

中等职业学校技能型紧缺人才培养培训系列教材

数控技术应用专业

数控机床控制技术基础

——电气控制基本常识

主编 吴文龙 王猛

高等教育出版社

内容简介

本书是中等职业学校技能型紧缺人才培养培训系列教材。

本书根据 2003 年 12 月教育部办公厅、国防科工委办公厅和中国机械工业联合会颁发的《中等职业学校数控技术应用专业领域技能型紧缺人才培养培训指导方案》的核心课程与训练项目《数控机床控制技术基础——电气控制基本常识》的教学大纲编写,同时参考了相关行业的职业技能鉴定规范及初级电工技术等级考核标准。

本书内容有:直流电路、正弦交流电路、变压器与交流异步电动机、电气控制基础、模拟电子技术基础、数字电子技术基础、数控机床的控制系统概述、PLC 及其应用基础、位置检测及控制基础、进给驱动及控制技术基础、主轴驱动及控制技术基础。

本书以理论实践一体化教学法和项目训练教学法为基本理念,采用综合化和模块化的编写方式,可供中等职业学校数控技术应用专业使用,也可作为相关行业岗位培训或自学用书。

图书在版编目(CIP)数据

数控机床控制技术基础 —— 电气控制基本常识 /
吴文龙 王猛主编. —北京:高等教育出版社, 2004. 8
ISBN 7 - 04 - 015650 - 4

I. 数... II. ①吴... ②王... III. 数控机床 - 电气
控制 - 专业学校 - 教材 IV. TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 075972 号

策划编辑 李新宇 责任编辑 王莉莉 封面设计 于 涛 责任绘图 朱 静
版式设计 张 岚 责任校对 胡晓琪 责任印制

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010 - 64054588
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	免费咨询	800 - 810 - 0598
邮政编码	100011	网 址	http ://www. hep. edu. cn
总 机	010 - 82028899		http ://www. hep. com. cn

经 销 新华书店北京发行所
印 刷 国防工业出版社印刷厂

开 本	787 × 1092 1/16	版 次	年 月第 1 版
印 张	21	印 次	2004 年 月第 次印刷
字 数	510 000	定 价	25. 90 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

出版说明

为实现党的十六大提出的全面建设小康社会的奋斗目标,落实《国务院关于大力推进职业教育改革与发展的决定》精神,促进职业教育更好地适应社会主义现代化建设对生产、服务一线技能型人才的需要,缓解劳动力市场制造业和现代服务业技能型人才紧缺状况,教育部、劳动和社会保障部、国防科工委、信息产业部、交通部、卫生部联合印发了《教育部等六部门关于实施职业院校制造业和现代服务业技能型紧缺人才培养培训工程的通知》。根据《通知》的要求,教育部办公厅、国防科工委办公厅、中国机械工业联合会组织制定了《中等职业学校数控技术应用专业领域技能型紧缺人才培养培训指导方案》(以下简称《指导方案》)。

《指导方案》要求本专业领域技能型紧缺人才的培养培训要以综合素质为基础,以能力为本位,把提高学生的职业能力放在突出的位置,加强实践性教学环节,使学生成为企业生产服务一线迫切需要的高素质劳动者。职业教育要以企业需求为基本依据,办成以就业为导向的教育,既要增强针对性,又要兼顾适应性,课程设置和教学内容要适应企业技术发展,体现本专业领域的新知识、新技术、新工艺和新方法,具有一定的先进性和前瞻性,教学组织要以学生为主体,提供选择和创新的空間,构建开放的课程体系,适应学生个性化发展的需要。

为了配合实施数控技术应用专业领域技能型紧缺人才培养培训工程,我社组织了由制定《指导方案》的专家组牵头,承担培养培训任务的职业院校及合作企业的一线“双师型”教师与工程技术人员参与的编者队伍,开发编写了数控技术应用专业领域技能型紧缺人才培养培训系列教材。本系列教材以《指导方案》为依据,以就业为导向,以能力为本位,定位准确,精心打造,借鉴了国内外职业教育先进教学模式,从内容到形式都有所创新,理论知识教材,有机地整合了多门传统的专业基础课程,知识点以必需、够用为度,体现了大综合化;理论实践一体化教材,倡导情境教学法,强化了知识性和实践性的统一;操作训练和实训指导教材,成系列按课题展开,考评标准具体明确,实用、可操作性强。本系列教材既注重了内在的相互衔接,又强化了相互支持,并将根据教学需要不断增添新内容。

数控技术应用专业领域技能型紧缺人才培养培训系列教材适用于中等职业学校教学,亦可供企业进行岗前和在职培训时选用。

查阅本系列教材的相关信息,请登录高等教育出版社“中等职业教育资源网”(网址:<http://sv.hep.com.cn>)。

前 言

本书根据 2003 年 12 月教育部办公厅、国防科工委办公厅和中国机械工业联合会颁发的《中等职业学校数控技术应用专业领域技能型紧缺人才培养培训指导方案》的核心课程与训练项目《数控机床控制技术基础——电气控制基本常识》的教学大纲编写 ,同时参考了相关行业的职业技能鉴定规范及初级技术工人等级考核标准。该大纲借鉴了国外先进职业教育的理念、模式和方法 ,结合我国数控技术应用专业领域技能型紧缺人才需求的实际情况 ,大刀阔斧地对专业课程结构、体系、内容和教学方法进行了改革 ,将电工技术、电子技术、电工仪表、电机与电气控制和数控技术等学科有机综合。本书是中等职业学校技能型紧缺人才培养培训系列数控技术应用专业教材。

本书坚持以就业为导向 ,以能力为本位 ,突出职业技能教育 ,注意与职业技能鉴定的内容和要求相接轨 ,与企业实践密切联系 ,理论知识与技能训练内容相统一。本书打破了原来各学科体系的框架 ,体现了课程的综合化和模块化。在内容的选择和处理上 ,以“ 必需、够用 ”为度 ,突出了针对性和适应性 ,力求浅显易懂、少而精、理论联系实际和学以致用。本书采用了案例性教学的内容 ,并将原来传统学科教学的长处与案例性教学相结合 ,将专业特点和职业特点相结合。同时 ,本书结合数控技术的发展 ,增加新技术、新知识的介绍 ,为学生的终身学习打下良好的基础。

本书在教学过程中建议采用理论实践(实验)一体化教学法或案例教学法 ,并根据数控机床的实际应用 ,优化教学过程。书中打 * 号的部分是选学内容 ,可供学生自学。

本书教学学时为 132 学时 ,学时方案建议如下表 ,供参考。

序号	课程内容	学时数
1	直流电路	16
2	正弦交流电路	14
3	变压器与交流异步电动机	8
4	电气控制基础	18
5	模拟电子技术基础	18
6	数字电子技术基础	14
7	数控机床的控制系统概述	4
8	PLC 及其应用基础	6
9	位置检测及控制基础	6
10	进给驱动及控制技术基础	12
11	主轴驱动及控制技术基础	12
机 动		4
合 计		132

第 5 章

模拟电子技术基础

本章将学到：

1. 二极管、晶体管和场效晶体管各有什么作用 ,怎样用万用表进行粗略地检测 ?
2. 常用的放大电路有共发射极放大电路、射极输出器、多极放大电路、负反馈放大电路、差分放大电路和 OCL 功率放大电路 ,这些电路各自的组成特点是什么 ,它们是怎样进行放大的 ,各有哪些作用 ?
3. 什么是集成运算放大器 ,常见的运算放大电路以及集成运算放大器的主要应用电路有哪些 ?
4. 直流稳压电路各个组成电路的作用和特点是什么 ,怎样使用集成稳压器 ?
5. 什么是晶闸管 ,它有何特点 ,可控整流电路的组成及其工作过程怎样 ? 在使用中怎样才能保护晶闸管 ?

5.1 半导体器件

在数控机床、自动化设备等的控制系统中 ,电子设备起着十分关键的作用。在这些电子设备中除了有前面已介绍的电阻、电容、变压器、开关等组件外 ,还有很重要的半导体器件。它们的种类很多 ,用途各异 ,本节主要介绍常用的二极管、晶体管和场效晶体管。

5.1.1 二极管

1. 二极管的构造

二极管是由半导体材料构成的。半导体是指导电性能介于导体和绝缘体之间的物体 ,常用的半导体有硅、锗和砷化镓等。半导体与金属导体不同 ,它有两种运载电荷的粒子 :一种是带负电荷的自由电子(简称电子) ,另一种是带正电荷的空穴(简称空穴)。这两种粒子统称载流子。

在不加杂质的纯净半导体(也称本征半导体)中 ,这两种载流子的数量是相等的。在纯净半导体中掺入微量杂质元素后 ,载流子的数量大大增多 ,导电能力也增强 ,并形成了 N 型半导体和 P 型半导体。N 型半导体又称电子型半导体 ,其内部电子是多数载流子 ,空穴是少数载流子 ,它主要靠电子导电 ;P 型半导体又称空穴型半导体 ,其内部空穴是多数载流子 ,电子是少数载流子 ,它主要靠空穴导电。

用特殊的工艺在一块半导体上(如硅或锗单芯片)加工出 P 型和 N 型半导体 ,则在 P 型区和

N 型区的交界面上就会形成 PN 结 ,如图 5.1 所示。将 PN 结加上电极引出线和管壳 ,就构成了二极管。二极管的外形如图 5.2 (a)所示 ,它的两个电极分别是正极(或称阳极)和负极(或称阴极) ,分别用“ + ”和“ - ”来表示。二极管的图形符号如图 5.2 (b)所示 ,它的文字符号用 V 表示 ,为与晶体管区分 ,常在 V 后面加字母 D ,本书用 VD 表示。

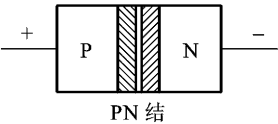


图 5.1 PN 结

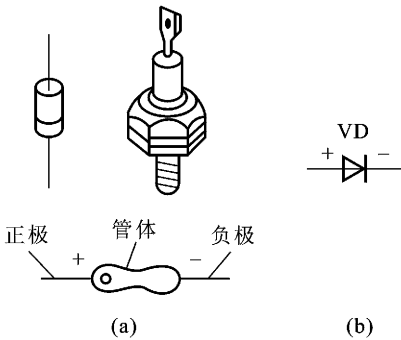


图 5.2 晶体二极管的外形和符号

2. 二极管的单向导电性能

把二极管接成如图 5.3 (a)所示的电路。当闭合开关时 ,灯亮。如果把二极管的正负极对调后接入电路 ,如图 5.3 (b)所示 ,则闭合开关后 ,灯不亮。实验说明 :二极管加正向电压(PN 结处于正偏) ,二极管导通 ;二极管加反向电压(PN 结处于反偏) ,二极管截止。这一特性称为二极管的单向导电性。

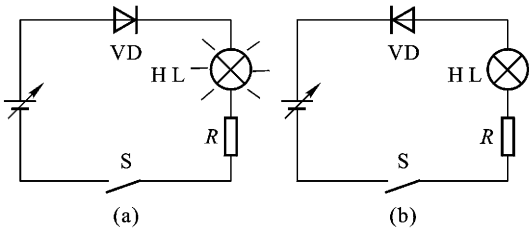


图 5.3 二极管的单向导电性能实验

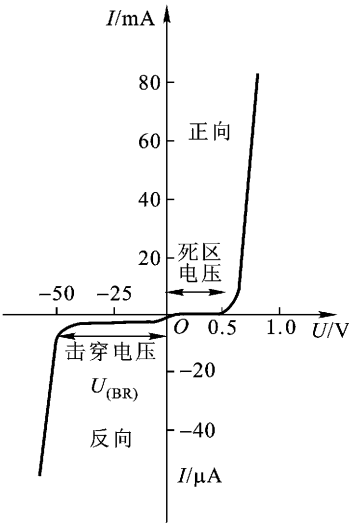


图 5.4 二极管的伏安特性曲线

3. 二极管的伏安特性

二极管两端的电压和流过它的电流之间的关系称为二极管的伏安特性 ,如图 5.4 所示。由图可见 ,当正向电压很小时 ,正向电流几乎为零。当正向电压超某一数值后 ,电流才随电压的上升而变大 ,这一电压称为死区电压(或称门坎电压)。通常 ,硅管的死区电压约为 0.5 V ,锗管约

为 0.1 V 。导通时,二极管的正向压降,硅管为 $0.6\sim 0.8\text{ V}$,锗管为 $0.2\sim 0.3\text{ V}$ 。

当二极管加反向电压时,在一定的范围内,反向电流很小,且其大小与反向电压的高低无关,所以此电流称为反向饱和电流。当反向电压超过某一数值时,反向电流会突然急剧增大,这种现象称为反向击穿,这一电压称为反向击穿电压。反向击穿分为电击穿和热击穿两种。当反向电流与反向电压的乘积(即 PN 结的耗散功率)不超过允许值时,PN 结不会烧坏,反向电压撤去后,二极管仍能正常工作,这种击穿就是电击穿。如果反向电流过大,将导致 PN 结过热而烧坏,这就是热击穿。

4. 主要参数

(1) 最大整流电流 I_{FM}

允许长时间流过二极管的最大正向平均电流称为最大整流电流。如果工作时电流超过此值,将造成 PN 结过热而使二极管损坏。

(2) 最高反向工作电压 U_{RM}

最高反向工作电压是二极管允许承受的反向工作电压峰值,一般是反向击穿电压的二分之一或三分之一。

(3) 反向电流 I_{R}

反向电流是指在室温条件下,在二极管两端加上规定的反向电压时流过的反向电流。这个电流的大小反映了二极管单向导电性能的好坏。反向电流越大,则二极管的单向导电性能越差,且受温度的影响大。硅管的反向电流比锗管小几十到几百倍,一般在几微安以下。

5. 二极管的种类和型号

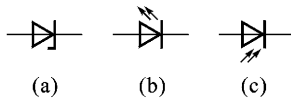
二极管的常见分类方法有以下几种:

① 按材料分类,有硅二极管和锗二极管等。

② 按结构分,有点接触型、面接触型和平面接触型。点接触型二极管因 PN 结面积很小,结电容小,高频性能好,但承受电流的能力差。面接触型和平面接触型二极管的 PN 结结面积较大,其结电容较大,能通过较大电流。但工作频率较低,一般用于整流、稳压等低频电路。

③ 按用途分,有用作检波、整流等的普通二极管,还有一些特殊用途的二极管。

a. 稳压二极管。它工作在特性曲线的反向击穿区,具有稳定电压的功能,其图形符号如图 5.5(a)所示。



b. 发光二极管。它能将电能转变为光能。发光二极管的颜色有红、橙、黄、绿等,这些颜色主要取决于制造管子所用的材料。发光二极管常用作显示器件,除单个使用外,还制成 LED 显示器等。

另外,还有一种红外发光二极管,主要用作光电自动控制及光电耦合器的红外光源。发光二极管的图形符号如图 5.5(b)所示。

c. 光电二极管。

它能将光照强弱的变化转变成电信号。它的特点是反向电流与光照度成正比,光照度越强,则反向电流越大,它的图形符号如图 5.5(c)所示。光电二极管常用于光的测量,如传感器上的光敏器件等。

从以上的分类方法可以看到,二极管有不同的类型,同一类型所用的材料及参数不一定相同,因此需要用不同的符号来表示,例如 2CZ82B 是整流二极管,2CW20 是稳压二极管。关于二

图 5.5 常用二极管的符号

极管的型号及其意义,见 5.1.4 节表 5.4。

6. 二极管的简易测量

二极管的好坏和极性可以用万用表来判别。对允许通过电流较小的二极管,一般将万用表拨至 $R \times 100 \Omega$ 或 $R \times 1 k$ 的电阻挡。当黑表笔接二极管正极,红表笔接二极管负极时,测得的是二极管的正向电阻,如图 5.6(a)所示;对调表笔,测得的是反向电阻,如图 5.6(b)所示。

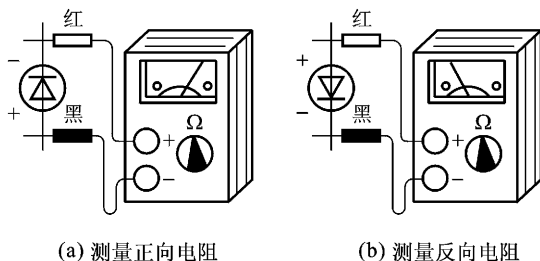


图 5.6 用万用表检测二极管

对整流二极管,因为它通过的电流较大,因此测正向电阻时应使用 $R \times 1 \Omega$ 挡;测反向电阻时,应使用 $R \times 10 k$ 挡,因为该挡电源电压较高,比其他挡更接近整流二极管的反向截止情况。

一般好的二极管,正向电阻都很小(整流二极管的正向电阻约为几欧至十几欧),反向电阻都很大。若测得正、反向电阻都很小,表示二极管内部短路;若正、反向电阻都为无穷大,表示二极管内部断路;若测得正、反向电阻相差不大,则表示其单向导电性能不好。这三种二极管都不能使用。

5.1.2 晶体管

1. 晶体管的结构和分类

晶体管也是由半导体构成,图 5.7 是几种常见晶体管的外形,其内部结构有 NPN 和 PNP 两种类型,对应的符号也有两种,如图 5.8 所示。从图中可以看出,晶体管的内部结构有三个区、两个 PN 结。三个区分别是发射区、基区和集电区,相应引出的三个极为发射极 e、基极 b、集电极 c,基区和发射区间的 PN 结称为发射结,基区和集电区间的 PN 结称为集电结。

晶体管除了按内部结构分为 NPN 和 PNP 两种类型外,还有很多种分类。按制造材料分有硅管和锗管两类,平时所用的硅管大多是 NPN 型,锗管大多是 PNP 型的;按工作频率分有高频管、低频管;按用途分有放大管、开关管等;按功率分有小功率管、中功率管和大功率管等。国产晶体管按照半导体器件的命名法,可以从型号上区分它们的类别。例如 3DG 表示 NPN 硅高频小功率晶体管,3AX 表示 PNP 型锗低频小功率晶体管,3BX 表示 NPN 型锗低频小功率晶体管,3DD 表示 NPN 型硅低频大功率晶体管等。

2. 晶体管的电流放大能力

图 5.9 是 NPN 型晶体管的实验电路。通过改变电位器 R_p 来改变基极电流 I_B 的大小,从而测得与之一一对应的集电极电流 I_C 和发射极电流 I_E 的数值,表 5.1 是实测的晶体管各极电流数据。

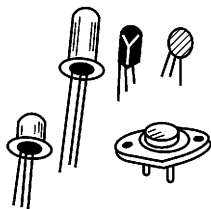
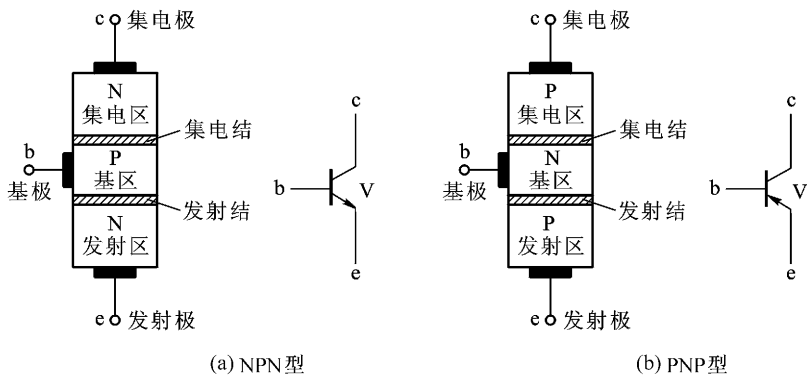


图 5.7 几种常见晶体管的外形图



5.8 晶体管的结构示意图和符号

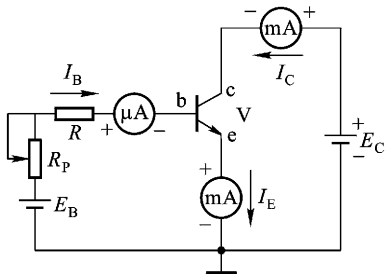


图 5.9 测试晶体管三个极电流的实验电路

表 5.1 晶体管各极电流的测试电路

实验序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I_B/mA	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.08	0.10	0.12
I_C/mA	0.01	0.71	1.52	2.40	3.20	4.00	4.78	5.82	5.85	5.85
I_E/mA	0.01	0.72	1.54	2.43	3.24	4.05	4.84	5.90	5.95	5.97

分析表 5.1 的测试数据 ,可以得到 :

① 晶体管各极的电流分配关系

$$I_E = I_C + I_B \tag{5.1}$$

因为 $I_C \gg I_B$,所以

$$I_E \approx I_C \tag{5.2}$$

② 比较 1 ~ 8 组的数据 ,发现基极电流 I_B 增大时 ,集电极电流 I_C 也相应增大。通常把 I_C 与 I_B 的比值称为直流电流放大系数 ,用 $\bar{\beta}$ 表示 ,它反映了晶体管电流放大能力的大小。

$$\bar{\beta} = \frac{I_C}{I_B} \tag{5.3}$$

③ 比较 1 ~ 8 组的数据 ,还可发现当基极电流有微小变化时 ,就能引起集电极电流的较大变化 ,这就是晶体管的电流放大作用。集电极电流的变化量与相应的基极电流变化量的比值称为晶体管的交流电流放大系数 ,用 β 表示

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \tag{5.4}$$

例如,从第4组和第5组的数据可得 I_B 从 0.03 mA 增大到 0.04 mA 时 I_C 从 2.40 mA 增大到 3.20 mA,则

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{3.20 - 2.40}{0.04 - 0.03} = 80$$

从式(5.4)得出 β 的数值越大,晶体管的电流放大作用就越大。但应该注意的是,晶体管的电流放大作用,并不是真正把微小的电流放大了,而是以基极电流的微小变化去控制集电极电流的较大变化。同时这一放大作用是有一定范围的,比较第9和第10组数据可以看出, I_B 虽然有微小的变化,但 I_C 没有变化,这时,晶体管已经没有放大作用了。

3. 晶体管的特性

(1) 输入特性曲线

输入特性曲线是指集电极-发射极电压 U_{CE} 为一定值时,晶体管的基极电流 I_B 与基极-发射极电压 U_{BE} 之间的关系曲线,如图 5.10 所示。

由图可见,晶体管的输入特性和二极管的伏安特性相似,也有一段死区电压。只有 U_{BE} 大于死区电压后, U_{BE} 增大 I_B 跟着增大,对应 I_B 很陡的曲线部分,两者成线性关系。同时, U_{BE} 的值变化很小,可以近似一个常数,通常把这样一个值称为晶体管发射结的导通电压,一般硅管约为 0.7 V,锗管约为 0.3 V。

(2) 输出曲线特性

输出特性曲线是指当基极电流 I_B 为某一数值时,集电极电流 I_C 与集电极-发射极电压 U_{CE} 之间的关系曲线,如图 5.11 所示。从图上看,输出特性曲线分成三个工作区。

