地位。但直流电动机具有良好的启动、制动和调速性能,可以很方便地在较大范围内实现平滑无级调速,20世纪30年代,直流调速系统在重型和精密机床上得到广泛应用。20世纪60年代以后,由于大功率晶闸管的问世,大功率整流技术和大功率晶体管的发展,晶闸管直流电动机无级调速系统取代了直流发电机—直流电动机、交磁放大机等直流调速系统,采用脉宽调制的直流调速系统也得到了广泛应用。

(2) 电气控制技术的发展 常用的控制系统有:

① 手动控制。它是用一些手动电器(如刀开关、控制器等)来控制执行电器(电动机),称为手动控制。它适合那些容量小、动作单一、不需要频繁操作的场合。

② 继电器接触器控制。20世纪二三十年代出现了继电器接触器控制,采用继电器、接触器、位置开关、保护元件,实现对控制对象的启动、停车、调速、制动、自动循环以及保护等控制,通常称为电气控制。

由于控制器件结构简单、价廉,控制方式简单、直接、工作可靠、易维护,因此在机床控制上得到长期、广泛的应用。其缺点:一是接线固定,一台控制装置只能针对某一种固定程序的设备,一旦工艺程序有所变动,改变控制程序困难,就得重新配线,满足不了对程序经常改变、控制要求比较复杂的系统的需求;二是控制装置体积大、功耗大、控制速度慢;另外它是有触点控制,在控制复杂时可靠性降低。

③ 顺序控制器控制。为了解决复杂和程序可变的控制对象的需要,在20世纪



60年代出现了顺序控制器。它是继电器和半导体元件综合应用的控制装置,通过编码、逻辑组合来改变程序,实现对程序经常变动的控制要求。具有通用性强、程序可变、编程容易、可靠性高、使用维护方便等特点,广泛应用于组合机床、自动控制线上。

④可编程控制器控制。随着计算机技术的发展,又出现了以微型计算机为基础的,具有编程、存储、逻辑控制及数字运算功能的可编程控制器 PLC。PLC 的设计以工业控制为目标,接线简单、通用性强、编程容易、抗干扰能力强、工作可靠。它一问世即以强大的生命力,大面积地占领了传统的控制领域。PLC 的发展方向之一是微型、简易、价廉,企图取代传统的继电器控制;而它的另一个发展方向是大容量、高速度、高性能、对大规模复杂控制系统能进行综合控制。

⑤数字控制。数字控制是机床电气自动控制发展的另一个重要方面。数控机床就是数控技术用于机床的产物。它是 20 世纪 50 年代初,为适应中小批量的机械加工自动化的需要,应用电子技术、计算技术、现代控制理论、精密测量技术、伺服驱动技术等现代科学技术的成果。下面将全面介绍数控方面的相关内容。

1.2 数控技术

1.2.1 数控及数控机床

数字控制简称数控(Numerical Control 缩写为 NC),是指用数字指令来控制一台或一台以上机械的动作。它所控制的一般是位置、角度、速度等机械量,但也有温度、压力等物理量。数控是与机床的控制密切结合而发展起来的。因此,数控一词,一般是“数控机床”的狭义使用。当然,广义的数控也有用在例如造纸、化工、石油精炼等流程工艺方面,但这是另外一种类型的数字控制,其叫法也大多采用别的名称。

由于科学技术和社会生产的迅速发展,使机械产品日趋精密、复杂而且改型频繁。这不仅给机床设备提出精度与效率的要求,也提出了通用性与灵活性的要求。尤其在造船、航天航空、机床、重型机械以及军工生产部门,其需要加工的零件的特点是批量小、形状复杂、经常改型且精度要求高。使用普通机床加工,不仅劳动强度大、生产效率低,还难以保证精度甚至无法加工。仿形机床使小批量、复杂零件的自动化加工得到了部分的解决。它借助靠模能加工出比较复杂的零件,有一定的灵活



性。但靠模的制造、安装与调整要花费许多手工劳动,生产的准备时间较长,如批量很小甚至单件零件制造靠模也很不经济。另外,仿形机床加工出的零件精度受靠模制造误差的影响,不能满足一些高精度零件的加工要求。大批量的零件加工使用专用自动机床、组合机床以及由它们组成的专用加工生产自动线,可以得到高的加工效率,但一般初期投资大,对于约占机械加工总量 80% 的单件、小批量(10~100 件)零件的加工并不经济。同时,由于近年来市场竞争日趋激烈,为满足市场迅速变化的需要,还要求不断开发新品,缩短生产周期,因此这种不易变更的“刚性”自动化设备在生产中也日益暴露其缺点。因而数控机床作为灵活通用,能够快速适应产品频繁变化的“柔性”自动化机床应运而生,且集微电子、计算机、自动控制、自动检测以及精密机械等技术的最新成果而迅速发展起来。

所谓数控机床就是将加工过程中所需的各种操作(如主轴变速、松夹工件、进刀与退刀、开车与停车、选择工具、供给冷却液等)和步骤以及工件的形状尺寸用数字化的程序表示(称为数字信息),通过控制介质(如光盘或磁盘等)将数字信息送入数控装置(专用的或通用的计算机),数控装置对输入的信息进行处理与运算,发出各种控制信号(或指令),来控制机床的伺服系统或其他驱动(执行)元件,使机床自动加工出所需要的工件。数控机床与其他自动机床的一个显著区别在于当被加工的工件改变时,除了重新装夹工件和更换刀具之外,只需要更换一条新的“描写”该工件的穿孔纸带或磁带,而不需要对机床作任何调整。

1.2.2 数控机床的组成与原理

数控机床通常由控制介质、数控装置、伺服系统和机床组成,必要时还加上检测装置,如图 1-2-1 所示。

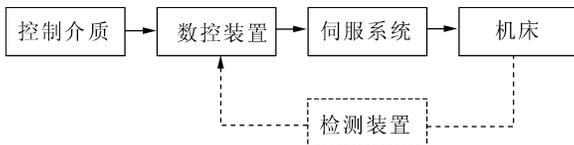


图 1-2-1 数控机床的组成

1. 控制介质

要对数控机床进行控制,就要将图 1-2-1 数控机床的组成在人与机床之间建立某种联系,这种联系的中间媒介物即称为控制介质,也称为信息载体。在控制介质上存储着加工零件所需要全部操作信息和刀具相对工件的位移信息。控制介

质可以是多种形式的,它随着数控装置的类型不同而异。常用的有光盘和磁盘。

磁盘上的程序由计算机逐行地转换为数控装置可以识别和处理的电信号。也有一些数控机床,常使用数码拨盘、数码插销或按键直接将程序或数据输入。

程序编制与磁盘等控制介质的准备,在一定程度上影响了数控机床的使用效率。用通用计算机辅助,实现自动程序编制,是现在解决此问题的重要途径。

2. 数控装置

数控装置是数控机床的中心环节,它接收控制介质输入的信息,经处理与运算去控制机床的动作。对各种具体控制对象,数控装置处理运算的步骤都是预先安排好的。这种“安排”可以用专用计算机固定接线的硬件结构来实现,称为硬线数控或硬联接数控;也可以用预先放在小型通用计算机或微型计算机内的系统程序来实现,称为软线数控或软联接数控。

硬线数控通常由输入装置、控制器、运算器和输出装置,如图 1-2-2 所示数控装置四大部分组成。

图 1-2-2 中,虚线内包含的部分为数控装置。输入装置接收由计算机输出的代码,经过识别与译码之后分别输送到各相应的寄存器,这些指令与数据是数控运算的原始依据。控制器接收输入装置的指令,根据指令控制运算器与输出装置,以实现机床的各种操作(例如控制工作台沿着某一坐标轴的运动,主轴变速或冷却液开关等)以及控制整机的工作循环。运算器接收控制器的指令,将输入装置送来的数据进行某种运算,并不断向输出装置送出运算结果,使伺服系统执行所要求的运动。

输出装置根据控制器的指令将运算器送来的计算结果输送到伺服系统,经过功率放大驱动相应的坐标轴,使机床完成刀具相对工件的运动。

软线数控目前常采用微型计算机作为数控装置。微型计算机的中央处理单元(CPU)又称为微处理器,是一种大规模集成电路,它将运算器、控制器等集成在一块集成电路芯片上。在微型计算机中,输入与输出电路即 I/O 接口也采用大规模集成

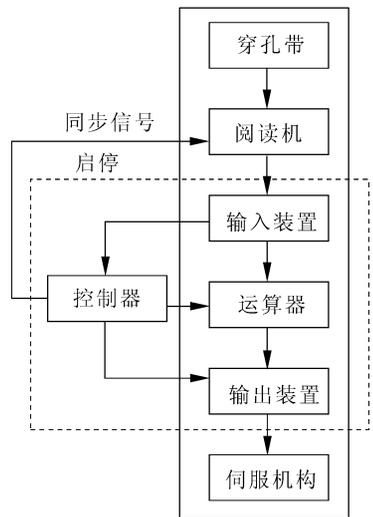


图 1-2-2 数控装置组成

电路;存储器采用高密度的存储介质,如半导体存储器,存储容量大。存储器分为只读存储器(ROM)和随机存取存储器(RAM),前者用于存放系统的控制程序,后者存放系统运行时的工作参数或用户的零件加工程序。

硬线数控与软线数控的工作原理基本相同,只是后者采用通用硬件,不同的功能通过改变软件来实现,因此更为灵活与经济。

3. 伺服系统

伺服系统接收来自数控装置的指令信息,严格按照指令信息的要求带动机床的移动部件,以加工出符合图纸要求的零件。它是数控机床的重要组成部分,它的伺服精度和动态响应是影响数控机床的加工精度、表面质量与生产率的重要因素之一。

伺服系统包括驱动装置和执行机构两大部分。目前大都采用直流伺服电机或交流伺服电机作为执行机构,这些电机常带有光电编码器等位置测量元件和测速发电机等速度测量元件。各种执行机构由相应的驱动装置来驱动。

4. 机床

与传统的手动机床相比,数控机床的结构强度、刚度和抗振性以及外部造型、整体布局,传动系统与刀具系统的部件结构和操作机构等方面都已发生了很大的变化,其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效能。

1.2.3 数控机床的特点与适用范围

数控机床具有以下几个特点。

1. 对加工对象改型的适应性强

由于在数控机床上改变加工零件时,只需要重新编制程序,更换一条新的穿孔纸带或者手动输入程序就能实现对零件的加工。它不同于传统的机床,不需要制造、更换许多工具、夹具和模具,更不需要重新调整机床。因此数控机床可以快速地由加工一种零件转变为加工另一种零件,这就为单件、小批以及试制新产品提供了极大的便利。它缩短了生产准备周期,而且节省了大量工艺装备费用。

2. 加工精度高

数控机床是按以数字形式给出的指令进行加工的,由于目前数控装置每输出一个脉冲信号数控机床移动部件相应的移动量(称脉冲当量)可以达到 0.001mm ,而且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。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 。因为数控机床的传动系统与机床结构都具有很高的刚度和热稳定性,而且提高了它的制造精度,特别是数控机床的自动加工方式避免了生产者的人为操作误差,因此,同一批加工零件的尺寸一致性好,产品合格率高,加工质量稳定。

3. 加工生产率高

零件加工所需要的时间包括机动时间与辅助时间两部分。数控机床能够有效地减少这两部分时间,因而加工生产率比普通机床高得多,数控机床主轴转速和进给量的范围比普通机床的范围大,每一道工序都能选用最有利的切削用量,良好的结构刚性允许数控机床进行大切削用量的强力切削,有效地节省了机动时间;数控机床移动部件的快速移动和定位均采用了加速与减速措施,因而选用了很高的空行程运动速度,消耗在快进、快退和定位的时间要比一般机床的少得多。

数控机床在更换被加工零件时几乎不需要重新调整机床,而零件又都安装在简单的定位夹紧装置中,用于停机进行零件安装调整的时间可以节省不少。数控机床的加工精度比较稳定,可以减少停机检验时间。因此数控机床的利用系数比一般机床的利用系数高得多。

使用带有刀库和自动换刀装置的数控加工中心机床时,在一台机床上实现了多道工序的连续加工,减少了半成品的周转时间,生产效率的提高就更为明显。

4. 减轻操作者的劳动强度

数控机床对零件的加工是按事先编好的程序自动完成的,操作者除了安放穿孔带或操作键盘,装卸零件、关键工序的中间测量以及观察机床的运行之外,不需要进行繁重的重复性手工操作,劳动强度与紧张程度均可大为减轻,劳动条件也得到相应的改善。

5. 良好的经济效益

使用数控机床加工零件时,分摊在每个零件上的设备费用是较昂贵的。但在单件、小批量生产情况下,可以节省许多其他方面的费用,如节省加工前的划线工时及零件安装到机床后调整、加工和检验时间,从而减少了直接生产费用;节省了手工制作模型、钻模板及其他工夹具的工艺装备费用;由于加工精度稳定,减少了废品率、使生产成本下降等等,因此能够获得良好的经济效益。

6. 有利于生产管理的现代化

用数控机床加工零件,能准确地计算零件的加工作业,并有效地简化了检验和



工夹具、半成品的管理工作,从而有利于生产管理的现代化。数控机床使用数字信息与标准代码输入,最适宜与数字计算机联系,目前已成为计算机辅助设计、制造及管理一体化的基础。

数控机床确实存在一般机床所不具备的许多优点,因而逐渐得到了推广,但它还不能完全代替其他类型的机床,也还不能以最经济的方式解决机械加工中的所有问题。一般来说,数控机床适用于加工:

①多品种小批量零件。这是因为数控机床设备费用高昂,与大批量生产采用的专用机床相比其效率还不够高。通常采用数控机床加工的合理生产批量在10~100件之间。

②结构比较复杂的零件。通常数控机床适宜加工结构比较复杂及在非数控机床上加工时需要昂贵的工艺装备(工具、夹具、模具)的零件。

③需要频繁改型的零件。

④价值昂贵、不允许报废的关键零件。

⑤需要最少生产周期的急需零件。

广泛推广数控机床的最大障碍是设备的初始投资大,而且系统本身比较复杂,增加了维修困难与费用。同时数控机床加工需要编制程序,当加工零件形状不太复杂时,可以手工编程,但易出错且速度慢;当零件形状复杂时,则必须使用自动编程系统,这就需要配备专门的程序设计人员,并对穿孔纸带进行校验与试切削验证,从而增加了生产费用。因此,在决定选用数控机床加工时,需要进行反复对比和仔细地经济分析,使数控机床发挥其最好经济效益。

1.3 数控机床的分类与发展

1.3.1 概况

数控机床是综合应用了微电子、计算机、自动控制、自动检测以及精密机械等技术的最新成果而发展起来的完全新型的机床,40年来,它经历了研究试制、工业应用和高速发展三个阶段,在品种、数量、加工范围与加工精度等方面有了惊人的发展。

1948年由美国帕森斯(Parsons)公司在研制加工直升机叶片轮廓检查用的样板机床时,首先提出数控机床设想,并与麻省理工学院合作,于1952年制作了世界上



第一台数控机床样机,这是一台采用专用计算机进行运算与控制的直线插补连续控制的三坐标数控铣床,专用计算机采用电子管元件,逻辑运算与控制采用硬件联接电路。后又经过三年的改进与自动程序编制的研究,于1955年进入实用阶段。

其后,随着电子与计算机技术的发展,数控机床经历了五代变化。第一代:1952~1959年,采用电子管元件。第二代:从1959年开始,采用晶体管元件。第三代:从1965年开始,采用集成电路。第四代:从1970年开始,采用大规模集成电路及小型通用计算机。第五代:从1974年开始,采用微处理器或微型计算机。

机床数控系统发展的基本目标是增强功能、方便使用、提高可靠性与降低价格。因而自20世纪70年代以来,由于大规模集成电路以及微型计算机的出现,数控系统的价格逐年下降,并大幅度提高了系统的精度与可靠性,使数控机床进入了高速发展阶段。我国从1958年开始研制数控机床并取得一定成绩。近年来,随着工厂、企业技术改造的深入开展,各行各业对数控机床的需要量大幅度增长,同时由于引进了国外的数控系统与伺服系统的制造技术,使我国数控机床在品种、数量和质量方面得到了迅速的发展。目前已有几十家机床厂能够生产不同类型的数控机床和加工中心机床,我国与先进的工业国家在数控技术领域中的差距正在缩小,数控机床必然会在我国现代化建设中发挥越来越大的作用。

1.3.2 数控机床的分类

数控机床发展的重要方面是品种不断增加,通常可以从三个不同角度对数控机床的品种进行分类。

1. 按工艺用途分类

最普通的数控机床是钻床、车床、铣床、镗床、磨床与齿轮加工机床等等。除了切削加工的数控机床以外,数控技术也大量用于压力机、冲床、弯管机、折弯机、电火花切割机和火焰切割机金属成型机床与特种加工机床上。近年来在非加工设备中也大量采用了数控技术,其中较常见的有装配机,多坐标测量机、自动绘图机和工业机器人等。

加工中心机床是带有刀库和自动换刀装置的数控镗铣床,它的出现打破了一台机床只进行一种工艺加工的传统概念。以铣削加工中心为例,它在数控铣床上增加了一个刀库(一般为20~120把刀)和自动换刀装置,工件在一次装夹后,可以对其大部分加工面进行铣、钻、扩、铰及攻丝等多工序加工。加工中心机床大多以镗铣为



主,主要用于加工箱体或异形零件。近来也出现了为数不少的车削加工中心,几乎可以完成非回转体零件的所有加工工序。加工中心机床可以有效地避免由于多次安装造成的定位误差,减少了机床的台数和占地面积,大大提高了生产率和加工自动化程度。

2. 按运动方式分类

(1) 点位控制系统 点位控制数控机床的特点:只控制机床移动部件的终点位置,即控制移动部件由一个位置到另一个位置的精确定位,而对它们定位过程中的运动轨迹没有严格要求,在移动和定位过程中不进行任何加工。因此为了尽可能减少移动部件的运动与定位时间,通常先以快速移动到接近终点坐标,然后以低速准确移动到定位点,以保证良好的定位精度。这类数控机床主要有数控坐标镗床、数控钻床、数控冲床、数控点焊机以及数控弯管机、数控测量机等。

(2) 点位直线控制系统 点位直线控制数控机床的特点:机床移动部件不仅要实现由一个位置到另一个位置的精确移动,而且能够实现平行于坐标轴的直线切削加工运动。

(3) 轮廓控制系统 轮廓控制数控机床的特点:能够对两个或两个以上的坐标轴同时进行控制,它不仅要控制机床移动部件起点与终点坐标,而且要控制整个加工过程每一点的速度与位移量,即要控制移动轨迹,将工件加工成一定的轮廓形状。数控铣床、数控车床和数控磨床是典型的轮廓控制数控机床。数控火焰切割机、数控线切割机及数控绘图机等也都采用轮廓控制系统。

3. 按控制方式分类

(1) 开环控制系统 开环控制系统就是指不带反馈装置的控制系統,如图 1-2-2 实线所示。

通常使用功率步进电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。移动部件的移动速度与位移量是由输入脉冲的频率和脉冲数所决定的。

开环控制系统具有结构简单、系统稳定、容易调试、成本较低等优点。但是系统对移动部件的实际位移量是不进行检测的,也不能进行误差校正。因此,步进电机的步距误差、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。目前开环控制系统已不能满足数控机床日益提高的精度要求。尽管如此,开环控制系统



在数控机床的发展过程中占有相当重要的地位,许多采用开环步进系统的数控机床仍在生产中发挥作用。

(2) 闭环控制系统 闭环控制系统是在机床移动部件位置上直接装有直线位置检测装置,将测量到的实际位移值反馈到数控装置中,如图 1-2-2 虚线所示,与输入的指令位移值进行比较,用偏差值进行控制,使移动部件按照实际需要的位移量运动,最终实现移动部件的精确定位。

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,但这并不意味着可降低对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。

(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装有角位移检测装置(如感应同步器和光电编码器等),通过检测丝杠的转角间接地检测移动部件的位移,然后反馈至数控装置中。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。因而半闭环控制系统的精度低于闭环控制系统。但由于角位移检测装置比直线位移检测装置的结构简单、安装方便,因此配有精密滚珠丝杠和齿轮的半闭环系统正在被广泛采用,且由于惯性较大的机床移动部件不包括在闭环之内,系统的调试比较方便,并有很好的稳定性。目前已逐步将角位移检测装置和伺服电机设计成一个部件,使系统变得更加简单。

1.3.3 数控机床的发展

数控机床的发展不仅表现为数量的迅速增长、种类的不断增多,而且在质量与性能上也有显著提高。与早期数控机床相比,无论是机床结构还是数控装置或伺服系统都有了惊人的变化。主要体现在以下几个方面。

1. 机床结构的发展

机床的爬行、振动、热变形、刚度不足以及机床的制造与装配误差等都会直接或间接地影响被加工零件的精度。因此,数控机床在机械结构上首先要求提高其静刚度与动刚度,减少热源的影响,提高其热稳定性,提高传动链的刚度并消除其中的间隙,消除爬行等,以保证加工精度稳定可靠。

20 世纪 60 年代初期,在一般数控机床的基础上又开发了数控加工中心机床。



前面数控机床分类中已介绍过它是在一般数控镗铣床上加装刀库和自动换刀装置,工件在一次装夹后,加工中心机床可自动更换刀具,连续地对零件的各加工面自动地完成铣、钻、铰以及攻丝等多种工序。目前刀库的容量可多达 120 把左右,自动换刀装置的换刀时间仅为 1~2 秒钟。加工中心机床已被工业发达国家普遍采用。据统计,1985 年仅在美国就有 150 家工厂生产加工中心机床。继加工中心机床出现之后,实现工序的高度集中仍然是数控机床当今的发展趋势。现已先后出现了带有工业机器人和工件交换系统(APC)的车削加工中心机床,可以自动更换电极的电火花加工中心机床等。这些工序集中的数控机床无论在结构上或外形上都与传统的机床大不相同。

为了实现工件的自动装卸,以镗铣床为基础的加工中心机床可以带有两个交换工作台。在交换工作台上由工人装夹好待加工的零件后,在数控系统的控制下,可以自动地把零件送上机床,并将已加工好的零件从机床上自动卸下。如果这种加工中心机床带有较多的交换工作台,便可实现无人看管加工。这种带有多个交换工作台的加工中心机床称为柔性制造单元(FMC)。

2. 数控系统的发展

目前,数控系统大都采用多个微处理器(CPU)组成的微型计算机作为数控装置(CNC)的核心。因此,高性能的计算机数控系统可以同时控制十几个轴,甚至几十个轴。而且,在机床上加工零件的同时,计算机数控系统还可以为其他待加工零件编制程序。有的还带有在屏幕上显示刀具轨迹的功能,在屏幕上模拟刀具运动,可使操作者及早发现程序的差错。

计算机数控系统还可带有可编程序控制器 PLC,它代替了传统的继电器逻辑控制,取消了庞大的强电控制箱。可编程序控制器可以通过编制程序来改变其控制逻辑,同样具有高度的柔性。数控技术和可编程序控制器的结合,可以有效地完成刀具管理和刀具寿命监控。

由此可见,与早期数控装置相比,现代数控系统不仅控制的轴数大为增加,而且其功能也远远超出控制刀具轨迹与机床动作的范畴,而且能够进行自动编程、自动测量、自身故障诊断与通信联络。省去了庞大的强电控制箱之后,不仅提高了系统的可靠性,而且为实现机电一体化设计提供了极大的方便。

3. 伺服系统执行机构的发展

数控机床伺服系统的执行机构也有其自身的发展过程。由于传统的直流伺服



电机响应时间长,性能远远不能满足数控机床的要求,所以最早的数控机床采用步进电机和液压扭矩放大器。后来功率型步进电机问世,开始直接用它驱动机床。如今,由于开环系统的应用日趋减少,因而步进电机在数控机床上的应用受到限制,主要用在精度要求不高、功率较小的经济型数控机床上。

日本首先研究成功了一种新型的小惯量直流伺服电机,其电气时间常数可以与液压伺服系统匹敌。特别是(1963年)大功率晶闸管(可控硅)整流器价格的大为下降,使得由价廉的晶闸管(可控硅)整流器驱动的小惯量直流伺服电机比液压伺服装置优越得多。于是20世纪60年代中期,不少机床制造厂在新设计的数控机床上普遍使用了小惯量直流伺服电机。

20世纪70年代,美国盖梯斯(GETTYS)公司首先研制成功了大惯量直流伺服电机,即通常所指的宽调速直流伺服电机。这种电机的峰值扭矩为额定扭矩的10~15倍,由于具有大的扭矩惯性比,大惯量直流伺服电机仍然具有与小惯量直流伺服电机相同的快速响应特性。这种电机的调速范围为0.1~2000r/min,可以直接与丝杠相连。而且克服了小惯量直流伺服机热容量小、过载时间不能太长的缺点,目前它已为许多数控机床所采用。

小 结

本章主要介绍了电气控制在机床发展中的地位 and 作用,及其由手动—继电器—顺序—数字控制的发展过程。重点讲述了数控技术的相关概念,数控机床的基本组成、分类、特点及使用范围,最后简单介绍数控机床程序编制的步骤及注意事项。

习题与思考题

- 1-1 电气自动控制在现代机床发展的重要作用主要体现于哪些方面?
- 1-2 现代机床的调速方法有哪几种?发展方向如何?
- 1-3 何谓数控技术,主要涵盖哪些内容?
- 1-4 数控机床的组成有哪些?影响机床加工精度的是哪一部分?



第 2 章 常用低压控制电器

在我国经济建设和人民生活中,电能的应用越来越广泛。在工业、农业、交通、国防以及人民生活的一切用电部门中,大多采用低压供电。为了安全、可靠地使用电能,电路中就必须装有各种起调节、分配、控制和保护作用的接触器、继电器等低压电器,即无论是低压供电系统还是控制生产过程的电气控制系统,均是由用途不同的各类低压电器组成。低压电器也是机床电气控制系统的基本组成元件。控制系统的优劣与所用低压电器直接相关。尽管随着电子技术、自控技术和计算机技术的迅猛发展,一些电器元件可能被电子线路所取代,但由于电器元件本身也朝着新的领域扩展(表现在提高原件的性能,生产新型的元件,实现机、电、仪一体化,扩展元件的应用范围等),且有些电器元件有其特殊性,故不可能被完全取代。随着科学技术和生产的发展,低压电器的种类不断增多、用量也不断增大、用途更为广泛。所以电气技术人员必须熟悉常用低压电器的原理、结构、型号、规格和用途,并能正确选择、使用与维护。

2.1 低压电器的基本知识

低压电器通常是指工作在交流电压小于 1200V、直流电压小于 1500V 的电路中起通断、保护、控制或调节作用的电器设备以及利用电能来控制、保护和调节非电过程、非电装置的用电装备。随着工农业生产的发展和某些工业部门使用电压等级的提高,低压电器的电压等级范围也将提高。

2.1.1 低压电器的分类

1. 按用途或所控制的对象分类

(1) 低压配电电器 这类电器包括刀开关、转换开关、熔断器和自动开关。主要用于低压配电系统中,要求在系统发生故障的情况下动作准确、工作可靠。

(2) 低压控制电器 包括接触器、继电器、启动器、控制器、主令电器、电阻器和



电磁铁等。主要用于电气传动系统中,要求寿命长、体积小、重量轻、工作可靠。

2. 按动作方式分类

(1) 自动切换电器 依靠电器本身参数变化或外来信号(如电、磁、光、热等)而自动完成接通、分断或使电机启动、反向以及停止等动作。如接触器、继电器等。

(2) 非自动切换电器 依靠外力(如人工)直接操作来进行切换等动作。如手动电器。通过人力做功来完成接通、分断、启动、反向和停止等动作的电器。常用的手动电器有刀开关、按钮、转换开关等。

另外,按电器的执行机能可分为有触点电器和无触点电器。低压电器按工作条件还可划分为一般工业电器、船用电器、化工电器、矿用电器、牵引电器及航空电器等几类,对不同类型低压电器的防护形式、耐潮湿、耐腐蚀、抗冲击等性能的要求不同。

一般用途的低压电器(称为基本系列)使用环境条件为:海拔高度不超过2000m,周围空气温度为 $-25 \sim 40^{\circ}\text{C}$,空气相对湿度90%,安装倾斜度不大于 5° ,无爆炸危险的介质及无显著摇动和冲击振动的场合。对于在特殊环境和工作条件下使用的各类低压电器,常在基本系列产品的基础上进行派生,构成如防爆电器、船舶电器、化工电器、热带电器、高原电器以及牵引电器等。

2.1.2 低压电器的基本结构

从结构上看,电器一般都具有两个基本组成部分,即感测部分与执行部分。感测部分接收外界输入的信号。并通过转换、放大与判断做出有规律的反应,使执行部分动作,或者输出相应的指令,实现控制的目的。对于有触点的电磁式电器,感测部分大都是电磁机构,而执行部分则是触头系统。

1. 电磁机构

电磁机构的作用是将电磁能转换成为机械能并带动触点闭合或断开。

(1) 结构形式 电磁机构通常采用电磁铁的形式,有吸引线圈、铁心(亦称静铁心)和衔铁(也称动铁心)三部分组成。其工作原理为:当线圈通入电流后,磁通 Φ 通过铁心、衔铁和气隙形成闭合回路,衔铁受电磁吸力的作用吸向铁心,衔铁同时又受弹簧拉力作用,只有当电磁吸力大于弹簧反力时,衔铁才能被铁心吸住。电磁吸力应大于弹簧反力,以便吸牢,但吸力又不宜过大,若过大则在吸合时衔铁与铁心将发生严重撞击。



电磁铁有各种结构形式,铁心有 E 型、U 型。动作方式有直动式、转动式两种。它们各有不同的机电性能,适用于不同的场合。

直流励磁的电磁铁和交流激磁的电磁铁在结构上也不相同。直流电磁铁在稳定状态下通过恒定磁通,铁心中没有磁滞损耗和涡流损耗,不产生热量,只有线圈是产生热量的热源,故直流电磁铁的线圈没有骨架,且成细长形,以增加它和铁心直接接触的面积,从而使线圈产生的热量通过铁心散发出去。交流电磁铁中通过交变磁通,铁心中有磁滞损耗和涡流损耗,产生热量,因此铁心用硅钢片叠压而成,以减小铁损,并将线圈制成短粗形,由线圈骨架把它和铁心隔开,以免铁心的热量传递给线圈使其过热而烧坏。

跨接在电源两端的电磁铁线圈称电压线圈,其电流值由电路电压和线圈本身的电阻或阻抗决定。其圈数多导线细、电流小而匝间电压高,一般用绝缘性能好的漆包线绕制。

当需要反应主电路电流值时,常将电磁线圈串入主电路即称为电流线圈。当主电路电流超过其动作值时电磁铁吸合,通过线圈的电流值由电路负载的大小决定,由于主电路的电流一般较大,因此线圈导线粗、匝数少,通常用紫铜条或粗的紫铜线绕制。

(2) 交流电磁铁的分磁环 对于单相交流电磁机构,一般在铁心端面上置一个铜制的分磁环(或称短路环),以便改善工作状况。这是因为电磁机构的磁通是交变的,而电磁吸力与磁通平方成正比,当磁通为零时,吸力也为零,这时衔铁在弹簧反力作用下被拉开,磁通过零后吸力增大,当吸力大于反力时,衔铁又吸合,在如此反复循环的过程中,衔铁产生强烈的振动和噪声,噪声污染工作环境,振动使电器寿命缩短,并使触点接触不良、磨损或熔焊。在铁心端面装设了分磁环后,将气隙磁通 Φ 分为两部分,一部分 Φ_1 穿过分磁环,将在环内产生感应电动势、感应电流,产生磁通 Φ_K , Φ_K 分别与 Φ_1 、 Φ_2 相量相加,使穿过气隙的磁通成为 Φ_{1K} 与 Φ_{2K} ,它们不仅相位不同而且幅值也不一样。由这两个磁通产生的电磁力 F_{1K} 与 F_{2K} ,就不再同时过零点。如果分磁环设计的比较理想,使 ϕ 为 90° 并且 F_{1K} 、 F_{2K} 近乎相等,这时,合成磁力就相当平坦,只要最小吸力大于反力,那么衔铁将会牢牢地被吸住,不会产生振动和噪声。

2. 触头系统

触头是电器的执行部件,这些电器就是通过触头的动作来接通与分断电路的。



因此,触头工作的好坏直接影响整个电器的工作性能。触头的工作状态可分为闭合状态、闭合过程和分断过程。

(1) 闭合状态 触头闭合工作时,由于接触表面凹凸不平,接触电阻加大,损耗增大,温度升高,表面氧化加剧,因此对触头的容许温升有一定的要求。

(2) 闭合过程 在触头闭合的过程中,往往发生运动部分的弹跳,而触头的这一机械振动又使触头表面产生电气磨损,严重时发生触头熔焊。为此应适当增大触头弹簧的初压力,减小触头质量、降低触头的接通速度,如有些电器采用的滚动指形触头。在触头闭合瞬间,先由动触头的头部与静触头接触,经过一段滚动后再转变为动触头的根部与静触头接触。这种指形触头闭合滚动接触的过程,既消除了氧化膜,同时使得长期工作的触头面不会有熔焊现象发生,有利于电弧转移,减轻触头的电气磨损,对触头在闭合状态下的工作十分有利。

(3) 分断过程 两触头之间的接触,实质上是许多个点的接触,触头在分断时最终将出现一个点接触的现象。这时,该点处的电流密度可达 $107 \sim 10^{12} \text{ A/m}^2$,致使金属熔化,并随着触头的分离形成熔化了的高温金属液桥,一旦触头完全分开,金属液桥被拉断,在断口处产生电弧。

电弧形成的过程是:当触头间刚出现断口时,两触头间距离极小,电场强度极大,在高热和强电场作用下,金属内部的自由电子从阴极表面逸出,奔向阳极,这些自由电子在电场中运动时撞击其他中性气体分子。因此,在触头间隙中产生了大量的带电粒子,使气体导电形成了炽热的电子流即电弧。

电弧一经产生,便在弧隙中产生大量热能,电压越高,电流越大,即电弧功率越大,弧区温度越高,电弧的游离因素就越强。

与此同时,弧隙中还存在着去游离因素,因为已游离的正离子和电子在空间相遇要进行复合,重新形成中性的分子,同时高度密集的高温离子和电子,要向周围密度小、温度低的介质方面扩散,使弧隙内离子和自由电子浓度降低,电弧电阻增加,电弧电流减小,热游离大为削弱。

所以,电弧是游离与去游离的统一体,触头分断是切断电流,应使电弧尽快熄灭。为此,应抑制游离因素而加强去游离因素,若去游离处于主导地位,就能使电弧熄灭。

3. 灭弧措施

各种有触点电器都是通过触点的开、闭来通、断电路的,触点接通电路时存在着



接触电阻,引起触点温升;触点分断电路时,由于热电子发射和强电场的作用,使气体游离,从而在分断瞬间产生电弧。开关电器在开端电路时产生的电弧,一方面使电路仍旧保持导通状态,延迟了电路的断开,另一方面会烧损触点,缩短电器的使用寿命。所以不少电器采取了灭弧措施,归纳起来主要有以下几种。

①依靠触点的分开,机械地拉长电弧。

②利用流过导电回路或特制线圈的电流在弧区产生磁场,使电弧受力迅速移动和拉长电弧。

③将电弧分隔成许多串联的短弧。

④依靠磁场的作用,将电弧驱入用耐弧材料制成的狭缝中,以加快电弧的冷却。

⑤在封闭的灭弧室中,利用电弧自身能量分解固体材料产生气体,以提高灭弧室中的压力,或者利用产生的气体进行吹弧。

不同电器采用不同的灭弧措施,有些则采用多种措施。例如,石英砂熔断器的熔片用纯银片冲成变截面的形状,放在密封的管内,管内充满石英砂,当出现短路电流时,熔片狭颈片熔断、气化,形成几个串联的短弧,熔片气化后,体积受石英砂限制,不能自由膨胀,因此产生很高的压力,此压力推动弧隙中游离气体迅速向周围石英砂中扩散,并受到石英砂的冷却,从而有较强的灭弧能力。

2.1.3 低压电器的主要技术参数

为了可靠地接通和分断被控电路,对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电器有不同的技术要求。如触点在分断状态时要有有一定的耐压能力,防止漏电或介质击穿,故有额定工作电压这一基本参数;触点闭合时,总有一定的接触电阻,负载电流在接触电阻上产生的压降和热量不应过大,因此对触点规定了额定电流值;被控负载的工作情况对电器也有不同的要求,这就使电器有不同的使用类别;配电器担负着接通和分断短路电流的任务,相应地规定了极限通、断能力;电器分断电流时出现的电弧要烧毁触点甚至熔焊,因此电器要有一定的使用寿命。

控制电器主要技术参数介绍如下,供选用电器时参考。

1. 使用类别

按国标 GB2455—85,将控制电器主触点和辅助触点的标准使用类别列于表 2-1-1 中。



表 2-1-1 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-2	并励电动机的启动、点动与反接制动
DC-3		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($\leq 72\text{VA}$)电磁铁负载
		AC-15	控制大容量($> 72\text{VA}$)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

2. 主参数——额定工作电压和额定工作电流

额定工作电压是指在规定条件下,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。有的电磁机构的控制电器还规定了电磁线圈的额定工作电压。

额定工作电流是根据电器的具体条件确定的电流值,它与额定电压、电网频率、额定工作制、使用类别、触点寿命及防护等级等因素有关,同一个开关电器可以对应不同的使用条件,规定不同的工作电流值。

3. 通断能力

通断能力以表 2-1-2 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 2-1-2 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	$\cos\varphi$									
AC-1	1	1	0.95	1	1	0.95	1.5	1.1	0.95	15	1.1	0.95
AC-2	1.5	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

4. 寿命

包括机械寿命和电寿命。机械寿命是指在不通电情况下能操作的次数;电寿命是指在规定使用条件下不需修理或更换零件的负载操作次数。

2.2 闸刀开关和主令电器

闸刀开关属于非自动切换的开关电器,一般用于主电路电源的控制。主令电器也属于非自动切换的开关电器,用于控制电路电源的控制,在控制电路系统中用来发布命令,包括按钮、转换开关、行程开关和接近开关等。

2.2.1 闸刀开关

闸刀开关是一种手动电器,主要用来手动接通与断开交、直流电路,通常只作隔离开关使用,也可用于不频繁地接通与分断额定电流以下的负载,如小型电动机、电阻炉等。

闸刀开关按极数分为单极、双极与三极 3 种。其结构都由刀片、触点座、手柄和底板组成。

为了使用方便和减小体积,在闸刀开关上再安装上熔丝或熔断器,组成兼有通、断电路和保护作用的开关电器,如胶盖闸刀开关、熔断式刀开关等。

1. 胶盖闸刀开关

胶盖闸刀开关主要用于频率为 50Hz,电压小于 380V,电流小于 60A 的电力线路中。一般作为照明、电热等回路的控制开关,也可用作分支线路的配电开关。三极的胶盖闸刀开关适当降低容量时可以直接用于不频繁启动和停止的小型电动机



控制,并借助于熔丝起过载短路保护作用。常用的有 HK1, HK2 系列,胶盖闸刀开关的技术数据见表 2-2-1。

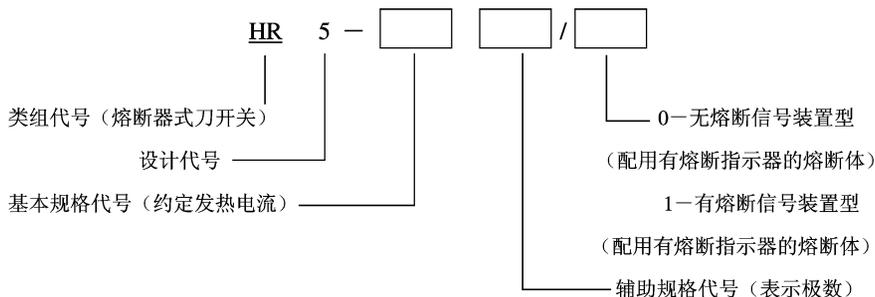
表 2-2-1 HK2 系列胶盖闸刀开关的技术数据

额定电压	额定电流/A	极数	最大分断电流/A (熔断器极限分断电流)	控制电动机 功率/kW	机械寿命 /万次	电寿命 /万次
250V	10	2	500	1.1	10000	2000
	15	2	500	1.5		
	30	2	1000	3.0		
380V	15	3	500	2.2	10000	2000
	30	3	1000	4.0		
	60	3	1000	5.5		

2. 熔断器式刀开关(铁壳开关、负荷开关)

熔断器式刀开关适用于配电线路,用作电源开关、隔离开关和应急开关,并可作电路保护之用,但一般不用于直接接通、断开电动机。常用的型号有 HR5, HH10, HH11 等系列。

型号含义:



HR5 系列开关由底座和盖两大部分组成。底座由钢板制成,其上装有插座组、灭弧室和极间隔板。塑料盖的背面装熔断体,拉动盖的上部手把,它就绕底座下部铰链旋转而通断电路。开关在断开位置有足够的隔离距离,以便安全地更换熔断体。

开关底座两侧装有储能弹簧,使开关具有快速闭合和断开的功能。灭弧室具有防止电弧吹向操作者和防止发生短路的作用。

有熔断装置的开关侧面还装有 LX19K 行程开关,当某相熔断体熔断时,熔断撞



击器弹出,通过传动轴,触动行程开关,以便发出信号或切断电动机控制电路,防止电动机缺相运行。

HR5 系列熔断器式刀开关的主要技术数据如表 2-2-2 所示。

表 2-2-2 HR5 系列熔断器式刀开关的技术数据

额定电压/V	500,660			
约定发热电流/A	100	200	400	630
可配熔断体 额定电流/A	4, 6, 10, 15, 20, 25, 32, 40, 35, 50, 63, 80, 100, 125, 160	80, 100, 125, 160, 200, 224, 250	125, 160, 224, 250, 300, 315, 355, 400	315, 355, 400, 425, 500, 630

2.2.2 组合开关

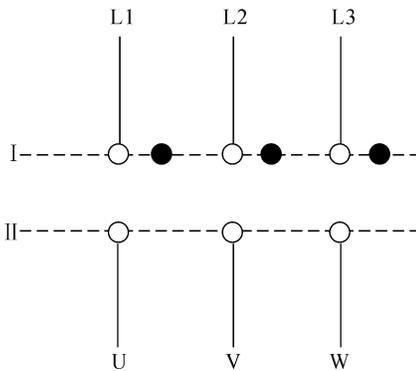
组合开关也是一种闸刀开关,不过它的刀片(动触片)是转动式的,比刀开关轻巧而且组合性强,能组成各种不同线路。

组合开关由若干分别装在数层绝缘件内的双断点桥式动触片、静触片(它与盒外的接线相连)组成。动触片装在附加有手柄的绝缘方轴上,方轴随手柄而旋转,于是动触片也随方轴转动并变更其与静触片分、合位置。所以,组合开关实际上是一个多触点、多位置式可以控制多个回路的开关电器,亦称转换开关。组合开关是一种闸刀开关,用于主电路的控制,但没有灭弧装置,使用时应加以注意。

组合开关分为单极、双极和多极三类。其主要参数有额定电压、额定电流、允许操作频率、极数、可控制电动机最大功率等。其中,额定电流具有 10A, 20A, 40A 和 60A 等几个等级。全国统一设计的新型组合开关有 HZ15 系列,其他常用的组合开关有 HZ10, HZ5 和 HZ2 型。近年引进生产的德国西门子公司的 3ST, 3LB 系列组合开关也有应用。

组合开关根据接线方法不同可组成以下几种类型:同时通断(各极同时接通或同时分断)、交替通断(一个操作位置上,只有总极数中的一部分接通,而另一部分断开)、两位转换(类似双投开关)、三位转换、四位转换等,以满足不同电路的控制要求。

组合开关在电气原理图中的画法,如图 2-2-1 所示。图中虚线表示操作位置,而不同操作位置的各对触点通断状态示于触点下方或右侧,规定用与虚线相交位置上的涂黑圆点表示接通,没有涂黑圆点表示断开。另一种是用触点通断状态表来表示,表中以“+”(或“×”)表示触点闭合,“-”(或无记号)表示分断。

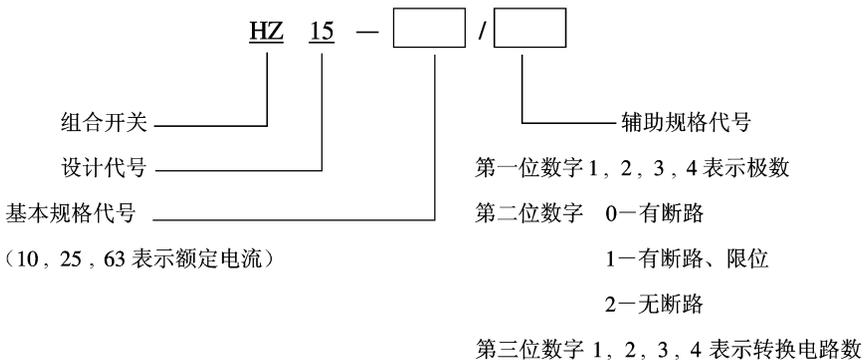


触点 \ 开关位置	I	II
	L1 - U	+
L2 - V	+	-
L3 - W	+	-

图 2-2-1 组合开关的图形符号

产品样本和有关手册提供各种组合开关的接线图,以便查阅选用。

型号含义:



2.2.3 万能转换开关

万能转换开关属于主令电器,和组合开关相比是具有更多操作位置和触点、能够切换多条电路的一种手动控制电器。由于它能控制多条回路,适应控制复杂线路,故有“万能”转换开关之称。

它由触点座、凸轮、转轴、定位机构、螺杆和手柄等组成,并由 1~20 层触点底座叠装起来。其中每层底座均可装三对触点,并由触点底座中的凸轮(套在转轴上)来控制这三对触点的接通和断开。由于各层凸轮可制成不同形状,因此,用手柄将开关转到不同位置时,通过凸轮的作用,可使各对触点按所需的变化规律接通或断开,以适应不同线路的要求。



表征万能转换开关特性的有额定电压、额定电流、手柄型式、触点座数、触点对数、触点座排列型式、定位特征代号、手柄定位角度等。如 LW6 系列的额定电压为交流 380V、直流 220V，额定电流为 5A，触点座排列型式有单列式、双列式和三列式。对于双列式，其列与列之间用齿轮啮合，并由公共手柄进行操作，双列式的触点对数比单列式增加一倍。当定位机构用不同限位方式时，LW6 所用手柄可达 2~12 个操作位置。

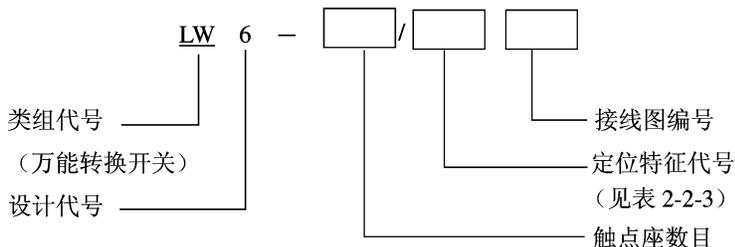
常用的万能转换开关有 LW8, LW6, LW5, LW2 等系列。表 2-2-3 为 LW6 系列万能转换开关定位特征代号表。

表 2-2-3 LW6 系列万能转换开关定位特征代号

定位 代号	手柄定位角度											
A						0	30					
B					30	0	30					
C					30	0	30	60				
D				60	30	0	30	60				
E				60	30	0	30	60	90			
F			90	60	30	0	30	60	90			
G			90	60	30	0	30	60	90	120		
H		120	90	60	30	0	30	60	90	120		
I	120	90	60	30	0	30	60	90	120	150		
J	150	120	90	60	30	0	30	60	90	120	150	
K	210	120	90	60	30	0	30	60	90	120	150	180

万能转换开关主要用于电气控制电路的转换。在操作不太频繁的情况下，也可用于小容量电动机的启动、停止或反向的控制。

型号含义：





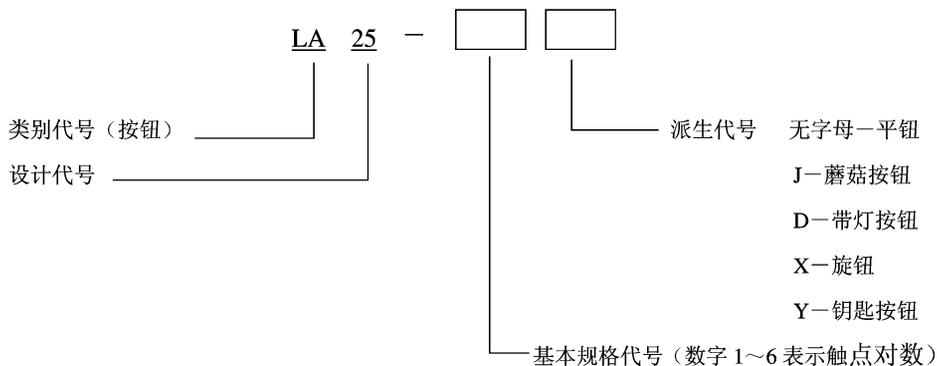
2.2.4 控制按钮

控制按钮的主要技术要求:规格、结构型式、触点对数和按钮的颜色。通常所选择的规格为交流额定电压 500V,允许持续电流为 5A。结构型式有多种,适合于以下各种场合:紧急式——装有突出的蘑菇形钮帽,以便紧急时操作;旋钮式——用手旋转进行操作;指示灯式——在透明的按钮内装入信号灯,以作信号显示;钥匙式——为使用安全起见,须用钥匙插入方可旋转操作等等。按钮的颜色有红、绿、黑、白、黄、蓝等几种,供不同场合选用。

控制按钮是主令电器,主要用于操纵控制器,或者控制接触器和继电器的线圈电源或用于电气连锁线路,以实现对各种运动的控制。

全国统一设计的按钮型号为 LA25 系列,其他常用的型号为 LA2, LA10, LA18, LA19, LA20 等系列。引进生产的有德国 BBC 公司的 LAZ 系列。

型号含义:



LA25 系列按钮是组合式结构,并采用插接式结构连接方式,接触系统采用独立的接触单元,可以根据需要任意组合常开、常闭触点对数,最多可组合为 6 个单元。

2.2.5 行程开关和接近开关

行程开关又称限位开关,是主令电器。能将机械位移转变为电信号,以控制机械运动。它的种类很多,按结构可分为直动式、滚动式和微动式;按触点性质可分为有触点式和无触点式。



1. 行程开关

其动作原理与控制按钮类似,只是它用运动部件上的撞块来碰撞行程开关的推杆,结构简单、成本较低。但触点的分合速度取决于撞块移动的速度。若撞块移动速度太慢,则触点就不能瞬时切断电路,使电弧在触点上停留,时间过长,易于烧蚀触点。因此,这种开关不宜用在撞块移动速度小于 $0.4\text{m}/\text{min}$ 的场合。

2. 微动开关

为克服直动式结构的缺点,采用具有弯片状弹簧的瞬动机构。当推杆被压下时,弹簧片发生变形,储存能量并产生位移,当达到预定的临界点时,弹簧片连同动触点产生瞬时跳跃,从而导致电路的接通、分断或转移。同样,减小操作力时,弹簧片释放能量并产生反向位移,当通过另一临界点时,弹簧片向相反方向跳跃。采用瞬动机构可以使开关触点的转换速度不受推杆压下速度的影响,这样不仅可以减轻电弧对触点的烧蚀,而且也能提高触点动作的准确性。

微动开关的体积小、动作灵敏,适合在小型机构中使用,但由于推杆所允许的极限行程很小,以及开关的结构强度不高,因此,在使用时必须对推杆的最大行程在机构上加以限制,以免压坏开关。

3. 接近开关

为了克服有触点行程开关可靠性较差、使用寿命短和操作频率低的缺点,可采用无触点式行程开关,也叫接近开关。目前小功率晶体管和大功率晶体管无触点电子开关正获得越来越广泛的应用。

接近开关大多由一个高频振荡器和一个整形放大器组成。一般高频振荡器振荡后,在开关的感应面上产生交变磁场,当金属物体接近感应面时,金属体产生涡流,吸收了振荡器的能量,使振荡减弱以致停振。振荡与停振两种不同的状态,由整形放大器转换成二进制的开关信号,从而达到检测位置的目的。

接近开关外形结构多种多样,电子电路外形装调后用环氧树脂密封,具有良好的防潮防腐性能。它能无接触、无压力地发出检测信号,灵敏度高、响应频率快、重复定位精度高、工作稳定可靠、使用寿命长,在自动控制系统中已获得广泛应用。

4. 行程开关

行程开关的主要技术参数有额定电压、额定电流、触点转换时间、动作力、动作角度或工作行程、触点数量、结构形式和操作频率等。结构形式中的复位方式有自



动复位和非自动复位两种。自动复位式是依靠本身的恢复弹簧来复原;非自动复位式在 U 形的结构摆杆上装有两个滚轮,当撞块通过其中的一个滚轮时,摆杆转过一定的角度,使开关动作。撞块离开滚轮后,摆杆并不自动复位,直到撞块在返回行程中再撞及另一滚轮时,摆杆才回到原始位置,使开关复位。这种开关由于具有“记忆”曾被压动过的特性,因此在某些情况下可使控制电路简化,而且根据不同需要,行程开关的两个滚轮可以布置在同一平面内或分别布置在两个平行平面内。

一般行程开关由执行元件、操作机构及外壳等部件组成。操作机构可根据不同场合的需要进行变换组合。

例如,LX32 系列行程开关采用了 LX31-1/1 型微动开关作为执行元件,配以外壳和操作机构,可组成四种不同的操作方式。全国统一设计的行程开关有 LX32, LX33 和 LX31 系列,其他常用的还有 LX19, LXW-11, JLXK1, LW2, LX5, LX10 等系列。LX32 型行程开关主要技术参数见表 2-2-4。

型号含义:

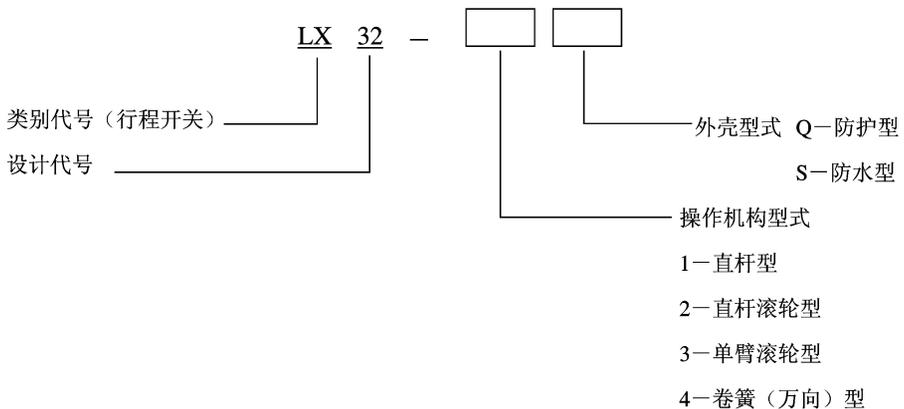


表 2-2-4 LX32 系列行程开关主要技术参数

额定工作电压/V		额定发热 电流/A	额定工作电流/A		额定操作频 率/(次/h)
直流	交流		直流	交流	
220, 110, 24	380, 220	6	0.046(220V 时)	0.79(380V 时)	1200

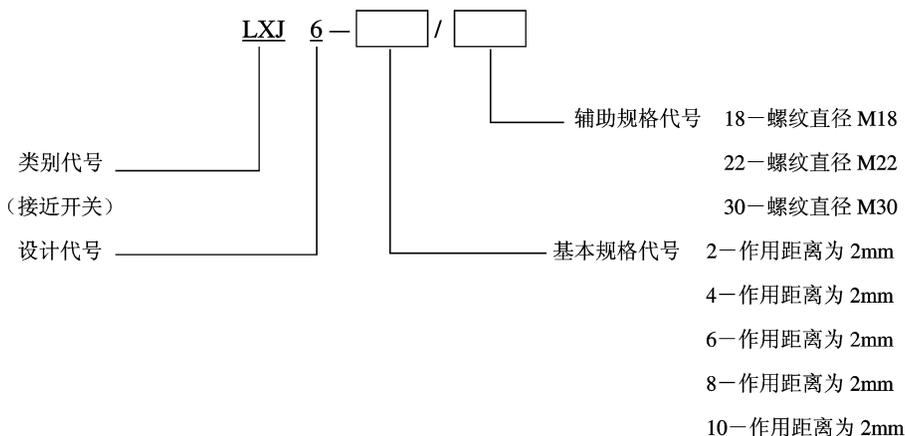
目前应用较多的接近开关有 LJ5, LXJ3, LXJ6, LXJ7 等系列,引进生产的有 3SG, LXT3(德国西门子)系列。LXJ6 系列接近开关主要技术参数见表 2-2-5。



表 2-2-5 LXJ6 系列接近开关技术参数

参数 型号	作用距离 /mm	复位行程 差/mm	额定交流工作 电压(AC、V)	输出能力/mA		重复定位 精度	开关交流压 降(AC、V)
				长期	瞬时		
LXJ6-4/22	4 ± 1	≤ 2	100 ~ 250	30 ~ 200mA	1A (t < 20ms)	≤ ± 0.15	≤ 9
LXJ6-6/22	6 ± 1	≤ 2					

型号含义：



2.2.6 指示灯

指示灯在各类电气设备及电气线路中起电源指示及指挥信号、预告信号、运行信号、事故信号及其他信号的指示作用。

指示灯主要由壳体、发光体、灯罩等组成。外形结构多种多样,发光体主要有白炽灯、氖灯和半导体型三种,发光颜色有黄、绿、红、白、橙五种,使用时应按国标规定的相应用途选用。常用国产产品系列有 AD11, AD30, XDJ1 等。

2.2.7 主令电器的选用原则

主令电器首先应满足控制电路的电气要求,如额定工作电压、额定工作电流(含电流种类)。其次应满足控制电路的控制功能要求,如触头类型(常开、常闭、是否延时等)、触头数目及其组合形式等。除此而外,还要满足一系列特殊要求,这些要求随电器的动作原理、防护等级、功能执行元件类型和具体设计的不同而异。



对于人力操作控制按钮、开关,包括按钮、转换开关、脚踏开关和主令控制器等,除满足控制电路电气要求外,主要是安全要求与防护等级。必须有良好的绝缘和接地性能,应尽可能选用经过安全认证的产品,必要时宜采用低电压操作等措施,以提高安全性。防护等级的选择应视开关的具体工作环境而定。其次是选择按钮颜色标记及组合原则、开关的操作图等。选用按钮时应注意其颜色标记是否符合国际规定。不同功能的按钮之间的组合关系也应该符合有关标准的规定。

2.3 接 触 器

接触器是电力拖动自动控制系统中使用量大、涉及面广的一种低压控制电器,用来频繁地接通和分断交、直流主回路和大容量控制电路。主要控制对象是电动机,能实现远距离控制,并具有欠(零)电压保护。通常分为交流接触器和直流接触器。

1. 结构和工作原理

(1) 结构 接触器主要由电磁系统、触头系统和灭弧装置组成。

①电磁系统。电磁系统包括动铁心(衔铁)、静铁心和电磁线圈三部分,其作用是将电磁能转换成机械能,产生电磁吸力带动触头动作。

②触头系统。触头又称为触点,是接触器的执行元件,用来接通或断开被控制电路。

触头的结构形式很多,按其所控制的电路可分为主触头和辅助触头。主触头用于接通或断开主电路,允许通过较大的电流;辅助触头用于接通或断开控制电路,只能通过较小电流。

触头按其原始状态可分为常开触头(动合触点)和常闭触头(动断触点)。原始状态时(即线圈未通电)断开、线圈通电后闭合的触头叫常开触头;原始状态时闭合、线圈通电后断开的触头叫常闭触头。线圈断电后所有触头复位,即回复到原始状态。

③灭弧装置。触头在分断电流瞬间会产生电弧,电弧的高温能将触头烧损,并可能造成其他事故,因此,应采取适当措施迅速熄灭电弧。常采用灭弧罩、栅片灭弧和磁吹灭弧装置。



(2) 工作原理 接触器是根据电磁原理工作的,当电磁线圈通电后产生磁场,使静铁心产生电磁吸力吸引衔铁,并带动触头动作,使常闭触头断开,常开触头闭合,两者是联动的。当线圈断电时电磁力消失,衔铁在释放弹簧的作用下释放,使触头复原,即常开触头断开,常闭触头闭合。

2. 主要技术参数和常用型号

(1) 主要技术参数

接触器铭牌上的额定电压:是指主触头的额定电压,选用时必须使它与被控制的负载回路的额定电压相同。

额定电流:接触器铭牌上的额定电流是指主触头额定电流。主触头的额定电流就是指接触器装在敞开的控制屏上,在间断—长期工作制下,温升不超过额定温升时流过触头的允许电流量。间断—长期工作制是指接触器连续通电时间不大于 8h 的工作制。

吸引线圈的额定电压:交流吸引线圈的额定电压一般有 36V,110V,127V,220V 和 380V 五种。直流吸引线圈的额定电压一般有 24V,48V,110V,220V,440V 五种,线圈的温升不超过绝缘材料的容许温升。

线圈消耗功率:交流接触器线圈消耗功率又分为线圈的启动功率和吸持功率(直流接触器的启动功率和吸持功率相等)。由于交流接触器的线圈已通电但衔铁尚未吸合时的气隙很大,线圈感抗小,所以启动时线圈电流很大,视在功率高。衔铁吸合后气隙几乎消失,磁阻变小,感抗增大,因而线圈中电流显著减小,视在功率降低。一般启动功率约为吸持功率的 5~8 倍。

额定操作频率:接触器的操作频率就是接触器每小时接通的次数。交流吸引线圈在通电瞬间有很大的启动电流,如果通电次数过多,会引起线圈过热,这就限制了交流接触器每小时的通电次数。一般交流接触器额定操作频率最高为 600 次/h,直流吸引线圈电流为一常数,与磁路的气隙无关,所以额定操作频率较高,最高可达 1200 次/h。因此,对于频繁操作的场合,如轧钢机的一些辅助机械,就采用了具有直流吸引线圈的接触器。CJ3 系列接触器就是具有直流吸引线圈、主触头交直两用的接触器,其额定操作频率可达到 1200 次/h。

寿命:机械寿命是指接触器在不需修理的条件下所能承受的无负载操作次数。一般接触器的机械寿命可达 600~1000 万次以上。电寿命是指接触器的主触点在



额定负载条件下,所允许的极限操作次数。与触点受电弧侵蚀直接相关,它取决于通断的方式以及相应的电压、电流和时间。电寿命参数在有关产品样本中给出。

(2)常用型号 常用的交流接触器有 CJ0,CJ20,CJ12 等系列,其主要技术数据见表 2-3-1。

型号含义:

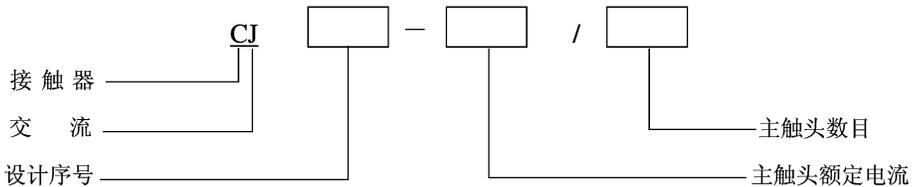


表 2-3-1 CJ0,CJ20 系列交流接触器的技术数据

型号	主触头			辅助触头			线圈		可控三相异步电动机的最大功率		额定操作频率 (次/h)
	对数	额定 电流/A	额定 电压/V	对数	额定 电流/A	额定 电压/V	电压/V	功率 /VA	220V	380V	
									220V	380V	
CJ0-10	3	10	380	两常 开两 常闭	5	380	36 110 127 220 380	14	2.5	4	≤600
CJ0-20	3	20						33	5.5	10	
CJ0-40	3	40						33	11	20	
CJ20-10	3	10						11	2.2	4	
CJ20-20	3	20						22	5.5	10	
CJ20-40	3	40						32	11	20	

常用的直流接触器有 CZ0,CZ1,CZ2,CZ3,CZ5-11 等系列产品。CZ5-11 为连锁接触器,常用于控制电路中,CZ0 系列直流接触器的基本技术参数见表 2-3-2。

型号含义:

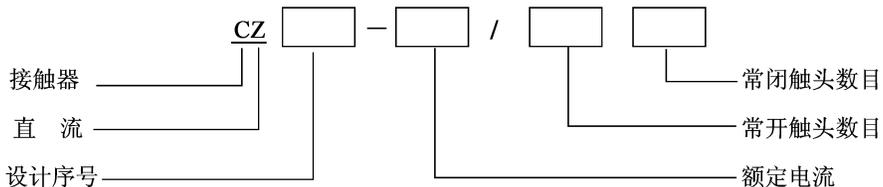


表 2-3-2 CZ0 系列直流接触器基本技术参数

型号	额定电压/V	额定电流 A	额定操作频率 (次/h)	主触头极数		最大分断 电流/A	辅助触头 型式及数目		吸引线圈 电压	吸引线圈 消耗功率
				常开	常闭		常开	常闭		
				V	W					
CZ0-40/20	440	40	1200	2	0	160	2	2	24	22
CZ0-40/02		40	600	0	2	100	2	2		24
CZ0-100/10		100	1200	1	0	400	2	2		24
CZ0-100/01		100	600	0	1	250	2	1	48	24
CZ0-100/20		100	1200	2	0	400	2	2	110	30
CZ0-150/10		150	1200	1	0	600	2	2	220	30
CZ0-150/01		150	600	0	1	375	2	1		25
CZ0-150/20		150	1200	2	0	600	2	2		40

近年来从国外引进一些交流接触器产品,有德国 BBC 公司的 B 系列,西门子公司的 3TB、3TD 系列、法国 TB 公司的 LC1-D 和 LC2-D 系列等。它们各有自己的特色,在国际市场上有一定声誉。例如,B 系列接触器就有通用件多和附件多的特点,除触点系统外,这种接触器的其他零部件大都可以通用,可以临时装配的附件有辅助触点(最多为 8 对)、气囊式延时器、机械连锁和锁扣继电器等以及对主触点进行串并联改接用的连板等。此外,它还有所谓“倒装”式结构,即电磁系统在前面而主触点系统紧靠安装面,使更换线圈方便,并缩短了主触点接线。目前国产的 CJX1 和 CJX2 系列小容量交流接触器也具有以上特点。

2.4 继电器

继电器是一种根据外界输入信号(电的或非电的)控制电路中电流“通”与“断”的自动切换电器。它主要用来反映各种控制信号,其触点通常接在控制电路中。

继电器的种类很多,分类方法也较多。按用途分,可分为控制继电器和保护继电器;按反映的信号不同来分,可分为电压继电器、电流继电器、时间继电器、热继电器、温度继电器、速度继电器和压力继电器等;按动作原理分,可分为电磁式、感应式、电动式、电子式等。

本节主要介绍常用的电磁式(电压、电流、中间)继电器、时间继电器和热继电器



等。

2.4.1 电流继电器、电压继电器和中间继电器

1. 工作原理

电磁式继电器的结构和动作原理与接触器大致相同,但后者在结构上体积较小、动作灵敏,没有庞大的灭弧装置,触点的种类和数量较多。

2. 电流、电压和中间继电器

(1) 电流继电器 反映线路中电流变化的继电器称为电流继电器,使用时线圈串在线路中。为了不影响线路正常工作,电流线圈应阻抗小、导线粗、匝数少,能通过大电流。随着使用场合和用途的不同,电流继电器分欠电流继电器和过电流继电器。欠电流继电器是在正常工作时动作,一旦电流低于某一整定电流时,欠电流继电器将释放,触头复位。而过电流继电器则是当线圈通以额定电流时,它所产生的电磁吸力不足以克服反作用弹簧的反弹力,触头不动作,只有当通过线圈的电流超过整定值后,电磁吸力大于反作用弹簧拉力,铁心吸引衔铁使触头动作,适用于做过电流保护。调节反作用弹簧力的大小,可以整定继电器的动作电流值。一般交流过电流继电器调整在 110% ~ 350% 额定电流时动作,而直流过电流继电器调整在 70% ~ 300% 额定电流时动作。

欠电流继电器属于长期工作的电器,故应考虑其振动和噪音,应在铁心中装有短路环,而过电流继电器属于短时工作的电器不需装短路环。

有的过电流继电器带有手动复位机构。当过电流时,继电器动作,衔铁动作。衔铁动作后,即使线圈中电流减小到零,衔铁也不会返回。只有当操作人员检查故障并处理后,采用手动复位,松掉锁扣机构,这时衔铁才会在复位弹簧作用下返回原位,从而避免重复过电流事故的发生。

(2) 电压继电器 用以反映线路中电压变化的继电器称为电压继电器。在应用时,电压线圈并联在线路中。为减少分流,电压线圈导线细、匝数多、电阻大。随着应用场所不同,电压继电器有欠(零)电压及过电压继电器之分。其区别在于:欠(零)电压继电器在正常电压时动作,而当电压过低或消失时,触头复位;过电压继电器则是在正常电压时不动作,只有当其线圈两端电压超过其整定值后触头才动作,以实现过电压保护。与电流继电器原理相同,欠(零)压继电器装有短路环,而过电



压继电器则不需短路环。

欠电压继电器是在电压为 40% ~ 70% 额定电压时才动作,对电路实现欠压保护;零电压继电器是当电压降至 0% ~ 25% 额定电压时动作,进行零压保护;过电压继电器是在电压为 110% ~ 150% 额定电压以上时动作,具体动作电压的调整根据需要决定。

(3) 中间继电器 中间继电器是将一个输入信号变成一个或多个输出信号的继电器。它的输入信号为线圈的通电或断电。它的输出是触头的动作,将信号同时传给几个控制元件或回路。

中间继电器的特点是触头数目多(6 对以上),可实现对多回路的控制;触头电流较大(5A 以上);动作灵敏(动作时间不大于 0.05s)。与接触器不同的是触头无主、辅之分,当电动机功率较小时,也可用它代替接触器使用,可以认为中间继电器是小容量的接触器。

中间继电器的选择主要是根据被控电路的电压等级,同时还应考虑触点的数量、种类及容量,以满足控制线路的要求。

3. 主要技术参数及常用型号

电流、电压和中间继电器的主要技术参数与接触器类似。所不同的是动作电压或动作电流、返回系数、动作时间及释放时间等。动作电压和动作电流是指继电器线圈中通过的电压、电流,其中动作时间是指继电器从线圈通电开始到常开触点闭合所需的时间;释放时间是指从线圈断电开始到常开触点断开所需的时间。如中间继电器的动作及释放时间约为几十毫秒。

机床上常用的电磁式继电器型号有:

JZ14, JZ15, JZ17(交、直流)及 JZ7(交流)等系列,用作中间继电器;

JT17 系列用作交流过电流继电器;

JT18 系列用作直流电压、欠电流和延时继电器(取代 JT3);

JL18 系列交、直流过电流继电器(取代 JL14, JL15)。

其中, JZ17 是从日本立石电机公司引进的产品。引进的电磁式继电器还有德国西门子的 3TH 系列、BBC 公司的 K 系列等。

型号含义:

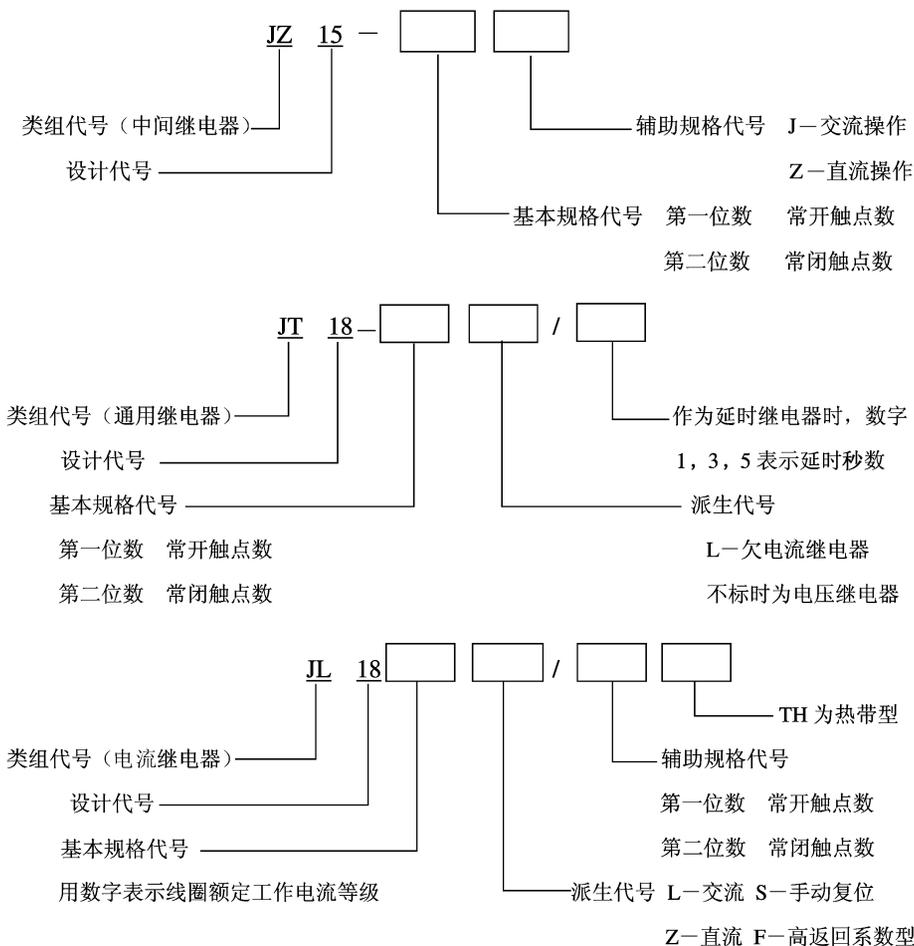


表 2-4-1 和表 2-4-2 列出了 JZ15 和 JL18 系列电磁式继电器的型号规格技术数据。

表 2-4-1 JZ15 系列中间继电器型号规格技术数据

型号	触点额定电压 U_N/V		约定发热电流 I/A	触点组合形式		触点额定控制容量		额定操作频率 次/h	吸引线圈额定电压 U_N/V		线圈吸持功率		动作时间 s
	交流	直流		常开	常闭	交流 S_N/V_A	直流 P/W		交流	直流	交流 S/VA	直流 P/W	
JZ15-62	127	48	10	6	2	1000	90	1200	127	48	12	11	≤0.05
JZ15-26	220	110		2	6				220	110			
JZ15-44	380	220		4	4				380	220			



表 2-4-2 JL18 系列过电流继电器型号规格技术数据

额定工作电压 U_N/V	AC380, DC220
线圈额定工作电流 I_N/A	1.0, 1.6, 2.5, 4.0, 6.3, 10, 16, 25, 40, 63, 100, 160, 250, 400, 630
触点主要 额定参数	额定工作电压: AC380V, DC220V
	约定发热电流: 10A
	额定工作电流: AC2.6A, DC0.27A
	额定控制容量: AC1000VA, DC60W
调整范围	交流: 吸合作电流值为 $110\% \sim 350\% I_N$
	直流: 吸合作电流值为 $70\% \sim 300\% I_N$
$\leq \pm 10\%$	动作与整定误差
返回系数	高返回系数型 > 0.65 普通类型不做规定
操作频率(次/h)	12
复位方式	自动及手动
触点对数	一对常开触点, 一对常闭触点

2.4.2 时间继电器

时间继电器在电路中起着控制动作时间的作用。当它的感测机构接收输入信号以后,需经过一定的时间,执行系统才会动作并输出信号,进而操纵控制电路。所以说时间继电器具有延时功能,被广泛用于控制生产过程中按时间原则制定的工艺程序,如鼠笼式异步电动机的几种降压启动均可由时间继电器发出自动转换信号。

时间继电器种类繁多,主要有直流电磁式、空气阻尼式(又称气囊式)、电动式及晶体管式等几种。其中,电动式时间继电器的延时精度高,且延时时间可以调整得很长(由几分钟到几小时),但价格较高;晶体管式应用越来越广泛,精确度高、延长时间长且价格低廉;电磁式时间继电器结构简单、价格便宜,但延时时间较短($0.3 \sim 1.6s$),而且只适用于直流电路,体积和重量又较大。目前在交流电路中得到较广泛应用的是空气阻尼式时间继电器,它结构简单、延时范围较大($0.4 \sim 180s$),更换电磁机构还可用于直流电路。时间继电器延时方式又有通电延时和断电延时两种。

1. 空气式时间继电器

空气式时间继电器是利用空气阻尼的原理制成。由于空气式时间继电器结构简单、易构成通电延时型和断电延时型、调整简便、价格较低,使用较为广泛,但延时精度较低,一般使用在要求不高的场合。

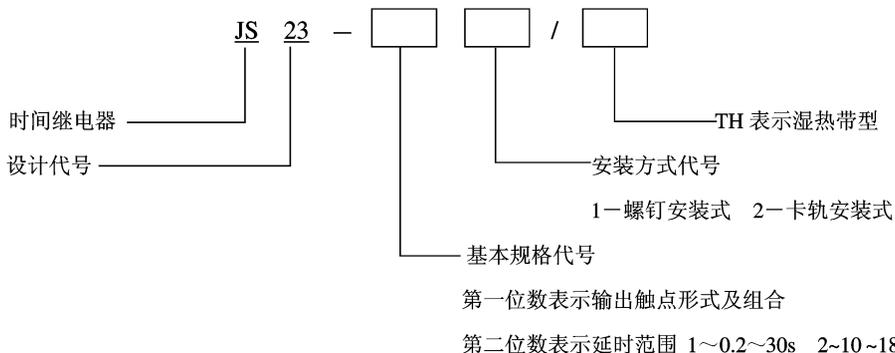


目前全国统一设计的空气式时间继电器有 JS23 系列,用于取代 JS7,JS16 系列。表 2-4-3 列出了它的主要技术数据。

表 2-4-3 JS23 系列空气式时间继电器型号规格数据

额定工作电压 U_N/V		AC380 DC220					
额定工作电流 I_N/A		AC380V 时:0.79A,DC220V 时:瞬动 0.27A					
触点 对数 及 组 合	型号	延时触点数量				瞬动触点数量	
		通电延时		断电延时			
		常开	常闭	常开	常闭	常开	常闭
	JS23-1□/□	1	1	-	-	4	0
	JS23-2□/□	1	1	-	-	3	1
	JS23-3□/□	1	1	-	-	2	2
	JS23-4□/□	-	-	1	1	4	0
JS23-5□/□	-	-	1	1	3	1	
JS23-6□/□	-	-	1	1	2	2	
延时范围		0.2~30s 10~180s					
线圈额定电压 (U_N/V)		AC110,220,380					
电寿命		瞬动触点:100 万次(交、直流)					
		延时触点:交流 100 万次、直流 50 万次					
操作频率(次/h)		1200					
安装方式		卡轨安装式、螺钉安装式					