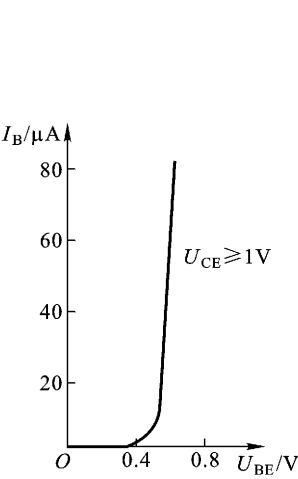


图 5.10 晶体管输入特性曲线

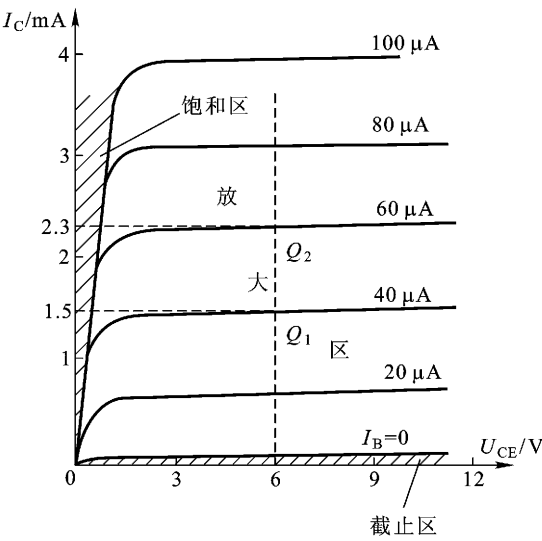


图 5.11 3DG6 晶体管的输出特性曲线

① 截止区。 $I_B = 0$ 曲线以下的区域称为截止区 ,此区域晶体管处于截止状态。晶体管处于截止状态的条件是晶体管的发射结反偏。

② 饱和区。此区域内 ,晶体管处于饱和状态 ,即 I_C 不随 I_B 的增大或减小而变化 ,且 U_{CE} 的数值较小。晶体管饱和时的 U_{CE} 称为饱和压降 ,记作 U_{CES} 。一般小功率硅管约为 0.3 V ,锗管约为 0.1 V。晶体管处于饱和状态的条件是晶体管的发射结和集电结都正偏。

③ 放大区。图中饱和区与截止区之间的区域称为放大区 ,此区域内晶体管处于放大状态 ,即 I_C 受 I_B 的控制而变化 $\Delta I_C = \beta \Delta I_B$,具有电流放大作用。晶体管处于放大状态的条件是晶体管的发射结正偏 ,集电结反偏。

从以上的分析可知 ,晶体管截止时 $I_B = 0$, $I_C \approx 0$, $U_{CE} \approx E_C$,此时晶体管的集电极和发射极之间可视为开路 ,相当于一个断开的开关 ;当晶体管饱和时 , U_{CE} 很小 ,与 E_C 相比可以忽略不计 ,此时晶体管的集电极和发射极可视为通路 ,相当一个接通的开关。这就是晶体管的开关作用。

综上所述 ,晶体管工作在放大状态时 ,具有电流放大作用 ;晶体管工作在截止和饱和状态时 ,具有开关作用。

晶体管的工作状态可以根据晶体管各极的电位来判断 ,见表 5. 2。

表 5. 2 晶体管各极的电位与其工作状态关系

工作状态	NPN 型	PNP 型
放大	$V_C > V_B > V_E$	$V_C < V_B < V_E$
截止	$V_C > V_B , V_B \leq V_E$	$V_C < V_B , V_B \geq V_E$
饱和	$V_C < V_B , V_B > V_E$	$V_C > V_B , V_B < V_E$

4. 主要参数

晶体管的主要参数是用来表示晶体管性能的 ,是选用晶体管的依据。主要有：

(1) 电流放大系数 $\bar{\beta}$ 和 β

$\bar{\beta}$ 和 β 分别是晶体管接成共发射极电路时直流放大系数和交流放大系数。对同一个晶体管 ,在同等工作条件下 $\bar{\beta} \approx \beta$ 。常用晶体管的 β 值在 20 ~ 200 之间。

(2) 集电极 - 发射极反向截止电流 I_{CEO}

集电极 - 发射极反向截止电流 I_{CEO} (又称穿透电流) 指当 $I_B = 0$ 时 ,集电极与发射极之间的反向电流。当温度不高时 I_{CEO} 的数值总比晶体管的工作电流小很多 ,但它会随温度升高而快速增加 ,因此它的数值越小 ,表示晶体管的温度稳定性越好 。硅管的 I_{CEO} 比锗管的小得多 ,所以硅管的热稳定性比锗管好。

(3) 集电极最大允许电流 I_{CM}

集电极电流 I_C 过大时 ,晶体管 β 值就要下降。集电极最大允许电流 I_{CM} 是 β 值下降至正常值三分之二时的集电极电流。

(4) 集电极 - 发射极间反向击穿电压 $U_{(BR)CEO}$

基极开路时 ,加在集电极和发射极之间的最大允许电压称为集电极 - 发射极间反向击穿电压 $U_{(BR)CEO}$ 。当 U_{CE} 大于 $U_{(BR)CEO}$ 时 ,晶体管会被击穿而导致损坏。温度升高会使 $U_{(BR)CEO}$ 的值降低 ,使用时应注意。

(5) 集电极最大允许耗散功率 P_{CM}

集电极最大允许耗散功率 P_{CM} 是指当晶体管因受热而引起的参数变化不超过允许值时,集电极所消耗的最大功率。使用中,晶体管的 I_C 与 U_{CE} 的乘积不能超过 P_{CM} , 否则会使晶体管因过热而造成损坏。通常可采用附加散热片来提高晶体管的 P_{CM} 值。

5. 晶体管的简易判别

晶体管性能的好坏,可用专门仪器测试,也可用万用表作简单的测试来进行判别。

(1) NPN 型、PNP 型和基极的判别

一只晶体管是 NPN 型还是 PNP 型,可以根据它的型号来判别,对不太熟悉的型号还可以通过查阅晶体管手册来判别。当无法识别其型号时,可根据晶体管的发射结和集电结是两个 PN 结,PN 结的正向电阻小、反向电阻大的特点来进行判断。对小功率晶体管,万用表电阻挡的旋钮应拨至 $R \times 1 \text{ k}$ 挡。用黑表笔接管子的一只脚,并假定它为基极,用红表笔分别接其他两只管脚,如图 5.12(a) 所示。如果两次测得的电阻都较小,则假定的基极成立,被测管子是 NPN 型。此时还必须对调黑、红表笔,两次测得的电阻都应较大,则这只管子是好的,否则就不能使用。如果以上的操作所测得的电阻值都相反,那么被测管子是 PNP 型,如图 5.12(b) 所示。

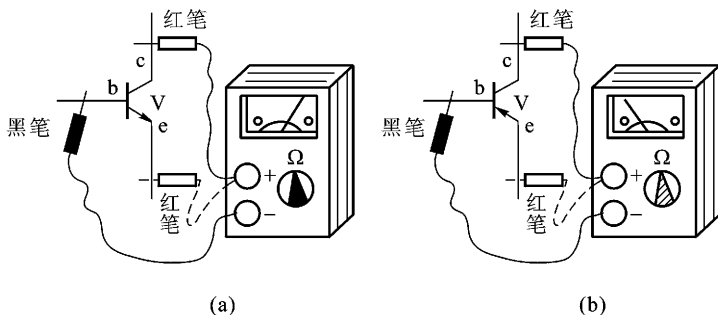


图 5.12 晶体管型号的判别

(2) 集电极和发射极的判别

确定基极和管型后,先假设另外两只管脚中的一只为集电极 c ,在基极 b 和集电极 c 之间接入一个约 $100 \text{ k}\Omega$ 的电阻,或用手捏住 b 和 c 极代替约 $100 \text{ k}\Omega$ 的电阻。对 NPN 型,将黑表笔接 c 极,红表笔接 e 极,读出测量的阻值,如图 5.13 所示,然后对调假定的 c 、 e 两极,重复以上操作。比较两次读数,其中读数较小的一次假设是正确的,即黑表笔接的是集电极 c ,红表笔接的是发射极 e 。如果是 PNP 型的管子,只需要将图 5.13 中的黑、红表笔对调即可。

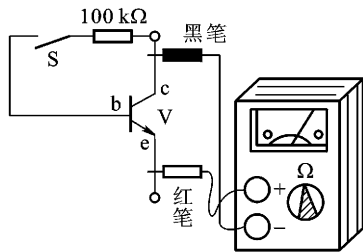


图 5.13 c 、 e 极的判别

(3) 估测 I_{CEO} 和 β

将万用表电阻挡拨至 $R \times 1 \text{ k}$ 挡,对 NPN 型管子,黑表笔接 c 极,红表笔接 e 极,测得阻值大的则表示 I_{CEO} 小。一般小功率硅管应大于数百千欧,锗管应大于数十千欧。若阻值较小则表明 I_{CEO} 较大,晶体管热稳定性差,基本不能使用,若阻值接近或等于零,表示晶体管内部短路。对大功率管,由于 I_{CEO} 通常比较大,所以阻值也比较小。

对 β 的估测,在上述测量后,再按图 5.13 所示的方法进行测量,若两次读数相差越大,表示晶体管的 β 越大。

5.1.3 场效晶体管

场效晶体管也是一种具有放大能力的晶体管,但它的控制方式与晶体管不同,晶体管是利用输入电流去控制输出电流,是电流控制器件,而场效晶体管是利用输入电压来控制输出电流,是电压控制器件。场效晶体管按结构的不同,可分为结型场效晶体管和绝缘栅场效晶体管两类,本书仅介绍应用最广的绝缘栅场效晶体管(或称 MOS 管)。

1. 结构和类型

绝缘栅场效晶体管按其工作状态可分为增强型和耗尽型两类。增强型绝缘栅场效晶体管的结构如图 5.14(a)所示。从图上可知,增强型 MOS 管有三个极,分别是栅极 G、源极 S 和漏极 D。源极 S 与漏极 D 之间是没有导电沟道的,当在栅极 G 和源极 S 之间加上正向电压 U_{GS} ,且 U_{GS} 超过一定值时(该值称为开启电压 U_T),才会在源极 S 与漏极 D 之间形成导电沟道,如图 5.14(b)所示。 U_{GS} 愈高,则导电沟道愈宽。

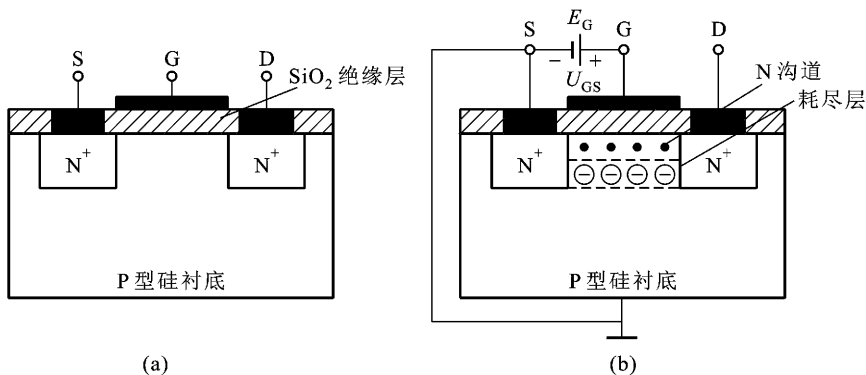


图 5.14 增强型 MOS 管的结构及导电沟道的形成

如果在漏极 D 与源极 S 间加上电压 U_{DS} ,那么就会产生漏极电流 I_D 。而改变 U_{GS} 的大小,就会改变导电沟道的宽窄,从而控制了流过漏极的电流 I_D ,这就是电压变化控制电流的变化。

耗尽型 MOS 管的结构与增强型 MOS 管基本相同,所不同的是原来就有导电沟道。在栅极 G 和源极 S 间加上电压 U_{GS} ,改变它的大小和极性时,可以使导电沟道变宽或变窄,甚至夹断(夹断时的电压称为夹断电压 U_P) ,这样也就控制了漏极电流 I_D 。

无论是增强型还是耗尽型 MOS 管,它们的导电沟道又分为 N 沟道和 P 沟道两类,所以 MOS 管可分为以下四种类型: N 沟道增强型 MOS 管, N 沟道耗尽型 MOS 管, P 沟道增强型 MOS 管, P 沟道耗尽型 MOS 管,它们的符号如图 5.15 所示。

2. 主要参数

(1) 跨导 g_m

在 U_{DS} 为常数时,漏极电流的变化量 ΔI_D 与栅-源极电压的变化量 ΔU_{GS} 的比值,用 g_m 表示,即

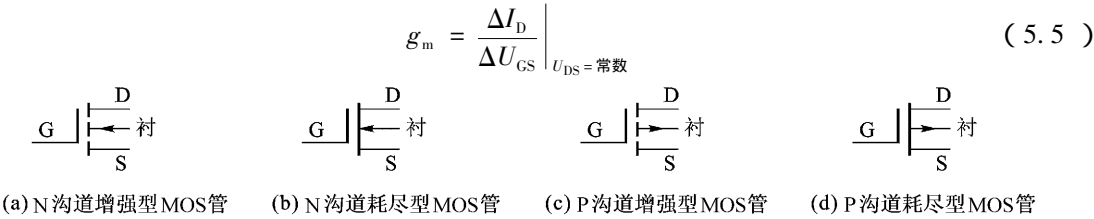


图 5.15 MOS 管的符号

跨导反映了栅 – 源电压 U_{GS} 对漏极电流 I_D 的控制能力 ,是表征场效晶体管放大能力的一个重要参数。

(2) 直流输入电阻 R_{GS}

直流输入电阻是指栅 – 源极电压 U_{GS} 与此对应的栅极电流 I_G 的比值。场效晶体管的输入电阻 R_{GS} 很高 ,约为 $10^7 \sim 10^{14} \Omega$ 。

3. 场效晶体管的特点

场效晶体管与晶体管相同 ,同样具有放大及开关的作用 ,但在性能上比晶体管更优越 ,表 5.3 是这两种管子的比较。

表 5.3 场效晶体管与晶体管的比较

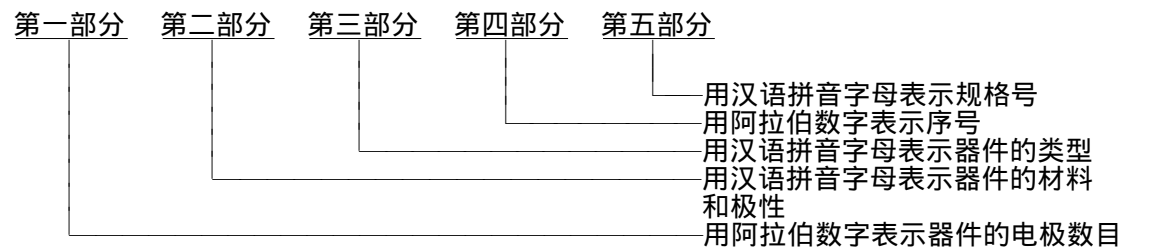
项目	器 件 名 称	
	普通晶体管	场效晶体管
极型特点	是双极型器件 ,又称双极型晶体管	是单极型器件 ,又称单极型晶体管
控制方式	电流控制	电压控制
类型	PNP 型、NPN 型两类	N 沟道、P 沟道两类
放大参数	$\beta = 20 \sim 200$	$g_m = 1 \sim 5 \text{ m A/V}$
输入电阻	$10^2 \sim 10^4 \Omega$	$10^7 \sim 10^{14} \Omega$
噪声	较大	较小
热稳定性	差	好
抗辐射能力	差	强
制造工艺	较复杂	简单、成本低
对应极	基极 – 栅极 ;发射极 – 源极 ;集电极 – 漏极	

4. MOS 管使用时的注意事项

- ① 在 MOS 管中 ,有的产品将衬底引出 ,这种管子有四个管脚 ,通常其漏极与源极可以互换。但有些产品出厂时已将源极与衬底连在一起 ,此时源极与漏极不能对调。
- ② 由于 MOS 管的输入电阻非常高 ,绝缘层薄 ,很容易受外电场的作用而造成损坏 ,因此在保存时需将各电极短路。
- ③ 焊接时 ,电烙铁必须外接地线 ,以屏蔽交流电场 ,防止损坏管子。

5.1.4 半导体器件型号的命名

我国半导体器件的型号是按其材料、性能、类别来命名的。一般半导体器件的型号由五部分组成。但有些半导体 ,如半导体特殊器件、场效晶体管、复合管、PIN 型管、激光器件的型号只有后面三部分。



例：高频小功率硅晶体管 3DG8B 的型号意义

3 D G 8 B

晶体管 NPN 型硅材料 高频小功率管 序号 规格号

国产半导体器件型号组成部分的符号及其意义见表 5.4。在实际的应用中 ,常常需要根据功能、用途及电路的要求等来选择参数合适又经济实用的半导体器件。这时可以查阅“ 常用晶体管手册 ”或产品使用说明书等资料 ,了解其功能、特性、参数数据、使用方法及相关说明 ,并选用。

表 5.4 国产半导体器件型号组成部分的符号及其意义

第一部分		第二部分		第三部分			第四部分	第五部分
用数字表示器件的电极数目		用汉语拼音字母表示器件的材料和极性		用汉语拼音字母表示器件的类型				
符号	意义	符号	意义	符号	意义	符号	意义	
2	二极管	A	N 型 锗材料	P	普通管	D	低频大功率管 ($f_a < 3\text{ MHz}$ $P_c \geq 1\text{ W}$)	用数字表示符号 用汉语拼音字母表示规格号
		B	P 型 锗材料	V	微波管			
		C	N 型 硅材料	W	稳压管	A	高频大功率管 ($f_a \geq 3\text{ MHz}$ $P_c \geq 1\text{ W}$)	
3	晶体管	D	P 型 硅材料	C	参量管	T	半导体闸流管 (可控整流器)	
		A	PNP 型 锗材料	Z	整流管			
		B	NPN 型 锗材料	L	整流堆	Y	体效应器件	
		C	PNP 型 硅材料	S	隧道管	B	雪崩管	
		D	NPN 型 硅材料	N	阻尼管	J	阶跃恢复管	
		E	化合物材料	U	光电器件	CS	场效应器件	
				K	开关管	BT	半导体特殊器件	
				X	低频小功率管 ($f_a < 3\text{ MHz}$ $P_c < 1\text{ W}$)	FH	复合管	
				G	高频小功率管 ($f_a \geq 3\text{ MHz}$ $P_c < 1\text{ W}$)	PIN	PIN 型管	
						JG	激光器件	

5.2 基本放大电路

晶体管具有放大作用 ,因此可以用它构成各式各样的放大电路。这些放大电路的形式虽然

不同,但其作用都是相同的,都能将微弱的信号进行放大。

5.2.1 共发射极放大电路

1. 电路的组成

图 5.16(a)是最基本的单级放大电路。该电路的输入信号 u_i 通过电容器 C_1 从晶体管的基极和发射极输入,负载电阻 R_L 通过电容 C_2 从集电极和发射极得到输出信号。因为发射极是输入和输出的共用端点,所以称为共发射极放大电路。电路中各元件的作用如下:

电源 E_C 是直流电源,它的作用一是为电路放大信号提供能量,二是使晶体管工作在放大状态(即必须使晶体管的发射结正偏,集电极反偏)。 E_C 一般为几伏到几十伏,而且极性不能接反。如果是 PNP 型晶体管,则应调换 E_C 的极性。

晶体管 V 是放大器件,起电流放大和控制作用,是整个电路的核心。

集电极负载电阻 R_c (简称集电极电阻)主要是将集电极电流的变化转变为电压的变化,以实现电压放大。 R_c 的值一般为几千欧到几十千欧。

基极偏置电阻 R_b 是为晶体管 V 提供发射结正向偏置,使电路获得合适的工作点。 R_b 的阻值约为几十千欧到几百千欧。

耦合电容 C_1 和 C_2 的作用是“隔直流、通交流”,即 C_1 、 C_2 分别隔断放大电路与信号源、负载之间的直流通路,而交流信号却能畅通无阻。 C_1 、 C_2 的电容值一般为几微法到几十微法,而且是极性电容,连接时应注意其极性。

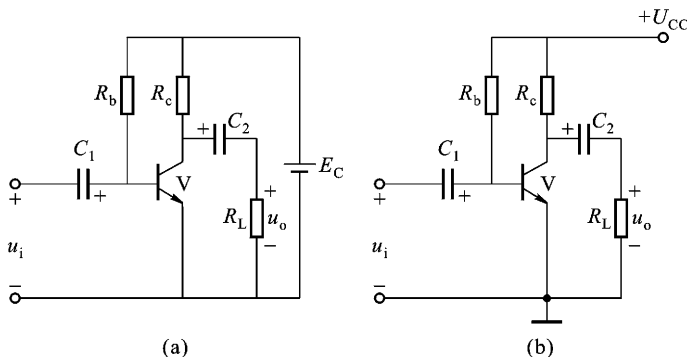


图 5.16 共发射极放大电路

放大电路中,通常把公共部分设为零电位,画成接地,并省去电源 E_C 的符号,用 U_{CC} 的极性和大小来表示,如图 5.16(b)所示,该电路也称为固定偏置放大电路。

2. 放大过程

(1) 无输入信号时电路的工作状态

当无信号输入,即 $u_i = 0$ 时,电路的工作状态称为静态。用示波器观察电路各处的波形,如图 5.17 所示,发现 U_{BE} 、 I_B 、 I_C 、 U_{CE} 都是直流量(直流量用大写字母和大写的下标表示)。这些直流量统称静态工作点 Q,并分别用 U_{BEQ} 、 I_{BQ} 、 I_{CQ} 和 U_{CEQ} 表示。从波形图上可以看到,虽然电路中有直流量,但负载 R_L 上却无输出电压,这是因为 C_2 具有“隔直流、通交流”的作用,直流信号不能送到 R_L 上。

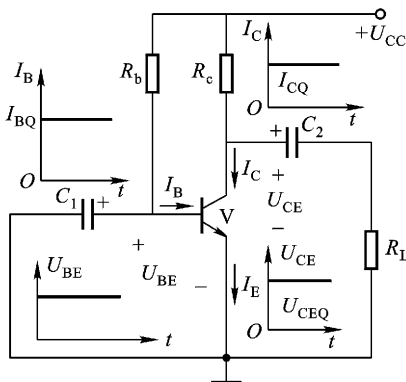


图 5.17 无输入信号时放大电路各处的电流及电压波形

(2) 有输入信号时的工作状态

有信号输入时,电路的工作状态称为动态。图 5.18 是用示波器观察动态时电路各处的电流、电压波形图。由于动态时,电路中既有直流量,又有交流量,为了表述简洁方便,规定用小写字母和小写下标表示交流量,例如电路的交流分量分别用 i_b 、 i_c 、 u_{ce} 等表示,用小写字母和大写下标表示交直流分量叠加后的总量,如 i_B 、 i_C 、 u_{CE} 等。

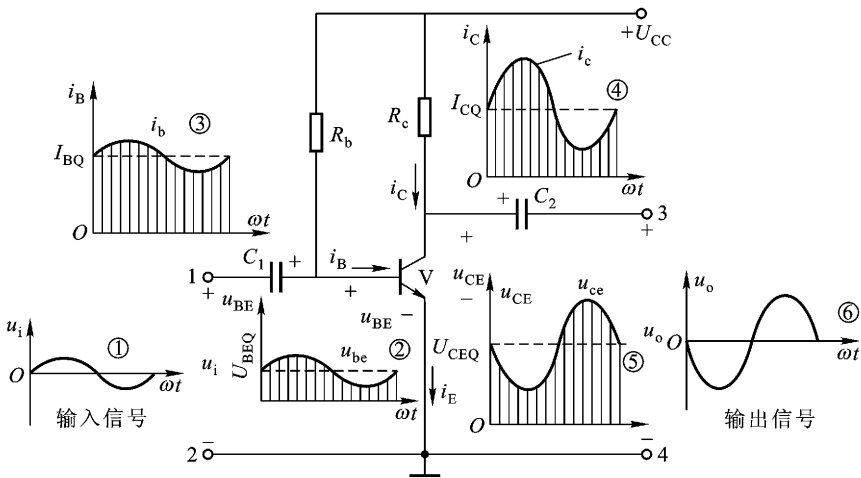


图 5.18 有输入信号时放大电路各处的电流、电压波形

从图 5.18 可以看出,当 u_i 瞬时增大时, u_{BE} 和 i_B 增大。由于 i_C 的变化是 i_B 的 β 倍,所以 i_C 就会增加得更大, R_c 上的压降也随之增大。因为 u_{CE} 的大小等于 U_{CC} 减去 R_c 上压降的差值,结果造成 u_{CE} 反而减小得更多,使得负载 R_L 的电压 u_o 也减小得更多。如果 u_i 瞬时减小,过程与之相反。

综上,当输入信号有一个变化量 Δu_i 时,将在电路中依次产生如下的变化

$$\Delta u_i \rightarrow \Delta u_{BE} \rightarrow \Delta i_B \rightarrow \Delta i_C \rightarrow \Delta u_{CE} \rightarrow \Delta u_o$$

归纳图 5.17 和图 5.18 各波形图的特点,可以得出共发射极放大电路有以下特点:

① 放大电路中同时存在着直流量和交流分量。当输入一个正弦电压 u_i 时,放大电路中

晶体管各极的交流电压和电流在各自静态值的基础上,按正弦规律变化。

② 当输入电压有微小的变化时,放大电路的输出电压有较大的变化,可见该电路有电压放大作用。

③ 输出电压 u_o 与输入电压 u_i 相位相反。

3. 静态工作点

(1) 静态工作点对输出信号波形的影响

基极偏置电阻 R_b 的大小决定了静态工作点高低。图 5.19 是调节 R_b 的大小得到的放大电路各处电流、电压的波形图。

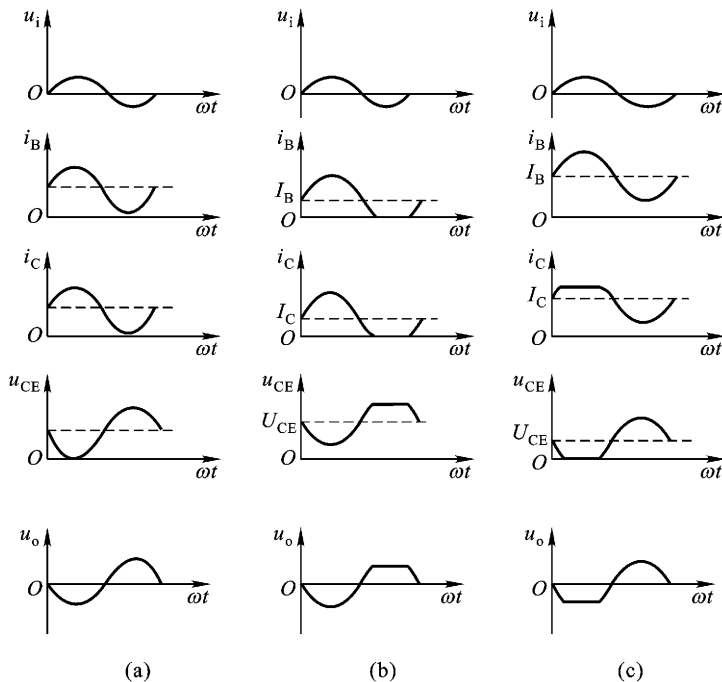


图 5.19 静态工作点对输出信号波形的影响

图 5.19(a)中 R_b 的数值合适,静态工作点 Q 合适, u_o 波形正常。

图 5.19(b)中 R_b 的数值调得过大, I_{BQ} 过小,即静态工作点 Q 过低,输出信号 u_o 正半周削顶,这一失真称为截止失真。造成截止失真的原因是因为晶体管输入特性曲线 U_{BE} 的死区电压和非线性的缘故,使得输入信号 u_i 的负半周有一部分进入了截止状态。

图 5.19(c)中 R_b 的数值调得过小, I_{BQ} 过大,即静态工作点 Q 过高,输出信号 u_o 负半周削底,这种失真称为饱和失真。这是因为静态工作点 Q 过高,使得集电极电流 i_C 在放大输入信号正半周时,有一部分已进入饱和状态。

由此可见,如果放大器输出信号出现削顶或削底的情况,则表明静态工作点选择不当,可以通过调节 R_b 的大小来获得合适的静态工作点,消除失真。

(2) 静态工作点的计算

对小信号放大电路的静态工作点可以用估算法来进行计算。对直流,耦合电容 C_1 和 C_2 可以看成是断开的,由此可得图 5.16(b)所示电路的静态工作点的计算公式

$$I_{BQ} = \frac{U_{CC} - U_{BEQ}}{R_b} \quad (5.6)$$

由于硅管的 U_{BEQ} 为 0.7 V, 锗管的 U_{BEQ} 为 0.3 V, 因而可以忽略, 所以有

$$I_{BQ} \approx \frac{U_{CC}}{R_b} \quad (5.7)$$

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} \quad (5.8)$$

$$U_{CEQ} = U_{CC} - R_C I_{CQ} \quad (5.9)$$

例 5.1 在图 5.16(b)所示的电路中, 设 $U_{CC} = 12$ V, $R_C = 3$ k Ω , $R_b = 300$ k Ω , $\beta = 50$, 求放大电路的静态工作点。

解

$$I_{BQ} \approx \frac{U_{CC}}{R_b} = \frac{12}{300 \times 10^3} \text{ A} = 0.04 \times 10^{-3} \text{ A} = 0.04 \text{ mA}$$

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} = 50 \times 0.040 \text{ mA} = 2.0 \text{ mA}$$

$$U_{CEQ} = U_{CC} - R_C I_{CQ} = 12 - 2.0 \times 10^{-3} \times 3 \times 10^3 \text{ V} = 6.0 \text{ V}$$

4. 放大电路的主要技术指标

放大电路的技术指标有电压放大倍数、电流放大倍数、输入电阻、输出电阻等, 它们可定量描述放大电路有关的技术性能。这些技术指标可以通过对放大电路的测试得到, 也可以通过估算等方法来得到。

(1) 主要技术指标

① 放大倍数。放大倍数是描述放大电路放大能力的指标, 有电压放大倍数 A_u 、电流放大倍数 A_i 和功率放大倍数 A_p 。

电压放大倍数是输出电压的变化量与输入电压的变化量之比, 也可以用有效值之比来表示, 即

$$A_u = \frac{U_o}{U_i} \quad (5.10)$$

电流放大倍数是输出电流的变化量与输入电流的变化量之比, 也可以用有效值之比来表示, 即

$$A_i = \frac{I_o}{I_i} \quad (5.11)$$

功率放大倍数是输出的功率 P_o 与输入功率 P_i 之比, 即

$$A_p = \frac{P_o}{P_i} = \frac{U_o I_o}{U_i I_i} = A_u A_i \quad (5.12)$$

② 增益。当放大倍数用对数的形式表示时, 称为增益 G , 通常用分贝(dB)作单位来表示增益的大小, 即

$$\text{电压增益} \quad G_u = 20 \lg A_u (\text{dB}) \quad (5.13)$$

$$\text{电流增益} \quad G_i = 20 \lg A_i (\text{dB}) \quad (5.14)$$

$$\text{功率增益} \quad G_p = 10 \lg A_p (\text{dB}) \quad (5.15)$$

③ 输入电阻。当输入信号加到放大电路的输入端时, 放大电路就相当于信号源的负载电阻, 这个负载电阻也就是放大电路的输入电阻, 它定义为输入电压的变化量与输入电流的变化量

之比,也可以用有效值之比来表示,即

$$r_i = \frac{U_i}{I_i} \quad (5.16)$$

放大电路输入电阻 r_i 越大,放大电流从信号源吸取的电流 i_i 就越小,减轻了对信号源的负担,同时 u_i 就越接近 u_s 。通常希望放大电路的输入电阻 r_i 能大一些。

④ 输出电阻。对负载而言,放大电路可以看成是一个内阻为 r_o 的电压源,这个内阻 r_o 就是放大电路的输出电阻。

放大电路输出电阻 r_o 的大小反映了放大电路带负载能力的强弱。 r_o 越小,放大电路带负载的能力就越强,反之就越弱。因此,通常希望放大电路的输出电阻 r_o 小一些。

⑤ 通频带。通频带 BW 是指放大电路在允许波动范围内电压放大倍数对应的频率范围,即放大倍数在高频段 f_H 和低频段 f_L 下降到中频段放大倍数的 0.707 倍的这一频率范围内,如图 5.20 所示。通频带 BW 越宽,表明放大电路对频率的适应能力越强,所以一般希望通频带 BW 能宽一些。

例 5.2 测得某一放大电路的输入电压是 80 mV,输入电流为 0.05 mA,输出电压为 0.8 V,输出电流为 5 mA,求该电路的电压、电流、功率放大倍数和增益。

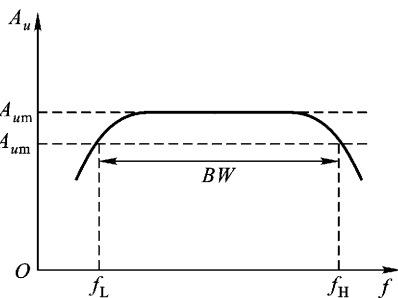


图 5.20 放大电路的通频带

解 电压放大倍数

$$A_u = \frac{U_o}{U_i} = \frac{0.8}{0.080} = 10$$

电流放大倍数

$$A_i = \frac{I_o}{I_i} = \frac{5}{0.05} = 100$$

功率放大倍数

$$A_p = A_u A_i = 10 \times 100 = 1\,000$$

电压增益

$$G_u = 20 \lg A_u = 20 \lg 10 = 20 \text{ dB}$$

电流增益

$$G_i = 20 \lg A_i = 20 \lg 100 = 40 \text{ dB}$$

功率增益

$$G_p = 10 \lg A_p = 10 \lg 1\,000 = 30 \text{ dB}$$

(2) 输入电阻、输出电阻和放大倍数的估算

对小信号放大电路,输入电阻、输出电阻和电压放大倍数可以采用估算法来进行计算,对如图 5.16(b)所示的共发射极电路,估算如下。

放大电路的输入电阻 r_i 近似等于晶体管的输入电阻 r_{be} ,即

$$r_i \approx r_{be} \quad (5.17)$$

晶体管的输入电阻 r_{be} 与它的电流放大系数 β 及发射极电流 I_E 有关,一般在低频小信号工作时 r_{be} 为几百欧到几千欧。

放大电路的输出电阻 r_o 等于集电极负载电阻 R_c ,即

$$r_o = R_c \quad (5.18)$$

放大电路的电压放大倍数为

$$A_u = -\beta \frac{R'_L}{r_{be}}, \quad R'_L = R_c \parallel R_L \quad (5.19)$$

式中, β ——晶体管的电流放大系数;

r_{be} ——晶体管的输入电阻;

R_c ——集电极负载电阻;

R_L ——负载电阻。

式中的负号表示输出电压与输入电压反相。

如果放大电路未接负载电阻 R_L , 则 $R'_L = R_c$ 。不带负载的电压放大倍数为

$$A'_u = -\beta \frac{R_c}{r_{be}} \quad (5.20)$$

从式(5.19)和(5.20)可以看出, 不接负载比接负载的电压放大倍数大, 负载 R_L 越小, 则电压放大倍数越小。

同时, 电压放大倍数 A_u 还与 β 、 r_{be} 和 R_c 有关。但 β 和 R_c 过分增大时, 会影响放大电路的其他性能。因为 β 太大的管子性能不稳定, R_c 增大会影响输出信号的幅度, 形成失真。另外, r_{be} 与 β 、 I_E 有关, 在 β 一定时, 只要把 I_E 稍增大一些, r_{be} 就会减小, 使电压放大倍数在一定范围内有明显的提高, 但 I_E 的增大是有限制的。

例 5.3 图 5.16(b) 所示的固定偏置电路中, $U_{CC} = 12\text{ V}$, 晶体管的电流放大系数 $\beta = 50$, $r_{be} = 1.2\text{ k}\Omega$, $R_b = 300\text{ k}\Omega$, $R_c = 3\text{ k}\Omega$, $R_L = 3\text{ k}\Omega$ 。试求 (1) 接入负载 R_L 与未接负载 R_L 的电压放大倍数 (2) 放大电路的输入电阻和输出电阻。

解 (1) 未接负载 R_L 的电压放大倍数

$$A_{uo} = -\beta \frac{R_c}{r_{be}} = -50 \times \frac{3}{1.2} = -125$$

接入负载 R_L 的电压放大倍数

$$R'_L = R_c \parallel R_L = \frac{3 \times 3}{3 + 3} \text{ k}\Omega = 1.5 \text{ k}\Omega$$

$$A_u = -\beta \frac{R'_L}{r_{be}} = -50 \times \frac{1.5}{1.2} = -62.5$$

(2) 输入电阻 $r_i \approx r_{be} = 1.2\text{ k}\Omega$

输出电阻 $r_o = R_c = 3\text{ k}\Omega$

5. 分压式偏置放大电路

晶体管对温度是十分敏感的, 当温度上升, 会影响晶体管的一些参数变化, 从而导致集电极电流 I_C 增大, 静态工作点的升高还将使输出信号的波形失真。因此, 必须保证静态工作点的稳定, 最常用的有分压式偏置放大电路, 如图 5.21 所示。

(1) 电路组成

分压式偏置放大电路与固定偏置电路的区别主要

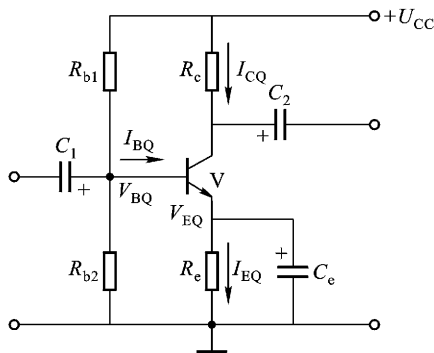


图 5.21 分压式偏置放大电路

有两点:一是由 R_{b1} 和 R_{b2} 构成分压式偏置电路。选择合适的 R_{b1} 、 R_{b2} 阻值,可使晶体管的基极电位 V_{BQ} 基本不受温度变化的影响。二是引入了发射极电阻 R_e 和旁路电容 C_e 。由于发射极接了电阻 R_e ,使得晶体管发射极电位 V_{EQ} 升高,发射结电压 U_{BEQ} 将跟随 V_{EQ} 变化。但同时交流分量也会在 R_e 上产生交流压降,使加在发射结上的交流分量 u_{be} 减小,因而会降低电路的电压放大倍数。为此,在 R_e 两端并联电容 C_e 。当 C_e 的容量较大时,它对交流信号可视为短路,对直流分量却无影响,所以 C_e 称为发射极交流旁路电容(简称旁路电路)。

(2) 稳定静态工作点的过程

当环境温度升高时,使集电极电流 I_{CQ} 增大。因为发射极电流 $I_{EQ} = I_{BQ} + I_{CQ} \approx I_{CQ}$,发射极电位 $V_{EQ} = R_e I_{EQ}$,则 I_{EQ} 增大,并引起 V_{EQ} 也增大。由于晶体管的基极电位 V_{BQ} 为 R_{b1} 和 R_{b2} 的分压偏置电路所固定,因而发射结电压 U_{BEQ} 就减小,从而因引起基极电流 I_{BQ} 减小而使集电极电流 I_{CQ} 下降。这样,集电极电流的增加受到抑制,稳定了静态工作点。其过程可用符号表示

$$T \uparrow \rightarrow I_{CQ} \uparrow \rightarrow I_{EQ} \uparrow \rightarrow V_{EQ} \uparrow \rightarrow U_{BEQ} \downarrow \rightarrow I_{BQ} \downarrow \rightarrow I_{CQ} \downarrow$$

5.2.2 射极输出器

晶体管组成的放大电路,除了有共发射极接法外,还有共集电极和共基极两种接法,其中共集电极电路的应用较广泛。

1. 电路的组成

图 5.22 是共集电极放大电路。由于电源对交流信号可以视为短路,所以交流信号从基极和集电极输入,从发射极和集电极输出,集电极是输入、输出回路的共同端,故称为共集电极电路。因为该电路的输出信号从发射极引出,所以又称为射极输出器。

2. 射极输出器的特点

(1) 电压放大倍数

分析射极输出器的电路图,可以得出输出电压 u_o 和输入电压 u_i 的关系

$$u_o = u_i - u_{be}$$

因为 u_{be} 很小,可以忽略,因此 $u_o \approx u_i$ 。所以,射极输出器的放大倍数总是小于 1,且接近 1,即 $A_u \approx 1$ 。同时,射极输出器的输出电压和输入电压相位相同,因此又称射极输出器为射极跟随器。

虽然,射极输出器的放大倍数总是略小于 1,但射极输出器却有较大的电流放大能力,这是因为发射极电流是基极电流的 $(1 + \beta)$ 倍,所以输出电流比输入电流大得多。

(2) 输入电阻

射极输出器的输入电阻较高,一般为几十至几百千欧,比共发射极电路的输入电阻大几十至几百倍。

(3) 输出电阻

射极输出器的输出电阻很小,一般只有几十欧。比共发射极电路的输出电阻小得多。

射极输出器的应用十分广泛。由于它的输入电阻高,可以减小放大电路从信号源所吸取的电流,所以可用它作多级放大器的输入级。例如:用于测量的放大电路,为了减小仪器接入时对

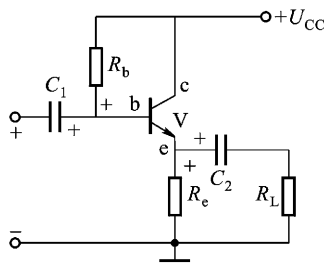


图 5.22 射极输出器

被测电路产生的影响,就要求有较高的输入电阻,常用射极输出器作为输入极。射极输出器输出电阻低,则带负载的能力强,因此常用作多级放大电路的输出级。有时还将射极输出器接在两级共发射极电路的中间,起到阻抗变换的作用。因为它的高输入电阻对前级的影响很小,它的低输出电阻又与后级输入电阻低的共发射极电路正好配合,此时的射极输出器称为缓冲级或中间隔离级。

5.2.3 多级放大电路

用单级放大电路组成的放大器,其电压放大倍数一般只能达到几十倍,而通常放大器的输入信号都很微弱,因此常需要把若干个放大电路串接起来,图 5.23 是多级放大电路的框图。

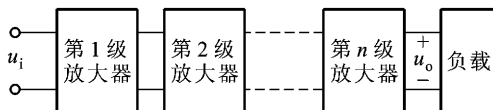


图 5.23 多级放大电路的框图

1. 多级放大电路的级间耦合方式

多级放大电路的级与级之间的连接方式称为耦合方式。常见的耦合方式有三种:阻容耦合、变压器耦合和直接耦合,分别如图 5.24(a)(b)(c)所示。由于图 5.24(b)所示的变压器耦合在放大电路中的应用逐渐减少,所以仅介绍阻容耦合和直接耦合。

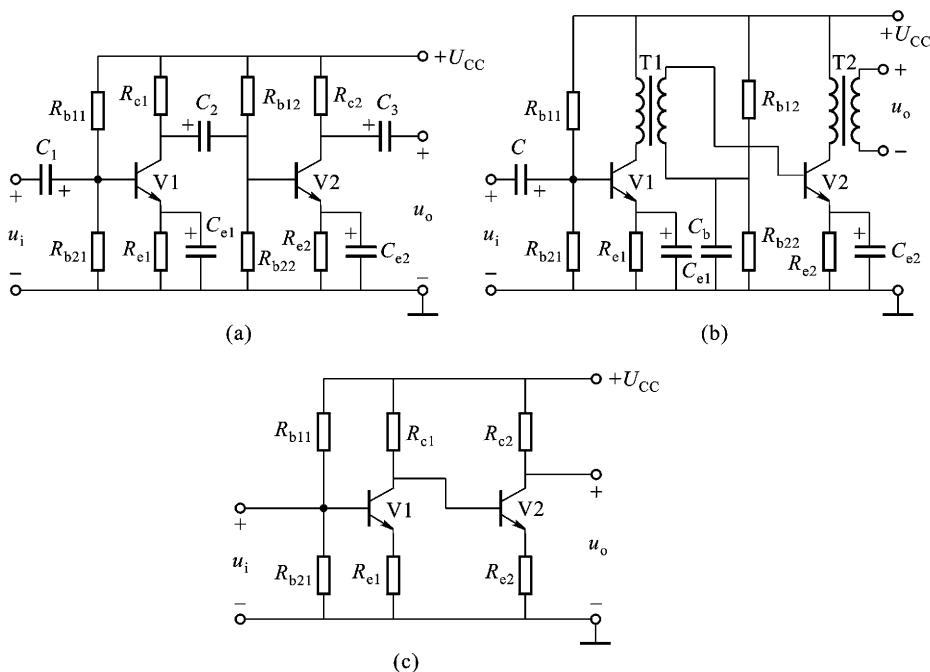


图 5.24 多级放大电路的三种耦合方式

(1) 阻容耦合

阻容耦合是指级与级之间通过电阻和电容元件相连接的方式,图 5.24(a)是两个单级放大电路通过电容 C_2 和基极分压式偏置电阻 $R_{b12} // R_{b22}$ 来耦合的。这种耦合方式的特点是:由于耦合电容的隔直作用,各级静态工作点相互独立,互不影响,但只能传递交流信号,所以一般在多级分立元件的交流放大电路中得到广泛应用,集成电路无法采用。

(2) 直接耦合

直接耦合是指前级的输出端直接通过电阻接到下级的输出端的连接方式,如图 5.24(c)所示。直接耦合的特点是:既能传递交流信号,也能传递缓慢变化的信号和直流信号,更重要的是这种耦合方式便于集成化制造。其缺点主要为:前后级的静态工作点相互影响和存在零点漂移。

2. 多级放大电路的电压放大倍数和输入、输出电阻

(1) 多级放大电路的电压放大倍数

多级放大电路总的电压放大倍数等于各级电压放大倍数的乘积,即

$$A_u = A_{u1} \cdot A_{u2} \cdot \dots \cdot A_{un} \quad (5.21)$$

由于多级放大电路后一级的输入电阻就是前一级的负载电阻,所以每一级的电压放大倍数受前后级之间的相互影响。

(2) 输入电阻和输出电阻

多级放大电路的输入电阻 r_i 等于第一级的输入电阻 r_{i1} ,即

$$r_i = r_{i1} \quad (5.22)$$

多级放大电路的输出电阻 r_o 等于最后一级的输出电阻 r_{on} ,即

$$r_o = r_{on} \quad (5.23)$$

5.2.4 负反馈放大电路

前面介绍的几种放大电路是由输入信号的变化去控制输出信号的变化,但在几乎所有实用的放大电路中,又常常从输出端取出部分输出信号回送到输入端,来改善放大电路的性能或在自动控制系统中实现自动调节。

1. 反馈

把放大电路输出量(电压或电流)的一部分或全都通过一定的元件或网络回送到输入端的过程,称为反馈。传送反馈信号的元件或网络的电路称为反馈电路,它一般由电阻、电容等元件组成。含有反馈的放大电路称为闭环放大电路或反馈放大电路。

图 5.25 是反馈电路的方框图,从输出端引出的反馈信号回送到输入端,与外加的输入信号共同参与对放大电路的控制。当反馈信号起到增强输入信号作用时,这种反馈称为正反馈;当反馈信号起到削弱输入信号作用时,这种反馈称为负反馈,本节主要讨论负反馈。

2. 负反馈的判别

电路中的反馈是正反馈还是负反馈,通常采用瞬时极性法来判别。设放大电路输入端的输入信号瞬时变化,用“+”号表示上升,用“-”表示下降。沿输入信号经过放大电路放大、传输的



图 5.25 反馈放大电路方框图

途径和输出信号经过反馈电路回输的途径,在各作用点上标出瞬时电位的变化方向(仍以“+”表示上升;“-”表示下降),最后得出反馈信号是削弱还是增强放大电路的净输入。如果反馈信号削弱了净输入量,则是负反馈;反之为正反馈。

例 5.4 判别图 5.26(a)、(b)两电路中,反馈元件 R_f 引进的是否为负反馈?