型号含义:



2. 电动式时间继电器

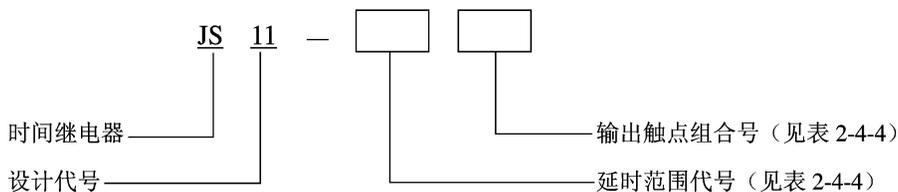
电动式时间继电器通常由带减速器的同步电动机、离合电磁铁和能带动触点的凸轮三部分组成。电动式时间继电器具有下列优点:延时值不受电源电压波动及环境温度变化的影响,重复精度高、延时范围宽,可长达数十小时,延时过程能通过指针直观地表示出来。主要缺点是:结构复杂、成本高、寿命短,不适于频繁操作,延时误差受电源频率的影响较大。

在机床电路中常用 JS11 系列电动式时间继电器。表 2-4-4 列出了它的主要技术数据。

表 2-4-4 JS11 系列电动式时间继电器主要技术数据

额定工作电压 U_N/V		交流 110, 220, 380					
触点通断能力		交流:接通 3A、分断 0.3A					
触点组合	型号	延时触点数量				瞬动触点数量	
		通电延时		断电延时			
		常开	常闭	常开	常闭	常开	常闭
	JS23-1□/□	3	2	-	-	1	1
JS23-2□/□	-	-	3	2	1	1	
延时范围		JS11-1□:0~8s; JS11-2□:0~40s; JS11-3□:0~4min					
		JS11-4□:0~20min; JS11-5□:0~2h					
		JS11-6□:0~12h; JS11-7□:0~72h					
操作频率(次/h)		1200					
误差		$\leq \pm 1\%$					

型号含义:



3. 直流电磁式时间继电器

直流电磁式时间继电器利用阻尼的方法来延缓磁通变化的速度,以达到延时的目的。一般通电延时仅 0.1~0.5s,而断电延时可达 0.2~10s。可见,直流电磁式时



间继电器主要用于断电延时。

延时时间的调整方法有两种。

①利用非磁性垫片(磷铜片)改变衔铁与铁心间的气隙来粗调。增厚垫片时,由于气隙增大,电感减小,磁通衰减速度加快,延时缩短。同时气隙增大,剩磁变小,也会使延时缩短。反之减薄垫片,延时加长,但是垫片的厚度不能太薄,可能造成衔铁粘住不放。

②调节反作用弹簧的松紧,可使衔铁释放的磁通值发生变化,延时时间可得到平滑的调节。弹簧越紧,释放磁通值越大,延时越短。反之弹簧越松,延时越长。但不可太松,因为弹簧过松,衔铁会因剩磁作用而粘住不放。

电磁式时间继电器的延时整定精度和稳定性不是很高,但继电器本身适应能力较强。

4. 电子式时间继电器

电子式时间继电器具有体积小、精度高、延时范围大、调节方便、消耗功率小、寿命长等优点。延时方式有闭合延时,也有断开延时。它又分阻容式和数字式,阻容式利用 RC 电路充放电原理构成延时电路。它主要适用于中等延时时间(0.05s ~ 1h)的场合。数字式时间继电器采用计算机控制,由脉冲频率决定延时长短。它不但延时长,而且精度更高,但线路复杂。主要用于长时间延时(可达几小时到十几小时)场合。

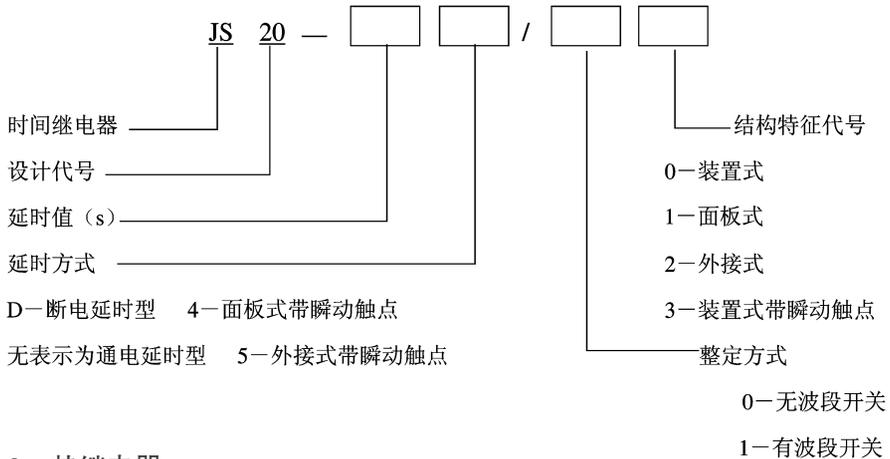
常用的电子式时间继电器有 JS20 系列以及 JS13,JS14,JS15 系列。此外,从日本富士公司引进生产了 ST,HH,AR,RT 等系列。JS20 系列的主要技术数据列于表 2-4-5 中。

表 2-4-5 JS20 系列时间继电器主要技术数据

延时形式	额定工作电压 U_N/V		延时等级 t/s
	交流	直流	
通电延时型	36,110,127,220,380	4,48,110	1,5,10,30,60,120,180,240,300,600,900
瞬动延时型	36,110,127,220		1,5,10,30,60,120,180,240,300,600
断电延时型	36,110,127,220,380		1,5,10,30,60,120,180



型号含义：



2.4.3 热继电器

热继电器是当电流通过电器的发热元件双金属片时,使双金属片弯曲而推动执行机构动作的电器。主要用来保护电动机或其他负载免于过载以及作为三相电动机的断相保护。

它是一种保护用继电器。电动机在运行中,随负载的不同,常遇到过载情况,而电机本身有一定的过载能力,若过载不大,电机绕组不超过允许的温升,这种过载是允许的。但是过载时间过长,绕组温升超过了允许值,将会加剧绕组绝缘的老化,降低电动机的使用寿命,严重时会使电动机的绕组烧毁。为了充分发挥电动机的过载能力,保证电动机的正常启动及运转,在电动机发生较长时间过载时能自动切断电路,防止电动机因过热而烧毁,为此采用了这种能随过载程度而改变动作时间的热保护装置即热继电器。

热继电器常采用热元件为双金属片式,它的结构简单、体积小、成本低,选择适当的热元件即可得到良好的反时限特性。所谓反时限特性,是指热继电器的动作时间随电流的增大而减小的性能,表 2-4-6 为热继电器的保护特性。

表 2-4-6 热继电器的保护特性

整定电流倍数	动作时间	起始条件
1.05	> 1 ~ 2h	从冷态开始
1.2	> 20min	从热态开始
1.5	> 2min	从热态开始
6	可返回时间 (t_F) > 3s; > 5s; > 8s	从冷态开始



(1) 热继电器的主要技术数据及型号 热继电器的主要技术参数为:额定电压、额定电流、相数、热元件的编号、整定电流及刻度电流调节范围等。

热继电器的额定电流是指可能装入的热元件的最大整定(额定)电流值。每种额定电流的热继电器可装入几种不同整定电流的热元件。为了便于选择,某些型号中的不同整定电流值的热元件是用不同的编号表示的。

热继电器的整定电流值是指热元件能够长期通过而不至引起热继电器动作的电流值。手动调节整定电流的范围,即刻度调节范围,可使热继电器具有更好的过载保护特性。

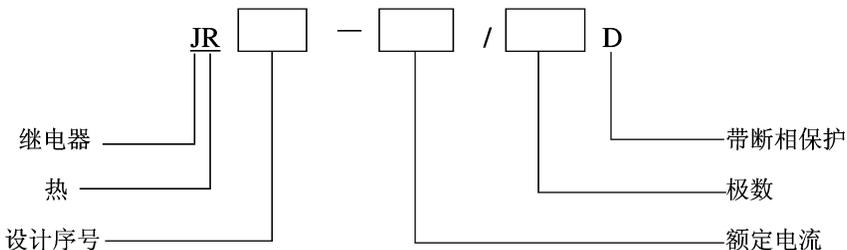
常用的热继电器的型号有 JR0, JR10, JR15, JR16 等。JR0, JR16 系列热继电器技术数据如表 2-4-7 所示。

表 2-4-7 JR0, JR16 系列热继电器的型号、规格及技术数据

型号	额定电流/A	热元件等级		主要用途
		额定电流/A	刻度电流调节范围/A	
JR0-20/3 JR0-20/3D JR16-20/3 JR16-20/3D	20	0.35	0.25~0.3~0.35	供交流 500V 以下的电气回路中作为电动机的过载保护之用
		0.5	0.32~0.4~0.5	
		0.72	0.45~0.6~0.72	
		1.1	0.68~0.9~1.1	
		1.6	1.0~1.3~1.6	
		2.4	1.5~2.0~2.4	
		3.5	2.2~2.8~3.5	
		5.0	3.2~4.0~5.0	
JR0-40/3 JR16-40/3D	40	7.2	4.5~6.1~7.2	
		0.64	0.4~0.64	
		1.0	0.64~1.0	
		1.6	1~1.6	
		2.5	1.6~2.5	
		4.0	2.5~4.0	
		6.4	4.0~6.4	
		10	6.4~10	
	16	10~16		



型号含义:



型号中不带“D”的表示不带断相保护。

例如, JR16-20/3, 表示热继电器, 设计序号是 16, 额定电流 20A, 3 极, 热元件有 12 个等级(从 0.35 ~ 22A), 不带断相保护。

(2) 热继电器的选择 热继电器选择得是否得当, 往往是决定它能否可靠地对电动机进行过载保护的关键因素, 应按电动机的工作环境要求、启动情况、负载性质等方面综合考虑。

①原则上按被保护电动机的额定电流选择热继电器。一般应使热继电器的额定电流接近或略大于电动机的额定电流, 即热继电器的额定电流为电动机额定电流的 0.95 ~ 1.05 倍。

②在非频繁启动的场合, 必须保证热继电器在电动机启动过程中不致误动作。通常, 在电动机启动电流为其额定电流 6 倍, 启动时间不超过 6s 的情况下, 只要很少连续启动, 就可按电动机的额定电流来选择热继电器。

③起断相保护的热继电器在选用时, 星形接法的电动机一般采用两相结构的热继电器。而三角形接法的电动机, 若热继电器的热元件接于电动机的每相绕组中, 则选用三相结构的热继电器。若发热元件接于三角形接线电动机的电源进线中, 则应选择带断相保护装置的三相结构热继电器。

2.4.4 其他继电器

由于控制对象的多样性, 控制电器应能适应不同工作状态下参数的检测要求, 例如, 电动机反接制动时需要有反映转速的速度继电器, 产品的统计、计数及位置检测常需要光电继电器等。几种最常用的继电器简要介绍如下:

(1) 压力继电器 压力继电器经常用作气压给水设备、消防系统或用于机床的



气压、水压和油压等系统中的保护。压力继电器由微动开关、调节螺母、压缩弹簧、顶杆、橡皮薄膜、缓冲器等组成。

压力继电器装在气路(水路或油路)的分支管路中。当管路压力超过整定值时,通过缓冲器、橡皮薄膜抬起顶杆,使微动开关动作,若管路中压力等于或低于整定值后,顶杆脱离微动开关,使触头复位。

压力继电器调整方便,只需放松或拧紧调整螺母即可改变控制压力。

常用的压力继电器有 YJ 系列、TE52 系列和 YT-1226 系列压力调节器等。

YJ 系列压力继电器的技术数据如表 2-4-8 所示。

表 2-4-8 YJ 系列继电器技术数据

型号	额定电压/V	长期工作 电流/A	分断功率 /VA	控制压力/Pa	
				最大控制压力	最小控制压力
YJ-0	交流 380	3	380	6.0795×10^5	2.0265×10^3
YJ-1				2.0265×10^5	1.01325×10^3

(2) 温度继电器 温度继电器是利用温度敏感元件(如热敏电阻)阻值随被测温度变化而改变的原理,经电子线路比较放大,驱动小型继电器动作,从而迅速且准确地直接反映某点的温度。

(3) 光电继电器 它是将发光头(电光源)和作为感测环节的接收头(如光电管)分别置于被测部位的两侧,当接收头接收到发光头的信号时,继电器就动作,一旦光线被遮断,继电器就释放。

(4) 速度继电器 它是根据电磁感应原理制成。套有永久磁铁的轴与被控电动机的轴相联,用以接收转速信号。当继电器的轴由电动机带动旋转时,磁铁磁通就切割圆环内的笼型绕组,绕组感应出电流,此电流与磁铁磁场作用产生电磁转矩,在这个转矩的推动下,圆环带动摆杆克服弹簧力沿电动机旋转方向偏转一定角度,并拨动触点改变其通断状态。调节弹簧松紧程度可调节速度继电器的触点在电动机不同转速时动作,及时地切换电路。



2.5 自动开关

2.5.1 自动开关

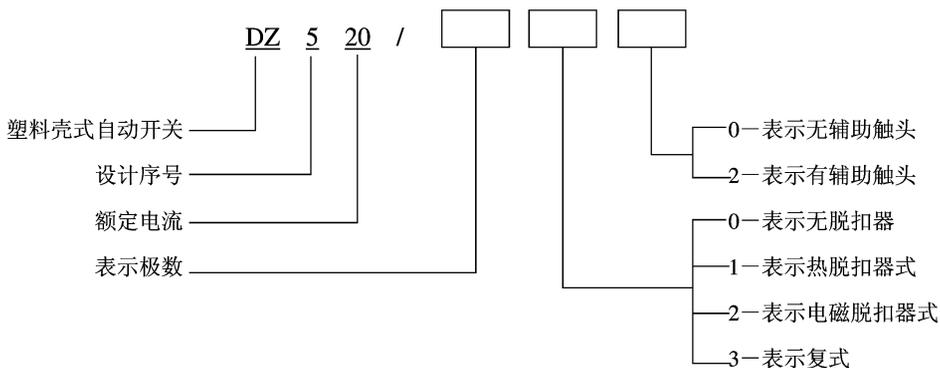
自动开关或自动空气开关又称空气断路器。它相当于刀开关、熔断器和各种继电器的组合。它的特点是:在正常工作时,可以人工操作接通或切断电源与负载的联系;当出现故障时,如短路、过载、欠压等,又能自动切断故障电路,起到保护电路作用,因此得到了广泛的应用。

1. 自动开关的结构

自动开关主要由触点、操作机构、脱扣器和灭弧装置等组成。操作机构分为直接手柄操作、杠杆操作、电磁铁操作和电动机驱动4种。脱扣器有电磁脱扣器、热脱扣器、复式脱扣器、欠压脱扣器、分励脱扣器等类型。

2. 自动开关技术型号及数据

型号含义:



自动空气开关技术数据。例如,DZ5-20型自动开关的技术数据见表2-5-1所示。

3. 自动开关的选择

①根据电气装置的要求确定自动开关的类型,如框架式、塑料外壳式、限流式等。

表 2-5-1 DZ5-20 型自动空气开关技术数据

型号	额定电压/V	主触头额定电流/A	极数	脱扣器型式	热脱扣器额定电流 (括号内为整定电流调节范围)/A	电磁脱扣器瞬时动作整定值/A
DZ-20/330 DZ-20/230 DZ-20/320 DZ-20/220 DZ-20/310 DZ-20/210 DZ-20/300 DZ-20/200	交流 380	20	3 2	复式	0.15 ~ (0.10 ~ 0.15)	为热脱扣器额定电流的 8 ~ 12 倍 (出厂时整定于 10 倍)
			3 2	电磁式	0.20 ~ (0.15 ~ 0.20)	
			3 2	热脱扣器式	0.30 ~ (0.20 ~ 0.30)	
					0.45 ~ (0.30 ~ 0.45)	
					0.65 ~ (0.45 ~ 0.65)	
	直流 220		1(0.65 ~ 1)			
			1.5(1 ~ 1.4)			
			2(1.5 ~ 2)			
			3(2 ~ 3)			
			4.5(3 ~ 4.5)			
3 2	无脱扣器式	6.5(4.5 ~ 6.5)				
		10(6.5 ~ 10)				
		15(10 ~ 15)				
		20(15 ~ 20)				

②自动开关的额定电压和额定电流应不小于电路的正常工作电压和工作电流。

③热脱扣器的整定电流应与所控制的电动机的额定电流或负载额定电流一致。

④电磁脱扣器的瞬时脱扣整定电流应大于负载电路正常工作时的峰值电流。对于电动机来说, DZ 型自动开关电磁脱扣器的瞬时脱扣整定电流值 I_z 可按下式计算:

$$I_z \geq KI_Q \quad (2-5-1)$$

式中: K ——安全系数, 可取 1.7;

I_Q ——电动机的启动电流。

⑤自动开关价格较高, 如非必要, 仍宜采用闸刀开关和熔断器组合。

⑥初步选定自动开关的类型和各项技术参数后, 还要和上、下级开关作保护特性的协调配合, 从总体上满足系统对选择性保护的要求。

2.5.2 漏电保护开关

随着家用电器的增多, 由于绝缘不良引起漏电时, 因泄漏电流小, 不能使其保护

装置(熔断器、自动开关)动作,这样漏电设备外露的可导电部分长期带电,增加了触电危险。漏电保护开关是针对这种情况在近年来发展起来的新型保护电器。像一般通用的电流型漏电保护开关,它由主回路断路器(内含脱扣器 YR)、零序电流互感器 TAN 和放大器 A 等三个主要部件组成。

漏电保护开关按保护功能分为两类:一类是带过电流保护的,它除具备漏电保护功能外,还兼有过载和短路保护功能。使用这种开关,电路上一般不需要配用熔断器。另一类是不带过电流保护的,它在使用时还需要配用相应的过电流保护装置(如熔断器)。

漏电保护断路器也是一种漏电保护装置,它由放大器、零序互感器和控制触点组成。它只具有检测与判断漏电的能力,本身不具备直接开闭主电路的功能,通常与带有分励脱扣器的自动开关配合使用,当断电器动作时输出信号至自动开关,由自动开关分断主电路。

漏电保护开关的工作原理:在设备正常运行时,主电路电流的相量和为零,零序互感器的铁心无磁通,其二次侧没有电压输出。当设备发生单相接地或漏电时,由于主电路电流的相和不再为零,TAN 的铁心有零序磁通,其二次侧有电压输出,经放大器 A 判断、放大后,输入给脱扣器 YR,使断路器 QF 跳闸,切断故障电路,避免发生触电事故。

2.6 熔断器

2.6.1 熔断器的种类

熔断器是一种最简单的保护电器,它可以实现过载和短路保护。由于结构简单、体积小、重量轻、维护简单、价格低廉,所以在强电和弱电系统中都获得了广泛的应用。

熔断器按其结构可分为开启式、半封闭式和封闭式三类。开启式很少采用。半封闭式如瓷插式熔断器。封闭式又可分为有填料管式、无填料管式及有填料螺旋式等。

熔断器按用途分为一般工业用熔断器、保护硅元件用快速熔断器、具有两段保护特性及快慢动作熔断器、特殊用途熔断器(如直流牵引用、旋转励磁用以及自复熔断器)等。



1. 熔断器的工作原理和特性

熔断器主要由熔体和熔器(安装熔体的绝缘管或绝缘底座)组成。熔体的材料有两种:一种是低熔点材料,如锡铅合金、锌等;另一种是高熔点材料,如银、铜等。常将熔体制成丝状或片状。绝缘管具有灭弧作用。使用时,熔断器串联在所保护的电路中,当电路发生过载或短路故障时,如果通过熔体的电流达到或超过了某一定值,熔体自行熔断,切断故障电流,起到保护作用。

电器设备的电流保护主要有两种形式:即过载延时保护和短路瞬时保护。过载一般是指 10 倍额定电流以下的过电流,短路则是指超过 10 倍额定电流以上的过电流。但应注意,过载保护和短路保护决不仅是电流倍数不同,实际上差异很大。从特性方面来看,过载需要反时限保护特性,短路则需要瞬时保护特性;从参数方面来看,过载要求熔化系数小、发热时间常数大,短路则要求较大的限流系数、较小的发热时间常数、较高的分断能力和较低的过电压。从工作原理分析可知,过载动作的物理过程主要是热熔化过程,而短路则主要是电弧的熄灭过程。

2. 主要技术参数

熔断器的主要技术参数有:安秒特性和分断能力。这两个参数体现了保护方面对熔断器提出的要求。

(1) 保护特性曲线 熔断器的保护特性曲线也称安秒特性曲线,它表征了流过熔体的电流大小与熔断时间的关系。

(2) 分断能力 熔断器的分断能力通常是指它在额定电压及一定的功率因数(或时间常数)下切断短路电流的极限能力,所以常用极限断开电流值(周期分量的有效值)来表示。

以上分析可知:安秒特性曲线(可熔化特性曲线)主要是为过载保护服务的,而分断能力则主要是为短路保护服务的,前者需要反时限特性,后者则需要瞬动限流特性。

3. 常用的熔断器

常用的熔断器有:瓷插式、螺旋式及管式熔断器三种。

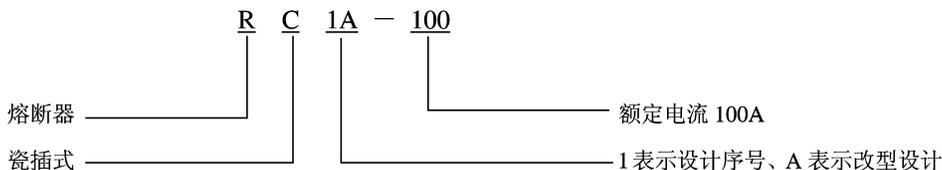
(1) 瓷插式熔断器 瓷插式熔断器由瓷底、瓷盖、动静触头及熔丝几部分组成。常用的瓷插式熔断器有 RC1A 系列,其主要技术数据见表 2-6-1 所示。RC1A 系列熔断器结构简单,使用方便,广泛应用于照明和小容量电动机的短路保护。



表 2-6-1 常用低压熔断器的基本技术数据

类别	型号	额定电压/V	额定电流/A	熔体额定电流等级/A
插入式熔断器	RC1A	380	5	2,4,5
			10	2,4,6,10
			15	6,10,15
			30	15,20,25,30
			60	30,40,50,60
			100	50,80,100
螺旋式熔断器	RL1	500	15	2,4,5,6,10,15
			60	20,25,30,35,40,50,60
			100	60,80,100
			200	100,125,150,200
	RL2	500	25	2,4,6,10,15,20,25
			60	25,35,50,60
			100	80,100

型号含义：



(2) 螺旋式熔断器 螺旋式熔断器主要由瓷帽、瓷套、上下接线端、底座和熔断管组成。常用的有 RL1 和 RL2 系列。其基本技术数据见表 2-6-1 所示。

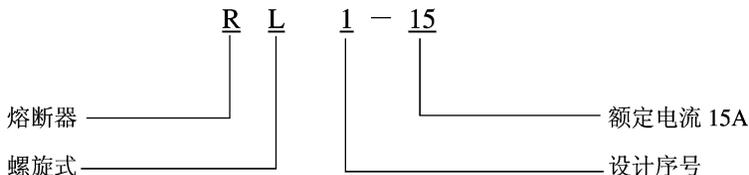
RL1 系列熔断器的底座瓷帽和熔断器(芯子)均由瓷制成。熔断管内装有一组熔丝或熔片,还装有灭弧用的石英砂。熔断管上盖有一个熔断指示器。当熔断管中熔丝或熔片熔断时,带红点指示器自动跳出,表示熔丝熔断。使用时先将熔断管带红点的一端插入瓷帽,然后将瓷帽拧入瓷座上,熔断管便可接通电路。在安装螺旋式熔断器时,电气设备接线应接在连接金属螺纹壳上的上接线端,电源线应接在底座上的下接线端。这样连接时,可保证在更换熔断管时,螺纹金属壳不带电,保证人身安全。

RL1 系列螺旋式熔断器断流能力大、体积小、更换熔丝容易、使用安全可靠,并



带有熔断显示装置,常用在电压为 500V、电流为 200A 的交流线路及电动机控制电路中做过载或短路保护。

型号含义:



(3) 管式熔断器 管式熔断器常分为无填料封闭式和有填料封闭式两种。

①RM10 系列无填料封闭式熔断器。该系列熔断器为可拆卸式,由熔断管、熔体及触座组成,适用于交流 50Hz、额定电压为 380V 或直流额定电压 440V 及以下电压等级的动力线路和成套配电设备中做短路保护或连续过载保护。

②RTO 系列有填料封闭管式熔断器。RTO 系列有填料封闭管式熔断器主要由熔断管、指示器、石英砂和熔体几部分组成。熔管采用高频电瓷制成,具有耐热性强、机械强度高等特点。指示器为一机械装置,与熔体并联的康铜丝,在熔体熔断后立即烧断,使红色指示件弹出,给出熔体已断信号。熔体采用网状薄紫铜片,有提高分断能力的变截面和增加时限的锡桥,从而获得较好的短路保护和过载保护性能。熔断器内充满石英砂填料,石英砂主要用来冷却电弧,使产生的电弧迅速熄灭。

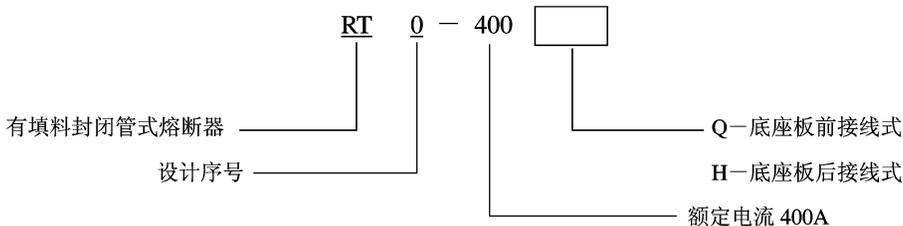
RTO 系列熔断器主要技术数据见表 2-6-2 所示。表中 * 尽可能不采用。

表 2-6-2 RTO 系列熔断器技术参数

额定电 流/A	熔体额定电流/A	极限分断 能力/kA		回路参数	
		交流 380V	直流 440V	交流 380V	直流 440V
50	5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 30, 40,	50kA (有效值)	25kA	cosφ = 0.1 ~ 0.2	T = 1.5 ~ 20ms
100	50, 60, 80, 100				
200	80 * , 100 * , 120, 150, 200				
400	150 * , 200, 250, 300, 350, 400				
600	350 * , 400 * , 450, 500, 550, 600				
1000	700, 800, 900, 1000				



型号含义:



有填料式熔断器还有 RT10 和 RT11 系列。

2.6.2 熔断器的选择

1. 熔断器种类的确定

根据负载的保护特性和短路电流的大小来选择熔断器的类型。例如,电动机过载保护用的熔断器采用具有锌质熔体和锡铅合金熔体的熔断器。对于车间配电网路的保护熔断器,如果短路电流较大,就要选用分断能力大的熔断器,有时甚至还需要选用有限流作用的熔断器,如 RT0 系列熔断器。在经常发生故障的地方,应考虑选用“可拆式”熔断器,如 RC1A,RL1, RM7, RM1 等系列产品。

2. 熔体额定电流的确定

在选择和计算熔体电流时,应考虑负载情况,一般可将负载划为两类,一类是有冲击电流的负载,如电动机;另一类是比较平稳的负载,如一般照明电路。

对于电炉、照明等阻性负载电路的短路保护,熔体的额定电流应稍大于或等于负载的额定电流。

对于一台电动机负载的短路保护,熔体的额定电流应等于 1.5 ~ 2.5 倍电动机的额定电流,即

$$I_N = (1.5 \sim 2.5) I_{NM} \quad (2-6-1)$$

对于多台电动机负载的短路保护,应按下式计算熔体的额定电流。即

$$I_N = (1.5 \sim 2.5) I_{NM\max} + \sum I_{NM} \quad (2-6-2)$$

式中, $I_{NM\max}$ ——最大一台电动机容量的额定电流(A);

$\sum I_{NM}$ ——其他各台电动机额定电流的总和(A)。

在电动机功率较大,而实际负载较小时,熔体额定电流可适当选小些,小到以电动机启动时熔丝不断为准。



3. 熔断器熔管额定电流的确定

熔断器熔管的额定电流必须大于或等于所装熔体的额定电流。

4. 熔断器额定电压的选择

熔断器的额定电压必须大于或等于线路的工作电压。

小 结

本章较详细地介绍了常用控制电器和保护电器的构造原理、图形符号、技术参数及各自的特点、用途和选择原则等。

控制电器主要用于接通和切断电路,以实现各种控制要求。分自动切换和非自动切换两大类。自动切换的有接触器、中间继电器、时间继电器、行程开关、自动开关、漏电保护开关等。其特点是触头的动作是自动的。非自动切换电器有按钮、转换开关等,其触头的动作是靠手动实现的。

保护电器的作用,是对电动机及电控系统实现短路、过流、漏电及失(欠)压等保护。如熔断器、热继电器、过电流和失(欠)压电流继电器、漏电保护开关及过电压和失(欠)压继电器等。这些电器可根据电路的故障情况自动切断电路,实现保护作用。

学习这些常用电器时,应联系工程实践,结合实物,通过实践或实习等手段,加深对本章内容的理解。并抓住各自的特点及共性,以便合理使用及正确选择电器,为将来从事工程实践打下良好的基础。

要想恰当合理选择电器设备,必须对其技术参数有所了解,在工程实践中选用时应查阅有关技术资料及手册。

习题与思考题

2-1 交流接触器频繁启动后,线圈为什么会过热?

2-2 在交流接触器的铁芯端面上为什么要安装短路环?

2-3 交流接触器在运行中有时线圈断电后,衔铁仍掉不下来,试分析故障原因,并确定排除故障的措施。

2-4 已知交流接触器吸引线圈的额定电压为 220V,如果给线圈通以 380V 的交流电行吗?为什么?如果使线圈通以 127V 交流电又如何?

2-5 交、直流接触器在结构上有何区别?为什么?交流电磁式电流、电压和中间继电



器哪种电器中不用装短路环?为什么?

2-6 两个相同的交流接触器,其线圈能否串联使用?

2-7 交流励磁的交流接触器用直流励磁,直流励磁的直流接触器用交流励磁是否可行?为什么?

2-8 热继电器和过电流继电器有何区别?各有什么用途?

2-9 在电动机的控制中,为什么有了热继电器还用熔断器?

2-10 在某自动控制电路中,电动机由于过载而自动停止后,有人立即按启动按钮,但启动不起来,为什么?

2-11 两台电动机能否用一只热继电器作过载保护?为什么?

2-12 简述自动空气开关的功能、工作原理和使用场合。与采用刀开关和熔断器组合的控制方式相比,自动空气开关有何优点?

2-13 漏电保护开关有几种,有何区别?

2-14 叙述在设备外壳带电时,漏电开关如何动作?

2-15 熔断器与漏电保护开关的区别是什么?



第3章 电气控制系统的基本控制电路及典型设备分析

3.1 电气图

电气控制系统是由许多电气元件和电气设备按照一定的控制要求连接而成。为了说明生产机械电气控制系统的组成、结构、工作原理,方便电气控制设备安装、调试、维修、维护等技术要求,需采用电气图表示出来。电气图有三种:电路图、电气接线图和电器位置图。电气图应根据国家电气制图标准,用规定的图形和文字符号及规定的画法绘制。

3.1.1 电气图的图形和文字符号

1. 图形符号

电气图的图形符号应遵循国家标准 GB4728. 1 ~ GB4728. 13《电气图用图形符号》。该标准规定了符号要素、限定符号、一般符号和常用其他符号等。有些符号规定了几种形式,在绘图时根据要求选用,在规定的规则下作某些变化,使电气图看上去清晰。

2. 文字符号

电气图的文字符号应遵循国家标准 GB7159—87《电气技术中的文字符号制定通则》。文字符号用来标明电气图上的电气设备、装置和元器件的名称、功能、状态和特征。标示在电气设备、元器件图形的旁边。文字符号分为基本文字符号和辅助文字符号。

基本文字符号有单字母符号和双字母符号。单字母符号一般用来表示电气设备、电气元件的类别。例如开关类用 Q 表示。如果当用单字母符号不能满足该类电气元件的要求,需要将该类别电器进一步划分时,才采用双字母符号。如位置开关用 SQ 表示。

辅助文字是用来进一步表示电气设备、电气元件的功能、特征和状态。



电气控制系统图常用的图形符号、文字符号,如需要详细地了解望查阅国家标准。

3.1.2 电路图

电路图一般称为电气原理图。电路图用规定的图形和文字符号按控制系统要求详细地表示了生产机械上所有电控设备之间的连接关系,是电气技术中应用最广的电气图。

电路图的作用是用来理解控制系统中设备及组成原理,为将来设备的安装、维修和维护提供信息,为绘制电气接线图提供依据。电路图的绘制规定应遵循国家标准 GB69988.4—86《电气制图电路图》。图 3-1-1 给出某车床电路图的实例。电路图表示控制线路的工作原理及各电气元件的作用和相关关系,但并不表示电气元件的实际位置和实际连线。绘制电路图应遵循如下原则:

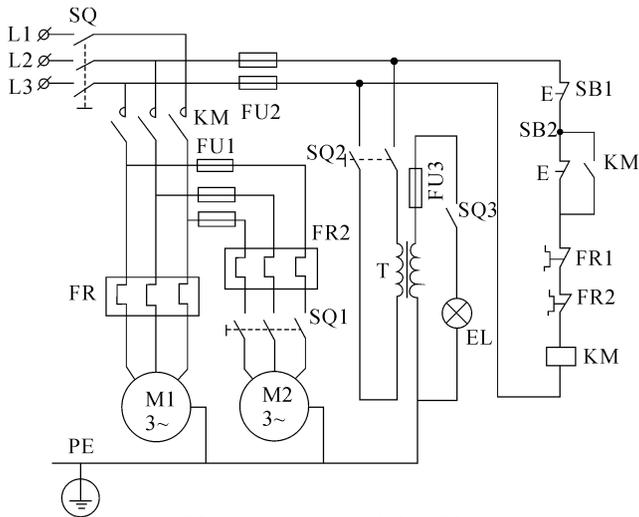


图 3-1-1 某车床电路图

①电路图一般分为主电路和控制电路两部分。通常分开画,主电路画在左侧,控制电路画在右侧。主电路为设备的驱动电路,在控制电路的控制下,向用电设备供电。控制电路要实现控制系统所需要的逻辑控制功能,一般由主令电器、各继电器、接触器的线圈、各电器辅助触点、照明信号电路及各种保护电路等构成。

②电路图中的电路可以水平布置或者垂直布置。水平布置时电源线垂直画,其他电路水平画。各分支电路基本上按控制动作的顺序由上而下排列。垂直布置时,



电源线水平画,其他垂直画。各分支电路按控制动作的顺序从左向右排列。两根以上导线的电气连接处要画圆点。

③各种电气元件及其部件在电路中的位置,根据便于阅读的原则应按先后顺序来安排。同一电器元件的各个部件可以不画在一起,但必须用同一文字符号来标明。如图 3-1-1 中接触器 KM 的线圈和触点都用 KM 表示。

④电路图中的全部电气元件触点的开、闭情况,均以线圈失电、开关不动作时的原始位置绘出。

3.1.3 电气接线图

电气接线图表示电气控制系统设备中电机、各种电器元件的实际安装位置及实际接线情况。它们是根据设备的结构和工作要求决定的。是在电路图基础上编制的,图 3-1-2 为某车床的电气接线图。绘制时应遵循国家标准 GB6988.5—86《电气制图、接线图和接线表》规定的接线图的编制规则,应遵循以下 3 个方面。

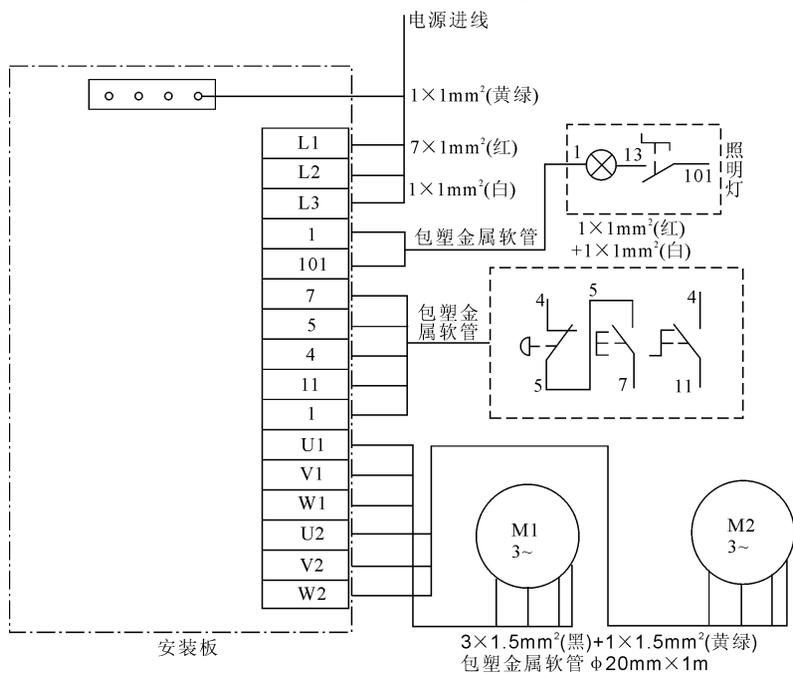


图 3-1-2 某车床的电气接线图



①同一电器元件的各部件要画在一起,接线图中的文字符号、元件连接顺序、接线端子的编写应与电路图一致,以便检查对照。

②在接线图中,应标出电控设备的位置、设备代号、端子号、导线号、导线类型和截面积等。

③同一控制板上的电器元件可以直接连接,而和控制板外的电器元件的连接一定要用接线端子引进、引出。

3.1.4 电器位置图

在成套的生产装置、设备上利用电器位置图将电控设备在装置上相对位置绘制出来,图中的各电控设备、电气元件和电路图中的符号相同,以便于电器元件之间的接线安排和电器元件的维修、维护与更换。

3.2 笼型异步电动机启动控制电路

笼型异步电动机结构简单、工作可靠、价格便宜,在电力拖动中得到广泛应用。从异步电动机的启动性能可知,电动机启动时,启动电流较大,一般可达到电动机额定电流的4~7倍,这样大的启动电流对电网有很大影响。为了限制启动电流,并得到合适的启动转矩,对不同容量的异步电动机,应采用不同的启动方法。异步电动机的启动方法有两种:直接启动和降压启动。一般10kW以下电机可采用直接启动。

3.2.1 直接启动控制电路

异步机单方向转动可采用刀开关或刀开关加接触器的控制电路。

1. 刀开关控制电动机单方向转动

图3-2-1为刀开关控制电机单方向转动电路。用刀开关接通和断开电路的时候,刀刃和夹座之间会产生电弧,烧坏刀开关,严重时伤人。一般用于小容量电机不频繁的启动、停止。

2. 接触器控制电机单方向转动电路

图3-2-2为接触器控制电机单方向转动电路。这是最基本的控制电路,分为主电路和控制电路。其中用了电源开关Q,交流接触器KM,热继电器FR,启动按钮

SB2, 停止按钮 SB1 及熔断器 FU 等几种电器。其工作原理为:

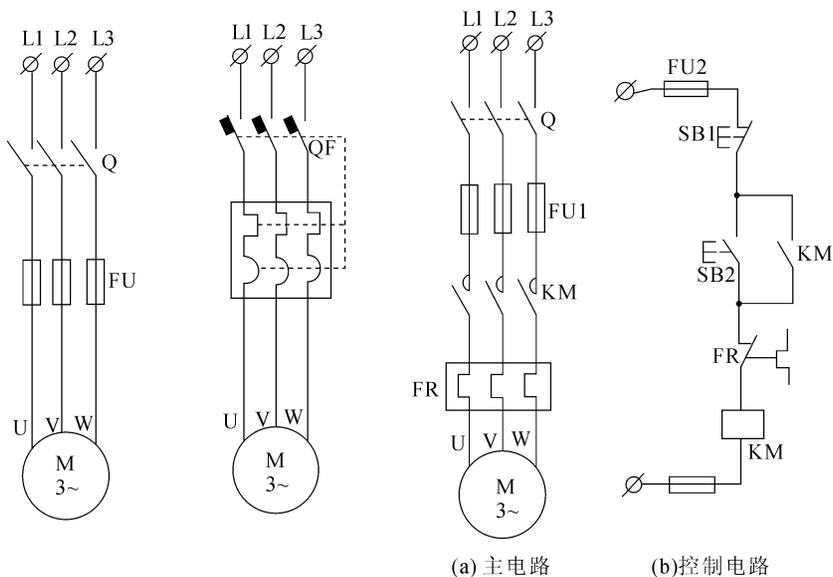


图 3-2-1 刀开关控制电机单方向转动电路 图 3-2-2 接触器电机单方向转动电路

合上电源开关 Q, 按下启动按钮 SB2, KM 的线圈通电, 其主触点闭合, 电动机接通电源启动。KM 的辅助触点同时闭合, 当松开 SB2 时, KM 的线圈通过其本身的常开辅助触点继续保持通电, 保证了电动机连续运转。

KM 辅助触点的作用就是当手松开启动按钮 SB2 时, SB2 自动复位。但接触器的线圈不会断电, 接触器利用自己的常开触点保持线圈通电的电路, 成为自锁电路。

当需要电动机停止时, 可按下停止按钮 SB1, 切断 KM 线圈电源的通路, KM 的主触点和辅助常开触点同时断开, 切断了电动机电源电路和控制电路, 电动机停止运转。

上述控制电路中可以实现短路保护、过载保护和零压保护。

熔断器 FU1, FU2 起主电路和控制电路的短路保护。一旦发生短路, 熔丝熔断, 电机停止工作。

热继电器 FR 为过载保护。当电机过载或缺相运行时, 电机绕组电流加大, 使通过热继电器的热元件发热弯曲, 将 FR 的常闭触点断开, 使接触器的线圈断电, 主触

点断开,电机停止工作,实现过载保护。

零压保护是当电源暂时停电时,电动机可自动与电源断开。因为这时接触器线圈断电,主触点断开,当电源再来电时,不重新按启动按钮,电动机不能自行工作。

利用接触器控制电机可以实现远距离控制。

3. 接触器控制电动机可逆转电路

生产机械要求电机单方向转动和停止。也要求电机可逆运转。如有的机床工作台前进、后退;主轴要能正转、反转,这就需要电机正反转。只要将电机接电源的任意两相连线对调,电机就能反转。这样主电路就需两个接触器,控制回路需要两个按钮来分别控制它们接通电源。

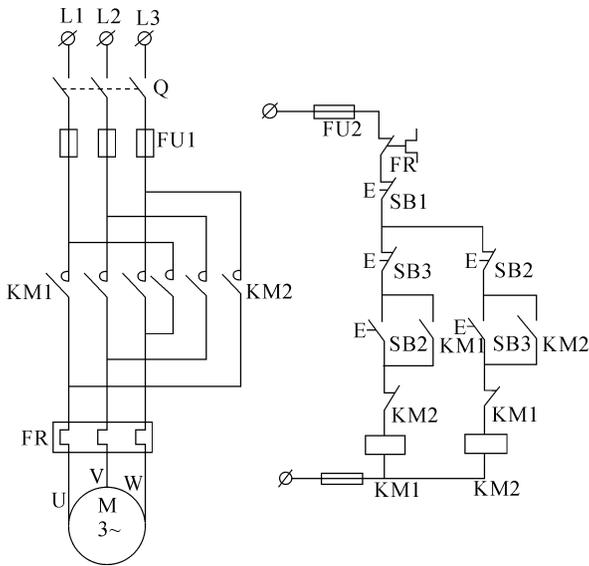


图 3-2-3 接触器控制电机可逆转动电路

图 3-2-3 是接触器控制电机可逆转动电路。图中主电路中有电源开关 Q, 短路保护熔断器 FU1、正转和反转接触器 KM1 和 KM2、过载保护热继电器 FR 等。控制电路中有短路保护 FU2、停止按钮 SB1、正转启动和反转启动按钮 SB2 和 SB3、正转接触器和反转接触器 KM1 和 KM2、热继电器 FR 的常闭触点等。其工作原理为:

合上电源开关 Q,电动机需要正转,按下正向启动按钮 SB2, KM1 的线圈通电并自锁,电动机接通正相序电源,电动机正转。如果电机反转,按下反向启动按钮



SB3, KM2 的线圈通电并自锁,电动机接通反相序电源,电动机反转。

在图 3-2-3 中看到接触器控制的电动机可逆运转电路中,正转接触器 KM1 的常闭触点串接在反转接触器 KM2 线圈的电源通路中。反过来也一样,反转接触器 KM2 的常闭触点串接在正转接触器 KM1 线圈的电源通路中。这就保证了当一个接触器工作,另一个接触器无论怎样也不会接通电源,这样防止两个接触器同时通电而造成电机电源短路现象。则称两个接触器的这两对常闭触点为连锁(互锁)触点。

电机正转按钮 SB2 常闭触点串接在反转接触器 KM2 的电源回路中,反过来,反转按钮 SB3 的常闭触点串接在正转接触器 KM1 的电源回路中的作用是为了操作方便。如果没有这两个按钮的常闭触点,当电机在正转过程中要求反转,必须操作停止按钮 SB1 后,再去操作反转按钮 SB3。而现在的电路就不需要去操作停止按钮 SB1,只要直接操作反转按钮 SB3 即可。

3.2.2 降压启动控制电路

笼型异步机直接启动控制电路简单,缺点是当电机容量大了,电机启动电流大会引起供电线路上较大的线路压降,影响其他电控设备的正常工作。这时就应当利用降压启动的方法。降压启动就是在电机启动时降低定子绕组上的电压,以减小启动电流。笼型异步机降压启动方法很多,一般有定子绕组串电阻降压启动、自耦变压器降压启动、星-三角降压启动、延边三角形降压启动等。下面介绍几种常用降压启动控制电路。

1. 定子绕组串电阻降压启动控制电路

在电动机的定子绕组上串联电阻可以达到降压启动的目的。当电动机启动时,利用定子绕组串联电阻 R 上的压降使电动机启动电流减小,等电动机的转速达到额定转速的 85% 以上时,将电阻 R 切除,使电动机投入全压运行。图 3-2-4 为定子串电阻降压启动电路。

主电路中有电源开关 Q、熔断器 FU1、电源接触器 KM1、短接定子绕组所串电阻 R 的 KM2、过载保护的继电器 FR 和电动机。

控制回路有停止按钮 SB1、启动按钮 SB2、线圈 KM1 及 KM2、热继电器 FR 的常闭触点和用来自动将降压启动切换为全压运行的时间继电器 KT。



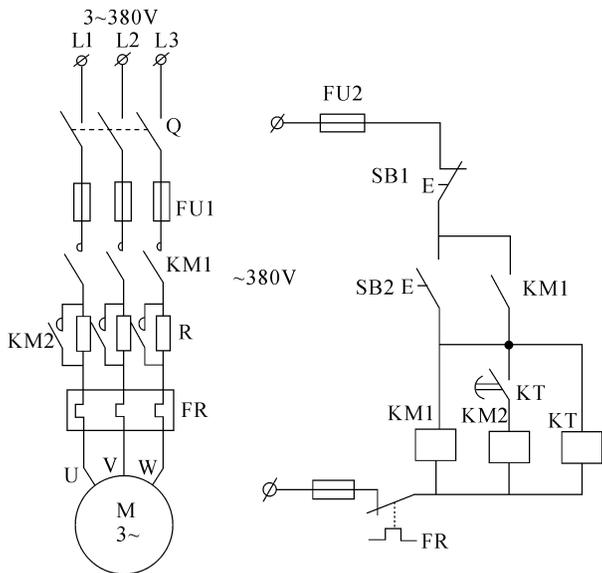


图 3-2-4 定子串电阻降压启动控制电路

工作原理:电动机启动时,按下启动按钮 SB2,接触器 KM1 线圈和时间继电器 KT 的线圈通电,接触器 KM1 的主触点将电动机定子绕组 R 接入电源,辅助常开触点自锁,电动机在降压状态下启动。经过一段时间后,时间继电器 KT 的常开延时触点闭合,使得接触器 KM2 线圈通电,其主触点闭合,短接了启动电阻 R。于是电动机在全压下继续启动到稳定状态。

电路中采用通电延时型的时间继电器 KT,延时时间为电动机启动过程所需时间,采用这种降压方法,当电压降低后,启动转矩与电压的平方成比例地降低,适用轻载或空载启动的场合。

2. 自耦变压器降压控制电路

在自耦变压器降压启动控制线路中,电动机启动电流的限制是依靠自耦变压器的降压作用完成。电动机启动初,定子绕组上加的是自耦变压器的二次电压。当电机的转速达到额定转速的 85% 以上时,切除自耦变压器的二次电压,电动机进入全压运行。图 3-2-5 为自耦变压器降压启动控制电路。

主电路中有电源开关 Q、短路保护熔断器 FU1、电动机全压接触器 KM2、给自耦变压器 T 送电源的接触器 KM1。控制电路中有停止按钮 SB1、启动按钮 SB2、接触器 KM1, KM2 的线圈,控制电动机由降压自动切换到全压运行的时间继电器 KT,中

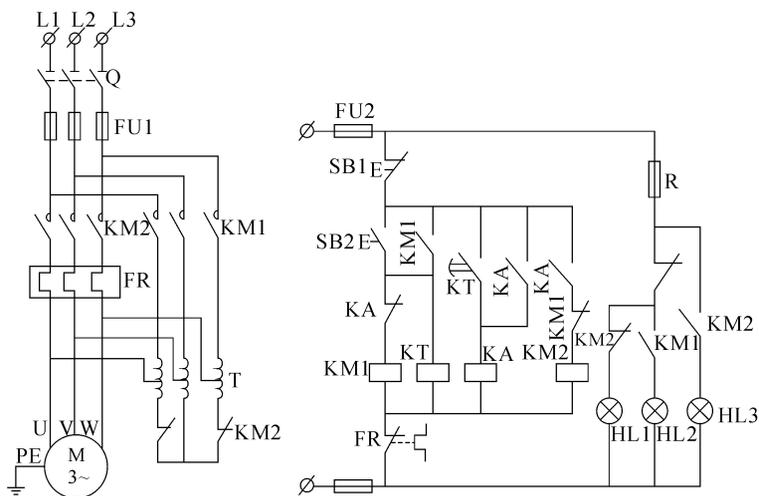


图 3-2-5 自耦变压器降压启动电路

间继电器 KA 和指示灯等。

工作原理:合上电源开关 Q,电机 M 需要启动,按下启动按钮 SB2, KM1 和 KT 的线圈同时通电并自锁,其 KM1 的主触点闭合,给自耦变压器 T 送电,电动机经自耦变压器得到二次电源做减压启动。当电动机的转速达到额定转速的 85% 以上时,时间继电器 KT 的通电延时常开触点闭合,使中间继电器 KA 线圈通电并自锁,同时 KA 的常闭触点断开,使 KM1 线圈断电,将自耦变压器切除,而 KA 的另一常开触点闭合使得 KM2 的线圈通电,电动机得全压,进入正常运转。电路中指示灯 HL1 是电源指示、HL2 是降压运行指示、HL3 是全压运行指示。

自耦变压器的原边绕组接电源,副边绕组接电动机,副边绕组一般有几个接头,如额定电压的 80%、65% 等抽头。电压不同,电机可获得不同的启动转矩,可根据实际情况选择。

3. 星—三角(Y/Δ)降压启动控制电路

在正常运行时绕组接为三角形送 380V 电源的笼型异步电机,均可采用 Y/Δ 降压启动方法来达到限制启动电流的目的。启动时定子绕组首先连接成星形,启动即将完成时再恢复为三角形接法。

图 3-2-6 为星—三角形降压启动控制电路。

图中主电路中有电源开关 Q、短路保护熔断器 FU1、降压星形接法的接触器 KM1 和 KM3、全压三角形接法的接触器 KM1 和 KM2、电动机 M。控制电路有停止

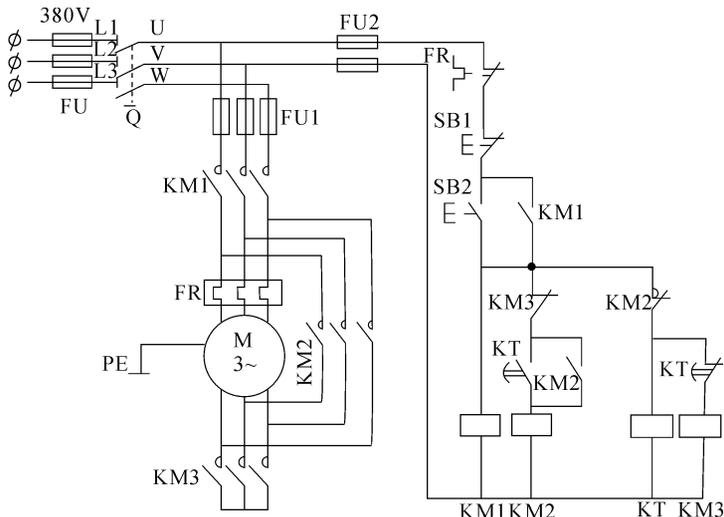


图 3-2-6 星形-三角形降压启动电路

按钮 SB1 和启动按钮 SB2、接触器 KM1 ~ KM3 的线圈及负责由星形接法自动切换到三角形接法的时间继电器 KT。

工作原理:合上电源开关 Q,电动机需要启动,按启动按钮 SB2,接触器 KM1, KM3 和时间继电器 KT 的线圈得到电源, KM1, KM3 的主触点使电动机在星形下减压运行,同时 KM1 的辅助常开触点闭合自锁, KM3 的辅助常闭触点和 KM2 的线圈连锁。当电动机的转速达到额定转速的 85% 以上时,时间继电器 KT 的通电延时常闭触点断开,断开接触器 KM3 线圈的电源,电动机减压运行结束,KT 的通电延时常开触点闭合,接触器 KM2 的线圈通电,主触点闭合,电动机进入全压的三角形运行。KM2 的辅助常开触点闭合自锁,辅助常闭触点断开和 KM3, KT 的线圈连锁。电动机需要停止,按 SB1 即可。

电机在启动时,把定子每一相绕组上的电压降到正常工作电压的 $1/\sqrt{3}$,由于转矩和电压的平方成正比,所以启动转矩也减少到全压启动时的 $1/3$,这种方法适用于空载或轻载启动。由于星-三角形启动方法利用电机本身的接法而不需要增加其他启动设备就可以实现降压启动。在生产实践中应用很广。

4. 延边三角形降压启动控制电路

星-三角形降压启动的方法,启动转矩是全压启动转矩的 $1/3$ 。如需要启动转矩大,也可采用延边三角形降压启动,这种启动方法也不需要专用启动设备。延边

三角形降压启动是在电机启动初,将电动机绕组接为延边三角形来降低启动电压,待启动完毕后,将定子绕组再接为三角形正常运行。

图 3-2-7 a 为电动机定子绕组连接图。定子绕组接法如图所示,和一般电机不同,这种专用电机有 9 个绕组端头。除正常的电机出线端头(U1, V1, W1)和(U2, V2, W2)外,每相定子绕组中间还有出线端头(U3, V3, W3),通过图可看出电机启动时定子绕组接为延边三角形,其中 U1-U3, V1-V3, W1-W3 为电动机三角形的延边绕组。改变延边绕组和该相定子绕组的抽头比例,就能调节启动时定子绕组相电压的大小,从而达到改变启动电流的目的。

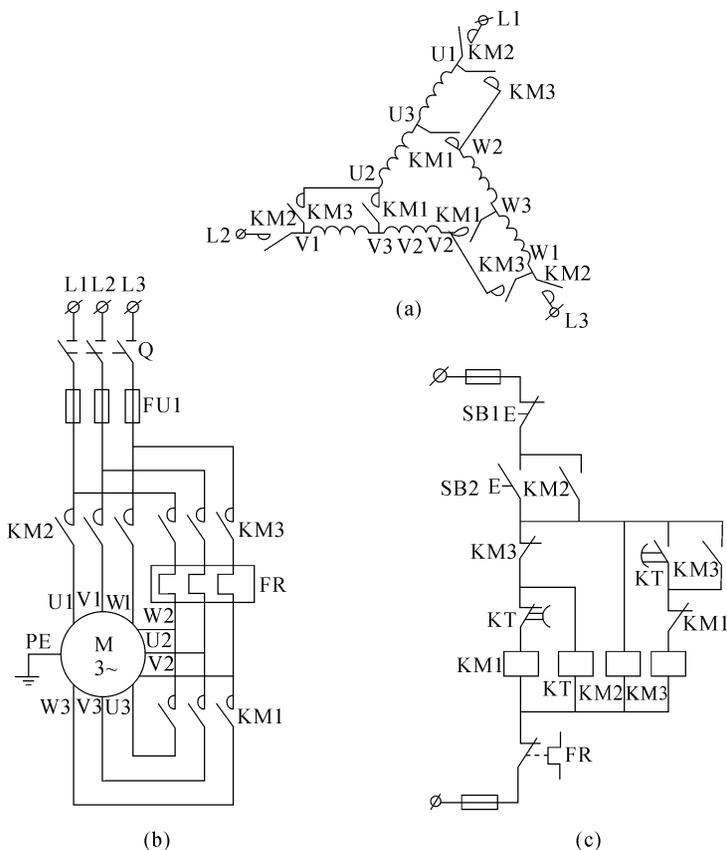


图 3-2-7 延边三角形降压启动控制电路

图 3-2-7 为延边三角形降压启动控制电路。主电路有电源开关 Q、短路保护 FU1、电源接触器 KM2、用于电机三角形接法接触器 KM3、用于电机延边三角形接法

接触器 KM1、电机过载保护继电器 FR。控制回路有停止、启动按钮 SB1 和 SB2,接触器 KM1, KM2, KM3 的线圈,有将延边三角形降压状态自动转换为三角形全压运行状态的时间继电器 KT。

工作原理:合上电源开关 Q,电动机要启动,按下启动按钮 SB2,接触器 KM1, KM2 和时间继电器 KT 的线圈有电, KM1, KM2 的主触点闭合使得电动机延边三角形减压启动, KM2 的辅助常开触点闭合自锁。经过一段延时,当电动机的转速达到额定转速的 85% 以上时,时间继电器 KT 的通电延时常闭触点断开接触器 KM1 线圈的电源,电动机延边三角形降压运行结束,而通电延时常开触点闭合,使得接触器 KM3 的线圈通电,其主触点闭合,电动机进入三角形的全压运行。KM3 的辅助常闭触点断开,和 KM1, KT 的线圈连锁, KM3 的辅助常开触点闭合自锁。

5. 绕线式异步电机转子串电阻启动控制电路

和笼型异步电动机不同,绕线式异步电动机的转子回路可以串接电阻,既能限制启动电流,又可以增加启动转矩,还可以调速。像起重机、电梯等生产机械一般采用绕线式异步电动机拖动。

前面介绍的降压启动控制电路全部采用时间继电器控制电路,实现由降压启动自动切换到全压运行,这种控制方式称为时间控制原则。

图 3-2-8 为电流原则控制转子串电阻降压启动控制电路。图中采用了电流继电器控制电路由降压启动自动切换到全压运行。主电路中有电源短路保护 FU1, 电机 M, 电源接触器 KM4, 电机的过载保护继电器 FR 的热元件, 转子回路所串电阻 R1, R2, R3, 用来切除电阻的接触器 KM1, KM2, KM3 的主触点, 欠电流继电器的线圈 KA1, KA2, KA3 (其中欠电流继电器 KA1, KA2, KA3 的吸合电流值都一样, 对于释放 $KA1 > KA2 > KA3$)。控制电路中有停止按钮 SB1、启动按钮 SB2、接触器 KM1 ~ KM4 的线圈和辅助触点、中间继电器 KA4、电流继电器 KA1 ~ KA3 控制触点等。

工作原理:合上电源开关 Q,按下启动按钮 SB2, KM4 通电并自锁,其主触点闭合给定子绕组送电源,此时电机转子串入所有的电阻启动。同时 KM4 的辅助常开触点闭合,使得 KA4 的线圈通电,为接触器 KM1 ~ KM3 的线圈通电做准备。由于电机刚启动时启动电流很大, KA1 ~ KA3 吸合电流相同,同时吸合动作,其常闭触点都断开,使得接触器 KM1 ~ KM3 都处于断电状态,转子电阻全部串入,限制了启动电流,增加了启动转矩。随着电机转速的升高,启动电流逐渐地减少,电流继电器 KA1 的释放电流最大,当启动电流减少至 KA1 的释放电流整定值时, KA1 首先释放,其

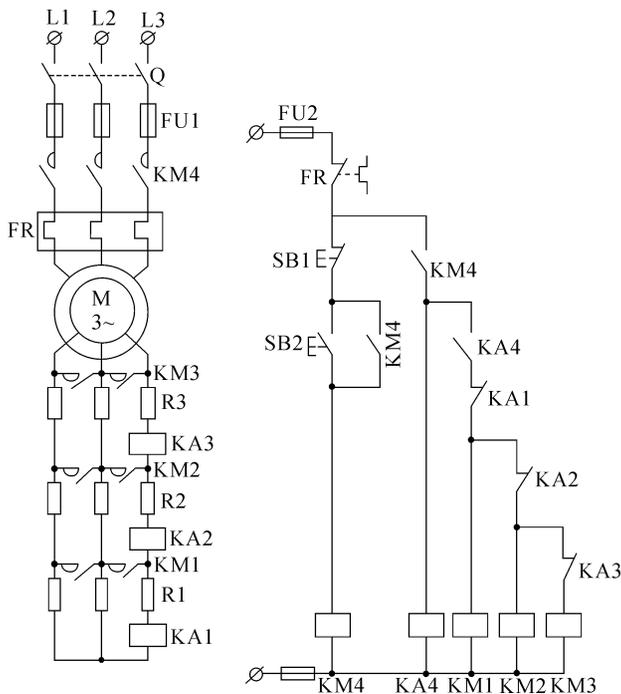


图 3-2-8 电流原则控制转子串电阻降压启动控制电路

常闭触点复位,使得接触器 KM1 的线圈通电,其主触点闭合短接转子串电阻 R₁,随着电机转速的继续升高,启动电流逐渐地减少,当启动电流减少至 KA2 的释放电流整定值时,KA2 其次释放,其常闭触点复位,使得接触器 KM2 的线圈通电,其主触点闭合短接转子串电阻 R₂,随着电机转速的继续升高,启动电流继续减少,直至转子电阻全部切除。

电路中 KA4 的作用是电机启动时保证全部电阻串入。因为电动机刚启动时,电流由零值上升到最大值需要一定的时间,启动初 KA1, KA2, KA3 可能都未动作,造成全部电阻不经启动就全部短接,电机直接启动了。有了中间继电器 KA4,使得启动初,接触器 KM1, KM2, KM3 不会通电。当接触器 KM4 的常开触点将中间继电器 KA1 线圈接通,KA4 的常开触点闭合后,接触器 KM1, KM2, KM3 的线圈方可通电,KA4 的动作时间保证电机的电流上升到最大值,这时电流继电器 KA1, KA2, KA3 已全部动作,使全部电阻接入,保证电动机串电阻启动。

6. 绕线式异步电机转子串频敏变阻器启动控制电路

绕线式异步电动机采用转子串电阻降压启动,电阻是被逐级一段一段地切除,

在逐级切除时电动机的电流就有一增加的突变过程,随之电动机转速也有增加的突变过程,影响了电机启动特性的平滑性。对于启动特性要求高的生产机械可采用电动机转子串频敏变阻器启动的方法。

频敏变阻器是一种无触点的电器元件,它的阻抗可以随着电机转子电流频率减小而下降达到自动变化,可以实现平滑无级启动。

频敏变阻器实质上是铁芯损耗非常大的三相电抗器,铁芯采用 E 形厚钢板叠压而成。线圈绕组连接为星形,接到绕线式异步机的转子绕组上。通过变阻器线圈的电流就是电动机转子绕组的电流。当转子频率随启动过程转速上升而下降时,频敏变阻器的阻抗值随着转子频率也平滑下降,保证了电动机特性的稳定。

图 3-2-9 为绕线式异步电机转子串频敏变阻器启动控制电路。主电路中有短路保护 FU1、电源接触器 KM1、电机 M、转子切除电阻用接触器 KM2、频敏变阻器 L、过载保护继电器 FR 等,控制电路有 KM1 和 KM2 接触器的线圈、时间继电器 KT、启动和停止按钮 SB1 和 SB2 等。

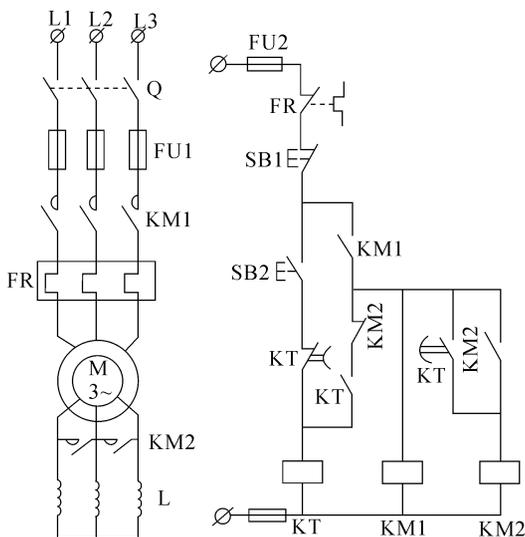


图 3-2-9 绕线式异步电机转子串频敏变阻器启动控制电路

工作原理:合上电源开关 Q,电机启动,按下启动按钮 SB2,接触器 KM1 和时间继电器 KT 的线圈有电,KM1 的主触点闭合,使得电机串频敏变阻器启动,随着转速的升高,频敏变阻器的阻抗下降,当转速达到电机额定转速的 85% 时,KT 的延时时间到了,其常开触点闭合使得接触器 KM2 线圈有电,主触点闭合切除频敏变阻器,



电机进入正常运行。

3.3 笼型异步电动机制动控制电路

电动机切除电源,由于机电惯性作用,电动机需转动一段时间才停下来。而有些电机拖动的机械设备,往往要求能够迅速停止转动或准确定位。在电气上要求电机制动,一般电气制动常采用反接制动和能耗制动。

3.3.1 反接制动

电动机转动,如要反接制动,断开电机电源的同时,给电机定子绕组送和原来电源相序相反的电源,使电动机定子绕组产生的旋转磁场与转子旋转方向相反,产生的制动力矩使转速很快为零。这时应该立刻切断电源,否则电机反方向旋转起来。

1. 单向反接制动

图3-3-1为电动机单向反接制动控制电路。反接制动时,转子与定子旋转磁场的相对速度接近于2倍的同步转速,反接制动电流相当于电机启动电流的2倍。为了减少制动时产生的冲击和绕组过热,一般采用在电机绕组中串入制动电阻。制动电阻一般分为对称电阻和不对称电阻。同时注意制动次数不宜太频繁。

在单向反接制动控制电路中主电路有电源开关Q、电源接触器KM1、制动接触器KM2、过载保护继电器FR的热元件、反接制动电阻R、电机M和电机同轴相连的速度继电器KV。控制回路有停止按钮SB1、启动按钮SB2、接触器KM1和KM2的线圈和辅助触点等。

工作原理:合上电源开关Q,电机要启动,按启动按钮SB2,接触器KM1的线圈通电并自锁,其主触点闭合,电动机启动,当 $n \geq 100\text{r/min}$ 时,速度继电器的触点KV闭合,为电动机的制动停车做准备。

电机要停止,按停止按钮SB1,接触器KM1的线圈断电,其主触点断开电机的正相序电源,电机惯性运转,将停止按钮SB1按到底,其常开触点闭合,电源通过速度继电器的触点KV使得接触器KM2的线圈通电,其主触点闭合通过制动电阻R给电机送反相序的电源,电机反接制动开始,当 $n \leq 100\text{r/min}$ 时,速度继电器的触点复



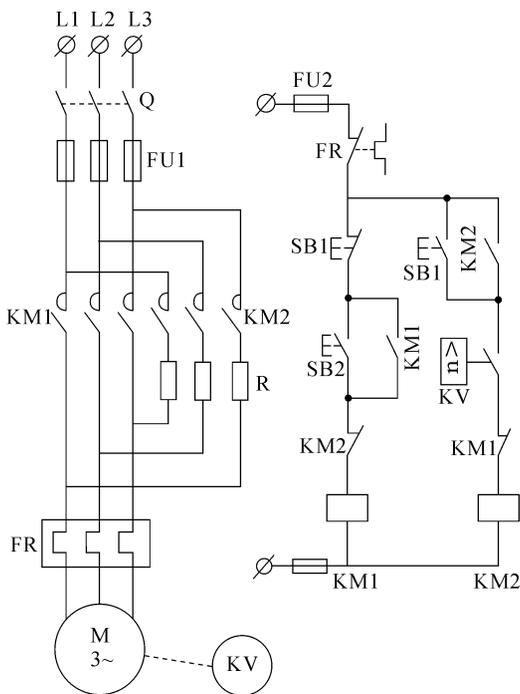


图 3-3-1 电动机单向反接制动控制电路

位,接触器 KM2 的线圈断电,其主触点断开电机的反相序电源,制动结束。

电路中采用速度继电器 KV 检测电动机转速的变化,通过调节速度继电器可使电机的速度接近零时,断开电机的反向制动电源。

2. 双向反接制动电路

图 3-3-2 为电动机可逆运行的反接制动控制线路。图中主电路有正转和反转电源接触器 KM1 和 KM2、短接或反接制动电阻的接触器 KM3、速度继电器 KV 及反接制动电阻 R。控制电路有停止按钮 SB1、正向和反向启动按钮 SB2 和 SB3、各接触器的线圈、中间继电器 KA1 ~ KA3、速度继电器正转触点 KV1、反转触点 KV2 等。

工作原理:合上电源开关 Q,电机要正向启动,按正向启动 SB2,接触器 KM1 的线圈通电并自锁,其主触点闭合,电动机定子绕组串入电阻 R,并接入正向电源启动,当 $n \geq 100r/min$ 时,速度继电器的正转触点 KV1 闭合,使得接触器 KM3 的线圈通电,其主触点闭合短接电阻 R,电动机进入正常运行。

电机要停止,按停止按钮 SB1,接触器 KM1 和 KM3 的线圈断电,电机断开正相

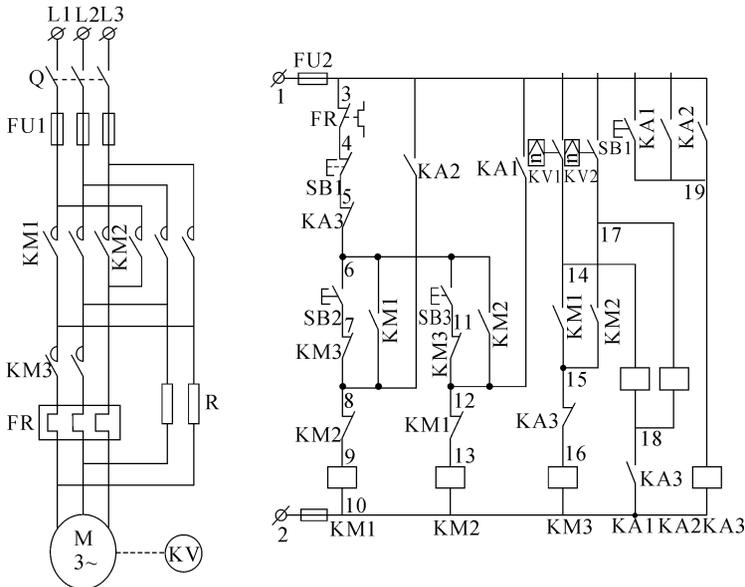


图 3-3-2 电动机可逆运行反接制动电路

序的电源,将停止按钮 SB1 按到底,常开触点闭合,使得 KA3 的线圈通电,KA3 的常闭触点断开和接触器 KM3 的线圈连锁,KM3 的主触点复位将电阻 R 串入主电路,保证制动时用。KA3 的另一常开触点闭合,电源通过速度继电器的正转触点 KV1,使得中间继电器 KA1 的线圈通电,KA1 的常开触点闭合,使得接触器 KM2 的线圈通电,这样,电机在串入电阻的情况下又接入反相序电源进行反接制动。当 $n \leq 100r/\min$ 时,速度继电器的 KV1 触点复位,KA1 和 KM2 的线圈相继断电,反接制动结束。电动机反向启动和制动停车的过程同上述原理相似,可自行分析。

通过以上原理分析,可以了解到主回路中的反接制动电阻 R 还起到限制启动电流的作用。

3.3.2 能耗制动

能耗制动是将正在转动的电动机从电源切除后,迅速在定子绕组上接入直流电源,这时便可在定子绕组中流过直流电流,在空间产生一个静止的磁场,因转子在惯性作用下旋转,旋转时切割磁力线,感应出电势,产生转子电流,利用转子电流在静止磁场的相互作用下产生制动力矩,使电动机很快停止转动。

图 3-3-3 为电动机能耗制动控制电路。图中主电路有电源接触器 KM1、制动

接触器 KM2、热继电器的热元件 FR、整流装置 UR。控制电路有停止按钮 SB1、启动按钮 SB2、接触器 KM1 和 KM2 的线圈、用于制动控制的时间继电器 KT 等。

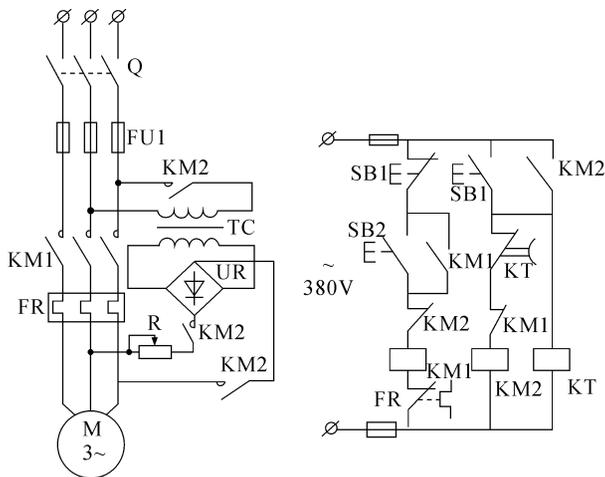


图 3-3-3 电动机能耗制动控制电路

工作原理:合上电源开关 Q,电机要启动,按下启动按钮 SB2,接触器 KM1 的线圈通电并自锁,其主触点闭合,电动机接入电源启动。电机要停止,按下停止按钮 SB1,SB1 的常闭触点断开接触器 KM1 的线圈的电源。将停止按钮 SB1 按到底,常开触点闭合,使得接触器 KM2 的线圈通电并自锁,同时给时间继电器 KT 的线圈通电,KM2 的主触点闭合,给电机送直流制动电源,电机进入能耗制动,转速迅速下降,当转速为零时,时间继电器 KT 的常闭触点断开,断开接触器 KM2 线圈的电源,电动机能耗制动结束。

为使能耗制动线路简化,对小容量的电动机能耗制动可采用无变压器的单管能耗制动,其控制线路见图 3-3-4 所示。控制原理和图 3-3-3 相似,可自行分析。

能耗制动方法可以弥补反接制动时振动和冲击大、影响所拖动机械设备的精度,同时不适合启动次数多的缺点。在一些功率稍大、制动次数频繁的生产机械上较多地采用能耗制动的方法。

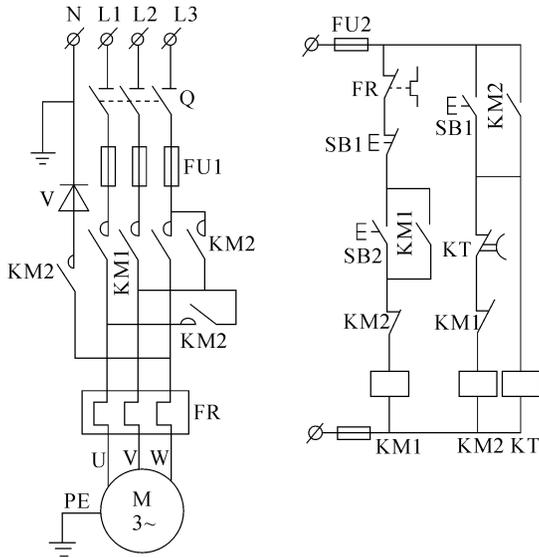


图 3-3-4 电动机单管能耗制动电路

3.4 直流电动机控制电路

在控制电路中由于直流电动机有良好的调速性能,在需要速度精确控制的场合,直流电动机得到广泛应用。

直流电动机有串励、并励、复励和他励四种。控制电路基本相同。下面以常用的他励直流电动机为例,介绍启动和制动控制电路。

3.4.1 直流电动机启动控制电路

直流电动机除了小功率的偶尔采用直接启动外,一般都在图 3-4-1 直流电动机串电阻启动控制电路的电枢电路中串接适当电阻 R 逐渐升压启动。这是由于电动机在静止状态下启动时,电机反电势尚未建立,如果在额定电压下启动,它的启动电流可达额定电流的 $10 \sim 50$ 倍,使电动机电枢绕组和换向器受到损坏。

图中主电路有电源接触器 $KM1$ 、切除电枢电阻 $R1$ 和 $R2$ 的接触器 $KM2$ 和 $KM3$ 、电枢回路的过电流保护继电器 $KA1$ 。控制回路有停止按钮 $SB1$ 、启动按钮 $SB2$ 、各接触器的线圈、欠电流继电器 $KA2$ 、用于控制自动切换电阻的时间继电器 $KT1, KT2$ 等。