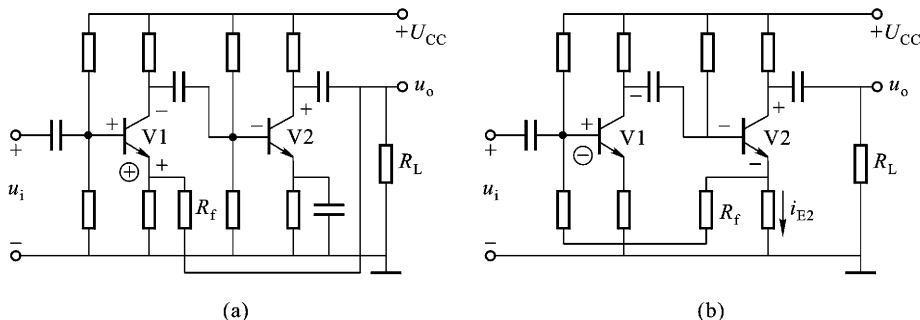


图 5.26 例 5.4 电路图

解 瞬时极性法判别:对图 5.26(a),设某一瞬时,输入信号极性为“+”,标在晶体管 V1 的基极上,然后依次在晶体管 V1 和 V2 各极上标出瞬时电位变化的方向:V1 的集电极为“-”,V2 的基极为“-”,V2 集电极为“+”。反馈信号经 R_f 送到 V1 的发射极为“⊕”(“⊕”或“⊖”来表示回送反馈信号后的电位变化方向,以区别于“+”或“-”)。反馈信号使晶体管 V1 发射极瞬时升高, μ_{BE} 就变小,则表示净输入量削弱,所以为负反馈。

同理,在图(b)上标出瞬时极性,反馈信号使晶体管 V1 基极的电位瞬时降低,则削弱了净输入,所以也是负反馈。

3. 负反馈对放大电路性能的影响

① 负反馈降低了放大电路的放大倍数,但提高了放大电路的稳定性。放大电路未加负反馈的放大倍数称为开环放大倍数,放大电路加了负反馈后的放大倍数称为闭环放大倍数。闭环放大倍数比开环放大倍数小,闭环放大倍数的大小跟开环放大倍数以及反馈系数 F 有关。反馈系数是反馈信号与输出信号的比值,反映了反馈量的大小。反馈系数愈大,表示反馈量愈大,则负反馈作用愈强,闭环放大倍数就愈小,电路的稳定性就愈好。在深度负反馈时,闭环放大倍数仅与反馈系数 F 有关,而与开环放大倍数无关。

由于反馈系数与反馈电路的参数(如电阻和电容)有关,它受外界因素的影响很小,因而闭环放大电路的放大倍数十分稳定。

② 减小了波形失真。用示波器观察加了负反馈的放大电路,会发现输出波形的失真程度比未加负反馈时减轻了。这是因为引入了负反馈后,输出端的失真信号回送到输入端,与输入信号相减,经过放大后,即可使输出信号的失真得到了一定程度的补偿,从而减小了波形失真。

③ 展宽道频带。放大电路加了负反馈后,道频带展宽了。这是因为反馈信号随着频率升高或降低而减小,净输入信号由此而增大,使输出信号自动提高。

④ 改变放大电路的输入、输出电阻。负反馈在输入端连接方式的不同和反馈信号在输出端取得方式的不同(即反馈类型的不同),会改变了放大电路输入、输出电阻的大小,使它们增大或减小。由于本节篇幅有限,不讨论反馈类型,请读者参考有关书籍。

5.2.5 差分放大电路

在自动化控制系统中,常要把一些变化缓慢的信号或直流信号进行放大(例如温度、速度的变化通过传感器转变为相应的电信号),这就只能采用直接耦合的放大电路。

1. 零点漂移

将一个直接耦合的多级放大电路的输入端短路,测其输出电压,发现不为零,而且在缓慢地、无规则地变化着,这种现象称为零点漂移,如图 5.27 所示。

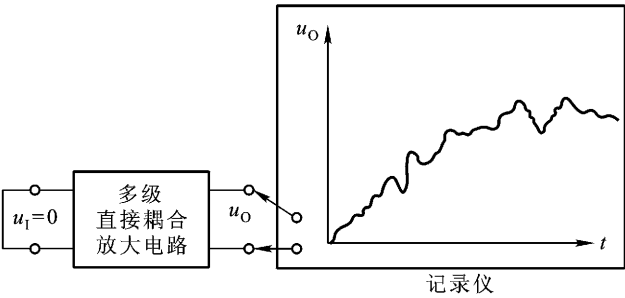


图 5.27 直接耦合的零点漂移

这种偏离原来的起始值作上下漂移的输出电压,其实是一个“假信号”,它对输入信号的放大是一种干扰,可致使放大电路无法工作。引起零点漂移的原因很多,如温度的变化、电源电压的波动、电路元件参数的变化等,但最主要的原因是温度的变化。而且在多级放大电路中,第一级的漂移影响最为严重,所以抑制零点漂移的重点是第一级的放大电路。抑制零点漂移最有效的电路是差分放大电路。

2. 差分放大电路的特点

差分放大电路有多种形式的电路结构,图 5.28 是典型的差分放大电路,也称为双端输入、双端输出的差分放大电路。该电路由两个完全对称的单管电路组成。

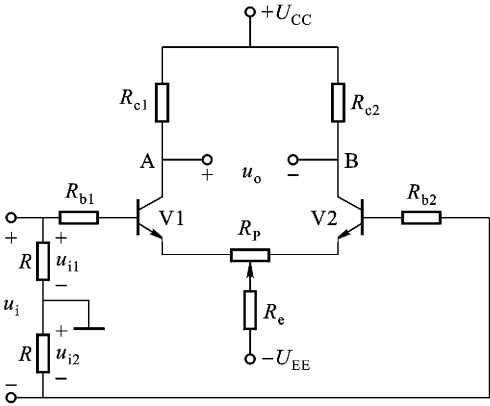


图 5.28 典型差分放大电路

两个晶体管 V1 和 V2 特性相同,由两组电源 $+U_{CC}$ 和 $-U_{EE}$ 供电。电位器 R_p 是调零电阻,因为电路不会完全对称,所以可以通过调节 R_p 来改变 V1 和 V2 的静态工作点,使静态时输出电压

为零。发射极电阻 R_e 主要是稳定电路的工作点,使每个管的漂移都受到削弱。输入信号经 R_1 、 R_2 ($R_1 = R_2$) 分压后,通过 R_{b1} 、 R_{b2} ($R_{b1} = R_{b2}$) 加到两管的基极,输出信号取自两管的集电极。

3. 零点漂移的抑制过程

静态时 $\mu_i = 0$, 输入两管的信号 $u_{i1} = u_{i2} = 0$, 由于电路完全对称, 两管的集电极电流相等, $I_{C1} = I_{C2}$, 集电极电位相等, $V_{C1} = V_{C2}$, 因此, 输出电压 $u_o = V_{C1} - V_{C2} = 0$ 。

当温度升高时, 两管的集电极电流都增大, 且增大的数值相同, $\Delta I_{C1} = \Delta I_{C2}$, 两管的集电极电位都下降, 且下降的数值也相同, $\Delta V_{C1} = \Delta V_{C2}$, 结果输出电压仍然为零, 即

$$u_o = (V_{C1} + \Delta V_{C1}) - (V_{C2} + \Delta V_{C2}) = 0$$

这就说明, 虽然由于温度升高, 每个管子都产生了零点漂移, 但在输出端却相互抵消, 从而完全抑制了零点漂移。

4. 放大倍数及共模抑制比

(1) 差模电压放大倍数 A_{ud}

当给差分放大电路输入信号 u_i 时, 晶体管 V1 和 V2 的基极则分别输入了一对大小相等、方向相反的信号, 且它们的大小都为输入信号 u_i 的一半, 即 $u_{i1} = -u_{i2}$, 这对信号称为差模信号。由于电路完全对称, 可以得出, 对于双端输入、双端输出的差分放大电路, 它的差模放大倍数等于每个单管放大电路的电压放大倍数。

(2) 共模放大倍数 A_{uc}

如果向差分放大电路的两个输入端输入一对大小相等、方向相同的信号, 这一对信号称为共模。差分放大电路对共模信号无放大作用, 其分析方法类同于温度升高时零点漂移的抑制过程, 所以其共模放大倍数 $A_{uc} = 0$ 。

实际的差分放大电路不可能做到两个单管电路完全对称, 所以共模抑制比并不为零, 但是很小。

(3) 共模抑制比 K_{CMR}

为了全面衡量差分放大电路放大差模信号及抑制共模信号的能力, 用共模抑制比来表示。共模抑制比定义为差模放大倍数 A_{ud} 和共模放大倍数 A_{uc} 之比。共模抑制比越大, 则表示差分放大电路的性能越好。

5.2.6 功率放大器

有些负载要求放大器有较大的输出功率才能拖动, 因此在这些多级放大器的最后一级或末前级都要用功率放大电路。功率放大电路和电压放大电路都是将信号放大, 它们的不同之处是前者要求输出有足够大的功率, 因而输入、输出的电压和电流都较大, 是大信号放大器; 后者输入、输出的电压和电流都较小, 是小信号放大器。

1. 功率放大电路的基本要求

① 在失真小的情况下输出尽可能大的功率, 并且有良好的散热措施。

② 由于功率大, 要求效率高。

2. 互补对称功率放大器(OCL)

功率放大电路的种类较多, 图 5.29 是常用的互补对称功率放大电路, 也称为 OCL。

该电路采用两只参数相同、但类别不同的晶体管, 并采用两组正负电源供电。静态时 I_C 等

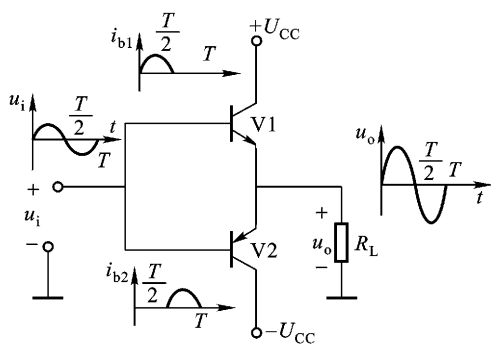


图 5.29 互补对称功率放大电路(OCL)

于 0。动态时,当输入信号 u_i 为正半周时, V1 导通, V2 截止,负载上电流为正半周;当输入信号 u_i 为负半周时, V1 截止, V2 导通,负载上的电流为负半周。V1 和 V2 两只管子轮流导通,使负载上得过一个完整的正弦波。由于该功率放大电路静态时 $I_C = 0$,所以效率较高,其理想的最大效率 $\eta_m = 78.5\%$,考虑到晶体管饱和压降等因素,实际效率略低于这个值。这种功率放大电路也称乙类功率放大电路。乙类功率放大电路的缺点是输出电流 I_o 的波形会在两个晶体管交替工作的时刻产生失真,这种失真称为交越失真。产生交越失真的原因是由于两只晶体管的静态 $U_{BE} = 0$,而晶体管输入特性曲线中存在着死区电压。克服交越失真的方法是将静态工作点略微提高一些,这就是甲乙类功放电路,如图 5.30 所示。

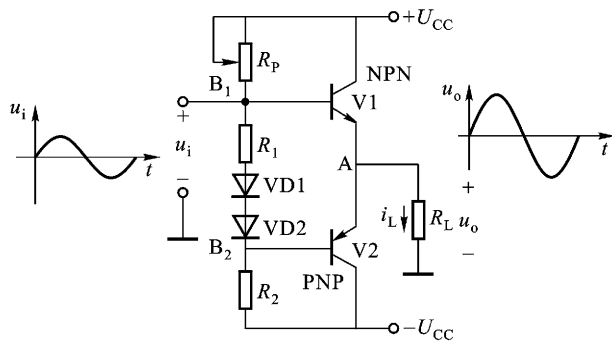


图 5.30 甲乙类互补功放电路

5.3 集成运算放大器

前几节介绍的放大器都是由各个分立的元件组成的,而集成电路是把晶体管、必要的元件以及相互之间的连接同时制造在一块半导体芯片上,形成具有一定电路功能的器件。它与分立元件组成的电路相比,具有体积小、质量轻、功耗低、工作可靠、安装方便而且价格便宜等特点。

集成电路就其集成度而言,有小规模、中规模、大规模和超大规模之分;就其所用器件来分,有双极型(NPN 或 PNP 管)、单极型(MOS 管)和两者兼容的三种类型。

5.3.1 集成运算放大器简介

1. 集成运算放大器

(1) 集成运算放大器的内部结构、外形与符号

集成运算放大器,简称集成运放,是具有高放大倍数的集成电路。它的内部是直接耦合的多级放大器,整个电路可分为输入级、中间级、输出级三部分。输入级采用差分放大电路以消除零点漂移和抑制干扰;中间级一般采用共发射极电路,以获得足够高的电压增益;输出级一般采用互补对称功放电路,以输出足够大的电压和电流,其输出电阻小,负载能力强。目前国产集成运算放大器的外形主要采用圆壳式、双列直杆式、扁平式,它们的外形分别如图 5.31(a)、(b)、(c) 所示。集成运算放大器的符号如图 5.32 所示,它有两个输入端和一个输出端。图中左边的“-”端表示反相输入端;“+”端表示同相输入端,右边的“+”端为输出端。

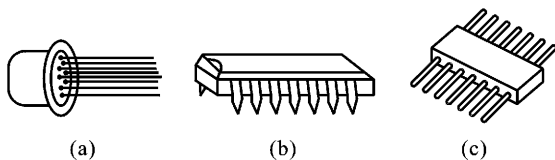


图 5.31 集成电路外形

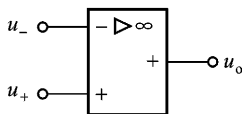


图 5.32 运算放大器的图形符号

(2) 集成运算放大器的主要参数

① 开环电压放大倍数 A_{uo} 。在无外接反馈电路时,输出电压的变化量与输入差模电压变化量之比称为开环电压放大倍数 A_{uo} 。 A_{uo} 越高,运算精度越高,一般 A_{uo} 约为 $10^4 \sim 10^7$ 。

② 差模输入电阻 r_i 。电路开环时,差模输入电压与输入电流之比称为差模输入电阻。 R_i 越大,集成运算放大器的性能越好,它一般在几百千欧至几兆欧。

③ 差模输出电阻 r_o 。电路开环时,输出电压与输出电流之比称为差模输出电阻。 r_o 越小,集成运算放大器带负载能力越强,它一般为几百欧。

④ 输出峰峰电压 U_{opp} 。集成运算放大器空载时的最大不失真电压的峰峰值。

⑤ 输入失调电压 U_{io} 。输入电压为零时,为了使输出电压也为零,必须在输入端加一个很小的补偿电压,它就是输入失调电压。输入失调电压表示电路输入部分不对称的程度。 U_{io} 一般为几毫伏,它的值越小越好。

⑥ 输入失调电流 I_{io} 。输入电压为零时,为使输出电压也为零,必须在输入端加补偿电流,其值为两个输入端静态基极电流之差。

⑦ 共模抑制比 K_{CMR} 。电路开环时,差模放大倍数 A_{ud} 和共模放大倍数 A_{uc} 之比。

其他参数还有输入偏置、静态功耗等,这些参数可以根据集成运算放大器的型号,从产品说明书等有关资料中查阅。

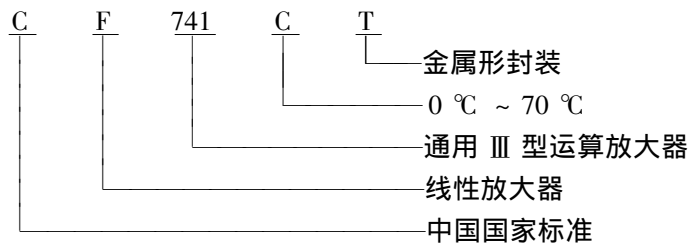
(3) 集成运算放大器的型号及分类

集成运算放大器的型号由五个部分组成,每一个部分的含义见表 5.5。

表 5.5 国标半导体集成电路型号各组成部分的意义

第零部分		第一部分		第二部分	第三部分		第四部分	
用字母表示器件符合国家标准		用字母表示器件的类型		用阿拉伯数字表示器件的系列和品种代号	用字母表示器件的工作温度范围		用字母表示器件的封装	
符号	意义	符号	意义		符号	意义	符号	意义
C	中国 制造	T	TTL		C	0℃~70℃	W	陶瓷扁平
		H	HTL		E	-40℃~85℃	B	塑料扁平
		E	ECL		R	-55℃~85℃	F	全密封扁平
		C	CMOS		M	-55℃~125℃	D	陶瓷直插
		F	线性放大器				P	塑料直插
		D	音响、电视电路				J	黑陶瓷直插
		W	稳压器				K	金属菱形
		J	接口电路				T	金属圆形
		B	非线性电路					
		M	存储器					
		μ	微型机电路					

例如：CF741 CT 各部分的意义为



集成运算放大器产品有通用型和专用型两大类。

① 通用型。性能较好的通用型中 ,常用的有 CF741 等。它们的特点是 :具有很高的最大差模输入电压和最大共模输入电压 ;输出具有短路保护功能 ;电流电压适应范围较广 ;不用外接补偿电容等。

② 专用型：

- a. 高精度型 : $\Delta U_{10}/\Delta T$ 小于 $2\text{ }\mu\text{V}/\text{℃}$ 。
- b. 高输入阻抗型 :差模输入电阻不小于 $10^9\text{ }\Omega$ 。
- c. 高速型 :转换速率应大于 $30\text{ V}/\mu\text{s}$ 。
- d. 高压性 :能输出较高的电压。
- e. 低功耗型 :这类产品要求电源电压 $\pm 15\text{ V}$ 时 ,最大功耗不大于 6 mW 。
- f. 宽带型 :增益带宽较大。

表 5.6 为部分国产集成运算放大器产品的型号及分类 ,供选用时参考。

表 5.6 国产集成运算放大器产品型号及分类

类别		部标型号	国标(草案)	国外同类型号
通用型	I	F001		μ A702
		F002	CF702	μ P051 LM702
	II	F004		BE809
		F003		μ A709
		F005	CF709	μ PC55 LM709
	III	F006		μ A741
		F007	CF741	TA7504
		F008		LM741
专用型	低功耗型	F010		
		F011	CF253	μ PC253
		F012		
		F013		
	高精度型	F030		AD508
		F031		
		F032		
		F033	CF725	μ A725
		F034		
	高速型	F050		μ A772
		F051		
		F052	CF118	LM118
		F054		
		F055	CF715	μ A715
	宽带型	F733		
	高阻型	F072 F3140		CA3140
	高压型	F1536		MC153

2. 理想集成运算放大器

(1) 理想集成运算放大器的条件

- ① 开环电压放大倍数 $A_{uo} \rightarrow \infty$ 。
- ② 差模输入电阻 $r_i \rightarrow \infty$ 。
- ③ 差模输入电阻 $r_o \rightarrow 0$ 。
- ④ 输入信号为零时 ,输出端电位也恒为零。

虽然实际的集成运算放大器达不到上述的理想条件 ,但也与之接近 ,所以分析时常用理想集成运算放大器代替实际的运算放大器 ,这样可以大大简化分析过程。

(2) 集成运算放大器的工作区

集成运算放大器有两个工作区域 ,即线性区和饱和区。集成运算放大器工作在线性区有两个特点 :

① 两个输入端电位相等。由于 $u_o = A_{uo}(u_+ - u_-)$, 运算放大器放大倍数 $A_{uo} \rightarrow \infty$, 输出电压又是一个有限值, 所以有

$$u_+ \approx u_- \quad (5.24)$$

② 两个输入端的电流为零。这是因为 $r_i \rightarrow \infty$, 而 u_i 是一个有限的值, 所以有

$$i_+ = i_- \approx 0 \quad (5.25)$$

5.3.2 信号运算电路

运算放大器工作在线性区时, 其输出电压 u_o 与输入电压 u_i 的关系是线性的, 因此可以应用于信号放大运算和测量等方面。

1. 比例运算电路

(1) 反相比例运算电路

图 5.33 是反相比例运算电路。输入电压 u_i 经输入端电阻 R_1 接入运算放大器的反相输入端, 同相输入端经平衡电阻 R_2 ($R_2 = R_1 // R_f$) 接地, 反馈电阻 R_f 接在输出端和输入端之间。

根据运算放大器工作在线性区的两个特点, 即 $i_- \approx i_+ = 0$ 和 $u_+ \approx u_- = 0$, 可知 $i_1 \approx i_f$, $u_+ \approx u_- = 0$ 。又因为

$$i_1 = \frac{u_i - u_-}{R_1} = \frac{u_i}{R_1}$$

$$i_f = \frac{u_- - u_o}{R_f} = -\frac{u_o}{R_f}$$

由此可知

$$u_o = -\frac{R_f}{R_1} u_i \quad (5.26)$$

上式说明, 反相比例放大器的输出电压与输入电压反相, 大小成比例关系, 其比例关系数仅由运算放大器的外接电路参数决定。

当 $R_f = R_1$ 时, 则得到 $u_o = -u_i$, 这就成了反相器, 反相器的符号如图 5.34 所示。

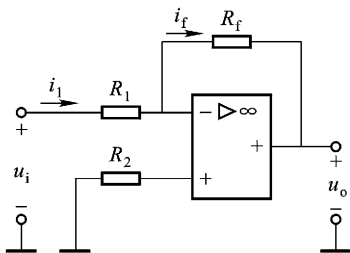


图 5.33 反相比例电路

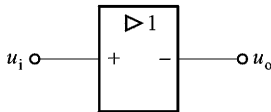


图 5.34 反相器的符号

(2) 同相比例运算电路

图 5.35 是同相比例运算电路, 它与反相比例运算电路的不同之处, 是将输入信号 u_i 接在同相输入端 u_+ 上。同样根据运算放大器的两个特点可以得出

$$u_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) u_i \quad (5.27)$$

上式表明 输出电压 u_o 与输入电压 u_i 同相 且 $u_o > u_i$ 其比例关系与运算放大器本身的参数无关 也只与外接电路的参数有关。

当同相比例运算电路中 R_1 断开 或 $R_f = 0$ 则有 $u_o = u_i$ 这就是电压跟随器 如图 5.36 所示。

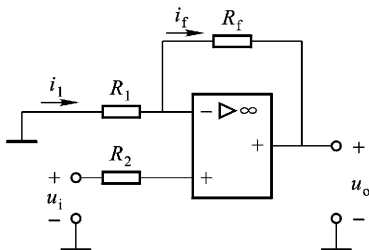


图 5.35 同相比例运算电路

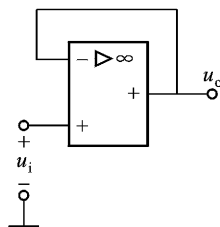


图 5.36 电压跟随器

2. 加法运算电路

如果在反相输入端增加若干输入电路 就构成了反相加法运算电路 如图 5.37 所示 图中平衡电阻 $R_2 = R_{11} // R_{12} // R_{13} // R_f$ 。同样可得输出电压和输入电压的关系

$$u_o = - \left(\frac{R_f}{R_{11}} u_{i1} + \frac{R_f}{R_{12}} u_{i2} + \frac{R_f}{R_{13}} u_{i3} \right) \quad (5.28)$$

当 $R_{11} = R_{12} = R_{13} = R_1$ 时 式(5.28)为

$$u_o = - \frac{R_f}{R_1} (u_{i1} + u_{i2} + u_{i3})$$

当 $R_f = R_1$ 时 有

$$u_o = - (u_{i1} + u_{i2} + u_{i3}) \quad (5.29)$$

3. 减法运算电路

减法运算电路 如图 5.38 所示 当 $R_1 = R_2$ $R_f = R_3$ 时 可得

$$u_o = \frac{R_f}{R_1} (u_{i2} - u_{i1}) \quad (5.30)$$

若 $R_1 = R_2 = R_3 = R_f$ 时 则

$$u_o = u_{i2} - u_{i1} \quad (5.31)$$

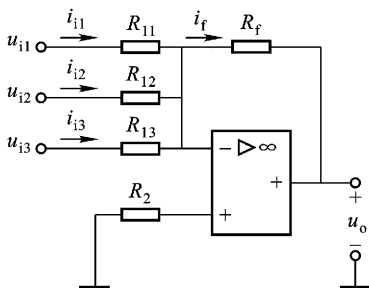


图 5.37 加法运算电路

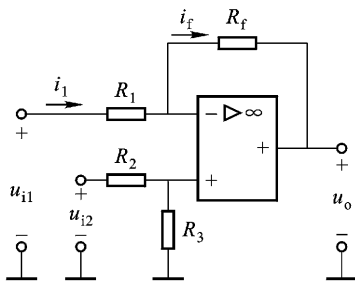


图 5.38 减法运算电路

4. 积分运算电路和 PI 调节器

图 5.39(a) 是积分运算电路, 它与反比例运算电路的结构相似, 不同的是电容 C_f 代替 R_f 作为反馈元件。

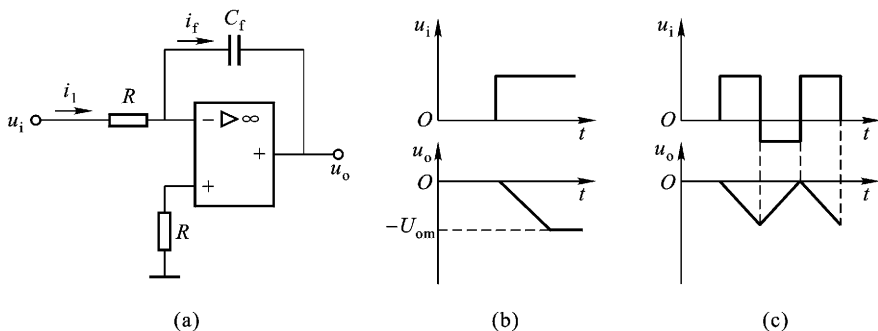


图 5.39 积分运算电路及其波形图

当输入阶跃电压 u_i 时, u_o 随时间线性增加至负饱和值 ($-U_{om}$), 如图 5.39(b) 所示。

当 u_i 为正负极性的方波时 u_o 为三角形波, 如图 5.39(c) 所示。积分电路除用于运算外, 在控制和测量中也得到较广泛的应用。

图 5.40 是将反比例运算和积分运算两者组合起来的电路, 称为比例-积分调节器, 简称 PI 调节器。在自动控制系统中, 需要用这种调节器(或称校正电路)来保证系统的稳定性和控制的精度。

5. 微分运算电路和 PD 调节器

微分运算是积分运算的逆运算, 将图 5.39(a) 积分运算中的反相输入电阻 R_1 和反馈电容 C_f 相互调换位置, 即组成微分运算电路, 如图 5.41(a) 所示。

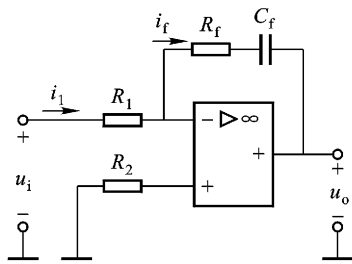


图 5.40 PI 调节器

当输入信号 u_i 为方波时, 输出电压 u_o 为正负相间的尖脉冲电压, 如图 5.41(b) 所示。

将反比例运算和微分运算两者结合起来组成的电路, 称为比例-微分调节器, 简称 PD 调节器, 如图 5.42 所示, 它也用于控制系统中, 使调节过程起加速作用。

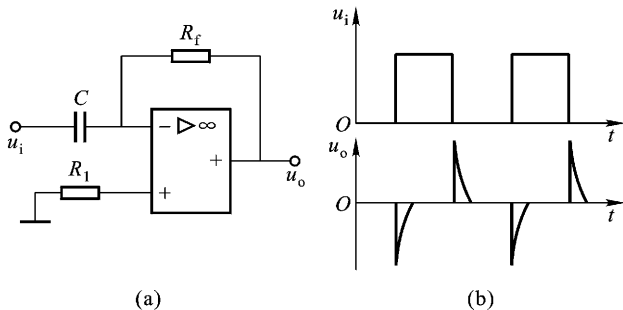


图 5.41 微分运算电路及其波形图

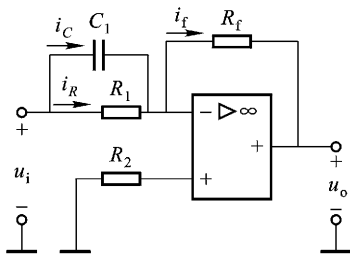


图 5.42 PD 调节器

5.3.3 电压比较器

电压比较器是对输入信号和参考信号进行比较的电路,它在自动控制及自动测量等系统中得到广泛应用。电压比较器与前面介绍的集成运算放大器的应用不同,它是工作在非线性区,即饱和区。这是因为它在开环状态(或外接正反馈)下运行。其开环电压放大倍数很高,因此输入端只要有一个非常微小的电压差值信号,其输出电压会产生跃变,即输出正的或负的最大电压。

1. 简单电压比较器

图 5.43(a)所示的电压比较器, U_R 是参考电压,接在同相输入端,输入信号接在反相输入端,当输入电压大于参考电压时 $u_o = -U_{om}$;当输入电压小于参考电压时 $u_o = +U_{om}$ 。其输出电压和输入电压的关系称为电压比较器的传输特性,如图 5.47(b)所示。

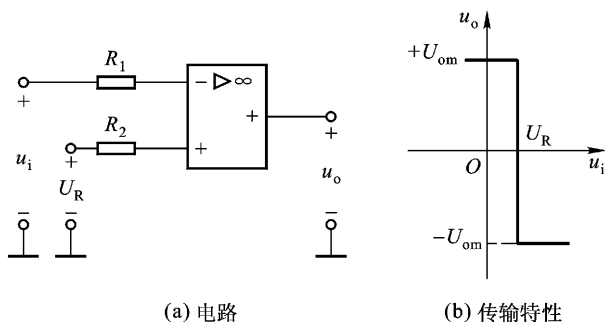


图 5.43 电压比较器

2. 过零比较器

当参考电压 $U_R = 0$ 时,输入电压和零电平比较,这一电路称为过零比较器,其电路和传输特性如图 5.44 所示。当 u_i 为正弦电压时,则 u_o 为矩形波电压,如图 5.45 所示。

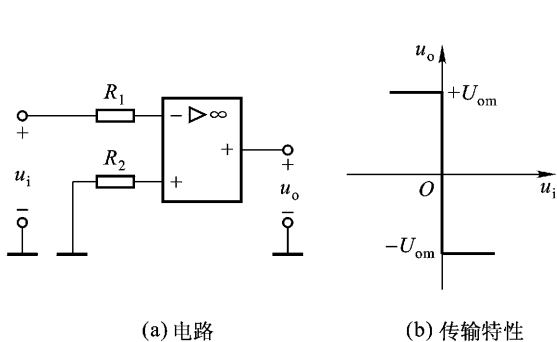


图 5.44 过零比较器

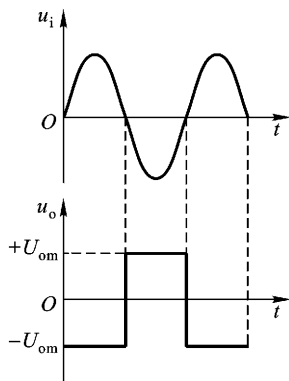


图 5.45 过零比较器将正弦波电压变换为矩形波电压

5.3.4 集成运算放大器的使用常识

1. 调零和消振

集成运算放大器在使用时,要进行调零。这是因为运算放大器内部的参数不可能完全对称,使得输入信号为零时,输出信号不为零。集成运算放大器的调零电路如图 5.46 所示。调零时,应将运算放大器信号的两个输入端短路,调节外接的调零电位器,使输出电压 $u_o = 0$ 。

集成运算放大器的开环电压放大倍数很大,容易引起自激振荡,破坏正常工作。因此,常要加接 RC 消振电路,具体的接法和参数可查阅使用说明书。加接消振电路后,自激振荡是否消除,可将运算放大器的输入端接“地”,用示波器观察输出端有无自激振荡。目前生产的集成运算放大器大部分产品内部已有消振电路,所以无须再加消振电路。

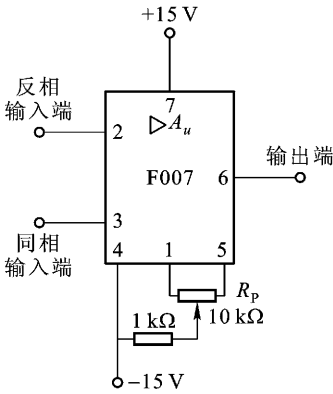


图 5.46 集成运算放大器的调零电路

2. 保护电路

集成运算放大器在使用时,常须加接以下的保护电路,以防止在运行中可能造成的损坏。

(1) 输入端的限幅保护

当输入信号电压过高时,会造成集成运算放大器输入级的晶体管损坏。为避免此种现象的出现,可在输入端接入两个反向并联的二极管,将输入电压限制在二极管正向导通压降的范围之内,如图 5.47(a)所示。

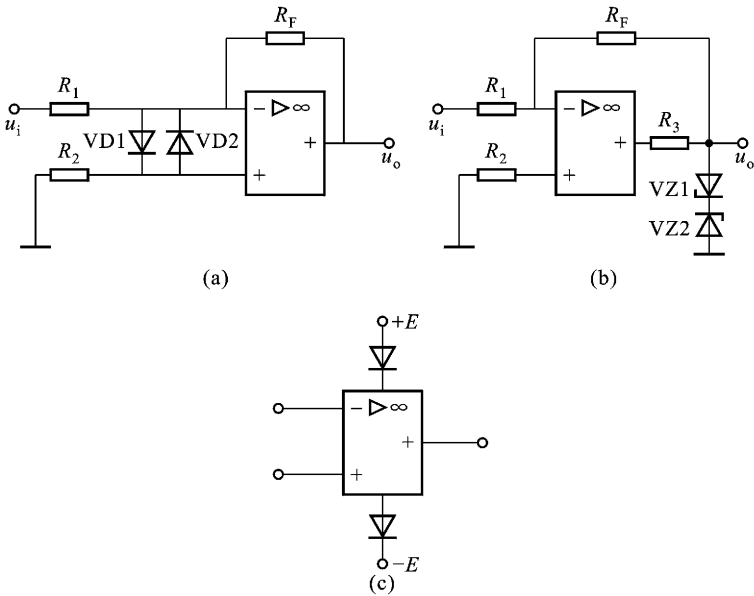


图 5.47 集成运算放大器的保护电路

(2) 输出端限幅保护

为防止输出电压过大,可将两个稳压二极管反向串联后接在集成运算放大器的输出端,使输出电压限制在稳压范围之内,如图 5.47(b)所示。

(3) 电流极性保护

为防止电流极性接反而造成集成运算放大器的损坏,可在电源接线端串入二极管,如图 5.47(c)所示。当电源接反时,二极管处于截止状态,等于电源断路,从而起到保护作用。

5.4 直流稳压电源

当前工农业生产和生活用电都是交流电,但在电解、电镀、直流电动机等场合中,常需要用直流电源供电,尤其在电子仪器和自动控制装置中还需要十分稳定的直流电源。这些直流电源除了采用直流发电机或化学电池外,通常是将电网提供的交流电经过半导体器件转换成直流电源。图 5.48 是半导体直流电源的方框图,它由电源变压器、整流电路、滤波器和稳压电路四部分组成。

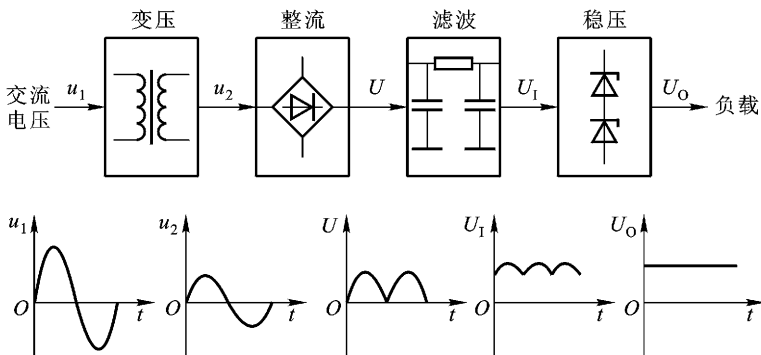


图 5.48 半导体直流电源方框图

电源变压器是将电网供电的 220 V 或 380 V 变换成符合各设备整流所需要的电压。

整流电路是利用具有单向导电性能的整流器件(二极管或晶闸管)将交流电变换成脉动的直流电。

滤波器是将脉动直流电变成较平滑的直流电压,它由电容、电感等储能元件组成。

稳压电路是在电网电压波动和负载变化时,使输出的直流电压保持稳定,不受外界的影响。在对直流电压稳定程度不高的设备中,稳压电路可以不要。

5.4.1 单相整流电路

1. 单相半波整流电路

在小功率直流电源中,经常采用单相半波和单相桥式整流电路。图 5.49(a)是单相半波整流电路,它由变压器 T、二极管 VD 和负载电阻 R_L 组成。

设变压器二次电压为 $u_2 = \sqrt{2}U_2 \sin \omega t$ 。当 u_2 为正半周时(变压器二次侧的极性为上“+”下“-”),二极管 VD 导通,负载电阻 R_L 上有电流流过;当 u_2 为负半周时(变压器二次侧的极性为

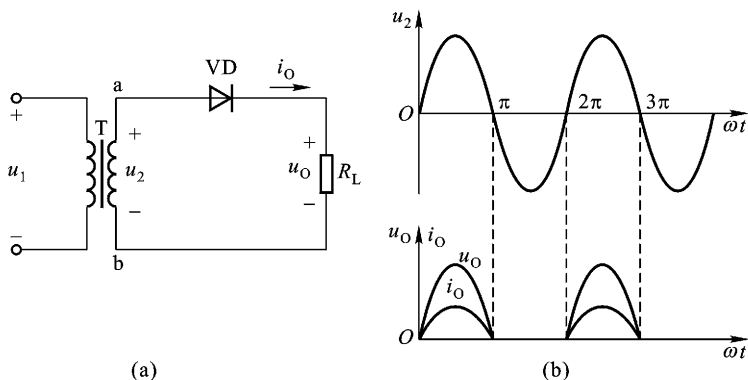


图 5.49 单相半波整流电路及波形图

上“ - ”下“ + ”) 二极管 VD 截止, 负载上无电流。负载电阻 R_L 上的电压 u_O 和电流 i_O 的波形如图 5.49(b) 所示, 由于整流后的 u_O 只有 u_2 的半个波, 所以称为半波整流。

(1) 负载上的直流电压和电流

整流后的直流电压或电流是用它们单向脉动电压或电流的平均值来表示, 因此负载两端的电压 U_O 与变压器二次交流电压有效值 U_2 的关系为

$$U_O = 0.45 U_2 \quad (5.32)$$

流过负载 R_L 上的电流 I_O 为

$$I_O = \frac{U_O}{R_L} = \frac{0.45 U_2}{R_L} \quad (5.33)$$

(2) 整流二极管的选择

流过二极管的电流 I_V 与流过负载上的电流 I_O 相等

$$I_V = I_O = \frac{0.45 U_2}{R_L} \quad (5.34)$$

二极管承受的最高反向电压 U_{RM} 出现在二极管截止时, 它等于 u_2 的最大值, 即

$$U_{RM} = \sqrt{2} U_2 \quad (5.35)$$

I_V 和 U_{RM} 是选择整流二极管的主要依据, 所以选用二极管的最大整流电流和最高反向电压应分别大于以上两个数据。

单相半波整流电路只用一只整流二极管, 电路最简单, 但输出电压脉动大、效率低, 通常用于小功率和要求不高的场合。

2. 单相桥式整流电路

单相桥式整流是全波整流电路, 它能克服单相半波整流电路的缺点, 因而得到了广泛应用。它由四只二极管接成电桥的形式构成, 如图 5.50(a) 所示, 图 5.50(b) 是简化画法。

当 u_2 为正半周时, 整流二极管 VD1 和 VD3 导通, VD2 和 VD4 截止, 电流从 a 流经 VD1、 R_L 、VD3 流向 b 端; 当 u_2 为负半周时, VD1 和 VD3 截止, VD2 和 VD4 导通, 电流从 b 端经 VD2、 R_L 、VD4 流向 a 端, 负载电压 U_O 和电流 I_O 的波形如图 5.51 所示。

(1) 负载上的直流电压和电流

从波形图上可知, 负载两端的直流电压应比半波的增大一倍, 即

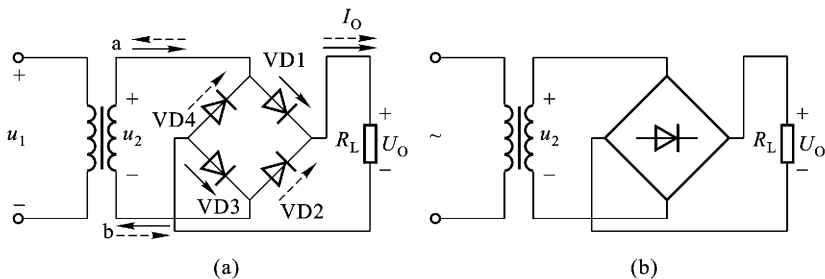


图 5.50 单相桥式整流电路

$$U_0 = 0.9 U_2 \quad (5.36)$$

流过负载的电流为

$$I_0 = \frac{U_0}{R_L} = \frac{0.9 U_2}{R_L} \quad (5.37)$$

(2) 整流二极管的选择

在电流的一个周期内,每只二极管只有一半时间导通,所以流过二极管的电流只是负载电流的一半,为

$$I_V = \frac{1}{2} I_0 = \frac{0.45 U_2}{R_L} \quad (5.38)$$

每只二极管承受的最高反向电压与半波整流相同,为

$$U_{RM} = \sqrt{2} U_2 \quad (5.39)$$

依据 I_V 和 U_{RM} 就可以选择桥式全波整流的二极管,方法与前面所述的相同。

将整流二极管组合,就构成半桥或全桥整流堆,常见的有 2CQ 型半桥堆和 QL 型全桥堆,它们的内部结构和外型分别如图 5.52(a)、(b)所示。

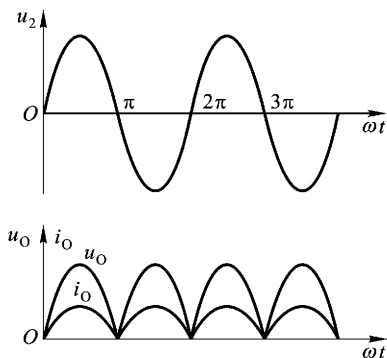


图 5.51 单相桥式整流电路波形图

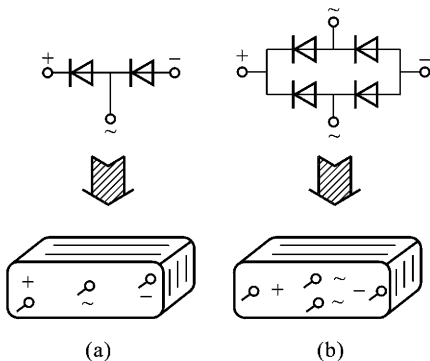


图 5.52 半桥和全桥整流堆

例 5.5 有一个直流负载,负载电阻 $R_L = 15 \Omega$ 、负载电流 $I_0 = 4 \text{ A}$ 。若采用单相桥式整流电路,交流电压为 220 V ,求(1)如何选择整流二极管?(2)电源变压器的变压比及容量。

解 (1) 负载电压

$$U_0 = R_L I_0 = 15 \times 4 \text{ V} = 60 \text{ V}$$

$$U_2 = \frac{U_0}{0.9} = \frac{60}{0.9} \text{ V} \approx 66.7 \text{ V}$$

流过每只二极管的平均电流

$$I_V = \frac{I_0}{2} = \frac{4}{2} \text{ A} = 2 \text{ A}$$

每只二极管承受的最高反向电压

$$U_{RM} = \sqrt{2}U_2 = 1.41 \times 66.7 \text{ V} \approx 94 \text{ V}$$

查阅晶体管手册,可选用整流电流为 3 A,最高反向电压为 100 V 的 2CZ12A 整流二极管 4 只。

(2) 变压器的变压比

$$K = \frac{U_1}{U_2} = \frac{220}{66.7} = 3.3$$

变压器二次电流的有效值

$$I_2 = \frac{I_0}{0.9} = \frac{4}{0.9} \text{ A} = 4.4 \text{ A}$$

变压器的容量

$$S = U_2 I_2 = 66.7 \times 4.4 \text{ V} \cdot \text{A} = 293 \text{ V} \cdot \text{A}$$