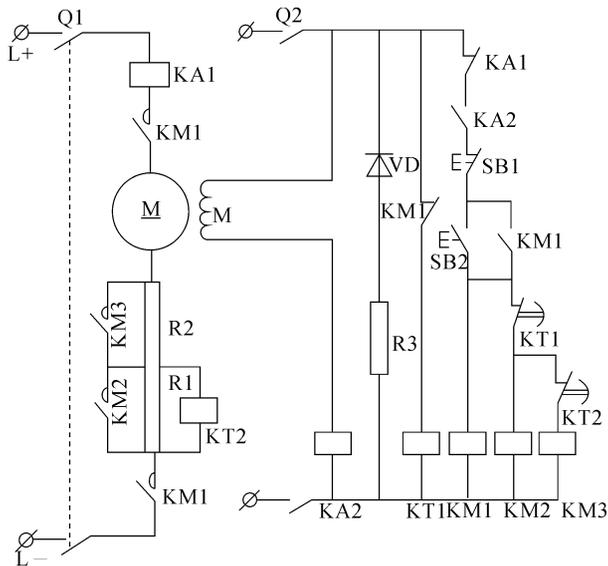


图 3-4-1 直流电动机串电阻启动控制电路

工作原理:合上电源开关 Q1 和控制开关 Q2,控制电路中的时间继电器 KT1 的线圈通电,其常闭触点断开了接触器 KM2 和 KM3 的线圈电源通路,保证了主回路电机启动时串入电阻 R1 和 R2。电机要启动,按下启动按钮 SB2,接触器 KM1 的线圈通电并自锁,其主触点闭合,接通了电机电枢回路,电机电枢串入二级电阻启动,同时接触器 KM1 的辅助常闭触点断开时间继电器 KT1 线圈的电源,其常闭触点将延时复位,为接触器 KM2, KM3 的通电短接电枢回路的电阻做准备。电机启动的同时,并接在 R1 两端的时间继电器 KT2 的线圈通电,其常闭触点断开,使得 KM3 的线圈断电,保证电阻 R2 串入电枢。

经过一段延时,时间继电器 KT1 的常闭触点复位,接触器 KM2 的线圈通电,其主触点闭合,短接电阻 R1,随着电机转速的升高,电枢电流减少,启动过程中将电阻逐级切除。就在 R1 被短接的同时,KT2 线圈断电,经过一段延时,KT2 的常闭触点复位,接触器 KM3 的线圈通电,其主触点闭合短接电阻 R2,电动机在全压下运转,启动过程结束。

电路中 KA1 为过电流继电器,起过载短路保护,KA2 为欠电流继电器,起励磁绕组欠磁场保护,VD 和 R3 是励磁绕组的放电回路。

3.4.2 直流电动机制动控制电路

直流电动机的电气制动有反接制动、再生制动和能耗制动。在机床控制上采用能耗制动较多。图 3-4-2 为能耗制动控制电路。

和直流电动机启动控制电路相比,主电路多了制动用接触器 KM4、制动用电阻 R4 和欠电压继电器 KA3。当电机启动时电路和图 3-4-1 相同。

停车时,按下停止按钮 SB1,接触器 KM1 的线圈断电,其主触点断开,切断电机的电枢直流电源,此时电机因机电惯性仍高速旋转,电枢两端仍有较高电压,由于中间继电器 KA3 的作用,使得接触器 KM4 线圈通电,电阻 R4 并接在电枢两端实现电动机的能耗制动,电机转速很快下降,电动机反电势相应下降,当降至 KA3 的释放电压时,最终使 KA3 释放,使接触器 KM4 线圈断电,电动机能耗制动结束。

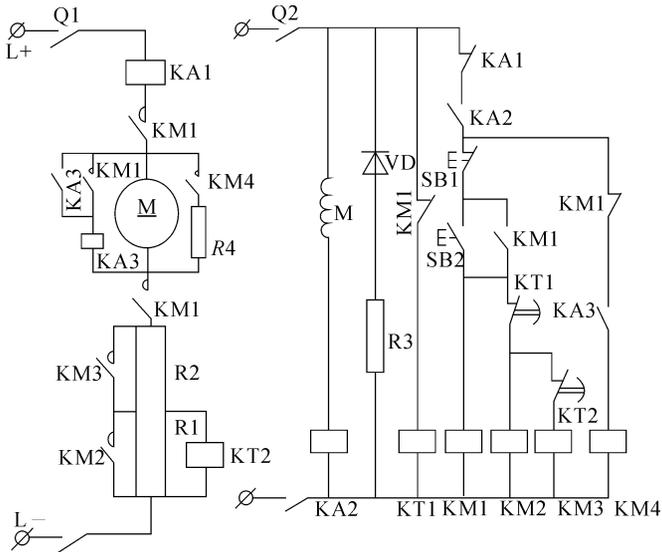


图 3-4-2 直流电动机能耗制动控制电路

3.5 电气控制线路的逻辑代数分析方法

在接触器、继电器的控制电路中,用触点的“闭合”和“断开”两种状态来控制系统工作。逻辑代数的变量有“1”和“0”两种取值,将逻辑代数的这两种截然不同的取值用来描述、分析和设计电气控制电路,已被广泛应用。

3.5.1 电器元件的逻辑表示

由接触器、继电器等开关量构成的电气控制系统,电路的控制状态与逻辑函数之间存在着对应关系,为了用逻辑函数的方式将电路的状态描述出来,对电器作如下规定。

①用 KM, KA, SB, SQ, Q…分别表示接触器、继电器、按钮、行程开关、电源开关等电器的常开(动合)触点;KM, KA, SB, SQ, Q等表示常闭(动断)触点。

②触点闭合时,逻辑状态为“1”;触点断开时,逻辑状态为“0”;电器的线圈通电时为“1”状态;线圈断电为“0”状态。

触点的原始状态:

$\overline{KM} = 0$ 接触器的常开(动合)触点状态。

$KM = 1$ 接触器的常闭(动断)触点状态。

$\overline{SB} = 0$ 按钮的常开(动合)触点状态。

$SB = 1$ 按钮的常闭(动断)触点状态。

线圈状态:

$KM = 1$ 接触器线圈为通电状态。

$KM = 0$ 接触器线圈为断电状态。

电器动作后的非原始状态:

$\overline{KM} = 1$ 接触器常开(动合)触点闭合状态。

$KM = 0$ 接触器常闭(动断)触点断开状态。

$\overline{SB} = 1$ 按钮的常开(动合)触点闭合状态。

$SB = 0$ 按钮的常闭(动断)触点断开状态。

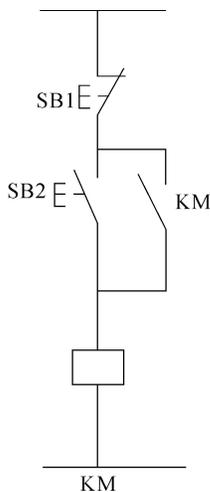


图 3-5-1 电机单方向连续运行电路

3.5.2 控制电路的逻辑表示

在控制电路中电路的触点有串联和并联的接法。如触点串联关系可用逻辑“与”即乘(·)的关系表示;触点的并联关系用逻辑“或”即逻辑加(+)的关系表示。图 3-5-1 是电机单方向连续运行电路。其中接触器 KM 线圈的逻辑函数表达式可写成:

$$f(KM) = \overline{SB1} \cdot (SB2 + KM) \quad (3-5-1)$$

图中 SB1, SB2 为停止和启动按钮,同时也是线圈 KM 的停止条件和启动条件,



而自锁触点具有记忆保持功能。在用逻辑函数表示的电路中可用逻辑代数进行化简。

图 3-5-2 中 a 图的逻辑式为

$$f(KM) = KA1 \cdot KA2 + \overline{KA1} \cdot KA3 + KA2 \cdot KA3 \quad (3-5-2)$$

$$\begin{aligned} \text{函数化简 } f(KM) &= KA1 \cdot KA2 + \overline{KA1} \cdot KA3 + KA2 \cdot KA3 \\ &= KA1 \cdot KA2 + \overline{KA1} \cdot KA3 + KA2 \cdot KA3 \cdot (KA1 + \overline{KA1}) \\ &= \overline{KA1} \cdot KA2 + \overline{KA1} \cdot KA3 + KA2 \cdot KA3 \cdot KA1 + KA2 \cdot KA3 \cdot \overline{KA1} \\ &= KA1 \cdot KA2 \cdot (1 + KA3) + \overline{KA1} \cdot KA3 \cdot (1 + KA2) \\ &= KA1 \cdot KA2 + \overline{KA1} \cdot KA3 \end{aligned}$$

通过逻辑运算, a 图化简后得到 b 图所示电路。两个功能不变。

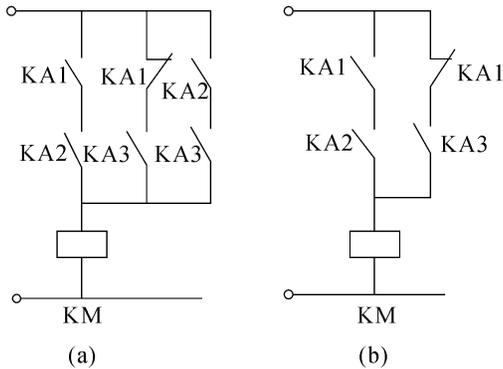


图 3-5-2 两个相等函数及其等效电路

3.6 电气控制线路的其他基本环节

控制电路中电动机可以启动,正反转,电气制动。为了满足生产机械设备工作的要求,在以上基本控制环节的基础上,下面介绍点动控制:顺序控制、多点控制、自动循环控制等基本电路。

3.6.1 点动控制

生产机械在正常加工时,需连续不断地工作,即所谓长动。而有些机械,如机床的快速进给电机,即按按钮时电动机转动实现快速进给。手放开按钮时,电动机即停止,进给结束,这就是点动控制。图 3-6-1 为点动控制电路。一般适用于机床



的刀架、横梁、立柱的快速移动等。

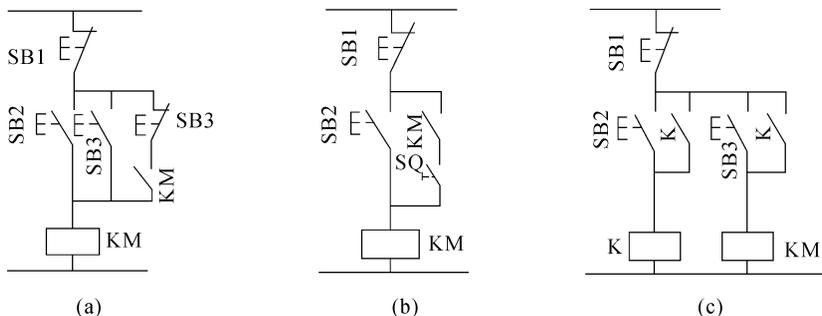


图 3-6-1 点动控制电路

长动和点动控制电路的区别是无电器触点的自锁。

3.6.2 顺序控制

在机床的控制线路中,经常要求电动机有顺序启动。如龙门刨床要求工作台在移动前,工作台下的导轨内必须有足够的润滑油,工作台才能够移动,如图 3-6-2 为电动机顺序控制电路。如电路所示,当满足控制液压电动机 M2 的接触器 KM1 工作后,控制主轴电动机 M1 的接触器 KM2 才能工作。

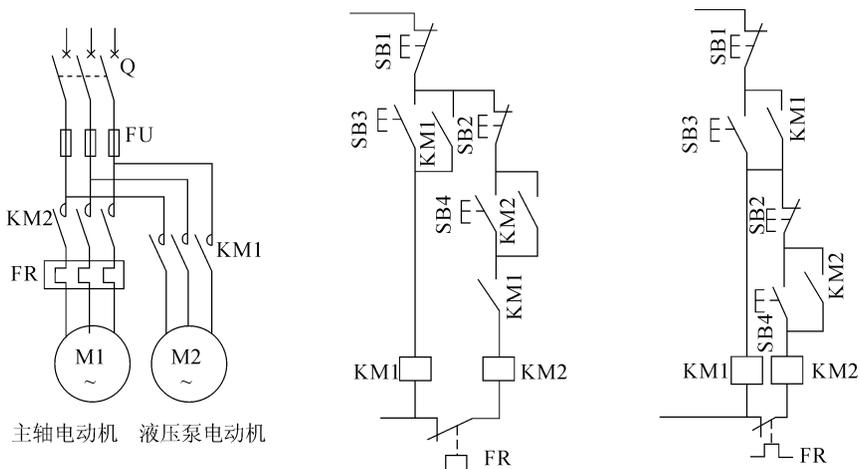


图 3-6-2 为电动机顺序控制电路

3.6.3 多点控制与条件控制

在大型生产机械中,为了操作方便,需要在多个方位进行控制,如图 3-6-3a 所示多个启动按钮并联连接,而多个停止按钮串联连接,就实现了多方位的操作。

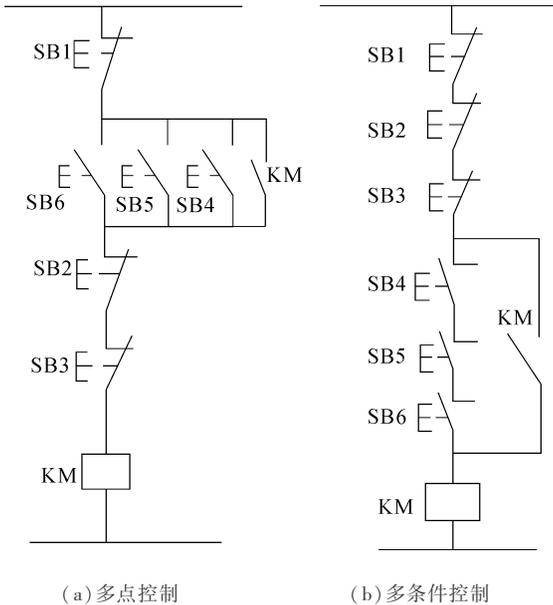


图 3-6-3

在有些生产设备上,为了保证操作安全,要求其他的控制设备都是原始状态下才能启动。如图 3-6-3b 要求设备工作时,其他空载设备停止时,KM 线圈才能有电去控制设备。

3.6.4 自动循环控制电路

许多机床的工作台要求正反转运动自动循环,这是在正反转控制电路的基础上加行程开关 SQ1, SQ2, 和起两端限位作用的行程开关 SQ3, SQ4 自动切换控制完成的。

图 3-6-4 为工作台自动循环示意图,其 SQ2 为正向转反向的行程开关, SQ1 为反向转正向的行程开关, SQ3 为正向限位行程开关, SQ4 为反向限位行程开关,图 3-6-5 为工作台自动循环控制电路。

当按正向按钮 SB2 后,使接触器 KM1 的线圈有电,其主触点闭合,实现电动机正转拖动工作台前进,当前进到位,制子 B 压下行程开关 SQ2,使电动机切换电源。

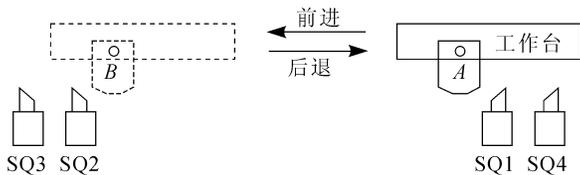


图 3-6-4 工作台自动循环示意图

电动机反转拖动工作台后退,后退到位,由制子 A 压下行程开关 SQ1,使电机切换电源,如此周而复始地自动往复循环工作。

此种控制电路适用于行程较长的生产机械。

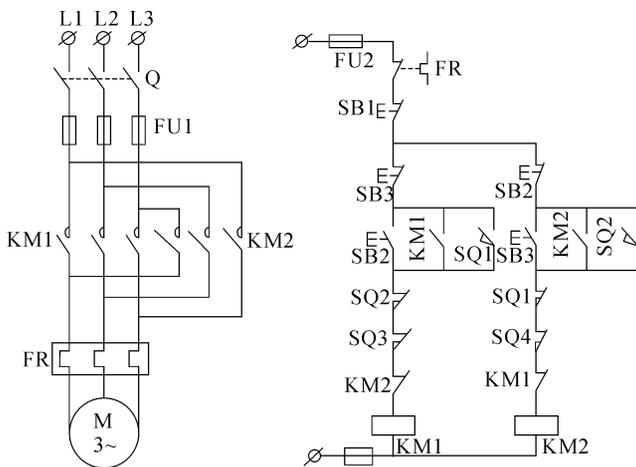


图 3-6-5 工作台自动循环控制电路

3.7 车床的电气控制

卧式车床是应用非常广泛的金属切削机床,可以用来加工工件的外圆、内圆、端面、螺纹,也可以用钻头、铰刀等加工。

3.7.1 普通车床的主要结构及运动形式

通过图 3-7-1 可以了解到普通车床的主要结构由基座、床身、主轴变速箱、进给箱、挂轮箱、溜板箱、溜板、刀架、尾架、光杠、丝杠等部分组成。

车床的运动形式有主运动,进给运动和辅助运动。

主运动为主轴带动工件的旋转运动。它承受车床加工时的主要切削功率。根据被加工工件的要求可调节切削速度,在加工螺纹时需主轴反转。

一般主轴调速是由机械变速部分实现。

车床的进给运动是刀架的纵向或横向的直线进给,是由车床主轴箱输出轴经挂轮箱传给进给箱,再经光杠传入溜板箱实现纵、横两个方向的进给运动。

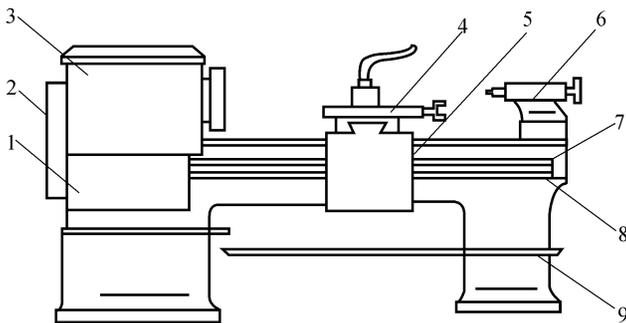


图 3-7-1 普通车床结构示意图

1—进给箱;2—挂轮箱;3—主轴变速箱;4—溜板与刀架
5—溜板箱;6—尾架;7—丝杠;8—光杠;9—床身

车床的辅助运动是溜板箱带动刀架的快速移动。

3.7.2 电力拖动及制动要求

C650 卧式车床属于中型车床,可加工的最大工件回转直径为 1020mm,最大工件长度为 3000mm 和 5000mm。

①电动机 M1(功率为 30kW),完成主轴主运动和刀具进给运动的驱动。电动机采用直接启动的方式启动,可正、反两个方向旋转,并正、反两旋转方向都可以实现反接制动。为加工调整方便,还具有点动功能。

②电动机 M2 为冷却泵,在工件加工时实施冷却液。采用单方向的连续工作状态。

③电动机 M3 实现刀架的快速移动,可根据需要随时手动控制启停,为点动控制。

3.7.3 机床电气控制系统分析

C650 车床的电气控制系统电路如图 3-7-2 所示。

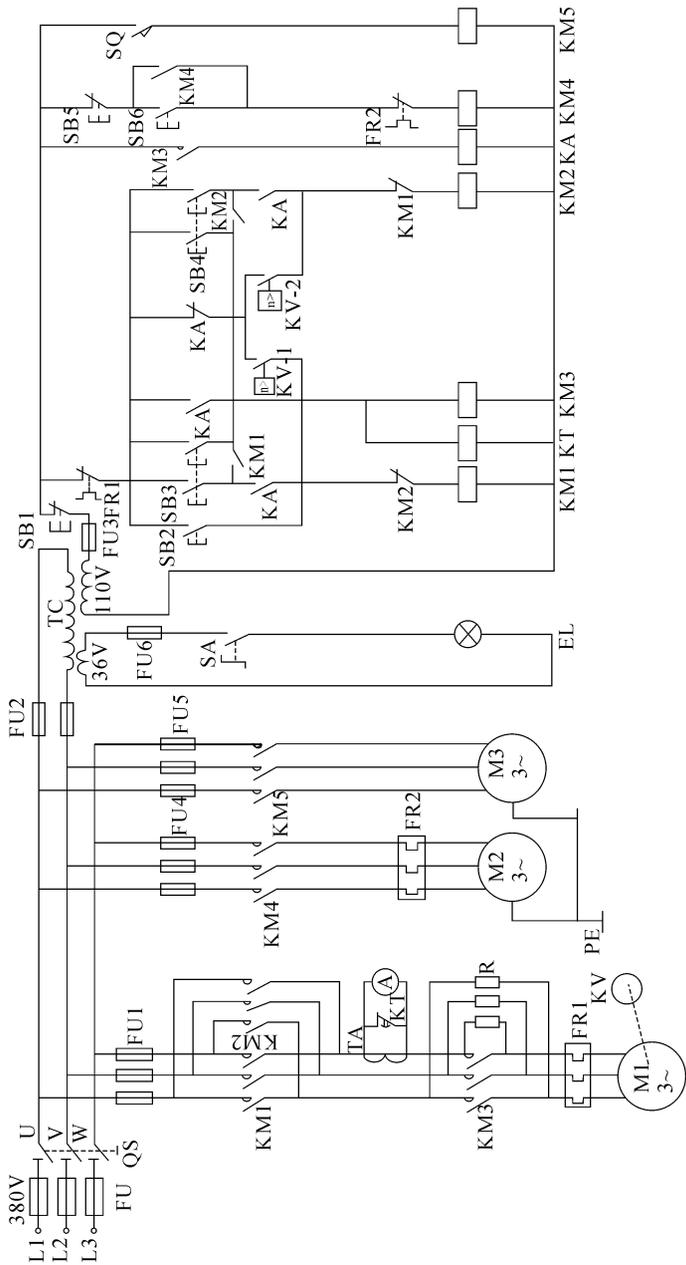


图3-7-2 C650车床控制电路



1. 主电路分析

隔离开关 QS 将三相电源引入, FU1 为主电动机 M1 的短路保护用熔断器, FR1 为 M1 电动机的过载保护用热继电器, 接触器 KM1 和 KM2 可以实现 M1 电动机正转和反转的控制, 接触器 KM3 的作用是控制限流电阻 R 的接入和切除。R 为限流电阻, 防止在点动时连续的启动电流造成电动机的过载, 另一作用是 M1 电动机反接制动时可以减少制动电流。通过互感器 TA 接入电流表 A 以监视主电动机 M1 绕组的电流, 为防止电流表被电动机启动电流冲击损坏, 利用时间继电器 KT 的常闭触点, 在启动时间内将电流表先短接。速度继电器 KV 与电动机主轴相连, 在反接制动中起停车作用。FR2 为冷却泵电机 M2 的过载保护, KM5 是实现快速移动电机 M3 的电源接触器。由于 M3 是短时工作, 所以不设过载保护。

2. 控制电路分析

控制电路可划分为两部分, 一部分是主电动机 M1 的控制电路, 第二部分是冷却泵电动机 M2 和快速移动电动机 M3 的控制电路。主电动机 M1 的控制电路较为复杂, 由主电动机的正反转及点动控制电路和制动控制电路组成, 局部控制电路如图 3-7-3。

(1) 主电动机 M 的正反转启动和点动控制 图 3-7-3a 为主电动机 M1 的正反转及点动控制电路。

主电动机 M1 的正转由正向启动按钮 SB3 控制。按下 SB3 时, 其两个常开触点同时闭合, 首先是右边的常开触点接通时间继电器 KT 和接触器 KM3 线圈电源, 时间继电器 KT 的常闭触点在主电路中短接电流表 A, 经延时(当启动电流过后)电流表接入电路正常工作。接触器 KM3 的主触点闭合, 将主电路中的限流电阻短接, KM3 的辅助常开触点闭合, 给中间继电器 KA 线圈送电源, 其 KA 的常开触点闭合, 给正转接触器 KM1 的线圈送电, 主电动机 M1 在满压下正向直接启动正转。其 KA 的另一常开触点闭合, 当正向启动按钮 SB3 复位时保证 KM3 和 KT 的线圈一直有电。反向直接启动控制过程与正向直接启动控制过程一样, 只是操作反向启动按钮 SB4。

主电动机点动调整控制, 按点动控制按钮 SB2, 给正转接触器 KM1 线圈送电源, 其主触点闭合, 主电动机的定子绕组经限流电阻 R 和电源接通, 主电动机在较低速下启动。松开 SB2, KM1 的线圈断电, 主电动机停止转动。在点动过程中, 中间继电器 KA 线圈不通电, 接触器 KM1 不会自锁。

(2) 主电动机的反接制动控制 为了停车迅速, C650 车床主轴采用了反接制动



冷却泵电动机 M2 由停止按钮 SB5、启动按钮 SB6 及接触器 KM4 组成的电动机单方向连续运转的电路控制。

3.8 铣床的电气控制

铣床主要用来加工机械零件的平面、斜面、沟槽等型面,在装上分度头后,还可以加工直齿轮和螺旋面,装上回转圆工作台还可以加工凸轮和弧形槽。由于用途广,在金属切削机床使用数量上仅次于车床,占第二位。铣床的类型有立铣、卧铣、龙门铣、仿形铣以及各种专用铣床。各种铣床在结构、传动形式、控制方式等方面有许多类似之处。下面以 X62W 卧式万能铣床为例介绍。

3.8.1 X62W 卧式万能铣床的主要结构和运动形式

图 3-8-1 为 X62W 万能铣床外形图,铣床主要由床身和工作台两大部分组成,箱形的床身 13 固定在机床底座 1 上。床身内装有主轴传动机构和变速操纵机械,在床身上部有水平导轨,上边装着带有刀杆支架的悬梁 9,刀杆支架悬梁 9 用来支撑铣刀心轴的一端,而铣刀心轴的另一端固定在主轴的上边,并由主轴带动铣刀旋转。悬梁可沿水平导轨移动,刀杆支架也可沿着悬梁作水平方向移动,用来调整铣刀位置和便于安装各种不同规格的心轴。床身前面有垂直导轨,升降台 3 可沿着垂直导轨上下移动,在升降台上的水平导轨上,装有可在平行主轴轴线方向移动(横向移动,即前后移动)的溜板,溜板上部有可转动的回转台 6。工作台 7 装在回转台导轨上,并能在导轨上作垂直于主轴轴线方向的移动(纵向移动,即左右移动)。工作台上固定的燕尾槽。从上述结果看,固定在工作台上的工件就可以作上下、左右及前后三个方向的运动。此外,由于转动部分 6 对溜板 5 可绕垂直轴线转动一个角度(通常为 45 度),这样工作台水平面上除能平行或垂直于主轴轴线方向进给外,还能在倾斜方向上进给,从而完成铣螺旋槽的加工。卧式铣床与万能卧式铣床的区别在于前者没有转动部分 6,因此不能加工螺旋槽。

X62W 型万能铣床有三种运动形式。

主运动:主轴的旋转运动。

进给运动:工作台在三个相互垂直方向上的直线运动(手动或机动)。

辅助运动:工作台在三个相互垂直方向上的快速直线运动。

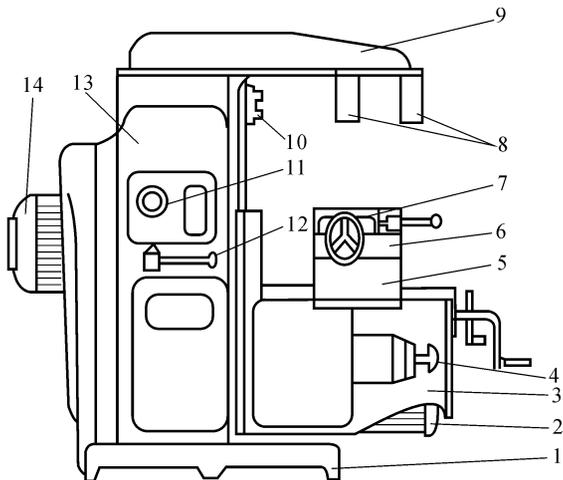


图 3-8-1 X62W 万能铣床外形图

- 1—底座;2—进给电机;3—升降台;4—进给变速手柄及变速盘;5—溜板
6—转动部分;7—工作台;8—刀架支杆;9—悬梁;10—主轴;11—主轴变速手柄盘
12—主轴变速手柄;13—床身;14—主轴电动机

3.8.2 电力拖动特点

1. 主运动电力拖动特点

①主轴的铣削加工有顺铣和逆铣两种形式,分别使用顺铣刀和逆铣刀,要求主轴电动机正反转。根据铣刀要求,对主轴电动机的控制要求是能够进行转向选择。

②铣削运动一般为多刃不连续的运动,为提高主轴旋转的均匀性并消除铣削加工时的振动,主轴上要加飞轮。而加飞轮又带来旋转惯性大,要求主轴停车时应有制动控制。

③主轴转速要求有较宽的调速范围,X62W 铣床采用机械变速方法,即采用改变床身内主轴变速箱的传动比的方法实现。为保证变速过程中齿轮的顺利啮合,减少齿轮端面的冲击,要求主轴电动机在主轴变速时具有变速冲动控制。

2. 进给运动电力拖动特点

①工作台有进给运动和快速移动运动,因此同一方向有进给和快速移动两种控制方式。X62W 铣床采用快速电磁铁的吸合与释放来改变该方向传动链的传动比来实现。

②工作台有三个相互垂直方向的移动,由同一台电机拖动,由于每个方向的移



动都是双向的,所以工作台拖动电动机能正反两方向运转,并且同一时间内只允许一个方向移动,三个相互垂直方向运动之间应有连锁作用。

③使用圆工作台时,要求圆工作台的旋转运动与工作台的上下、左右、前后三个方向运动之间有连锁控制作用。同时根据工艺要求,主轴转动起来以后,才能有进给运动。加工结束以后,先停止进给运动,主轴再停止旋转。

3.8.3 电气控制系统分析

图3-8-2为X62W型铣床控制电路。图中电路可分为主电路和控制电路两部分。铣床控制电路所用电器元件说明如表3-8-1所示。

表3-8-1 电器元件说明表

符号	名称及用途	符号	名称及用途
M1	主轴电动机	SA1	圆工作台转换开关
M2	进给电动机	SA3	冷却泵控制用开关
M3	冷却泵电动机	SA4	照明灯开关
KM1	主轴电动机启动用接触器	SA5	主轴换向开关
KM2	主轴电动机反接制动用接触器	Q	电源隔离开关
KM3	进给电动机正转接触器	SB1 SB2	主轴启动按钮
KM4	进给电动机反转接触器	SB3 SB4	主轴停止按钮
KM5	快速进给控制用接触器	SB5 SB6	工作台快速移动按钮
KM6	冷却泵电动机启动接触器	FR1	主轴电动机热继电器
SQ1	工作台向右进给行程开关	FR2	进给电动机热继电器
SQ2	工作台向左进给行程开关	FR3	冷却泵热继电器
SQ3	工作台向前、向后进给行程开关	FU1-4	熔断器
SQ4	工作台向后、向上进给行程开关	T	变压器
SQ6	进给变速冲动开关	EL	照明灯
SQ7	主轴变速冲动开关	R	制动用限流电阻

1. 主电路分析

KM1 是主轴电动机 M1 的电源接触器,KM2 是主轴电动机 M1 的反接制动用接触器,在加工工件以前确定顺铣和逆铣的是主轴换向开关 SA5。KM3 和 KM4 是进给电动机 M2 正反转接触器,通过机械和电气连锁作用实现工作台三个方向的进给



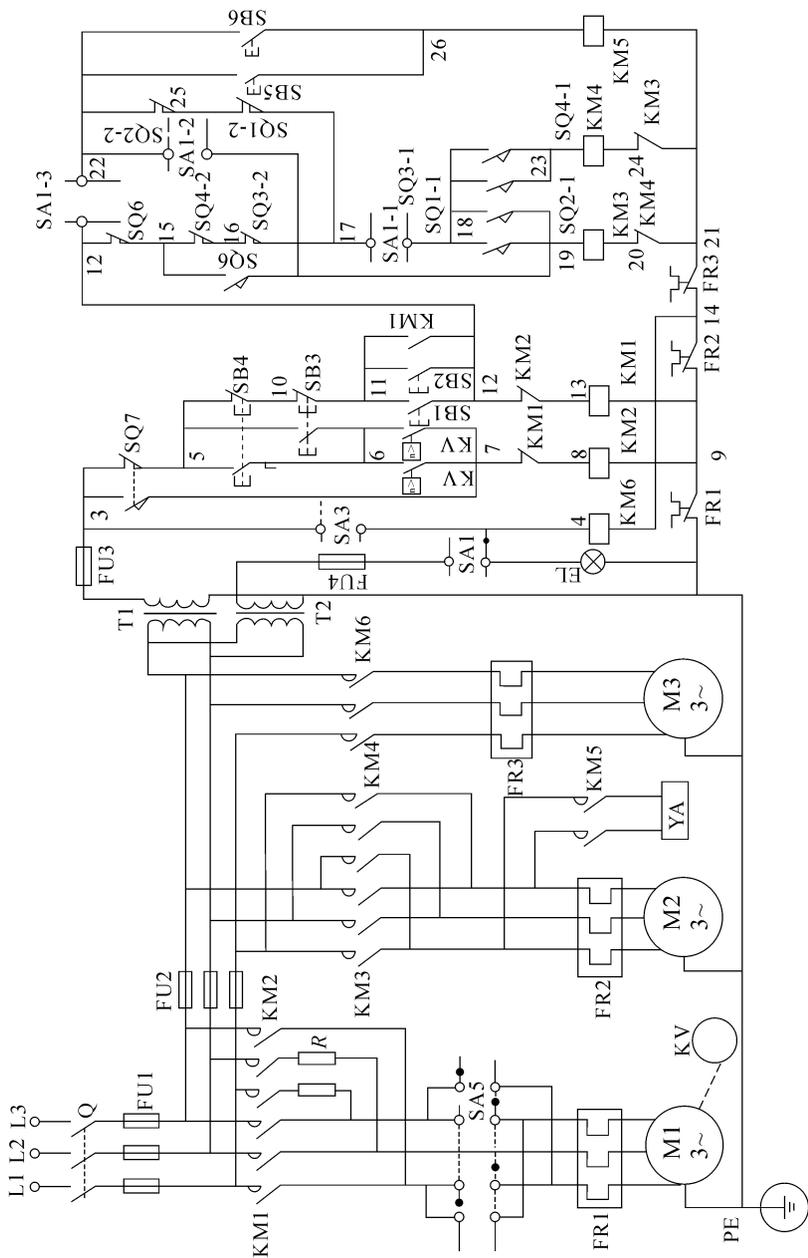


图3-8-2 X62W型铣床控制电路



及圆工作台的旋转运动。KM5 是工作台三个方向的快速移动用接触器,它是通过给电磁铁 YA 线圈送电,通过机械完成的。KM6 是冷却泵电动机 M3 的电源接触器。

2. 控制电路分析

控制电路的电源电压是从变压器 T1 上取得的 127V 安全电压,控制电路的内容可分为两部分,一是主轴控制电路,二是进给控制电路。

(1) 主轴控制电路 主要包括两方面。

① 主轴启动与停止。主轴电动机 M1 启动前,先由 SA5 确定是需要顺铣还是逆铣。然后按按钮 SB1 或 SB2,电源接触器 KM1 线圈有电,主触点闭合,M1 按选定的方向转动,KM1 的辅助常开触点(11,12)闭合自锁,并给进给控制回路送电。

当主轴电动机 M1 的转速上去后,和 M1 主轴相连的速度继电器 KV 的触点(6,7)闭合,为制动停车做好准备工作。

主轴电动机 M1 停止,按按钮 SB3 或 SB4,常闭触点(10,11)或(5,10)断开电源接触器 KM1 线圈的电源,断开了 M1 的正向电源,同时常开触点(5,6)闭合,接通反接制动接触器 KM2 的线圈电源,其主触点闭合串限流电阻 R 反接制动。当 M 的转速为零时,KV 触点(6,7)断开制动接触器 KM2 线圈电源,制动结束。注意停止按钮 SB3 或 SB4 一定要按到底,否则只有自由停车。SB1,SB2,SB3,SB4 分别位于两个操作板上,从而实现主轴电动机的两地操作控制。

② 主轴变速。主轴变速,将变速手柄拉出,再转动变速手轮选择转速,当转速选好后将变速手柄复位。以上变速是通过机械变速机构实现的,当变速齿轮没有进入正常的啮合状态时,需主轴有变速冲动的功能。主轴变速冲动发生在当变速手柄复位的过程中,短时压动行程开关 SQ7,其常开触点(3,7)闭合,接通电源接触器 KM2,主轴电动机 M1 短时启动,带动一方齿轮在极低的速度下转动,调整齿轮位置,使齿轮啮合。因 SQ7 的常闭触点(3,5)串在 KM1 的自锁通路中,因此 M1 只能点动。因 SQ7 的动作是发生在主轴选好速度后,主轴变速手柄推回原位的过程中发生的瞬时动作,所以称为主轴变速冲动。

(2) 进给控制电路 进给控制电路如图 3-8-3。此电路控制工作台的进给、工作台的快速进给、圆工作台的旋转。当主轴转动起来,KM1 的辅助常开触点(11,12)闭合以后,进给控制电路有电。

① 工作台进给。要作进给运动,先将圆工作台的控制开关 SA1 置于圆工作台不工作状态,触点 SA1-1(17,18),SA1-3(12,22)闭合,SA1-2(17,22)断开。进



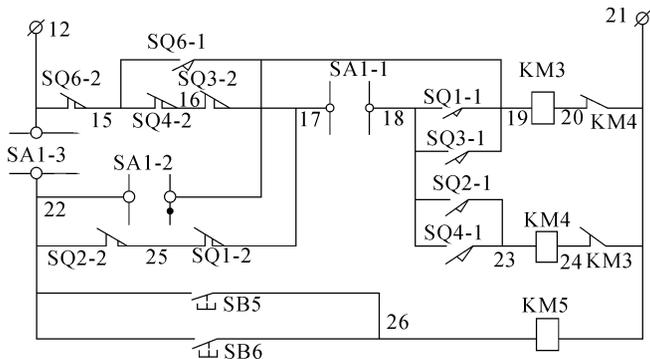


图 3-8-3 进给控制电路

给运动是由两个机械操作手柄进行控制,通过控制进给控制电路中的行程开关 SQ1, SQ2, SQ3, SQ4 实现三个方向的可逆运动。工作台的左右进给运动由一个操作手柄控制,手柄有三个位置,向左、停止、向右。若操纵手柄搬至向左位置时,手柄的联动装置将行程开关 SQ2 压下,进给控制电路的电源从 12 经 SQ6 常闭触点,15 经 SQ4-2 常闭触点,16 经 SQ3-2 常闭触点,17 经 SA1-1,18 经 SQ2-1 压下的常开触点,经 23 给接触器 KM4 线圈有电,主触点闭合使进给电动机 M2 反转,拖动工作台向左进给。若操纵手柄搬至向右位置时,手柄的联动装置将行程开关 SQ1 压下,进给控制电路的电源从 12 经 SQ6 的常闭触点,15 经 SQ4-2 的常闭触点,16 经 SQ3-2 常闭触点,17 经 SA1-1,18 经 SQ1-1 压下的常开触点,经 19 给接触器 KM3 线圈有电,主触点闭合使进给电动机 M2 正转,拖动工作台向右进给。若操纵手柄搬至中间的停止位置,行程开关 SQ1, SQ2 不被压,进给停止。

工作台的前后、上下进给运动是由一个操纵手柄控制,这个手柄有五个位置:向前、向后、向上、向下及停止。因手柄在同一时间只能确定一个运动方向位置,所以手柄在向上、向后时手柄的联动装置压动行程开关 SQ4。而向前、向下时,手柄的联动装置压动行程开关 SQ3,若操作手柄搬至向上(或向后)时手柄的联动装置将行程开关 SQ4 压下,进给控制电路的电源从 12 经 SA1-3,22 经 SQ2-2 的常闭触点,25 经 SQ1-2 常闭触点,17 经 SA1-1,18 经 SQ4-1 压下的常开触点,经 23 给接触器 KM4 线圈有电,主触点闭合,进给电动机 M2 反转拖动工作台向上(或向后)进给。

若操作手柄搬至向下(或向后)时,手柄的联动装置将行程开关 SQ3 压下,进给控制电路的电源从 12 经 SA1-3,22 经 SQ2-2 的常闭触点,25 经 SQ1-2 常闭触点,17 经 SA1-1,18 经 SQ3-1 压下的常开触点,经 19 给接触器 KM3 线圈有电,主触点闭合,进给电动机 M2 正转,实现向下(或向前)的进给。



工作台的左、右、上、下、前、后进给,在作进给时只能允许一个方向进给,其中控制左右进给的手柄之间具有机械连锁,而另一控制上下,前后进给的手柄之间具有机械连锁的作用,为了确保只有一个进给方向,两个机械手柄不同时动作,避免误操作事故,两个机械手柄控制的方向之间,即左右和上下,前后之间,进给控制电路中设置了电气连锁控制电路,分别将控制左、右进给的行程开关 SQ2, SQ1 的常闭触点串接在控制上、下、前、后进给控制电路中。同理将控制上、下、前、后进给的行程开关 SQ4 和 SQ3 的常闭触点串接在控制左、右进给控制电路中,从而起到电气连锁作用。只有一个机械手柄于停止位置时,另一个机械手柄操作才能有进给动作。实现了只允许一个方向进给的要求。

② 工作台快速进给。由机械手柄选择了进给方向后,按下快速启动按钮 SB5 或 SB6,接触器 KM5 线圈有电,主触点闭合给快速移动电磁铁 YA 线圈送电, YA 的衔铁吸合,通过机械作用减少中间传动装置,实现快速移动。按钮 SB5 或 SB6 松开时, YA 的衔铁释放,快速移动结束。工作台仍按操作手柄选定的速度和方向继续进给。可见快速移动是点动控制。

③ 圆工作台的转动。当矩形工作台不运动时,将两个操作手柄置于停止位置,圆工作台可作单方向转动,将圆工作台控制开关 SA1 置于圆工作台工作位置,其触点 SA1-1(17,18)和 SA1-3(12,22)断开,触点 SA1-2(17,22)闭合,进给控制电路的电源从 12 经 SQ6 常闭触点,到 15 经 SQ4 常闭触点,到 16 经 SQ3-2 常闭触点,到 17 经 SQ1-2 常闭触点,到 25 经 SQ2-2 常闭触点,到 22 经 SA1-2,到 19 给接触器 KM3 线圈送电,主触点闭合,使进给电动机 M2 正转实现圆工作台的转动。通过以上电路看到圆工作台工作时将行程开关 SQ1, SQ2, SQ3, SQ4 的常闭触点串接在电路中,圆工作台和矩形工作台之间的控制电路实现了电气连锁。可见两个操作手柄置于停止位置时,圆工作台才能转动。

④ 进给变速。进给变速调节是采用机械方法进行的。进给变速时,将蘑菇形进给变速手柄拉出,把速度转盘所选速度对准箭头,然后再把变速手柄继续向外拉至极限位置后推回原位,变速过程结束。在将蘑菇形手柄拉至极限位置的瞬间,通过机械作用使得行程开关 SQ6 瞬间压下,此时进给控制电路的电源从 12 经 SA1-3, 22 经 SQ2-2 常闭触点, 28 经 SQ1-2 常闭触点, 17 经 SQ3-2 的常闭触点,到 16 经 SQ4-2 常闭触点,到 15 经 SQ6 被压下到 19 给 KM3 线圈送电,主触点闭合使进给电动机 M2 瞬动一下,拖动进给变速机构的齿轮瞬动,利于齿轮啮合,完成进给变



速冲动。

3.9 实训一(X62W 铣床电气原理与故障分析)

1. 实验目的及要求

①进一步熟悉 X62W 铣床电气控制电路。能对铣床进行模拟操作并清楚地了解各运动方向上机电互锁的逻辑关系。

②学习机床电气控制电路板电器位置的合理布置及配线方式。熟悉所有电路的规格、型号、用途及动作原理。

③学习机床电器控制电路板的接线规则和方法,了解机床电气控制电路的线号标注规则及导线、按钮规定使用的颜色。

④能正确使用仪表、工具对铣床电气控制电路进行有针对性的检查、测试和维修。能根据故障现象在原理图上分析出故障产生的原因,并能在电路板上指出存在的范围。学会根据电气原理图分析和排除故障。

2. 实验装置及仪表

三相交流异步电动机(其中一台连有速度继电器)	3 台
JQ2—12—14 三相 380V/0.8kW	
X62W 铣床电气控制电路板(自制)	1 块
万用表,欧姆表	各一只
常用电工工具	1 套
连接电源和电动机的三芯橡胶电缆	若干

3. 电气原理图(X62W 铣床控制原理图如图 3-8-2)

4. 实验步骤

(1)分析 X62W 铣床的控制特点 认真阅读电气原理和相关的内容,补齐原理图上缺少的线号。注意 X62W 铣床电气控制由哪些基本环节组成。分析这些环节之间的逻辑关系,以便对铣床的特点和控制要求有较清晰的了解。

①主轴旋转运动的控制。铣床的加工特点决定了主轴旋转方向,在加工前先将主轴电动机转换开关 SA5 切换到所需的位置。

为使主轴能迅速停车,主轴电动机采用了反接制动,制动时在主回路中串入限流电阻来防止过大的制动电流损坏主轴电动机。



X62W 铣床为主轴电动机变速设置了瞬时冲动控制电路,以保证变速齿轮能进入良好的啮合状态。

②工作台的进给控制。X62W 铣床工作台既可在上下(垂直),左右(纵向),前后(横向)六个方向进给,又可通过快速牵引电磁铁改变传动方式在六个方向上做空行程的快速移动。电气电路及操作手柄有完备的机电连锁,既能保证刀具和工件的安全,又可提高工件表面的精度。如主轴电动机起动后才允许工作台进给或快速移动。控制开关和手柄保证六个方向进给和快速移动在同一时刻只能任选一个。圆工作台工作时,六个方向的进给和快速移动均被禁止等。

③为使铣床工作可靠,操作方便,X62W 铣床采用与行程开关、机械挂挡相互联动的两个机械操作手柄(各有两套,分设在铣床工作台的正面和侧面)选择工作台的六个进给方向。用转换开关选择铣刀旋转方向,由设置在两处的按钮对主轴电动机进行启停控制。

(2) 检查与观察电气元件 对电气元件进行外观检查:

①对照原理图核对电气元件,察看各电气元件的外观有无损坏;零件是否齐全有效;接线端子及螺钉、垫片有无缺失的现象。

②检查熔断器熔体是否完好。安装螺旋式熔断器熔体时,从熔断器瓷帽观察窗观察,色点应该朝上,要保证熔断体和熔断器的上下接线板接触良好。

③检查各个开关接通和断开的动作是否清晰有效,行程开关的传动机构是否灵活可靠。扳动行程开关的滚轮应该听到清晰的触点闭合撞击声。

④拆下接触器的灭弧罩,检查灭弧罩隔板(无灭弧罩的接触器直接检查相间的隔板)有无破损。按压其触点架观察触点闭合、复位是否灵活,衔铁有无卡阻现象。检查动触点和静触点有无缺损、歪斜的情况。注意配电板垂直地面放置时,接触器散热孔方向应该朝上。

⑤小心打开热继电器的盖板,检查热继电器的各部件是否完好,用万用表检查热继电器常闭触点的两接线端子,用螺钉旋具轻轻拨动导板,观察热继电器的常闭触点分断是否正常。合上盖板,当机床电气控制板垂直地面时,热继电器的盖板应该向上,以利于散热和防止机床工作时将盖板振脱。

⑥打开速度继电器的端盖,用手指按压摆杆前端顶块观察其触点的分断情况。速度继电器是主轴反接制动的重要控制元件,其摆杆触点、复位弹簧应无异常;触点切换动作应该灵活可靠。



写出元件规格与型号:对照图 3-8-2 X62W 铣床电路,将已检查过的电气元件的规格型号填入表 3-9-1 中相对应的位置。

表 3-9-1 X62W 型铣床电路板电气元件明细表

符号	名称及用途	规格及型号	符号	名称及用途	规格及型号
M1	主轴电动机		SA4	主轴电动机正反转转换开关	
M2	进给电动机		SQ1	工作台向右进给行程开关	
M3	冷却泵电动机		SQ2	工作台向左进给行程开关	
KM1	主轴电动机启动交流接触器		SQ3	工作台向前向下进给行程开关	
KM2	主轴电动机反接制动交流接触器		SQ4	工作台向后与向上进给行程开关	
KM3	主轴电动机正接启停交流接触器		SQ6	工作台进给变速瞬时冲动开关	
KM4	主轴电动机反接启停交流接触器		SQ7	主轴变速瞬时冲动开关	
KM5	快速牵引电磁铁启停交流接触器		T1	控制变压器	
KM6	冷却泵电动机启停交流接触器		T2	照明变压器	
KV	速度继电器		YA	工作台快速移动牵引电磁铁	
SB1	主轴电动机启动按钮		Q	电源引入开关	
SB2	主轴电动机启动按钮(两地控制)		FR1	主轴电动机过载保护热继电器	
SB3	主轴电动机停止按钮		FR2	进给电动机过载保护热继电器	
SB4	主轴电动机停止按钮(两地控制)		FR3	冷却泵电动机过载保护热继电器	
SB5	工作台快速移动按钮		FU1	总电源短路保护熔断器	
SB6	工作台快速移动按钮(两地控制)		FU2	进给电动机与冷却泵电动机短路保护熔断器	
SA1	圆工作台转换开关		FU3	控制电路短路保护熔断器	
SA3	冷却泵电动机启停开关		FU4	照明电路短路保护熔断器	
SA2	照明开关				

检查进给行程开关状态:对照原理图,在实验板中找到各行程开关和转换开关的位置。根据状态(表 3-9-2,表 3-9-3,表 3-9-4)用万用表检查各触点的通断情况。

表 3-9-2 工作台纵向进给行程开关状态表

触点	位置	向左进给	停止	向右进给
SQ1-1	18-19	-	-	+
SQ1-2	17-25	+	+	-
SQ2-1	18-23	+	-	-
SQ2-2	22-25	-	+	+

注:“+”表示触点接触,“-”表示触点断开,下同。



表 3-9-3 工作台横向及上下进给行程开关状态表

触点	位置	向前向下	停止	向后向上
SQ3-1	18-19	+	-	-
SQ3-2	16-17	-	+	+
SQ4-1	18-23	-	-	+
SQ4-2	15-16	+	+	-

表 3-9-4 圆工作台转换开关状态表

触点	位置	接通	断开
SA1-1	17-18	-	+
SA1-2	19-22	+	-
SA1-3	12-22	-	+

(3) 检查与接线端子的接线方法 根据原理图对 X62W 铣床控制电气电路板认真校线。从电源端起,逐级核对接线端子上的线号。检查电气元件与接线端子排之间及元件相互之间的连线是否正确;号码管上的号码是否和电气原理图上的线号一致,采用一线一号,并检查所有端子接线是否牢固。

(4) 检查电路

①检查主回路。用三芯橡胶电缆将主轴电动机 M1 接到端子排相应的端子(不接试车电源),装好主回路熔断器 FU1 和熔体,拧下 FU2 的瓷帽,万用表拨至电阻挡,对 M1 主回路进行检查。

合上总开关 Q,万用表棒分搭 Q 上端的 L1, L2, L3 处,用于按压主轴电动机启动接触器 KM1 触点力使三对主触点闭合。观察表针所示电阻值,判断电路是否正常。

工作台电动机 M2 主回路及冷却泵电动机 M3 主回路均可按上述方法检测。检测时应该断开的电路必须断开,防止造成误判断。测量某一条回路是否断开某条电路,采用什么方式(取出熔体? 关断开关? 拆开某接线端子上的连线?),可根据原理图和现场情况确定。

②检查控制回路。拧下控制回路熔断器 FU3 瓷帽,取出熔体。SA3, SA4 置断开位置,行程开关 SQ7 的滚轮扳至合适的位置(3~5 道),万用表转换开关置电阻挡。

将万用表的一表棒置 3 号线的接线端子(FU3 的下接线端子),另一表棒置 2 号线接线端子上,并分别按主轴电动机启动按钮 SB1 或 SB2,观察表针所示电阻值,判



断控制回路是否正常。若电阻是“ ∞ ”,则该控制回路有断路点。此时,可将2号端子上的表棒依次搭5号,10号,11号……各段导线两端端子检查,直到查出断路点为止。

照明灯控制回路、冷却泵控制回路及工作台进给控制回路均可用上述方法检查。检查以上控制回路时,一定要把行程开关和转换开关扳至“合适”的位置,以防出现判断失误。该断开的电路均应断开,以免出现“寄生电路”。

应特别注意的是,用万用表导通法对电路进行检测时应在通电试车之前进行,若用此法排除故障,一定要断开电源!

(5)模拟操作电路板 在完成实验步骤的(1)~(4)项后,检查三相电源电压,连接电气控制电路的电源线,在指导老师的监护下通电试车,用X62W铣床电路板进行模拟操作。

①主轴电动机M1的启停控制。合上电源开关Q,对换相开关SA5进行预置(主轴电动机M1正转或反转)。

主轴电动机M1的启动控制:按下SB1(或SB2),观察M1的工作情况。KM1线圈得电途径为

1—FU3—3—SQ7—5—SB4—10—SB3—11—SB1(或SB2)—12—KM2—13—KM1—9—FR1—2

主轴电动机M1的停止控制:按下SB3(或SB4),观察M1的停止情况。KM2线圈的电途径为

1—FU3—3—SQ7—5—SB4(或SB3)—6—KV—7—KM1—8—KM2—9—FR1—2

观察主轴电动机的转速:轻按停止按钮SB3(或SB4),只将其常闭触点断开而不使常开触点闭合;停止按钮SB3(或SB4)一按到底就松开;按下停止按钮SB3(或SB4),等到速度继电器的常开触点复位后再松开停止按钮。模仿主轴电动机M1的启停控制过程,并在指导教师监护下完成模拟操作。

②主轴电动机M1的冲动控制。

③进给电动机M2的控制。

工作台纵向(左右)运动的控制:向右运动;向左运动。

工作台垂直(上下)运动和横向(前后)运动的控制:向上进给;向下进给;向前进给;向后进给;工作台的快速移动控制;工作台进给变速运动时的冲动控制;圆工作台的回转控制。



④冷却泵电动机的控制和照明电路控制。

5. 注意事项

①实验前要对所有的仪表、工具、电器等进行检查。发现有问题的仪表、电器向指导教师提出更换。实验时要将仪表放在使用方便且不会从实验台上跌落的位置,实验结束时要对仪器、仪表进行整理,摆放整齐,有损坏的要及时报告指导教师处理。

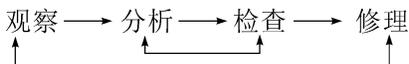
②为了能方便地模拟 X62W 铣床各控制环节的互锁关系,实验前要仔细对照状态表把行程开关的滚轮扳到符合控制要求的位置。

③为了防止设备和人身事故的发生,通电试车必须在指导教师监护下进行。

6. X62W 铣床故障分析

分析、判断和排除故障一般可用外观检查法(看)、逻辑检查法(想)、通电实验法(试)、感官判断法(感觉)、测试法(用仪表测试)等方法进行。

检查故障的程序可为:



下面给出常见的故障:

- ①按停止按钮后主轴不停。
- ②主轴能停,但制动效果不明显或无制动。
- ③主轴停车后产生短时反向旋转。
- ④主轴变速时无瞬时冲动。
- ⑤工作台不能向上进给。
- ⑥工作台向左、向右不能进给。
- ⑦工作台向左、向右进给,但不能上、下、前、后进给。
- ⑧工作台各个方向都不能进给。
- ⑨工作台不能快速移动。

举例说明产生故障的原因。例如,当按下启动按钮 SB1(或 SB2)后主轴电动机 M1 不启动,接触器不吸合。造成这种故障的原因有:

- ①总电源开关 Q 未接通或没有电源电压。
- ②能直接影响 KM1 控制回路的熔断器 FU1, FU2, FU3 中有个熔体已断或与熔断器上下接线板接触不良。
- ③变压器损坏,二次电压不正常。



④KM1 控制回路五个常闭触点 SQ7(3-5), SB4(5-10), SB3(10-11), KM2(12-13), FR1(9-2) 中有个不通。

⑤启动按钮 SB1/SB2 常开触点有端子损坏或接线有脱落现象。

⑥KM1 线圈断线。

7. 思考题

①X62W 铣床电路装置试运行前要做哪些准备工作? 对实验装置的电气设备接线要做哪几项检查? 主回路和控制回路的标注原则是什么?

②可以用几种方法对 X62W 铣床电路板的故障进行检查判断? 排除故障一般应按什么操作程序反复进行?

8. 实验报告要求

①画出 X62W 铣床电路板接线图并标注线号。

②按指导教师要求写出实验报告。

小 结

①介绍了电气系统图及组成电路常用的图形和文字符号, 为了正确绘图和阅读分析这些图纸, 必须掌握各类图纸的画法。

②电气控制线路中常用的基本控制环节如各类电动机全压启动控制电路、各类降压启动控制电路、绕线式异步机启动控制电路、直流电动机的启动和制动控制基本电路。掌握这些基本电路, 对设计电气系统图起着至关重要的作用。

③在基本环节电路中介绍了短路保护、过载保护、过电流保护、欠电流保护、零电流保护、等保护环节。

④在基本环节电路中介绍了自锁和连锁的概念。

⑤常用的制动方式有反接制动和能耗制动, 制动控制电路应考虑限制制动电流和避免反向再启动, 前者是在主电路中串限流电阻实现, 后者是采用速度继电器或时间继电器来实现控制要求。

⑥介绍了使用量最大的普通车床 C650 的结构、运动形式、电力拖动特点及电气控制原理图。

⑦介绍了 X62W 卧式铣床的结构、运动形式、电力拖动特点及电气控制原理图, 并分析了进给变速的过程。

习题与思考题

- 3-1 电路中的文字符号 Q, FU, KM, KA, KT, SQ, SB 分别是什么电器元件?
- 3-2 鼠笼式异步电动机在什么情况下采用降压启动? 每种降压启动方法各有什么优缺点?
- 3-3 鼠笼式异步电动机如何改变转动方向?
- 3-4 试用按钮、开关、中间继电器、接触器绘制出点动和连续运转的控制电路。
- 3-5 什么是连锁? 什么是自锁? 试举例说明各自的作用?
- 3-6 在图 3-2-3 的控制电路中, 如果不采用按钮连锁的接线方式, 对电路的正常操作会受到什么影响?
- 3-7 在电动机单向旋转的启动控制电路中, 从按钮盒中应引出几根导线, 各连向何处?
- 3-8 在星形-三角形启动控制电路中, 时间继电器的延时整定时间由什么因素决定? 延时太长或延时太短对电动机有何影响?
- 3-9 设计一个电路, 要求第一台电动机启动 10s 以后, 第二台电动机自行启动, 运行 5s 以后, 第一台电动机停止转动, 同时第三台电动机启动, 在运转 15s 后, 电动机全部停止。
- 3-10 反接制动的电路中, 采用时间继电器转换电路可以吗? 为什么?
- 3-11 C650 车床的运动形式有哪些?
- 3-12 X62W 万能铣床的进给运动是如何实现的?
- 3-13 在 X62W 万能铣床电气控制电路中, 何为主轴变速冲动? 何为进给变速冲动? 在电路中是如何实现的?

第 4 章 PLC 控制原理及应用

4.1 概 述

可编程序控制器(Programmable Controller)简称 PC。早期的可编程序控制器只能进行记数、定时及开关量的逻辑控制,称其为可编程逻辑控制器(Programmable Logic Controller),简称 PLC,后来由于采用了微处理器技术,其功能远远超过逻辑控制的范畴,于是又称其为 Programmable Controller,简称 PC。但个人计算机(Personal Computer)也简称 PC,为了避免混淆,将可编程序控制器仍称为 PLC。

国际电工委员会(IEC)在 1987 年对可编程序控制器定义如下:可编程序控制器是一种数字运算操作的电子系统,专为工业环境下应用而设计。它采用可编程的存储器,用来在其内部存储执行逻辑运算、顺序控制、定时、记数和算术运算等操作的指令,并通过数字式、模拟式的输入和输出,控制各种机械或生产过程。可编程序控制器及有关外部设备,都按易于与工业控制系统联成一个整体、易于扩充其功能的原则设计。

4.1.1 PLC 的产生和发展

在 20 世纪 60 年代,美国的汽车制造业竞争激烈,产品更新换代的周期越来越短,要求生产线必须随之频繁地变更。而当时传统的继电器控制的生产线很不易变更。此时,美国通用汽车公司(GM)在 1968 年提出用一种新型控制装置替代继电器控制,这种装置能把计算机的通用、灵活及功能齐全等优点与继电器控制的简单、易懂、操作方便及价格便宜等特点结合起来,方便人们使用。根据此设想,1969 年美国数字设备公司(DEC)研制出了世界上第一台可编程序控制器 PDP - 14,并在 GM 公司汽车自动装配生产线上试用成功。

由于 PLC 技术的优越,在工业界产生了巨大的影响,并在世界各地迅速发展起来。1971 年,日本引进该技术研制出第一台 PLC,1973 年,原联邦德国、法国也研制



出自己的 PLC。我国 1974 年开始研制,1977 年研制成功以美国 Motorola 公司的一位微处理器 MC14500 为核心的 PLC。随着微电子技术的迅速发展,20 世纪 80 年代中期 PLC 的处理速度和可靠性大大提高,不仅增加了多种特殊功能,且体积进一步缩小,成本也大幅度下降。到 90 年代中期,PLC 几乎完全计算机化,其速度更快、功能更强,许多厂家开发出各种 PLC 智能化模块以及 PLC 的计算机辅助编程软件。

目前,世界上一些著名电器生产厂家几乎都在生产 PLC,产品功能日趋完善、换代周期越来越短。为了进一步扩大 PLC 在工业自动化领域的应用范围,适应大、中、小型企业的不同需要,PLC 产品大致向两个方面发展:一是小型 PLC 向体积小、功能增强、速度加快、价格低廉的方向发展,更便于实现机电一体化;二是大中型 PLC 向高可靠性、高速度、多功能、网络化的方向发展,实现对大规模、复杂系统进行综合性的自动控制。

PLC 的主要生产厂商集中在欧美和日本。欧美国家的 PLC 以大型 PLC 闻名,日本以高性价比的小型 PLC 著称。

美国是 PLC 生产大国,其中 A-B 公司、通用电气(GE)公司、德州仪器(TI)公司、歌德(Gould)公司、西屋公司等都是著名的大公司。A-B 公司是美国最大的 PLC 制造商,在我国引进的大型 PLC 中,A-B 公司的产品几乎占一半。德国的西门子(SIEMENS)、AEG 及法国的 TI 公司是欧洲著名的 PLC 制造商,其中西门子的电子产品以性能精良而驰名,在大、中型 PLC 产品领域与 A-B 公司齐名。

日本的小型机颇具盛名,在某些欧美的中型机或大型机才能实现的控制,用日本的小型机就可解决。日本主要的 PLC 生产厂商有欧姆龙(OMRON)、三菱、松下、日立、富士、东芝等公司。在世界小型机市场上,日本产品约占 70% 的份额,而在中国,欧姆龙产品销量居首位。本章主要介绍 OMRON 公司的 CPM1A 系列 PLC。

此外,PLC 不仅能进行逻辑控制,在模拟量的闭环控制、数字量的智能控制、数字采集、监控、通信联网等方面都得到广泛的应用。目前 PLC 技术已与机器人技术、CAD/CAM 技术成为工业自动化的三大支柱。

4.1.2 PLC 的特点

1. 可靠性高、抗干扰能力强

由于 PLC 选用了大规模集成电路和微处理器,使系统器件数大大减少,并且在硬件软件设计制造过程中采用了一系列隔离和抗干扰措施,使它能适应恶劣的工作



环境,具有极高的可靠性和抗干扰能力。目前从国内外使用 PLC 的情况看,平均无故障率可以达到几万甚至几十万小时以上。

2. 灵活性和通用性强

由于 PLC 是利用存储在机内的程序实现各种控制功能的,因此在 PLC 控制系统中,当控制功能改变时只需要修改程序即可,PLC 外部线路极少甚至不必改动。一台 PLC 可以通过改变程序满足不同的控制系统。

3. 编程简单易学

虽然 PLC 是以微处理机技术为核心的控制装置,但是不要求使用者精通计算机方面复杂的软硬件知识。PLC 采用类似继电器控制电路的“梯形图”语言编程,清晰、直观、简单易学,了解继电器控制线路的电气技术人员很容易接受。

4. PLC 与外部设备连接简单、使用方便

PLC 的输入/输出接口已经做好,其输入接口可以直接与各种输入设备(如按钮、各种传感器等)连接,输出接口具有较强的驱动能力,可以直接与继电器、接触器、电磁阀等强电电器连接,接线简单,使用非常方便。

5. PLC 的功能强

PLC 除具有定时、计数、顺序等控制,还具有 A/D 和 D/A 转换、数据运算和处理、运动控制及通信联网功能。

6. PLC 控制系统的设计、调试周期短

由于 PLC 是通过程序完成系统控制,所以设计人员可以在实验室设计和修改程序,并且可在实验室进行系统的模拟运行调试,使现场工作量大大减少。

7. PLC 体积小、重量轻、易于实现机电一体化

由于采用大规模集成电路及微型计算机技术,使得 PLC 具有结构紧凑、体积小、重量轻、功耗低的特点。并且 PLC 的抗干扰能力强,适应各种恶劣的环境,它已成为实现机电一体化的理想控制装置。

4.1.3 PLC 的分类

PLC 的种类很多,因此 PLC 的分类标准也不统一,但主要以 I/O 点数、结构形式、实现功能来大致分类。

1. 按 I/O 点数分类

PLC 可分为:小型机(小于 256 点),例如本章将介绍的 OMRON CPM1A 系列



PLC,中型机(257-2048点),大型机(超过2048点)。

2. 按结构形式分类

PLC按硬件结构形式可分为整体式PLC和组合式PLC。整体式的CPU、存储器、I/O接口安装在一个机体内,其结构紧凑、体积小、价格低,但灵活性较差。组合式在硬件上具有较高的灵活性,其模块可以像积木一样进行组合,构成不同控制规模和功能的PLC,也称为模块式PLC。

3. 按功能分类

可将PLC分为低档、中档和高档三类。低档机具有逻辑运算、定时、计数、移位、自诊断、监控等基本功能和一定的算术运算、数据传送、比较、通信和模拟量处理功能。中档机除具有低档机的功能外,还具有较强的算术运算、数据传送、比较、通信、中断处理、子程序和回路控制功能。高档机则在中档机的基础上加强了带符号数的运算、矩阵运算及函数、表格、CRT显示、打印等功能。

一般来说,低档机多为小型机,采用整体结构;中档机可为大、中、小型机,可采用整体结构或组合结构;高档机多为大型机,采用组合结构。目前,广泛应用的多为中、低档机。

4.2 PLC的基本原理

4.2.1 PLC硬件的基本组成

PLC是基于计算机技术和自动控制理论专为工业控制而发展起来的。但它又不同于普通计算机,作为一种特殊形式的计算机装置,它在系统结构、硬件组成、软件结构及用户界面等方面都有其特殊性。

虽然各公司生产的PLC产品的组成形式和功能特点各不相同,但它们在结构和组成上基本相同:即由CPU、存储器、输入输出接口及其他可选件四部分组成。PLC在运行过程中一般由CPU、存储器、输入输出接口三部分完成预定的各种基本控制任务,因此可将这三部分称为PLC的基本组成部分,如图4-2-1所示。其他可选件包括编程器、外存储器、通信接口、人机界面及测试设备等,它们是PLC的辅助组成部分。

1. 中央处理器CPU

CPU是PLC的核心部件,类似人的大脑,主要是处理和运行用户程序、监控系



统状态、作出逻辑判断及必要的处理。不同厂家不同型号的 PLC 所用的 CPU 可能不同。

2. 存储器

存储器用来存放系统程序、用户程序、逻辑变量和一些其他信息。系统程序是厂家根据所选用的 CPU 的指令系统编写的,它决定了 PLC 的功能,厂家将系统程序固化在 ROM(只读存储器)中,用户不能修改;用户程序是根据控制要求而编写的应用程序,用户程序存储器容量的大小决定了用户程序的大小和复杂程度,从而决定了用户程序所能完成的功能和任务大小。因为用户程序经常需要改动,所以用户程序存储在可读写存储器 RAM 中,但为了防止掉电丢失程序,一般采用具有备用电池的 RAM 或 EPROM 存储卡代替 RAM。目前较先进的 PLC(如 CPM1A 等)采用可随时读写的快闪存储器作为用户程序存储器,这样不需后备电池,可防止电池没电时的程序丢失。

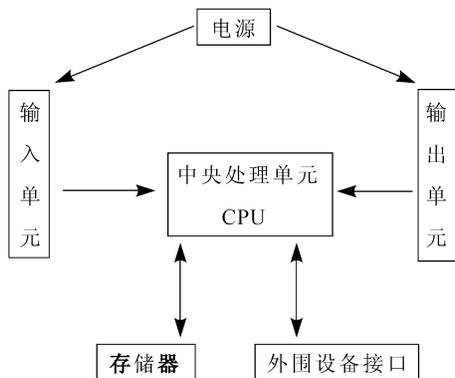


图 4-2-1 PLC 组成示意图

3. 输入输出接口

输入输出接口是 PLC 与被控设备或控制开关相连的接口电路。控制中所用的按钮、开关及一些传感器输出的信号都要通过输入接口读入并转换成 PLC 可接收的信号,而 CPU 处理后的信号需通过输出接口转换成控制现场需要的信号来驱动电磁阀、接触器、电磁离合器、调节阀、调速装置等被控设备的控制和执行元件。

输入接口用光电耦合电路来隔离输入信号,防止现场的强电干扰,有些 PLC 还加有滤波环节来增强抗干扰性能。输入接口按输入端电源类型的不同,分为直流输入单元和交流输入单元。



输出接口也有隔离电路,并且有功率放大电路。输出接口主要分为继电器输出和晶体管输出。

4.2.2 PLC 的编程语言

PLC 是通过程序对系统进行控制的,所以各种机型的 PLC 都有自己的编程语言。PLC 的编程语言有多种,如梯形图、语句表、逻辑功能图、逻辑方程式等。

1. 梯形图编程语言

梯形图编程语言是一种图形语言,是若干图形符号的组成。它是在继电器—接触器控制系统电路图基础上简化了符号而演变来的,也可以说是沿袭了传统的电气控制图。在简化的同时还加进了许多功能强大又使用灵活的指令,熟悉继电器控制技术的人员很容易掌握。图 4-2-2a 是一个梯形图编程语言的例子。梯形图是目前应用最普遍的一种 PLC 编程语言,各厂家的各种机型都把它作为第一编程语言。

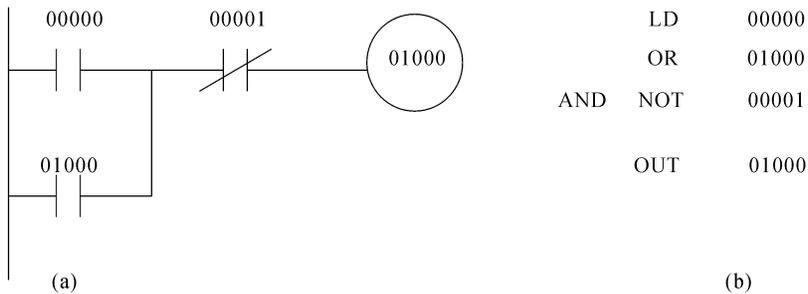


图 4-2-2 PLC 的编程语言

2. 语句表

语句表编程语言类似计算机汇编语言,是用助记符来表示各种指令的功能。但是对同样功能的指令,不同厂家使用的助记符一般不同。图 4-2-2b 为语句表编程(以 CMP1A 为例)。其含义如下:

- LD 00000 (取常开触点 00000)
- OR 01000 (常开触点 01000 与常开触点 00000 相并联)
- AND NOT 00001 (串联一个常闭触点 00001)
- OUT 01000 (输出到继电器 01000)

语句表编程不如梯形图形象、直观,但是在使用简易编程器输入用户程序时,必须把梯形图程序转换成语句表才能输入。

3. 逻辑功能图

逻辑功能图编程语言实际上是以逻辑功能符号组成功能块表达命令的图形语言,与数字电路中的逻辑图一样,表现出条件和结果之间的逻辑功能。

4. 逻辑方程式

这是一种用逻辑表达式来编程的语言,逻辑关系很强。

4.2.3 PLC 的工作方式

PLC 采用循环扫描的工作方式,PLC 在执行用户程序时,CPU 对梯形图自上而下、自左而右地进行扫描。PLC 运行时,用户程序中有许多的操作需要去执行,但一个 CPU 在同一时刻只能执行一个操作而不能同时执行多个操作,因此 CPU 只能按规定顺序依次执行各个操作。这种依次处理多个任务的工作方式称为扫描工作方式。由于扫描是周而复始无限循环的,每扫描一个循环所用的时间称为一个扫描周期。

正常运行时,CPU 的每一个扫描周期主要完成输入采样、程序执行、输出处理三项任务。

1. 输入采样

CPU 将现场输入信号(如按钮、限位开关等的状态)经 PLC 的输入端子读入到输入映像寄存器中,这个过程称为输入采样。注意,在进入下一阶段即程序执行阶段时,输入信号即使发生变化,输入映像寄存器的值也不改变,只有等到下一个扫描周期输入采样阶段才被更新。这种输入工作方式称为集中输入方式。

2. 程序执行

CPU 从程序的第一条指令开始,依次逐条执行各指令,直到执行到最后一条指令。PLC 在执行指令程序时,要读入输入映像寄存器的状态(即 1 或 0)和其他器件的状态,CPU 按要求进行逻辑和算术运算,运算结果存入相应的器件映像寄存器,并将向外输出的信号存入输出映像寄存器中,由输出锁存器保存。

3. 输出处理

CPU 将输出映像寄存器的状态经输出锁存器和 PLC 输出端子,传送到外部负载(如接触器、电磁阀和指示灯等)上。这时输出锁存器的内容要等到下一个扫描周期的输出处理阶段到来时才会被刷新。这种输出工作方式称为集中输出方式。

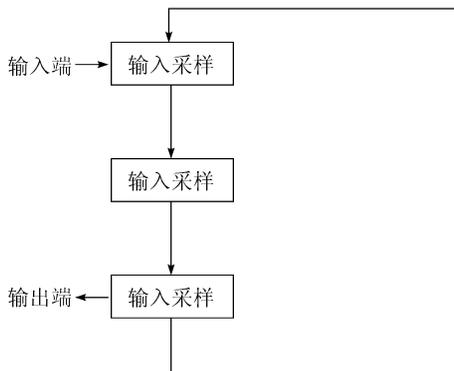


图 4-2-3 PLC 循环扫描示意图

4.3 欧姆龙 CPM1A 系列 PLC 概述

CPM1A 系列 PLC 是欧姆龙公司生产的小型整体式可编程控制器。其结构紧凑、功能强,具有很高的性价比,在小规模控制中已获得广泛应用。本节介绍 CPM1A 系列 PLC 的基本构成、内部继电器和数据区的配置及其主要功能。

4.3.1 欧姆龙 SYSMAC CPM1A 系列 PLC

CPM1A 系列 PLC 主要分为基本单元(即主机)、扩展单元和专用单元三类。其中主机按 I/O 点数分,有 10 点、20 点、30 点和 40 点 4 种;按电源类型分 AC 和 DC 型 2 种;按输出方式分,有继电器输出型和晶体管输出型 2 种。表 4-3-1 为 CPM1A 基本单元规格。表 4-3-2 为 CPM1A I/O 扩展单元规格。

表 4-3-1 CPM1A 系列基本单元

I/O 点数	输入	输出	电源	型号		
				继电器输出	晶体管输出	
					漏型输出	源型输出
10	6 点	4 点	AC	CPM1A-10CDR-A	CPM1A-10CDT-A	CPM1A-10CDT1-A
			DC	CPM1A-10CDR-D	CPM1A-10CDT-D	CPM1A-10CDT1-D
20	12 点	8 点	AC	CPM1A-20CDR-A	CPM1A-20CDT-A	CPM1A-20CDT1-A
			DC	CPM1A-20CDR-D	CPM1A-20CDT-D	CPM1A-20CDT1-D
30	18 点	12 点	AC	CPM1A-30CDR-A	CPM1A-30CDT-A	CPM1A-30CDT1-A
			DC	CPM1A-30CDR-D	CPM1A-30CDT-D	CPM1A-30CDT1-D
40	24 点	16 点	AC	CPM1A-40CDR-A	CPM1A-40CDT-A	CPM1A-40CDT1-A
			DC	CPM1A-40CDR-D	CPM1A-40CDT-D	CPM1A-40CDT1-D

表 4-3-2 为 CPM1A 扩展单元

类 型	型 号	输出形式
8 点型 输入:8 点	CPM1A-8ED	——
8 点型 输出:8 点	CPM1A-8ER	继电器
	CPM1A-8ET	漏型晶体管
	CPM1A-8ET1	源型晶体管
20 点型 输入:12 点 输出:8 点	CPM1A-20EDR	继电器
	CPM1A-20EDT	漏型晶体管
	CPM1A-20EDT1	源型晶体管

当使用的基本单元输入输出点数不够用时,可以通过增加 I/O 扩展单元来实现。但是 CPM1A 系列中 10 点、20 点的主机没有扩展连接器,所以不能连接 I/O 扩展单元。30 点、40 点的主机有扩展连接器,但最多能连接 3 台 I/O 扩展单元。40 点的主机连接 3 台 20 点的 I/O 扩展单元时最多能组成 100 个 I/O 点,因此 CPM1A 系列 PLC 的 I/O 点可在 10~100 之间进行配置。

此外,CPM1A 系列还有特殊功能的单元,如有模拟量 I/O 单元、温度传感器和模拟量输出单元以及温度传感器单元。用户根据需要,可以选择一种或几种特殊单元。但是与主机连接的特殊功能单元总数不能超过 3 台。在使用温度传感器 TS002 和 TS102 时,只能连接其中的一个,且同时使用的扩展单元总数不能超过 2 台。