在选用变压器时,还应考虑变压器的效率,因此实际容量比上面的数值要大。

5.4.2 滤波器

经过整流电路输出的直流电压都是单向脉动电压。对电镀、蓄电池等设备用这种电压供电是允许的,但在大多数电子设备或自动控制中,必须在整流电路上加接滤波器。滤波器能改善输出电压的脉动成分,使输出电压变得较为平滑。

1. 电容滤波器

电容滤波器就是一个并联在负载两端的电容器,如图 5.53(a)所示。图 5.53(b)是接有电容滤波器的半波整流电路输出电压 u_o 的波形,虚线部分是不接滤波电容时的输出电压波形。

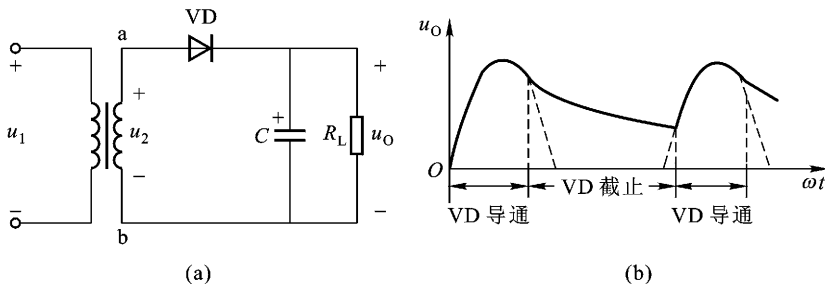


图 5.53 接有电容滤波器的单相半波整流电路及波形图

从波形图上可以看出接上电容 C 后,二极管导通时,电压既向负载 R_L 供电,又对电容充电。当电容 C 两端的电压大于 U_2 时,二极管就承受反向电压截止,电容 C 对负载 R_L 放电。由于电容的充放电作用,使得输出电压 U_o 的波形比较平坦,可见电容器具有滤波作用。

电容滤波的特点是电路简单,输出电压 U_0 较高,半波整流时 $U_0 = U_2$,全波整流时为 $U_0 = 1.2U_2$,但输出电压 U_0 随负载电流的增大会迅速减小,带负载能力差,因而适用于负载电流较小并且变化也较小的场合。

滤波电容 C 一般采用电解电容器,数值视负载电流的大小而定,在几十至几千微法之间。电容器的耐压应大于实际工作时承受的最大电压。必须注意,加了电容滤波后,半波整流二极管承受的最高电压增大了,应为 $2\sqrt{2}U_2$,但桥式整流的二极管承受的最高反向电压不变。

2. 电感滤波器

电感滤波器是在整流电路的输出端与负载之间串入一个带有铁心的电感,如图 5.54 所示。它是利用电感直流电阻小、交流阻抗大的特性来进行滤波的。电感一般取几亨到几十亨,其数值越大,滤波效果越好,其缺点是体积和质量大、成本高。电感滤波器运用于负载电流大并且经常变化的场合。

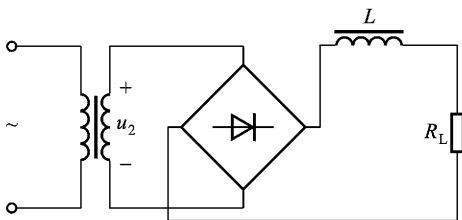


图 5.54 接有电感滤波器的桥式整流电路

3. 复式滤波器

将电容和电感或电阻组合起来,就组成了复式滤波器,其滤波效果好于单独使用的电容或电感滤波。常见的复式滤波器有 LC 滤波器、 π 形 LC 滤波器、 π 形 RC 滤波器等,分别如图 5.55 (a)、(b)、(c)所示。

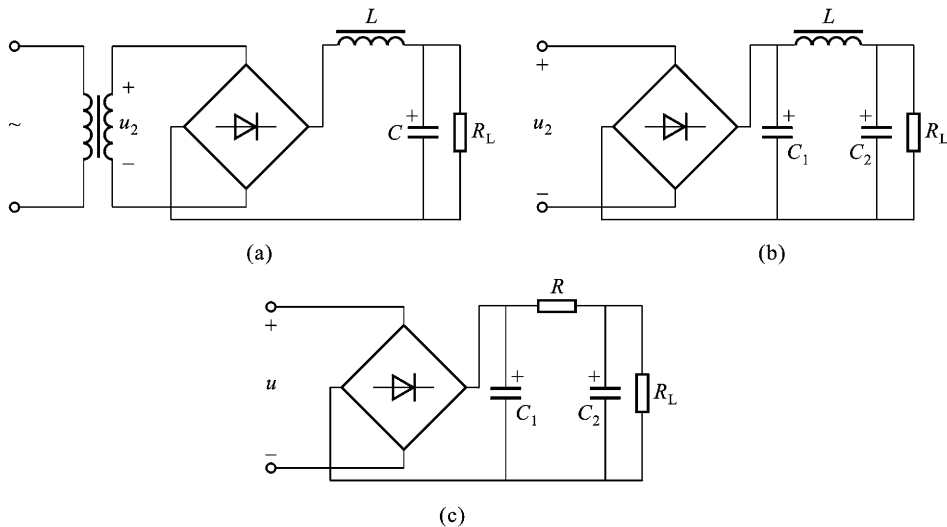


图 5.55 常见的带有复式滤波器的整流电路

5.4.3 稳压电路

经过整流及滤波后的直流电压和稳定的直流电压还是有相当大的差距,这是因为当电网电压波动、负载变化或温度变化时,输出的直流电压也会变化。为了能够提供更加稳定的直流电压,就要在整流滤波电路的后面增加稳压电路,常用的稳压电路有稳压二极管稳压电路、串联型稳压电路等。

1. 稳压二极管稳压电路

图 5.56 是最简单的稳压二极管稳压电路,它由稳压二极管 V_Z 和限流电阻 R 组成,稳压电路的输出电压 U_O 就是稳压二极管 V_Z 的稳定电压 U_Z 。

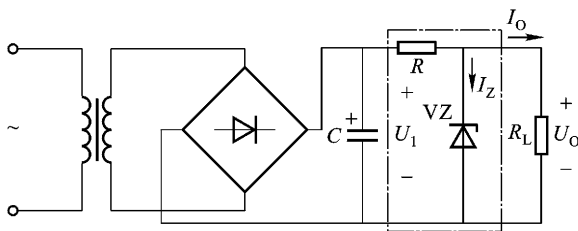


图 5.56 稳压二极管稳压电路

当电网电压或负载 R_L 变化而引起 U_O 增大时,稳压二极管的电流 I_Z 就会增大,导致流过电阻 R 上的电流 I_R 增大,使 R 上的降压 U_R 也增大,从而抑制了 U_O 的升高,使 U_O 保持近似不变。如果因电网电压或负载 R_L 的变化而引起 U_O 减小时,其稳压过程与上述相反。

稳压二极管稳压电路结构简单,但输出电流较小,输出电压不能调节(由稳压二极管的型号决定),稳压性能也较差,仅适用于稳压要求不高的场合。

2. 串联型稳压电路

图 5.57 是典型的串联型稳压电路。图中 R_1 、 R_2 和 R_p 组成采样电路,其实是一个分压器,它的作用是从输出端取出一部分采样电压作为晶体管 V_2 的基极电位 V_{B2} 。稳压二极管 V_Z 和 R_3 组成基准电路,稳压二极管 V_Z 的稳定电压 U_Z 作为基准电压,加在晶体管 V_2 的发射极上。晶体管 V_2 组成比较放大电路,它的基极-发射极电压 U_{BE2} 就是 V_{B2} 与 U_Z 比较后的差值,经过 V_2 放大后,去控制 V_1 的基极电位 V_{B1} 。晶体管 V_1 是调整管,它的集电极-发射极和负载串联,因此称为串联型稳压电路。调整管 V_1 的 U_{CE1} 的变化受其基极电位 V_{B1} 的控制,从而起到稳定输出电压 U_O 的作用。电阻 R_4 既是调整管 V_1 的基极偏置电阻,又是比较放大管 V_2 的集电极负载电阻。

当电网电压降低或负载电阻减小而使输出电压 U_O 有下降趋势时,稳压电路的自动调整过程可简单表示如下:

$$U_O \downarrow \rightarrow V_{B2} \downarrow \rightarrow V_{CE2} \uparrow \rightarrow V_{B1} \uparrow \rightarrow U_{BE1} \uparrow \rightarrow U_{CE1} \downarrow \rightarrow U_O \uparrow$$

如果电网电压升高或负载电阻增大而引起输出电压 U_O 升高时,其自动调整过程与上述正好相反,从而保持输出电压基本不变。

该电路的输出电压可以调节,当 R_p 滑动端向上移动时, U_O 减小;反之, U_O 增大。 U_O 的调节范围为

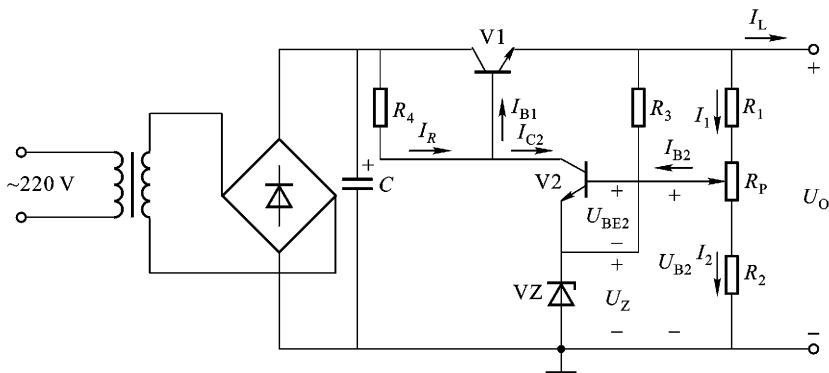


图 5.57 串联型稳压电路

$$(R_1 + R_2 + R_P) \times (U_{BE2} + U_Z) / (R_2 + R_P) \sim (R_1 + R_2 + R_P) \times (U_{BE2} + U_Z) / R_2$$

当负载电流较大时,调整管 V1 的集电极电流也较大(大于负载电流),此时必须选择大功率管,并按规定安装散热装置。

串联型稳压电路的比较放大电路也可采用集成运算放大器,如图 5.58 所示。由于集成运算放大器的电压放大倍数很高,输出阻抗较低,因此可获得优良的稳压特性,其稳压过程请读者自行分析。

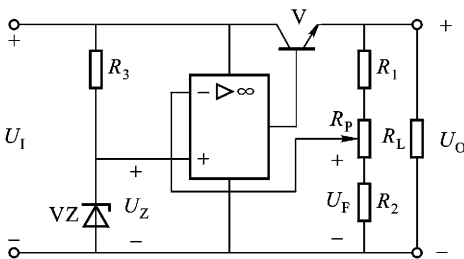


图 5.58 采用集成运算放大器的串联型稳压电路

3. 集成稳压器

随着集成电路的迅速发展,稳压电路形成了集成化。集成稳压器的型号种类很多,有多端式(管脚超过三个)和三端式(管脚只有三个)等,其中以三端式应用最广。

三端集成稳压器有固定输出和可调输出两种类型。他们都只有三个管脚,分别接输入端、输出端和公共端。它们内部大都采用串联型稳压电路,而且有启动电路及限流、过压和过热保护电路,使用更加安全、方便。

三端固定式集成稳压器可分为正电源输出(CW7800 系列)和负电源输出(CW7900 系列)。它们的外形通常有两种:一种是金属壳封装,如图 5.59(a)所示;另一种是塑料壳封装,如图 5.59(b)所示。CW7800 系列和 CW7900 系列的输出电压分为 7 个等级,即 5 V、6 V、8 V、12 V、15 V、18 V、24 V,以最后两位数字表示其输出电压的大小。例如, CW7812 的输出电压为 12 V, CW7912 的输出电压为 -12 V。CW7800 和 7900 系列的最大输出电流为 1.5 A,其他同类产品的最大输出电流还有 0.1 A、0.5 A、3 A、5 A 等几个等级,可查阅有关手册或产品说明书。

图 5.60 是 CW7800 系列的基本应用电路 ,为了改善纹波电压 ,常在输入端接入电容 C_1 ,同时在输出端接入 C_2 ,以改善负载的瞬态电压波动。

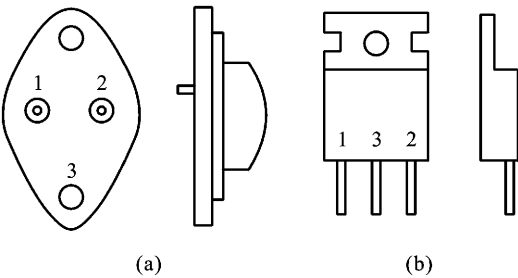


图 5.59 三端固定式集成稳压器的外形

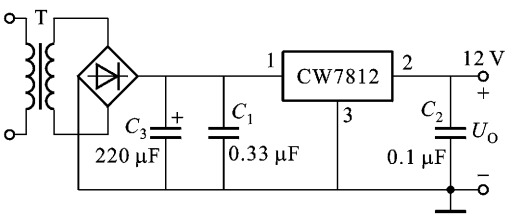


图 5.60 CW7800 系列的基本应用电路

下面介绍几种常用的三端固定式集成稳压器的应用电路。

- ① 双路正负电源输出电路 ,如图 5.61(a)所示。
- ② 提高输出电压的电路 ,如图 5.61(b)所示。图中 $U_{\times\times}$ 为 CW78 $\times\times$ 的固定输出电压 ,则输

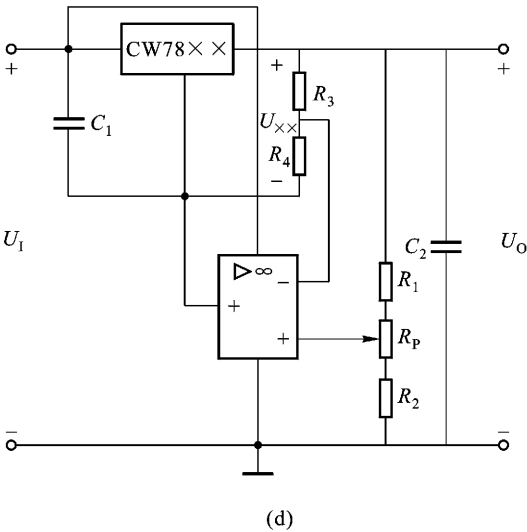
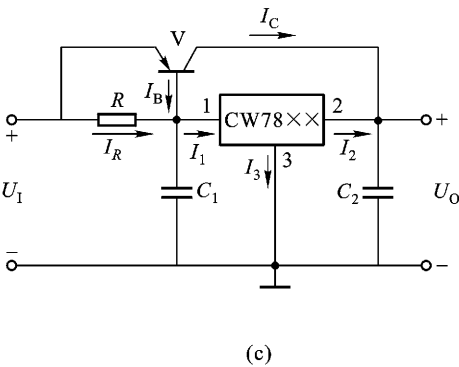
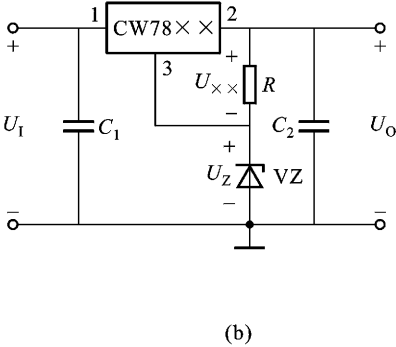
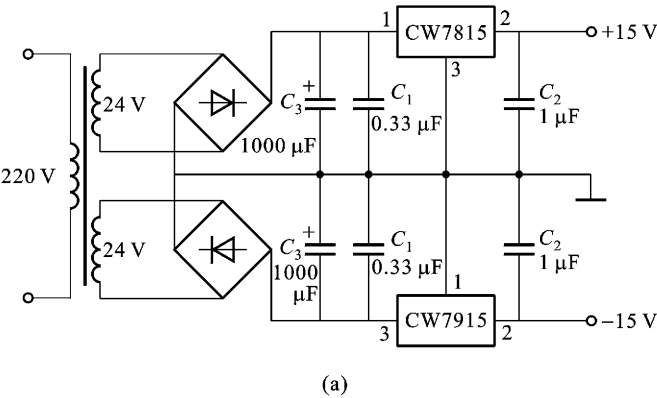


图 5.61 三端固定式集成稳压器的常见应用电路

出电压 $U_0 = U_{xx} + U_Z$ 。

③ 扩大输出电流的电路,如图 5.61(c)所示。该电路是采用外接功率管 V 的方法来扩大输出电流。

④ 输出电压可调的电路,如图 5.61(d)所示。

5.5 晶闸管及其可控整流电路

晶闸管(旧称可控硅)是在硅二极管基础上发展起来的大功率变流器件,它不仅具有硅二极管的特性,而且它的工作过程是可以控制的,因此以晶闸管为主体的交流技术得到了广泛应用,主要用于可控整流、逆变与变频、交流调压、直流斩波调压和无触点开关等方面。本节主要介绍晶闸管和可控整流电路,为后面介绍的数控机床电动机调速等电路作准备。

5.5.1 晶闸管

1. 晶闸管的结构和符号

常用的晶闸管的外形如图 5.62(a)所示,晶闸管的内部结构如图 5.62(b)所示。从图上可以看出,它具有三个 PN 结、四层 PNPN 的结构。三个电极分别为阳极 A、阴极 K 和控制极 G,它的符号如图 5.62(c)所示。

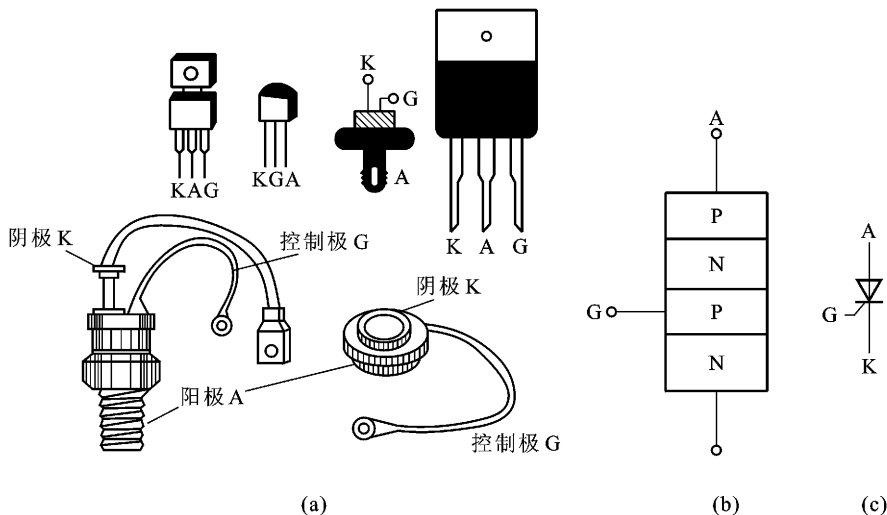


图 5.62 晶闸管的外形、结构及符号

2. 晶闸管的工作特点

图 5.63 是晶闸管导通的实验电路图。当晶闸管阳极与阴极间加正向电压,开关 S 断开,即控制极不加电压,如图 5.63(a)所示,此时灯不亮,说明晶闸管不导通。

当晶闸管阴极和阳极间加正向电压,开关 S 闭合,即控制极和阴极间也加正向电压时,如图 5.63(b)所示,这时灯亮,说明晶闸管导通。如果灯亮后,再打开开关 S,即去掉控制极上的电压,灯仍然亮,说明晶闸管导通后,控制极失去控制作用。

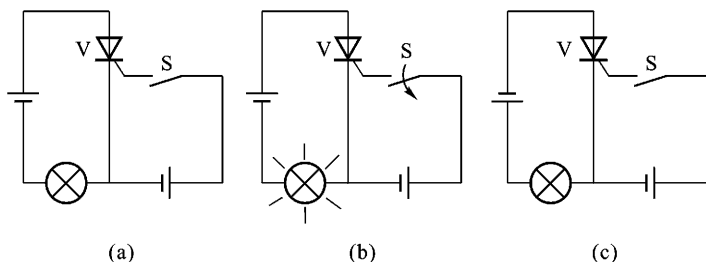


图 5.63 晶闸管导通实验电路图

调换晶闸管阴极与阳极间的电源极性,如图 5.63(c)所示。此时控制极加不加电压,灯都不亮,说明晶闸管截止。

通过以上实验,可以得出晶闸管导通必须同时具备两个条件:

- ① 晶闸管的阳极与阴极之间加正向电压。
- ② 控制极与阴极间加适当大小的正向电压。

由于晶闸管导通后,控制极就失去控制作用,所以控制极的电压通常加脉冲式的触发电压。

关断导通的晶闸管,可以撤去阳极和阴极间的正向电压,或者将阳极电流减小至“维持电流”以下。

3. 晶闸管的主要参数

① 正向阻断峰值电压 U_{FRM} 。在控制极开路、晶闸管正向阻断和额定结温时,可重复(50Hz)加在晶闸管阳极和阴极间的正向峰值电压。

② 反向阻断峰值电压 U_{RRM} 。在控制极开路 and 额定结温时,允许重复加在晶闸管阳极和阴极的反向峰值电压。

③ 额定电压 U_N 。通常 U_{FRM} 和 U_{RRM} 的数值相等,因此它们其中的一个数值就是额定电压 U_N 。如果不等,就取其中较小的那个数值作为晶闸管型号上的额定电压。选用晶闸管时,其额定电压应为正常工作峰值电压的 2~3 倍。

④ 额定正向平均电流 I_F 。指在环境温度为 40℃ 和规定散热以及全导通的条件下,晶闸管阳极与阴极间允许连续流过的工频正弦波电流的平均值。选用晶闸管时,一般应留有裕量,其额定正向平均电流 I_F 应为正常工作平均电流的 1.5~2 倍。

⑤ 维持电流 I_H 。指在控制极开路 and 规定环境温度条件下,维持晶闸管继续导通所需的阳极最小正向电流。当晶闸管阳极的正向电流小于这个电流时,晶闸管将自动关断。

4. 其他类型的晶闸管

① 双向晶闸管。双向晶闸管等效于两个晶闸管反并联,但只有一个控制极,如图 5.64(a)所示,它的符号如图 5.64(b)所示,它不同于普通晶闸管,控制极加触发脉冲后,能使晶闸管正、反两个方向都导通,它主要用于交流调压等场合。

② 可关断晶闸管。可关断晶闸管与普通晶闸管的不同之处在于其控制极和阴极间加正脉冲信号,晶闸管导通,加负脉冲信号,晶闸管关断。它克服了普通晶闸管只能控制其导通而不能控制起其关断的缺陷。可关断晶闸管的符号如图 5.65 所示。

5. 晶闸管的型号

晶闸管的型号及其含义如下:

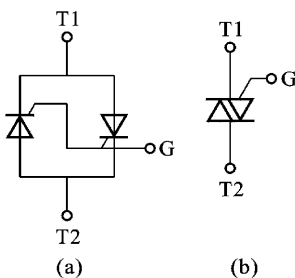
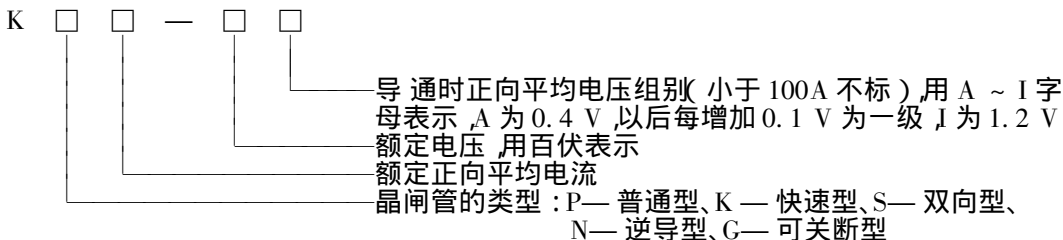