4.3.2 CPM1A 系列继电器区及数据区

CPM1A 系列继电器区及数据区分为内部继电器(IR)、特殊辅助继电器(SR)、暂存继电器(TR)、保持继电器(HR)、辅助记忆继电器(AR)、链接继电器区(LR)、定时器/计数器区(TC)和数据存储区(DM)。

CPM1A 系列 PLC 的内部器件以通道形式进行编号,通道号用二位、三位或四位数表示。一个通道内有 16 个继电器,一个继电器对应通道中的一位,16 个位的序号为 00~15。所以一个继电器的编号由两部分组成,一部分是通道号,另一部分是通道内的序号。

1. 内部继电器(IR)

内部继电器 IR 区分为两部分,输入输出继电器区和内部辅助继电器区。输入输出继电器区的通道号为 000~019,内部辅助继电器区是供用户编写程序使用的,



该区的通道号为 200 ~ 231 共 32 个通道,每个通道有 16 位(点),所以一共有 512 个内部辅助继电器,但它不能直接对外输出。在编写用户程序时,内部继电器区使用频率很高,要记住其编号范围。

在 IR 区,继电器的编号要用 5 位数表示。前 3 位是通道号,后 2 位是通道内的序号。例如某继电器的编号是 00015,其中 000 是通道号,15 是该继电器在通道内的序号。

输入继电器区有编号为 000 ~ 009 的 10 个通道,其中 000,001 用来对主机的输入通道编号,002 ~ 009 用于对主机连接的 I/O 扩展单元的输入通道号。

输出继电器区有编号为 010 ~ 019 的 10 个通道,其中 010,011 用来对主机的输出通道编号,012 ~ 019 用于对主机连接的 I/O 扩展单元的输出通道号。

另外,输入输出继电器区中未被使用的通道也可作为内部辅助继电器使用。

2. 特殊辅助继电器区(SR)

SR 有 24 个通道,通道号为 232 ~ 255,主要供系统使用。常用的 SR 的功能如下:

25309 当扫描周期超过 100ms 时为 ON。

25315 PLC 上电后的第一个扫描周期内为 ON,常作为初始化脉冲。

25500 输出 0.1 秒时钟脉冲(占空比为 1:1),当扫描周期 >0.05s 时不能正常使用。

25501 输出 0.2 秒时钟脉冲(占空比为 1:1),当扫描周期 >0.1s 时不能正常使用。

25502 输出 1 秒时钟脉冲(占空比为 1:1)。

25504 CY 标志(执行指令时结果有进位或错位发生时为 ON)。

25505 > 标志(执行比较指令,第一个比较数大于第二个比较数时,该位为 ON)。

25506 = 标志(执行比较指令,第一个比较数等于第二个比较数时,该位为 ON)。

25507 < 标志(执行比较指令,第一个比较数小于第二个比较数时,该位为 ON)。

3. 暂存继电器区(TR)

CPM1A 有编号为 TR0 ~ TR7 共 8 个暂存继电器,在编写用户程序时,暂存继电器用于暂存复杂梯形图中分支点之前的 ON / OFF 状态。同一编号的暂存继电器在同一程序段内不能重复使用,但在不同的程序段可重复使用。

4. 保持继电器区(HR)

该区有编号为 HR00 ~ HR19 的 20 个通道,每个通道有 16 位,共有 320 个继电器。HR 的使用方法同内部辅助继电器一样,但保持继电器的通道号必须用 HR。

保持继电器具有断电保持功能,其断电保持功能通常有两种用法:一是当以通



道为单位用作数据通道时,断电后再恢复供电时数据不会丢失;二是以位为单位与 KEEP 指令配合使用时、或作成自保持电路时,断电后再恢复供电时,该位能保持掉电前的状态。

5. 辅助记忆继电器区(AR)

辅助记忆继电器区共有 AR00 ~ AR15 的 16 个通道,该继电器区具有断电保持功能。该区用来存储 PLC 的工作状态信息,如扩展单元连接的台数、扫描周期最大值及当前值等,用户可根据其状态了解系统运行状况。

6. 定时器 / 计数器区(TC)

该区总共有 128 个定时器 / 计数器,编号范围为 000 ~ 127。定时器、计数器各分为 2 种,即普通定时器 TIM 和高速定时器 TIMH,普通计数器 CNT 和可逆计数器 CNTR。

定时器 / 计数器统一编号(称为 TC 号),一个 TC 号既可分配给定时器,又可分配给计数器,但所有定时器或计数器的 TC 号不能重复。如 000 已分配给普通定时器,则其他普通定时器、高速定时器、普通计数器、可逆计数器就不能再使用 TC 号 000。例如设定 TIM000,在程序中就不能用 CNT000。

定时器无断电保持功能,电源断电时定时器复位,计数器有断电保持功能。

7. 数据存储区(DM)

数据存储区用来存储数据。该区共有 1536 个通道,每个通道 16 个位。通道编号用 DM 加 4 位数表示,其编号为 DM0000 ~ DM1023,DM6144 ~ DM6655。对数据存储区的说明:

- ① 数据存储区只能以通道为单位使用,不能以位为单位使用。
- ② DM0000 ~ DM0999、DM1022 ~ DM1023 为程序可读写区,用户程序可自由读写其内容。在编写用户程序时,这个区域经常使用,要记住这些编号范围。
- ③ DM6144 ~ DM6599 为只读存储区,用户程序可以读出但不能用程序改写其内容,利用编程器可预先写入数据内容。
- ④ DM6600 ~ DM6655 称为系统设定区,用来设定各种系统参数。
- ⑤ 数据存储区 DM 有掉电保持功能。

4.4 欧姆龙 CPM1A 系列 PLC 的编程指令介绍

PLC 是通过用户所编程序对系统进行控制的,欧姆龙 CPM1A 系列 PLC 属于小



型机,但它的指令系统却很丰富。而指令系统又反映出控制功能的强弱。

欧姆龙 CPM1A 系列 PLC 的编程指令共有 153 条,按功能的不同,可分为基本指令和应用指令。基本指令是直接对输入输出点进行操作的指令,如“与”、“或”、“非”等指令。应用指令是进行数据传送、数据处理、数据运算等操作的指令。指令的表示方式为梯形图和语句表。指令的格式表示为:

助记符(指令码) 操作数 1
操作数 2
操作数 3

4.4.1 基本指令

CPM1A 系列 PLC 有 17 条基本指令,在实际编程时,基本指令使用频率最高。以下一一介绍。

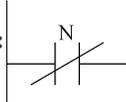
1. 取指令

指令符:LD N 梯形图符: 

数据:N 可以是 IR,SR,HR,AR,LR,TC,TR。

功能:读入逻辑行的第一个常开接点。以位为单位进行操作。

2. LD NOT 指令

指令符:LD NOT N 梯形图符: 

数据:同取指令。

功能:读入逻辑行的第一个常闭接点。以位为单位进行操作。

3. AND 指令

指令符:AND N 梯形图符: 

数据:N 可以是 IR,SR,HR,AR,LR,TC。

功能:逻辑与操作,即串联一个常开接点。以位为单位进行操作。

4. AND NOT 指令

指令符:AND NOT N 梯形图符: 

数据:同 AND 指令。

功能:逻辑与非操作,即串联一个常闭接点。以位为单位进行操作。



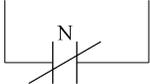
5. OR 指令

指令符:OR N 梯形图符:

数据:同 AND 指令。

功能:逻辑或操作,即并联一个常开接点。以位为单位进行操作。

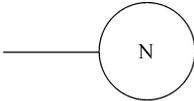
6. OR NOT 指令

指令符:OR NOT N 梯形图符:

数据:同 AND 指令。

功能:逻辑或非操作,即并联一个常闭接点。以位为单位进行操作。

7. OUT 指令

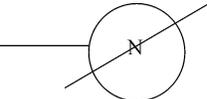
指令符:OUT N 梯形图符:

指令符:OUT N 梯形图符:

数据:N 可以是 IR,SR,HR,AR,LR,TC,TR。

功能:将逻辑行的运算结果输出。以位为单位进行操作。(除了 IR 中已作为输入通道的位)

8. OUT NOT 指令

指令符:OUT NOT N 梯形图符:

数据:同 OUT 指令。

功能:将逻辑行的运算结果取反后输出。以位为单位进行操作。(除了 IR 中已作为输入通道的位)

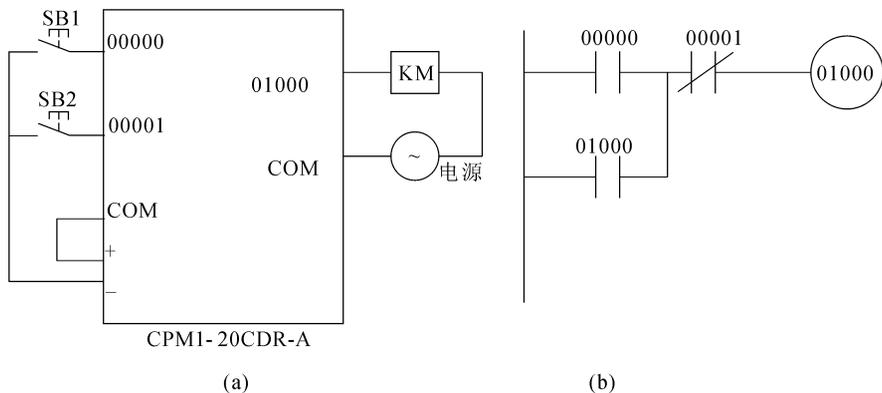


图 4-4-1 PLC 控制接线图及其控制程序梯形图



例1 电动机启动 / 停止电路的编程。

图3-2-2是继电器控制原理图,图4-4-1a,b是PLC控制接线图及PLC控制程序梯形图,其中启动按钮为SB1,停止按钮是SB2。

9. END 指令

指令符:END 梯形图符: 

数据:无。

功能:是程序最后一条指令,表示程序的结束。PLC执行到END指令就停止执行程序阶段,转入输出处理阶段。如果程序中遗漏END指令,在程序运行和查错时将显示:“NO END INSET”。插入END指令后,PLC才能正常运行。END指令还可用来分段调试程序,可以将END指令插在各段程序之后,调试结束时再删除插在中间各段程序后的END指令。

10. NOP 指令

指令符:NOP 梯形图符:无

数据:无。

功能:CPU执行这条指令不作任何逻辑操作,该指令只占一序号和一定的执行时间。它常用来修改程序。在输入程序时加入该指令可留出地址,以便调试程序时加入指令,还可用于扫描时间的微调。

11. AND LD 指令

指令符:AND LD 梯形图符:无

数据:无。

功能:将两个电路块串联起来。

图4-4-2给出了两个电路块串联的例子。

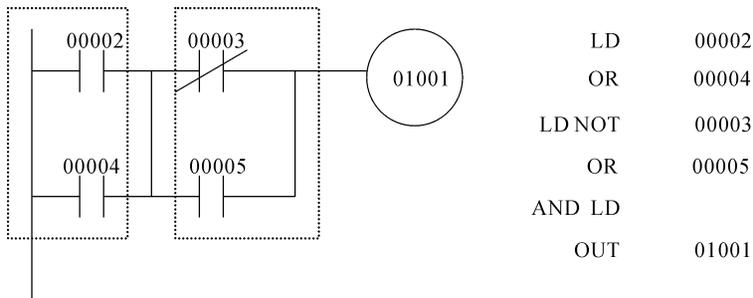


图4-4-2 AND LD 指令的应用

12. OR LD 指令

指令符:OR LD 梯形图符:无

数据:无。

功能:将两个电路块并联起来。

图 4-4-3 给出了两个电路块并联的例子。

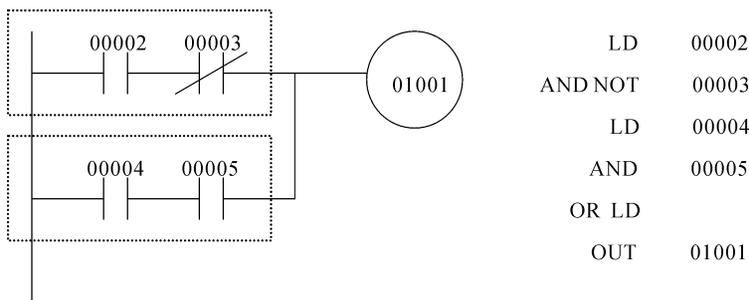


图 4-4-3 OR LD 指令的应用

13. SET 指令

指令符:SET N 梯形图符:

数据:N 可以是 IR,SR,HR,AR,LR。

功能:当执行条件为 ON 时,将指定的继电器 N 置为 ON 且保持。以位为单位进行操作。

14. RESET 指令

指令符:RESET N 梯形图符:

数据:同 SET 指令。

功能:当执行条件为 ON 时,将指定的继电器置为 OFF 且保持。以位为单位进行操作。

SET 和 RESET 指令常成对使用,一般用 SET 指令将某继电器置为 ON,再用 RESET 指令将其置为 OFF。也可以单独使用 RESET 指令将为 ON 的继电器置为 OFF。

15. KEEP 指令

指令符:KEEP N 梯形图符:

数据:N 可以是 IR,SR,HR,AR,LR(除了 IR 中已作为输入通道的位)。

功能:锁存继电器指令。当 S 端输入为 ON 时,继电器 N 被置为 ON 且保持;当



R 端输入为 ON 时,N 被置为 OFF。N 为 HR 区继电器时有掉电保持功能。

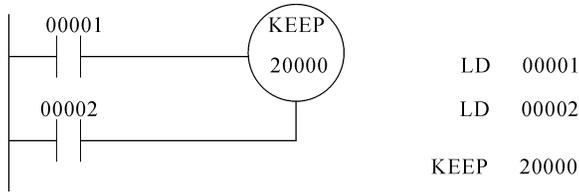


图 4-4-4 使用 KEEP 指令的例子

如图 4-4-4 所示,当输入触点 00001 由 OFF 变为 ON 时,20000 被置为 ON 并保持,即使 00001 又变为 OFF,20000 也保持为 ON,只有当 00002 由 OFF 变为 ON 时,20000 被复位为 OFF 并保持,即使 00002 再变为 OFF,20000 也为 OFF。

16. 上升沿微分 DIFU 指令

指令符: DIFU N 梯形图符: 

数据: N 可以是 IR, SR, HR, AR, LR (除了 IR 中已作为输入通道的位)。

功能: 当执行条件由 OFF 变为 ON 时,使指定的继电器接通一个扫描周期。以位为单位进行操作。

17. 下降沿微分 DIFD 指令

指令符: DIFD N 梯形图符: 

数据: 同 DIFU。

功能: 当执行条件由 ON 变为 OFF 时,使指定的继电器接通一个扫描周期。以位为单位进行操作。

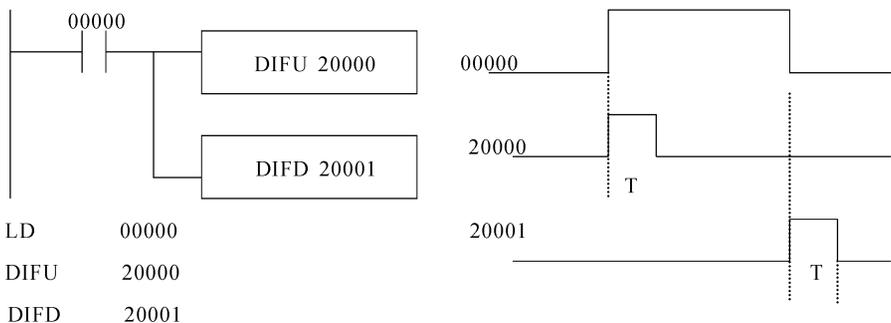


图 4-4-5 使用 DIFU 和 DIFD 指令的例子

图 4-4-5 使用了 DIFU 和 DIFD 指令, T 为扫描周期。当 00000 由 OFF 变为

ON 开始,20000 只接通一个扫描周期。当 00000 由 ON 变为 OFF 开始,20001 只接通一个扫描周期。

DIFU 和 DIFD 指令常用在下面几种场合:一是利用 DIFU 和 DIFD 指令的操作位作为某指令的执行条件,使某指令只在一个扫描周期中执行一次。另外利用 DIFU 和 DIFD 指令产生脉冲信号。

4.4.2 常用的应用指令

CPM1A 系列 PLC 有 136 条应用指令,其中有些应用指令经常使用,下面介绍这些常用应用指令的功能和使用方法。

1. 分支 IL 指令

指令符:IL 梯形图符:

数据:无。

功能:程序分支开始指令。当 IL 的输入条件为 ON 时,IL 和 ILC 之间的程序正常执行;当 IL 的输入条件为 OFF 时,IL 和 ILC 之间的程序不执行。

2. 分支结束 ILC 指令

指令符:ILC 梯形图符:

数据:无。

功能:程序分支结束指令。常用于控制程序的流向。

使用 IL/ILC 指令时应注意:

①不论 IL 的输入条件是 ON 还是 OFF,CPU 都要对 IL/ILC 之间的程序进行扫描。

②如果 IL 的执行条件为 OFF,则位于 IL 和 ILC 之间的程序不执行,此时 IL 和 ILC 之间各内部器件的状态为:所有 OUT 和 OUT NOT 指令的输出位为 OFF;所有定时器都复位;KEEP 指令的操作位、计数器、移位寄存器及 SET 和 RESET 指令的操作位都保持 IL 为 OFF 以前的状态。

③IL 和 ILC 可以成对使用,也可以多个 IL 指令配一个 ILC 指令,但不能嵌套使用,如 IL—IL—ILC—ILC。

3. 暂存继电器(TR)

暂存继电器可用来暂时存储当前指令执行的结果,所以处理梯形图的分支还有



另外一种方法,即使用暂存继电器。

CPM1A 系列 PLC 有编号为 TR0 - TR7 的 8 个暂存继电器。如果某个 TR 位被设置在一个分支点处,则分支前面的执行结果就会存储在这个 TR 位中。但要注意,在同一分支程序段中,同一 TR 号不能重复使用。并且 TR 不是编程指令,只能配合 LD 或 OUT 等基本指令一起使用。

4. 跳转 JMP 指令

指令符:JMP N 梯形图符: 

数据:N 为 00 ~ 49。

功能:是跳转开始指令,当 JMP 的执行条件为 OFF 时,跳过 JMP 和 JME 之间的程序转去执行 JME 之后的程序;当 JMP 的执行条件为 ON 时,JMP 和 JME 之间的程序被执行。

5. 跳转结束 JME 指令

指令符:JME N 梯形图符: 

数据:N 为 00 ~ 49。

功能:是跳转结束指令。

JMP/JME 指令常用于控制程序的流向。在使用时应注意:

- ①发生跳转时,JMP N 和 JME N 之间的程序不执行,不占用扫描时间。
- ②发生跳转时,JMP N 和 JME N 之间的所有器件保持跳转前的状态不变。
- ③对同一跳转号 N,程序只能使用一次。但当 N 取 00 时,可以多次使用。
- ④以 00 为跳转号时,指令的执行时间比其他跳转号的执行时间长,因为 CPU 要花时间寻找下一个 JME 00。
- ⑤跳转指令可以嵌套使用,但必须是不同跳转号的嵌套,如 JMP00 ~ JMP01 ~ JME01 ~ JME00 等。

图 4-4-6 是使用跳转指令的例子。00000 是 JMP00 的执行条件。当 00000 为 OFF 时,JMP00 到 JME00 之间的程序不执行,这时 01000 和 01100 保持跳转前的状态;当 00000 为 ON 时,它们之间的程序才被执行。



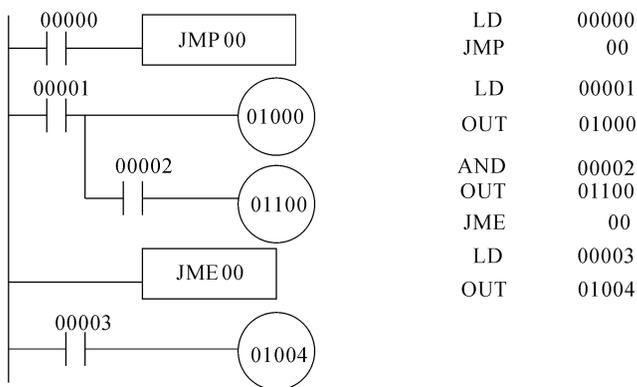


图 4-4-6 使用跳转指令的例子

与 IL/ILC 指令一样,多个 JMP 可以共用一个 JME,如图 4-4-7 所示。如在两段程序间切换时,常采用跳转指令,如图 4-4-8,当输入 00001 为 ON 时,执行手动程序而不执行自动程序;当 00001 为 OFF 时,跳过手动程序转去执行自动程序。

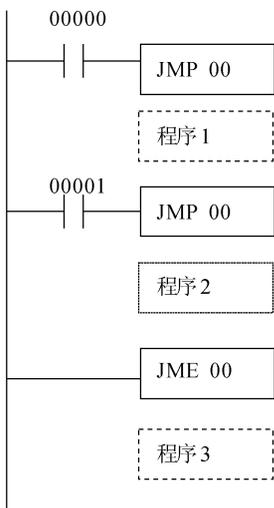


图 4-4-7 多个 JMP 共用一个 JME 指令

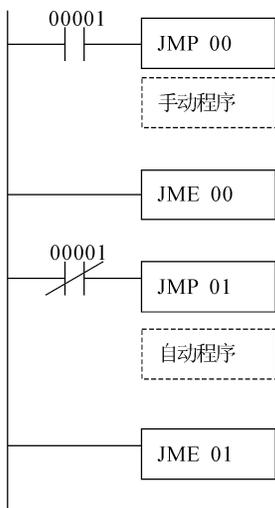


图 4-4-8 跳转指令的应用

6. 定时器 TIM 指令

指令符:TIM N 梯形图符: 数据:占两行,N 是定时器 TC 号,范围 000 ~ 127;SV 是定时器的设定值(BCD

SV 是定时器的设定值(BCD



0000 ~ 9999), 其范围为 IR, SR, HR, AR, LR, DM。

功能: 定时时间到接通定时器接点。从输入条件为 ON 开始定时(定时时间为 $SV \times 0.1$ 秒), 定时时间到, 定时器的输出为 ON 且保持; 当输入条件为 OFF 时, 不管定时器当前处于什么状态都复位, 输出变为 OFF, 对应的常开触点断开。并停止定时, 其当前值恢复为 SV。定时器无掉电保持功能。

例如图 4-4-9 所示, 当 00000 为 ON 时 TIM000 开始定时, 其值从 0050 开始每隔 0.1 秒减去 1, 减 50 次(5 秒)后, 当前值为 0000, 此时 TIM000 输出为 ON, 其常开触点闭合, 使 01000 为 ON。若 00000 一直为 ON, 则 TIM000 的状态也一直保持 ON, 输出 01000 也为 ON。若 00000 变为 OFF, 则 TIM000 复位, 当前值恢复为设定值 0050, 01000 变为 OFF。

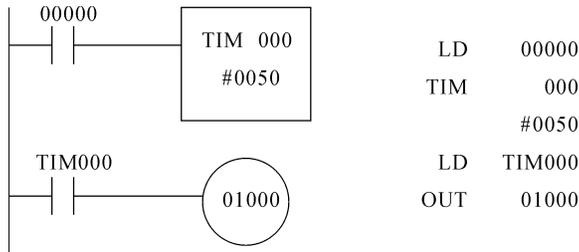


图 4-4-9 使用 TIM 指令的例子

一个定时器的最大定时时间是 999.9s, 但如果几个定时器连用, 则可获得更长的定时时间。如图 4-4-10 所示, 将两个定时器连用, 每一个定时器定时时间设为 900 秒, 则定时总时间为 $900 + 900 = 1800$ 秒。或者利用定时器和计数器以及特殊辅助继电器也可以实现定时器的扩展。请同学们自己做做试试。

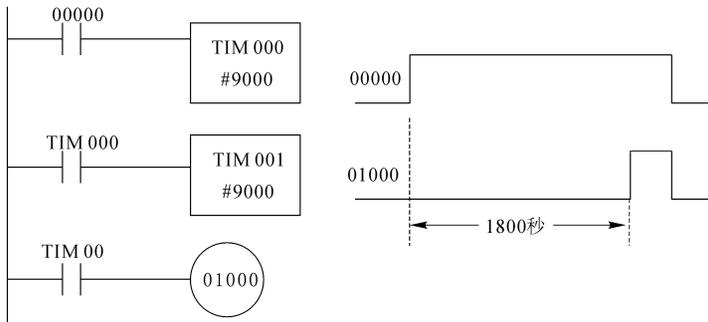


图 4-4-10 定时器容量的扩展



7. 计数器 CNT 指令



SV

数据:占两行,N 是计数器 TC 号,范围 000 ~ 127;SV 是计数器的设定值(BCD 0000 ~ 9999),其范围为 IR,SR,HR,AR,LR,DM。

功能:计数到时,接通计数器常开触点。从 CP 端输入计数脉冲,当计数到设定值时,其输出为 ON 且保持,并停止计数。当复位端 R 输入为 ON 时,计数器复位即 OFF,当前值恢复到设定值 SV。计数器有掉电保持功能。

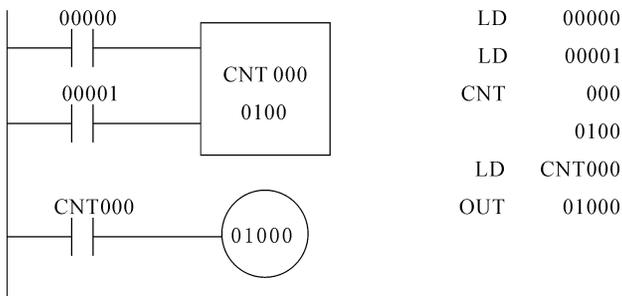


图 4-4-11 使用计数器的例子

图 4-4-11 为使用计数器的例子。当 00001 为 OFF,每当 00000 由 OFF - ON - OFF 一次(即一个脉冲),CNT000 的当前值就减 1,当减到 0000 时,即 00000 发来 100 个脉冲时就停止计数,此时 CNT000 输出为 ON 且保持,其常开触点闭合,使 01000 为 ON 且保持。若在计数过程中或计数满以后,00001 由 OFF 变为 ON,则计数器立即复位并停止计数,01000 也变为 OFF。

一个计数器的计数最大值为 9999,与定时器的扩展方法相似,将计数器串联组合,也可以完成计数器的扩展,如图 4-4-12 所示。图中 CNT000 对 00002 的通断次数计数,当计到 1000 次时 CNT000 的常开接点接通一个扫描周期,使 CNT001 计一次,下一个扫描又使 CNT000 复位,又开始新的计数过程。当 CNT001 计数 2000 次时,它的常开接点闭合,01000 接通。此时 00002 共闭合 $1000 \times 2000 = 2000000$ 次。该电路的计数值为两个计数器计数值的乘积。

8. 高速定时器 TIMH 指令

高速定时器 TIMH 指令定时时间为 $SV \times 0.01s$,其余同 TIM 指令。

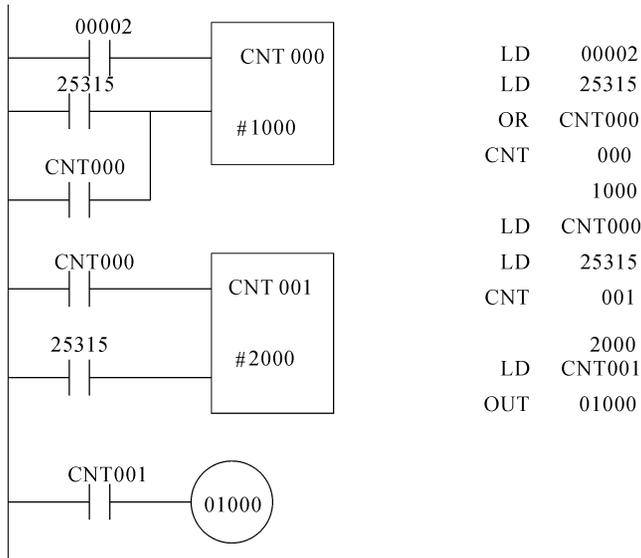
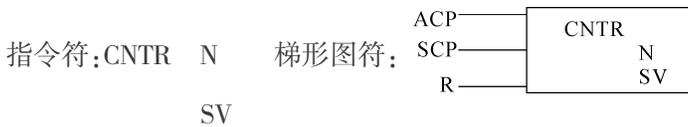


图 4-4-12 计数器扩展

9. 可逆计数器 CNTR 指令



数据: 同计数器 CNT 指令。

功能: 可逆循环计数器指令。只要复位 R 端为 ON, 计数器即复位为 OFF 并停止计数, 且不论加计数还是减计数, 其当前值均为 0。从 ACP 端输入计数脉冲为加计数; 从 SCP 端输入计数脉冲为减计数; 加/减计数有进位/借位时, 输出 ON 一个计数脉冲周期。当 ACP 端和 SCP 端同时输入计数则不计数。该指令也有掉电保持功能。

如图 4-4-13 所示, 当复位端 00002 为 ON 时, CNTR 045 复位, 当前值变为 0000, 此时既不作加法计数, 也不作减法计数。当 00002 变为 OFF 时计数器开始计数。

若 00001 为 OFF、由 00000 输入计数脉冲时为加计数器。00000 每输入一个计数脉冲, CNTR 045 的当前值加 1。当加到 0100 时, 再输入一个计数脉冲, 当前值变为 0000 (有进位), 同时 CNTR 045 的输出变为 ON。若再来一个计数脉冲, 当前值为

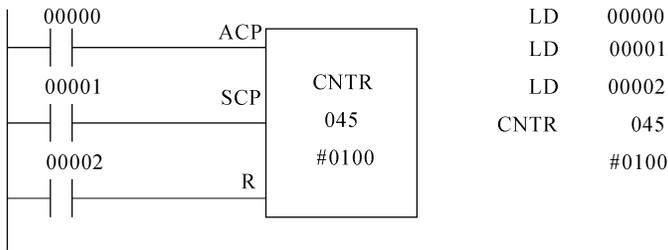


图 4-4-13 可逆循环计数器指令的例子

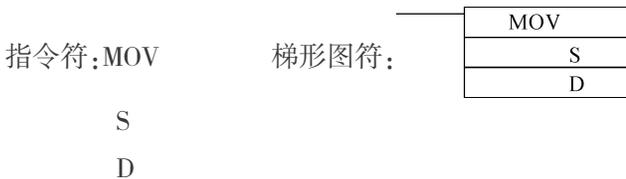
1, CNTR 045 的输出变为 OFF, 且开始下一个循环的计数。

若 00000 为 OFF, 由 00001 输入计数脉冲时为减计数器。00001 每输入一个计数脉冲, CNTR 045 的当前值减 1。当减到 0000 时, 再输入一个计数脉冲, 当前值变为 0100(有错位), 同时 CNTR 045 的输出变为 ON。若再来一个计数脉冲, 当前值为 0099, CNTR 045 的输出变为 OFF, 且开始下一个循环的计数。

当 00000 和 00001 同时输入计数脉冲时, 计数器不计数。

CNT 和 CNTR 指令的区别是: 当计数器 CNT 达到设定值后, 只要不复位, 其输出就一直为 ON, 即使计数脉冲仍在输入; 高速计数器 CNTR 达到设定值后, 其输出为 ON, 只要不复位, 在下一个计数脉冲到来时, 计数器 CNTR 立即变为 OFF, 且开始新一轮计数, 即 CNTR 是个循环计数器。

10. 数据传送 MOV / @MOV 指令



数据: S 是源数据, 其范围: IR, SR, HR, AR, LR, TC, DM, #。

D 是目的通道, 其范围: IR, SR, HR, AR, LR, DM。

功能: 当执行条件为 ON 时, 将源数据 S 传送到通道 D 中。只要条件一直 ON, 每个扫描周期 MOV 指令都执行。

@MOV 传送指令是微分型指令, 只有在执行条件由 OFF 变为 ON 时才执行将源数据 S 传送到通道 D 中。

如图 4-4-14 所示, 当 00000 为 ON, 执行 MOV 指令, 将常数 2000 传送到通道

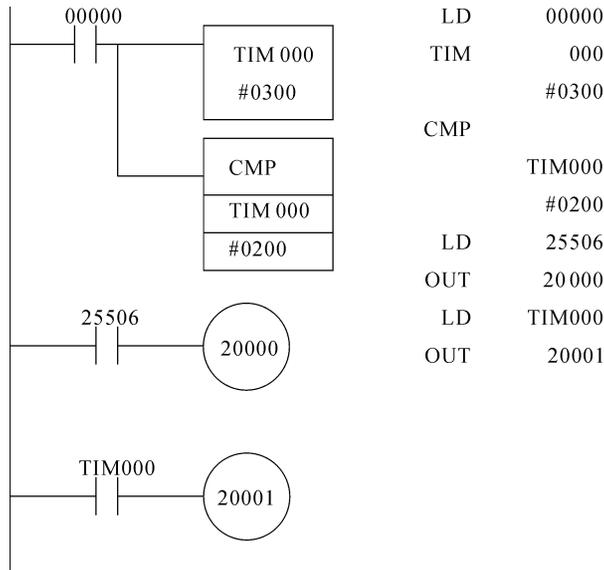


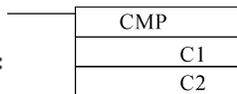
图 4-4-14 MOV 和@ 指令的例子

HR00 中去,如果 00000 一直为 ON,每个扫描周期都执行 MOV 指令。当 00001 由 OFF 变为 ON 时,微分型指令@ MOV 执行一次,将常数 2001 传送到通道 HR01 中,此后 00001 即使一直为 ON,@ MOV 指令也不再执行。

11. 数据比较 CMP 指令

指令符: CMP

梯形图符:



C1

C2

数据: C1 是比较数 1, C2 是比较数 2。范围: IR, SR, HR, AR, LR, TC, DM, #。

功能: 单字比较指令。在执行条件为 ON 时,将 C1 和 C2 进行比较,并将比较结果送到各标志位;当 $C1 > C2$, 大于标志位 25505 为 ON。

当 $C1 = C2$, 等于标志位 25506 为 ON。

当 $C1 < C2$, 小于标志位 25507 为 ON。

如图 4-4-15 所示,当 00000 为 ON 时, TIM000 开始定时、CMP 指令开始执行,由于每隔 0.1s TIM000 当前值减 1,经过 10 秒当前值减为 0200 时, 25506、20000 为 ON,当 TIM000 的当前值等于 0000 时, TIM000 常开触点闭合, 20001 为 ON。

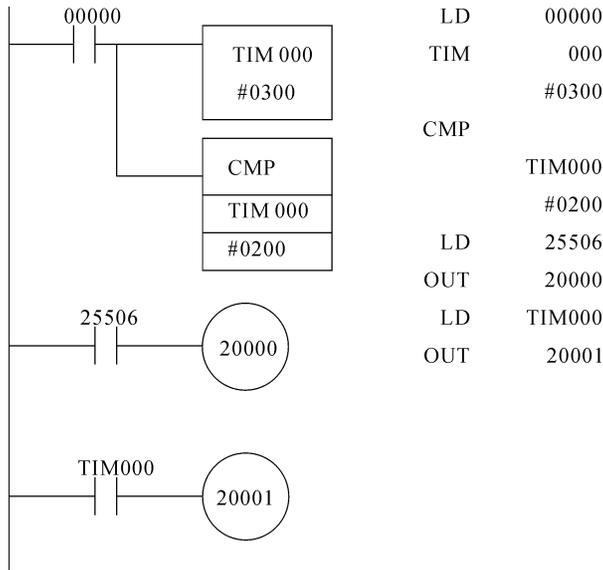
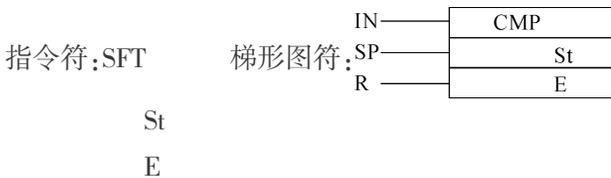


图 4 - 4 - 15 CMP 指令的例子

12. 数据移位 SFT 指令



数据: St 是移位的开始通道号, E 是移位的结束通道号。范围是: IR, SR, HR, AR, LR。St 和 E 必须在同一区域, 且 $St \leq E$ 。

功能: 移位寄存器指令。当复位端 R 为 OFF 时, 在 SP 端的每个移位脉冲的上升沿时刻, St 到 E 通道中的所有数据按位依次左移一位。E 通道中数据的最高位溢出丢失, St 通道中的最低位则移进 IN 端的数据; SP 端没有移位脉冲则不移位; 当复位端 R 为 ON 时, St 到 E 所有通道均复位为零, 且移位指令不执行。

如图 4 - 4 - 16 中, SFT 指令的首通道和末通道都是 300, 说明移位是在 300 通道内进行。特殊辅助继电器 25502 产生的秒脉冲 (每秒产生一个脉冲) 作为移位脉冲, 00000 的 ON 和 OFF 状态作为输入数据。当 00001 为 ON, 移位寄存器即复位, 300 通道内的 16 个位均为 0, 当 00001 为 OFF 后, 00000 输入 ON 状态马上在变 OFF 状态。在 SP 端输入的每一个移位脉冲前沿时刻, 00000 的 ON 状态移入 30000, 使

30000 原来的 OFF 状态移入 30001,以下类推。在第四个移位脉冲前沿时刻 30003 变为 ON,使 01000 变为 ON。在第五个移位脉冲时 30003 为 OFF,01000 也变为 OFF。

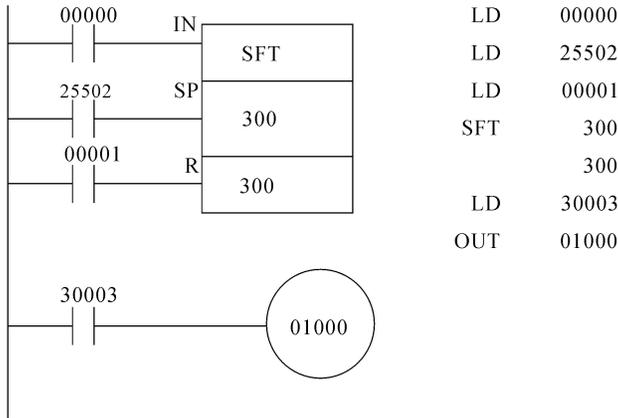


图 4-4-16 SFT 指令的例子

此外,CPM1A 系列 PLC 还有很多其他功能的指令,在此就不一一叙述。

4.5 PLC 编程规则及编程举例

4.5.1 基本编程规则

① 梯形图的每一行必须从左边母线以接点输入画起,以线圈或指令结束,右边的母线可以不画(OMRON PLC 梯形图的右母线省略)。

② 接点的使用次数不受限制。

③ 在一个程序中,一个线圈只能使用一次,不得重复使用。

④ 一个完整的梯形图程序必须用 END 指令结束,END 是 PLC 执行程序阶段的结束标志。

⑤ 梯形图必须遵循从左到右、从上到下的顺序编写,不允许在两行之间垂直连接触点。

4.5.2 基本编程方法

①触点组与单个触点相并联时,应将单个触点放在下面。例如图 4-5-1(a)变成图(b)后,从语句表看节省了一个 OR LD 语句。

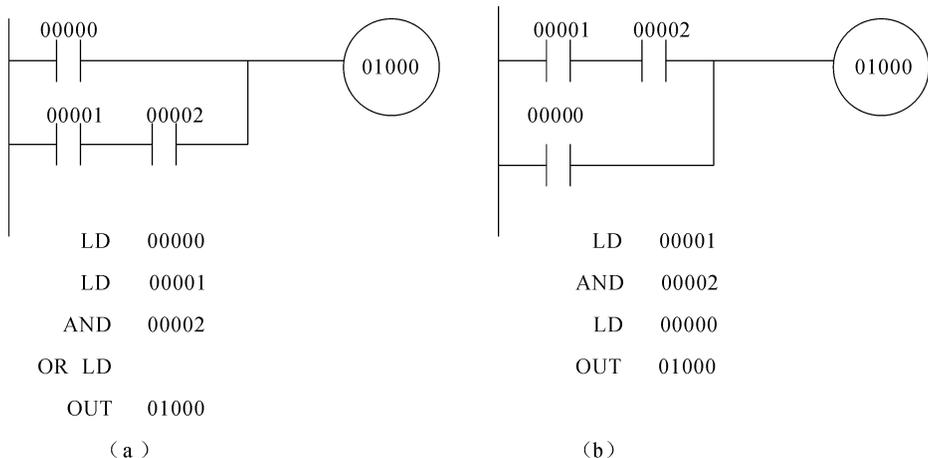


图 4-5-1 基本编程方法一

②并联触点组与几个触点相串联时,应将并联触点组放在左边。

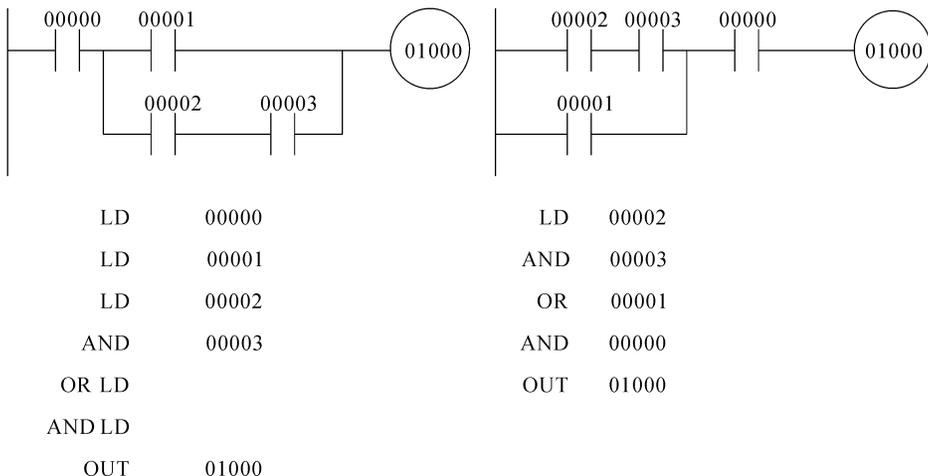


图 4-5-2 简单串-并电路的简化

③对于较复杂的串并电路,将串联触点分到各并联支路,可以使电路结构清晰,

编程容易。如图 4-5-3 所示。

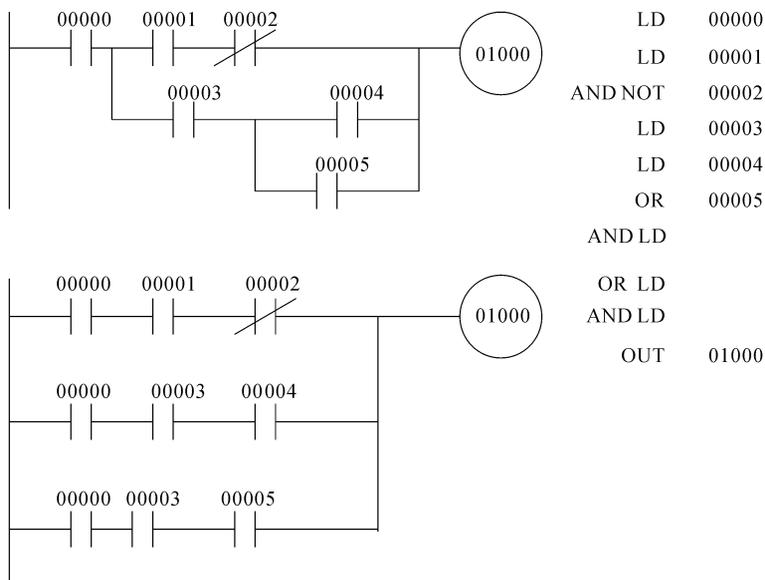


图 4-5-3 较复杂的串并电路的重排

这样重排后,电路结构清晰了,同学们可自己写出编码表。需要指出的是重排后的电路,不得改变原电路的功能。

④对于多分支输出电路,把分支后直接输出支路放在上面可节省 TR 指令。如图 4-5-4 所示。

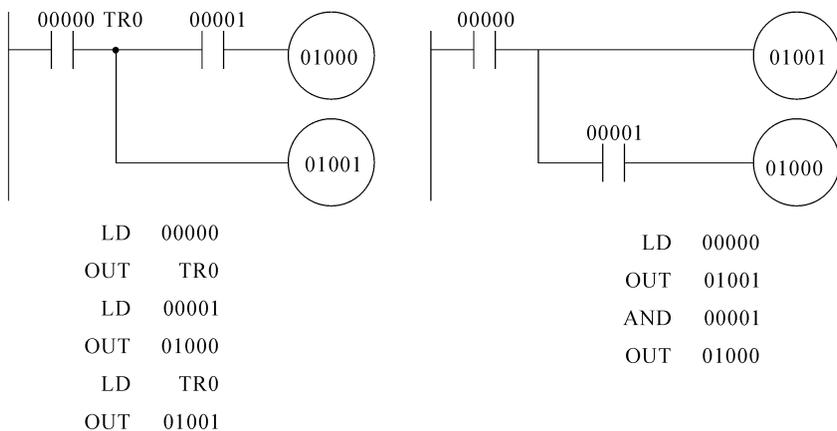


图 4-5-4 多分支输出电路

(5) 尽量使用那些操作数少、执行时间短的指令编/程,以缩短扫描周期,从而提高 I/O 的响应速度。

4.5.3 编程举例

1. 上升沿触发单脉冲电路

例 2 用单脉冲实现的单按钮启停电路。

如图 4-5-5 所示,操作按钮的常开触点接于 00001 输入端。第一次按下,20000 产生短暂脉冲,使 CNT000 计数值减 1,当前值变为 1,同时使输出继电器 01000 接通并自锁。当第二次按动按钮,20000 再次产生短暂脉冲,使 CNT000 计数值再减 1,当前值变为 0,CNT000 的常闭触点断开,使 01000 断开;同时 CNT000 的常开触点接通,在下一个扫描周期使 CNT000 复位。这样通过微分指令,用一个按钮开关完成了第一次启动,第二次停止的点动工作方式。

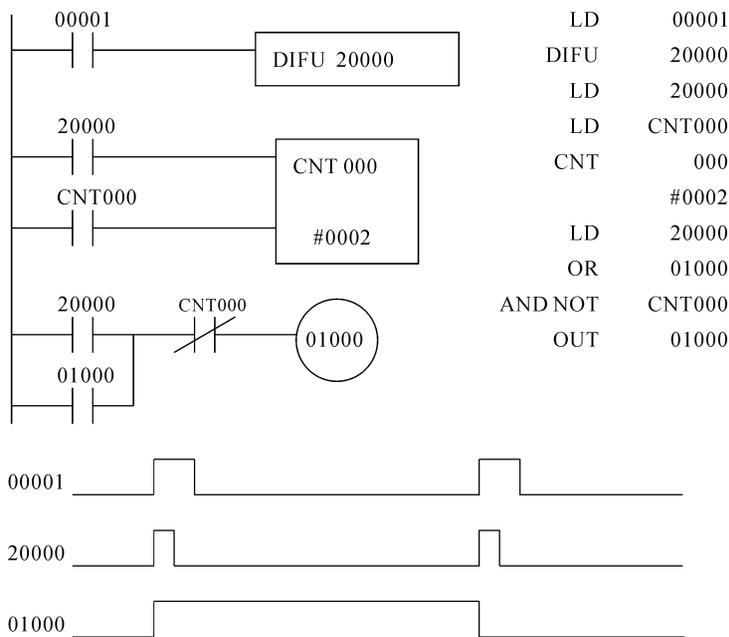


图 4-5-5 单按钮启、停电路

2. 下降沿触发单脉冲电路

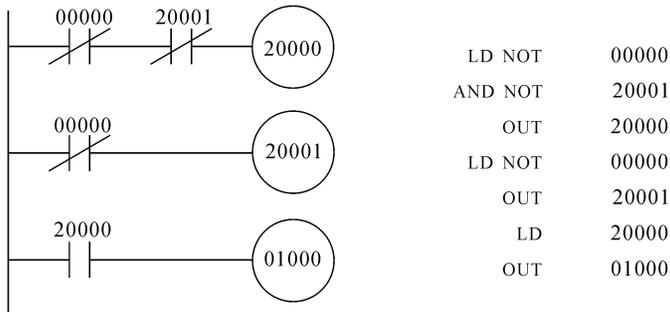


图 4-5-6 下降沿触发单脉冲电路

如图 4-5-6 所示,当接于 00000 输入端的输入设备的常开触点由接通到断开时,00000 的常闭触点闭合,辅助继电器 20000、20001 接通,01000 继电器接通。但在下一个扫描周期时,20001 常闭触点已断开,使 20000 继电器断开,它的常开触点也断开,01000 断开。辅助继电器 20000、输出继电器 01000 接通时间均为一个扫描周期。

其实,用 DIFD 指令也可以得到下降沿触发的单脉冲电路,同学们可以自己试着编写。

3. 脉冲宽度可改变的单脉冲电路

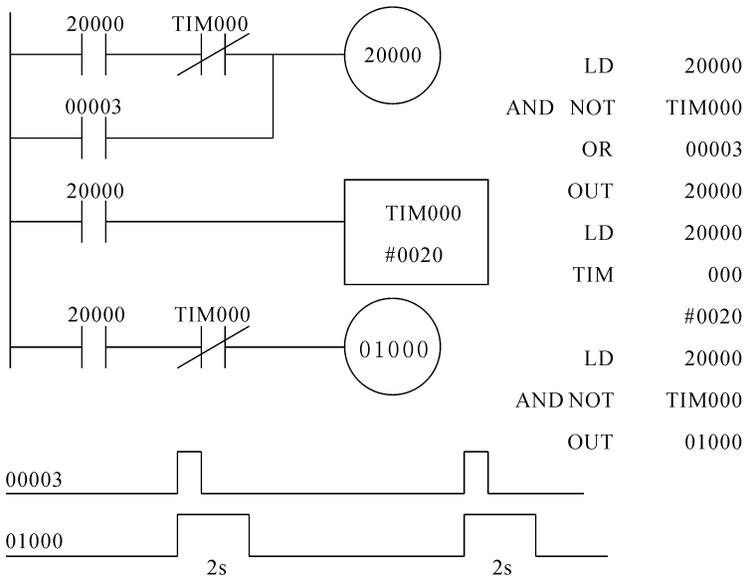


图 4-5-7 脉冲宽度可改变的单脉冲电路

当接于 00003 输入端的开关闭合时,00003 常开触点接通,20000 线圈接通并自锁。20000 的常开触点闭合,定时器 TIM000 开始计时,01000 接通。这时即使 00003 输入断开,01000 仍保持接通;延时 2 秒到 TIM000 的常闭触点断开,01000 断。这样就得到脉宽为 2 秒的单脉冲。修改定时器的设定值,可以改变脉冲宽度。

4. 瞬时输入延时断开电路

如图 4-5-8 所示,当 00002 的常开触点闭合,输出线圈 01000 接通并自锁,同时 00002 的常闭触点断开,定时器 TIM000 不定时。当 00002 输入断开时,00002 常闭触点状态为“1”,01000 的常开触点状态也为“1”,TIM000 开始计时,经过 15 秒, TIM000 动作,它的常闭触点状态为“0”,01000 断开。

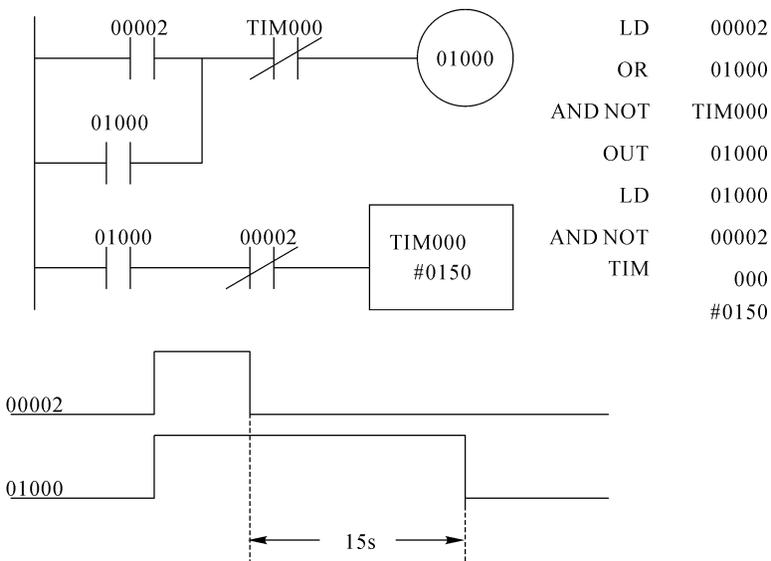


图 4-5-8 瞬时输入延时断开电路

5. 延时接通断开电路

图 4-5-9 是延时接通延时断开电路,它有两个定时器,一个用作延时接通,另一个用作延时断开。当输入端 00002 的常开触点闭合, TIM000 开始计时,经过 10 秒,其常开触点闭合,01000 输出线圈接通并自锁。若 00002 的输入断开,00002 常闭触点状态为“1”,TIM001 开始定时,经过 5 秒,它的常闭触点状态为“0”,01000 断开,这就实现了延时 10 秒接通,延时 5 秒断开。修改定时器的设定值,就可以调整

延时时间。

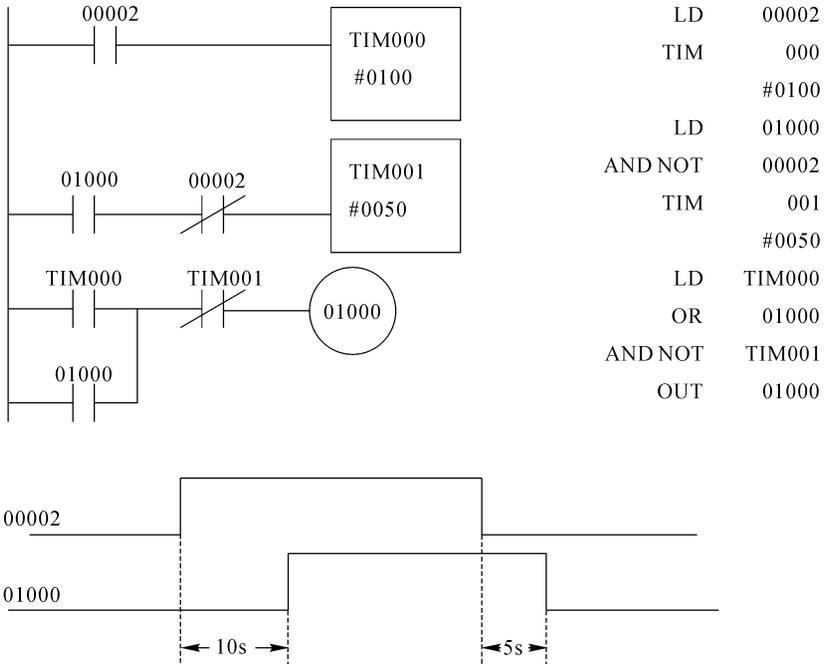


图 4-5-9 延时接通断开电路

6. 报警电路

当控制系统发生故障时,应能及时报警,通知操作人员采取相应措施进行处理。图 4-5-10 所示电路在系统产生故障时,可以产生声音和灯光报警。

梯形图的第一行到第三行为闪烁电路。当 00004 常开触点为 ON 时,在内部辅助继电器 20000 周期性接通断开,周期为 2 秒,它的常开触点使输出继电器 01000 产生间隔为 2 秒的断续信号输出,报警灯闪烁,同时接于输出继电器的 01001 的蜂鸣器发声。若按下接于 00006 输入端的声响复位按钮,使 20001 接通并自锁,其常闭触点状态为 OFF,断开 01001 蜂鸣器停响;常开触点使 01000 持续接通,报警灯一直亮。只有报警信号 00004 撤除,声光报警才取消。为了检查报警灯电路是否正常,设置了检查按钮,接于 00005 输入端上。当按下此按钮 01000 接通,报警灯应点亮,否则指示灯坏了,应予以更换。

7. 自动开关门中的应用

根据汽车进入或离开仓库,自动打开或关闭仓库大门。输入设备采用一个超声开关和一个光电开关。超声开关发射声波。当汽车进入超声开关的作用范围时,超声开关便检测出汽车反射的回波。光电开关由内光源和接收器两个元件组成。光源连续地发射光束,由接收器加以接收。若汽车遮断了光束,光电开关便检测出汽车。

另外,还有两个附加的输入信号,一个检测门行程的上限,另一个检测门行程的下限。

I/O 分配表见表 4-5-1,00002 和 00003 是常闭的行程开关接点。

由图 4-5-11 所示,来自超声开关的输入信号(即 00000)与检测门行程上限的行程开关信号(即 00002,这是一个常闭开关)相串联。当输入 00000 为 ON 时(即汽车进入超声开关的作用范围),输出 01000 继电器为 ON,启动电动机把门打开。当门提升到上限位置时,限位开关 00002 由常闭变为断开,从而使输出 01000 为 OFF,使电动机停止拖动门上升。同时,来自光电开关的输入信号(即 00001)的下降沿使内部辅助继电器 20000 ON 一个扫描周期,此时输出 01001 继电器导通,使电动机带着库门下降。当门落到下限位置时,限位开关 00003 由常闭变为断开,使电动机停止拖动门下降。如果再检测到有车辆接近库门时,又重复开始的动作。

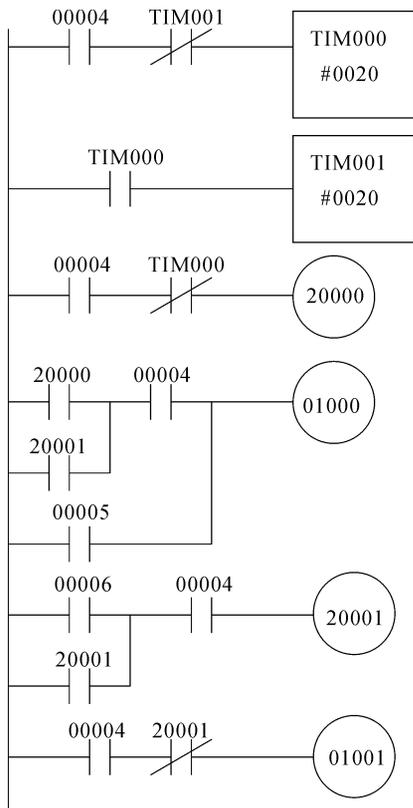


图 4-5-10 报警电路

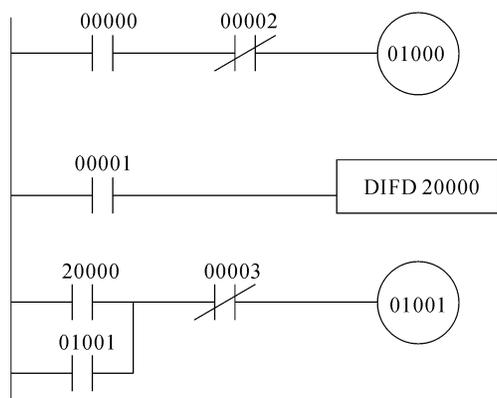


图 4-5-11 自动开关门梯形图

表 4-5-1 I/O 分配表

输入	输入继电器	输出	输出继电器
超声开关	00000	升门(假设电机正转)	01000
光电开关	00001	降门(假设电机反转)	01001
门行程上限检测开关	00002		
门行程下限检测开关	00003		

4.6 实训二(加工中心刀库控制)

1. 实训目的与要求

- ①熟悉 CPM1A 系列 PLC 的工作原理、编程方式、器件的分配。
- ②熟悉 CPM1A-40CDR-A 的面板及使用。
- ③了解加工中心刀库控制原理。

2. 实训仪器与设备

- ①欧姆龙 CPM1A-40CDR-A 可编程控制器一台。
- ②计算机一台。
- ③附带 CPM1A-40CDR-A 随机编程软件 cp-x。
- ④电缆线。

3. 相关知识概述

数控加工中心(简称 MC)是在一般数控机床上加装一个刀库和自动换刀装置

的数控机床(习惯上称为加工中心——Machining Center,简称 MC)。

加工中心换刀一般有两种控制方案:固定存取换刀和随机换刀控制。本实训以固定存取换刀为例。固定存取换刀控制中,刀库中刀具的位置是固定的,刀具选择(CNC 过来的 T 代码)指令以刀套编号为存取地址来控制取刀、存刀动作,即原来从哪一刀套编号中取的刀具,在使用完毕后,仍归还到哪一刀套中。

数控系统通过网络线 RS232 将换刀“T”代码指令给 PLC,PLC 经译码后在数据表中检索,找到 T 代码指定的新刀号所在的数据表地址,并与现行刀号比较。如不符,则将刀库回转控制信号送刀库控制系统,直到定位到新刀号位置,刀库停止回转,并准备换刀。

工作过程示意图如下:

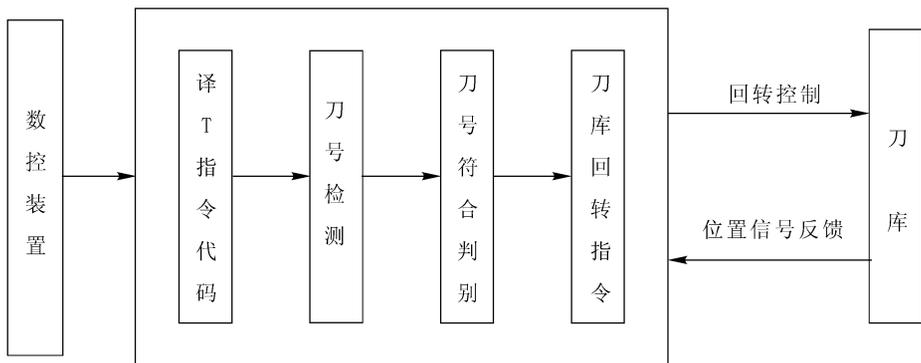


图 4-6-1 换刀过程示意图

4. 实训内容

假设刀库盘上共有 20 把刀具供选择,如图 4-6-2 所示,为提高换刀效率要求换刀时按最小旋转角($\leq 180^\circ$)转动,为提高定位精度,当指定刀具号转至离取刀口一个刀具位置时减速。根据这些要求该控制系统必须能够自动随机判断所取刀具是正转近还是反转近,以下分析取刀算法及规律,刀库刀具示意图如下:

分析:由图可视刀库中 20 把刀具沿顺时针按圆周摆于刀架上,每当刀库旋转时,取刀口的刀具为当前刀号(假设该值存于 DM0000 中),将要取的刀号为设定值(假设存于 DM0001)两者之差放于 DM0002 中。先用试探法找出其算法和规律。

(1)假定被取刀号为“7 号”,当前值为 15 号,则用 $7 - 15 = -8$,再取补 $20 + (-8) = 12$, $12 > 10$,设正转标志,正转刀位的步数 $20 - 12 = 8$,即正转 8 个刀位。



(2) 假定被取刀号为“3号”, 当前值为15号, 则用 $3 - 15 = -12$, 再取补 $20 + (-12) = 8$, $8 < 10$, 设反转标志, 反转刀位的步数为8个刀位。

(3) 假定被取刀号为“17号”, 当前值为15号, 则反转2个刀位。

所以得出结论: 先将设定值减去现值(即当前刀号), 结果若为负则取补(加20), 为正不动作, 然后判断该值与10的关系(小于180度旋转), 大于10则设置正转标志, 小于10则设置反转标志。如置正转标志, 则在置完标志后应计算出刀具实际旋转的刀步数($20 - \text{差值} = \text{实际差值}$)。

输入输出点的分配见表4-6-1 器件分配表。同学们可以参考该表编写程序或自己重新分配器件进行编写, 并进行仿真。

表4-6-1 器件分配表

序号	输入继电器		输出继电器		数据存储区		内部辅助继电器	
	代码	功能	代码	功能	代码	功能	代码	功能
1	00000	刀具检测信号	01000	正转控制	DM0000	存当前刀号	20000	MC置PLC软件换刀命令标志
2	00003	复位按钮	01001	反转控制	DM0001	存设定刀号	20001	启动换刀程序标志
3			01002	减速控制	DM0002	存刀号差值	20002	换刀控制复位标志
4			01003	停止控制			20003	正转换刀标志
5							20004	反转换刀标志
6							20005	减速换刀标志
7							20006	刀具检测标志
8							20007	系统停止标志

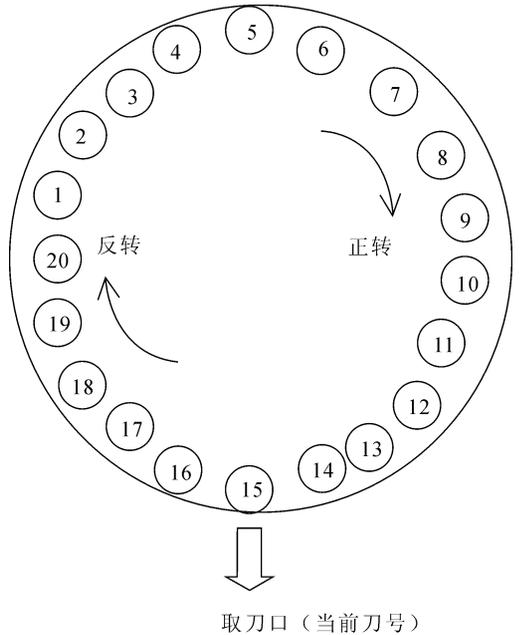


图4-6-2 刀库示意图



5. 实训总结

- (1) 熟悉加工中心刀库控制原理。
- (2) 掌握 CPM1A 系列 PLC 的工作原理、器件的分配。
- (3) 熟悉 CPM1A - 40CDR - A 的面板及使用。
- (4) 会使用编程软件 cp - x。

6. 实训报告

- (1) 画出刀库控制所使用的输入输出点分配表。
- (2) 画出刀库控制程序的梯形图。
- (3) 程序仿真过程。

小 结

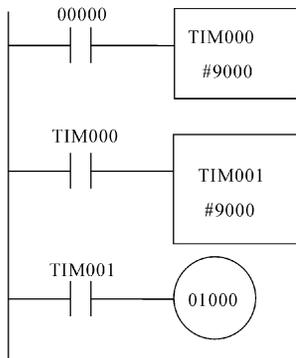
可编程控制器(PLC)产生于 70 年代初,它是以为微处理器为核心的工业通用自动化控制装置,具有控制能力强、使用方便灵活、小型化、可靠性高、易于扩展、通用性强等优点。PLC 根据不同的分类方法可分为低档、中档和高档机;以及小型机、中型机、大型机。它由 CPU、存储器、输入输出接口及其他可选件四部分组成。PLC 是采用循环扫描的工作方式进行工作的。

本章主要介绍日本欧姆龙公司 CPM1A 系列 PLC,它是小型整体式可编程控制器。其结构紧凑、功能强,具有很高的性价比,在小规模控制中已获得广泛应用。PLC 不仅取代了传统的继电控制系统,还可以进行复杂的生产过程控制和应用于工厂自动化网络。目前 PLC 技术已与机器人技术、CAD/CAM 技术成为工业自动化的三大支柱。

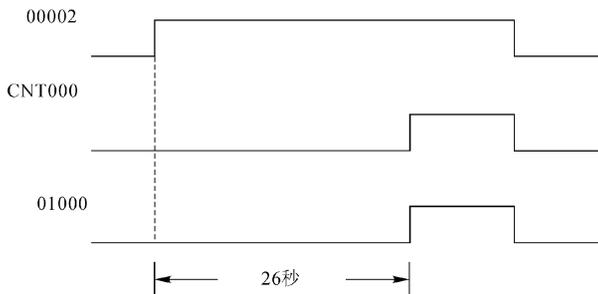
习题与思考题

- 4-1 PLC 由哪几部分组成?各部分作用是什么?
- 4-2 PLC 有哪些特点?
- 4-3 试简述 PLC 的工作过程。
- 4-4 CPM1A 系列 PLC 的内部继电器区是怎样划分的?哪些继电器有断电保持功能?
- 4-5 用 TIM 指令编写一个程序,完成在 00000 接通 10 秒后 01001 接通并保持,定时器则立即复位。01001 接通 10 秒后自动断开。画出梯形图,写出语句表。

- 4-6 用 CNT 指令编写一个程序,实现上题的控制。
 4-7 写出题 4-7 图所示梯形图的编码表,并说明它的功其能。
 4-8 试用计数器构成题 4-8 图所示延时 26 秒的电路,画出梯形图。



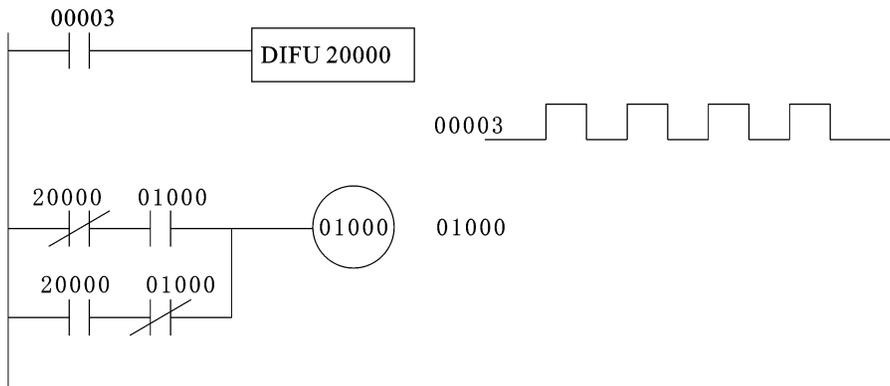
题 4-7 图



题 4-8 图

4-9 有一台电动机,要求在按下启动按钮后,电动机运转 10 秒,停止 5 秒;重复 3 次后,电动机自动停止。试画出梯形图。

4-10 仔细分析题 4-10 图左面的梯形图,画出输出继电器 01000 的波形图,并说明其功能。



题 4-10 图

第 5 章 数控原理及系统

本章主要介绍数控系统的插补原理及其特点,刀具的尺寸补偿原理,以及数控系统的组成和数控装置的软硬件结构,并介绍一些典型数控系统,以及数控系统参数设置和调整的方法。

5.1 数控系统的插补原理

5.1.1 插补概述

数控系统的主要任务之一,是控制执行机构按预定的轨迹运动。一般情况是已知运动轨迹的起点坐标、终点坐标和轨迹的曲线方程,由数控系统实时地计算出各个中间点的坐标。也就是说需要“插入、补上”运动轨迹各个中间点的坐标,通常把这个过程称为“插补”,实际上插补是一个数据点密化的过程。当然,中间点的插入是根据一定的算法由数控系统软件或硬件自动完成的。

早期的插补功能是由数字逻辑电路完成的,完成插补计算的硬件电路称为插补器,它应用在硬件数控(NC)系统中。而在计算机数控系统(CNC)中,插补功能可完全由软件实现,也可由软、硬件结合来完成。硬件插补器速度快,但电路复杂,并且调整和修改都相当困难,缺乏柔性;软件插补方法虽然速度慢一些,但调整方便,而且现在计算机的处理速度越来越快,弥补了速度慢的缺陷。所以现代数控机床都采用配备了 CNC 系统的软件插补数控系统。

软件插补方法可分为基准脉冲插补和数据采样插补两类。

基准脉冲插补方法是模拟硬件插补的原理,它把每次插补运算产生的指令脉冲输出到伺服系统,以驱动工作台运动。每发出一个脉冲,工作台移动一个基本长度单位,即脉冲当量。输出脉冲的最大速度取决于执行一次运算所需的时间。该方法虽然插补程序比较简单,但进给速率受到一定的限制,所以用在进给速度不需要很高的数控系统或开环数控系统中。基准脉冲插补有多种方法,最常用的是逐点比较插补法和数字积分插补法等。



数据采集法用到以直流或交流伺服电机作为执行元件的闭环或半闭环数控系统中,插补结果输出的不是脉冲,而是数据。在这类数控系统中,每调用一次插补程序,就计算出坐标轴在每个插补周期中的位置增量,然后求得坐标轴相应的位置给定值,再与采样所获得的实际位置反馈值相比较,求得跟踪误差。位置伺服软件就根据当前的位置误差计算出进给坐标轴的速度给定值,并将其输出给驱动装置,然后通过电动机带动丝杠和工作台朝着减小误差的方向运动,以保证整个系统的加工精度。当数控系统采用数据采集插补方法时,由于插补频率较低(大约在 $50 \sim 125\text{Hz}$,插补周期约为 $8 \sim 20\text{ms}$),使用计算机较易管理和实现。一般情况下,要求插补程序的运行时间不大于计算机时间负荷的 $30\% \sim 40\%$,而在余下的时间内,计算机可以去完成数控加工程序编制、存储、收集运行状态数据、监视机床等其他数控功能。这时,数控系统所能达到的最大轨迹速度为 $10\text{m}/\text{min}$ 以上,也就是说数据采集插补程序的运行时间已不再是限制轨迹速度的主要因素,其轨迹速度的上限将取决于圆弧弦线误差以及伺服系统的动态响应特性。

另外还有一种硬件和软件相结合的插补方法。把插补功能分别分配给软件和硬件插补器,前者完成粗插补,即把加工轨迹分为大的段,而硬件插补器完成精插补,进一步密化数据点,完成程序段的加工。该方法对计算机运算速度要求不高,并可余出更多的存储空间以存储零件程序,而且相应速度和分辨率都比较高。

下面我们通过介绍基准脉冲插补的逐点比较法,来进一步了解插补的含义。

5.1.2 逐点比较插补法

1. 基本原理

逐点比较法的原理是,刀具在加工零件的运动过程中,每走一步都要将刀具的实际位置和被加工零件轮廓相比较,判断其偏差,并根据偏差结果决定下一步的进给方向,使刀具向减小误差的方向进给。如果加工点走到轮廓里面,那么下一步就要向轮廓外面走;如果加工点在轮廓外面,则下一步就要向轮廓里面走,以缩小误差,每走的一步是一个脉冲当量。通过这种方法可以获得一个非常接近于数控加工程序规定轮廓的轨迹,其最大的偏差不超过一个脉冲当量。逐点比较法插补过程中每进给一步都要经过四个节拍。

(1) 偏差判别 判别刀具当前位置相对于规定轮廓的偏差情况,也就是通过偏差值的正负判断加工点是在规定轮廓的里面还是外面。



(2) 坐标进给 根据偏差判别的结果,控制相应的坐标轴进给一步,使加工点向规定轮廓靠拢,缩小偏差。

(3) 偏差计算 刀具进给一步后,到达新的加工点,计算新的加工点与规定轮廓之间新的偏差,作为下一步偏差判别的依据。

(4) 终点判别 每走一步都要判断是不是到达终点,如果到达则停止插补循环,若没有到达则继续循环以上四个节拍,直到到达终点。

逐点比较法的工作流程如图5-1-1所示。

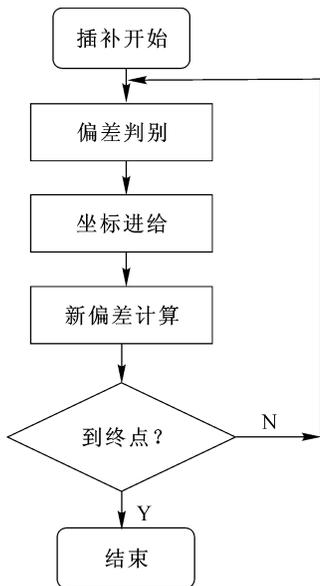


图5-1-1 逐点比较法工作流程图

2. 逐点比较法 I 象限直线插补

基本原理:如图5-1-2所示第一象限直线OE,起点O(0,0),终点为E(X_e,Y_e),还有一个动点为N(X_i,Y_i),现假设动点N正好处于直线OE上,则有下式成立

$$\frac{Y_i}{X_i} = \frac{Y_e}{X_e} \text{ 即 } X_e Y_i - X_i Y_e = 0 \quad (5-1-1)$$

假设动点处于OE的下方N'处,则直线ON'的斜率小于直线OE的斜率,从而有下式成立

$$\frac{Y_i}{X_i} < \frac{Y_e}{X_e} \text{ 即 } X_e Y_i - X_i Y_e < 0 \quad (5-1-2)$$

假设动点处于OE的上方N''处,则直线ON''的斜率大于直线OE的斜率,从而有下式成立

$$\frac{Y_i}{X_i} > \frac{Y_e}{X_e} \text{ 即 } X_e Y_i - X_i Y_e > 0 \quad (5-1-3)$$

由以上关系式可以看出,(X_eY_i - X_iY_e)的符号就反映了动点N与直线OE之间的偏离情况,为此取偏差函数为

$$F = X_e Y_i - X_i Y_e \quad (5-1-4)$$

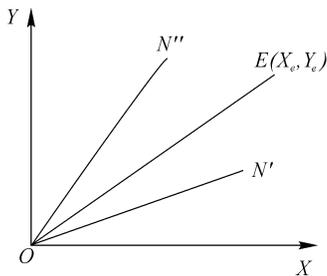


图5-1-2 I象限动点与直线之间的关系



依此可总结出动点 $N(X_i, Y_i)$ 与设定直线之间的相对位置关系如下:

当 $F=0$ 时, 动点 $N(X_i, Y_i)$ 正好处在直线 OE 上;

当 $F>0$ 时, 动点 $N(X_i, Y_i)$ 落在直线 OE 的上方区域;

当 $F<0$ 时, 动点 $N(X_i, Y_i)$ 落在直线 OE 的下方区域。

以图 5-1-3 为例, 设 OE 为要加工的直线轮廓, 而动点 $N(X_i, Y_i)$ 对应切削刀具的位置。显然, 刀具处于直线下区域时 ($F<0$), 为了更靠拢直线轮廓, 则要求刀具向 (+Y) 方向进给一步; 当刀具处于直线上区域时 ($F>0$), 为了更靠拢直线轮廓, 则要求刀具向 (+X) 方向进给一步; 当刀具正好处于直线上时 ($F=0$), 理论上既可以向 (+X) 方向进给一步, 也可以向 (+Y) 进给一步, 但一般情况下约定向 (+X) 方向进给, 从而将 $F>0$ 和 $F=0$ 两种情况归为一类 ($F\geq 0$)。根据上述原则从原点 $O(0,0)$ 开始, 走一步, 算一算, 判别 F 的符号, 再趋向直线进给, 步步前进, 直至终点 E 。这样, 通过逐点比较的方法, 控制刀具走出一条尽量接近零件轮廓直线的轨迹, 如图 5-1-3 中折线所示。当每次进给的台阶 (即脉冲当量) 很小时, 就可将这条折线近似当作直线来看待。显然, 逼近程度的大小与脉冲当量的大小直接相关。

由式 (5-1-4) 可以看出, 每次计算偏差值 F 时, 都要作乘法和减法运算, 而这在使用硬件或汇编语言软件实现是不太方便的, 还会增加运算时间。因此, 为了简化计算, 通常采用递推法, 即每进给一步后新加工点的加工偏差值通过前一点的偏差递推算出。

现在假设第 i 次插补后, 动点坐标为 $N(X_i, Y_i)$, 偏差函数为

$$F_i = X_c Y_i - X_i Y_c$$

若 $F_i \geq 0$, 则向 (+X) 方向进给一步, 新的动点坐标值为

$$X_{i+1} = X_i + 1, \quad Y_{i+1} = Y_i$$

因此新的偏差函数为

$$F_{i+1} = X_c Y_{i+1} - X_{i+1} Y_c = X_c Y_i - X_i Y_c - Y_c$$

所以

$$F_{i+1} = F_i - Y_c \quad (5-1-5)$$

同样, 若 $F_i < 0$, 则向 (+Y) 方向进给一步, 新的动点坐标值为

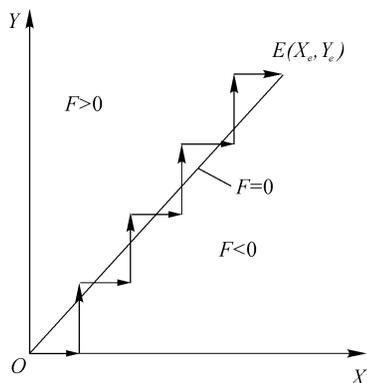


图 5-1-3 I 象限直线插补轨迹

$$X_{i+1} = X_i, \quad Y_{i+1} = Y_i + 1$$

因此新的偏差函数为

$$F_{i+1} = X_e Y_{i+1} - X_{i+1} Y_e = X_e Y_i - X_i Y_e + X_e$$

所以

$$F_{i+1} = F_i + X_e \quad (5-1-6)$$

根据式(5-1-5)和(5-1-6)可以得出,采用递推算法后,消除了乘法运算,而且偏差函数 F 的计算只与终点坐标值 X_e 和 Y_e 有关,并不涉及动点坐标 X_i 、 Y_i 的值,新动点的偏差函数可由上一个动点的偏差函数值递推出来。算法非常简单,节省运算时间,易于实现。由于在开始加工时,一般采用人工方法将刀具移到加工起点(对刀),这时刀具正好处于直线上,当然也就没有偏差,所以递推开始时偏差函数的初始值为 $F_0 = 0$ 。

综上所述, I 象限内偏差函数与进给方向的对应关系如下:

当 $F \geq 0$ 时,进给(+X)方向,新的偏差函数为 $F_{i+1} = F_i - Y_e$;

当 $F < 0$ 时,进给(-Y)方向,新的偏差函数为 $F_{i+1} = F_i + X_e$ 。

由前面的逐点比较法工作流程知道,在插补计算、进给的同时还要进行终点判别,若已经到达终点,就不再进给,并发出停机或转换新程序段的信号,否则返回继续循环插补。具体讲,终点判别有三种方法。

第一种方法称为总步长法。首先求出被插补直线在两个坐标轴方向上应走的总步数

$$\Sigma = |X_e| + |Y_e|$$

然后每插补一次,不论哪个轴进给一步,均从总步数中减去1,这样当总步数减到零时即表示已到达终点。

第二种方法称为投影法。既首先求出被插补直线终点坐标值中较大的一个作为计数值

$$\Sigma = \max(|X_e|, |Y_e|)$$

然后在插补过程中每当终点坐标绝对值较大的那个轴进给时就从计数单元中减去1,这样当减到零时表示已到达终点。

第三种方法称为终点坐标法。即取被插补直线终点坐标分别作为计数单元

$$\Sigma_1 = |X_e|, \quad \Sigma_2 = |Y_e|$$

然后在插补过程中,如果进给了(+X)方向,则使 Σ_1 减去1,如果进给了(+Y)方向,则使 Σ_2 减去1,这样当 Σ_1 和 Σ_2 均减到零时,才表示到达终点位置。



在上述推导和叙述过程中,均假设所有坐标值的单位是脉冲当量,这样坐标值均是整数,每次发出一个单位脉冲,也就是进给一个脉冲当量的距离。

例 5-1 现欲加工 I 象限直线 OE , 设终点坐标为 $E(X_e, Y_e) = E(3, 5)$, 试用逐点比较法进行插补。

解 总步数 $\Sigma_0 = 3 + 5 = 8$, 开始时刀具处于直线起点原点, $F_0 = 0$, 则插补运算过程如表 5-1-1 所示, 插补轨迹如图 5-1-4 所示。

表 5-1-1 I 象限直线插补运算过程

序号	偏差判别	进给方向	偏差计算	终点判别
起点			$F_0 = 0$	$\Sigma_0 = 8$
1	$F_0 = 0$	+X	$F_1 = F_0 - Y_e = 0 - 5 = -5$	$\Sigma_1 = \Sigma_0 - 1 = 8 - 1 = 7$
2	$F_1 = -5 < 0$	+Y	$F_2 = F_1 + X_e = -5 + 3 = -2$	$\Sigma_2 = \Sigma_1 - 1 = 7 - 1 = 6$
3	$F_2 = -2 < 0$	+Y	$F_3 = F_2 + X_e = -2 + 3 = +1$	$\Sigma_3 = \Sigma_2 - 1 = 6 - 1 = 5$
4	$F_3 = +1 > 0$	+X	$F_4 = F_3 - Y_e = 1 - 5 = -4$	$\Sigma_4 = \Sigma_3 - 1 = 5 - 1 = 4$
5	$F_4 = -4 < 0$	+Y	$F_5 = F_4 + X_e = -4 + 3 = -1$	$\Sigma_5 = \Sigma_4 - 1 = 4 - 1 = 3$
6	$F_5 = -1 < 0$	+Y	$F_6 = F_5 + X_e = -1 + 3 = +2$	$\Sigma_6 = \Sigma_5 - 1 = 3 - 1 = 2$
7	$F_6 = +2 > 0$	+X	$F_7 = F_6 - Y_e = 2 - 5 = -3$	$\Sigma_7 = \Sigma_6 - 1 = 2 - 1 = 1$
8	$F_7 = -3 < 0$	+Y	$F_8 = F_7 + X_e = -3 + 3 = 0$	$\Sigma_8 = \Sigma_7 - 1 = 1 - 1 = 0$

对于逐点比较法插补, 由于假设所有坐标值的单位是脉冲当量, 起点和终点处刀具均应落在零件轮廓上, 也就是说在插补开始和结束时偏差值均为零, 即 $F = 0$, 否则, 说明插补过程中出现了错误。

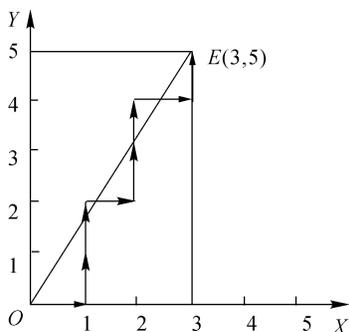


图 5-1-4 逐点比较法直线插补实例

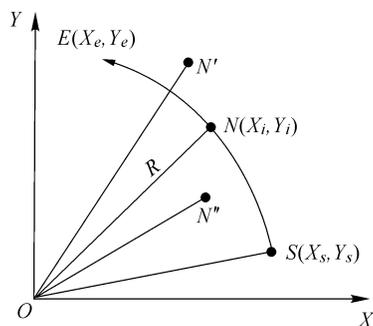


图 5-1-5 I 象限逆圆弧与动点间的关系

3. 逐点比较法 I 象限圆弧插补

基本原理:在圆弧加工过程中,要描述刀具位置与被加工圆弧之间的相对关系,可用动点到圆心的距离大小来反映。

如图 5-1-5 所示,假设被加工的零件轮廓为 I 象限逆圆弧 SE ,刀具在动点 $N(X_i, Y_i)$ 处,圆心为 $O(0,0)$,半径为 R ,则通过比较该动点到圆心的距离与圆弧半径之间的大小就可反映出动点与圆弧之间的相对位置关系,即当动点 $N(X_i, Y_i)$ 正好落在圆弧 SE 上时,则有下式成立:

$$X_i^2 + Y_i^2 = X_e^2 + Y_e^2 = R^2$$

当动点 N 落在圆弧 SE 外侧(如在 N' 处)时,则有下式成立:

$$X_i^2 + Y_i^2 > X_e^2 + Y_e^2 = R^2$$

当动点 N 落在圆弧 SE 内侧(如在 N'' 处)时,则有下式成立:

$$X_i^2 + Y_i^2 < X_e^2 + Y_e^2 = R^2$$

为此,现取圆弧插补时的偏差函数表达式为

$$F = X_i^2 + Y_i^2 - R^2 \quad (5-1-7)$$

进一步可以从图中直观看出,当动点处于圆外时,为了减小加工误差,则应向圆内进给,即走 $(-X)$ 轴方向一步。当动点落在圆弧内部时,为了缩小加工误差,则应向圆外进给,即走 $(+Y)$ 轴方向一步。当动点正好落在圆弧上时,为了使加工进给继续下去, $(+Y)$ 和 $(-X)$ 两个方向均可以进给,但一般情况下约定向 $(-X)$ 轴方向进给。

综上所述,可总结出逐点比较法 I 象限逆圆弧插补的规则如下:

当 $F > 0$ 时,即 $F = X_i^2 + Y_i^2 - R^2 > 0$,动点在圆外,则向 $(-X)$ 轴进给一步;

当 $F = 0$ 时,即 $F = X_i^2 + Y_i^2 - R^2 = 0$,动点正好在圆上,则向 $(-X)$ 轴进给一步;

当 $F < 0$ 时,即 $F = X_i^2 + Y_i^2 - R^2 < 0$,动点在圆内,则向 $(+Y)$ 轴进给一步。

在式(5-1-7)中,要求出偏差 F 的值,要求进行平方运算,这样在用硬件或汇编语言实现时不太方便,为简化计算,进一步推导其相应的递推形式表达式。

现假设第 i 次插补后,动点坐标为 $N(X_i, Y_i)$,对应偏差函数为

$$F_i = X_i^2 + Y_i^2 - R^2$$

若 $F_i \geq 0$,则向 $(-X)$ 轴方向进给一步,获得新的动点坐标值为

$$X_{i+1} = X_i - 1, \quad Y_{i+1} = Y_i$$

因此,新的偏差函数为



$$F_{i+1} = X_{i+1}^2 + Y_{i+1}^2 - R^2 = (X_i - 1)^2 + Y_i^2 - R^2$$

所以
$$F_{i+1} = F_i - 2X_i + 1 \quad (5-1-8)$$

同理,若 $F_i < 0$,则向 $(+Y)$ 轴方向进给一步,获得新的动点坐标值为

$$X_{i+1} = X_i, Y_{i+1} = Y_i + 1$$

因此,可求得新的偏差函数为

$$F_{i+1} = X_{i+1}^2 + Y_{i+1}^2 - R^2 = X_i^2 + (Y_i + 1)^2 - R^2$$

所以
$$F_{i+1} = F_i + 2Y_i + 1 \quad (5-1-9)$$

通过式 5-1-8 和式 5-1-9 可以看出如下两个特点:第一是递推形式的偏差计算公式中除加/减运算外,只有乘 2 运算,而乘 2 可等效成二进制数左移一位,显然比原来平方运算简单得多。第二是进给后新的偏差函数值除与前一点的偏差值有关外,还与动点坐标 $N(X_i, Y_i)$ 有关(这与直线插补不相同),而动点坐标值随着插补的进行是变化的,所以,在插补的同时还必须修正新的动点坐标,以便为下一步的偏差计算做好准备。至此,可总结出 I 象限逆圆弧插补的规则和计算公式如下:

当 $F_i \geq 0$ 时,进给 $(-X)$ 方向,新偏差值为 $F_{i+1} = F_i - 2X_i + 1$,动点坐标为 $X_{i+1} = X_i - 1, Y_{i+1} = Y_i$;

当 $F_i < 0$ 时,进给 $(+Y)$ 方向,新偏差值为 $F_{i+1} = F_i + 2Y_i + 1$,动点坐标为 $X_{i+1} = X_i, Y_{i+1} = Y_i + 1$ 。

和直线插补一样,插补过程中还要进行终点判别。对于圆弧仅在一个象限内的情况,则仍然可借用直线终点判别的三种方法,只是公式稍有不同。

$$\Sigma = |X_e - X_s| + |Y_e - Y_s|$$

$$\Sigma = \max(|X_e - X_s|, |Y_e - Y_s|)$$

$$\Sigma_1 = |X_e - X_s|, \Sigma_2 = |Y_e - Y_s|$$

式中: (X_s, Y_s) ——被插补圆弧起点坐标;

(X_e, Y_e) ——被插补圆弧终点坐标。

例 5-2 现欲加工 I 象限逆圆 SE ,如图 5-1-6 所示,起点 $S(X_s, Y_s) = S(4, 3)$,终点 $E(X_e, Y_e) = E(0, 5)$,试用逐点比较法进行插补。

解 总步数 $\Sigma = |X_e - X_s| + |Y_e - Y_s| = 6$

开始时刀具处于圆弧起点 $S(4, 3)$ 处, $F_0 = 0$

根据上述插补方法可以获得如表 5-1-2 所示插补过程,对应的插补轨迹如图 5-1-6 中折线所示。



表 5-1-2 I 象限逆圆插补运算过程

序号	工 作 节 拍				
	第一拍 偏差判别	第二拍 进给方向	第三拍		第四拍 终点判别
			偏差计算	坐标修正	
起点			$F_0 = 0$	$X_0 = 4, Y_0 = 3$	$\Sigma_0 = 6$
1	$F_0 = 0$	$-X$	$F_1 = 0 - 2 \times 4 + 1 = -7$	$X_1 = 3, Y_1 = 3$	$\Sigma_1 = \Sigma_0 - 1 = 5$
2	$F_1 = -7 < 0$	$+Y$	$F_2 = -7 + 2 \times 3 + 1 = 0$	$X_2 = 3, Y_2 = 4$	$\Sigma_2 = \Sigma_1 - 1 = 4$
3	$F_2 = 0$	$-X$	$F_3 = 0 - 2 \times 3 + 1 = -5$	$X_3 = 2, Y_3 = 4$	$\Sigma_3 = \Sigma_2 - 1 = 3$
4	$F_3 = -5 < 0$	$+Y$	$F_4 = -5 + 2 \times 4 + 1 = 4$	$X_4 = 2, Y_4 = 5$	$\Sigma_4 = \Sigma_3 - 1 = 2$
5	$F_4 = 4 > 0$	$-X$	$F_5 = 4 - 2 \times 2 + 1 = 1$	$X_5 = 1, Y_5 = 5$	$\Sigma_5 = \Sigma_4 - 1 = 1$
6	$F_5 = 1 > 0$	$-X$	$F_6 = 1 - 2 \times 1 + 1 = 0$	$X_6 = 0, Y_6 = 5$	$\Sigma_6 = \Sigma_5 - 1 = 0$

4. 插补象限和圆弧走向处理

前面所讨论的关于逐点比较法直线和圆弧插补的原理,均假设针对 I 象限直线和 I 象限逆圆的这种特定情况进行的。事实上,任何机床都必须具备处理不同象限、不同走向轮廓曲线的能力,而这时其插补计算公式和脉冲进给方向都是不同的。为了方便处理和实现插补,要尽量寻找其间的共同规律,以利于优化程序设计,提高插补质量。现将 I, II, III, IV

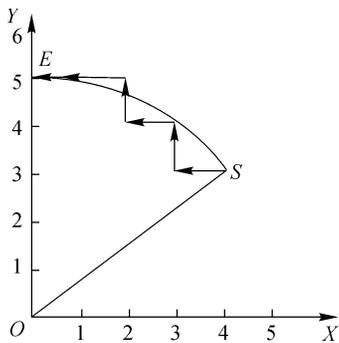


图 5-1-6 I 象限逆圆插补实例

象限内的直线分别记为 L_1, L_2, L_3, L_4 ,而对于圆弧用“S”表示顺时针圆弧,“N”表示逆时针圆弧。结合象限的区别可获得 8 种圆弧形式,其中 4 个象限顺圆可表示为 $SR1, SR2, SR3, SR4$,4 个象限逆圆可表示为 $NR1, NR2, NR3, NR4$ 。

(1) 四个象限直线插补 现假设有 II 象限直线如图 5-1-7 所示,起点在原点 $O(0,0)$ 终点为 $A(-X_e, +Y_e)$,则依照前面介绍的方法,很容易推得对应的插补计算法和进给方向如下:

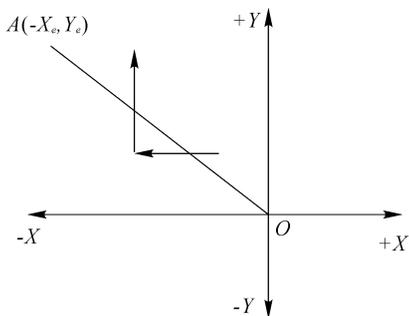


图 5-1-7 II 象限直线插补

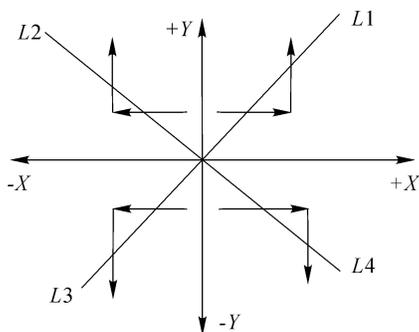


图 5-1-8 四个象限直线插补进给方向

当 $F_i \geq 0$ 时,进给 $(-\Delta X)$ 方向,新的偏差函数为 $F_{i+1} = F_i - Y_e$;

当 $F_i < 0$ 时,进给 $(+\Delta Y)$ 方向,新的偏差函数为 $F_{i+1} = F_i + X_e$ 。

表 5-1-3 四个象限直线插补进给方向和偏差计算

线型	偏差计算	进给	偏差计算	进给
	$F \geq 0$		$F < 0$	
L1	$F - Y_e \rightarrow F$	$+\Delta X$	$F + X_e \rightarrow F$	$+\Delta Y$
L2		$-\Delta X$		$+\Delta Y$
L3		$-\Delta X$		$-\Delta Y$
L4		$+\Delta X$		$-\Delta Y$

与前面进行比较后发现,当被插补直线处于不同象限时,其计算公式及处理过程完全一样,仅仅是进给方向不同而已。进一步可总结出 $L1, L2, L3, L4$ 的进给方向如图 5-1-8 和表 5-1-3 所示。

(2) 四个象限中圆弧插补 如图 5-1-9 为 I 象限顺圆,圆弧 SE 起点为 $S(X_s, Y_s)$, 终点为 $E(X_e, Y_e)$, 当某一时刻动点 $N(X_i, Y_i)$ 处在圆弧外侧,即 $F_i \geq 0$, 显然应该向圆内走才能减小误差,即进给一步 $(-\Delta Y)$; 若动点 N 在圆弧内侧,即 $F_i < 0$, 则应向圆外进给一步 $(+\Delta X)$ 。由此可推得第一象限顺圆插补的偏差函数为:

当 $F_i \geq 0$ 时,进给一步 $(-\Delta Y)$, 则新动点的偏差函数为

$$F_{i+1} = X_{i+1}^2 + Y_{i+1}^2 - R^2 = X_i^2 + (Y_i - 1)^2 - R^2$$

所以

$$F_{i+1} = F_i - 2Y_i + 1 \quad (5-1-10)$$

当 $F_i < 0$ 时,进给一步 $(+\Delta X)$, 则新动点的偏差函数为

$$F_{i+1} = X_{i+1}^2 + Y_{i+1}^2 - R^2 = (X_i + 1)^2 + Y_i^2 - R^2$$

所以

$$F_{i+1} = F_i + 2X_i + 1 \tag{5-1-11}$$

比较式(5-1-10)、式(5-1-11)与式(5-1-8)、式(5-1-9)可以看出有两点不同,其一是当 $F_i \geq 0$ 和 $F_i < 0$ 时对应的进给方向不同;其二是插补计算公式中动点坐标的修正也不同。

同理还可以推导出其余 6 种圆弧的插补公式,现将其进给情况汇总在图 5-1-10 和表 5-1-4 中。

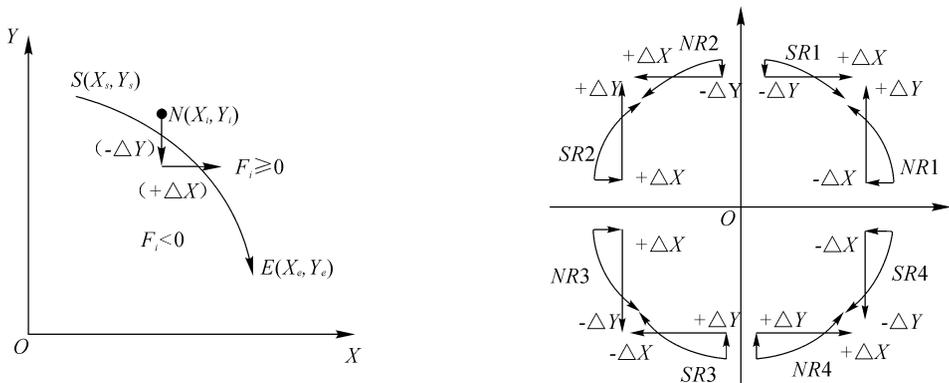


图 5-1-9 象限顺圆逐点比较法插补示意图 图 5-1-10 四象限圆弧插补进给方向和偏差计算

表 5-1-4 四个象限圆弧插补进给方向和偏差计算

线型	偏差计算	进给	偏差计算	进给
	$F \geq 0$		$F < 0$	
SR1		$-\Delta Y$		$+\Delta X$
SR3	$F - 2Y + 1 \rightarrow F$	$+\Delta Y$	$F + 2X + 1 \rightarrow F$	$-\Delta X$
NR2	$Y - 1 \rightarrow F$	$-\Delta Y$	$X + 1 \rightarrow F$	$-\Delta X$
NR4		$+\Delta Y$		$+\Delta X$
SR2		$+\Delta X$		$+\Delta Y$
SR4	$F - 2X + 1 \rightarrow F$	$-\Delta X$	$F + 2Y + 1 \rightarrow F$	$-\Delta Y$
NR1	$X - 1 \rightarrow F$	$-\Delta X$	$Y + 1 \rightarrow F$	$+\Delta Y$
NR3		$+\Delta X$		$-\Delta Y$



5.2 CNC 系统中的刀具补偿

由于 CNC 系统通过控制刀架的参考点或是刀具中心实现加工轨迹,但实际上切削时是使用刀尖或切削刃边缘完成的,这样就需要在刀架参考点或刀具中心与刀具切削点之间进行位置偏置,从而使数控系统的控制对象由刀架参考点或刀具中心变换到刀尖或切削刃的边缘。这种变换过程称为刀具补偿。

刀具补偿一般分为刀具长度补偿和刀具半径补偿。应用刀具补偿功能,CNC 系统可以对刀具长度和刀具半径自动校正,使编程人员可以直接根据零件图纸上的尺寸进行编程,而不必考虑刀具尺寸因素。它的优点是在换刀后不需要另外编写程序,只需调整新的刀具参数即可,如刀具半径、刀具长度、刀具中心的偏移量等。

5.2.1 刀具长度补偿

我们先以数控车系统为例说明。如图 5-2-1 所示,图中 P 为理论刀尖, S 为刀头圆弧圆心, R_s 为刀尖圆弧半径, F 为刀架参考点。

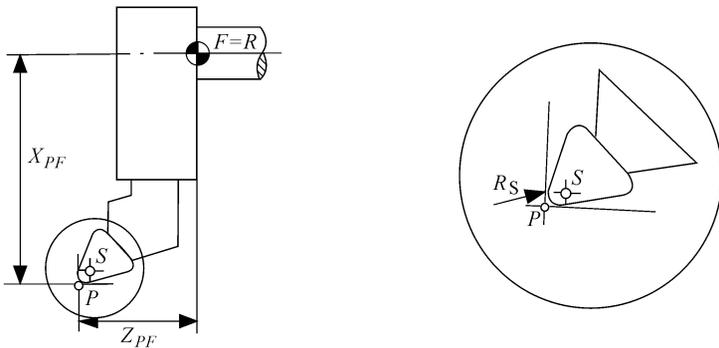


图 5-2-1 刀具结构参数

刀具长度补偿是用来实现刀尖圆弧中心轨迹与刀架参考点之间的转换,对应图 5-2-1 中 F 与 S 之间的转换,但实际上不能直接测得这两个中心点之间的距离变量,而只能测得理论刀尖 P 与刀架参考点 F 之间的距离。

为了简单起见,假设刀尖圆弧半径 $R_s = 0$,这时可采用刀具长度测量装置测出理论刀尖点 P 相对于刀架参考点的坐标 X_{PF} 和 Z_{PF} ,并存入刀具参数表中



$$X_{PF} = X_P - X$$

$$Z_{PF} = Z_P - Z$$

式中: (X_P, Z_P) ——理论刀尖 P 点坐标;

(X, Z) ——刀架参考点 F 的坐标。

由上可以很容易写出刀具长度补偿的计算公式为

$$X = X_P - X_{PF}$$

$$Z = Z_P - Z_{PF}$$

式中理论刀尖 P 的坐标 (X_P, Z_P) 实际上就是加工零件轨迹点坐标, 可从数控加工程序中获得。此时, 零件轮廓轨迹经上面公式计算补偿后, 即能通过控制刀架参考点 F 来实现。

进一步对于图 5-2-1 中 $R_s \neq 0$ 的情况, 在进行刀具长度补偿时, 不但需要考虑到刀头圆弧半径的补偿, 而且还要考虑刀具的安装方式, 分析较复杂。另一方面, 由于 R_s 很小, 生产中可以不予考虑, 尤其在调试程序及对刀过程中已包括进去。因此, 这里就不再详述。

另外, 对于铣床、钻床的刀具长度补偿比较简单, 只要在刀具轴线方向进行长度偏置即可。

刀具长度补偿指令有 G43, G44, 其中 G43 为刀具长度正补偿, G44 为刀具长度负补偿。

5.2.2 刀具半径补偿

在轮廓加工中, 数控系统控制的是刀具的中心运动轨迹, 由于刀具半径不为零, 所以刀具中心运动轨迹并不等于加工的零件轮廓。如果按照刀具中心轨迹编程, 再更换不同直径的刀具时程序也将重新编写, 而且有比较大的计算量。为了解决这一问题可按照零件的轮廓尺寸编程, 预先输入各把刀具的半径值, CNC 系统会自动计算出每把刀具的中心轨迹。这种功能称为刀具半径补偿。

刀具半径补偿指令有两种: G41 是左补偿指令, G42 是右补偿指令。左右补偿的判断方法是沿着刀具前进的方向看过去, 如果刀具的中心在切削面的左边用 G41, 刀具中心在切削面的右边时用 G42。当不需要进行刀具补偿时, 用 G40 注销。另外需要注意的是 G40, G41 和 G42 都是模态指令, 也就是它们一旦被执行, 则一直有效, 直到同组的其他模态指令出现才会被取消。

在切削过程中,刀具半径补偿的执行过程分为三个步骤:

(1)刀补建立 刀具从起刀点接近工件过程中,根据 G41 或 G42 所指定的刀补方向,控制刀具中心轨迹相对原来的编程轨迹伸长或缩短一个刀具半径值的距离。

(2)刀补进行 在 G41 或 G42 程序段后,刀具中心始终与编程轨迹相距一个偏置量,直到刀补注销。

(3)刀补注销 在刀具离开工件返回到起刀点的过程中,根据刀补撤销前 G41 或 G42 的情况,控制刀具中心轨迹相对原来的编程轨迹伸长或缩短一个刀具半径值的距离,使刀具中心和编程轨迹重合。

5.3 CNC 系统的组成

5.3.1 CNC 系统的基本组成

CNC 系统由程序介质、输入输出装置、计算机数字控制装置(CNC 单元)、PLC、主轴控制单元和进给伺服驱动系统组成,如图 5-3-1 所示。

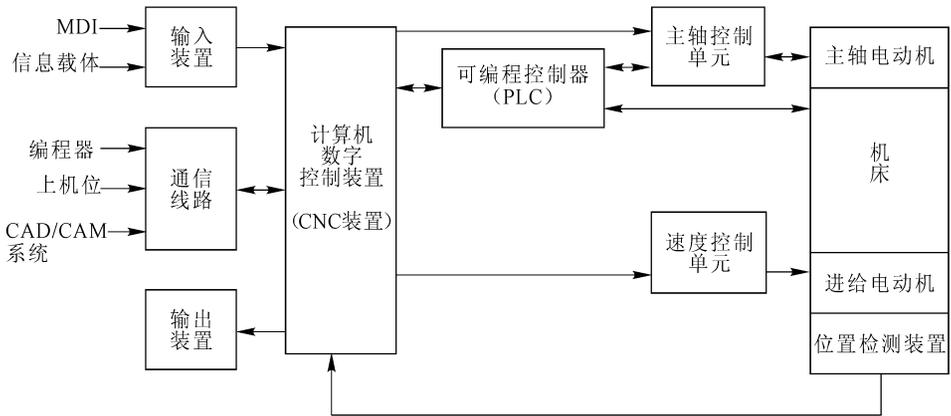


图 5-3-1 CNC 系统的组成

就现代数控系统而言,几乎都采用了微处理器构成的计算机装置,即微处理器数控系统(MNC)。这样的数控系统一般由中央处理单元(CPU)和总线(BUS)、存储器(ROM, RAM)、输入输出(I/O)接口电路以及相应的外部设备、PLC、主轴控制单元、进给控制单元等组成,如图 5-3-2 所示。

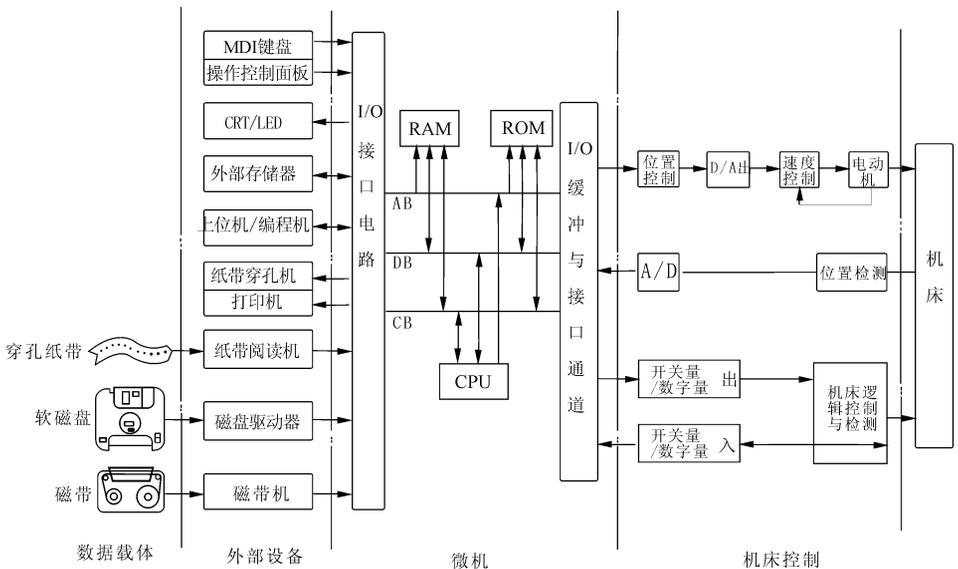


图 5-3-2 微处理器数控系统的组成

5.3.2 各个组成部分的作用

程序介质主要是记录数控加工程序信息的,在数控机床上加工零件时,要把被加工零件的全部工艺过程、工艺参数和位移数据,以数字信息的形式记录在程序载体上,输入 CNC 装置,然后再进行加工。常用的程序介质有穿孔纸带、磁带和磁盘等。

程序输入、输出装置和通信设备是数控系统和外界交换信息的通道。对应不同的程序介质有不同的输入装置,穿孔纸带用光电阅读机,而磁带和磁盘分别用盒式录音机和磁盘驱动器。现代数控装置还可以通过其他的方式输入加工程序,如通过键盘方式输入和编辑程序(MDI);通过通信方式输入其他计算机程序编辑器、自动编程器、CAD/CAM 系统或上位机所提供的数控加工程序。

数控系统的核心是计算机数控装置,数控系统的主要信息处理由计算机数控装置实现。电子技术和微机技术的发展,使计算机数控装置的性能和可靠性不断提高,成本不断降低,其优越的性能价格比,推动了数控机床的普及和发展。

可编程序控制器(PLC)实际上也是一种专用微机。在数控系统中可编程序控制器主要用来实现辅助功能(M,S,T),其控制的主要是开关量。由于用 PLC 取代了



传统的机床电气逻辑控制装置,使系统更小巧,灵活性和可靠性也大大提高,易于实现复杂的控制功能,而且具有与上位机连接和远程通信的功能。

主轴控制单元控制的主要是主轴的转速,而且和可编程序控制器配合可以实现主轴的准确定位。现代数控机床的主轴都采用交流电机驱动,相应的主轴控制单元大多采用变频调速进行控制,也有一些采用伺服主轴。通常主轴控制单元都由一个处理器控制。

数控系统所发出的控制指令,是通过进给伺服系统驱动机械执行部件,最终实现精确的进给运动的,因此,进给伺服系统实际上是一个高精度的位置跟踪与定位系统。它的性能直接关系到数控系统的精度和速度。进给伺服系统有速度控制和位置控制两个控制环路,通常由计算机数控装置处理位置控制信息,由速度控制单元进行速度控制。

5.4 数控系统的硬件结构

数控系统是由输入输出装置、计算机数字控制装置(CNC 单元)、主轴控制单元和进给伺服驱动系统、机床电气逻辑控制装置(PLC)组成,而这几个部分都通过 I/O 接口进行互联。数控装置是数控系统的控制核心,其硬件和软件实现各种数控功能,它具有与数控系统其他组成部分的接口;输入/输出装置一般采用数控面板和其他常规输入/输出装置(如纸带阅读机、盒式磁带录音机等),用以输入数控数据,监控数控系统的运行;驱动控制装置一般是以轴为单位的独立模块,用以控制各个轴的运动,其中进给轴的位置控制部分常在数控装置中以硬件位置控制模板或软件位置调节器实现,即由数控装置接收实际位置反馈信号,将其与插补计算出的指令位置相比较,通过位置调节作为轴位置控制给定量,再输出给伺服驱动系统;机床电气逻辑控制装置接收数控装置发出的数控辅助功能控制指令,进行机床操作面板及各种机床机电控制/监测机构的逻辑处理和监控,并为数控装置提供机床状态和有关应答信号,在现代数控系统中机床电气逻辑控制装置已经由可编程序控制器(PLC)取代。

5.4.1 数控系统中的接口

在制造系统中,数控系统硬件部分之间的接口按功能可以分为三大类:①数控



装置与上位系统之间的接口;②数控装置与人机交互设备之间的接口;③数控装置与下位系统之间的接口。

如图 5-4-1 所示,将制造系统分为了几个模块,而几个模块之间有接口互联。上位系统是 DNC 系统、FMS 系统、CIMS 系统的单元或上位计算机,它一方面为数控系统进行数控加工程序和刀具数据等做准备,另一方面对数控系统进行远程控制,数控装置可以将修改过的程序、系统状态、故障和报警信号等信息传送给上位系统;数控系统与用户之间进行信息交互的设备可以是键盘、操作面板的按键按钮、显示器和手轮等,通过这些设备可以进行人工的数控数据的输入、数控系统的操作和加工控制,数控装置通过显示器向用户显示数控系统的工作状态和相关数据;下位系统指的是驱动和执行机构、检测元件和机床电器控制器,它们接受数控系统的位置、速度、驱动电流给定以及开关功能控制信号,并向数控系统反馈系统实际位置、过程数据和故障报告等。

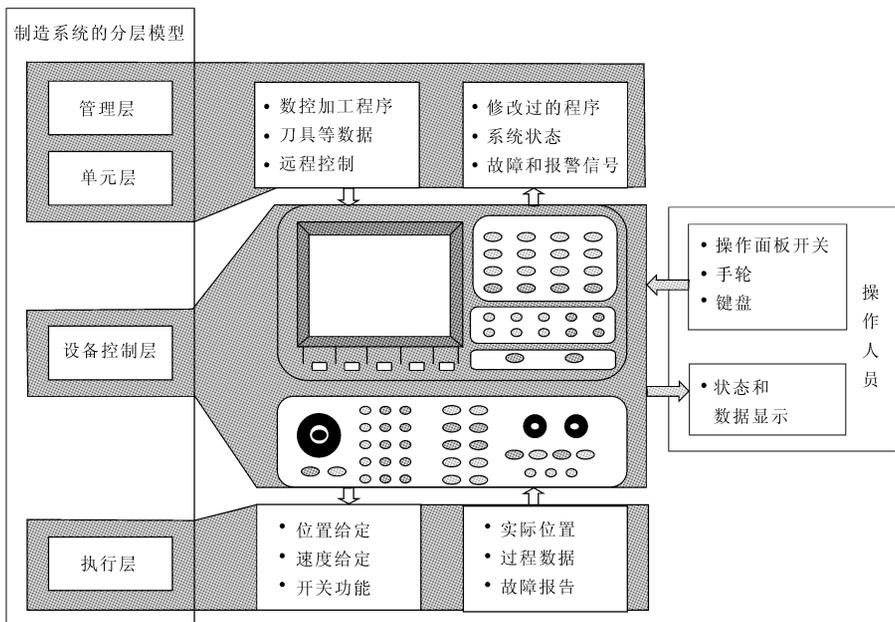


图 5-4-1 在制造系统中数控装置的功能接口

具体地来讲,数控装置与上位系统的连接一般通过串行接口(RS232,RS422等)进行点到点的连接,数控装置与外部编程系统的连接也采用串行接口。数控面板通



过键盘接口和显示控制接口与数控系统相连,机床操作面板及其他二进制形式的开关量和应答信号通过开关量 I/O 接口与数控装置相连。数控装置与进给轴和主轴的驱动接口一般可以采用 $\pm 10\text{V}$ 模拟量接口(对于模拟量驱动的数控系统而言)。按照不同的传感器类型与传感器的连接常常使用开关量输入接口,或采用模拟量接口。内装式 PLC 作为数控装置内部的一个功能模块,通过内部系统总线与其他功能模块相连,外置式 PLC 可以通过电缆与数控装置相连,也可以与数控装置的串行通信接口相连。

5.4.2 数控装置的硬件结构

数控装置是数控系统的核心,其硬件结构按 CNC 装置中微处理器的个数可以分为单微处理器结构和多微处理器结构;按 CNC 装置中各印刷电路板的插接方式可以分为大板式结构和功能模块式结构。

1. 单微处理器结构和多微处理器结构

(1)单微处理器结构 在单微处理器结构的 CNC 中,只有一个微处理器,其他功能部件,包括存储器、各种接口、位置控制器等都通过总线与微处理器相连,采用集中控制、分时处理各个任务。在这种结构的 CNC 装置中,所有的数控功能和管理功能都由一个微处理器来完成,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限制。

(2)多微处理器结构 多微处理器结构数控装置中有两个或两个以上微处理器。现在使用的多微处理器系统有三种不同的结构,即主从式系统、总线式多主 CPU 系统和分布式系统。

如图 5-4-2 所示是一个主从式系统,它有一个微处理器为主微处理器,其他为从微处理器,各微处理器也都是完整而独立的系统。但是只有主微处理器能控制总线,并访问总线上的资源,主微处理器通过总线对从微处理器进行控制、监视,并协调多个微处理器系统的操作;从微处理器只能被动地执行主微处理器发出的指令,或完成一些特定的功能,不能与主微处理器一起进行系统的决策和规划工作,只能访问自己的局部资源,一般不能访问总线上的资源。主、从微处理器间的通信可以通过 I/O 接口进行应答,也可以通过自己的总线读/写同一个存储器。

如图 5-4-3 所示是一个总线式多主 CPU 系统,它有一个并行主总线连接着多个微处理器系统,每个 CPU 可以直接访问所有系统资源,包括上述并行总线、总线



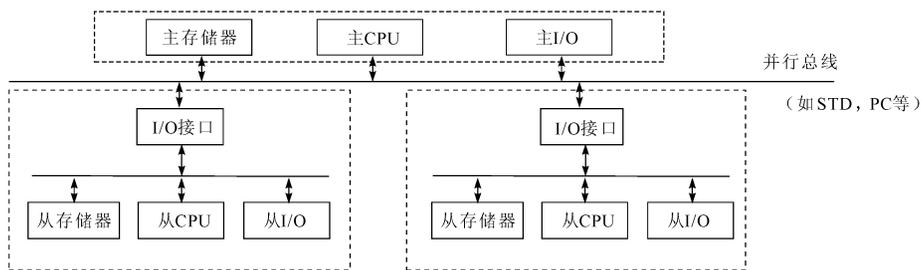


图 5-4-2 主从式多微处理器系统结构

上的全局存储器及 I/O 接口,同时还允许自由而独立地使用各自的所有资源,例如局部存储器、局部 I/O 接口等。各微处理器从逻辑上不分主次。这样需要在系统中加入总线仲裁器以解决多个 CPU 争用并行总线的问题,它为各个 CPU 分配了使用总线的优先级,这样在任何时刻只有总线优先级最高的 CPU 可以使用总线。

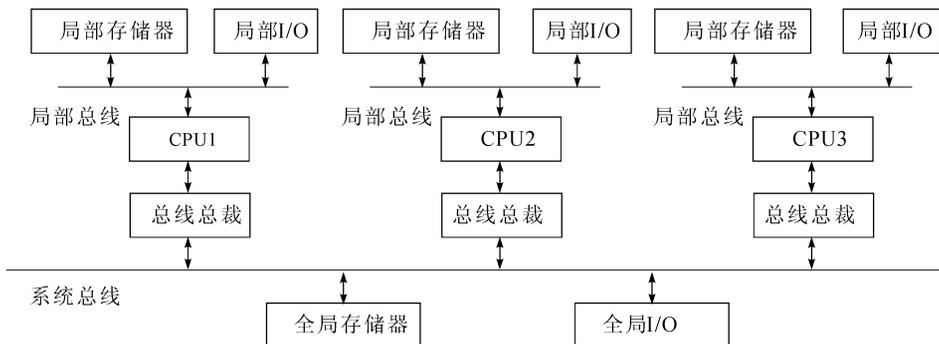


图 5-4-3 总线式多主 CPU 系统结构

如图 5-4-4 所示是一个分布式系统,其中每个 CPU 与自己的局部存储器和 I/O 组成一个完整而独立的系统。各 CPU 之间通过一条外部的通信链路连接在一起,它们之间的联系以及对共享资源的使用都要通过网络技术来实现。

目前计算机技术飞速发展,微处理机的性价比也越来越高,因此 CNC 装置多采用多处理器结构。在 CNC 装置内部,一般采用主从式和总线式多主 CPU 结构。数控装置与伺服装置、PLC、传感器等的连接可以采用分布式多处理器结构。

2. 大板式结构和功能模块式结构

(1) 大板式结构 大板式结构 CNC 系统的 CNC 装置有主电路板、位置控制板、PLC 板、图形控制板和电源等组成。主电路板是大印刷电路板,其他电路板是小印

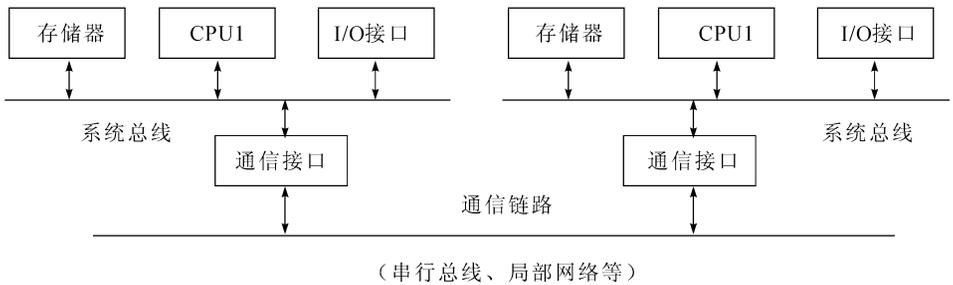


图 5-4-4 分布式多微处理器系统结构

刷电路板,它们插在大印刷电路板上的插槽内共同组成 CNC 装置。图 5-4-5 为大板式结构示意图。

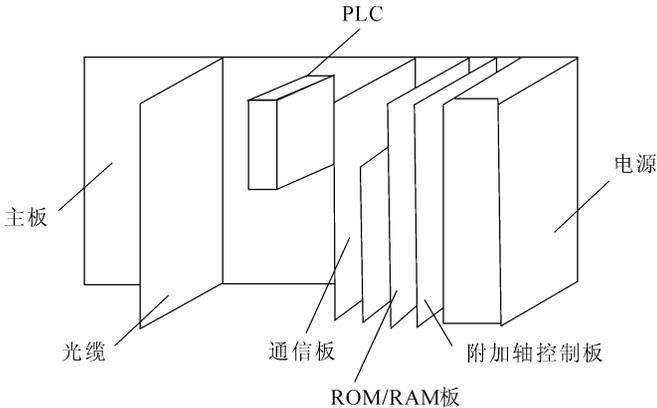


图 5-4-5 大板式结构示意图

FANUC CNC 6MB 就采用了这种大板式结构,其框图如图 5-4-6 所示。图中主电路板(大印刷电路板)上有控制核心电路、位置控制电路、纸带阅读器接口、三个轴的位置反馈量输入接口和速度控制量输出接口、手摇脉冲发生器接口、I/O 扩展板接口和六个小印刷电路板的插槽。控制核心电路为微机基本系统,由 CPU、存储器、定时和中断控制电路组成。存储器包括 ROM 和 RAM,ROM(常用 EPROM)用于固化数控系统软件,RAM 用于存放可变数据,如堆栈数据和控制软件暂存数据等。数控加工程序和系统参数的可变数据的存储区域应具有掉电保护功能(如磁泡存储器和带电池的 RAM),这样当主电源不供电时,能保持其信息不丢失。六个插槽内可分别插入用于保存数控加工程序的磁泡存储器板、附加轴控制板、CRT 显示控制

和 I/O 接口、扩展存储器板、可程序控制器 PMC 板和传感器控制板等。

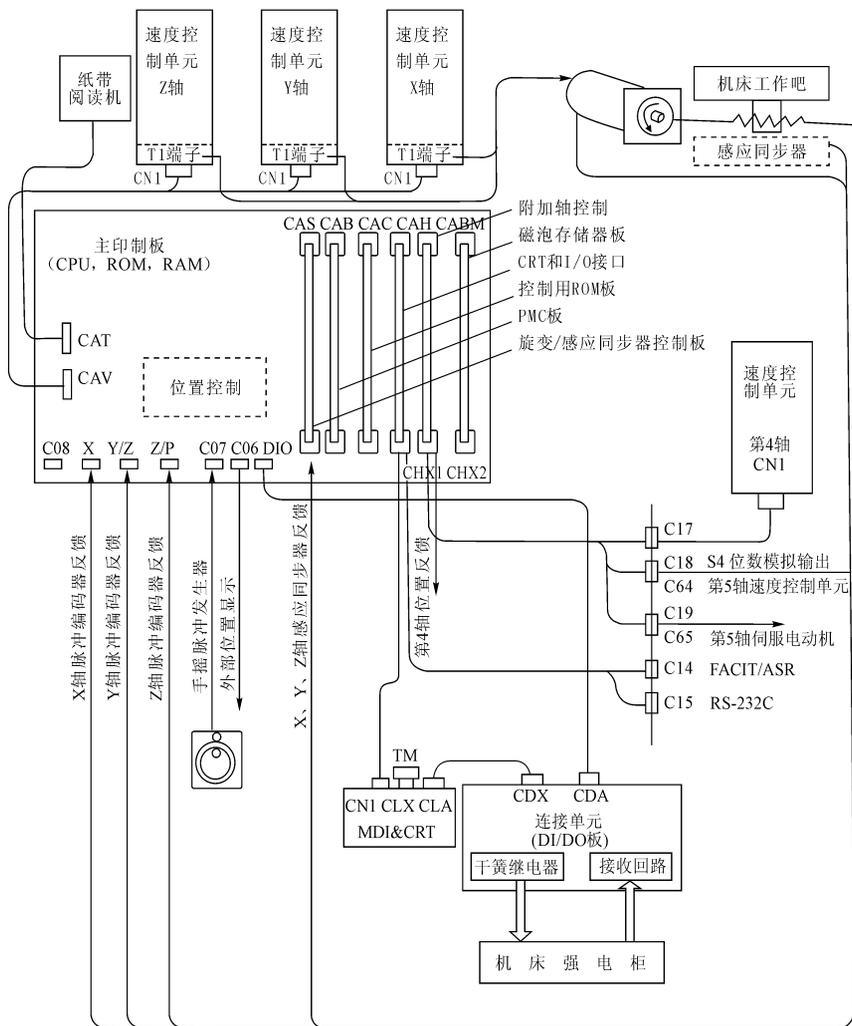


图 5-4-6 FANUC CNC 6MB 框图

(2) 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 装置按功能划分为模块, 硬件和软件的设计都采用模块化设计方法, 每个功能模块被做成尺寸相同的印刷电路板(称为功能模块), 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

及所需功能模块,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。常见的功能模板有 CNC 控制板、位置控制板、PLC 板、图形板和通信板等。

图 5-4-7 为西门子公司的 SINUMERIK 840C 系统组成框图,其中中央控制器由各种模块化的单元组成,包括主电源模块、中央服务板(CSB)、测量模块、NC 模

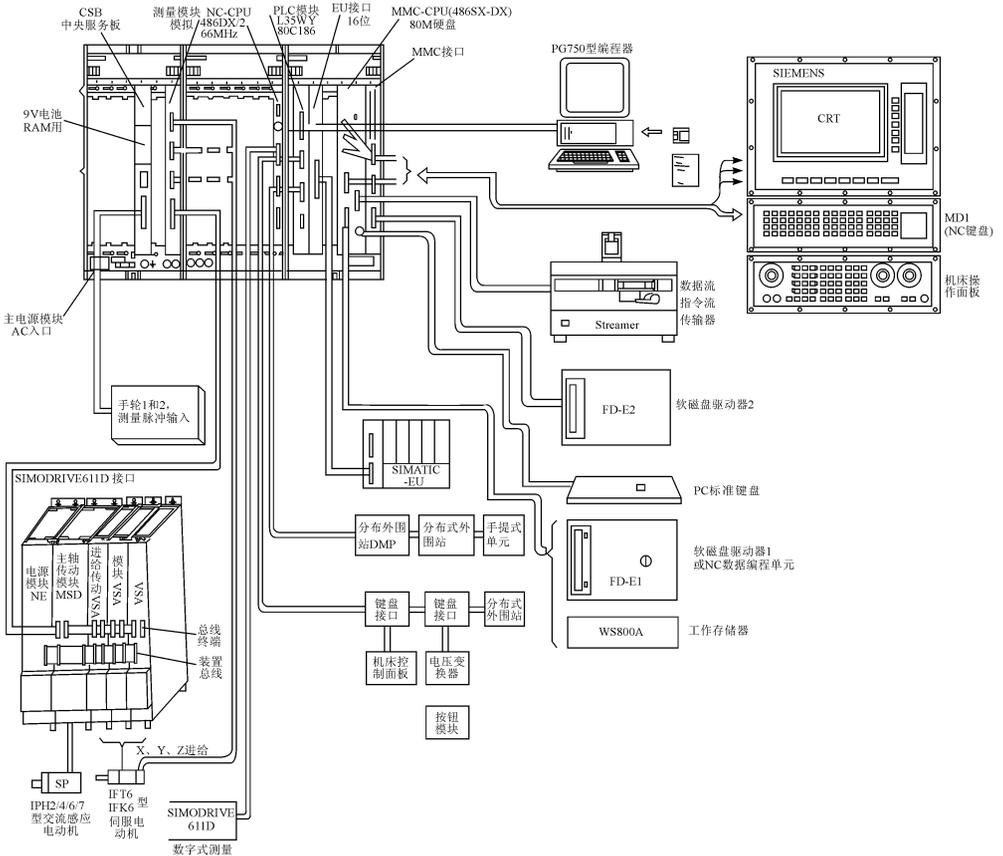


图 5-4-7 SINUMERIK 840C 功能模块式系统框图

块、PLC 模块、扩展 EU 模块、人机控制器(MMC)及其接口模块等。这些模块装在统一的框架上,拆装非常方便。用电缆将这些模块与外设(CRT/MDI、操作面板、传动装置、编码器、数据的输入输出设备等)相连,构成一个大的系统。

5.5 数控系统的软件结构

5.5.1 CNC 系统软件的构成

在数控系统中,有多种形式的软件程序存在。数控机床的加工过程是用数控加工程序编写并输入数控系统的,它是将 G、M 等功能字组成的程序段按零件加工顺序进行排列所形成的程序。对输入的数控加工程序信息的译码、预处理及插补等功能是在数控系统的数控功能程序下实现的,数控功能程序要在系统管理软件的控制和协调下实现,数控功能程序和系统管理软件一起组成了数控系统程序,以前受计算机运行速度等性能的限制,数控系统程序采用非常麻烦的汇编语言来编写,现在,一般采用高级语言来编写,如 C 或 C++ 等。在现代数控系统中,一般使用可编程序控制器(PLC)进行数控加工程序中有关机床电器的逻辑控制和开关信号控制,在 PLC 中,这些逻辑处理和控制在用 PLC 控制程序来实现的,它常采用梯形图语言编写。此外,数控功能程序和 PLC 控制程序的运行也都需要相应的计算机软件的支持。

如图 5-5-1 所示为数控系统软件结构。数控的主要功能体现在数控功能程序上,数控功能程序包括数控的核心程序,如:数控加工程序的译码、预处理和插补处理,也包括数控加工程序编辑器、加工模拟器、刀具管理和故障监测与诊断这些可选功能。

硬件和各功能程序的连接由数控系统的管理软件实现,它除了存储器管理和输入、输出管理外,还承担各个过程的同步任务。管理软件分为不依赖于硬件部分和依赖于硬件的部分,不依赖于硬件的管理软件进行时间管理、任务管理、存储器管理、内部通信和同步;依赖于硬件的管理软件有外设驱动管理和实时管理,前者负责数控系统外部设备的软件控制,如图形显示器、键盘和通信设备的控制,后者负责中断管理和各种处理芯片管理等实时任务。适合于数控的标准管理软件必须有多任务管理能力,因为许多功能程序必须并行执行,如数控加工程序预处理和插补处理,此外,还要有实时处理能力,也就是说,具有较高优先权的任务将被及时处理,它排挤了可能出现的具有较低优先权的任务,如:从紧迫性来看,实时碰撞监测的优先权要比数据显示任务的优先权高。通过实时处理能力对一些过程的外部事件可及时做出决定性反应,确保系统安全。

现代数控系统多采用软件集成环境,这种集成环境独立于数控功能,并作为数控功能程序的操作平台。集成环境中常常提供了图形库和实时数据库,通过图形开

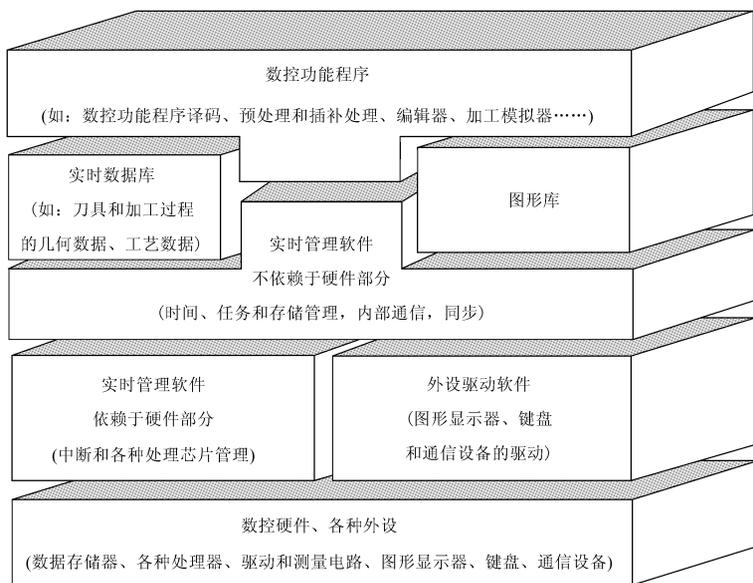


图 5-5-1 数控系统软件结构

发工具,用户可以构造自己的操作界面;实时数据库为用户提供了一个开放的数据(如刀具和加工过程的几何数据、工艺数据等)存取接口,从而方便用户对一些关键数据进行管理和安全的访问。

5.5.2 CNC 系统软件的功能

CNC 系统软件的功能包括数控加工程序的解释、几何数据处理、管理程序、监测和诊断、等等。

1. 数控加工程序的解释功能

数控加工程序的解释包括程序的输入和程序的译码。

(1) 输入程序 输入程序的功能有两个:一是把零件程序从阅读机或键盘经相应的缓冲器输入到零件程序存储器;二是将零件程序从零件程序存储器取出送入缓冲器。

输入程序中均有阅读机中断处理程序、键盘中断处理程序和输入管理程序。阅读机中断处理程序将光电阅读机读入的零件加工程序,通过中导孔产生中断的方式逐行读入缓冲器,经过有效性判别、纸带垂直奇偶校验和水平奇偶检验、代码转换,

在输入管理程序的配合下将内部代码存入零件程序存储区。如用键盘输入零件程序(MDI方式),则每次按键表示向CPU申请一次中断,调出键盘服务程序,对相应的键盘命令进行处理。一次中断只读一个字符,而输入管理程序则负责缓冲器的管理、读入字符的存放等。

图5-5-2为阅读机输入程序的流程图。图5-5-2a为输入程序的主程序,图5-5-2b为中断处理服务程序。从图可知,当启动了纸带输入机后,主程序等候纸带输

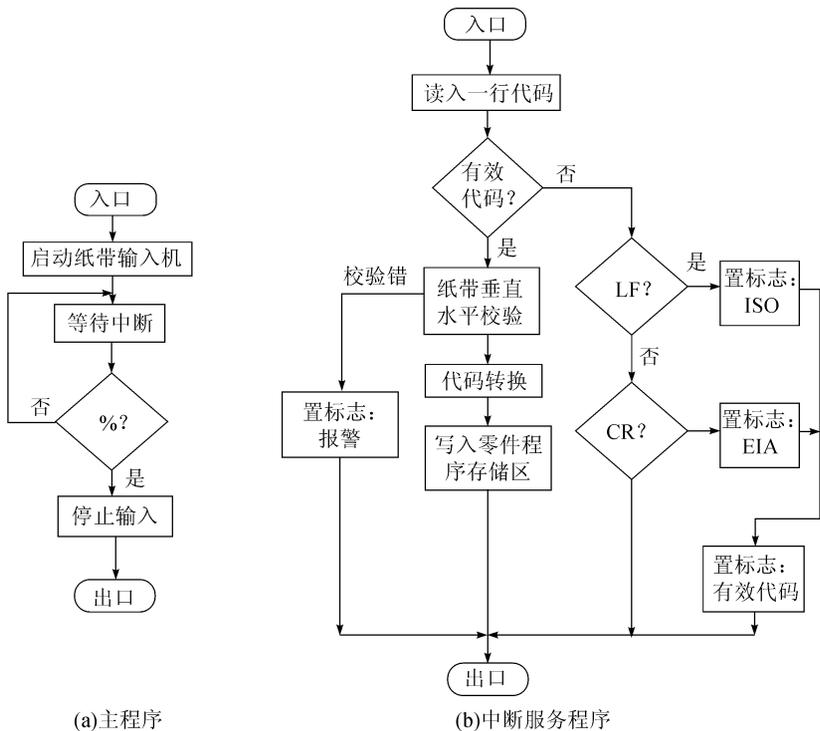


图5-5-2 输入程序流程图

入机中断,这时CPU可处理其他工作。当送完纸带的一排孔后,便通过中导孔向CPU发出中断请求信号,CPU则转入中断服务程序,将送来的信息经过中断程序的处理后存入零件程序存储区,然后CPU返回输入主程序。其中纸带垂直奇偶校验是指每个程序段必须输入偶数行代码,否则要以空格码(Space)填补而使之成为偶数行。纸带程序水平奇偶校验指每行代码中“1”的个数必须为偶数(ISO码)或奇数(EIA码)。代码转换是指将数控码(ISO或EIA码)转成内部码。进行代码转换是因为原来的代码排



列规律不明显,而转换为内部码后数字码0~9可以很容易直接进行二-十进制转换,且文字码与符号码也有了明显区别,从而使译码速度加快。

(2) 译码程序 在输入的零件加工程序中,含有零件的轮廓信息(线型、起点、终点坐标值)、工艺要求的加工速度及其他辅助信息(换刀、冷却液开/关等)。这些信息在计算机作插补运算与控制操作之前,需按一定的语法规则解释成计算机容易处理的数据形式,并以一定的数据格式存放在给定的内存专用区间,即把各程序段中的数据根据其前面的文字地址送到相应的缓冲寄存器中。译码就是从数控加工程序缓冲器或 MDI 缓冲器中逐个读入字符,先识别出其中的文字码和数字码,然后根据文字码所代表的功能,将后续数字码送到相应译码结果缓冲器中。译码程序的功能主要包括代码识别和功能代码的解释两部分。

①代码的识别。代码识别就是通过软件将取出的字符与内部码数字相比较,若相等则说明输入了该字符,并设置相应标志或转成相应处理。由于这种查询方式是逐个地串行进行,因此速度较慢。但译码的实时性要求不高,可在数控系统软件的后台程序中完成,即可利用系统软件的空余时间来进行译码。当然,在保证上述代码识别功能的前提下,可采取一些有效措施来提高识别速度。例如,可以先根据平时的经验将字符出现的频率大致排序,然后按出现频率高低的顺序进行识别。另外,还可将文字码与数字码分开处理。

②功能代码的识别。要进行功能代码的译码,首先要建立一个与数控加工程序缓冲器相对应的译码结果缓冲器(又称文字缓冲寄存器)。对于具体的 CNC 系统,译码结果缓冲器的格式和规模是固定不变的。最简单的方法是在 CNC 装置的存储器中划出一块内存区域,并为数控加工程序中可能出现的各功能代码对应一个内存单元,存放数值或特征字,后续处理软件根据需要到相对应的内存单元中取出数控加工程序信息,并予以执行。由于 ISO 标准或 EIA 标准中规定的字符和代码很丰富,因此相应地也要求设置一个庞大的表格,这样不但会浪费内存,而且会影响译码速度。为此必须对译码结果存储区的格式加以规范,尽量减少其规模。

2. 几何数据处理功能

几何数据处理功能包括数控加工程序段的几何变换、刀具补偿计算、插补计算、速度预计算以及辅助功能的处理等。

几何变换和补偿计算是为了数控加工程序编制过程能相对独立,不用事先考虑实际使用的机床类型和刀具几何尺寸。在数控系统中允许采用多种坐标系,要求操作者



在工件装夹后,具体执行程序加工前,输入工件零点相对于机床零点的偏移量,坐标几何变换程序确定各种坐标系下的坐标值与机床坐标系的关系。加工过程中所采用的刀具的几何形状各异,当操作者在加工前输入了实际使用的刀具参数(主要是刀具长度和刀具半径)后,应使刀架相关点按刀具参数相对编程轨迹进行偏移,即进行刀具补偿,补偿计算程序完成各种刀具补偿计算;另外,补偿计算程序还必须协调数控装置外部随机的、动态的影响,如:操作者利用机床操作面板上的选钮开关,对进给速度和主轴转速的修正,以及由随机负载或机床结构的热变形等造成的影响。

插补处理的任务,包括插补计算和按一定速度的插补输出。由前面的介绍所知,插补计算是在一个加工程序段轨迹的起、始点之间,进行中间点的计算,分别向各个坐标轴发出方向、大小都确定的协调的运动序列命令,通过各个轴的运动合成,产生数控加工程序段要求的运动轨迹。

速度预计算程序进行轨迹运行的自动加减速处理,使插补速度命令与系统实际的加速度相适应,当出现大的速度变化时,因受系统动态性能的影响,系统难以跟踪给定的轨迹,此时速度预计算程序自动取消数控加工程序给定的轨迹速度,以便保证轨迹精度。更好的速度预计算程序具有超前功能,它预先分析多个数控加工程序段,进行相应速度预计算和处理。

辅助功能处理是指换刀、主轴启动、停止,冷却液开、停等辅助功能的处理(即M,S,T功能的传送及其先后顺序的处理)。

3. 管理程序功能

当一个程序段开始插补加工时,管理程序即准备下一个数据段的读入、译码、处理,调用各功能子程序,准备好下一段数据。一旦本数据段加工完毕便立即开始下一段插补。为数据输入、处理及切削加工过程服务的各个程序均由管理程序调度。管理程序还要对面板命令、时钟信号、故障信号等引起的中断进行处理。在实际系统中,一个主程序将整个加工过程串起来,主控程序对输入的数据进行分析判断后,转入相应的子程序处理,处理完毕后再返回,对数据进行分析、判断、运算。在主程序空闲时,可以安排CPU执行预防性诊断程序,或对尚未执行程序的输入数据进行预处理等。其中中断处理是重点,因大部分实时性较强的控制步骤都要由中断程序来完成。有的系统将行程超程和报警、插补等分为多级中断,根据优先级决定响应的次序。

4. 监测和诊断功能

为保证加工过程的正确进行,避免机床、工件和刀具的损坏,数控系统具备监测



和诊断功能。这种功能可以直接置于数控装置的控制程序中,也可以为附加的、可直接执行的功能模块形式。监测和诊断功能可以对机床进行,如对机床的动态运行、几何精度和润滑状态的检查处理;对数控系统本身的硬件和软件进行,如数控系统硬件的配置、硬件电路导通和断开、各硬件组成部分功能及各软件功能的检查处理;还可以对加工过程进行检查,如对刀具磨损、刀具断裂、工件尺寸和表面质量的检查处理。对数控系统进行完全的监测和诊断是很复杂的,需要通过几个或多个监测和诊断功能模块的运行及硬件的配合才能进行故障定位。

当然,现代数控系统还具有很多先进的功能,比如图形支持的加工模拟、测量和校正功能,通信功能,以及在网络和现场总线基础上建立起来的 FMS、CIMS 等,就需要更加强大的硬件和软件的支持。

5.6 典型数控系统介绍

数控机床配置的数控系统品牌繁多,性能和结构也不尽相同。德国 SIEMENS 公司和日本 FANUC 公司是世界上主要的数控系统生产厂商。目前国内的数控机床使用的数控系统主要是这两家公司的产品,此外,还有西班牙的 FAGOR、德国的 HEIDENHAIN、法国 NUM 等公司的产品。近年来数控机床在我国迅速发展,一些国内公司的数控产品也占有了一定的市场份额,如华中数控公司、广州数控公司、北京航天机床数控集团公司等。在这里着重讲解 SINUMERIK 802C base line 系统。

SINUMERIK 802C base line 是在 SINUMERIK 802C 的基础上新开发的全功能数控系统。它可以控制 2 到 3 个伺服电机进给轴和一个伺服主轴或变频主轴,连接 SIMODRIVE 611U 或 SIMODRIVE base line。当系统匹配 SIMODRIVE 611U 或 SIMODRIVE base line 时,连接 1FK7 系列伺服电机。

SINUMERIK 802C base line 系统由 CNC 控制器、驱动器和电机、电缆三大部分组成。其中 CNC 控制器部分包括集成式、紧凑型 CNC 控制器,配备 8"液晶显示器、全功能操作键盘、机床操作界面。驱动器和电机方面,SIMODRIVE base line 带 1FK7 的配置有 3 种:3Nm+6Nm,6Nm+8Nm,11Nm,光轴,带/不带抱闸;使用 SIMODRIVE 611U 与 1FK7 的配置为:3Nm/6Nm/8Nm/11Nm,光轴,带/不带抱闸。电缆部分包括连接 CNC 控制器到驱动器的速度给定值电缆和位置反馈值电缆和连接驱动器到电机的编码器电缆和电动机电缆。



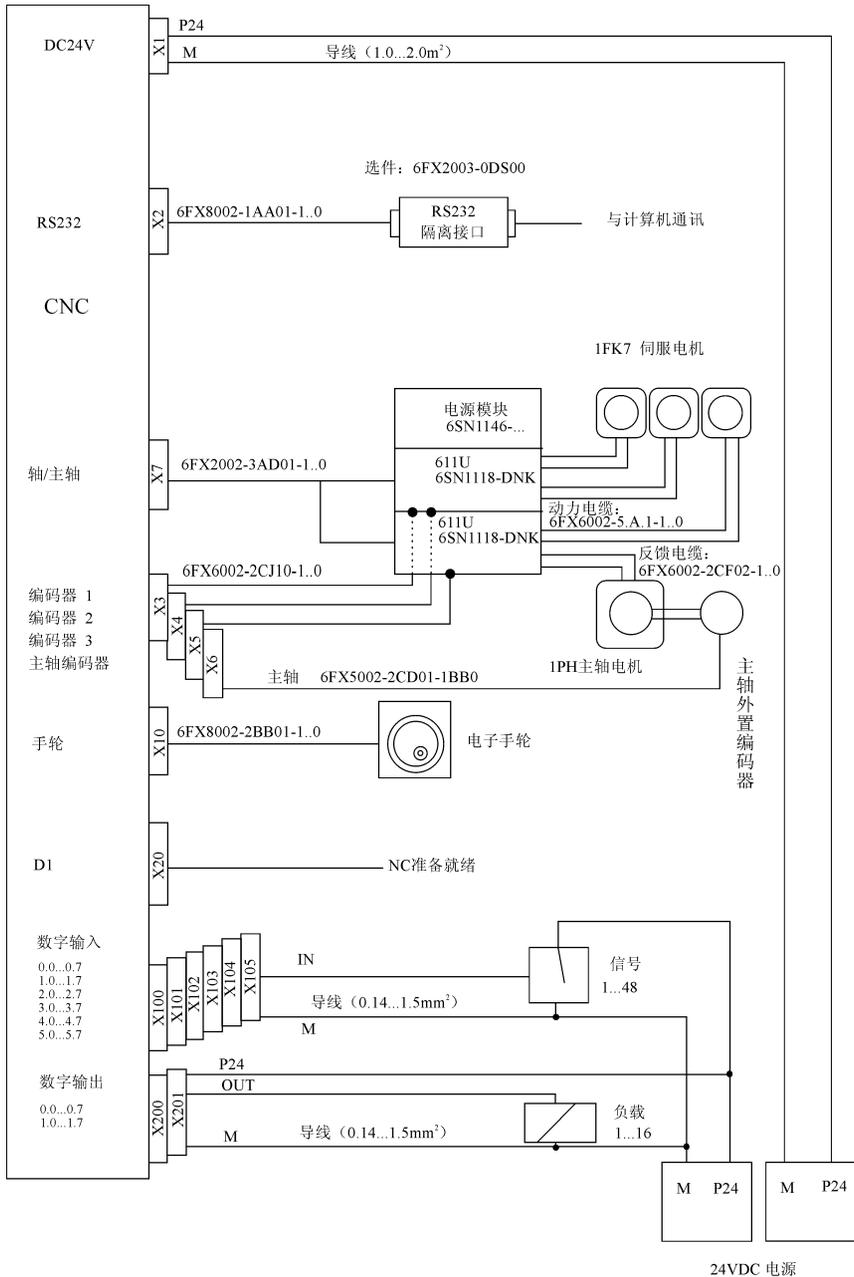


图 5-6-1 SINUMERIK 802C base line 系统的连接



1. SINUMERIK 802C base line 系统的连接

图 5-6-2 是 SINUMERIK 802C base line CNC 控制器与伺服驱动 SIMODRIVE 611U 和 1FK7 伺服电机的连接图,通过该图可以深入地了解系统的结构和内部信号的处理过程。

①X1 电源端子,它有三个端子,分别是直流 24V,24V 地(M)和保护地(PE),由此连接 CNC 系统电源。系统电源连接可采用共地方式或者浮地方式,系统出厂是为共地方式(PE 和 M 短接),在没有良好接地的情况下,建议将 PE 和 M 之间的短接片摘除。

②X2 串行通信接口 RS232,在使用外部 PC 和 SINUMERIK 802C base line 进行数据通信或编写 PLC 程序时使用。CNC 和计算机连接方法如下图 5-6-2 所示。

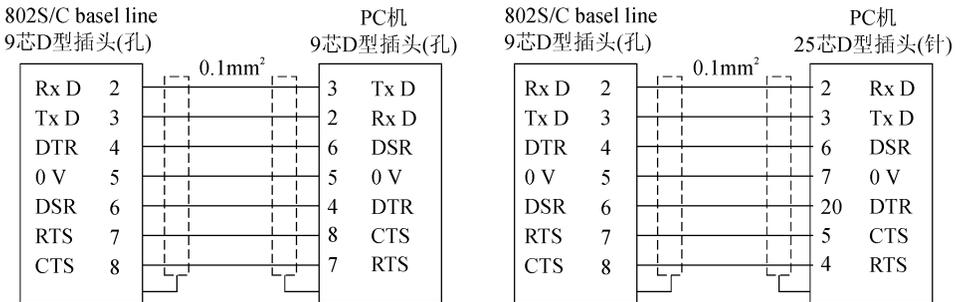


图 5-6-2 802S/C 与 PC 机通信接口接线图

电缆两端插头的金属壳体必须通过屏蔽网相互联通,确保计算机与 802S/C base line 的 CNC 共地,而且 CNC 与计算机之间的通信电缆的连接和断开,必须在断电状态下进行。

③X3/4/5/6 编码器接口 X3, X4, X5 和 X6 均为 SUB-D15 芯孔插座,其中 X3, X4 和 X5 用于进给轴的编码器接口, X6 作为主轴编码器接口使用,它们接口引脚分配均相同。

④X7 驱动器接口 X7 是一个 SUB-D50 芯孔插座,分别接 X、Y、Z 和主轴电机驱动的给定信号和使能信号。

⑤X10 手轮接口,通过手轮接口 X10 可以在外部连接两个手轮, X10 接口有 10 个接线端子。

⑥X20 高速输入接口,在 802S 中可以接 3 个接近开关,用于得到返回参考点的零位脉冲信号,在 802C 中用于 NC 就绪信号。



⑦X100 ~ X105 数字输入接口,共有 48 个数字输入接线端子,这些接线端子在 PLC 中进行了具体定义。X100 的编址为 I0.0 ~ I0.7, X101 的编址为 I1.0 ~ I1.7, 依此类推 X105 的编址为 I4.0 ~ I4.7。

⑧X200 ~ X201 数字输出接口,共有 16 个数字输出接线端子, X200 的编址为 Q0.0 ~ Q0.7, X201 的编址为 Q1.0 ~ Q1.7。

2. SIMODRIVE 611U 伺服驱动器的连接

SIMODRIVE 611U 分为电源馈入模块和控制模块两大部分。SINUMERIK 802C base line 可以与 SIMODRIVE 611U 配合使用,其电缆连接方式及面板接口定义,如图 5-6-3 所示。

其中的主要接口和端子介绍如下。

①X111, X121 电源馈入模块状态信号接口,电源馈入模块的反馈信号 51、72 应反馈给 PLC, PLC 在使能生效后,应检测该反馈信号,如果信号异常(如 I2t 温度报警),应使电源馈入模块自动进入断电时序。

②电源馈入模块的控制端子 T48, T63, T64 必须按时序由 PLC 控制。上电时, T48 - T63 - T64 依次与公共端 9 闭环(延时 > 50ms); 断电前, T64 - T63 - T48 依次与公共端 9 断开(延时 > 50ms); 端子 112 与 9 应保持短接; 端子 NS1 与 NS2 保持短接; 在电源馈入模块的 380V 进线断开之前, 必须断开端子 48 与端子 9 的连接。

③X141 其中 7 端子为 +24V, 45 端子为 +15V, 44 端子为 -15V, 10 端子为 -24V, 15 端子为地线, R 端子为伺服报警复位, 高电平到低电平有效。

④X171, X172 NS1 和 NS2 一般在低功率时直接短接, AS1 和 AS2 为信号触点。

⑤电源模块指示灯 共有 6 个, 不同的灯代表不同的含义, 具体如下图 5-6-4 所示。

⑥X411, X412 外部接线接口, 连接电机的编码器反馈信号。对于双轴模块动力电缆与反馈电缆绝对不能交叉。而且, A 通道的动力由 A1 接电机 1 的动力插座, 反馈电缆由 611U 模块的 X411 接至电机 1 的反馈插座; B 通道的动力由 A2 接电机 2 的动力插座, 反馈电缆由 611U 模块的 X412 接至电机 2 的反馈插座。

⑦X421 AS1, AS2 端子为信号触点, 闭合表示脉冲已使能。

⑧X431 P24 端子为 +24V 外部电源, 用于数字量输出; 633 端子为脉冲使能, 一般与端子 9 短接; M24 和 19 端子为 24V 参考地。

⑨X441 为模拟量输出口, 15 端子为模拟信号的参考地。

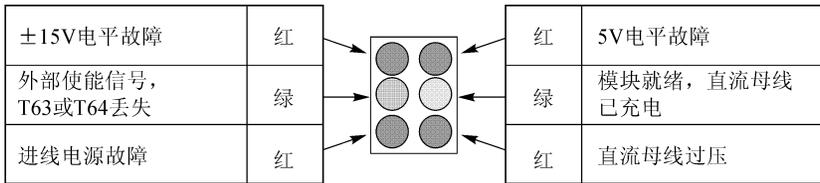


图 5-6-4 电源模块指示灯含义

⑩X451, X452 连接 802C base line CNC 的 X7 接口,其中 56,14 为各个轴的给定信号,65,9 为各个轴的使能信号。

⑪X461, X462 WSG 接口,连接 802C base line CNC 对应轴的编码器反馈接口。

⑫数字量输入输出 I0. A ~ I3. A, I0. B ~ I3. B 为数字量输入; O0. A ~ O3. A, O0. B ~ O3. B 为数字量输出。