图 5.64 双向晶闸管的等效电路和符号

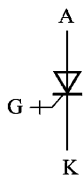


图 5.65 可关断晶闸管符号

例如: KP200-10D 表示额定正向平均电流为 200 A, 额定电压为 1 000 V, 正向平均电压为 0.7 V 的普通型晶闸管。

6. 晶闸管的简易检测

晶闸管可以用万用表进行简易检测, 以粗略确定其好坏。

① 检测阳极和阴极的正反向电阻。将万用表拨至 $R \times 1 \text{ k}$ 的电阻挡, 测得晶闸管的正向电阻和反向电阻都应很大(指针基本不动), 否则表示元件已短路或性能不好。

② 检测控制极和阴极间的正反向电阻。黑表笔接控制极, 红表笔接阴极, 测得的电阻应很小; 对调两表笔, 测得的电阻应很大。如果两次测得的电阻都很小或很大, 则表示控制极与阴极短路或断开, 不能使用。

以上检测仅是粗略地进行判断, 进一步检测还是要用专门仪器。

5.5.2 可控整流电路

1. 单相半波可控整流电路

图 5.66(a) 是单相半波可控整流电路, 图 5.66(b) 是该电路的电压波形图。图中 u_g 是加在晶闸管控制极上的触发电压, 输入电压 u_2 为正半周时, 晶闸管 V 阳极与阴极间加正向电压, 当控制极加上触发脉冲时, 晶闸管导通, 负载上得到电压。当 u_2 下降到接近零时, 晶闸管的正向电流小于维持电流而关断, 负载上电压 u_0 为零, 直到 u_2 为第二个正半周, 且 u_g 的脉冲信号来到时, 晶闸管才导通, 负载上重新获得电压。

晶闸管在正向电压下不导通的范围称为控制角, 用 α 表示, 导通的范围称为导通角, 用 θ 表示。从图 5.66(b) 上可以看出, 控制角 $\alpha = 0$, 导通角 $\theta = \pi$, 晶闸管在 u_2 为正半周时全导通, 输出电压的平均值 U_0 最大; α 越大, 则 θ 越小, 输出电压越小, 因此只要改变触发电压的到来时刻, 即可改变控制角的大小, 也就改变了导通角, 从而改变了输出电压的大小。

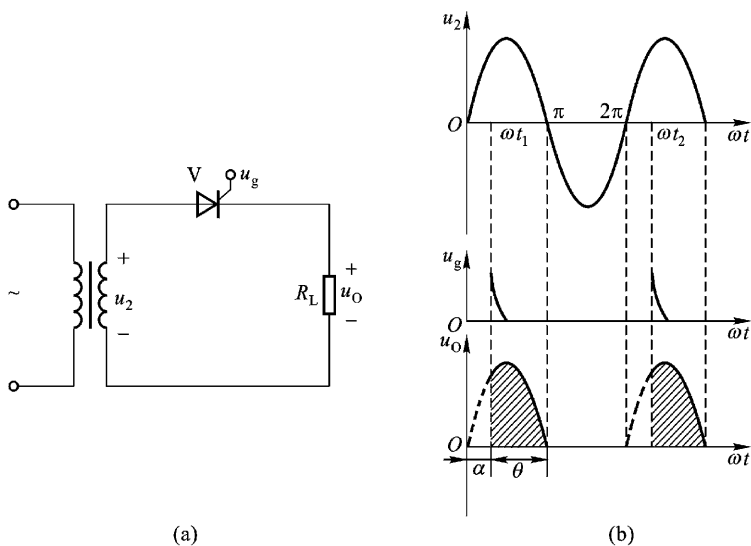


图 5.66 单相半波可控整流电路及波形图

2. 单结晶体管触发电路

产生晶闸管控制极所需的脉冲信号的触发电路 ,种类较多 ,最常用的是单结晶体管触发电路。

单结晶体管也称双基极二极管 ,它的结构如图 5.67(a)所示。它有三个电极 ,即发射极 e、第一基极 b_1 、第二基极 b_2 ,但只有一个 PN 结。单结晶体管的符号如图 5.67(b)所示 ,其等效电路如图 5.67(c)中的点画线所示。

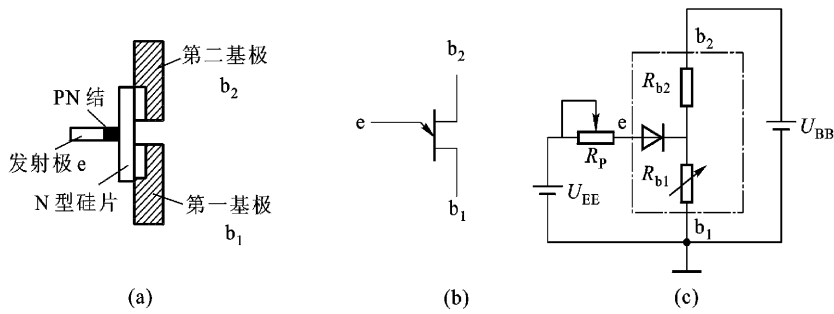


图 5.67 单结晶体管的结构、符号及等效电路

在单结晶体管两个基极 b_1 、 b_2 之间加一个固定的直流电压 U_{BB} ,在发射极 e 和第一基极 b_1 之间加电压 U_E ,如图 5.67(c)所示。调节 R_p 会发现以下现象 :当电压 U_E 较小时 ,单结晶体管的 PN 结处于反偏 ,e 与 b_1 之间不导通 ,呈现很大的电阻。当电压增大到某一值时(该值称为峰点电压 U_P , U_P 与 U_{BB} 有关) ,单结晶体管的 PN 结导通 ,发射极电流 I_E 突然增大 ,e 和 b_1 之间的电阻 R_{b1} 迅速减小 , U_E 也随之下降。当 I_E 增大到某一值时 , U_E 降到最低点上(此值称为谷点电压 U_V) ,调节 R_p 使 U_E 小于谷点电压时 ,单结晶体管就恢复截止。

从以上现象可以得出单结晶体管导通和截止的条件是:当发射极电压 U_E 等于峰点电压 U_P 时,单结晶体管导通;导通后,当发射极电压 U_E 小于谷点电压 U_V 时,单结晶体管就截止。

图 5.68(a) 是单结晶体管多谐振荡电路,它是组成触发电路的最基本单元。单结晶体管发射极电压 U_E 和输出端的电压 u_g 波形如图 5.68(b) 所示。其工作原理如下:

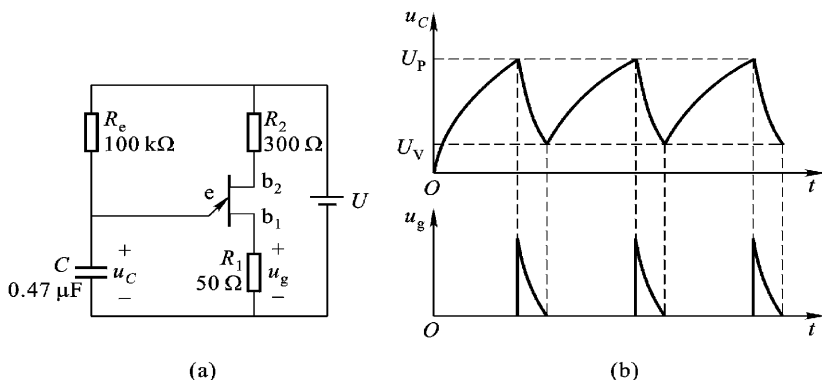


图 5.68 单结晶体管多谐振荡电路及其波形

当电路接通电源后,电源电压 U_B 通过 R_e 向电容 C 充电, U_E 逐渐上升。当 U_E 低于峰点电压时,单结晶体管截止 $\mu_g \approx 0$;当 U_E 等于峰点电压时,单结晶体管导通,电容 C 变充电为放电,通过单结晶体管发射极 e 、第一基极 b_1 向 R_1 放电。由于 R_1 较小,放电很快,在 R_1 上形成脉冲电压 u_g 。当 U_E 小于谷点电压时,单结晶体管截止,电源再次经过 R_e 向电容 C 充电。重复上述过程,由此得到一个个脉冲电压 u_g 。改变 R_e 和 C 的数值,即改变电容充电的时间常数,从而改变电压脉冲 u_g 的频率。

图 5.69(a) 是由单结晶体管触发的单相半控桥式整流电路,主电路的可控整流采用两只晶闸管和两只二极管组成半控桥式整流电路,两只晶闸管的控制信号 u_g 从电阻 R_1 上获得。

为了获得稳定的控制,触发电路与主电路必须同步,这样才能使晶闸管的导通角和输出电压的平均值保持不变。该电路是通过变压器将两电路接在同一电源上,使两者达到同步。

触发电路的电源经过稳压二极管 VZ 稳压,使单结晶体管输出的脉冲幅度和每个周期中产生的第一个脉冲不受交流电源电压的影响。图 5.69(b) 是该电路的电压波形,该电路的工作过程,请读者自行分析。

要改变负载上输出电压的大小,可以调节 R_p 来实现。 R_p 调大,电容 C 的充电变慢,控制角 α 增大,导通角 θ 变小,输出电压的平均值也就变小。

自动控制中常用的单结晶体管触发电路是在图 5.69(a) 的触发电路上增加放大器,同时,为了加大整流电流,可采用全控桥式整流电路,即用四只晶闸管,其工作原理与半控桥式整流相同。这种全控桥式整流电路在数控机床的电气控制中用得很多。

3. 晶闸管的保护和防失控措施

尽管晶闸管具有很多优点,但它也有弱点,主要是承受过电流和过电压的能力很差,因此使用中必须采取一定的保护措施。

(1) 晶闸管的过电流保护

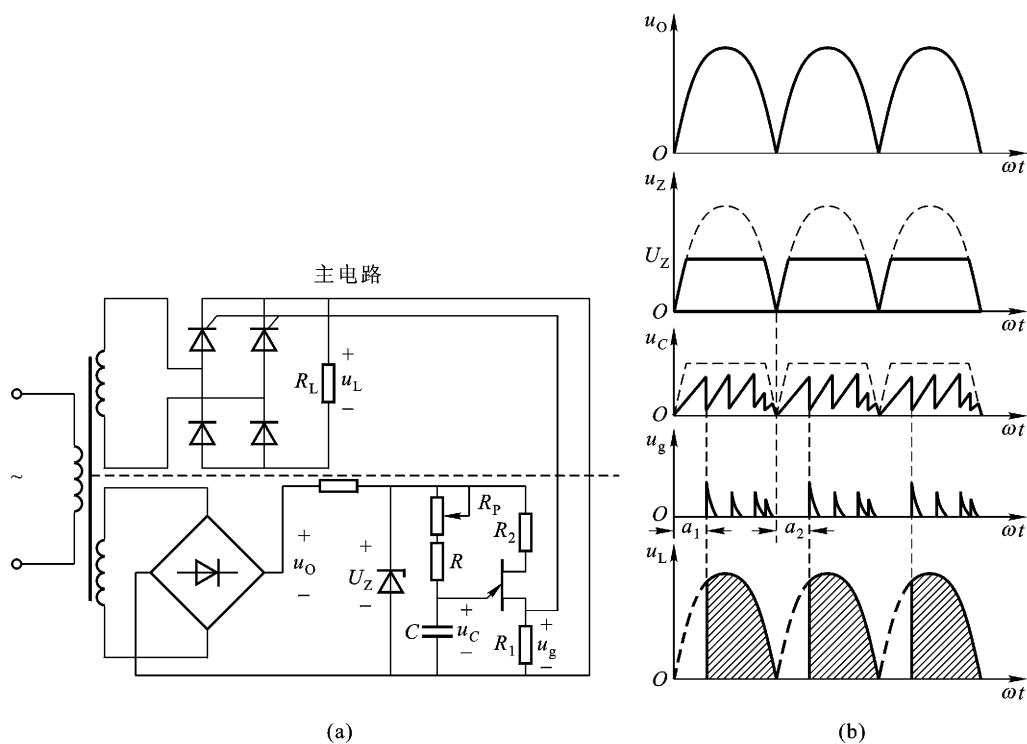


图 5.69 单结晶体管触发的单相半控桥式整流电路及其电压波形

晶闸管允许在短时间内承受一定的过电流,例如过载电流为额定电流的 2 倍时,允许电流过载的时间为 5 s;如果过载电流为额定电流的 4 倍时,允许过载的时间是 0.02 s,因此只要在允许的短时间内切断过电流,就可以保护晶闸管不受损坏。晶闸管过电流的保护方法有:快速熔断器、灵敏继电器和过载截止保护等,其中快速熔断器保护应用最广泛。

普通熔断器熔体的熔断时间比晶闸管允许过载的时间长,因此必须采用专用于保护晶闸管的快速熔断器。快速熔断器接入的方法有三种,如图 5.70 所示。一种方法是将快速熔断器串联在交流的输入端;第二种方法是快速熔断器与晶闸管串联;第三种方法是快速熔断器接在输出端,与负载串联。这三种接法的保护范围是不同的,第三种接法仅能对负载的过载或短路起保护作用,不能对晶闸管或二极管的故障起保护,而前两种接法能同时对以上两种故障起到保护。

选用快速熔断器时,应注意快速熔断器的额定电流应尽量接近晶闸管实际工作电流的有效值,而不是按晶闸管的额定电流(该额定电流是以平均值计算的)选取,可参考表 5.7。

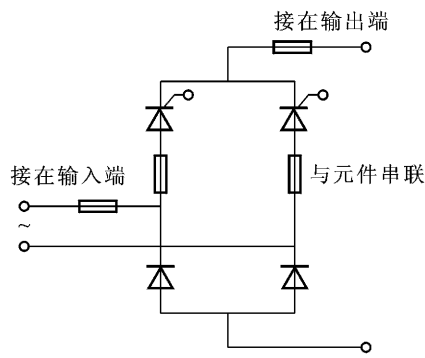


图 5.70 快速熔断器的接入方式

图 5.70 快速熔断器的接入方式

表 5.7 快速熔断器选用的参考数据

晶闸管额定电流/A	5	10	20	30	50	100	200	300	500
快速熔断器额定电流/A	8	15	30	50	80	150	300	500	800

(2) 晶闸管的过电压保护

负载电路中一般都接有电感元件,在切断电路时,往往会造成过电压的现象,一般采用接入阻容吸收回路的方法对晶闸管实施过电压保护。阻容吸收回路由电容和电阻组成,可并联在交流的输入端、晶闸管或负载两端,如图 5.71 所示。

(3) 防失控措施

前面分析的整流电路的负载都是电阻,当负载是电感性时,其情况与电阻就大不相同了。这是因为当交流电压 u_2 过零变负时,电感 L 会产生感应电动势,使得晶闸管承受正向电压,而不能及时关断,造成失控。

解决失控的措施是在感性负载两端并联一个二极管 VD,如图 5.72 所示,当交流电压 u_2 过零变负时,感应电动势产生的电流经过这个二极管形成回路,这时负载两端电压近似为零,晶闸管承受反向电压而迅速关断。并联在负载的两端的二极管称为续流二极管,它的极性不能接反,否则会引起短路事故。

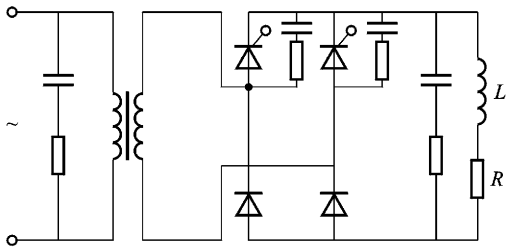


图 5.71 阻容吸收回路的连接方法

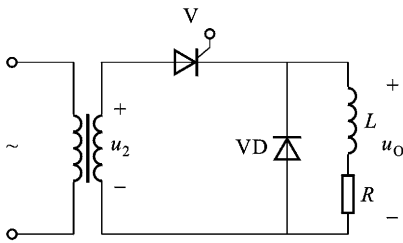
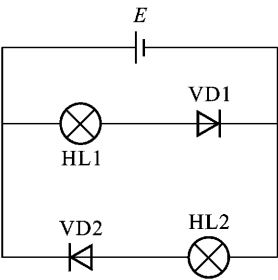


图 5.72 并联续流二极管的防失控电路

思考与练习

- 5.1 题图 5.1 所示的电路中,哪些白炽灯可能发亮?
- 5.2 什么是反向击穿,电击穿和热击穿有何区别?
- 5.3 怎样用万用表判别二极管的正极和负极,怎样判别二极管的好坏?
- 5.4 测量电流时,为了避免因性接反而损坏电流表,可以在表头处串联一只二极管;为了避免电流过大而损坏电流表,则可以在表头两端并联一只二极管。试画出这两种接法的电路图,并说明为什么?
- 5.5 用万用表测量二极管的正向电阻时,用 $R \times 100$ 挡和用 $R \times 1\text{ k}$ 挡测量的电阻是否相同,为什么?
- 5.6 测得某晶体管的电流为: $I_B = 40\text{ }\mu\text{A}$, $I_C = 2.4\text{ mA}$,试求 I_E 和 β 。如果当 I_B 增大为



题图 5.1

60 μA 时 I_C 变为 3.58 mA ,则 β 为多大 ?

5.7 有两只晶体管 ,甲管 $\beta = 60$ $I_{\text{CEO}} = 5 \mu\text{A}$;乙管 $\beta = 120$ $I_{\text{CEO}} = 20 \mu\text{A}$,如果其他参数差不多 ,那么选用哪只管子较好 ,为什么 ?

5.8 放大电路中四只晶体管 3 个极的电位分别为以下各组数据 :

(1) 6 V , 1.2 V , 0.5 V ; (2) 8 V , 7.7 V , 2 V ;

(3) 10 V , 9.3 V , 1 V ; (4) -8 V , -0.3 V , 0 V

试确定各电位对应的电极和晶体管的类型(PNP 型还是 NPN 型 ,硅管还是锗管)。

5.9 某晶体管的 $P_{\text{CM}} = 100 \text{ mW}$ $I_{\text{CM}} = 20 \text{ mA}$ $U_{(\text{BR})\text{CEO}} = 15 \text{ V}$,试问以下几种情况能否正常工作 ?

(1) $U_{\text{CE}} = 4 \text{ V}$ $I_C = 10 \text{ mA}$; (2) $U_{\text{CE}} = 3 \text{ V}$ $I_C = 30 \text{ mA}$;

(3) $U_{\text{CE}} = 6 \text{ V}$ $I_C = 20 \text{ mA}$; (4) $U_{\text{CE}} = 18 \text{ V}$, $I_C = 5 \text{ mA}$

5.10 怎样用万用表判断一只晶体管是 NPN 型还是 PNP 型、管子的三个管脚以及锗管还是硅管 ?

5.11 场效晶体管与晶体管比较 ,各有哪些特点 ?

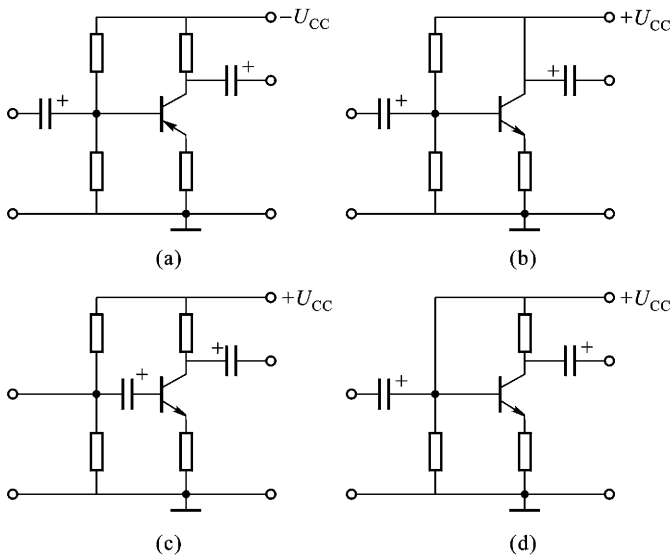
5.12 用示波器观察固定偏置的放大电路 ,发现在工作时输出波形失真严重 ,若用直流电压表测得以下情况 (1) $U_{\text{CE}} \approx U_{\text{BE}}$; (2) $U_{\text{CE}} < U_{\text{BE}}$,试分析以上两情况管子工作在什么状态 ,怎样调节 R_b 才能使电路正常工作 ?

5.13 通常希望放大电路的输入电阻和输出电阻是高一些还是低一些好 ,为什么 ?

5.14 对分压式偏置电路 ,当更换晶体管的 β 比原来的大一些时 ,对放大电路的静态工作点有无影响 ,为什么 ?

5.15 说出分压式偏置电路稳定静态工作点的工作过程。

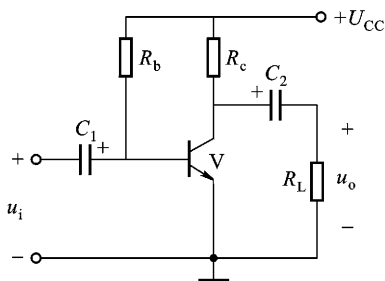
5.16 试判别题图 5.16 中各个电路能否放大交流信号 ,为什么 ?



题图 5.16

5.17 题图 5.17 所示的固定偏置放大电路 $R_c = 2 \text{ k}\Omega$, $R_b = 500 \text{ k}\Omega$, $R_L = 3 \text{ k}\Omega$, $U_{CC} = 10 \text{ V}$, $\beta = 100$, 求 (1) 静态工作点 (2) 电压放大倍数 (3) 输入电阻和输出电阻。

5.18 某一放大电路的输入电压 $U_i = 20 \text{ mV}$, 输入电流 $I_i = 1.0 \text{ mA}$, 输出电压 $U_o = 2 \text{ V}$, 输出电流为 100 mA , 试求 (1) 电压、电流和功率放大倍数 (2) 电压、电流和功率增益。



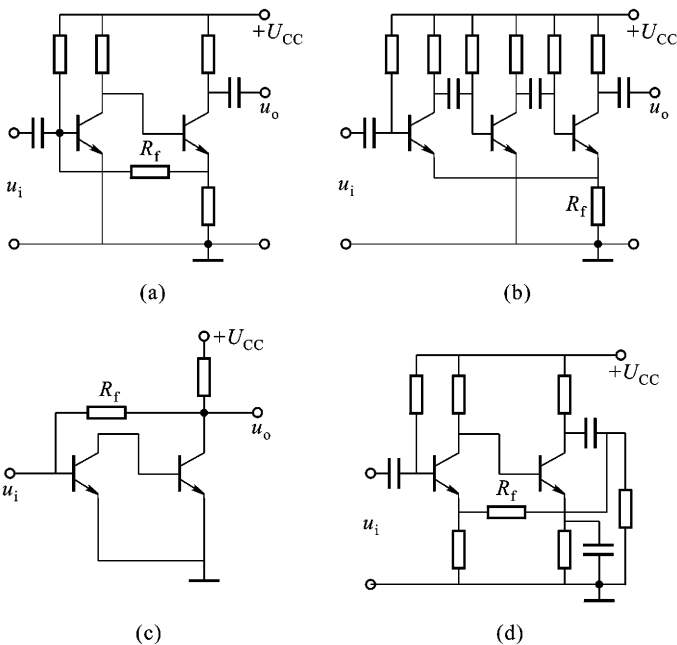
题图 5.17

5.19 射极输出器有何特点? 有哪些应用?