⑬X471 RS232 串行接口,主要用于 611U 与 PC 机进行通信,我们可以借助于专用软件 SimCOM U 对 611U 驱动模块进行参数设置和优化。PC 机与 SIMODRIVE 611U 串行电缆的连接如图 5-6-5 所示。

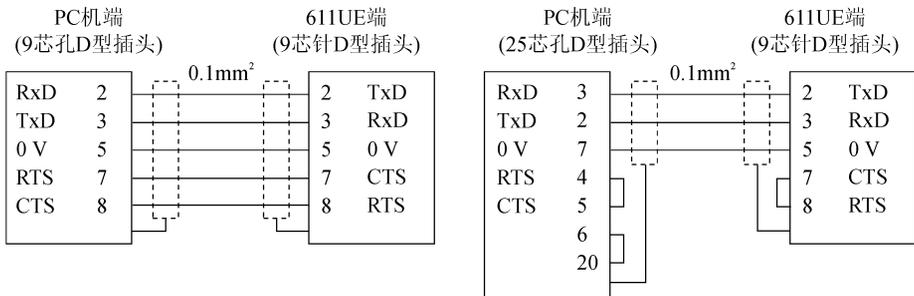


图 5-6-5 SIMODRIVE 611U 与 PC 机通信接口接线图

5.7 数控系统的参数设置及通信

5.7.1 NC 参数设置

1. 系统配置

SINUMERIK 802C base line 出厂时的系统配置为车床系统,即坐标轴设定第一轴为 X 轴、第三轴为 Z 轴、第四轴为主轴,加工工艺设定为切削;如果需要控制铣床,则需要装入铣床初始化文件。铣床设定第一轴为 X 轴、第二轴为 Y 轴、第三轴为 Z



轴、第四轴为主轴,加工工艺设定为铣削。车削循环和铣削循环可以根据需要通过通信软件 WINPCIN 传入系统。

2. 参数设定

SINUMERIK 802C base line 需要设定的参数有系统参数、伺服电机参数、传动系统的机械参数和各轴相关速度参数等,具体机床参数如表 5-7-1 至表 5-7-4 所示。

表 5-7-1 SINUMERIK 802C base line

轴参数号	参数名	单位	轴	输入值	参数定义
30130	CTRLOUT_TYPE	-	X,Y,Z	1	模拟给定输出到轴控接口
30240	ENC_TYPE	-	X,Y,Z	2	TTL 编码器
34200	ENC_REF_MODE	-	X,Y,Z	1	电机编码器参考点脉冲

表 5-7-2 伺服电机参数

轴参数号	参数名	单位	轴	输入值	参数定义
31020	ENC_RESOL	IPR	X,Y,Z	3072	编码器每转脉冲数

31020 号参数为 SIMODRIVE 611U WSG 接口引出的编码器信号脉冲数。脉冲数 = 电机的极对数 × 1024。比如,电机 1FK6060-6AF,1-1S□□,为 6 极电机,极对数为 3,则脉冲数为 $3 \times 1024 = 3072$ 。

表 5-7-3 传动系统的机械参数

轴参数号	参数名	单位	轴	输入值	参数定义
31030	LEADSCREW_PITCH	mm	X,Y,Z	5	丝杠螺距
31050	DRIVE_AX_RATIO_DENUM[0...5]	-	X,Y,Z	40	减速箱电机端齿轮齿数
31060	DRIVE_AX_RATIO_NOMERA[0...5]	-	X,Y,Z	50	减速箱丝杠端齿轮齿数

传动系统的机械参数确定后即可设定各轴相关速度,具体参数表 5-7-4 所示。

表 5-7-4 各轴相关速度参数

轴参数号	参数名	单位	轴	输入值	参数定义
32000	MAX_AX_VELO	mm/min	X,Y,Z	480	最大轴速度(G00)
32010	JOG_VELO_RAPID	mm/min	X,Y,Z	4800	点动快速
32020	JOG_VELO	mm/min	X,Y,Z	3000	点动速度
32260	RATED_VELO	RPM	X,Y,Z	1200	电机额定转速
36200	AX_VELO_LIMIT	mm/min	X,Y,Z	5280	坐标速度极限

5.7.2 SIMODRIVE 611U 驱动器参数设定

由上节典型数控系统的硬件结构中,我们了解到 SIMODRIVE 611U 是一种通用



型伺服驱动器,用户可以根据不同的应用场合进行各种参数的设定。使用工具软件 SimoComU,用户可以非常方便地设定驱动器及电机的参数。

1. 物理准备

物理上主要是 PC 机与 SIMODRIVE 611U 通过 RS232 接口的连接,最好是笔记本电脑,并装好 SimoComU 软件。具体的连接方法见上一节相关内容。

2. 参数设定步骤

①启动 SimoComU 软件,选择联机方式。



图 5-7-1 启动 SimoComU 软件

②命名将要调试的驱动器,然后选择“下一步”。

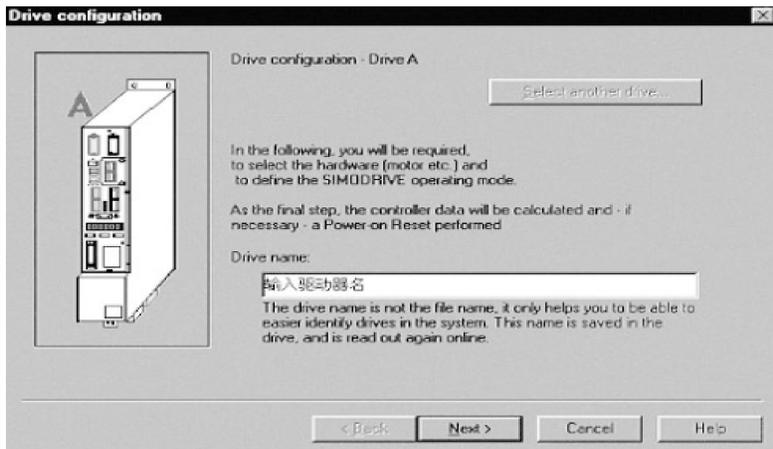


图 5-7-2 命名调试的驱动器



③进入联机方式后,SimoComU 自动识别功率模块和 611U 控制板的型号,然后选择“下一步”。

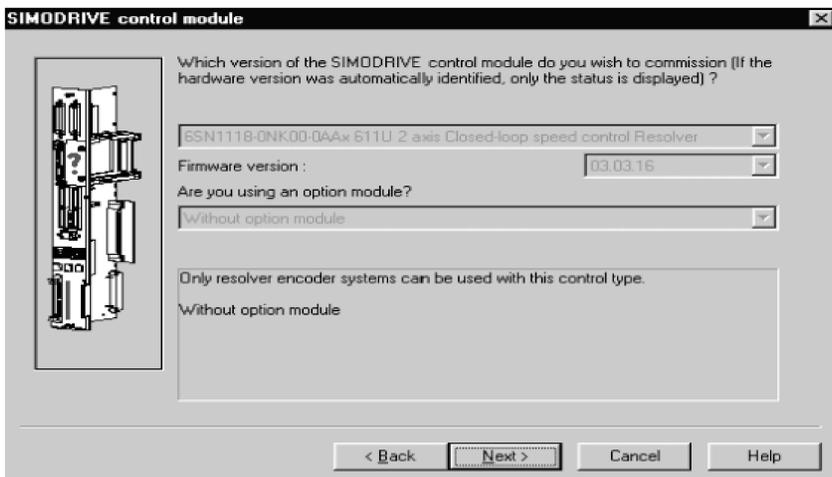


图 5-7-3 选择驱动器型号

④选择电机的型号,然后选择“下一步”。

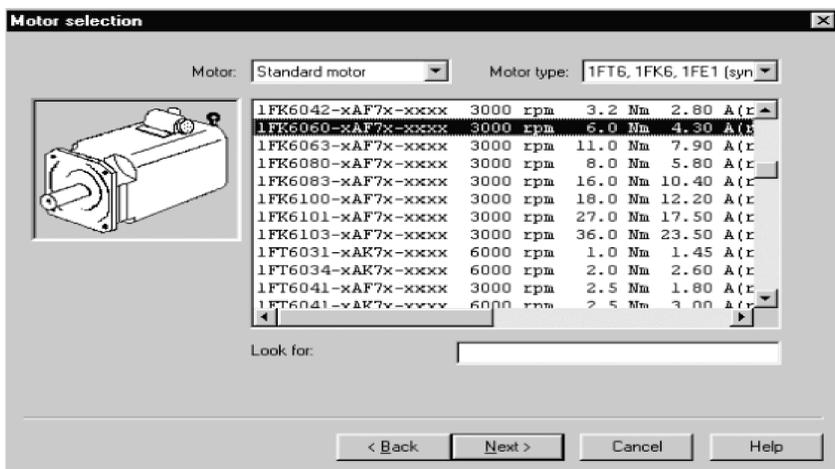


图 5-7-4 选择电机型号

⑤根据电机的型号选择编码器的类型。



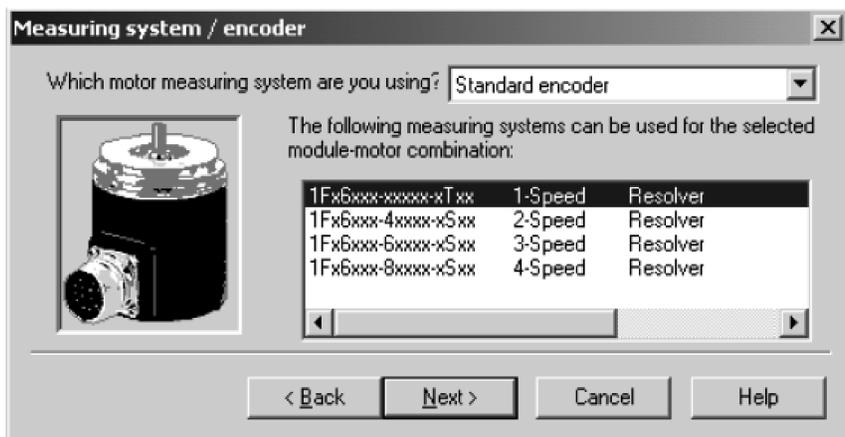


图 5-7-5 选择编码器型号

- ⑥ 选择速度控制方式(Speed/torque setpoint),然后选择“下一步”。

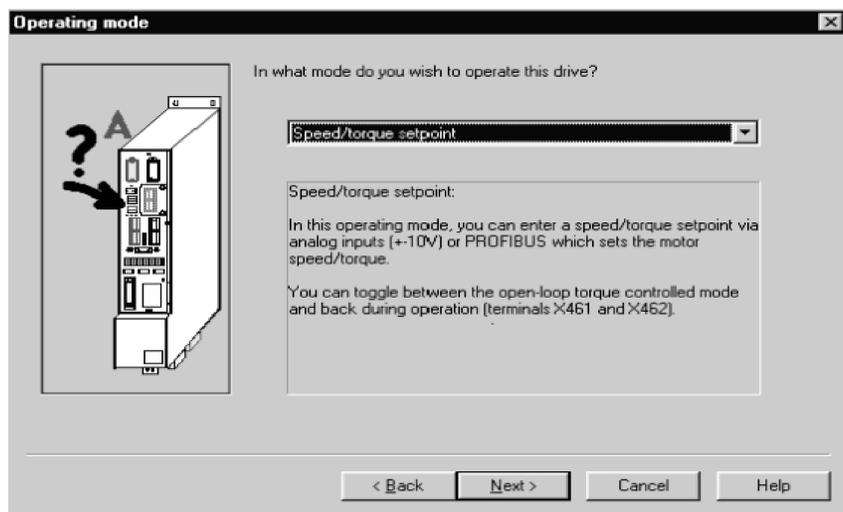


图 5-7-6 选择速度控制方式

- ⑦ SimoComU 列出所选择的数据,需要您再次确认,如果数据无误,选择“接受该轴驱动器配制”。

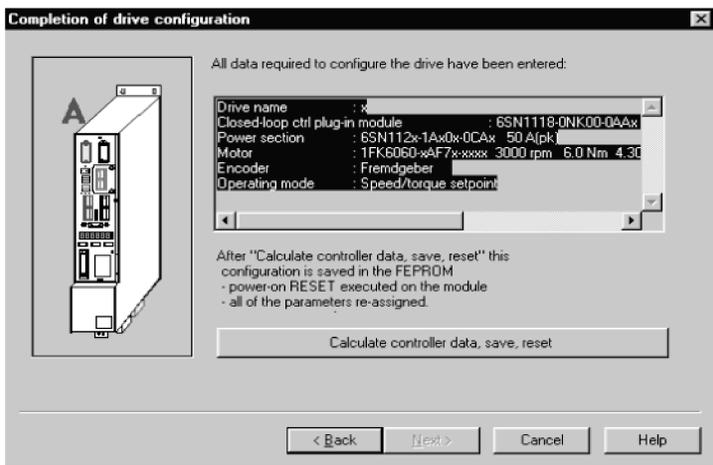


图 5-7-7 确认配置的数据

这样一个坐标轴驱动器的基本参数就设定好了,那么用同样的方法设定其他每个坐标轴驱动器。

5.7.3 数控系统与 PC 机的通信

数控机床的设定数据、刀具参数、机床数据、试车数据、PLC 应用程序等数据都需要备份,而且经常要进行在线加工(DNC),这样就需要数控系统与计算机进行实时信息传送。我们可以借助于 WINPCIN 通信工具软件实现数据传送。数控机床中的系统数据有如表 5-7-5 所示。

表 5-7-5 数控机床系统数据

数据类型	内 容	文件类型
零件程序和子程序	主程序目录内的所有零件程序文件	文本
标准循环	所有在固定循环目录内的标准固定循环文件	文本
各种数据	机床数据	文本
	设定参数	文本
	刀具参数	文本
	R 参数	文本
	零点偏移	文本
	丝杠螺距误差补偿	文本
试车数据	试车数据到 PC 机	二进制
PLC 应用程序	PLC 应用程序到 PC 机	二进制

1. 物理准备

物理上主要是 PC 机与数控系统通过 RS232 接口连接,最好采用笔记本电脑,并装好 SimoComU 软件。具体的连接方法见上一节相关内容。

2. 通信步骤

①打开 WINPCIN 软件,界面如图 5-7-8 所示。



图 5-7-8 WINPCIN 软件界面

②设定通信参数“RS232 Config”,包括端口号、传输波特率、奇偶校验、软硬件握手等,然后保存(Save),如图 5-7-9 所示。

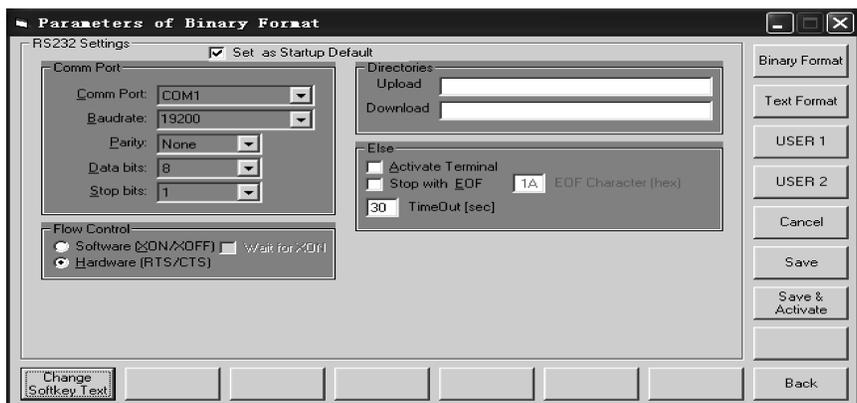


图 5-7-9 设定通信参数

③选择文本格式文件“Text Format”或者二进制文件“Binary Format”。

④在 SINUMERIK 802C base line 系统中匹配相应的通信参数。



⑤在 SINUMERIK 802C base line 系统中选择对应的文件格式。

⑥根据 WINPCIN 软件上的 Send Date 和 ReceiveDate 按钮进行数据的上传和下载。

需要注意的是,在传送数据时,应该接收方先处于等待状态,然后发送方再进行发送。不然将导致数据传输失败。

小 结

插补是一个数据点密化的过程,中间点的插入是根据一定的算法由数控系统软件或硬件自动完成的。软件插补方法可分为基准脉冲插补和数据采样插补两类。基准脉冲插补有多种方法,最常用的是逐点比较插补法和数字积分插补法。数据采样法用到以直流或交流伺服电机作为执行元件的闭环或半闭环数控系统中,插补结果输出的不是脉冲,而是数据。

刀具补偿一般分为刀具长度补偿和刀具半径补偿。应用刀具补偿功能,CNC 系统可以对刀具长度和刀具半径自动校正,使编程人员可以直接根据零件图纸上的尺寸进行编程,而不必考虑刀具尺寸因素。刀具补偿执行过程包括三个步骤:刀补建立、刀补执行和刀补撤销。

数控系统由程序介质、输入输出装置、计算机数字控制装置(CNC 单元)、PLC、主轴控制单元和进给伺服驱动系统组成,而这几个部分都通过 I/O 接口进行互联。

数控装置是数控系统的核心,其硬件结构按 CNC 装置中微处理器的个数可以分为单微处理器结构和多微处理器结构;按 CNC 装置中各印刷电路板的插接方式可以分为大板式结构和功能模块式结构。

数控系统软件可分为管理软件和控制软件两部分。管理软件包括零件程序的输入、输出,显示,诊断和通信功能软件;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。

SINUMERIK 802C base line 系统由 CNC 控制器、611U 驱动器和 1Fk7 电机、电缆三大部分组成。

SINUMERIK 802C base line 系统的参数可以通过专用软件 SimoComU 来设定和调整,数据传送和数据备份可以通过 WINPCIN 来实现。



习题与思考题

- 5-1 什么是插补？就加工曲线轮廓说明插补的作用和原理。
- 5-2 常用的插补方法有哪些？各种方法的原理、特点是什么？
- 5-3 直线的起点在原点 $O(0,0)$ ，终点 E 的坐标分别是：(1) $E(7,4)$ ；(2) $E(4,9)$ 。试用逐点比较法对直线进行插补，并画出插补轨迹。
- 5-4 顺圆的起点、终点坐标如下：(1) $A(0,6)$ ， $B(6,0)$ ；(2) $A(6,8)$ ， $B(10,0)$ 。试用逐点比较法对它们分别插补，并画出插补轨迹。
- 5-5 数控系统由哪几部分组成？各部分的作用是什么？
- 5-6 数控系统的硬件结构有哪些分类？各种分类有什么特点？
- 5-7 数控系统的软件由哪些组成？各有什么作用？
- 5-8 说明 SIEMENS 系统的结构和各部分的功能。
- 5-9 简述 SIMODRIVE 611U 伺服单元的工作过程和各接口的作用。
- 5-10 简述 SimoComU 的和 WINPCIN 的使用。

第 6 章 自动调速系统

6.1 速度控制的基本概念和指标

6.1.1 速度控制的基本概念

1. 速度控制

电动机的速度控制,又称电动机的调速。所谓调速,是在机械传动系统中人为地或自动地改变电动机的转速,以满足工作机械对不同转速的要求。调速和由于负载变动引起的转速变化是不同的概念,例如在图 6-1-1 中所示的,人为地使电压由 U_N 降至 U_1 时,在保持负载转矩为 T_N 不变的条件下,稳态时的转速由 n_a 降至 n_b ,称为调速。若 $U = U_N$ 不变,负载转矩由 T_N 增加至 T'_N ,则稳态时的转速将自动地由 n_a 降至 n_c ,这称为由负载变动而引起的速度变化(或转速波动)。

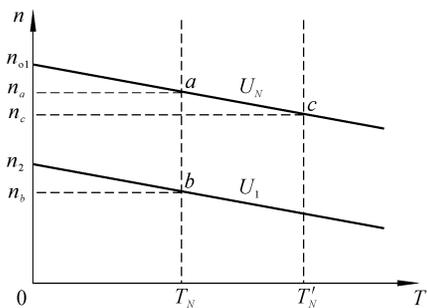


图 6-1-1 调压调速

2. 调速的必要性

调速是机床对其电力拖动系统提出的重要要求。

当然某些小型机床对转速的要求并不高,但是大多数机床对其电力拖动系统的转速调节有不同程度的要求。

机床加工工作时,由于工件直径大小不同、材料的硬度和性质不同、要求的精度和表面粗糙度不同,所用刀具也可能不一样,为保证得到最经济的切削速度,则要求机床能在不同的转速下工作。这就对电力拖动系统提出了速度的要求。

机床不仅要求调速,在许多情况下还要求速度稳定(稳速)。图 6-1-2 为直流电动机的机械特性,它是向下倾斜的,可见即使固定在某一转速下工作,如工作在 A

点,但在加工时,由于电源电压的波动,工件毛坯余量不同、材质不均匀、摩擦力变化等原因,必然引起负载转矩 T_c 的变化。例如 $T_{N1} \sim T_{N2}$ 之间变化,使工作点在 A_1 和 A_2 间变化,从而使转速在 n_1 和 n_2 之间波动,显然这种变化不是“人为”的,是速度的波动,是不希望的。它会影响到产品的加工质量,尤其电动机在低速运行时,如果负载波动大,不仅影响加工精度,而且还可能破坏电动机的正常工作,甚至使电动机停车。故要想办法使

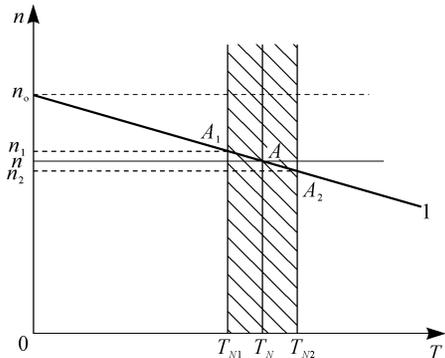


图 6-1-2 直流机的机械特性

电动机转速尽量不随外界扰动而变化,始终能精确地保持在所需要的数值上,这就要求速度控制系统既能调节速度,又能稳定速度。

由上述看出,速度控制对提高产品质量和劳动生产率有着非常重要的作用。

3. 机床的调速方法

为了满足各种工作速度的要求,目前普通机床常用的调速方法有三种:

(1) 机械有级调速 在这种系统中电动机转速不变,而是通过改变齿轮变速箱的变速比得到机床主轴的不同转速。这种机械变速,不能保证最有利的切削速度,而且调速装置体积大,造价又高。

(2) 电气和机械配合的有级调速 机床的传动系统采用多速异步电动机,再与齿轮变速箱变比相配合而获得不同的转速。这样可以减小机床变速箱体积,而且可以得到较多的不同速度,但多速电动机比单速电动机造价要高得多。

(3) 电气无级调速 就是机床执行机构所需的不同转速是通过直接改变电动机的转速而实现的,这种机床的齿轮变速箱改为减速器,从而使机床的传动系统变得很简单,这一点对重型机床来说是非常重要的,同时电气无级调速系统调速范围宽、控制灵活,可以实现远距离操作。因此,机床一般使用的是电气无级调速。由于拖动系统采用电动机种类不同,电气无级调速系统有直流调速和交流调速两种类型。

6.1.2 调速系统的静态技术指标

各种机床,对控制系统都有一定的要求:例如,精密机床要求加工精度达到百分之几毫米甚至几微米;大型铣床的送进机构,快速移动最高速达到 600mm/min,而精



加工时最低速只有 $2\text{mm}/\text{min}$, 这些要求可以转化成电力拖动控制系统的静态或动态技术指标。静态技术指标主要有调速范围 D , 静差率 S , 调速的平滑性和经济性以及系统与负载配合的能力等, 它们反映了调速系统的稳定性能。

1. 调速范围 D

在额定负载转矩 T_N 下, 电动机的最高转速 n_{\max} 与最低转速 n_{\min} 之比称为调速范围 D 。

$$D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} \quad (6-1-1)$$

如图 6-1-3 所示, 通常将 n_{\max} 视为电动机的额定转速 n_N 。一般希望调速系统 D 大一些好。

2. 静差率 S

静差率 S 是指电动机由理想空载增加到额定负载时, 对应的转速降 Δn_N 与其理想空载转速 n_0 之比, 采用百分数表示, 即

$$S = \frac{n_0 - n_N}{n_0} \times 100\% = \frac{\Delta n_N}{n_0} \times 100\% \quad (6-1-2)$$

静差率主要表示负载变化时, 调速系统转速变化的程度。在同一负载下, 高速运行和低速运行时, 转速降 Δn 是相同的(图 6-1-3)。但在高速和低速运行时, 对应的理想空载转速 n_{01} 和 n_{02} 却不同, $n_{01} > n_{02}$, 显然高速时 S_1 较小, 低速时 S_2 较大, 当低速时 S_2 能满足要求的话, 则高速时就更能满足要求了, 所以用调速范围 D 内最低速时的静差率 S_2 代表系统能达到的静差率。

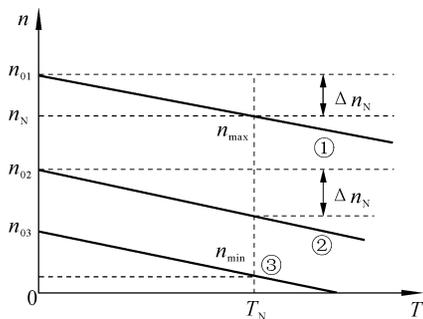


图 6-1-3 恒功率调速的特性

通过利用已有的数学式, 可以找到 D , S 和 Δn_N 三者之间的关系

$$\begin{aligned} D &= \frac{n_{\max}}{n_{\min}} = \frac{n_{\max}}{n_{0\min} - \Delta n_N} = \frac{n_N}{\Delta n_N (n_{0\min} / \Delta n_N - 1)} \\ &= \frac{n_N}{\Delta n_N \left(\frac{1}{S_2} - 1 \right)} = \frac{n_N S_2}{\Delta n_N (1 - S_2)} \end{aligned} \quad (6-1-3)$$

由式(6-1-3)可见, Δn_N 一定时, 要求 S 越小, 则调速范围 D 也越小; 若要满足



D 和 S 的要求,则要设法使 Δn_N 减小。

3. 调速的平滑性

用两个相邻转速之比中表示

$$\Phi = \frac{n_i}{n_{i-1}} \quad (6-1-4)$$

即从某一转速 n_i 与能调节到的最邻近的转速 n_{i-1} 之比来评价。显然。 Φ 值愈小,说明愈平滑,无级调速时 $\Phi \approx 1$ 。

4. 调速的经济性

用调速的设备费用、能量消耗、维护及运转的费用来评价其经济性。

6.2 三相异步电动机的变频调速

交流异步电动机比直流电动机结构简单、价格低廉、运行可靠、维修方便。因此,机械设备绝大部分都用交流电动机拖动。但异步电动机调速性能比直流电动机差,所以长期以来,凡要求调速性能高的场合,一般均采用直流机拖动。

从 20 世纪 60 年代起,国外对交流变速传动已经开始重视。特别是晶闸管问世以后,使得采用半导体变流技术的交流调速系统得以实现。尤其是 20 世纪 70 年代以来,大规模集成电路和计算机控制技术的发展,为交流调速系统的发展创造了有利条件。目前,交流调速系统已具备了较宽的调速范围,较高的稳定精度、较快的动态响应、较高的工作效率,其静、动特性均可以与直流调速系统相媲美。国际上许多国家交流调速系统已进入实用化、系列化阶段,并出现了逐步取代直流调速系统的势头。自 20 世纪 90 年代以来,国产交流调速装置开始进入生产的各个领域,并发挥巨大的经济效益。

6.2.1 交流调速的方案

根据异步电动机的转速公式

$$n = n_0(1-s) = \frac{60f_1}{p}(1-s) \quad (6-2-1)$$

式中: f_1 为供电电源频率; s 为转差率; P 为极对数。

因此,异步电动机有三种基本调速方法。

(1) 变极调速 改变定子极对数 P 调速。



(2) 变频调速 改变供电电源的频率 f_1 。

(3) 变转差率 s 调速 可通过改变电动机的某些参数来改变 s , 例如定子电压、转子电阻、转差电压等, 因此变 s 调速可分为: ① 转子串电阻调速, 绕线转子电动机转子绕组串电阻; ② 调压调速, 改变定子电压; ③ 串级调速, 绕线转子电动机转子绕组串电动势; ④ 电磁转差离合器调速, 笼型电动机加电磁转差离合器。

6.2.2 变频调速原理

由同步转速 $n_0 = \frac{60f_1}{p}$ 可知, 只要频率 f_1 连续可调, 就可以平滑地调节转速, 但调速时应注意变频与调压的配合。

1. 原理

(1) 基频(额定频率 f_N) 以下调速 在基频以下调速时, 速度调低。但在调节过程中, 必须配合着调节电源电压, 否则电动机不能正常运行。其原因从电动机电动势电压平衡方程式

$$U_1 \approx E1 = 4.44f_1 NK\Phi_m \quad (6-2-2)$$

式中: N 为每相绕组的匝数; Φ_m 为电动机气隙磁通的最大值; K 为电动机的结构系数。

可知, 当 f_1 下降时, 如果 U_1 不变, 势必使 Φ_m 增加, 但电动机在设计时, 磁路磁通本已选得接近饱和, 因此 Φ_m 上升必然使磁路饱和, 励磁电流剧增, 这样电动机就无法正常运行。为了防止磁路饱和就应使 Φ_m 保持不变, 即应使 $\frac{U_1}{f_1} = \text{常数}$ 。

这就表明, 在基频以下调速时, 要实现恒磁通调速, 应使定子电压随频率成正比地变化, 这相当于直流电动机的调压调速。

(2) 基频以上调速(速度调高) 当频率上调时, 也按比例升高电压这是不行的, 因为此时往上调 U_1 , 将超过了额定电压, 很可能会超过电动机绝缘耐压限度, 因此频率上调时应保持电压不变, 即 $U_1 = \text{常数}$, 这时 f_1 升高, Φ_m 下降, 相当于直流电动机弱磁调速。

2. 变频调速的特性

图 6-2-1 为异步电动机变频调速时的机械特性曲线。从曲线看出, 无论速度是调高(高于基速), 还是调低, Δn 都不变, 因此机械特性运行段的斜率也基本不变, 它是一族平行的曲线。可见变频调速时, 在整个调速范围内, 机械特性一直保持着



较高的硬度。由上面分析看出,只要 f_1 能连续变化,则速度 n 也会连续变化。因此,变频调速具有调速范围广(可达 10:1)、平滑、机械特性硬,静差率小等优点。同时它在基频以下调速时 $U_1/f_1 = \text{常数}$,而 Φ_m 不变,属于恒转矩调速方式;频率调高时, $U_1 = \text{常数}$,而 Φ_m 下降,故又属于恒功率调速方式。因此整个调速范围的特性与直流电动机降压调速和弱磁调速十分相似。这就说明,调频调速是异步电动机的一种比较合理的调速方法,问题是如何得到平滑可调的变频电源。

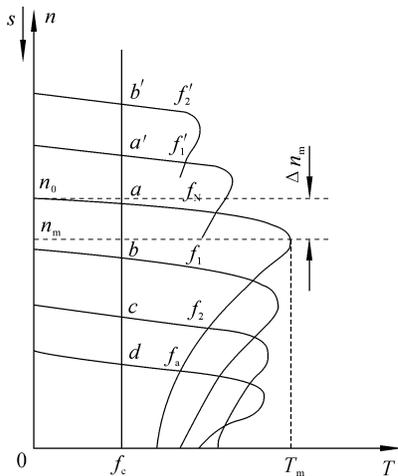


图 6-2-1 异步电动机变频调速时的机械特性

6.2.3 变频器的基本构成

变频器分为交-交和交-直-交两种形式。交-交变频器可将工频交流电直接变换成频率、电压均可调的交流,又称直接式变频器。而交-直-交变频器是先把工频交流变成直流,然后再把直流变换成可控的交流电,它的基本构成如图 6-2-2 所

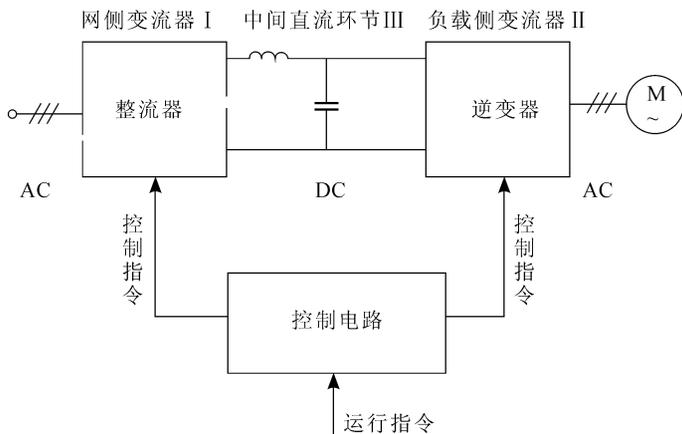


图 6-2-2 变频器的基本构成



示,由主电路(包括整流器、中间直流环节、逆变器)和控制电路组成。

1. 整流器

整流器的作用是把三相或单相交流电变成直流电。

2. 逆变器

逆变器最常见的结构形式是利用六个半导体主开关器件组成的三相桥式逆变电路。有规律地控制逆变器中主开关器件的通与断,可以得到任意频率的三相交流电输出。

3. 中间直流环节

由于逆变器的负载为异步电动机,属于感性负载。

无论电动机处于电动或发电制动状态,其功率因数总不会为1。因此,在中间直流环节和电动机之间总会有无功功率的交流。这种无功能量要靠中间直流环节的储能元件(电容器或电抗器)来缓冲。所以又常称中间直流环节为中间直流储能环节。

4. 控制电路

控制电路通常由运算电路、检测电路、控制信号的输入、输出电路和驱动电路等构成。其主要任务是完成对逆变器的开关控制、对整流器的电压控制以及完成各种保护功能等。控制方法可以采用模拟控制或数字控制。

6.2.4 变频器的分类

1. 按直流电源的性质分类

当逆变器输出侧的负载为交流电动机时,在负载和直流电源之间将有无功功率的交流。用于缓冲无功功率的中间直流环节的储能元件可以是电容或是电感,据此,变频器分成电流型变频器和电压型变频器两大类。

(1) 电流型变频器 电流型变频器主电路的典型构成方式如图 6-2-3 所示。其特点是中间直流环节采用大电感作为储能环节,无功功率将由该电感来缓冲。由于电感的作用,直流电流 I_d 趋于平稳,电动机的电流波形为方波或阶梯波,电压波形接近正弦波。直流电源的内阻较大,近似于电流源,故称为电流源型变频器或电流型变频器。这种电流型变频器,其逆变器中晶闸管,每周期内工作 120° 。电流型变频器的一个较突出的优点是:当电动机处于再生发电状态时,回馈到直流侧的再生电能可以方便地回馈到交流电网,不需在主电路内附加任何设备,只要利用网侧变



流器改变其输出电压极性(控制角 $\alpha > 90^\circ$)即可。这种电流型变频器可用于频繁加减速的大容量电动机的传动。在大容量风机、泵类节能调速中也有应用。

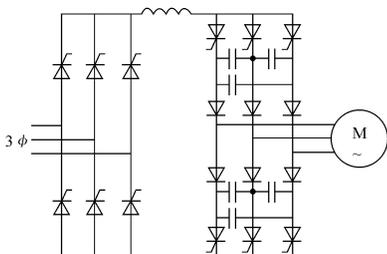


图 6-2-3 电流型变频器

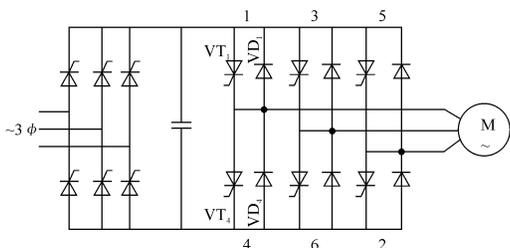


图 6-2-4 电压型变频器

(2) 电压型变频器 电压型变频器典型的一种主电路结构形式如图 6-2-4 所示,其中用于逆变器晶闸管的换相电路未画出。图中逆变器的每个导电臂,均有一个可控开关器件和一个不可控器件(二极管)反并联组成。这种变频器晶闸管在一个周期内导通 180° 。中间直流环节的储能元件采用大电容,负载的无功功率将由它来缓冲。由于大电容的作用,主电路直流电压 E_d 比较平稳,电动机端的电压为方波或阶梯波。直流电源内阻比较小,相当于电压源,故称为电压源型变频器或电压型变频器。对负载电动机而言,电压型变频器是一个交流电压源,在不超过容量限度的情况下,可以驱动多台电动机并联运行,具有不选择负载的通用性。缺点是电动机处于再生发电状态,回馈到直流侧的无功能量难于回馈给交流电网。要实现这部分能量向电网的回馈,必须采用可逆变器。

2. 按输出电压调节方式分类

变频调速时,需要同时调节逆变器的输出电压和频率,以保证电动机的主磁通的恒定。

对输出电压的调节主要有两种方式:PAM 方式和 PWM 方式。

(1) PAM 方式 脉冲幅值调节方式(Pulse Amplitude Modulation),简称 PAM 方式。是通过改变直流电压的幅值进行调压的方式。在变频器中,逆变器只负责调节输出频率,而输出电压的调节由相控整流器或直流斩波器通过调节直流电压 E_d 去实现。采用相控整流器调压时,网侧的功率因数随调节深度的增加而变低。而采用直流斩波器调压时,网侧功率因数在不考虑谐波影响时,可以达到 $\cos\Phi \approx 1$

(2) PWM 方式 脉冲宽度调节方式(Pulse Width Modulation),简称 PWM 方式。



变频器中的整流器采用不可控的二极管整流电路。变频器的输出频率和输出电压的调节均由逆变器按 PWM 方式来完成。利用参考电压波 U_r 与载频三角波 U_c 相互比较来决定主开关器件的导通时间而实现调压。利用脉冲宽度的改变来得到幅值不同的正弦基波电压。这种参考信号为正弦波、输出电压平均值近似为正弦波的 PWM 方式,称为正弦 PWM 调制,简称 SP - WM (Sinusoidal Pulse Width Modulation) 方式。

(3) 高载波频率的 PWM 方式 这种方式与上面 2 条所述的 PWM 方式的区别仅在于调制频率有很大的提高。主开关器件的工作频率较高,普通的功率晶体管已经不能适应,常采用开关频率较高的 IGBT 或 MOSFET。因为开关频率达到 10 ~ 20kHz,可以使电动机的噪声大幅度降低(达到了人耳难于感知的频段)。

采用 IGBT 的高载波频率的 PWM 通用变频器已经投放市场,正在取代以 BJT 为开关器件的变频器。

3. 按控制方式分类

(1) U/f 控制 按照图 6-2-5 所示的电压、频率关系对变频器的频率和电压进行控制,称为 U/f 控制方式。基频以下可以实现恒转矩调速,基频以上则可以实现恒功率调速。

U/f 方式又称为 VVVF (Variable Voltage Vari - able Frequency) 控制方式。主电路中逆变器采用 BJT,用 PWM 控制方式进行控制。逆变器的控制脉冲发生器同时受控于频率指令 f^* 和电压指令 U ,由 U/f 曲线发生器(U/f 模式形成)决定的。这样经 PWM 控制之后,变频器的输出频率 f 、输出电压 U 之间的关系,就是 U/f 曲线发生器所确定的关系。由

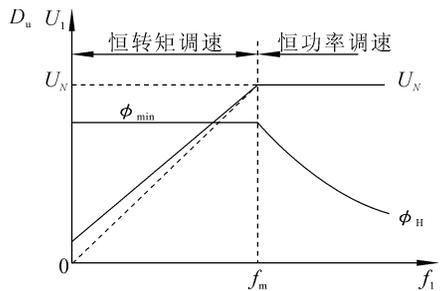


图 6-2-5 U/f 控制方式

图可见,转速的改变是靠改变频率的设定值 f^* 来实现。

电动机的实际转速要根据负载的大小,即转差率的大小来决定。负载变化时,在 f^* 不变条件下,转子转速将随负载转矩变化而变化,故它常用于速度精度要求不十分严格或负载变动较小的场合。

U/f 控制是转速开环控制,无需速度传感器,控制电路简单,负载可以通用标准



异步电动机,所以通用性强,经济性好,是目前变频器中使用较多的一种控制方式。

(2)转差频率控制在没有任何附加措施的情况下,采用 U/f 控制方式,如果负载变化,转速也会随之变化,转速的变化量与转差率成正比。 U/f 控制的静态调速精度显然较差,为提高调速精度,采用转差频率控制方式。

根据速度传感器的检测,可以求出转差频率 Δf ,再把它与速度设定值 f^* 相加,以该叠加值作为逆变器的频率设定值 f^* ,就实现了转差补偿。这种实现转差补偿的闭环控制方式称为转差频率控制方式。与 U/f 控制方式相比,其调速精度大为提高。但是使用速度传感器求取转差频率,要针对具体电动机的机械特性调整控制参数,因而转差频率控制方式的通用性较差。

(3)矢量控制 上述的 U/f 控制方式和转差频率控制方式的控制思想都建立在异步电动机的动态数学模型。利用坐标变换的手段,将交流电动机的定子电流分解成磁场分量电流和转矩分量电流,并分别加以控制,即模仿自然解耦的直流电动机的控制方式,对电动机的磁场和转矩分别进行控制,以获得类似于直流调速系统的动态性能。

在矢量控制方式中,磁场电流 I_m 和转矩电流 I_t 可以根据可测定的电动机定子电压、电流的实际值经计算求得。磁场电流和转矩电流再与相应的设定值相比较并根据需要进行必要的校正。高性能速度调节器的输出信号可以作为转矩电流(或称有功电流)的设定值,动态频率控制 df/dt 可以保证快速动态响应。

4. 按主开关器件分类

逆变器主开关器件的性能,往往对变频器装置的性能有较关键的影响。通用变频器中最常用的主开关器件都是自关断器件,主要有 IGBT(绝缘栅双极型晶体管)、GTO(门极关断晶闸管)和 BJT(双极晶体管)。目前采用以 IGBT 为主开关器件的 IPM(智能电力模块)也成为一种趋势。

6.3 实训三(变频器的设置与调试操作)

1. 实训目的

- ①了解 MICROMASTER MM220/3 变频器操作面板的设置和功能选择的方法。
- ②掌握控制端子的功能和接线。



2. 基本知识

(1) 交流电动机变频调速的基本概念 由电动机原理可知,三相交流异步电动机的同步转速 n_1 为

$$n_1 = 60f_1/p \quad (6-3-1)$$

其中 f_1 是电源的频率,当频率等于 50 Hz 时,称为基频。 p 是电动机的极对数。从公式(6-3-1)可以看出,假如均匀地改变电源频率,就可以连续地改变同步转速 n_1 ,从而获得无级调速。显然,要想使电动机的调速范围低于或高于额定转速运行,就需要变频器提供低于基频到高于基频的三相电源。在调速过程中,为了保持电动机原有的过载能力,需要保持磁通恒定,也就是在改变频率 f_1 的同时,还要求改变加在电动机上的电压。

①频率 $f_1 > 50\text{Hz}$ 时的变频调速。当频率大于 50Hz 时,由于定子的电压不会大于额定值,一般保持在额定电压。这个时候,由于频率上升,则转速上升,磁通下降,转矩 T 也下降。这时调速属于恒功率调速性质。

② U_1/f_1 等于常数时的变频调速。在电动机调速中,当 U_1/f_1 等于常数时,如果要完全满足恒定转矩调速的要求, U_1 为加在电动机定子绕组上的电压。就属于恒定磁通变频调速,这种方法一般适用于频率小于 50Hz 的情况。假若频率大于 50Hz,还要求保持 U_1/f_1 等于常数,那么电压将大于额定电压,这是不允许的。严格地说, $U_1/f_1 = \text{常数}$ 的变频调速只适用于调速范围不大,负载转矩随转速下降而下降的泵类负载。

(2) 变频的基本原理与变频器的类型 将电源 50Hz 的频率通过电力电子设备变成不同频率的方法,基本可以大致分成交流-直流-交流变频和交流-交流变频两大类。

由于交流异步电动机是感性负载,它与电网要交换功率。为了缓冲无功能量,在变频器中往往要并联上一个大电容或者串联一个大电感。所以变频器可以分为电压源型(并联大电容)和电流源型(串联大电感)两大类。

(3) 通用变频器的基本结构与参数 了解变频器外形和基本结构才能对其进行进一步操作。变频器外形因功率大小区分为盒式和落地柜式两种结构,图 6-3-1、图 6-3-2 所示为通用变频器的外接线路图和某型变频器结构图。从图中可知,主电路接线端有:工频电网的输入(R,S,T)接线端和接电动机的频率电压可调输出(U,



V, W) 接线端; 另外还有外部信号控制变频器的控制端子, 变频调速工作状态指示端子和变频器与微机接口等。

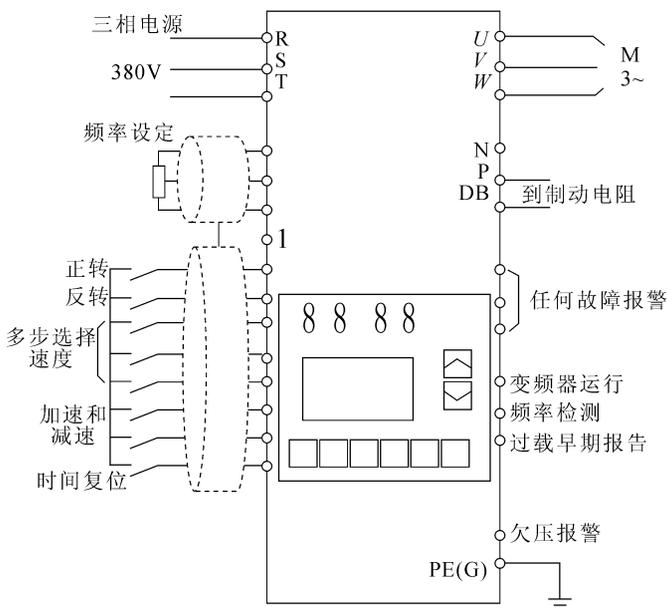


图 6-3-1 通用变频器的外接线图

在我国主电路输入电压额定值一般是三相 380V, 50Hz, 小功率的输入电压额定值是 220V, 50Hz 单相。输出额定值有如下几项:

- ①输出电压 U_N (V) 一般指输出电压的最大值, 通常与电网的电压最大值相等。
- ②输出电流 I_N (A) 指允许长时间输出的最大电流, 是选择变频器的重要依据。
- ③输出容量 S_N (kVA) 与 U_N , I_N 的关系为 $S_N = \sqrt{3}U_N I_N$ 。
- ④配用电动机容量 P (kW) 指变频器说明书规定长时间连续负载——电动机的容量。
- ⑤过载能力指输出电流允许超过额定值的百分比及持续时间, 通常规定 150% I_N , 60 s; 180% I_N , 0.5 s。

⑥频率指标指频率范围、频率精度和频率分辨率。

(4) 三相变频控制器的控制方法

①普通电压频率 (U/f) 变频控制器。

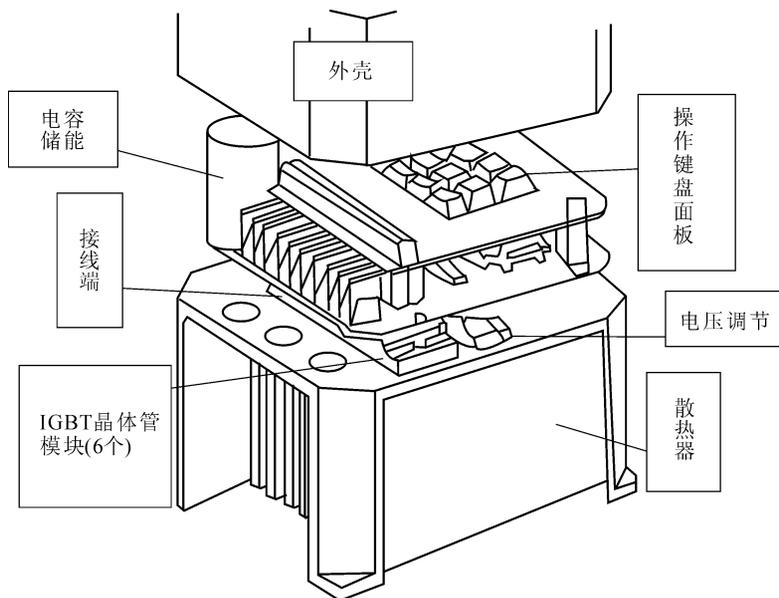


图 6-3-2 某型变频器结构图

②具有恒定磁通反馈功能的电压/频率(U/f)变频控制器。

③矢量控制变频器。

3. 操作方法与步骤

为了满足用户对被控制对象的运行需要,在使用通用变频器之前,必须由用户来设置、选择或修改变频器的运行参数及功能。这些设定一般都是通过在变频器面板上进行操作而完成的。下面介绍通用变频器的参数设定与功能选择的常用方法。

(1) 给定频率的设置 通用变频器的给定频率设置通常使用面板给定、预制给定、外接给定等方法。

①面板给定。面板给定通常是利用操作面板上的数字按键进行增加或减少数字来完成的。面板上一般都有数码显示所给定的频率,早期的产品也有用电位器来给定的。图 6-3-3 所示为西门子公司的 MICRO/MIDI MASTER 变频器操作面板。

②预置给定。预置给定是利用程序控制单元预先设置给定频率。其设置方法是,在控制单元面板上按动上升▲和下降▼按键,变频器会自动预设频率。

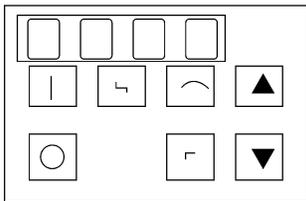


图 6-3-3 西门子公司的 MICRO/MIDIMASTER 变频器操作面板

③外接给定。外接给定是属于远程控制使用模式,它利用外部模拟的电压或其他电路信号,从控制端输入。通常需和外部 PID 模拟调节器等配套使用,也可以直接外接电位器进行设定。外部给定接线端口的电路如图 6-3-4 所示。

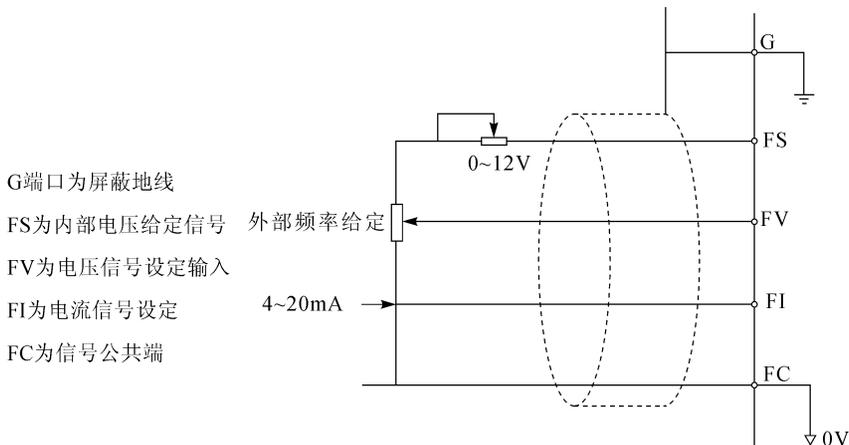


图 6-3-4 外部给定接线端口的电路

如果外部控制器比较远,必须使用 FI 电流信号设定,这样抗干扰能力比较强。外接电位器设定时接电压给定信号输入端口 FV,可以进行机械设定或者手动设定。外部电位器电阻一般为 10 kΩ 左右为宜,其耗散功率最好在计算功率 10 倍左右。

(2) 频率设定的几个概念

- ①基本频率。电动机额定频率称为变频器的基本频率。
- ②最高频率。当频率给定信号为最大值时,变频器的给定频率称为最高频率。
- ③上限频率与下限频率。上、下限频率是调速控制系统输入要求变频器的工作范围。它们的大小应该根据工作情况设定。设定的时候注意与变频器最高频率、基本频率的关系,保证合理性。

(3) 通用变频器面板设定应用举例

①参数与功能设定要求。某交流调速系统采用西门子公司生产的 MICROMASTER 系列变频器,型号是 NCvU2013,电动机的参数和控制系统的要求见表 6-3-1,按表 6-3-1 设定该变频器的参数与功能。

表 6-3-1 变频器的参数和功能

项目名称	参数与功能要求	项目名称	参数与功能要求
电机额定电流/A	5.2	升、降速操作	操作面板控制
电机额定电压/V	380	右转点动频率/Hz	操作面板控制
电机额定功率/kW	2.2	左转点动频率/Hz	操作面板控制
电机额定转速/(r/min)	1495	电机额定频率/Hz	50
电机正反转、停止	操作面板控制	电动机最低频率/Hz	20
变频器输出频率监视	操作面板控制	电动机最高频率/Hz	50

②功能码及其设定。功能码相当于程序特定指令,每一个数字有特定功能。操作时按键“P”,可以出现功能数码 PXXX,再按“P”,则出现该功能码所设定的内容“XXXX”。运用键“ \wedge ”或者键“ \vee ”可以修改其内容。

修改完成以后,再按“P”键,内容被存储。接着又显示“PXXX”(II)MI,为某一个十进制数码。然后可以进行下一个功能码的设定。

注意:“功能”栏目是该功能码的解释,“范围”栏目是功能码中存储的内容,“修改结果”栏目表示功能码选择的数值,“修改说明”是解释修改的原因。所谓功能码就是变频器参数设置代码。表 6-3-2 所示为该变频器的功能码及设置后的参数与功能。

表 6-3-2 变频器的功能码

功能码	功能	范围(出厂设定)	修改结果	修改说明
P001	显示选择	0-6(0)	(0)	监视输出频率
P002	频率上升时间/s	0-650.0(15)	(15)	越小越好
P003	频率下降时间/s	0-650.0(15)	(15)	越小越好
P004	平滑区域时间/s	0-40.0(0)	(5)	现场调试
P006	频率给定选择	0-2(2)	(0)	升降速由面板控制
P007	On/Off 面板上按键	0-1(1)	(1)	正反向、停止、点动由面板控制
P012	电动机最低频率/Hz	0-650.0(0)	(20)	系统要求

功能码	功能	范围(出场设定)	修改结果	修改说明
P013	电动机最高频率/Hz	0 - 650.0(50.0)	(50)	系统要求
P031	右转点动频率/Hz	0 - 650.0(15)	(15)	系统要求
P032	左转点动频率/Hz	0 - 650.0(10)	(10)	系统要求
P081	电机额定频率/Hz	0 - 650.0(50.0)	(50)	系统要求
P082	电机额定转速/(r/min)	0 - 9999	(1495)	系统要求
P083	电机额定电流/A	0 - 99.9	(5.2)	系统要求
P084	电机额定电压/V	0 - 1000	(380)	系统要求
P085	电机额定功率/Kw	0 - 50	(2.2)	系统要求

4. 实训

(1) 实训名称 MICROMASTER MM220/3 型变频器操作面板的设定和功能选择。

(2) 实训器材 (推荐使用)MICROMASTER 系列变频器(型号 MM220/3)1 套;三相交流异步电动机($U_N = 380\text{ V}$, $I_N = 5.2\text{ A}$, $P_N = 2.2\text{ kW}$, $f_N = 50\text{ Hz}$)1 台;3 mm × 2.5 mm 三芯电缆若干米。

(3) 实训内容

①电动机参数和操作要求,见表 6-3-1 某交流调速系统的参数与功能。

②变频器的功能码及设置后的参数与功能,见表 6-3-2。

(4) 实训步骤

①变频器 U, V, W 不接负载, R, S, T 通电,按照表 6-3-2,按动面板 P 键,屏上出现功能码 PXXX

②再按 P 键出现功能码内容“XXXX”,这时可用“▲”和“▼”键增减内容进行修改。

③认为修改内容正确,则再按 P 键定,即被存储,并又显示“PXXX”,这样又可以进行下一步功能码的修改和内容设定。按照表 6-3-2 的要求,一步步将参数输入。注意:功能选择表中的功能码和功能必须进行检查核对,使变频器中对应存储的内容和表 6-2-2 中的要求一致,以使变频器按要求工作。

④变频器信号端子的接线。注意:接线时不要给变频器通电。变频器信号端子的接线可参阅图 6-3-1 进行。变频器的频率设定采用模拟量输入,外接电位器,调正电位器时,可使变频器输出频率从 20.50 Hz 变化。也可以在变频器运行状态 1 端口接人照明灯(24V),显示变频器运行状态(正转)。

⑤完成接线后,对变频器进行运行操作,观察各种设定下的反应。首先按启动



键,观察频率上升快慢,按停止键观察频率下降速度,并观察显示频率。如符合要求,则进行下一步,否则进行修改。

⑥在变频器U、V、W端接上电动机负载轻载运行。接电源,按面板启动键,此时电动机启动;按停止键,电动机应减速停止;再按点动操作键进行点动操作。

小 结

本章以电机调速为主要问题,首先讨论了电机调速的稳态性能指标:调速范围、静差率、和调速平滑性;然后重点讨论了异步电机的调速方法和相关性能,虽然异步电机调速较复杂,但由于异步电机结构简单、坚固耐用、应用广泛,所以是现代电力拖动技术的发展方向。其中变频调速本章以实用为主,主要讲述了变频器的组成、分类、选型,使用中的注意事项等问题。

习题与思考题

- 6-1 画出异步电机的M-S曲线,说明不同的转差率S的电动机特性及与转速N之间的关系?
- 6-2 异步电动机的稳态调速指标有哪些?他们的关系如何?
- 6-3 异步电动机的转速表达式?常用的调速方法有几种?
- 6-4 画出变频器控制一台交流电动机的电路图,并说明其工作原理。
- 6-5 变频器有哪些分类,选型的注意事项如何?
- 6-6 何谓恒转矩调速方式及恒功率调速方式,主要区别是什么?
- 6-7 变频调速有几种?什么叫SPWM方式?SPWM扁平器的特点是什么?



第 7 章 数控机床伺服驱动系统

7.1 概 述

7.1.1 伺服驱动系统概念

1. 什么是伺服驱动系统

在自动控制系统中,把输出量能够以一定准确度随输入量的变化而变化的系统称为随动系统,亦称伺服系统。数控机床伺服系统是指以机床移动部件的位置和速度作为控制量的自动控制系统。

数控机床伺服驱动系统是 CNC 装置和机床的联系环节,作用在于接收来自数控装置的指令信号,驱动机床移动部件跟随指令信号运动,并保证动作的快速和准确。CNC 装置发出的控制信息,通过伺服驱动系统,转换成坐标轴的运动,完成程序所规定的操作。伺服驱动系统是数控机床的重要组成部分。伺服驱动系统的作用归纳如下:

①伺服驱动系统能放大控制信号,具有输出功率的能力;

②伺服驱动系统根据 CNC 装置发出的控制信息对机床移动部件的位置和速度进行控制。

数控机床运动中,主轴运动和进给运动是机床的基本成形运动。主轴驱动控制一般只要满足主轴调速及正、反转即可,但当要求机床有螺纹加工、准停和恒线速加工等功能时,就对主轴提出了相应的位置控制要求。此时,主轴驱动控制系统可成为主轴伺服系统,只不过控制较为简单。本章主要讨论进给伺服系统。

2. 数控机床对伺服驱动系统的要求

数控机床的性能在很大程度上取决伺服驱动系统的性能,对伺服驱动系统的主要要求如下:

(1)可逆运行 可逆运行要求能灵活地正反向运行。在加工过程中,机床工作



台处于随机状态,根据加工轨迹的要求,随时都可能实现正向或反向运动。同时要要求在方向变化时,不应有反向间隙和运动的损失。

(2) 进给调速范围要宽 为适应不同的加工条件,例如加工用刀具、被加工材料及零件加工要求的不同,为保证在任何情况下都能得到最佳切削条件,就要求进给驱动必须具有足够宽的调速范围。

(3) 位置精度要高 使用数控机床主要是为了解决:

- ①保证加工质量的稳定性、一致性,减少废品率。
- ②解决复杂曲面零件的加工问题。
- ③解决复杂零件的加工精度问题,缩短制造周期等。

为了满足这些要求,关键之一是保证数控机床的定位精度和加工精度。数控机床在加工时免除了操作者的人为误差,它是按预先的程序自动进行加工,不可能应付事先没有预料到的情况。就是说,数控机床不能像普通机床那样,可随时用手动操作来调整和补偿各种因素对加工精度的影响。因此,要求定位精度和轮廓切削精度能达到数控机床要求的指标。为此,在位置控制中要求有高的定位精度,如 $1\mu\text{m}$ 甚至 $0.1\mu\text{m}$ 。在速度控制中,要求具有很高的调速精度和很强的抗干扰能力,即要求工作稳定性要好。

(4) 速度响应要快 为了保证轮廓切削形状精度和低的加工表面粗糙度,除了要求有较高的定位精度外,还要求有良好的快速响应特性,即要求跟踪指令信号的响应要快。一方面,要求过渡过程时间要短,一般在 200ms 以内,甚至小于几十毫秒;另一方面,要使过渡过程的前沿陡,亦即上升率要大。

(5) 低速大转矩 根据数控机床的加工特点,大都是在低速进行重切削,即在低速时进给驱动要有大的转矩输出。这要求动力源尽量靠近机床的执行机构,使传动装置机械部分的结构简化,系统刚性增加,传动精度提高。

7.1.2 伺服系统的组成

图 7-1-1 所示为数控机床进给伺服系统的组成。它是一个双闭环伺服系统,内环是速度环,外环是位置环。速度环中用作速度反馈的检测装置为测速发电机、脉冲编码器等。速度控制单元是一个独立的单元部件,它由速度调节器、电流调节器及功率驱动放大器等部分组成。位置环是由 CNC 装置中的位置控制模块、速度控制单元、位置检测及反馈控制等部分组成。位置控制主要是对机床运动坐标进



行控制,轴控制是要求最高的位置控制。

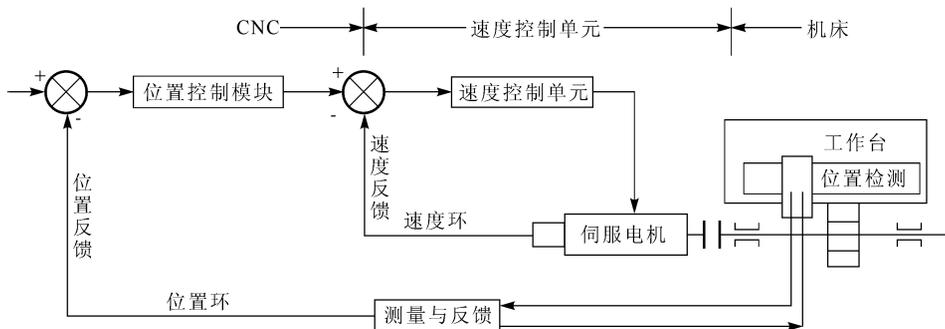


图 7-1-1 伺服系统结构原理图

7.1.3 伺服系统的分类

数控进给伺服系统有多种分类方法。按驱动方式可分为液压伺服系统、气压伺服系统和电气伺服系统;按执行元件的类别,可分为直流电机伺服系统、交流电机伺服驱动系统和步进电机伺服系统;按有无检测元件和反馈环节,可分为开环伺服系统、闭环伺服系统和半闭环伺服系统;按输出被控制量的性质,可分为位置伺服系统、速度伺服系统。下面介绍开环伺服系统、闭环伺服系统和半闭环伺服系统的概念。

1. 开环伺服系统

开环伺服系统是最简单的进给伺服系统,是无位置反馈的系统。如图 7-1-2 所示,这种系统的伺服驱动装置主要是步进电机、功率步进电机、电液脉冲电机等。由数控系统送出的指令脉冲,经驱动控制电路和功率放大后,使步进电机转动,通过齿轮副与滚珠丝杠螺母副驱动执行部件。由于步进电机的角位移量和角速度分别与指令脉冲的数量和频率成正比,而且旋转方向决定于脉冲电流的通电顺序。因此,只要控制指令脉冲数量、频率以及通电顺序,便可控制执行部件运动的位移量、速度和运动方向。系统的位移精度主要取决于步进电机的角位移精度、齿轮丝杠等传动元件的节距精度以及系统的摩擦阻尼特性。

开环伺服系统的结构简单,调试、维修方便,成本低廉,但精度差,一般用于经济型数控机床。

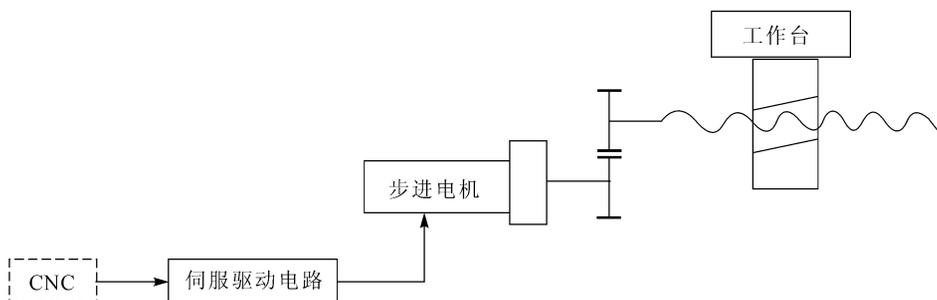


图 7-1-2 开环伺服系统

2. 闭环伺服系统

闭环伺服系统如图 7-1-3 所示。系统所用的伺服驱动装置主要是直流或交流伺服电机以及电液伺服阀——液压电机。与开环进给系统最主要的区别是：安装在执行部件或其他转动元件上的位置检测装置，将执行部件的实际位移转换成电脉冲，反馈到输入端并与输入位置指令信号进行比较，求得误差，依次构成闭环位置控制。

由于采用了位置检测反馈装置，所以闭环伺服系统的位移精度主要取决于检测装置的精度。闭环伺服系统的定位精度一般可达 $\pm 0.01 \sim \pm 0.005 \text{mm}$ 。

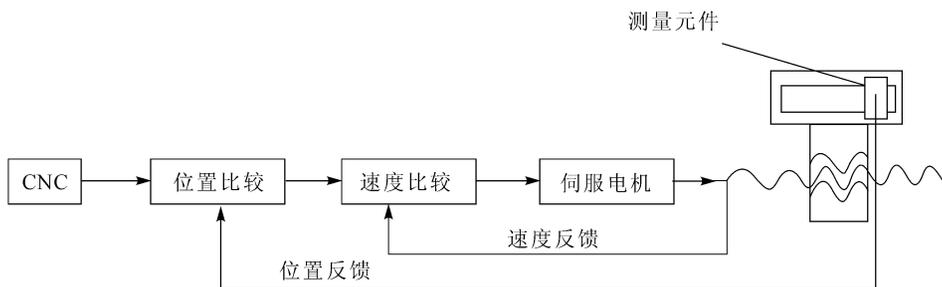


图 7-1-3 闭环伺服系统

3. 半闭环伺服系统

半闭环伺服系统如图 7-1-4 所示。将检测元件安装在中间传动件上，间接测

量执行部件位置的系统称为半闭环系统。闭环系统可以消除机械传动机构的全部误差,而半闭环系统只能补偿系统环路内部分元件的误差,因此,半闭环系统的精度比闭环系统的精度要低一些,但是它的结构与调试都比较简单。

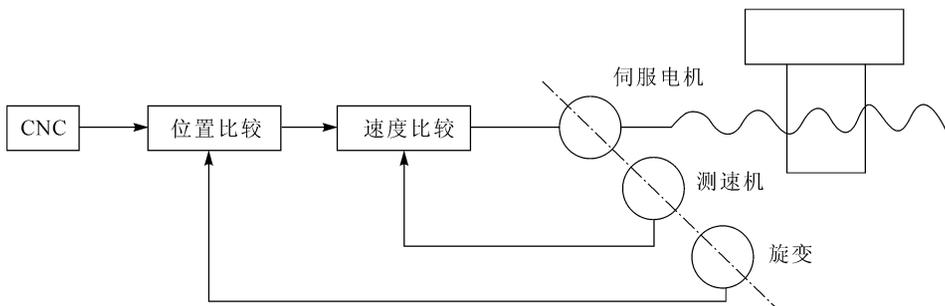


图 7-1-4 半闭环伺服系统

采用直流或交流伺服电机的闭环和半闭环伺服系统,具有较高的精度、速度和动态特性,在数控机床中得到广泛应用。

闭环伺服系统的设计和调试都较开环系统困难。目前数控机床上使用半闭环伺服系统较多,只有在高精度数控机床上才使用全闭环伺服系统。

7.2 步进电机

7.2.1 步进电机的分类

步进电机是一种将电脉冲信号转换成机械角位移的机电式数模转换器。其转子的转角与输入的电脉冲数成正比,它的速度与脉冲频率成正比,而运动方向是由步进电机通电的顺序所决定的。

步进电机是一种特殊的电机,一般电机通电后连续旋转,而步进电机则跟随输入脉冲按节拍一步一步地转动。对步进电机施加一个电脉冲信号时,步进电机就旋转一个固定的角度,称为一步。每一步所转过的角度叫做步距角。步进电机的角位移量和输入脉冲的个数严格地成正比例,在时间上与输入脉冲同步。因此,只需控制输入脉冲的数量、频率及电机绕组通电相序,便可获得所需的转角、转速及旋转方向。在无脉冲输入时,在绕组电源激励下,气隙磁场能使转子保持原有位置而处于



定位状态。

步进电机的结构形式很多,因此其分类方式也很多,常见的分类方式是按力矩的大小、力矩产生的原理、电机的励磁组数分类等。

①按步进电机输出转矩的大小可分为快速步进电机和功率步进电机。快速步进电机连续工作频率高,而输出转矩较小,可用于控制小型精密机床的工作台(例如线切割机),可以和液压伺服阀、液压马达一起组成电液脉冲马达,驱动数控机床工作台。功率步进电机的输出转矩比较大,可直接驱动数控机床的工作台。

②按励磁组数可分为三相、四相、五相、六相甚至八相步进电机。

③按转矩产生的工作原理可分为电磁式、反应式以及混合式步进电机。数控机床上常用3~6相反应式步进电机。这种步进电机的转子无绕组,当定子绕组通电激励后,转子产生力矩使步进电机实现步进。

7.2.2 步进电机的工作原理及特点

1. 工作原理

图7-2-1所示是三相反应式步进电机工作原理图。步进电机由转子和定子组成。定子上有A、B、C三对绕组磁极,分别称为A相、B相、C相。转子是硅钢片等软磁材料迭合成的带齿廓形状的铁芯。这种步进电机称为三相步进电机。如果在定子的三对绕组中通直流电流,就会产生磁场。当A、B、C三对磁极的绕组依次轮流通电,则A、B、C三对磁极依次产生磁场吸引转子转动。

①当A相通电,B相和C相不通电时,电机铁芯的AA方向产生磁通,在磁拉力的作用下,转子1,3齿与A相磁极对齐。2,4两齿与B,C两磁极相对错开 30° 。

②当B相通电,C相和A相断电时,电动机铁芯的BB方向产生磁通,在磁拉力的作用下,转子沿逆时针方向旋转 30° ,2,4齿与B相磁极对齐。1,3两齿与C,A两磁极相对错开 30° 。

③当C相通电,A相和B相断电时,电动机铁芯的CC方向产生磁通,在磁拉力的作用下,转子沿逆时针方向又旋转 30° ,1,3齿与C相磁极对齐。2,4两齿与A,B两磁极相对错开 30° 。

若按A→B→C…通电相序连续通电,则步进电机就连续地沿逆时针方向旋转,每换接一次通电相序,步进电机沿逆时针方向转过 30° ,即步距角为 30° 。如果步进电机定子磁极通电相序按A→C→B…进行,则转子沿顺时针方向旋转。上述通电方



式称为三相单三拍通电方式。所谓“单”是指每次只有一相绕组通电的意思。从一相通电换接到另一相通电称为一拍,每一拍转子转动一个步距角,故所谓“三拍”是指通电换接三次后完成一个通电周期。

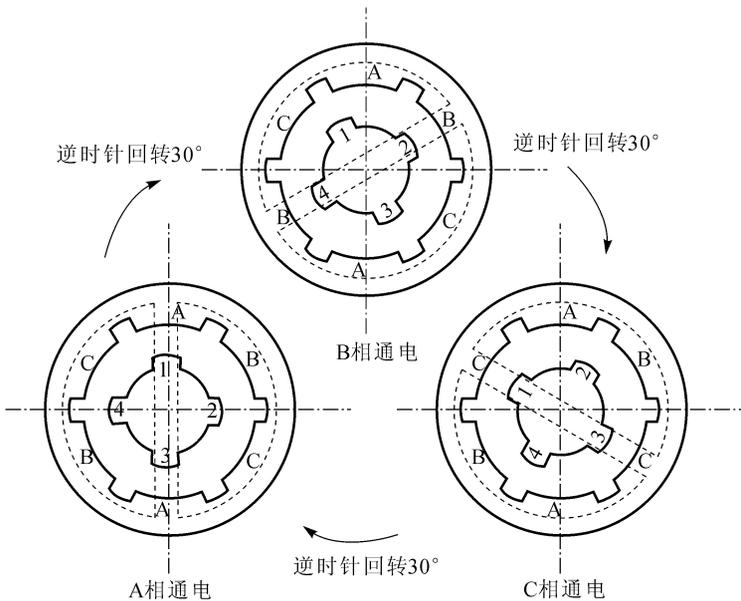


图 7-2-1 步进电机工作原理

还有一种通电方式称为三相六拍通电方式,即按照 A→AB→B→BC→C→CA…相序通电,工作原理如图 7-2-2 所示。如果 A 相通电,1,3 齿与 A 相磁极对齐。当 A,B 两相同时通电,因 A 极吸引 1,3 齿,B 极吸引 2,4 齿,转子逆时针旋转 15°。随后 A 相断电,只有 B 相通电,转子又逆时针旋转 15°,2,4 齿与 B 相磁极对齐。如果继续按 BC→C→CA→A…的相序通电,步进电机就沿逆时针方向,以 15°的步距角一步一步移动。这种通电方式采用单、双相轮流通电,在通电换接时,总有一相通电,所以工作比较平稳。

实际使用的步进电机,一般都要求有较小的步距角。因为步距角越小它所达到的位置精度越高。图 7-2-3 是步进电动机实例。图中转子上有 40 个齿,相邻两个齿的齿距角 $360^\circ/40 = 9^\circ$ 。三对定子磁极均匀分布在圆周上,相邻磁极间的夹角为 60° 。定子的每个磁极上有 5 个齿,相邻两个齿的齿距角也是 9° 。因为相邻磁极夹角(60°)比 7 个齿的齿距角总和($9^\circ \times 7 = 63^\circ$)小 3° ,而 120° 比 14 个齿的齿距角

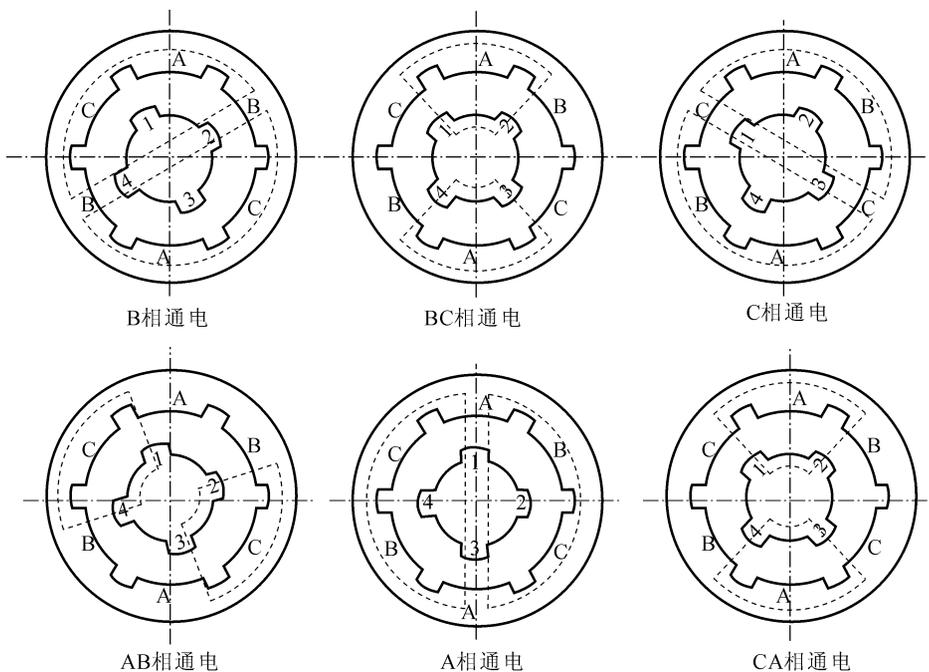


图 7-2-2 三相六拍通电方式工作原理

总和($9^\circ \times 14 = 126^\circ$)小 6° , 这样当转子齿和 A 相定子齿对齐时, B 相齿相对转子齿逆时针方向错过 3° , 而 C 相齿相对转子齿逆时针方向错过 6° 。按照此结构, 采用三相单三拍通电方式时, 转子沿逆时针方向, 以 3° 步距角转动。采用三相六拍通电方式时, 则步距角减为 1.5° 。如通电相序相反, 则步进电机将沿着顺时针方向转动。

如上所述, 步进电机的步距角大小不仅与通电方式有关, 而且还与转子的齿数有关。计算公式为:

$$\theta = \frac{360^\circ}{mzk} \quad (7-2-1)$$

式中: m ——定子励磁绕组相数;

z ——转子齿数;

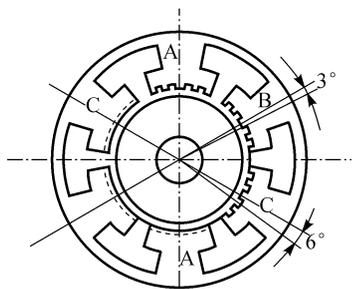


图 7-2-3 步进电机实例

k ——通电方式,相邻两次通电相数一样, $k=1$,不同时, $k=2$ 。

步进电机转速计算公式为:

$$n = \frac{\theta}{360^\circ} \times 60f = \frac{\theta f}{6} \quad (7-2-2)$$

式中: n ——转速, $[n]$ 为 r/min;

f ——控制脉冲频率,即每秒输入步进电机的脉冲数;

θ ——用度数表示的步距角。

由上式可见,当转子的步距角一定时,步进电机的转速与输入脉冲频率成正比。

2. 步进电机的特点

步进电机的主要特点如下:

①步进电机的输出转角与输入的脉冲个数严格成正比,故控制输入步进电机的脉冲个数就能控制位移量。

②步进电机的转速与输入的脉冲频率成正比,只要控制脉冲频率就能调节步进电机的转速。

③当停止送入脉冲时,只要维持绕组内电流不变,电机轴可以保持在某固定位置上,不需要机械制动装置。

④改变通电相序即可改变电机转向。

⑤步进电机存在齿间相邻误差,但是不会产生累积误差。

⑥步进电机转动惯量小,启动、停止迅速。

由于步进电机有这些特点,所以在开环数控系统中获得广泛应用。

7.2.3 步进电机的性能指标

1. 单向通电的矩角特性

当步进电机不改变通电状态时,转子处在不动状态,即静态。如果在电机轴外加一个负载转矩,使转子按一定方向(如顺时针)转过一个角度 θ_0 ,此时,转子所受电磁转矩 T 称为静态转矩,角度 θ_0 称为失调角,如图7-2-4a所示。步进电机的静态转矩和失调角之间的关系叫矩角特性,大致上是一条正弦曲线,如图7-2-4b。此曲线的峰值表示步进电机所能承受的最大静态负载转矩。在静态稳定区内,当外加转矩消除后,转子在电磁转矩作用下,仍能回到稳定平衡点。

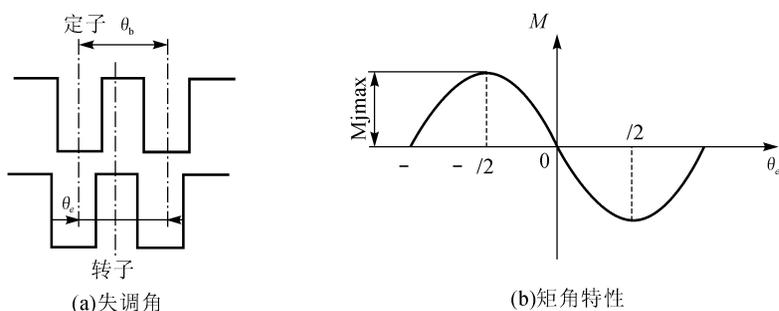


图 7-2-4 步进电机的失调角和矩角特性

多相通电时的矩角特性,可根据单相通电的矩角特性以向量和的方式算出,计算结果如表 7-2-1 所示。其中最后一列表示多相通电时的合成转矩与单相通电时最大静态转矩的比值。

由表 7-2-1 可见,当步进电机励磁绕组相数大于 3 时,多相通电方式能提高输出转矩。所以功率较大的步进电机多数采用多于三相的励磁绕组,且多相通电。

表 7-2-1 步进电机多相通电时的转矩

电动机相数	同时通电相数	合成转矩 M_{jmax}	电动机 相数	同时通电相数	合成转矩 M_{jmax}
3	1	1	5	3	1.618
	2	1		4	1
4	1	1	6	1	1
	2	1.414		2	1.732
	3	1		3	2
5	1	1	4	1.732	
	2	1.619	5	1	

2. 启动转矩

图 7-2-5 所示为三相步进电机的矩角特性曲线,则 A 相和 B 相的矩角特性交点的纵坐标值称为启动转矩。它表示步进电机单相励磁时所能带动的极限负载转矩。



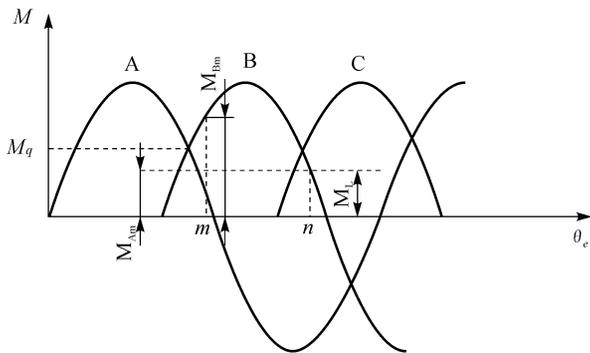


图 7-2-5 步进电机的最大负载能力

当电机所带负载 $M_L < M_q$ 时, A 相通电, 工作点在 m 点, 在此点 $M_{Am} = M_L$ 。当励磁电流从 A 相切换到 B 相, 而转子在点 m 位置时, B 相励磁绕组产生的电磁转矩是 $M_{Bm} > M_L$, 转子旋转, 前进到点 n 时, $M_{Bn} = M_L$, 转子到达新的平衡位置。显然, 负载转矩不可能大于 A, B 两交点的转矩 M_q , 否则转子无法转动, 产生“失步”现象。不同相数的步进电机的启动转矩不同, 启动转矩如表 7-2-2 所示。

表 7-2-2 步进电机启动转矩

步进电机	相数	3		4		5		6	
	拍数	3	6	4	8	5	10	6	12
M_q/M_{jmax}		0.5	0.866	0.707	0.707	0.809	0.951	0.866	0.866

3. 空载启动频率

步进电机在空载情况下, 不失步启动所能允许的最高频率称为空载启动频率。在有负载情况下, 不失步启动所能允许的最高频率将大大降低。例如 70BF3 型步进电机的空载启动频率是 1400Hz, 负载达到最大静转矩的 0.5 倍时, 降为 50Hz。为了缩短启动时间, 可使加到电机上的电脉冲频率按一定速率逐渐增加。

4. 运行矩频特性与动态转矩

在步进电机正常转动时, 若输入脉冲的频率逐渐增加, 则电机所能带动的负载转矩将逐渐下降, 如图 7-2-6 所示, 图中的曲线称为步进电机的矩频特性曲线。可见, 矩频特性曲线是描述步进电机连续稳定运行时输出转矩与运行频率之间的关系。在不同频率下步进电机产生的转矩称为动态转矩。

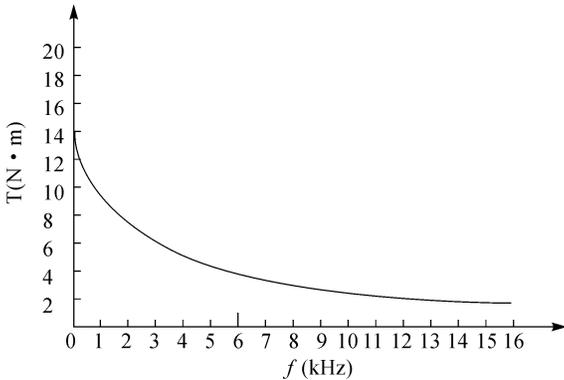


图 7-2-6 运行矩频特性
定子静态电流:9A(两相通电),双电压供电:80V/12V

7.3 开环伺服驱动系统

7.3.1 概述

图 7-1-2 是典型的开环伺服驱动系统。开环伺服系统中没有检测反馈装置。数控装置将工件加工程序处理后,输出数字指令信号给伺服驱动系统,驱动机床运动。但不检测运动的实际位置,即没有位置反馈信号。开环控制的伺服系统主要使用步进电机。插补器进行插补运算后,发出指令脉冲(又称进给脉冲),经驱动电路放大后,驱动步进电机转动。一个进给脉冲使步进电机转动一个角度,通过齿轮丝杠传动使工作台移动一定距离。

受步进电机的步距精度和工作频率以及传动机构的传动精度影响,开环伺服驱动系统的速度和精度都较低。但由于开环控制结构简单,调试方便,容易维修,成本较低,仍被广泛应用于经济型数控上。

7.3.2 开环步进伺服系统的脉冲分配器

图 7-3-1 是开环步进伺服系统中步进电机驱动原理图。图中脉冲信号源是一个脉冲发生器,脉冲的频率可以连续调整,送出的脉冲个数和脉冲频率由控制信号进行控制。在 CNC 系统中由数控装置根据程序控制脉冲个数和脉冲频率。脉冲分配器是将脉冲信号按一定顺序分配,然后送到驱动电路中并进行功率放大,驱动

步进电机工作。

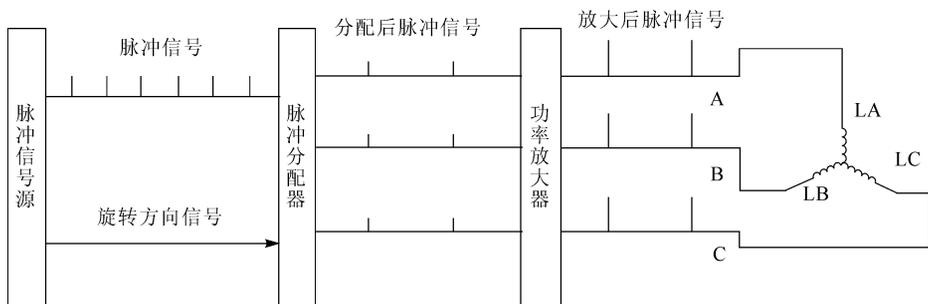


图 7-3-1 步进电机驱动原理图

在开环步进伺服系统步进电机各励磁绕组按一定节拍,依次轮流通电工作,为此,需将控制脉冲按规定通电方式分配到定子各励磁绕组中。完成脉冲分配的功能元件称脉冲分配器。脉冲分配可由硬件实现,也可以用软件完成。

1. 硬件脉冲分配器

脉冲分配器可用逻辑元件及其逻辑电路构成。图 7-3-2 是一个简单的三相六拍脉冲分配逻辑电路,它是由 FF1, FF2, FF3 三个 D 触发器组成。D 触发器的特征方程是 $Q_{n+1} = D_n$ 。方程表明,D 触发器的输出状态 Q 等于时钟脉冲 CP 到来前输入信号 D 的状态。图中 S 为 D 触发器的置“1”端,R 为置“0”端。由图可以列出分配器的输入条件(驱动方程):

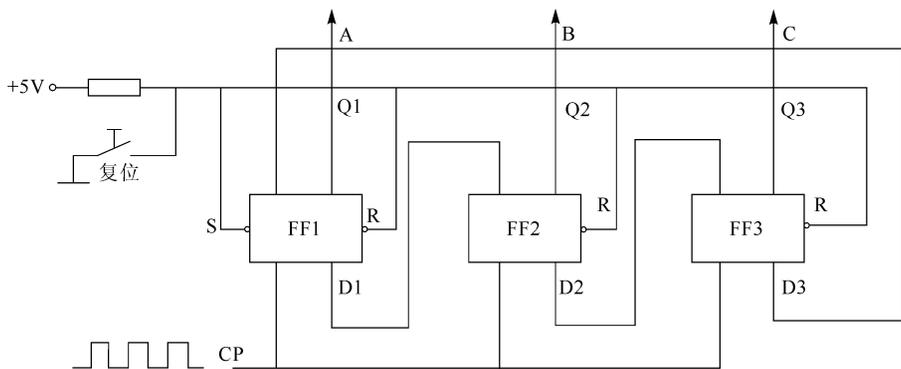


图 7-3-2 三项六拍脉冲分配器

$$D1 = \overline{Q2} \quad D2 = \overline{Q3} \quad D3 = \overline{Q1}$$

运行时,先按一下复位开关,使电路进入初始状态:



$$A = \overline{Q1} = 1 \quad B = \overline{Q2} = 0 \quad C = \overline{Q3} = 0$$

$$D1 = \overline{Q2} = 1 \quad D2 = \overline{Q3} = 1 \quad D3 = \overline{Q1} = 0$$

第一个时钟脉冲 CP 到来后:

$$A = \overline{Q1} = 1 \quad B = \overline{Q2} = 1 \quad C = \overline{Q3} = 0$$

$$D1 = \overline{Q2} = 0 \quad D2 = \overline{Q3} = 1 \quad D3 = \overline{Q1} = 0$$

第二个时钟脉冲 CP 到来后:

$$A = \overline{Q1} = 0 \quad B = \overline{Q2} = 1 \quad C = \overline{Q3} = 0$$

$$D1 = \overline{Q2} = 0 \quad D2 = \overline{Q3} = 1 \quad D3 = \overline{Q1} = 1$$

第三个时钟脉冲 CP 到来后:

$$A = \overline{Q1} = 0 \quad B = \overline{Q2} = 1 \quad C = \overline{Q3} = 1$$

$$D1 = \overline{Q2} = 0 \quad D2 = \overline{Q3} = 0 \quad D3 = \overline{Q1} = 1$$

以此类推,可获得脉冲分配器的状态转换表,如表 7-3-1。

由表 7-3-1 可知,脉冲分配器的分配顺序是 $A \rightarrow AB \rightarrow B \rightarrow BC \rightarrow C \rightarrow CA \rightarrow A \rightarrow \dots$ 可以使步进电机顺时方向转动。

表 7-3-1 脉冲分配器状态转换表

输入脉冲数	触发器状态		
	Q1(A)	Q2(B)	Q3(C)
0	1	0	0
1	1	1	0
2	0	1	0
3	0	1	1
4	0	0	1
5	1	0	1
6	1	0	0

目前,在驱动电路中大多采用可靠性高、外形尺寸小、使用方便的集成脉冲分配器。市场上提供的国产脉冲分配器有三相、四相、五相和六相,它们的型号分别是 YB 013, YB 014, YB 015 及 YB 016。YB 系列脉冲分配器均为 18 个管脚的直插式扁平封装的芯片。

图 7-3-3a 是 YB013 芯片的引线图。各管脚功能如下。

$\overline{E0}$:选通输出控制,低电平有效。控制脉冲分配器是否输出顺序脉冲。

\overline{R} :清零,低电平有效。输出脉冲前,对脉冲分配器清零,使其正常工作。

A0, A1:通电方式控制。若是 A0, A1 = 0, 0 状态,脉冲分配器以三相单三拍方式



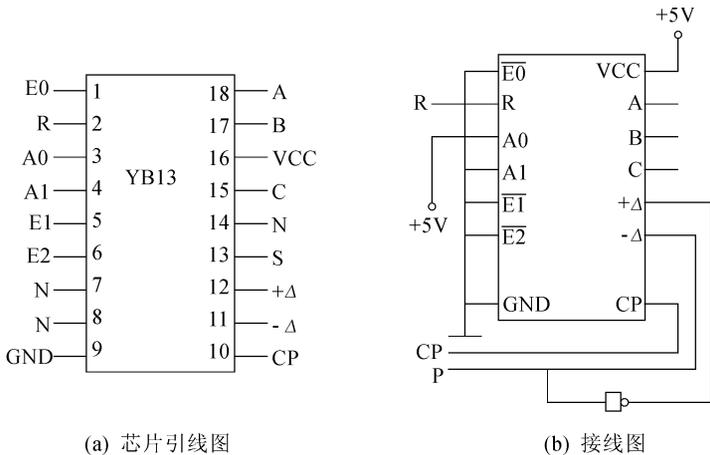


图 7-3-3 YB013 三相六拍接线图

工作;若是 $A0, A1 = 0, 1$ 状态,脉冲分配器以三相双三拍方式工作;若是 $A0 = 1$ 状态,脉冲分配器以三相六拍方式工作。

$E1, E2$:选通输入控制,低电平有效。决定控制指令起作用的时刻。

CP :时钟输入。

Δ :正、反转控制端。决定步进电机旋转方向。

S :出错报警输出。某控制信号出错或脉冲分配器运行错误时,该端口发出报警信号。

图 7-3-3b 是 YB013 三相六拍接线图。图中 R 是清零信号,低电平清零,恢复高电平时,脉冲分配器工作。时钟 CP 的上升沿使脉冲分配器改变输出状态,因此 CP 的频率决定了步进电机的转速。 P 端控制步进电机的转向; $P = 1$ 时为正转, $P = 0$ 时为反转。

2. 软件脉冲分配器

在微机控制系统中,脉冲的分配常用软件实现。图 7-3-4 是 8031 单片机控制步进电机的控制电路。8031 单片机的 $P1$ 口作为输出口,用程序实现脉冲分配功能。因为控制对象是三相步进电机,所以只需三个端口 $P1.0, P1.1, P1.2$ 。三个端口输出的脉冲信号,经光电隔离电路,再由驱动电路放大后驱动步进电机运转。在外部设置两个开关 $K1$ 和 $K2$,开关 $K1$ 控制步进电机的启动和停止,开关 $K2$ 控制步进电机的正转和反转。将 $P3.0$ 和 $P3.1$ 设置成输入口,分别连接开关 $K1$ 和 $K2$ 。当 $P3.0$ 口输入高电平时,电机启动,输入是低电平时,电机停止。当 $P3.1$ 口输入高电



平时,电机正转,输入低电平时,电机反转。

由 P1 口输出控制信号的状态字,即可控制电机的正反转。状态字由 D0 ~ D7 八位构成,因为被控制的步进电机是三相电机,故只用 D0 ~ D2 三位, D3 ~ D7 位取 0。例如,若三相步进电机的 A 相通电, B 相和 C 相断电时,状态字的组成

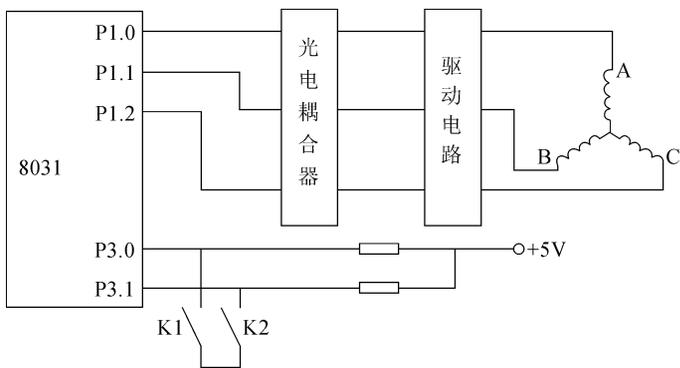


图 7-3-4 步进电机的单片机控制电路

结构是 00000001,用 16 进制表示为 01H。同理,若是 C 相和 A 相通电, B 相断电时,状态字的结构是 00000101,用 16 进制表示为 05H。用同样的道理,我们可以推出步进电机正转和反转时全部状态字的结构,见表 7-3-2。

表 7-3-2 状态字表

转向	通电顺序	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0	状态字
正 转	A						0	0	1	01H
	AB						0	1	1	03H
	B						0	1	0	02H
	BC						1	1	0	06H
	C						1	0	0	04H
	CA						1	0	1	05H
反 转	A						0	0	1	01H
	AC						1	0	1	05H
	C						1	0	0	04H
	CB						1	1	0	06H
	B						0	1	0	02H
	BA						0	1	1	03H

由表 7-3-2 中可以看出,步进电机第一个状态字为 01H,从上到下输出状态字时,步进电机正转。从正转最后一个状态字 05H 之后,加上反转的第一个状态字 01H,此时从下向上输出状态字时,步进电机反转。这样,状态字只占用七个存储单元,而不是十二个,就能实现对步进电机的正反控制,如图 7-3-5 所示。根据状态



字在存储器的地址以及读取状态字的顺序,可以绘出步进电机恒速控制流程图,如图 7-3-6 所示。根据流程图可编写出步进电机正反转控制程序。

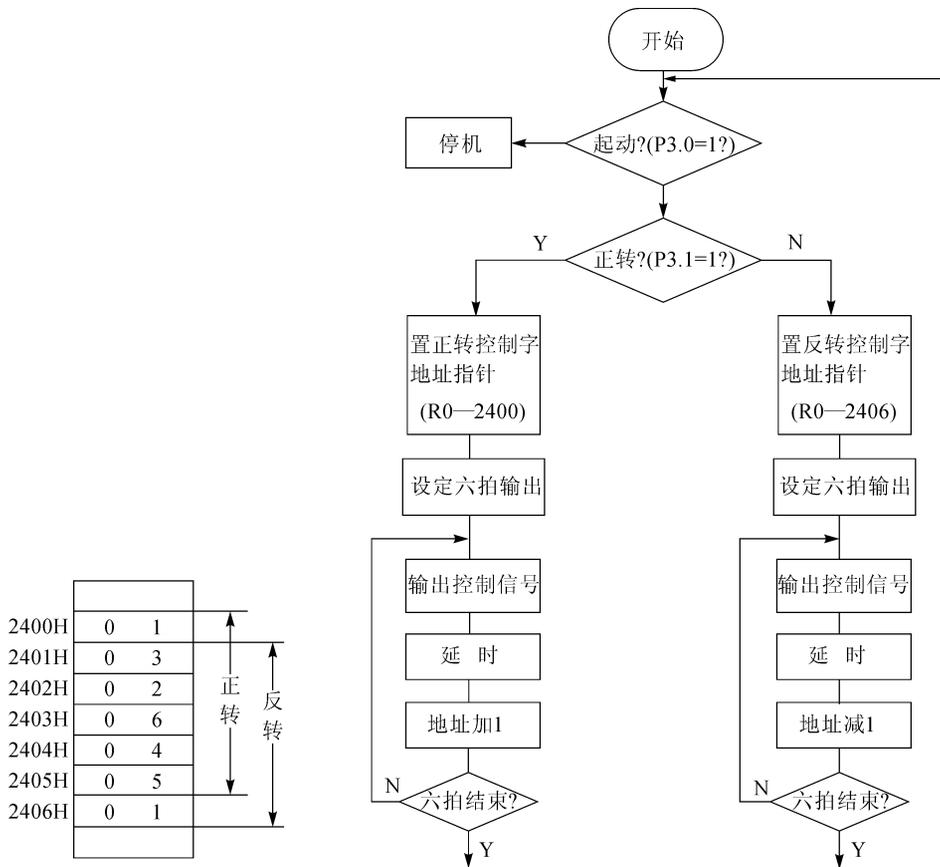


图 7-3-5 状态字在存储器中存放示意图 图 7-3-6 步进电机恒速控制流程图

流程图的含义是:计算机先读出 P3 口的状态,若 P3.0 为“0”时,表示开关 K1 关闭,故转为停机状态;若 P3.0 为“1”,P3.1 也为“1”,要求步进电机正转,此时让地址指针指向 2400H;接着设定六拍输出;首先,取出状态字 01H 作为控制信号由 P1 口输出给步进电机,电机转过一个步距角;调延时子程序,完成一拍延时;地址指针加 1,指向 2401H;判断六拍是否执行完毕,若没有完,返回输出控制信号处,直至六拍执行完毕;六拍结束后,返回到程序起点,查询 P3 口状态,如果开关 K1, K2 位置不变,则程序循环运行,步进电机保持恒速运转;如果 K1 置“0”,转入停机;如果 K1 置“1”,K2 置“0”,转入反转程序。



反转程序运行和正转程序运行相似,只是地址指针设置指向 2406H,并且每完成一拍后,地址指针减 1。

延时子程序的长短决定了步进电机运行一拍的时间,从而控制了步进电机的转速。

7.3.3 开环步进伺服系统的驱动电路

在数控机床中,微型计算机根据加工程序中进给速度及坐标值输出脉冲,并依次将脉冲分配给步进电机的各相绕组。由于微机发出的脉冲功率很小,电压 3V,电流为 mA 级,不能直接驱动步进电机。必须经驱动电路将信号电流放大到若干倍,才能驱动步进电机。因此,驱动电路实际上是一个功率放大器。

驱动电路的质量直接影响步进电机的性能。对驱动电路的主要要求是,信号失真要小,脉冲电源要有较好的前沿、后沿和足够幅值,效率要高。常用的电路有单电源驱动电路、高低压双电源驱动电路和恒流斩波驱动电路。下面只对单电源驱动电路作简单介绍。

图 7-3-7 是一实际应用的单电源驱动电路,图中的 L_a 、 L_b 、 L_c 分别是步进电机的三相绕组,每相绕组由一组放大电路驱动,所以,驱动电路由三组放大电路组成。三组放大电路的结构完全相同,现以 A 组放大电路为例说明驱动电路的结构及原理。

由 A 端输入的脉冲信号为高电平时,输入信号使开关管 3DK4 饱和导通。开关管 3DK4 的发射极电压加在功率放大管 3DD15D 的基极,使其导通。此时 +27V 的电源导通,电流经步进电机 L_a 绕组、电阻 R 和功放管 3DD15D 接地,输入信号被放大。如果 A 端输入的脉冲信号为低电平时,开关管 3DK4 和功放管 3DD15D 均截止,电机绕组 L_a 无电流通过。因为驱动放大电路放大的是脉冲信号,因此,也叫脉冲放大器。

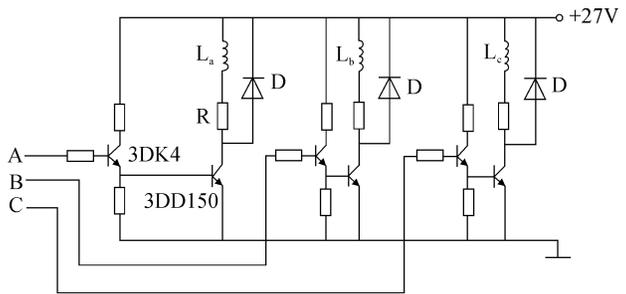


图 7-3-7 单电源驱动电路

如果把脉冲信号按相序输送到 A、B 和 C,则三组放大电路依次工作。当第一个脉冲输入到 A 时,两个三极管均饱和导通, L_a 有电流通过,电机转动一步;当第二个

脉冲输入到 B 时, L_b 有电流通过, 电机再转动一步; 当第三个脉冲输入到 C 时, L_c 有电流通过, 电机又转动一步。如此不断循环, 电机就会一步一步连续转动。这就是三相单三拍通电方式。

图中二极管 D 是续流二极管, 用来泄放电感绕组 L 中储存的能量, 从而保护功放管免遭击穿损坏。R 为限流电阻, 限制通过电机绕组的电流, 使其不致超过额定值, 避免电机发热烧毁。R 的阻值在 $5 \sim 20\Omega$ 范围内选取。

该电路结构简单。由于 R 串联在大电流输出回路中, 要消耗一定的能量, 因此发热严重, 效率低。这种驱动电路通常用在对速度要求不高的小型步进电机中。

7.4 伺服电动机工作原理

伺服电动机多应用于自动控制装置的电路中, 其作用是将电信号转换成轴上的角位移或角速度, 其最大特点是在有控制信号时就旋转, 无控制信号时就停转, 控制信号强和弱时相应的旋转速度就快和慢, 且其转向取决于控制信号的极性。

在闭环伺服驱动系统多采用直流伺服电机和交流伺服电机。伺服电机和普通电机在工作原理方面并无本质的区别, 但因控制电机的性能指标不同, 所以在结构上有很大的差别。普通电机构成的系统称为电力拖动系统。电力拖动系统对电机性能要求不高, 仅仅要求启动和运动状态的性能指标。伺服电机构成的系统常称为伺服驱动系统。伺服驱动系统对伺服电机的要求很高, 既要求高精度, 又要求动态响应性能好。所以伺服电机比普通电机的价格昂贵。

直流伺服电机同交流伺服电机比较具有容易调速, 调速范围大等优点, 所以直流伺服系统一直占主导地位。但是, 直流伺服电机结构复杂, 造价贵, 使用维修不方便。所以人们一直致力于交流伺服电机调速系统的研究工作, 并且, 由于微机技术和电子技术的飞速发展, 交流伺服驱动系统的应用得到迅速发展, 进入 80 年代中期交流伺服驱动系统有取代直流伺服驱动系统而占据主导地位的趋势。在下面我们分别介绍两种电动机的结构和特点。

7.4.1 直流伺服电动机

直流电机具有良好的调速特性, 为一般交流电机所不及。因此, 在对电机的调速性能和启动性能要求较高的机械设备上, 以往大都采用直流电机驱动, 而不顾及



结构复杂和价格较贵等缺点。

1. 数控机床中使用直流伺服电动机的类型

归纳起来,目前世界上的数控机床用到的直流伺服电机主要有以下几类。

(1)改进型直流电动机 如果把传统用的直流电动机在设计时减少转动惯量、增大其过载能力,改进其换向性能,使它在静态与动态特性方面有所改善,就可成为数控机床的进给驱动伺服电动机。在早期的欧美数控机床中较多采用这种改进型的直流电动机。

(2)小惯量电动机 随着数控机床的发展,对伺服系统的执行电动机的要求越来越高主要是因为:①尽量小的转动惯量,以保证系统的动态特性。②在很低的转速下,仍能均匀稳定地旋转,以保证低速时的精度。③尽量大的过载倍数,以适应经常出现的冲击现象。

一般直流电动机不能达到上述要求,于是出现了这种特殊的直流电动机——小惯量电动机。小惯量电动机也是直流电动机的一种,其特点是:①转动惯量小,约为普通直流电动机的 $1/10$ 。②由于电枢反应比较小,具有良好的换向性能,机电时间常数只有几个毫秒。③由于其转子无槽,电气机械均衡性好,尤其在低速时运转稳定而均匀,在转速低达 $10\text{r}/\text{min}$ 时,无爬行现象。④最大转矩为额定值的 10 倍。

(3)永磁直流伺服电动机 由于永磁直流伺服电动机能在较大过载转矩下长期的工作以及电动机的转子惯量较前述两种电动机都大,因此它能直接与丝杠相连而不需要中间传动装置。而且因为无励磁回路损耗,所以它的外形尺寸比与其相类似的励磁式直流电动机为小。它还有一个特点是可在低速下运转,如能在 $1\text{r}/\text{min}$ 甚至在 $0.1\text{r}/\text{min}$ 下平稳地运转。因此,这种电动机在数控机床上获得了广泛的应用。自20世纪70年代至80年代中期,在数控机床应用中,它占据着绝对统治地位。至今,许多数控机床上仍然使用着永磁直流伺服电动机。

(4)无刷直流电动机 无刷直流电动机也叫无换向器直流电动机,是由同步电动机和逆变器组成,而逆变器是由装在转子上的转子位置传感器控制。因此,它实质上是交流调速电动机的一种。由于这种电动机的性能达到直流电动机的水平,又取消了换向器及电刷部件,使电动机寿命大约提高了一个数量级,因此多年来引起人们很大的兴趣。

下面以永磁式直流伺服电动机为例简单介绍直流伺服电机的结构及工作原理。



2. 永磁式直流伺服电动机

(1) 永磁式直流伺服电动机的结构 永磁直流电动机可分为驱动用永磁直流电动机和永磁直流伺服电动机两大类。驱动用永磁直流电动机通常是指不带稳速装置,没有伺服要求的电机,而永磁直流伺服电机则除具有驱动用永磁直流电动机的性能外,还具有一定的伺服特性和快速响应能力。在结构上往往与反馈部件做成一体。当然,永磁直流伺服电动机也可作为驱动用电动机。因为永磁直流伺服电动机允许有宽的调速范围,所以也称宽调速直流电动机,其结构如图 7-4-1 所示。电机本体由三部分组成:机壳、定子磁极和转子电枢。反馈用的检测部件有高精度的测速发电机、旋转变压器以及脉冲编码器等,安装在电机的尾部。

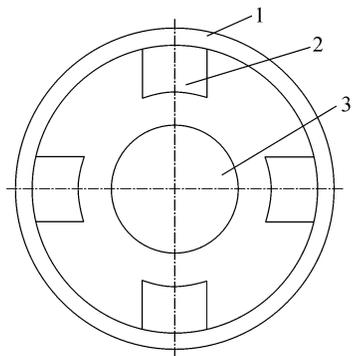


图 7-4-1 四极永磁直流电机

1—机壳;2—定子磁极;3—电枢

(2) 工作原理 永磁式直流伺服电动机的工作原理与普通直流电机相同。用永久磁铁代替普通直流电机的励磁绕组和磁极铁心,在电机气隙中建立主磁通,产生感应电势和电磁转矩。图 7-4-2 所示为永磁式直流伺服电动机电路原理。

电机电枢电路的电压平衡方程式为

$$U = E_M + I_M R_M \quad (7-4-1)$$

感应电动势为

$$E_M = C_e n \Phi \quad (7-4-2)$$

有以上两个方程可得电动机转速特性

$$n = \frac{U - i_M R_M}{C_e \Phi} = \frac{U}{K_V} - \frac{R_M}{K_V} i_M \quad (7-4-3)$$

式中: U ——电动机电枢回路外加电压;

R_M ——电枢回路电阻;

I_M ——电枢回路电流;

C_e ——反电动势系数;

K_V ——反电动势常数;

Φ ——气隙磁通量。

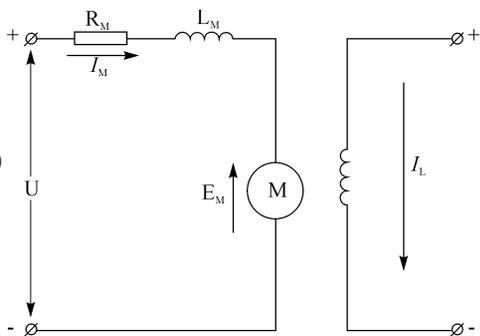


图 7-4-2 他激直流电机电路原理图

电动机的电磁转矩为

$$T_M = C_m \Phi I_M \quad (7-4-4)$$

因此可得电动机机械特性方程式为

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R_M}{C_e C_m \Phi^2} T_M \quad (7-4-5)$$

式中： C_m ——转矩系数。

式(7-4-5)描述了电枢转速与转矩间的关系,称为电机的机械特性。图7-4-3所示为机械特性曲线。图中不同的电枢电压对应不同的曲线,各曲线彼此平行。

n_0 即 $\frac{U}{C_e \Phi}$ 称为“理想空载转速”而 Δ_n 即

$\frac{R_M}{C_e C_m \Phi^2}$ 称为转速降落。电机速度控制单元的作用是将转速指令信号改变为相应的电枢电压值。

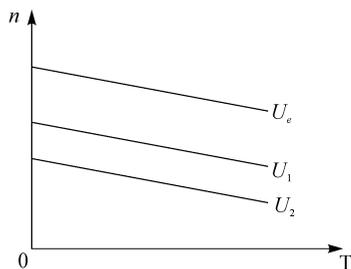


图7-4-3 不改变外加电压时的机械特性
($U_N > U_1 > U_2$)

(3) 工作特性 永磁式直流伺服电机的性能可用其工作特性曲线来描述,下面介绍转矩-速度特性曲线和负载周期曲线。

①转矩-速度特性曲线。又称工作曲线,如图7-4-4所示,伺服电机的工作区域被温度极限线、转速极限线、换向极限线、转矩极限线以及瞬时换向极限线划分为三个区域。Ⅰ为连续工作区,在该区域内可对转矩和转速做任意组合,都可长期连续工作;Ⅱ为断续工作区,此区域电机只能按负载周期曲线所决定的允许工作时间和断电时间做间歇工作;Ⅲ为加(减)速区域,电机只能用做加(减)速工作一段极短的时间。

②负载周期曲线。如图7-4-5所示,该曲线表示在满足机械所需转矩,而又确保电机不过热的情况下,允许电机工作的时间。因此,这些曲线是由电机温度极限决定的。负载周期曲线的使用方法是:首先根据实际负载转矩的要求,求出电机在改值下的过载倍数,即

$$T_{md} = \frac{\text{负载转矩}}{\text{连续额定转矩}} \quad (7-4-6)$$

然后在负载周期曲线的水平轴线上找到实际机械所需要的工作时间,并从该点

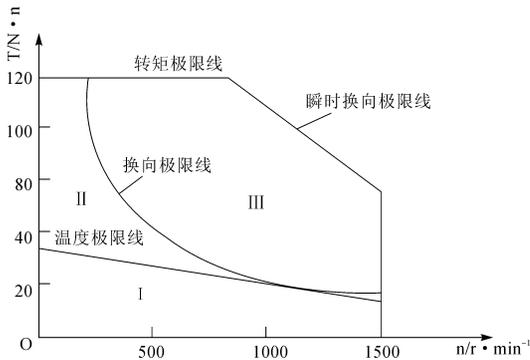


图 7-4-4 转矩-速度特性曲线

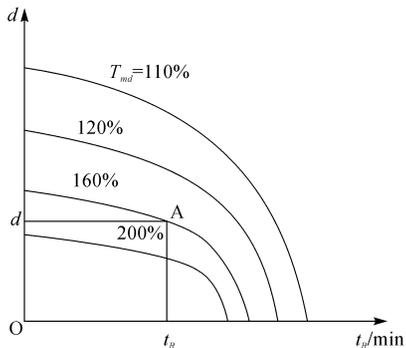


图 7-4-5 负载周期曲线

向上作垂线,与所需要的曲线相交。再从该点作水平线,与垂直轴相交的点即为允许的负载工作周期比,即

$$n = \frac{t_R}{t_R + t_F} \quad (7-4-7)$$

式中: t_R ——电机的工作时间;

t_F ——电机的断电时间。

最后可求出最短的断电时间为

$$t_F = T_R \frac{1}{d} - 1 \quad (7-4-8)$$

(4) 直流伺服电动机的速度控制方法 对于直流电动机,控制速度的方法可以从直流电动机的工作原理来分析。由式(7-5)可以看出,对于已经给定的直流电机,要改变它的转速,有三种方法:①改变电枢回路电阻;②改变气隙磁通量;③改变外加电压。前两种方法的调速特性不能满足数控机床的要求。第三种方法的机械特性如图 7-4-3 所示。图中 U_e 为额定电压值。改变外加电压调速方法的特点是具有恒转矩的调速特性,机械特性好。因为采用减小输入功率方式减小输出功率,所以经济性能好,调速方法得到了广泛的应用。永磁直流伺服电机的调速都采用这种方式。所以,直流电机控制单元的作用是将转速指令信号改变为相应的电枢电压值。

在数控机床驱动装置中,直流电机速度控制大多采用晶闸管调速系统和晶体管脉宽调制调速系统。下面对这两种控制方式作简单介绍。

① 晶闸管调速装置。晶闸管,又称可控硅(SCR),是一种大功率半导体器件,由阳极 A、阴极 K 和控制极 G 组成。当阳极与阴极间施加正电压且控制极出现触发



脉冲时,可控硅导通。称触发脉冲出现的时刻为触发角 α 。控制触发角 α 即可控制可控硅的导通时间,从而达到控制电压的目的。

晶闸管速度控制只通过改变晶闸管触发角 α ,对电动机进行调速范围较小。为满足数控机床的调速范围需要,可采用带有速度反馈的闭环系统。为增加调速特性的硬度,需再加一个电流反馈环节,实现双环调速。图7-4-6所示为一个典型的双环调速系统。

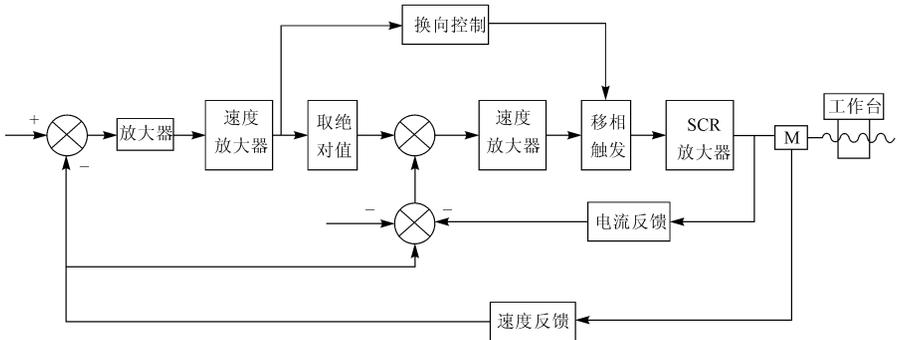


图 7-4-6 双环调速系统结构框图

②脉冲宽度调制器直流调速系统(简称PWM)。所谓脉冲宽度调速,是利用脉冲宽度调制器对大功率晶体管开关放大器的开关时间进行控制,将直流电压转换成某一频率的方波电压,加到直流电机的电枢两端,通过对方波脉冲宽度的控制,改变电枢两端的平均电压,从而达到调节电机转速的目的。直流脉宽调速系统主要采用了转速电流双闭环的系统结构,如图7-4-7所示。其主要优点是频带宽、电流脉动小、波形系数小、电源功率因数高等。

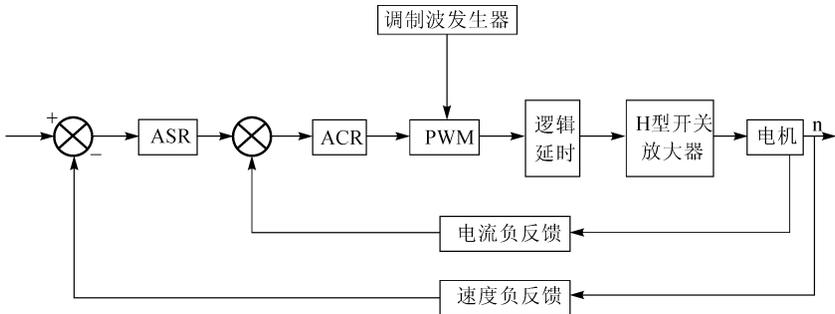


图 7-4-7 直流脉宽调速系统框图

7.4.2 交流伺服电动机

由于直流伺服电机具有优良的调速性能,因此长期以来,在要求调速性能较高的场合,直流电机调速系统的应用一直占据主导地位。但直流电机存在一些固有的缺点,如它的电刷和换向器容易磨损,需要经常维护;由于换向器换向时会产生火花,使电机的最高转速受到限制,也使应用环境受到限制;而且直流电机的结构复杂,制造困难,所以铜铁材料消耗大,制造成本高。而交流电机特别是交流感应电机没有上述缺点,并且转子惯量较直流电机小,使电机的动态响应更好。在同样的体积下,交流电机的输出功率可比直流电机提高 10% ~ 70%。

1. 交流伺服电机的分类和特点

在交流伺服系统中既可以用交流感应电机也可以用交流同步电机。

交流感应电机按所用电源种类可以分为三相和单相两种。从结构上分又有带换向器和不带换向器的两种。通常多用不带换向器的三相感应电机。其结构是定子上装有对称三相绕组,而在圆柱体的转子铁心上嵌有均匀分布的导条,导条两端分别用金属环联成一个整体(称笼式转子)。因此这种电机也称笼式电机。当对称三相绕组接三相电源后,由电源提供励磁电流,在定子和转子之间的气隙内建立起同步转速的旋转磁场,依靠电磁感应作用,在转子导条内产生感应电势。因为转子上的导条已构成闭合回路,转子导条中就有电流流过,从而产生电磁转矩,实现由电能转变成机械能的能量变换。

交流同步电机与感应电机的最大差别是同步电机的转速与电源的频率之间存在严格的关系,即在电源电压和频率固定不变时,其转速保持稳定不变。因此,由变频电源供电给同步电机时,便可获得与频率成正比的可变转速,调速范围宽,机械特性硬。

交流同步电机的定子结构与感应电机一样,而转子结构不一样。在数控机床进给驱动中常采用永磁式同步电机,即转子用永磁式结构其优点是结构简单、运行可靠、效率较高。若采用高剩磁感应,高矫顽力的稀土类磁铁等,可比直流电机的外形尺寸约减小 1/2,重量减轻 60%,转子惯量减到 1/5。与异步电机相比,由于采用永磁铁励磁消除了励磁损耗和杂散损耗,所以效率高。通常永磁交流伺服电机是指永磁同步电机。

2. 永磁交流伺服电机的结构及工作原理

永磁交流伺服电机结构示意图如图 7-4-8 所示。由图可见,永磁交流伺服电机



主要由三部分组成:定子、转子和检测元件。其中定子具有齿槽,内有三相绕组,形状与普通感应电机的定子相同。但其外部表面呈多边形,并且无外壳,这有利于散热,可以避免电机发热对机床精度的影响。转子由多块永久磁铁等组成,这种结构的优点是气隙磁密较高,极数较多。

图 7-4-9 是永磁交流伺服电机工作原理简图,图中只画了一对永磁转子,当定子三相绕组通上交流电源后,就产生一个旋转磁场。旋转磁场将以同步转速旋转。根据磁极的同性相斥,异性相吸的原理,定子旋转磁极吸引转子永磁磁极,并带动转子一起同步旋转。当转子加上负载转矩后,造成定子磁场轴线与转子磁极轴线的重合,如图 7-4-9 中所示的 θ 角。随着负载的增加, θ 角也随着增大,当负载减小时, θ 角也随着减小。当负载超过一定极限后,转子不再按同步转速旋转,甚至可能不转。这就是同步电机的失步现象。因此负载极限称为最大同步转矩。

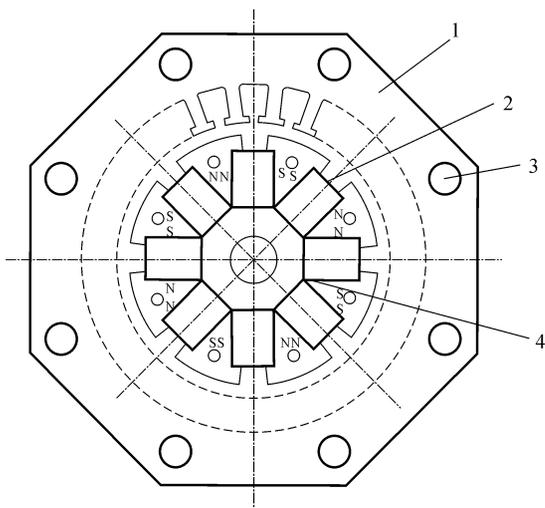


图 7-4-8 永磁交流伺服电机

1—定子;2—永久磁铁;3—轴向通风孔;4—转轴

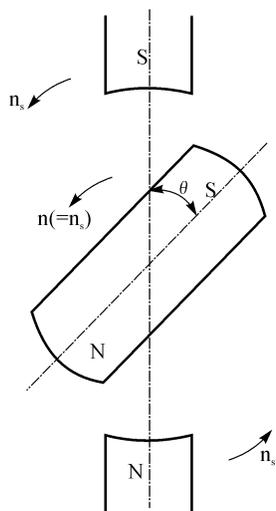


图 7-4-9 永磁交流伺服电机工作原理图

永磁同步电机的缺点是启动比较困难。这是因为当三相电源供给定子绕组时,虽已产生旋转磁场,但转子处于静止状态,惯性较大而无法跟随旋转磁场转动。解决的办法是在转子上装启动绕组,常采用笼式启动绕组。笼式启动绕组将使永磁同步电机如同感应电机一样,产生启动转矩,使转子开始转动,然后电机将以同步转速旋转。另一种办法是在设计中设法减低转子的惯量或采用多磁极等使定子旋转磁场的同步转速不很大,使永磁交流伺服电机能直接启动。还可以在速度控制单元中



采取措施,让电机先在低速下启动,然后再提高到所要求的速度。

3. 交流电机速度控制单元

(1) 交流电机的调速方法 根据交流电动机工作原理,当电机定子三相绕组通三相交流正弦电源时,将建立旋转磁场,其主磁通 Φ_m 的空间转速称为同步转速 n_0 。其值为:

$$n_0 = \frac{60f}{p} \quad (7-4-9)$$

若电机的实际转速为 n ,则电机的转差率为:

$$s = \frac{n_0 - n}{n} \quad (4-7-10)$$

故
$$n = \frac{60f}{p}(1-s) = n_0(1-s) \quad (7-4-11)$$

式中: f ——电源电压频率;

p ——电机磁极对数。

由上式可见,改变异步电动机转速的方法有三种。

①改变磁极对数 P 调速。磁极对数可变的交流电动机称为多速电动机。通常磁极对数设计成 $4/2, 8/4, 6/4$ 等几种。显然,磁极对数只能成对地改变,转速只能成倍地变化。

②改变转差率调速。只能在绕线式异步电动机中使用,在转子绕组回路中串入电阻,通过改变电阻值的大小,可以改变转差率的大小。串入电阻值大,转差率大,转速低;串入电阻值小,转差率小,转速高。调速系统的调速范围为 $3:1$ 。

③改变频率调速。如果电源频率能平滑调节,电机转速也就可以平滑改变。目前,高性能交流电动机伺服驱动系统都采用改变频率调速方法。能改变频率的装置称变频器(VFD)。

(2) 变频调速器调速 在实际调速时,单纯改变频率是不够的,因为定子相电压为

$$u_1 = E_1 = 4.44f_1 K_1 W_1 \Phi_m \quad (7-4-12)$$

所以

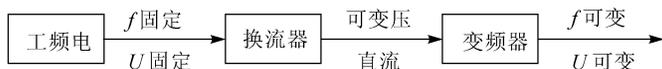
$$\Phi_m = \frac{u_1}{4.44f_1 K_1 W_1} \quad (7-4-13)$$

由上式可见,如果在变频调速中,保持定子电压不变,则主磁通 Φ_m 大小将会改变。因为在一般电机中, Φ_m 值通常是在工频额定电压的运行条件下确定的,为了充

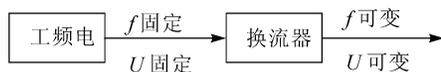


分利用电机铁心,把磁通量选在接近磁饱和的数值上。因此,在变频调速过程中,如果频率从工频往下调节,则 Φ_m 上升,将导致铁心过饱和而使励磁电流迅速上升,铁心过热,功率因数下降,电机带负载能力降低。因此,必须在降低频率的同时,降低电压,以保持 Φ_m 不变。这种频率和电压的配合变化称为恒磁通变频调速中的协调控制。

我国电网频率为 50Hz,是固定不变的,而数控机床的能源都是取自交流电网。因此,设计一个价格便宜、工作可靠、控制方便的变频器已成为自动控制系统中的一个重要研究课题。目前国内主要采用晶闸管和功率晶体管组成的静态变频器。这种变频器先将工频交流电压整流成直流电压,再经过变频器转换成可变频率的交流电压,这种变频器称间接变频器,或称交-直-交变频器,如图 7-4-10a 所示。另一类变频器没有中间环节,直接由电网的工频电压变换成频率、电压可调的交流电压,这种变频器称直接变频器,或称交-交变频器,如图 7-4-10b 所示。



(a)



(b)

图 7-4-10 变频器结构框图

直接变频器只需进行一次电能的变换,所以变换效率高,工作可靠。缺点是频率的变化范围有限,多用在低频大容量的调速。间接变频器需进行两次电能的变换,所以变换效率低,但频率变化范围大不受限制,目前已成为交流电机变频调速的典型方法。

(3) 正弦波脉宽调制 (SPWM) 原理 间接变频器输出的都是矩形波,含有较大的谐波分量。用这种矩形波作为电机电源,不但效率低,而且工作性能也差。若用交流滤波器滤去谐波分量,会使脉冲波形特性变坏。目前广泛采用脉宽调制技术 (PWM 变频器) 可解决上述问题。PWM 变频器输出的是一系列频率可调的脉冲波,脉冲的幅值恒定,宽度可调。根据比值,在变频的同时改变电压,如按正弦波规律调制,就得到接近于正弦波的输出电压,从而使谐波分量大大减小,提高了电机的运行



性能。

随着电力电子学、微电子学及自动控制学的不断发展,交流伺服系统向着全数字化的控制系统前进。如美国 Intel 公司的 16 位单片机 8096 或 80C196 型或 TP86A 单板机等在伺服系统中的应用,使伺服系统中硬件数量大为减少,抗干扰能力随之提高。可以用软件实现速度检测运算、位置的检测、辨向与运算控制,电流相位检测和运算,三相电流生成等,从而实现全数字化控制。在采用微机控制软件方案时,主要考虑的问题是运算速度。数字信息处理器(DSP)是专为处理高速信息信号而开发的一种最新的电机控制技术,内装有并行乘法器,可以实现数字滤波和频率分析的快速傅里叶变换的乘法运算,是一种有前途的数字控制方法。

7.5 闭环伺服驱动系统与位置控制

7.5.1 闭环位置控制的概念

伺服驱动系统按控制对象不同可主要分为速度控制和位置控制。利用速度传感器将速度信号反馈到输入端构成速度环的闭环回路;利用位置传感器将位置信号反馈到输入端构成位置环反馈的闭环回路;同时利用速度环和位置环构成双闭环系统(参考图 7-1-3)。

以加工指令脉冲为输入量,以机床移动部件的位置为输出量的伺服驱动系统称之为位置伺服驱动系统。

数控机床的位置伺服驱动系统按其结构可分成开环控制和闭环(半闭环)控制。由于开环控制的精度不能很好地满足机床的要求,为提高伺服系统的控制精度,最根本的办法是采用闭环控制方式。

闭环和半闭环位置控制的基本原理相同,控制是由数控系统中的计算机完成的。安装在工作台上的位置传感器(半闭环中为安装在电动机轴上的角度传感器)将机械位移转换为数字脉冲,该脉冲送至数控系统的位置测量接口,有计数器进行计数。计算机以固定的时间周期对该反馈进行采样,采样值与插补程序输出的结果进行比较,得到位置误差。该误差经软件增益放大,输出给数模转换器(D/A),从而为伺服装置提供控制电压,驱动工作台向减少误差的方向移动。如果插补程序不断产生进给量,工作台就不断地跟随该进给量运动。只有位置误差为零时,工作台才



停止(停在要求的位置上)。数控系统位置伺服控制如图 7-5-1 所示。

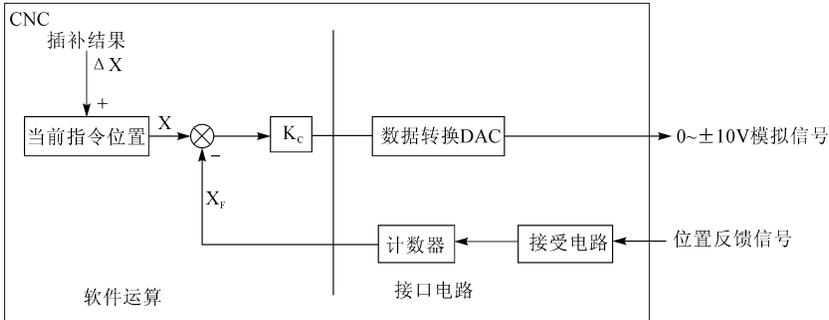


图 7-5-1 数控系统位置控制接口

7.5.2 位置比较实现的方式

在数控机床闭环位置伺服系统中,由于采用的位置检测元件不同,从而引出指令信号与反馈信号不同的比较方式。通常分为脉冲比较、相位比较和幅值比较三种方式。

1. 脉冲比较伺服系统

如图 7-5-2 所示,脉冲比较伺服系统按功能大致可以分为三部分:采用光电脉冲编码器等位置检测器产生位置反馈脉冲 P_f ;实现指令脉冲 P_e 与反馈脉冲 P_f 的脉冲比较,从而取得位置偏差信号 e ;以位置偏差 e 为依据来控制伺服电机的转向和转速,即可控制工作台向指令位置进给。

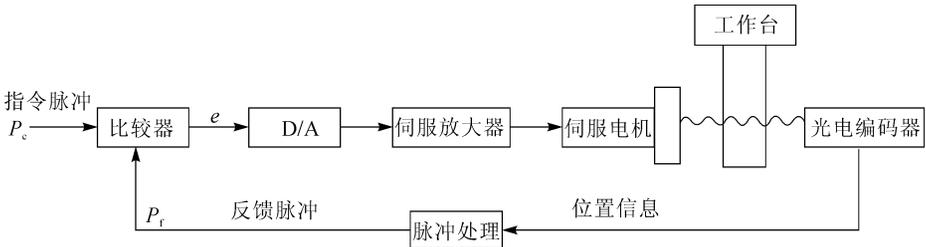


图 7-5-2 脉冲比较伺服系统组成框图

光电编码器与伺服电机的转轴连接,随着电机的转动产生脉冲序列输出,其脉冲的频率将随着转速的快慢而升降。现设工作台处于静止状态,指令脉冲 $P_e = 0$,这时反馈脉冲 P_f 亦为零,经比较环节可知偏差 $e = P_e - P_f = 0$,则伺服电机的速度给定为零,工作台继续保持静止不动。随着指令脉冲的输出, $P_e \neq 0$,在工作台尚未移动之前,反馈脉冲 P_f 仍为零。在比较器中,将 P_e 与 P_f 比较,得偏差 $e = P_e - P_f \neq 0$,若



设指令脉冲为正向进给脉冲,则 $e > 0$,有速度控制单元驱动电机带动工作台正向进给。随着电机运转,光电脉冲编码器将输出反馈脉冲 P_f 送入比较器,与指令脉冲 P_c 进行比较,如 $e = P_c - P_f \neq 0$,继续运动,不断反馈,直到 $e = P_c - P_f = 0$,即反馈脉冲数等于指令脉冲数时, $e = 0$,工作台停在指令规定的位置上。如果继续给正向运动指令脉冲,工作台继续运动。当指令脉冲为反向运动脉冲时,控制过程与指令脉冲为正向进给脉冲时基本上类似。只是此时 $e < 0$,工作台做反向进给。最后,也应在指令所规定的反向某个位置,在 $e = 0$ 时,停止。

比较器为由加减可逆计数器组成的数字脉冲比较器,其组成如图 7-5-3 所示。指令脉冲 P_c 来自插补器,反馈脉冲 P_f 来自光电编码器。

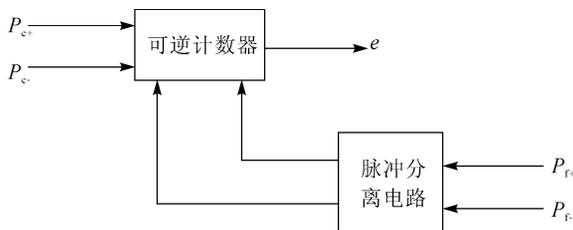


图 7-5-3 脉冲比较器

应用可逆计数器实现脉冲比较的基本要求是:当输入指令脉冲为正(由 P_{c+})或反馈脉冲为负(由 P_{f-})时,可逆计数器做加法计数;当指令脉冲为负(由 P_{c-})或反馈脉冲为正(由 P_{f+})时,可逆计数器做减法计数。

脉冲分离电路的作用是,在加、减脉冲先后分别到来时,各自按预定的要求经加法计数端或减法计数端进入可逆计数器。若加减脉冲同时到来,则由该电路保证先做加法计数,然后再做减法计数,这样可保证两电路计数脉冲均不会丢失。

除光电编码器外,光栅等也可用作脉冲比较伺服系统的检测元件。随着数控技术的发展,采用脉冲比较方法的位置闭环受到了广泛的重视,原因是这种系统结构简单,易于实现数字化的闭环位置控制。

2. 相位比较伺服系统

当位置检测装置采用旋转变压器、感应同步器或磁栅时,如果这些装置工作在相位工作状态,则构成的闭环控制系统为相位比较伺服系统。

图 7-5-4 所示为相位比较伺服系统的原理框图。系统采用同步器为检测元件。由感应同步器的原理可知,当其工作在相位工作状态时,以定尺的相位检测信号经整形放大后所得的作为位置反馈信号。相位比较的实质不是脉冲数量的比较,



而是脉冲相位之间的比较,如超前或滞后多少。实现相位比较的比较器为鉴相器。

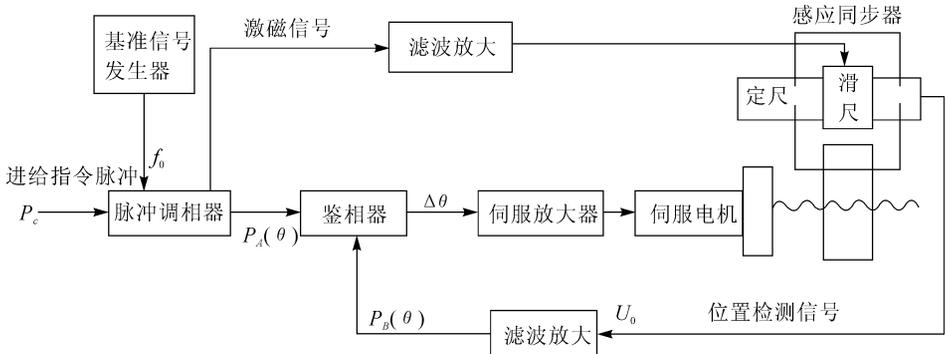


图 7-5-4 相位比较伺服系统的原理框图

脉冲调相器又称脉冲-相位变换器,它的作用是将进给脉冲信号转变为相位变化信号。若数控装置没有进给指令脉冲输出,脉冲调相器的输出与基准信号发生器的基准信号同相位,即两者没有相位差。若数控装置有进给指令脉冲输出,数控装置每输出一个正向或反向脉冲,脉冲调相器的输出将超前或滞后基准信号一个相应相位角。

鉴相器又称相位比较器,它的作用是鉴别指令信号与反馈信号的相位,判别两者之间的相位差,把它变成一个带极性的误差电压信号,且作为伺服放大器——伺服电机的输入信号。鉴相器的输入信号有两路,一路是来自脉冲调相器的指令信号 $P_A(\theta)$,另一路是位置的反馈信号 $P_B(\theta)$, $P_B(\theta)$ 代表了工作台的实际位移量。这两路信号都是用它们与基准信号之间的相位差来表示,而且频率相同,周期相同。当工作台实际移动的距离小于进给指令脉冲要求的距离时,这两个信号之间便存在一个相位差,这个相位差的大小就代表了工作台实际移动的距离与进给指令脉冲要求的距离之差。鉴相器就是鉴别这个误差的电路,它的输出是与此相位差成正比的电压信号。

当进给指令脉冲 P_c 为正时,经过脉冲调相后, $P_A(\theta)$ 产生正的相位移。 $P_A(\theta)$ 与反馈脉冲 $P_B(\theta)$ 比较后,鉴相器输出 $\Delta\theta = +\theta_0$,电机带动工作台作正向移动。当进给指令脉冲 P_c 为负时, $P_A(\theta)$ 产生负的相位移, $P_A(\theta)$ 与 $P_B(\theta)$ 比较后鉴相器输出 $\Delta\theta = -\theta_0$,电机带动工作台作反向运动。当进给脉冲指令 P_c 为 0 时,且工作台处于静止状态时, $\Delta\theta = 0$,工作台不动。

3. 幅值比较伺服系统

当位置检测装置采用旋转变压器或感应同步器,且工作在幅值工作状态时,则



构成的闭环控制系统为幅值比较伺服系统。图 7-5-5 所示为其原理图。

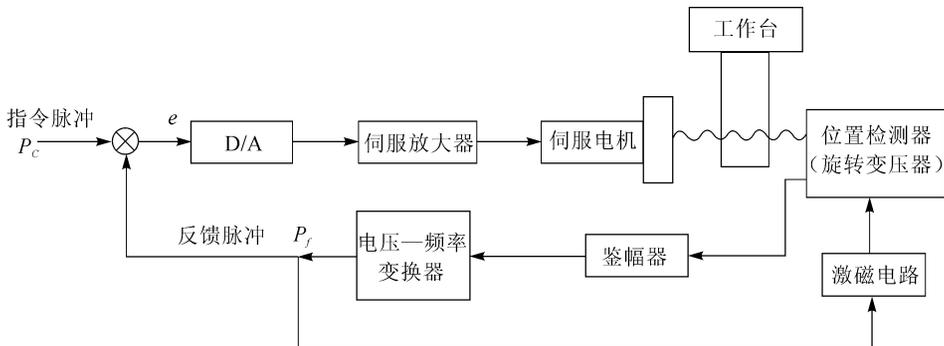


图 7-5-5 幅值比较伺服系统原理框图

幅值比较伺服系统是以位置检测信号的幅值大小来反映工作台的位移,并以此作为位置反馈信号与进给指令信号进行比较构成的闭环控制系统。

鉴幅器由低通滤波器、放大器和检波器三部分组成。来自测量元件的信号除包含基波信号之外,还有许多高次谐波,需要低通滤波器将它滤除。检波器的作用是将滤波后的基波正弦信号转变为直流电压。电压-频率变换器的作用是把检波后输出的模拟电压变成相应的脉冲信号,此电压为正时,输出正向脉冲,此电压为负时,输出反向脉冲。

位置检测装置将工作台的位移检测出来,经鉴幅器和电压-频率变换器处理,转换为相应数字脉冲信号,其输出一路作为位置反馈脉冲 P_f ,另一路送入位置检测装置的激磁电路。当进给指令脉冲 P_c 与反馈脉冲 P_f 两者相等,则比较器输出 e 为 0,说明工作台实际移动距离等于进给指令要求的距离,则伺服电机停止从而使工作台停止移动;若 $e \neq 0$,则 P_c 与 P_f 不相等,说明工作台实际位移不等于进给指令要求的位移,伺服电机会继续运转,带动工作台继续移动,直到 $e=0$ 为止。

7.5.3 速度控制信号的实现方式

经位置控制的脉冲比较、相位比较或幅值比较获得的位置偏差均以脉冲的形式存在,该位置偏差经一定的转换后,形成速度控制信号,数控系统一般输出的速度控制信号为模拟信号 $-10 \sim +10\text{V}$,作为伺服驱动装置的控制信号的大小与伺服电动机的转速成正比;速度控制信号的正、负决定了伺服电动机的正、反转。从位置偏差到速度控制信号的形成如图 7-5-6 所示。

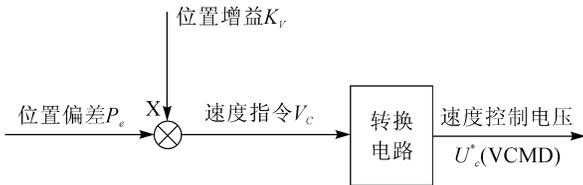


图 7-5-6 速度控制信号的形成

速度指令 $V_c = \text{位置偏差 } P_e \times \text{位置增益 } K_v$ 。位置增益 K_v 决定了速度对位置偏差的响应程度,它反映了伺服系统的灵敏度。将速度指令 V_c 转换为速度控制电压 U_c^* 的转换电路常采用脉宽调制器(PWM)的方法。

7.6 进给伺服系统的性能分析

在数控机床中,伺服系统是数控装置和机床的中间连接环节,是数控系统重要组成部分。数控机床的性能和技术指标在很大程度上是由伺服系统的性能所决定,本节以一个典型的进给伺服系统为例来分析伺服系统的性能。

7.6.1 典型进给伺服系统的组成及其数学模型

这里以由晶闸管控制直流电动机驱动,并采用直线位移检测器作为位置检测元件的双闭环伺服进给系统为例进行讨论。系统原理图如图 7-6-1 所示。

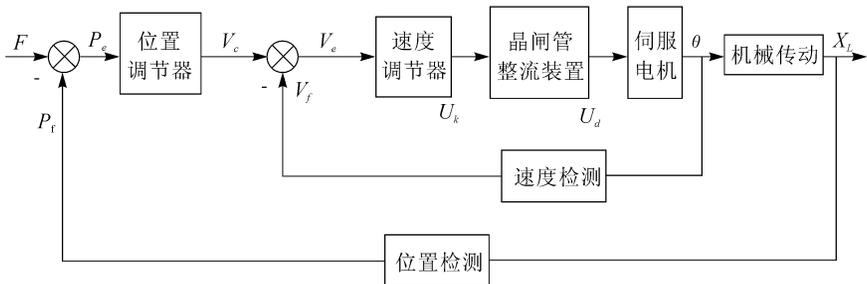


图 7-6-1 直流电机驱动的进给伺服系统原理图

在较为全面考虑伺服进给系统的各个组成部分的特性及相互关系后,所建立起来的数学模型将是一个阶次很高的微分方程。因而,为了研究问题方便,常有条件地将其简化成低阶系统的形式。假如系统的各个环节都是理想的,既没有惯性,没有阻尼,刚性也为无穷大,则可以把进给伺服系统简化成一阶系统的形式,如图 7-6

-2 所示。

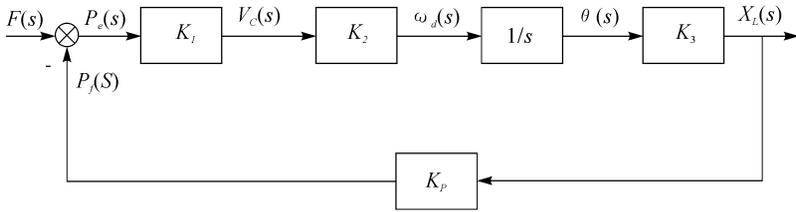


图 7-6-2 简化成一阶系统的结构图

这种简化只是适用于在理论上进行定性的分析。图中： K_1 ——位置放大器增益； K_2 ——速度环增益； $1/s$ ——积分环节，其作用是将速度对时间积分的位移输出； K_p ——位置反馈增益； K_3 ——机械传动装置增益。

若将各环节的增益值相乘，可得：

$$K = K_2 K_3 K_4 K_p$$

称 K 为系统的开环增益亦简称增益。系统开环增益是伺服系统最重要的性能参数，它与伺服进给的快速响应性、稳定性及定位精度等密切相关。

7.6.2 系统的稳定性和稳态性能

1. 稳定性的概念

系统的稳定性是指系统在受到扰动作用使平衡状态破坏，经过调整，能重新达到平衡状态的性能。当系统受到扰动后，偏离了原来的平衡状态，若通过系统的自身调节，使偏差最后逐渐减小，系统重新恢复平衡状态，那么这种系统是稳定的，反之则是不稳定系统。

需要指出的是，稳定性是系统能正常工作的必要条件。如果一台数控机床的伺服控制系统是不稳定的，那么机床工作台就不可能稳定在指定位置，是无法进行切削加工的。因此在控制系统中，最重要的是稳定性问题，或者说，任何控制系统首先必须是稳定的。

2. 稳态性能

一个稳定的控制系统，在启动或受到外部干扰后均需经过短暂的过渡才能从一个稳定状态进入另一个稳定状态。位置进给伺服系统的稳态性能是指在到达新的稳态后，实际状态与期望状态之间的偏差程度，也称为定位精度。一般数控机床的定位精度应不低于 0.01mm ，而高性能数控机床的定位精度将达到 0.001mm 以上。



影响伺服系统稳态精度的原因可以有两类,一类是位置测量装置的误差和测量误差,另一类是系统误差。系统误差与系统输入信号的性质和形式有关,也与系统本身的结构和参数有关。本节主要讨论系统误差对稳态精度的影响。

(1) 典型输入信号 在伺服系统的分析中常用两种典型的输入信号。

①位置输入即位置阶跃输入,见图 7-6-3a。当阶跃的幅值 $A=1$ 时,称为单位阶跃信号,其拉氏变换式为 $R(s)=1/s$ 。点位控制的数控机床是这种输入的典型例子。

②速度输入又称斜坡输入,见图 7-6-3b。在分析中,常用速度信号,其拉氏变换式为 $R(s)=1/s^2$ 。直线插补的数控伺服系统是速度输入的典型例子。

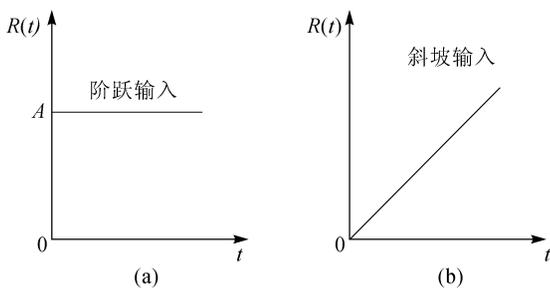


图 7-6-3 典型输入信号

作用于伺服系统除给定输入之外,还有扰动输入。凡是力图使系统离开对给定输入准确跟踪的输入量,统称为扰动输入。典型的扰动输入有:恒值负载扰动、正弦负载扰动、随机性负载扰动以及从检测装置输入的噪声干扰等。

(2) 单位阶跃给定输入时的稳态误差 进给伺服系统若机械传动装置的固有频率远大于电机的固有频率,则进给系统的频率响应就决定于电机速度环的频率特性,则可将这个进给伺服系统简化成一个二阶系统,经整理后系统结构框图见图 7-6-4。其中 $G_k(s)$ 是系统的开环传递函数, K 为开环放大倍数, T 为时间常数。

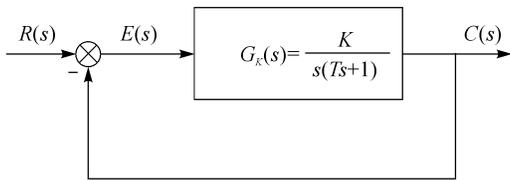


图 7-6-4 二阶典型系统的结构框图

由于开环传递函数中只包含一个积分环节,习惯上亦称为 I 型系统。

在单位阶跃给定输入下,即输入信号 $R(s) = \frac{1}{s}$

由于



$$E(s) = R(s) - C(s) \quad C(s) = G_k(s)E(s)$$

经整理得

$$E(s) = \frac{1}{1 + G_k(s)} R(s) = \frac{s(Ts + 1)}{s(Ts + 1)K} \cdot \frac{1}{s} = \frac{Ts + 1}{s(Ts + 1) + K}$$

利用拉氏变换的终值定理,求得系统的稳态误差

$$e(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{Ts + 1}{s(Ts + 1) + K} = 0 \quad (7-6-1)$$

上式表明,在单位阶跃的给定输入下, I 型系统的稳态误差为零,这个结论是在忽略电机轴上负载的条件下才成立的。由于伺服系统电机的转速到位移之间是一个积分环节,只要输出 $C(t)$ 与输入 $R(t)$ 不相等,它们之间的偏差电压经放大后就使电机旋转,当负载为零时,电机将一直转到偏差电压等于零为止,因此稳态误差为零。如果考虑负载的话,则当电机输出转矩与负载转矩平衡时工作停止进给。为了维持这个转矩,放大器输入端就得有一定的偏差电压,因而稳态误差不等于零。

(3) 单位速度给定输入时的稳态误差 单位速度输入信号 $R(s) = \frac{1}{s}$, 稳态误差

$$e(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1}{1 + G_k(s)} R(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{s(Ts + 1)}{s(Ts + 1) + K} \cdot \frac{1}{s^2} = \frac{1}{K} \quad (7-6-2)$$

此式表明在单位速度给定输入时, I 型系统的稳态误差等于开环放大倍数的倒数,这说明在速度输入下,要实现准确跟踪,电机的输出轴必须随着作同步变化,因此电机的电枢上应保持有一定数值的电压。由于 I 型系统中,只有一个积分环节,放大器只能是比例环节,要维持一定的电枢电压,放大器输入端必须有一个偏差电压,所以系统的稳态误差不会等于零,当然开环放大倍数 K 越大,稳态误差的值愈小。

(4) 单位恒值负载扰动输入的影响 如前所述,伺服系统所承受的各种扰动作用也要影响系统的跟随精度。扰动可来自负载、检测装置及其他各种原因。最常见的扰动是负载扰动和从测量装置引入的噪声干扰。为了简便,仅讨论单位恒值负载扰动的影响。

图 7-6-5a 是给定输入为零,只考虑负载扰动输入时的系统结构图。

图中 $G_1(s)$ 中没有积分环节, $G_2(s)$ 中包含一个积分环节。对于单位恒值负载

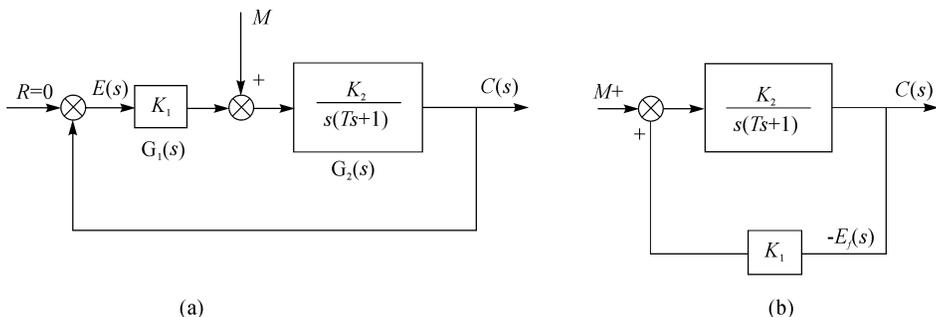


图 7-6-5 负载扰动时系统结构框图

扰动。

设由 M 引起的稳态误差为 e_f , 其拉氏变换式为 $E_f(s)$ 。

由于

$$R(s) = 0, E_f(s) = R(s) - C(s) = -C(s)$$

图 7-6-5b 可以更清楚地表达负载扰动输入下的系统结构。

由此可得

$$C(s) = \frac{G_2(s)}{1 - G_1(s)G_2(s)} M(s)$$

把 $G_1(s) = K_1, G_2(s) = \frac{K_2}{s(Ts+1)}, M(s) = \frac{1}{s}$, 代入上式得

$$C(s) = \frac{K_2/s(Ts+1) \cdot 1/s}{1 + \frac{KK_2}{s(Ts+1)}} = \frac{K_2}{[s(Ts+1) - K_1K_2]s}$$

$$e(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} s E_f(s) = -\lim_{s \rightarrow 0} s C(s) = -\lim_{s \rightarrow 0} \frac{K_2}{s(Ts+1) - K_1K_2} = +\frac{1}{K_1} \quad (7-6-3)$$

这表明恒值负载扰动会使 I 型系统产生稳态误差, 误差值的大小与负载扰动作用点之前的传递函数的放大倍数成反比。

7.6.3 动态过程分析

动态过程是指控制系统在输入作用下从一个稳态向新的稳态转变的过渡过程。位置伺服进给系统在跟踪加工的连续控制过程中, 几乎始终处于动态的过程之中。

前面已经提到, 通常有给定与扰动两种输入作用于控制系统。理想的控制系统

应该对给定输入的变化能够准确地跟踪,同时应该完全不受扰动输入的影响。换句话说,系统应该具有很好的跟随性和很强的抗扰性。下面主要讨论有关的动态指标和性能。

在分析系统的动态过程时用时域分析法最为直观,因此这里讨论的是属于时域上的性能指标。由于系统在给定输入和扰动输入下,其输出响应具有不同的物理意义,对系统动态过程的评价相应地提出不同的性能指标。

1. 给定输入的跟随性能指标

对于位置随动系统,由于给定值的变化是主要输入,动态过程将围绕这个变化了的给定值而变化。

在 $r(t)$ 为单位阶跃信号作用下,系统输出 $c(t)$ 的相应曲线如图 7-6-6 所示。

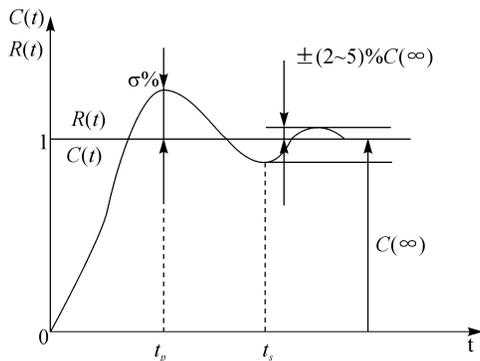


图 7-6-6 动态跟随过程曲线

分析动态跟随相应曲线的质量时,常用的性能指标有以下几种。

(1) 超调量 $\sigma\%$ 设系统输出响应在 t_p 时刻到达最大值,其超出稳态值的部分与稳态值的比值称为超调量,通常取百分数形式。即

$$\sigma\% = \frac{c(t_p) - c(\infty)}{c(\infty)} \times 100\% \quad (7-6-4)$$

式中: $c(t_p)$ —— t_p 时刻 $c(t)$ 的值;

$c(\infty)$ —— $t = \infty$ 时 $c(t)$ 的值,即稳态值。

(2) 调节时间 t_s 首先,若把 $c(\infty)$ 的 $\pm(2\%$ 或 $5\%)$ 形成的区域称为误差带。那么,调节时间 t_s 的定义是:从加上输入量的时刻到输出量 $c(t)$ 进入而且不再超出误差带为止的一段时间。



以上指标中,调节时间 t_s 愈小表明系统快速性跟随性能愈好,超调量 $\sigma\%$ 愈小表明系统在跟随过程中比较平稳,但往往也比较迟钝。显然,作为数控伺服系统,希望都能做到愈小愈好。然而,在实际中快速性和稳定性往往是互相矛盾的。压低了超调量就会延长过渡过程,加快了过渡过程却又会增大超调量。因此,需按照加工工艺的要求在各项性能指标中作一定的选择。

2. 对扰动输入的抗扰性能指标

抗扰性能是指,当系统的给定输入不变时,即给定量为定值时,在受到阶跃扰动后输出克服扰动的影响自行恢复的能力。

系统抗扰能力的动态指标用的是最大动态变化(降落或上升)和恢复时间。

7.7 实训四(步进电动机驱动系统的调试及使用)

1. 实训目的与要求

- ①熟悉步进电动机的运行原理及其驱动系统的连接。
- ②掌握步进电动机的性能特性及其与驱动器的关系。
- ③了解步进电动机的驱动系统的加、减速特性。

2. 实训仪器与设备

- ①57HS13 型两相混合式步进电动机一台。
- ②MS535 型两相双极性细分驱动器一台。
- ③CZ-0.5 型磁粉制动器(5N·m)一台。
- ④光电编码器(2500 或 3600 线,A,B,Z 相信号,带线驱动器输出)一只。
- ⑤HNC-21TF 数控系统一套。
- ⑥可安装于步进电动机轴上的惯量圆盘。

3. 相关知识概述

(1)混合式步进电动机的工作原理 混合式步进电动机综合了永磁式及反应式步进电动机两者的优点,因而得到了广泛的应用。图 7-7-1 为两相混合式步进电动机结构原理图,定子与反应式步进电动机的类似,磁极上有控制绕组,极靴表面有小齿。绕组为 A,B 两相,并通以双极性激励电流。转子铁心分成两段,中间有一环形永磁体,充磁方向为轴向,如图 7-7-1 所示,两段转子铁心的齿数和齿形完全一样,但互对位置沿圆周方向相互错开 $1/2$ 齿距角,即齿与槽相对。由于永磁体的作



用,其转子的齿带有固定的极性。若 A 相通以正向电流, A 相磁极产生的极性为 A_1, A_3 为 S 极, A_2, A_4 为 N 极。由于转子齿左段为 N 极性,故 A_1 和 A_3 极的定子齿与转子齿对齐,而 A_2 和 A_4 的定子齿与转子齿同极性,形成齿槽相对;在转子的右段,情况与左段相反, A_2 和 A_4 的定子齿与转子齿对齐,而 A_1 和 A_3 则为齿槽相对。磁路走向如图 7-7-1 中箭头所示的方向沿轴向穿过转子左段,沿径向通过气隙和定子磁极,再沿轴向经过定子轭,沿径向通过定子磁极和气隙,进入右段转子。若 A 相通以负向电流, A_1 和 A_3 变为 N 极, A_2 和 A_4 变为 S 极,齿槽对应的情况与上述相反,也及电流从正方向改变为负方向后,转子将转过 $1/2$ 齿距。当 A_1 磁极的定子齿与转子齿对齐时, B 向的 B_1 磁极定子齿与转子齿之间错开了 $1/4$ 齿距,因此从 A 相正电流转换为 B 相正电流时,转子将转过 $1/4$ 齿距。

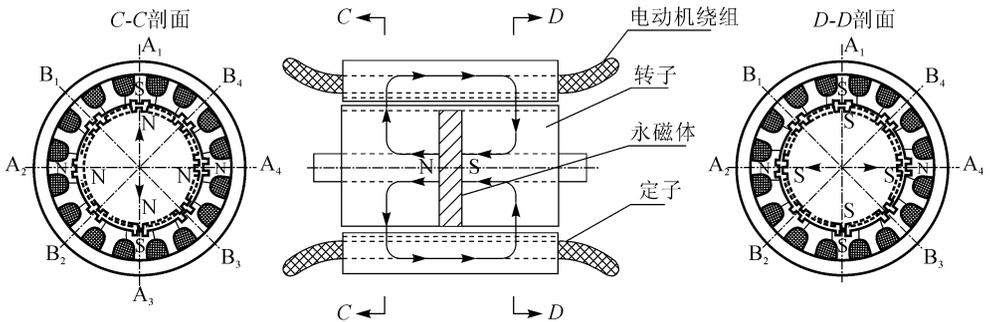


图 7-7-1 两项混合式步进电动机的结构原理图

若步进电动机通以如图 7-7-2 所示两相双极性激励电流,则在任何时刻 A, B 相都存在电流,步进电动机的电磁转矩由两相的转矩合成,转子的平衡位置则处于 A, B 相两个平衡位置之间。每一次电流变化,转子就会转过 $1/4$ 齿距。一个电流周期,共发生四次电流转换(称为四拍),转子则转过 1 个齿距,因此步进电动机的步距角为

$$\beta = \frac{360^\circ}{\text{循环环拍} \times \text{转子齿数}} = \frac{360^\circ}{4 \times \text{转子齿数}}$$

若以两相八拍双极性激励电流,如图 7-7-3 所示,则步进电动机的步距为前者的 $1/2$,即 $\beta = \frac{360^\circ}{8 \times \text{转子齿数}}$,称细分数为 2。

若 A, B 两相激励电流按图 7-7-4 所示分成 40 等分的余弦函数和正弦函数采样点给定电流,则一个电流周期的循环拍数将为 40,故步进电动机的步距角将成为 $\beta = \frac{360^\circ}{40 \times \text{转子齿数}}$ 称细分数为 10。

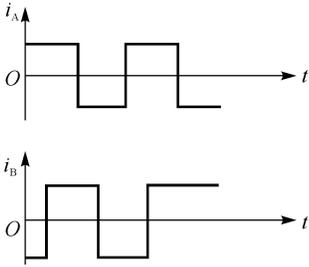


图 7-7-2 两相双极性激磁电流

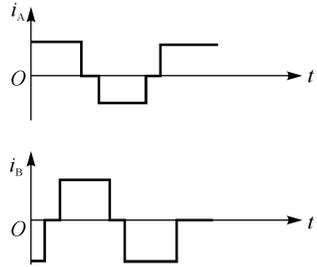


图 7-7-3 两相八拍双极性激磁电流

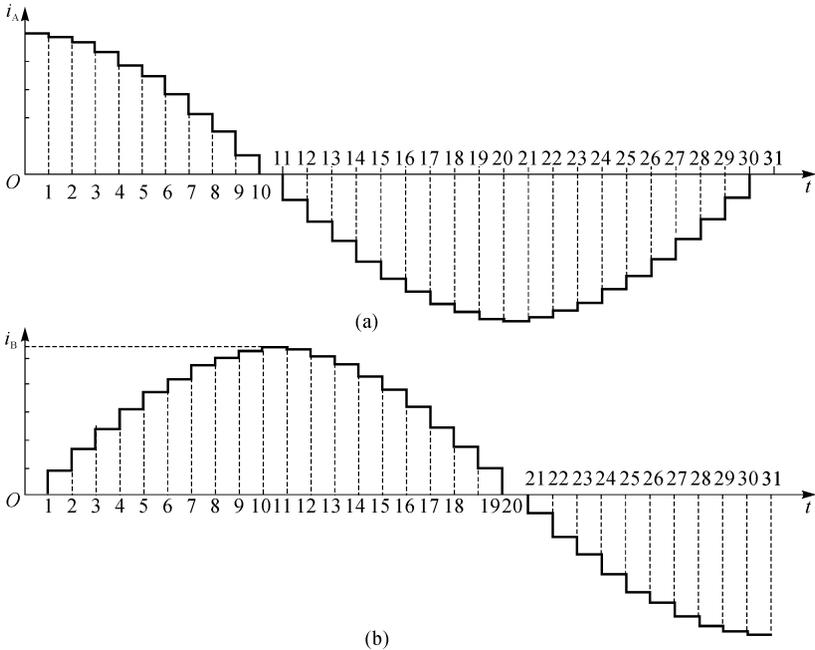


图 7-7-4 两相四十拍双极性激磁电流

改变上述两相电流的采样点数,可以在一个驱动器上实现多种细分数(每转步数)。在三相、五相步进电动机中,定子极数随之增加,相应地增加了通电循环的拍数,在一定的转子齿数下,可获得更小的齿距角,其结构原理与二相步进电动机相似。

(2) 步进电动机的主要特性

①步距角和步距误差。转子每步转过的空间机械角度,即步距角为 $\beta = \frac{360^\circ}{NZ_2}$

式中: Z_2 —转子齿数;

N —运行拍数。

步进电动机每走一步,转子实际的角位移与设计的步距角之间都存在步距误差。连续走若干步时,上述误差形成累积值。转子转过一圈后,回至上一转的稳定位置,因此步进电动机的步距误差不会长期积累。步进电动机步距的积累误差,是指一转范围内步距误差积累的最大值,步距误差和积累误差通常用度($^{\circ}$)、分(')或者步距角的百分比表示。影响步进电动机步距误差和积累误差的主要因素有:齿与磁极的分度精度、铁心叠压及装配精度、各相距角特性之间差别的大小、气隙的不均匀程度等。

②静态距角特性和最大静转矩特性。所谓静态,是指电动机不改变通电状态,转子不动时的工作状态。空载时,步进电动机某相通以直流电流时,该相对应的定、转子齿对齐,这时转子无转矩输出。如在电动机轴上加以顺时针方向的负载转矩,步进电动机转子将按顺时针方向转过一个小角度 θ ,称为失调角;这时,转子电磁转矩 T 与负载转矩相等。距角特性是描述步进电动机静态时电磁转矩 T 与失调角 θ 之间关系的曲线,也称为静转矩特性,如图7-7-5所示。

③步进电动机的矩频特性。步进电动机矩频特性是用来描述步进电动机连续稳定运行时,输出转矩与连续运行频率之间的关系曲线。矩频特性曲线上每一频率所对应的转矩称为动态转矩。动态转矩除了与步进电动机的结构及材料有关外,还与步进电动机绕组的连接方式、驱动电路、驱动电压有密切的关系。图7-7-6是混合式步进电动机连续运行时的典型矩频特性曲线。

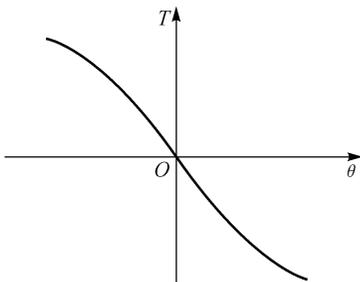


图7-7-5 步进电机的矩角特性图

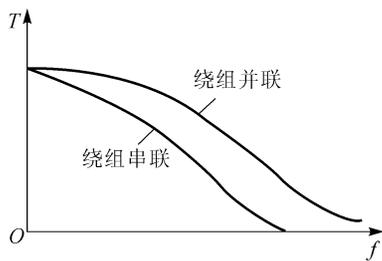


图7-7-6 步进电动机的矩频特性

4. 实训内容

①把步进电动机安装于负载测试台上,松开与磁粉制动器连接的联轴器,连接光电编码器与步进电动机。最后,按图7-7-7将57HS13型步进电动机、MS535型步进电动机驱动器与HNC-21TF数控系统连接起来。



②HNC-21TF 数控系统参数设置。按表 7-7-1 对步进电动机有关坐标轴参数进行设置。按表 7-7-2 设置硬件配置参数。

表 7-7-1 坐标轴参数

参数名	参数值
伺服驱动器部件号	46
最大跟踪误差	0
电动机每转脉冲数	400
伺服内部参数[0]	8(步进电动机拍数)
伺服内部参数[1][2][3][4][5]	0
快移加、减速时间常数	0
快移加速度时间常数	0
加工加、减速时间常数	0
加工加速度时间常数	0

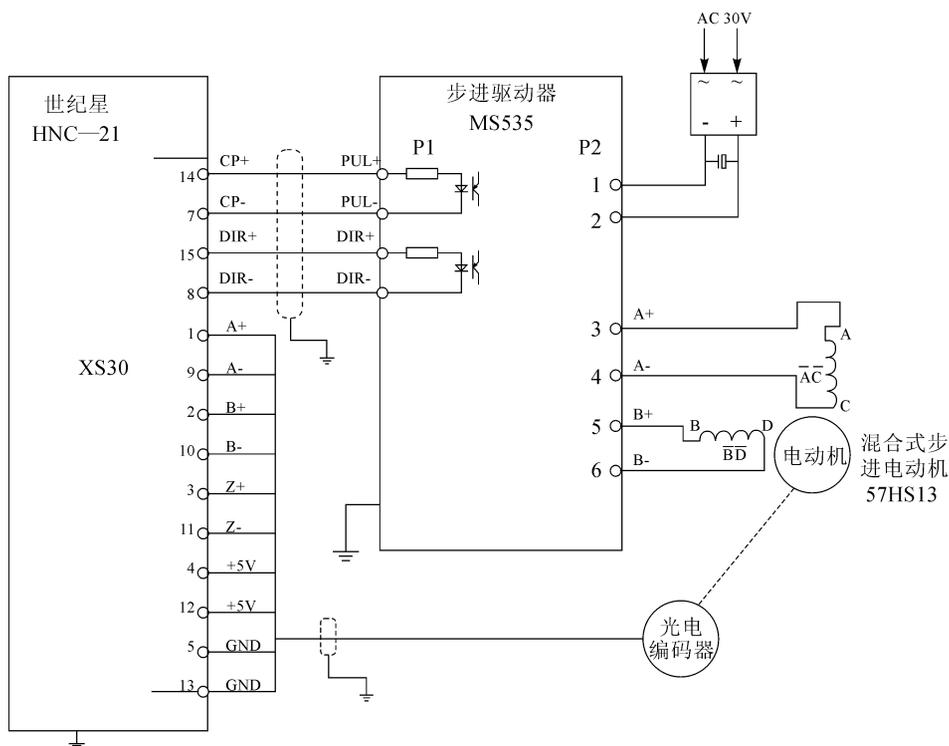


图 7-7-7 步进电动机、驱动器与 HNC-21 数控系统的连接



表 7-7-2 硬件配置参数

参数名	型号	标识	地址	配置[0]	配置[1]
部件0	5301	46(不带反馈)	0	0	0

③MS535 步进电动机驱动器参数设置。按驱动器前面表格,将细分数设置为 2,将电动机电流设置为 57HS13 步进电动机的额定电流。

④在线路和电源检查无误后,进行通电试运行,以手动或手摇脉冲发生器方式发送脉冲,控制电动机慢速转动和正、反转,在没有堵转等异常情况下,逐渐提高电动机转速。

⑤测定步进电动机的步距角。以手动方式发送单脉冲,从数控系统显示屏上记录工件实际坐标值,计算步进电动机的步距角 $\beta = \frac{\text{实际坐标值} \times 360^\circ}{\text{脉冲数}(n) \times 4 \times \text{光电编码器线数}}$ (取最接近数值 $\frac{360^\circ}{\beta}$ 的整数)

计算每一步脉冲的实际坐标增量值,再按下式换算成实际步距角 β_n :

$$\beta_n = \frac{\text{单脉冲实际坐标增量值} \times 360^\circ}{4 \times \text{光电编码器线数}}$$

由 β 和 β_n 可算出步距精度 $\Delta\beta = (\beta_n - \beta)/\beta$,再将记录和计算数据填入表 7-7-3 中。

表 7-7-3 步距精度

脉冲列	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
坐标值/mm										
实际步距角/(°)										
步距精度/(%)										
脉冲列	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
坐标值/mm										
实际步距角/(°)										
步距精度/(%)										

⑥测定步进电动机的静转矩特性。步进电动机处于锁定状态(即不发送脉冲给驱动器)时,用测力扳手或悬挂砝码给步进电动机施加外加转矩 T ,并读取对应的转子轴偏转角 θ (根据记录的工件实际坐标值换算),记录一组转矩 T 与偏转角 θ 的数据,直至最大转矩点。根据下式,计算步进电动机的静态刚度



$$K = \frac{dT}{d\theta} = \frac{\Delta T}{\Delta \theta} \left(\frac{N \cdot m}{^\circ} \right)$$

注意:由于在锁定状态时,驱动器电流自动减半,实际静态刚度还可能增大一倍。将记录和计算的数据填入表 7-7-4 中。

表 7-7-4 步进电动机静刚度

坐标值/mm								
角位移/(°)								
转矩值/(N·m)								
静态刚度/(N·m/(°))								

⑦测定步进电动机的运行矩频特性。

第一,将步进电动机与磁粉制动器用联轴器相连接。由数控系统设置步进电动机的速度(即为步进电动机的运行频率),且将加、减速时间常数设置为 1s 以上。

第二,步进电动机在锁定状态下,逐渐加大负载,直至步进电动机失步停转,记录该激励电流值。

第三,增加步进电动机的速度给定值,重复上述步骤,记录新转速下使步进电动机失步的激励电流值。

由磁粉制动器特性曲线,获取对应激励电流的制动转矩值,并由速度指令值换算为频率值,即可绘出步进电动机的运行矩频特性。将记录数据填入表 7-7-5 中。

表 7-7-5 步进电动机运行矩频特性

运行频率/Hz								
负载转矩/(N·m)								

第四,将步进电动机定子绕组改为并联接法,如图 7-7-8,再按上述步骤测定步进电动机的运行矩频特性。(绕组并联后,应将步进电动机的电流设置增大一倍,这才不至于降低步进电动机在低频段的输出转矩。)

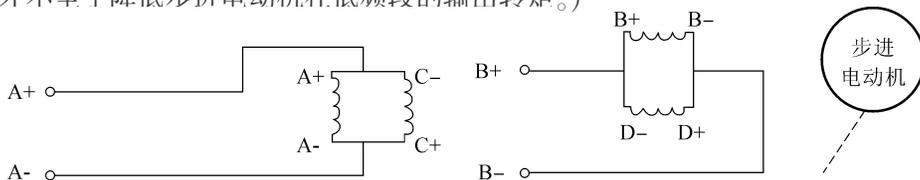


图 7-7-8 步进电动机定子绕组并联接法



5. 实训总结

- ①描述步进电动机控制原理。
- ②区分步进电动机控制系统的强、弱电连接。
- ③简要说明步进电动机控制系统投入运转的操作步骤。
- ④比较步进电动机绕组串联与绕组并联时,矩频特性之差别。
- ⑤说明步进电动机控制系统的加、减速设置对步进电动机运行的作用,以及按什么原则来选择系统的加、减速时间常数。

6. 实训报告

- ①绘制步进电动机控制系统电气连接图。
- ②根据实验数据,计算实验所用步进电动机的步距精度和静态刚度。
- ③根据实验数据,绘制实验所用步进电动机的运行矩频特性。

7.8 实训五 交流伺服系统的构成、调整及使用

1. 实训目的与要求

- ①熟悉交流伺服系统的构成以及伺服电动机、驱动器、数控系统的互联。
- ②掌握交流伺服电动机及驱动器的控制特性。
- ③了解交流伺服系统的动态特性及其参数调整方法。

2. 实训仪器与设备

- ①MSMA022A1A 型交流伺服电动机一台。
- ②MSDA023A1A 型伺服驱动器一台。
- ③华中世纪星数控系统(HNC-21TF)一套。
- ④X-Y 轴工作台一套。
- ⑤负载试验台一套。
- ⑥双通道储存示波器一台。
- ⑦音频信号发生器一台。

3. 理论回顾

(1) 永磁式同步交流伺服电动机的工作原理 永磁式同步交流伺服电动机的定子绕组有三相,由三相电流产生定子合成旋转磁场 F_s ;在其由稀土永磁材料制成的转子中,三相电流产生转子磁场 F_r , F_s 与 F_r 相互作用产生电磁转矩 $T(=$

$F_s F_R \sin \theta_{SR}$), 如图 7-8-1 所示。若保持 $\theta_{SR} = 90^\circ$, 则 $T = F_s F_R$ 。

在电磁转矩作用下, 转子逆时针方向转动, 由驱动控制器读取转子位置传感器 PS 给出的转子移动量 $\Delta \theta_r$, 控制定子绕组三相电流的相位, 使其合成磁场 F_s 沿转子旋转方向也移动相同的角度 ($\Delta \theta_r = \Delta \theta_s$), 保持 θ_{SR} 不变。电磁转矩的大小则通过控制三相电流 i_A, i_B, i_C 的幅值 I_m 来实现, 即 $T \propto I_m$ (当 $I_m = 0$ 时, $T = 0$)。当需要转子反方向旋转时, 只要将三相电流改变符号 (及 180°) 即可; 这将使其合成磁场 F_s 也改变 180° (即 F_s'), 从而产生顺时针方向的转矩。上述这种控制方式称为矢量控制, 这时永磁同步交流伺服电动机运行于自同步状态。

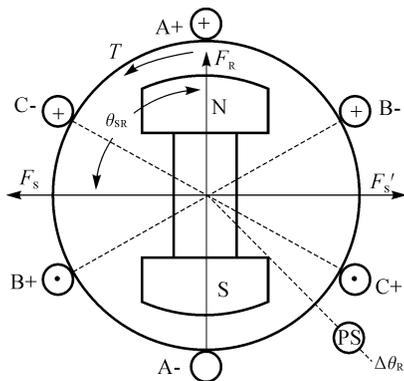


图 7-8-1 永磁式同步交流伺服电动机结构原理图

(2) 交流伺服系统的组成 交流伺服系统主要由下列几个部分构成, 如图 7-8-2 所示。

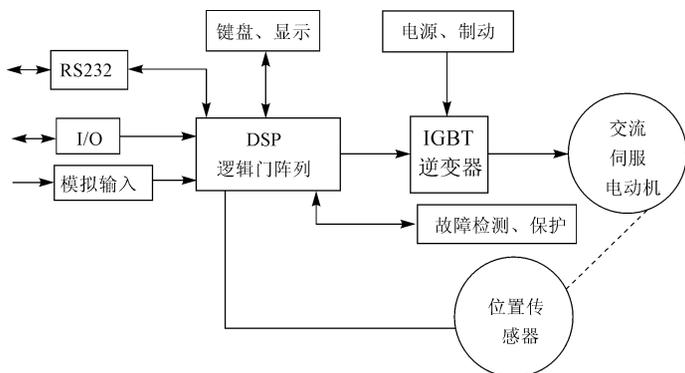


图 7-8-2 交流伺服系统组成

①正如前述, 交流伺服电动机, 可分为永磁式同步交流伺服电动机, 永磁式无刷直流伺服电动机、感应式伺服电动机及磁阻式交流伺服电动机。

②PWM 功率逆变器, 可分为功率晶体管逆变器、功率场效应管逆变器、IGBT 逆变器 (包括智能型 IGBT 逆变器模块) 等。

③微处理器控制器及逻辑门阵列, 可分为单片机、DSP (数字信号处理器)、DSP + CPU、多功能 DSP (如 TMS320F240) 等。

- ④位置传感器(含速度),可分为旋转变压器、磁性编码器、光电编码器等。
- ⑤电源及能耗制动电路。
- ⑥键盘及显示电路。
- ⑦接口电路,包括模拟电压、数字 I/O 及 RS232 串口通讯电路。
- ⑧故障检测、保护电路。

(3)MINAS - A 系列伺服驱动器控制信号接线图 图 7-8-3 为位置控制 CN1/F 接线图,图 7-8-4 为速度控制 CN1/F 接线图。

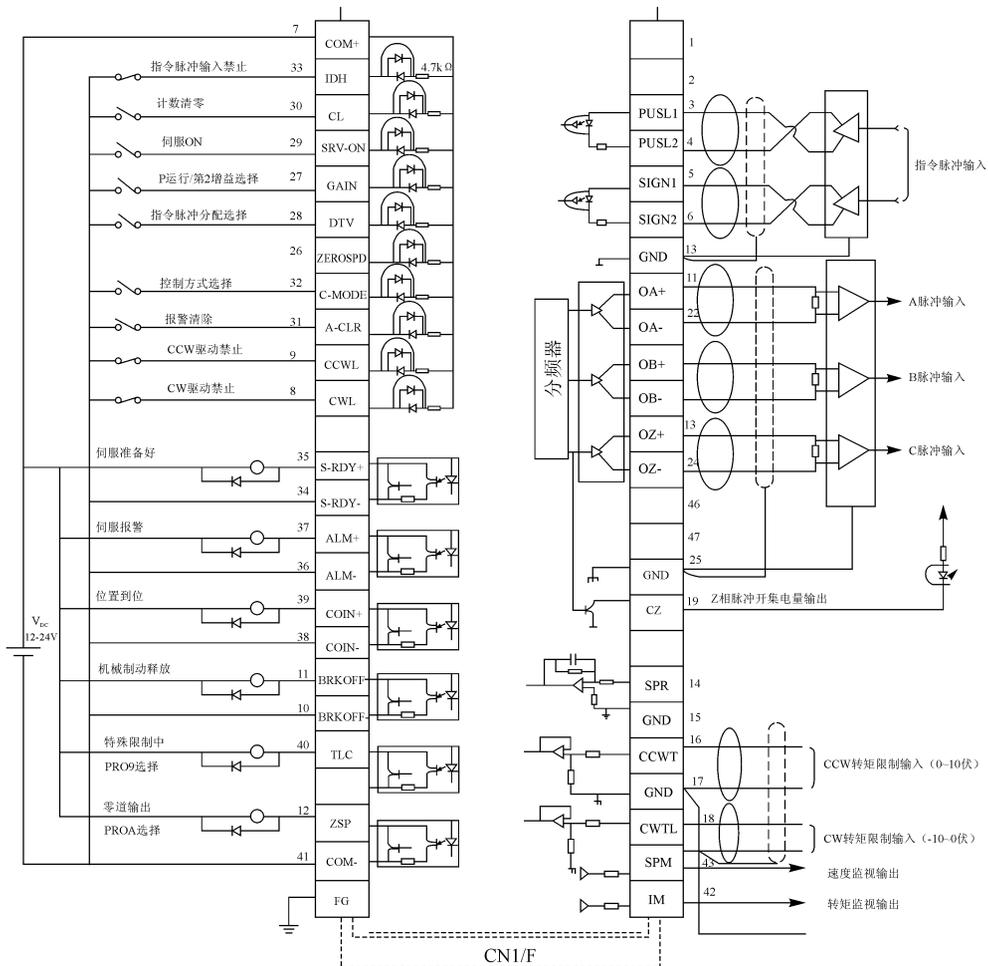


图 7-8-3 CN1/F 位置控制接线图

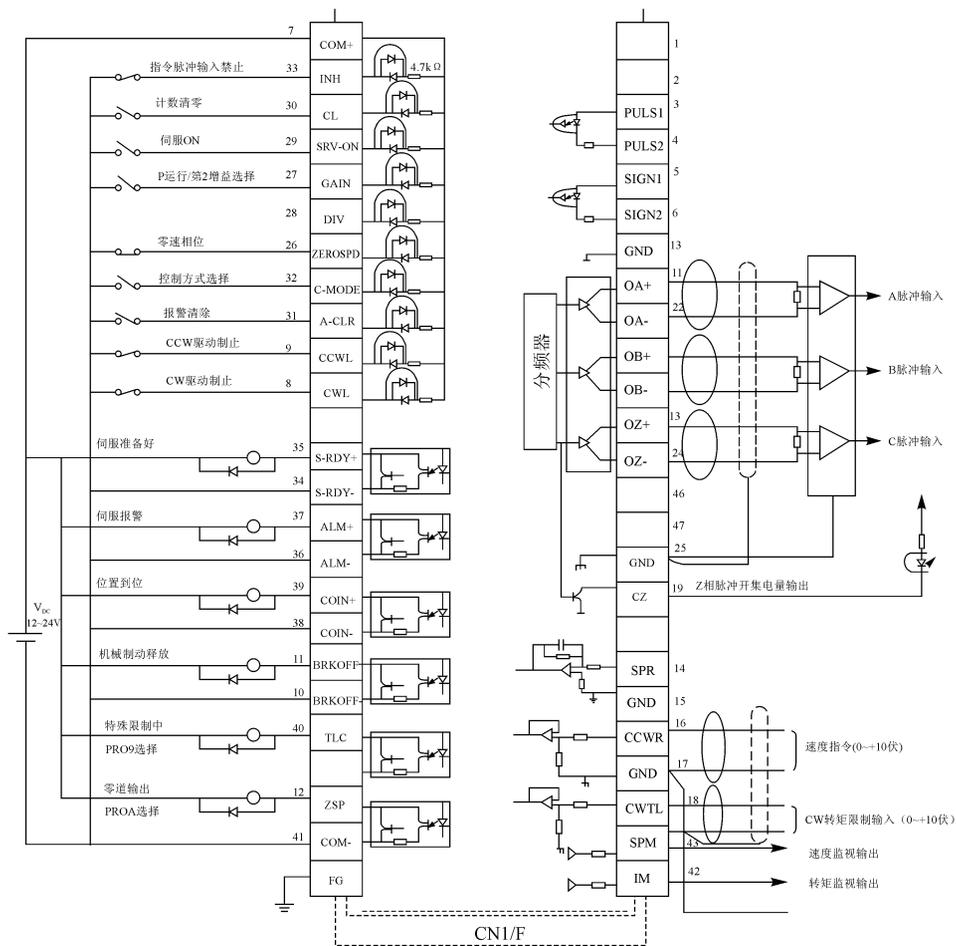


图 7-8-4 CNI/F 速度控制接线图

4. 实训内容

(1) 主回路接线 按图 7-8-5 连接(或检查)r, t 及 L1, L2, L3 与电源的接线; 连接(或检查)伺服驱动器 U, V, W 与伺服电动机 A, B, C 之间的接线; 连接(或检查)伺服电动机位置传感器与伺服驱动器的连接电缆(见图 7-8-5); 连接(或检查)伺服 ON 控制线及开关。

(2) 空载下试运行电动机

① 松开伺服电动机与负载之间的联轴器, 接通伺服驱动器的电源, 按“Panasonic

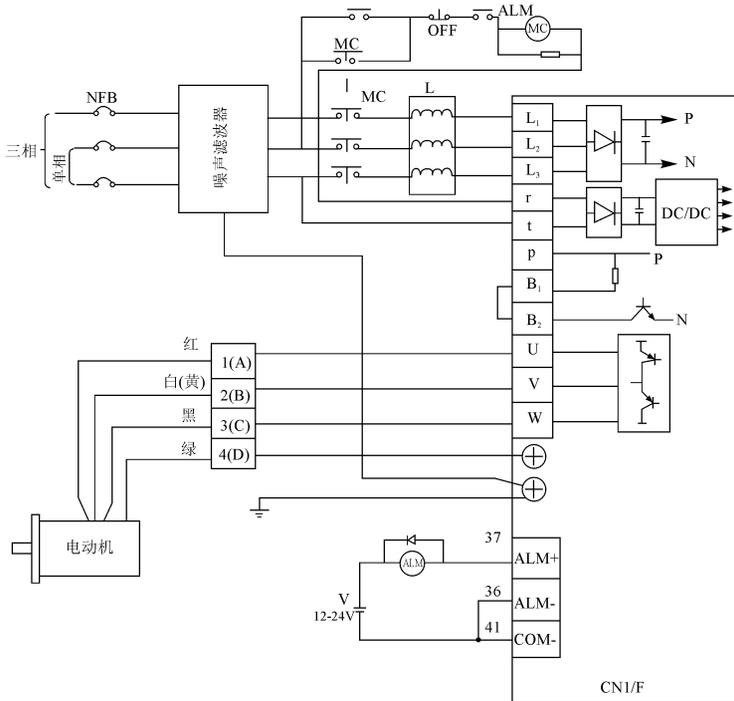


图 7-8-5 主回路接线图

交流伺服电动机驱动器 MINAS - A 系列使用说明书”中 PAGE - 51 的步骤,先设置用户参数为“出厂设定”,用 JOG 模式试运行电动机。接通驱动器电源后,初始显示“r - 0”;按 MODE \square 键、及 \square 键,显示“AF_JOG”;按 SET 键后,再按住 \square 键直到出现“ready”;按住 \square 键直到出现“Srv_on”。按 \square 键,电动机逆时针方向旋转;按 \square 键,电动机顺时针方向旋转,其速率由 PA57 参数来确定。

②按照伺服驱动器的控制前面板所示的操作方法,将控制方式设置为“速度控制方式”(PA02 = 1),给定方式设置为“内部给定”(PA05 = 1),速度给定值设置为“100r/min”(PA53 = 100),然后将参数保存到 EEPROM 中。在确认没有报警或异常情况,接通伺服使能(伺服 ON)闭合,这时伺服电动机应在给定转速下运转。在当前监视器模式下,显示伺服电动机的实际转速。

③将伺服驱动器的控制前面板设置转换至参数设置模式,修改转速给定值(PA53);再按 SET 键生效后,伺服电动机应在新给定转速下运转。记录给定转速及实际转速,计算转速误差,填入表 7 - 8 - 1。

表 7-8-1 空载转速误差

给定转速/(r/min)				
实际转速/(r/min)				
误差计算/(%)				

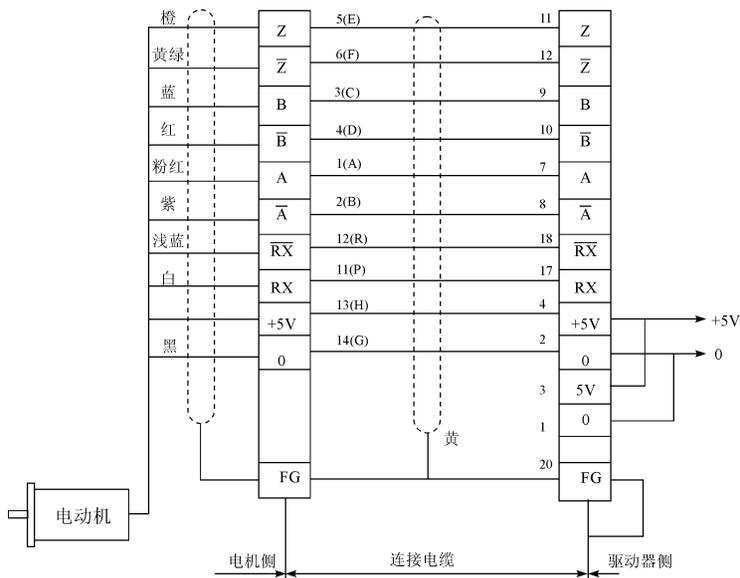


图 7-8-6 增量式编码器接线图

(3) 测试交流伺服电动机的转速动态响应特性

①将伺服驱动器的速度监视输出接口 SP 及 G(在控制系统前面板显示器下方)连接至数字存储示波器通道 1,接通伺服驱动器电源,将给定转速设置为 0r/min (PA53 = 0);然后接通伺服 ON(这时伺服电动机不转动或处于低速漂移状态),修改给定转速,将其设置为 1000r/min (PA53 = 1000),再按 SET 键使设置生效。这时,伺服电动机应从静止状态加速至给定转速,由数字存储示波器捕获这个加速过程,并显示、存储下来;再将给定转速设置为 0r/min (PA53 = 0),按 SET 键使设置生效,这时伺服电动机应从运转状态制动至静止状态,同样由数字存储示波器记录这个制动过程。读取主要数据填入表 7-8-2(上升时间,从 0.1 至 0.9 稳态值的时间;超调量 = 最大峰值 - 稳态值;稳定时间,从时刻 0 开始至峰值进入 0.95 ~ 1.05 稳态值范围内的时间)。

表 7-8-2 交流伺服电动机转速动态响应特性

序号	速度环增益/Hz	速度环积分时间常数/ms	上升时间/s	超调量/(%)	稳定时间/s
1					
2					
3					
4					

②修改速度环增益(PA11)、速度环积分时间常数(PA12),以及改变转子上的转动惯量后,重复上述启动、制动过程,观察速度响应特性的变化;取定某一转动惯量(如10倍转子惯量),通过改变PA11及PA12,使响应特性的超调变小、响应加快。上述有关MINAS交流伺服驱动器常规自动增益调节、实时自动增益调节参照参考文献,现设定参数PA21=2,PA22=6。

③记录并比较增益调整前后速度响应特性的差别,列出最佳的速度环增益及速度环积分时间常数。记录数据,填入表7-8-3中。

表 7-8-3 最佳的速度环增益和速度环积分时间常数

项 目	常规自动增益调节	实时自动增益调节
速度环增益/Hz		
速度环积分时间常数/ms		

(4) 测试交流伺服电动机的频带宽度

①接通伺服驱动器电源,将给定方式设置为“外部给定”(PA05=0),将速度指令输入增益设置为“300rpm/V”(PA50=300);然后将参数保存至EEPROM中,并断开驱动器电源。

②将正弦波频率发生器的输出电压幅值调至0.1V(频率范围为0~500Hz),先将频率调至1Hz;将正弦波发生器的输出电压连接至伺服驱动器的速度指令输入端口(CN1~14),接地端连接至(CN1~15),同时也将该输出电压接至示波器的通道1;将伺服驱动器的速度监视输出端口SP及G(在控制系统前面板显示器下方)连接至示波器的通道2。

③接通伺服驱动器电源,确认没有报警或异常情况后,接通伺服ON,这时伺服应以1Hz的频率正(反)转(我们可从示波器上观察给定的速度和伺服电动机的实际速度之间的差别:两者在相位上接近同相,转速的幅值因计算系数不等而不同)。逐渐升高正弦波发生器的输出频率,并保持其幅值为0.1V,记录电动机转速的幅值



及其与给定转速信号的相位差,直至相位差达到 $\pi/2$;记录此时的频率,作为速度环的频带宽度。记录相关数据,填入表 7-8-4 中。

表 7-8-4 交流伺服电动机频带宽度

输入信号频率/Hz								
输出信号幅值/V								
相位差/(°)								

(5) 测试交流伺服电动机的稳速误差

① 接通伺服驱动器电源,将给定方式设置为“内部给定”(PA05 = 1),将给定转速设置为“3000r/min”(额定转速),即 PA53 = 3000,然后保存参数到 EEPROM 中,断开伺服驱动器电源。

② 将伺服电动机与负载联轴器连接起来,接通伺服驱动器电源后,再接通伺服 ON,打开监视器模式;选择转矩项(dp_Lrp),按 SET 键,显示伺服电动机输出转矩百分数;逐渐增加电动机的负载转矩值(L = 100.0)额定转矩(L = 100,即 100%),再转换至显示速度项,读取伺服电动机的实际转速。调整主电源的输入电压至 110%(即 220V),保持负载转矩不变,记录伺服电动机的实际转速;再将主电源输入电压调至 85%(即 170V),保持负载转矩不变,记录伺服电动机的实际转速。

③ 计算电压变化时伺服电动机的稳速误差 Δ_n 。

$$\Delta_n = [(\text{实际转速} - \text{额定转速}) / \text{额定转速}] \times 100\%$$

将相关数据填入表 7-8-5 中。

表 7-8-5 交流伺服电动机的稳速误差

项目	110% 额定电压(220V)	85% 额定电压(170V)
伺服电动机实际转速(r/min)		
稳速误差/(%)		

(6) 测试位置闭环下伺服电动机的稳态刚度

① 接通伺服驱动器电源,将控制方式设置为“位置控制方式”(PA02 = 0),然后保存参数到 EEPROM,断开伺服驱动器电源。

② 连接伺服电动机输出轴与负载联轴器。接通伺服驱动器电源后,再接通伺服 ON,这时伺服电动机静止不动,处于定位状态。

③ 将转矩监视器信号输出端 IM 及 G(控制系统前面板显示器下方)接至示波器或万用表电压挡,打开监视器模式,选择位置偏差项(dp_Eps);按 SET 键,显示出位



置偏差值(以脉冲数表示)。用手在联轴器上施加扭矩,使扭矩达到额定转矩,即 IM 输出到 3V 记录该时刻的位置偏差值 Δps_1 ; 断开伺服 ON 和伺服驱动器电源,将伺服电动机输出轴转动约 120° 后,接通伺服驱动器电源和伺服 ON,对转子轴施加额定转矩,记录其位置差值 Δps_2 ; 断开伺服 ON 和伺服驱动器电源,转子轴再转过约 120° ,重复上述步骤,记录下位置偏差值。静态刚度按下式计算:

$$\text{静态刚度} = \text{额定转矩} (\text{N} \cdot \text{m}) / \text{最大位置偏差值} (\text{弧度})$$

将相关数据填入表 7-8-6 中。

表 7-8-6 交流伺服电动机的稳态刚度

项目	位置 1	位置 2	位置 3
位置偏差/(脉冲数)			
静态刚度/($\text{N} \cdot \text{m}/^\circ$)			

5. 实验总结

- ①描述永磁式同步交流伺服系统控制的原理。
- ②说明永磁式同步交流伺服系统控制框图。
- ③区分永磁式同步交流伺服系统的强、弱电连接。
- ④说明 MINAS A 系列交流伺服电动机驱动器投入运转的操作步骤。
- ⑤说明如何调整速度环参数以优化系统响应。

6. 实验报告

- ①绘制永磁式同步交流伺服系统电气连接图。
- ②根据实验数据,计算伺服系统的稳态精度。
- ③根据速度控制方式下的最低转速和额定转速,计算伺服系统调速比。
- ④根据速度阶跃超调小、稳定时间短的原则,从实验数据中选择一组速度环增益和速度环积分时间常数。

小 结

本章首先阐述了伺服控制系统的概念,及其在数控机床中应用的组成和分类;其次分别讲述了数控机床中所采用伺服控制系统的组成单元工作原理和性能,主要讲述了步进电机、直流伺服电机、交流伺服电机组成工作原理及性能;最后对数控机床中伺服控制系统的性能进行简单的分析。



习题与思考题

- 7-1 什么是伺服驱动系统？伺服驱动系统的特点是什么？由哪几部分组成？
- 7-2 步进电动机开环伺服系统由哪几部分组成？简述工作原理。
- 7-3 什么是数控机床位置伺服的闭环与半闭环系统？
- 7-4 数控机床进给伺服电动机有哪些类型？
- 7-5 数控机床对进给伺服系统的性能有何要求？
- 7-6 步进电动机的矩角特性指的是什么？用图线说明。
- 7-7 直流伺服电动机的速度控制原理是什么？
- 7-8 简述永磁交流伺服电动机的结构及工作原理。
- 7-9 交流电动机的调速原理是什么？有几种调速方法？



第 8 章 数控机床的位置检测元件

8.1 概 述

测量装置是数控机床伺服系统中的一部分,它与驱动装置相辅相成。伺服系统是数控机床的驱动部分,它将计算机输出的控制信息指令转变为数控机床移动部件的运动。在此过程中,位置伺服控制的准确性决定了机床的加工精度。在闭环和半闭环系统中,位置伺服控制是以直线位移或转角位移为控制对象的自动控制。位置检测装置是检测数控机床移动部件位移量的装置,在位置检测过程中,发出反馈信号与数控系统发出的指令信号相比较后发出控制指令,使伺服系统控制机床移动部件向减小偏差方向移动,直至偏差等于零为止。

8.1.1 位置检测装置的要求

数控机床中,数控装置是依靠指令值与位置检测装置的反馈值进行比较,来控制工作台的运动。位置检测装置是 CNC 系统的重要组成部分。在闭环系统中,它的主要作用是检测位移量,并将检测的反馈信号和数控装置发出的指令信号相比较,若有偏差,经放大后控制执行部件,使其向着消除偏差的方向运动,直到偏差为零。为提高数控机床的加工精度,必须提高测量元件和测量系统的精度。不同的数控机床对测量元件和测量系统的精度要求、允许的最高移动速度各不相同,因此,研制和选用性能优越的检测装置是很重要的。

数控机床对位置检测装置的要求如下:

- ①受温度、湿度的影响小,工作可靠,能长期保持精度,抗干扰能力强。
- ②在机床执行部件移动范围内,能满足精度和速度的要求。
- ③使用维护方便,适应机床工作环境。
- ④成本低。



8.1.2 检测装置的分类

按工作条件和测量要求的不同,测量方式也有不同的划分方法,如表 8-1-1 所示。

表 8-1-1 位置检测装置分类

位置 检测 装置	按检测方式分类	直接测量	光栅,感应同步器,编码盘(测回转运动)
		间接测量	编码盘,旋转变压器
	按测量装置编码方式分类	增量式测量	光栅,增量式光电码盘
		绝对式测量	接触式码盘,绝对式光电码盘
	按检测型号的类型分类	数字式测量	光栅,光电码盘,接触式码盘
		模拟式测量	旋转变压器,感应同步器,磁栅

1. 直接测量和间接测量

测量传感器按形状可以分为直线型和回转型。若测量传感器所测量的指标就是所要求的指标,即直线型传感器测量直线位移,回转型传感器测量角位移,则该测量方式为直接测量。若回转型传感器测量的角位移只是中间量,由它再推算出与之对应的工作台直线位移,那么该测量方式为间接测量,其测量精度取决于测量装置和机床传动链两者的精度。

2. 增量式测量和绝对式测量

按测量装置编码的方式可以分为增量式测量和绝对式测量。增量式测量的特点是只测量位移增量,即工作台每移动一个测量单位,测量装置便发出一个测量信号,此信号通常是脉冲形式。绝对式测量的特点是被测的任一点的位置都由一个固定的零点算起,每一测量点都有一对应的测量值。

3. 数字式测量和模拟式测量

数字式测量以量化后的数字形式表示被测的量。数字式测量的特点是测量装置简单,信号抗干扰能力强,且便于显示处理。模拟式测量是将被测的量用连续的变量表示,如用电压变化、相位变化来表示。

数控机床检测元件的种类很多,在数字式位置检测装置中,采用较多的有光电编码器、光栅等。在模拟式位置检测装置中,多采用感应同步器、旋转变压器和磁尺等。随着计算机技术在工业控制领域的广泛应用,目前感应同步器、旋转变压器和磁尺在国内已很少使用,许多公司已不再经营此类产品。然而旋转变压器由于其抗



振、抗干扰性好,在欧美一些国家仍有较多的应用。数字式的传感器使用方便可靠(如光电编码器和光栅等),因而应用最为广泛。在数控机床上除位置检测外,还有速度检测,其目的是精确地控制转速。转速检测装置常用测速发电机、回转式脉冲发生器。本章主要介绍各种常用的位置检测元件的结构和工作原理及其应用。

8.2 旋转变压器

8.2.1 旋转变压器的结构和工作原理

旋转变压器是一种旋转式的小型交流电动机,它由定子和转子组成。如图8-2-1所示是一种无刷旋转变压器的结构,左边为分解器,右边为变压器。变压器的作用是将分解器转子绕组上的感应电动势传输出来,这样就省掉了电刷和滑环。分解器定子绕组为旋转变压器的原边,分解器转子绕组为旋转变压器的副边,励磁电压接到原边,励磁频率通常为400Hz,500Hz,1000Hz,5000Hz。旋转变压器结构简单、动作灵敏、对环境无特殊要求、维护方便、输出信号的幅度大、抗干扰性强、工作可靠,为数控机床经常使用的位移检测元件之一。

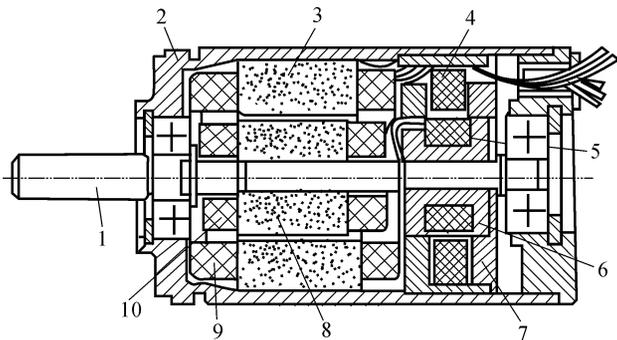


图 8-2-1 旋转变压器的结构图

- 1—电动机;2—外壳;3—分解器定子;4—变压器定子绕组;5—变压器转子绕组
6—变压器转子;7—变压器定子;8—分解器转子;9—分解器定子绕组;10—分解器转子绕组

旋转变压器是根据互感原理工作的。它的结构设计及制造保证了定子与转子之间的空气隙内的磁通分布呈正(余)弦规律,当定子绕组上加交流励磁电压(交变电压,频率为2~4kHz)时,通过互感在转子绕组中产生感应电动势,如图8-2-2



所示。其输出电压的大小取决于定子与转子两个绕组轴线在空间的相对位置 θ 角。两者平行时互感最大,副边的感应电动势也最大;两者垂直时互感为零,感应电动势也为零。感应电势随着转子偏转的角度呈正(余)弦变化,故有

$$U_2 = KU_1 \cos\theta = KU_m \sin\omega t \cos\theta \quad (8-2-1)$$

式中: U_2 ——转子绕组感应电势;

U_1 ——定子的励磁电压;

U_m ——定子励磁电压的幅值;

θ ——两绕组轴线之间的夹角;

K ——变压比,即两个绕组匝数比 N_1/N_2 。

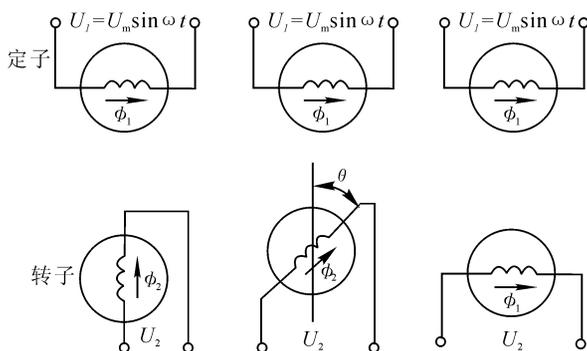


图 8-2-2 两级旋转变压器的工作原理

8.2.2 旋转变压器的应用

使用旋转变压器作位置检测元件有两种方法:鉴相型和鉴幅型。

一般采用的是正弦、余弦旋转变压器,其定子和转子绕组中各有互相垂直的两个绕组,如图 8-2-3 所示。

1. 鉴相型(相位比较工作方式)

在这种状态下,旋转变压器的定子两相正交绕组即正弦绕组 S 和余弦绕组 C 中分别加上幅值相等、频率相同而相位相差 90° 的正弦交流电压,如图 8-2-3 所示。即

$$U_S = U_m \sin\omega t \quad (8-2-2)$$

$$U_C = U_m \cos\omega t \quad (8-2-3)$$

因为此两相励磁电压会产生旋转磁场,所以在转子绕组中(另一绕组短接)感应



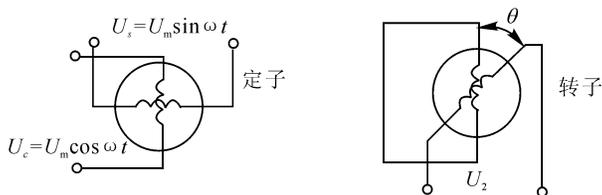


图 8-2-3 四级旋转变压器

电动势为

$$U_2 = U_s \sin\theta + U_c \cos\theta$$

上式可变换为

$$U_2 = KU_m \sin\omega t \sin\theta + KU_m \cos\omega t \cos\theta = KU_m \cos(\omega t - \theta)$$

测量转子绕组输出电压的相位角 θ , 便可测得转子相对于定子的空间转角位置。在实际应用时, 把对定子正弦绕组励磁的交流电压相位作为基准相位, 与转子绕组输出电压相位作比较, 来确定转子转角的位移。

2. 鉴幅型(幅值比较工作方式)

在这种应用中, 定子两相绕组的励磁电压为频率相同、相位相同而幅值分别按正弦、余弦规律变化的交变电压, 即

$$U_s = U_m \sin\theta \sin\omega t \quad (8-2-4)$$

$$U_c = U_m \cos\theta \sin\omega t \quad (8-2-5)$$

励磁电压频率为 2~4kHz。

定子励磁信号产生的合成磁通在转子绕组中产生感应电动势 U_2 , 其大小与转子和定子的相对位置 θ_m 有关, 并与励磁的幅值 $U_m \sin\theta$ 和 $U_m \cos\theta$ 有关, 即

$$U_2 = KU_m \sin(\theta - \theta_m) \sin\omega t \quad (8-2-6)$$

如果 $\theta_m = \theta$, 则 $U_2 = 0$ 。

从物理意义上理解, $\theta_m = \theta$ 表示定子绕组合成磁通 Φ 与转子绕组的线圈平面平行, 即没有磁力线穿过转子绕组线圈, 故感应电动势为零。当 Φ 垂直于转子绕组线圈平面, 即 $\theta_m = \theta \pm 90^\circ$ 时, 转子绕组中感应电动势最大。

在实际应用中, 根据转子误差电压的大小, 不断修改定子励磁信号的 θ (即励磁幅值), 使其跟踪 θ_m 的变化。当感应电动势 U_2 的幅值: $KU_m \sin(\theta - \theta_m)$ 为零时, 说明 θ 角的大小就是被测角位移 θ_m 的大小。



8.3 光栅测量装置

光栅种类很多,其中有物理光栅和计量光栅之分。物理光栅的刻线细而密,栅距(两刻线间的距离)在 $0.002 \sim 0.005\text{mm}$ 之间,通常用于光谱分析和光波波长的测定。计量光栅相对来说刻线较粗,栅距在 $0.004 \sim 0.25\text{mm}$ 之间,通常用于数字检测系统,用来检测高精度的直线位移和角位移。计量光栅是用于数控机床的精密检测装置,具有测量精度高、响应速度快、量程宽等特点,是闭环系统中一种用得较多的位置检测装置。

8.3.1 光栅的结构和工作原理

光栅是一种最常见的测量装置,具有精度高、响应速度快等优点,是一种非接触式测量。光栅利用光学原理进行工作,按形状可分为圆光栅和长光栅。圆光栅用于角位移的检测,长光栅用于直线位移的检测。光栅的检测精度较高,可达 $1\mu\text{m}$ 以上。

光栅是利用光的透射、衍射现象制成的光电检测元件,主要由光栅尺(包括标尺光栅和指示光栅)和光栅读数头两部分组成,如图8-3-1所示。通常标尺光栅固定在机床的运动部件(如工作台或丝杠)上,光栅读数头安装在机床的固定部件(如机床底座)上,两者随着工作台的移动而相对移动。在光栅读数头中,安装着一个指示光栅,当光栅读数头相对于标尺光栅移动时,指示光栅便在标尺光栅上移动。在安装光栅时,要严格保证标尺光栅和指示光栅的平行度以及两者之间的间隙(一般取 0.05mm 或 0.1mm)要求。

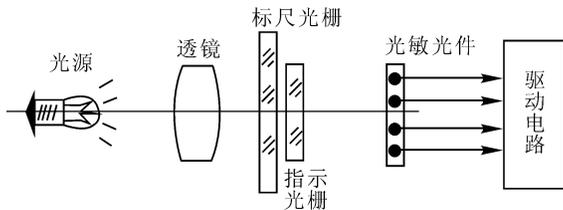


图8-3-1 光栅读数头

光栅尺是用真空镀膜的方法刻上均匀密集线纹的透明玻璃片或长条形金属镜面。对于长光栅,这些线纹相互平行,各线纹之间的距离相等,称此距离为栅距。对

于圆光栅,这些线纹是等栅距角的向心条纹。栅距和栅距角是决定光栅光学性质的基本参数。常见的长光栅的线纹密度为 25 条/mm、50 条/mm、100 条/mm、250 条/mm。对于圆光栅,若直径为 70mm,则一周内刻线 100~768 条;若直径为 110mm,则一周内刻线达 600~1024 条,甚至更高。同一个光栅元件,其标尺光栅和指示光栅的线纹密度必须相同。

光栅读数头由光源、透镜、指示光栅、光敏元件和驱动线路组成,如图 8-3-1 所示。读数头的光源一般采用白炽灯泡。白炽灯泡发出的辐射光线经过透镜后变成平行光束,照射在光栅尺上。光敏元件是一种将光强信号转换为电信号的光电转换元件,它接收透过光栅尺的光强信号,并将其转换成与之成比例的电压信号。由于光敏元件产生的电压信号一般比较微弱,在长距离传送时很容易被各种干扰信号所淹没、覆盖,造成传送失真。为了保证光敏元件输出的信号在传送中不失真,应首先将该电压信号进行功率和电压放大,然后再进行传送。驱动线路就是实现对光敏元件输出信号进行功率和电压放大的线路。

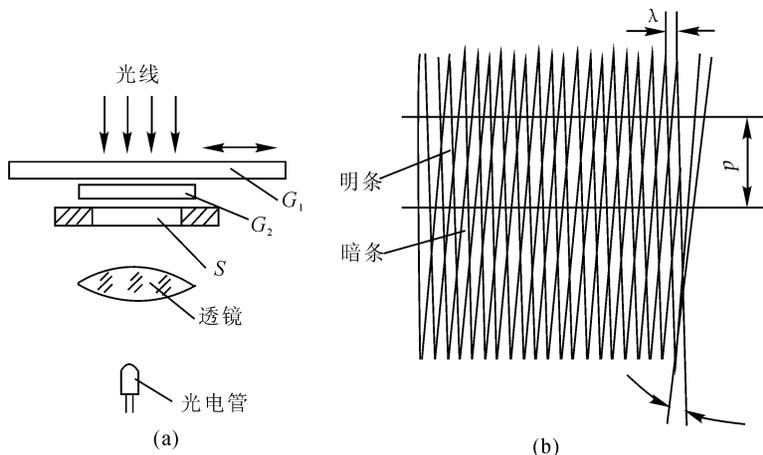


图 8-3-2 光栅的工作原理

如果将指示光栅在其自身的平面内转过一个很小的角度 β ,使两块光栅的刻线相交,当平行光线垂直照射标尺光栅时,则在相交区域出现明暗交替、间隔相等的粗大条纹,称为莫尔条纹。由于两块光栅的刻线密度相等,即栅距 λ 相等,使产生的莫尔条纹的方向与光栅刻线方向大致垂直,其几何关系如图 8-3-2b 所示。当 β 很小时,莫尔条纹的节距为



$$p = \lambda/\beta$$

这表明,莫尔条纹的节距是栅距的 $1/\beta$ 倍。当标尺光栅移动时,莫尔条纹就沿与光栅移动方向垂直的方向移动。当光栅移动一个栅距 λ 时,莫尔条纹就相应准确地移动一个节距 p ,也就是说,两者一一对应。因此,只要读出移过莫尔条纹的数目,就可知道光栅移过了多少个栅距。而栅距在制造光栅时是已知的,所以光栅的移动距离就可以通过光电检测系统对移过的莫尔条纹进行计数、处理后自动测量出来。光栅的刻线为 100 条,即栅距为 0.01mm,人们是无法用肉眼来分辨的,但它的莫尔条纹却清晰可见。所以莫尔条纹是一种简单的放大机构,其放大倍数取决于两光栅刻线的交角 β ,如 $\lambda = 0.01\text{mm}$, $p = 5\text{mm}$,则其放大倍数为 $1/\beta = p/\lambda = 500$ 倍。这种放大特点是莫尔条纹系统的独具特性。莫尔条纹还具有平均误差的特性。

8.3.2 光栅检测装置的特点

①由于光栅的刻线可以制作十分精确,同时莫尔条纹对刻线局部误差有均化作用,因此,栅距误差对测量精度影响很小;也可采用倍频的方法来提高分辨率精度,所以测量精度高。

②在检测过程中,标尺光栅与指示光栅不直接接触,没有磨损,因而精度可以长期保持。

③光栅刻线要求很精确,两光栅之间的间隙及倾角都要求保持不变,故制造调试比较困难。另外光学系统很容易受外界的影响产生误差,灰尘、冷却液等污物的侵入,易使光学系统污染甚至变质。为了保证精度和光电信号的稳定,光栅和读数头都应放在密封的防护罩内,对工作环境的要求也较高,测量精度高的都放在恒温室中使用。

8.4 脉冲编码器

编码器又称编码盘或码盘,它把机械转角转换成电脉冲,是一种常用的角位移测量装置。编码器分为光电式、接触式和电磁感应式三种,光电式的精度和可靠性都优于其他两种,因此在数控机床上得到广泛的应用。

8.4.1 光电脉冲编码器的结构和工作原理

脉冲编码器是一种增量检测装置,它的型号由每转发出的脉冲数来区分。数控



机床上常用的脉冲编码器有 2 000 P/r, 2 500 P/r 和 3 000 P/r 等, 在高速、高精度数字伺服系统中应用高分辨率的脉冲编码器, 如 20 000 P/r, 25 000 P/r 和 30 000 P/r 等, 现在已有使用每转发 10 万个脉冲的脉冲编码器, 该编码器装置内部采用了微处理器。

光电脉冲编码器的结构如图 8-4-1 所示。在一个圆盘的圆周上刻有相等间距的线纹(分为透明和不透明)称为圆光栅。圆光栅与工作轴一起旋转。与圆光栅相对平行地放置一个固定的扇形薄片, 称为指示光栅, 上面刻有相差 $1/4$ 节距的两个狭缝(在同一圆周上, 称为辨向狭缝)。此外还有一个零位狭缝(一转发出一个脉冲)。脉冲编码器通过十字连接头或键与伺服电动机相连, 它的法兰盘固定在电动机端面上, 罩上防护罩, 构成一个完整的检测装置。

下面介绍光电编码器的工作原理。当圆光栅旋转时, 光线透过两个光栅的线纹部分, 形成明暗相间的条纹。光电元件接收这些明暗相间的光信号, 并转换为交替变化的电信号。该信号为两路近似于正弦波的电流信号 A 和 B, 如图 8-4-2 所示。A 和 B 信号相位相差 90° , 经放大和整形变成方波。通过光栅的两个电流信号, 还有一个“一转脉冲”, 称为 Z 相脉冲, 该脉冲也是通过上述处理得来的。A 脉冲用来产生机床的基准点。

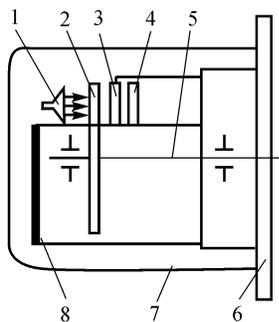


图 8-4-1 光电脉冲编码器的结构组成示意图

- 1—光源; 2—圆光栅; 3—指示光栅; 4—光敏元件
5—轴; 6—连接法兰; 7—防护装置; 8—电路板

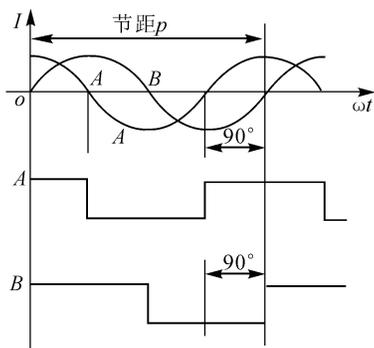


图 8-4-2 脉冲编码器输出的波形

脉冲编码器输出信号有 $A, \bar{A}, B, \bar{B}, Z, \bar{Z}$ 等信号, 这些信号作为位移测量脉冲, 并经过频率—电压变换作为速度反馈信号, 进行速度调节。



8.4.2 光电脉冲编码器的应用

光电脉冲编码器在数控机床上用于数字比较的伺服系统中作为位置检测装置,将检测信号反馈给数控装置。

光电脉冲编码器将位置检测信号反馈给 CNC 装置有两种方式:一种是适应带加减计数要求的可逆计数器,形成加计数脉冲和减计数脉冲。另一种是适应有计数控制和计数要求的计数器,形成方向控制信号和计数脉冲。

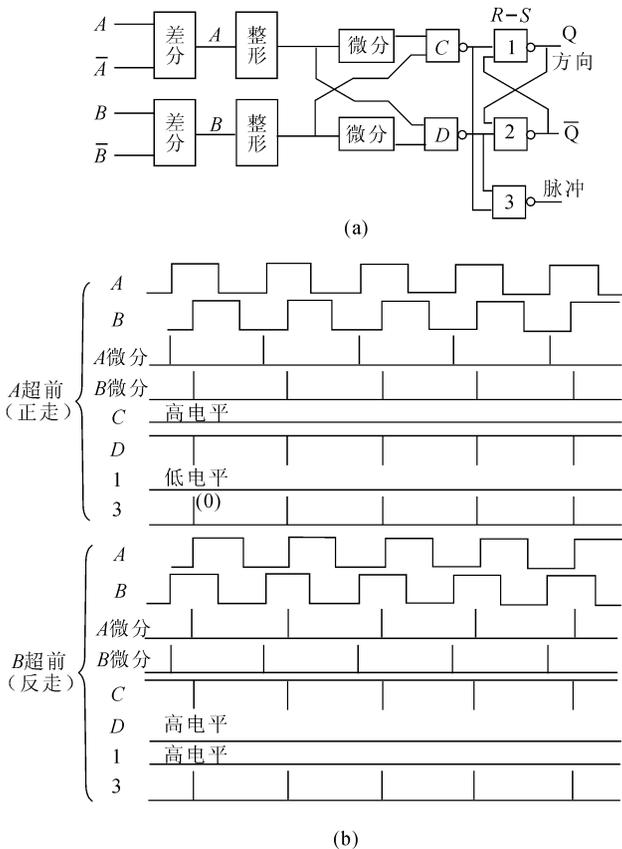


图 8-4-3 脉冲编码器的应用

在此,仅以第二种应用方式为例,通过给出该方式的电路图(图 8-4-3a)和波形图(图 8-4-3b)来简要介绍其工作过程。脉冲编码器的输出信号 A、B 经差分、微分、与非门 C 和 D,由 RS 触发器(由 1、2 与非门组成)输出方向信号,正走时为



“0”,反走时为“1”。由与非门3输出计数脉冲。

正走时,A脉冲超前B脉冲,D门在A信号控制下,将B脉冲上升沿微分作为计数脉冲反向输出,为负脉冲。该脉冲经与非门3变为正向计数脉冲输出。D门输出的负脉冲同时又将触发器置为“0”状态,Q端输出“0”,作为正走方向控制信号。

反走时,B脉冲超前A脉冲。这时,由C门输出反走时的负计数脉冲,该负脉冲也由3门反向输出作为反走时计数脉冲。不论正走、反走,与非门3都为计数脉冲输入门。反走时,C门输出的负脉冲使触发器置“1”,作为反走时方向控制信号。

小 结

本章主要介绍了数控机床常用的位置检测元件,如旋转变压器、光栅测量装置、脉冲编码器等检测元件。在数控机床中数控装置是依靠指令值与位置检测装置的反馈值进行比较,来控制工作台运动的。位置检测装置是CNC系统的重要组成部分。在闭环系统中,它的主要作用是检测位移量,并将检测的反馈信号和数控装置发出的指令信号相比较,若有偏差,经放大后控制执行部件,使其向着消除偏差的方向运动,直到偏差为零。为了提高数控机床的加工精度,必须提高测量元件和测量系统的精度。不同的数控机床对测量元件和测量系统的精度要求、允许的最高移动速度各不相同,因此,研制和选用性能优越的检测装置是很重要的。

习题与思考题

- 8-1 数控机床伺服系统对位置检测装置有何要求?怎样对位置检测装置进行分类?
- 8-2 简述旋转变压器的工作原理,并说明它的应用。
- 8-3 简述光栅测量装置的基本组成和测量原理。
- 8-4 简述光电脉冲编码器的构成和工作原理。



附录

附录1 OMRON PLC SYSMAC CPM1A 系列的参数

型号信息

商品名称	型号	规格
CPU 单元	CPM1A-10CDR-A	10点 AC电源 DC输入 继电器输出
	CPM1A-10CDR-D	10点 DC电源 DC输入 继电器输出
	CPM1A-20CDR-A	20点 AC电源 DC输入 继电器输出
	CPM1A-20CDR-D	20点 DC电源 DC输入 继电器输出
	CPM1A-30CDR-A	30点 AC电源 DC输入 继电器输出
	CPM1A-30CDR-D	30点 DC电源 DC输入 继电器输出
	CPM1A-40CDR-A	40点 AC电源 DC输入 继电器输出
	CPM1A-40CDR-D	40点 DC电源 DC输入 继电器输出
扩展单元	CPM1A-20EDR	20点 DC输入 继电器输出
RS232C 适配器	CPM1-CIF01	外设口〈---〉RS232C 适配器
RS442 适配器	CPM1-CIF11	外设口〈---〉RS422 适配器
编程器	CQM1-PRO001	电缆长2m
SYSMAC 支持软件	C500-ZL3PC1	PC98 系列计算机
	C500-ZL3DV1	DOS/V 用
	C500-ZL3AT1-E	PC/AT 系列计算机(英文版)
计算机连接电缆	CQM1-CIF01	PC98 系列计算机接线用(3.3m)
	CQM1-CIF02	DOS/V 系列计算机接线用(3.3m)

外形尺寸

型号	宽度(mm)
CPM1A-10CDR-A/D	66
CPM1A-20CDR-A/D	86
CPM1A-30CDR-A/D	130
CPM1A-40CDR-A/D	150
CPM1A-20EDR	86(厚度50mm)



附录2 OMRON PLC SYSMAC CPM1A 系列的性能规格

一般规格

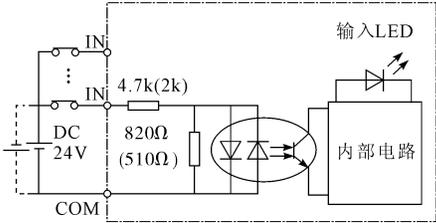
项目		10点CPU单元	20点CPU单元	30点CPU单元	40点CPU单元
电源电压	AC电源	AC100~200V 50/60Hz 40VA 以下			
	DC电源	DC24V 20W 以下			
电源外部输出		DC24V 200mA		DC24V 300mA	

性能规格

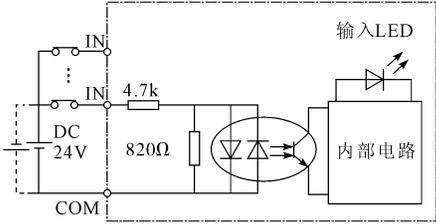
项目		10点CPU单元	20点CPU单元	30点CPU单元	40点CPU单元
控制方式		存储程序法(梯形图方式)			
输入/输出控制方式		周期扫描直接输出,即时刷新处理			
命令种类		基本指令:14种,应用指令:77种(134条)			
处理速度	基本指令	LD指令:0.72 μ s			
	应用指令	MOV指令:12.3 μ s			
程序容量		2048字			
最大I/O	主机	10点(输入6点/输出4点)	20点(输入12点/输出8点)	30点(输入18点/输出12点)	40点(输入24点/输出16点)
	扩展	不可扩展	不可扩展	90点(输入54点/输出36点)	100点(输入60点/输出40点)
输入/输出继电器		00000-00915(输入)01000-01915(输出) 输入输出继电器所未用的通道可作为内部辅助继电器			
内部辅助继电器		640点:20000-23915(200-239CH)			
保持继电器		320点:HR0000-1915(HR00-19CH)			
辅助继电器		256点:AR0000-1515(AR00-15CH)			
计时器/计数器		128点:TIM/CNT000-127(10ms,100ms计时器) (减法计数器、可逆计数器)			
数据存储器		1024字(读/写)+512字(只读)			
中断处理		2点 响应时间(0.3ms以下)		4点 响应时间(0.3ms以下)	
外部中断		快闪存储器:用户程序 只读数据存储器(无需电池保持)			
存储器后备		1点:单相5kHz或2相2.5kHz(线性计数方式) 增量模式:0~65535(16位) 增减模式:-32767~32767(16位)			
高速计数器		与外部中断输入点共用(最小输入脉冲宽度0.2ms)			
高速响应输入		2点(0~200)			
模拟量设定		仅对晶体管输出型1点(2kHz)			

附录3 OMRON PLC SYSMAC CPM1A 各种单元的规格

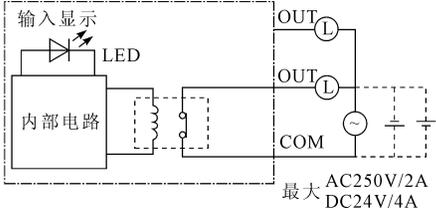
CPU 单元的输入规格

项 目	规 格	电路构成图
输入电压	DC20.4 ~ 26.4V	
输入阻抗	IN00000 ~ 00002: 2kΩ 其他: 4.7kΩ	
输入电流	IN00000 ~ 00002: 12mA 其他: 5mA	
ON 电压	最小 DC14.4V	
OFF 电压	最大 DC5.0V	
ON 响应时间	1 ~ 128ms 以内 (缺省 8ms)	
OFF 响应时间	1 ~ 128ms 以内 (缺省 8ms)	

I/O 扩展单元的输入规格

项 目	规 格	电路构成图
输入电压	DC20.4 ~ 26.4V	
输入阻抗	4.7kΩ	
输入电流	5mA	
ON 电压	最小 DC14.4V	
OFF 电压	最大 DC5.0V	
ON 响应时间	1 ~ 128ms 以内 (缺省 8ms)	
OFF 响应时间	1 ~ 128ms 以内 (缺省 8ms)	

继电器输出规格

项 目		规 格	电路构成图	
最大开关能力		AC250V/2A ($\cos\phi = 1$) DC24V/2A (4A/公共端)		
最小开关能力		DC5V、10mA		
继电器 寿命	电气性	阻性负载		30 万次
		感性负载		10 万次
	机械性	2000 万次		
ON 响应时间		15ms 以下		
响应时间		15ms 以下		

晶体管输出规格

项 目	规 格	电路构成图
最大开关能力	DC20.4 ~ 26.4V 300mA	
最小开关能力	10mA	
漏电流	0.1mA	
残留电压	1.5V 以下	
ON 响应时间	0.1ms 以下	
OFF 响应时间	1ms 以下	

特殊功能单元规格

名称	项 目	规 格
模拟量 I/O 单元	型 号	CPMIA - MAD01
	模拟量输入	输入路数:2 输入信号范围:电压 0 ~ 10V 或 1 ~ 5V、电流 4 ~ 20mA 分辨率:1/126 精度:1.0% (全量程) 转换 A/D 数据:8 位二进制数
	模拟量输出	输出路数:1 输出信号范围:电压 0 ~ 10V 或 -10 ~ 10V、电流 4 ~ 20mA 分辨率:1/126 (当输出信号范围是 -10 ~ 10V 时为 1/512) 精度:1.0% (全量程) 数据设定:带符号的 8 位二进制数
	转换时间	最大 10ms/单元
	隔离方式	模拟量 I/O 信号间无隔离, I/O 端子和 PC 间采用光电耦合隔离
温度传感器和模拟量输出单元	型 号	CPMIA - TS101 - DA
	Pt100 输入	输入路数:2 输入信号范围:最小 Pt100:82.3Ω/ -40℃; 最大 Pt100:194Ω/ +250℃ 分辨率:0.1℃ 精度:1.0% (全量程)
	模拟量输出	输出路数:1 输出信号范围:电压 0 ~ 10V 或 -10 ~ 10V、电流 4 ~ 20mA 分辨率:1/126 (当输出信号范围是 -10 ~ 10V 时为 1/512) 精度:1.0% (全量程)
	转换时间	最大 10ms/单元



名称	项 目	规 格	
温度传感器单元	型 号	CPM1A - TS001/TS002	CPM1A - TS101/102
	输入类型	热电偶:K1, K2, J1, J2 之间选 (由旋转开关设定)	铂热电阻: Pt100 JPt100 之间 选一(由旋转开关设定)
	输入点数	TS001, TS101: 2 点 TS002, TS102: 4 点	
	精度	1.0% (全量程)	
	转换时间	250ms/所有点	
	温度转换	4 位 16 进制	
	绝缘方式	光电耦合绝缘(得温度输入信号之间)	



参考文献

- 1 李宏胜. 机床数控技术及应用. 北京:高等教育出版社,2003
- 2 严爱珍. 机床数控原理与系统. 北京:机械工业出版社,2003
- 3 吴国经. 数控机床故障诊断与维修. 北京:电子工业出版社,2004
- 4 SINUMERIK 802S/C base line 简明安装调试手册. 2003
- 5 李善术主编. 数控机床及其应用. 北京:机械工业出版社,2003
- 6 王润孝,秦现生主编. 机床数控原理与系统. 西安:西北工业大学出版社,1999
- 7 林 宋主编. 现代数控机床. 北京:化学工业出版社,2002
- 8 严爱珍主编. 机床数控原理与系统. 北京:机械工业出版社,1999
- 9 余仲裕主编. 数控机床维修. 北京:机械工业出版社,2001
- 10 王侃夫主编. 数控机床故障诊断及维护. 北京:机械工业出版社,2001
- 11 陈吉红主编. 数控机床实验指南. 武汉:华中科技大学出版社,2003
- 12 王炳实主编.《机床电气控制》(第三版). 机械工业出版社,2004
- 13 何伟主编.《电气控制实训》. 高等教育出版社,2002
- 14 张爱玲主编.《电力拖动与控制》. 北京:机械工业出版社,2003
- 15 郑瑜平主编.《可编程序控制器》. 北京:北京航空航天大学出版社,1996
- 16 官淑贞主编.《可编程序控制器原理及应用》北京:人民邮电出版社,2002
- 17 CPM1A 可编程序控制器操作手册 OMRON,2004