5.20 负反馈对放大电路的工作性能有何影响?

5.21 某多级放大电路, 各级的电压放大倍数分别为 $A_{u1} = 100$, $A_{u2} = 50$, $A_{u3} = 10$, 试求: (1) 各级的电压增益 (2) 总的电压放大倍数和电压增益。

5.22 题图 5.22 所示各电路反馈元件为 R_f , 试分析哪些是负反馈电路?



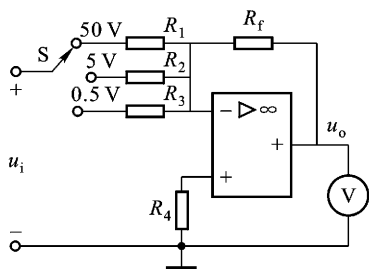
题图 5.22

5.23 什么是零点漂移, 产生零点漂移的主要因素是什么, 差分放大电路为什么能抑制零点漂移?

5.24 试分析 OCL 功率放大电路的工作过程, 并说明是如何改善交越失真的。

5.25 在图 5.33 的反相比例运算电路中, 设 $R_1 = 20 \text{ k}\Omega$, $R_f = 20 \text{ k}\Omega$, 若 $U_i = 0.1 \text{ V}$, 求 U_o 。

5.26 在图 5.35 的同相比例运算电路中, 设 $R_1 = 5 \text{ k}\Omega$, $R_f = 20 \text{ k}\Omega$, $U_i = 0.2 \text{ V}$, 求 U_o 。



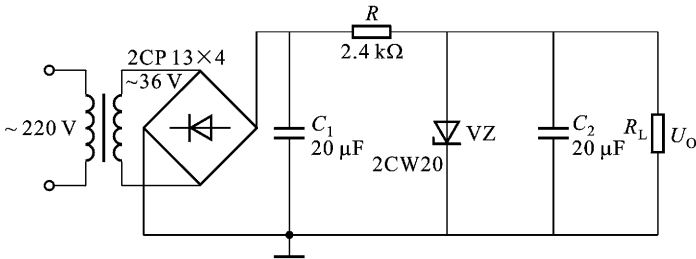
题图 5.27

5.27 用运算放大器构成的电压表如题图 5.27 所

示 图中表头的满量程为 5 V $R_f = 500\text{ k}\Omega$ 对应于 50 V、5 V 和 0.5 V 三种不同量程 ,电阻 R_1 、 R_2 和 R_3 应取多少 ?

5.28 有一个电压为 24 V ,电阻为 $20\text{ }\Omega$ 的直流负载 ,采用单相桥式整流电路(无滤波器)供电 ,试求 (1) 变压器二次电压 (2) 选用整流二极管 (3) 如果其中一只整流二极管开路 ,则直流负载两端的电压为多少 ?

5.29 某稳压电路如题图 5.29 所示 ,试问 (1) 输出电压 U_O 的极性和大小如何 ? (2) 电容 C_1 和 C_2 的极性如何 ? 它们的耐压应选多大 ? (3) 若 R 短路 ,将会怎样 ? (4) 若将稳压二极管 VZ 接反 ,后果怎样 ?



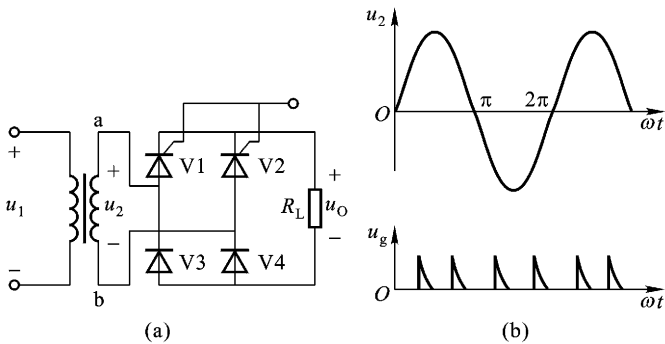
题图 5.29

5.30 图 5.57 所示的串联型稳压电路 $R_1 = R_2 = 1\text{ k}\Omega$ $R_p = 680\text{ }\Omega$ $U_Z = 6.3\text{ V}$ 试求 : (1) 输出电压的可调范围 (2) 当温度下降时的稳压过程。

5.31 试画出一个用 CW7800 系列和 CW7900 系列集成稳压器组成的一个输出正电压 12 V、负电压 8 V 的稳压电路图。

5.32 晶闸管导通的条件是什么 ? 晶闸管导通后怎样关断 ?

5.33 题图 5.33 的所示单相半控桥式整流电路 U_2 和 u_g 的波形图如题图 5.33(b)所示。 (1) 画出 u_O 的波形图 (2) 若要增大 u_O ,则应怎样调节 u_g ?



题图 5.33

5.34 图 5.69(a)所示的单结晶体管触发的单相半控桥式整流电路 ,若要增大 u_O ,则应怎样调节 R_p ? 若要减小 u_O ,情况如何 ?

5.35 晶闸管的过电流保护有哪几种 ,各有什么优点 ?

5.36 晶闸管的过电压保护有哪几种 ?

第 6 章

数字电子技术基础

本章将学到：

1. 数字电路有什么特点？
2. 数字电路中的基本门电路和常见的复合门电路有哪些 ,它们各有哪些逻辑功能 ,常见的组合逻辑电路有哪些 ,集成门电路的分类及其使用中应注意哪些问题？
3. 常见的触发器有哪几种 ,各有哪些逻辑功能 ,寄存器和计数器各有什么功能？
4. 什么是 D/A 转换器 ,什么是 A/D 转换器 ,它们常用产品各管脚引线的功能是什么 ,与 8031 单片机是怎样连接的？

6.1 概 述

电子技术的电路分为两大类 ,一类是模拟电路 ,另一类是数字电路。第 5 章讨论的电路是模拟电路 ,本章将讨论数字电路。数字电路与模拟电路相比 ,具有抗干扰能力强、能耗低、便于集成等优点 ,在计算机、通信、工业自动化控制、家电等领域广泛应用 ,迅速发展。

6.1.1 数字信号及其数字电路

电子电路中的信号分为模拟信号和数字信号两大类。模拟信号是指电信号随时间而连续变化的 ,处理模拟信号的电路称为模拟电路。数字信号是不连续变化的脉冲信号 ,处理数字信号的电路称为数字电路。数字电路主要研究脉冲信号的产生、变换、控制和对数字信号进行逻辑运算等 ,因此数字电路又称为逻辑电路。

在生产与生活的实践中 ,存在着大量相互对应的逻辑状态 ,如开关的接通与断开、电灯的亮与暗、信号电平的高与低、脉冲的有和无等。这些相互对应的状态 ,可以用数字符号 **1** 和 **0** 表示 ,分别称为逻辑 **1** 和逻辑 **0**。必须注意的是 ,这里的 **0** 和 **1** 不是数量的大小 ,只表示两种对立的状态。在数字电路中 ,这种对立的状态分别用信号电平的高和低来反映。如果用 **0** 表示低电平 ,**1** 表示高电平 ,这种方法称为正逻辑 ;反之 ,用 **1** 表示低电平 ,**0** 表示高电平 ,则称为负逻辑。在本书中 ,如果没有特殊说明 ,一律采用正逻辑。

数字电路按电路的组成结构可分为分立电路和集成电路 ,其中集成电路又可分为小规模 (SSI)、中规模 (MSI)、大规模 (LSI)和超大规模集成电路 (VSI) ;按电路所用的器件可分为双极

型和 MOS 型 按电路的逻辑功能可分为组合逻辑电路和时序逻辑电路。

6.1.2 脉冲波形及其参数

常见的脉冲信号有矩形波和尖峰波等 ,分别如图 6. 1(a)、(b)所示。其中最常用的是矩形波 ,图 6. 1(a)所示的是理想的矩形波 ,而实际的矩形波如图 6. 2 所示。矩形波的重要数据有：

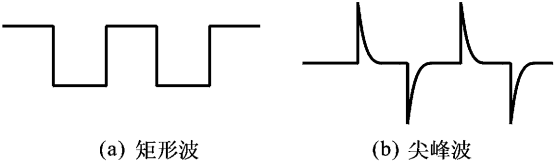


图 6. 1 常见的脉冲波形

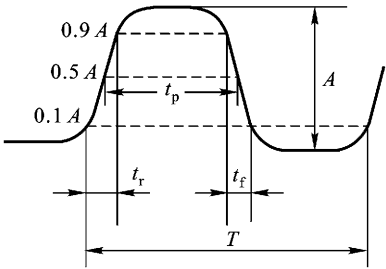


图 6. 2 实际的矩形波

(1) 脉冲幅度 A

脉冲信号变化的最大值。

(2) 脉冲宽度 t_p

脉冲信号前沿幅度的 50% 到后沿幅度的 50% 所需要的时间 ,这段时间也称为脉冲持续时间。

(3) 脉冲周期 T

两个相邻脉冲重复出现的时间间隔。

(4) 脉冲频率 f

单位时间(s)内脉冲的个数。

6.1.3 二进制数

数字电路是采用二进制进行计数和运算的 ,而不是日常习惯的十进制计数和运算。这是因为数字电路中的开关元件都具有两个稳定状态 ,采用二进制可以将数码和电路的两个状态对应起来。二进制数只用 0 和 1 两个数码表示 ,二进制的基数为 2 ,它的进制规则是“逢二进一” ,二进制数的“ 10 ”相当于十进制数的“ 2 ” ,它和十进制数的“ 10 ”是完全不同的。任一个二进制数都可以转换为十进制数 ,例如 ,二进制数 1011 可以表示为

$$(1011)_2 = 1 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 1 \times 2^0 = (11)_{10}$$

即二进制数(1011)₂ 等于十进制数(11)₁₀。式中以 2 为底的指数 2⁰、2¹、2²...称为二进制数的权。

6.1.4 晶体管的开关电路

与模拟电路相同,数字电路的主要器件也是晶体管,其不同的是数字电路中的晶体管是作为开关元件来使用的。所谓开关元件,是指具有接通和断开两种工作状态。

当二极管加正向电压时,二极管导通,相当于开关闭合;当二极管加反向电压时,二极管截止,相当于开关断开,所以二极管具有开关作用。

在数字电路中,晶体管工作在饱和状态或截止状态,并在这两种状态之间高速转换,而经过放大区的时间是极短的。晶体管处于饱和状态时,其饱和压降 U_{CES} 很小(硅管约为 0.3 V,锗管约为 0.1 V),可以认为 $U_{CES} \approx 0$,即集电极与发射极间近似短路,相当于开关接通;当晶体管处于截止状态时,集电极电流 $i_C \approx 0$,因此集电极与发射极之间近似开路,相当于断开。

图 6.3 是晶体管的开关电路。当输入信号为低电平,即 $u_i = 0$ 时,晶体管发射结反偏,晶体管 V 截止, $i_B = 0$, $i_C = 0$,输出电压 $u_o = U_{CC} = 12$ V。

晶体管处于饱和状态时,其集电极饱和电流 I_{CS} 和基极临界饱和电流 I_{BS} 分别有以下关系

$$I_{CS} = \frac{U_{CC} - U_{CES}}{R_c} \approx \frac{U_{CC}}{R_c} \quad (6.1)$$

$$I_{BS} = \frac{I_{CS}}{\beta} \approx \frac{U_{CC}}{\beta R_c} \quad (6.2)$$

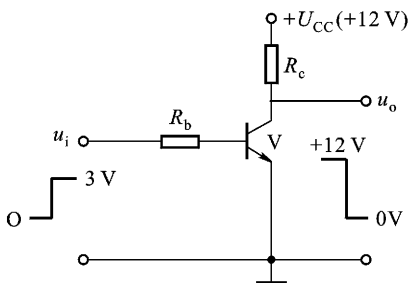


图 6.3 晶体管的开关电路

当晶体管输入高电平时,只要选择合适的 R_b ,使 $i_B > i_{BS}$,则晶体管工作在饱和状态,输出电压 $u_o \approx 0$ 。晶体管作为开关元件时,输入高电平时,输出则为低电平;输入低电平时,输出则为高电平。晶体管不仅在数字电路中作为开关元件,在后面介绍的数控机床控制电动机的功率放大电路中,晶体管也是工作在开关状态。

6.2 门电路和组合逻辑电路

数字电路研究的是电路输入、输出状态间的逻辑关系,所谓逻辑关系是事物间的因果关系,而门电路是实现因果逻辑关系最基本的电子电路。

6.2.1 基本门电路

数字电路中的基本逻辑关系有三种,与逻辑、或逻辑和非逻辑。实现这三种逻辑运算的是与

门、或门和非门。

1. 与逻辑及与门

与逻辑是指当决定一件事情的几个条件都具备后,事情才发生,缺一不可。与逻辑实例如图 6.4 所示,开关 A 和 B 串联,同时闭合,灯才亮;如果仅闭合其中一只开关,灯不亮。

实现与逻辑的电路称为与门电路,简称与门,图 6.5 是与门的符号, A 、 B 是两个输入端, Y 是输出端。

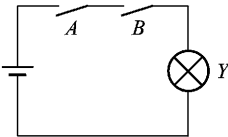


图 6.4 与逻辑关系实例

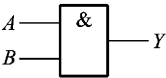


图 6.5 与门符号

与逻辑关系可以用逻辑函数式表示

$$Y = A \cdot B$$

(6.3)

其中,运算符“ $\cdot$ ”可省略。

与门的逻辑关系除了用逻辑函数式表达外,也可以用真值表或波形图表示,表 6.1 是与门的真值表,图 6.6 是与门的输入、输出波形图。

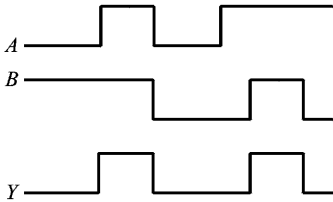


图 6.6 与门输入输出波形图

表 6.1 与门真值表

输入		输出
A	B	Y
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

由真值表可知,只要输入有一个 0 时,输出为 0;只有输入全为 1 时,输出才为 1。因此,与逻辑可概括为“有 0 出 0,全 1 出 1”。

2. 或逻辑及或门

或逻辑关系是指当决定一件事情的几个条件中,只要具备一个条件,事情就会发生。或逻辑关系的实例如图 6.7 所示,开关 A 、 B 并联,只要其中一只开关闭合,灯就会亮;只有全部断开,灯

才不亮。

实现或逻辑关系的电路称为或门电路 ,简称或门 ,或门的符号如图 6.8 所示。

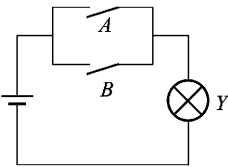


图 6.7 或逻辑关系实例

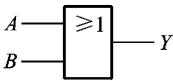


图 6.8 或门符号

或门的逻辑函数式为

$$Y = A + B$$

(6.4)

或门的真值表见表 6.2 输入、输出的波形如图 6.9 所示。

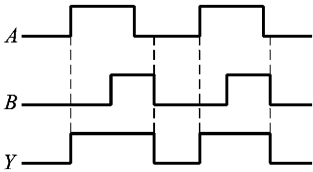


图 6.9 或门输入输出波形图

表 6.2 或门真值表

输入		输出
A	B	Y
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

从真值表上可知 ,只要输入有一个或一个以上为 1 时 ,输出为 1 ;只有输入全为 0 时 ,输出为 0。因此 ,或门的逻辑功能可概括为“ 有 1 出 1 ,全 0 出 0 ”。

3. 非逻辑及非门

非逻辑关系是指事情与条件总是相反 ,即输出状态与输入状态相反。实现非逻辑的电路称为非门电路。非门是一个反相器 ,图 6.4 所示的晶体管电路就是一个非门电路。非门的符号如图 6.10 所示 ,输出端的小圆圈表示非的意思。

它的逻辑表达式为

$$Y = \overline{A}$$

(6.5)

非门的真值表如表 6.3 所示 ,波形图如 6.11 所示。

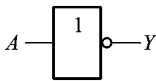


图 6.10 非门符号

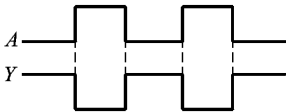


图 6.11 非门输入输出波形图

表 6.3 非门真值表

输入		输出
A		Y
0		1
1		0

非门的逻辑功能可表述为“有 1 出 0 ,有 0 出 1 ”。

6.2.2 复合门电路

由于反相器具有电流放大能力 ,带负载能力强 ,且输出电平比较稳定 ,因此在实际应用中 ,常把与门、或门和非门结合起来 ,构成与非门、或非门、与或非门等复合门电路。

1. 与非门

在一级与门的后面加一级非门就构成与非门 ,其逻辑结构图和逻辑符号如图 6.12(a)(b)所示。与非门的逻辑表达式为

$$Y = \overline{A \cdot B}$$

(6.6)

其真值表见表 6.4 ,由真值表可知 ,与非门的逻辑功能为“全 1 出 0 ,有 0 出 1 ”。

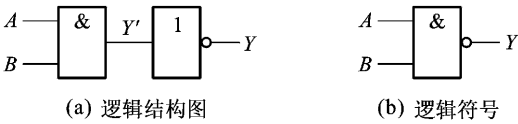


图 6.12 与非门逻辑结构及逻辑符号

表 6.4 与非门真值表

输入		输出
A	B	Y
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

2. 或非门

在一级或门的后面加一个非门就组成了或非门 ,其逻辑结构和逻辑符号如图 6.13(a)(b)

所示。或非门的逻辑表达式为

$$Y = \overline{A + B}$$

(6. 7)

或非门的真值表见表 6. 5 ,由真值表可得或非门的逻辑功能为：“有 1 出 0 ,全 0 出 1 ”。

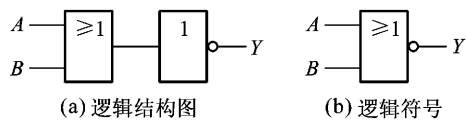


图 6. 13 或非门逻辑结构图及符号

表 6. 5 或非门真值表

输入		输出
A	B	Y
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

3. 与或非门

把与门、或门、非门按顺序连接起来就组成了与或非门 ,其逻辑结构和逻辑符号如图 6. 14(a)(b)所示。它的逻辑关系是 :先与 ,再或 ,最后非。与或非门的逻辑表达式为

$$Y = \overline{AB + CD}$$

(6. 8)

与或非门的真值表见表 6. 6 ,由其真值表得与或非门的逻辑功能为 :输入端中任一组合为 1 时 ,输出为 0 ;各组输入都至少有一个为 0 时 ,输出才为 1。

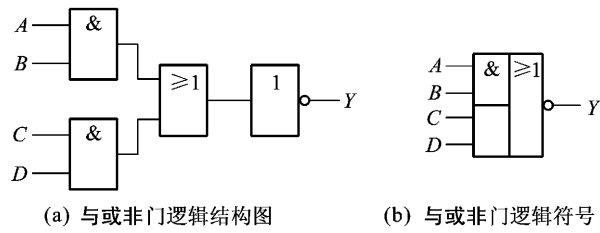


图 6. 14 与或非门逻辑结构图及逻辑符号

表 6. 6 与或非门真值表

输入				输出
A	B	C	D	Y
0	0	0	0	1
0	0	0	1	1
0	0	1	0	1

续表

输入				输出
A	B	C	D	Y
0	0	1	1	0
0	1	0	0	1
0	1	0	1	1
0	1	1	0	1
0	1	1	1	0
1	0	0	0	1
1	0	0	1	1
1	0	1	0	1
1	0	1	1	0
1	1	0	0	0
1	1	0	1	0
1	1	1	0	0
1	1	1	1	0

4. 异或门

图 6. 15(a)是异或门的逻辑结构图 ,图(b)是异或门的逻辑符号。它的逻辑表达式为

$$Y = A \overline{B} + \overline{A} B \tag{ 6. 9 }$$

异或门的逻辑表达式通常写成

$$Y = A \oplus B$$

异或门的真值表见表 6. 7 ,异或门的逻辑功能是 :当两个输入端状态相同时 ,输出为 0 ;两个输入端状态相异时 ,输出为 1。

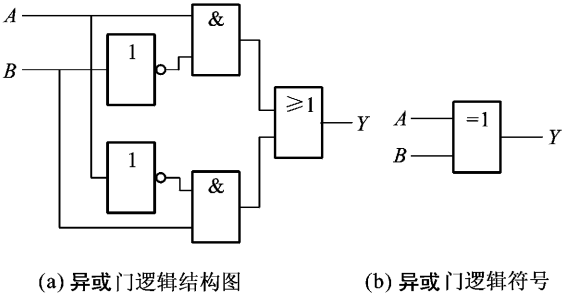


图 6. 15 异或门的逻辑结构图和逻辑符号

表 6.7 异或门真值表

输入		输出
A	B	Y
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

6.2.3 集成门电路简介

逻辑门电路可用晶体管等分立元器件组成,称为分立元件门电路;也可集成在半导体芯片上,称为集成门电路。集成门电路与分立元件门电路相比,具有高可靠性和微型化等优点,因此数字电路中多采用集成门电路。集成门电路主要有两大类系列,即 TTL 系列和 MOS 系列。

1. TTL 集成门电路

集成门电路由晶体管组成,由于其电路输入和输出级均采用晶体管,故称为晶体管-晶体管门电路,即简称 TTL。TTL 门电路运行速度快,电源电压比较低,带负载能力强。在 TTL 门电路中以与非门的应用最为普遍。表 6.8 中列出了 TTL 系列中的主要产品的系列。集成门电路目前大量采用双列直插式外形封装。图 6.16(a)、(b)分别是 74LS00 和 74LS20 的外引线排列图。74LS00 集成块内含有四个 2 输入端的与非门;74LS20 集成块内含有两个 4 输入端的与非门,它们都共用一个电源和一个接地点。

表 6.8 集成门电路的主要产品系列

系列	子系列	名称	国标型号	部标型号
TTL	TTL	基本型中速 TTL	CT54/74	T1000
	HTTL	高速 TTL	CT54/74H	T2000
	STTL	超高速 TTL	CT54/74S	T3000
	LSTTL	低功耗 TTL	CT54/74L	T4000
	ALSTTL	先进低消耗 TTL	CT54/74ALS	
MOS	CMOS	互补场效晶体管型	CC4000	C000
	HCMOS	高速 CMOS	CT54/74HC	
	HCMOST	与 TTL 兼容的高速 CMOS	CT54/74HCT	

TTL 与非门在使用中应注意以下几个问题：

(1) 多余输入端的处理

多余输入端悬空(相当于 1 态),这是最简单的处理,但由于悬空端对地阻抗很高,容易受外界干扰,所以一般不宜采用悬空处理。可以将多余输入端与其他输入端并联使用,或按电路功能要求通过限流电阻将多余输入端接电源。

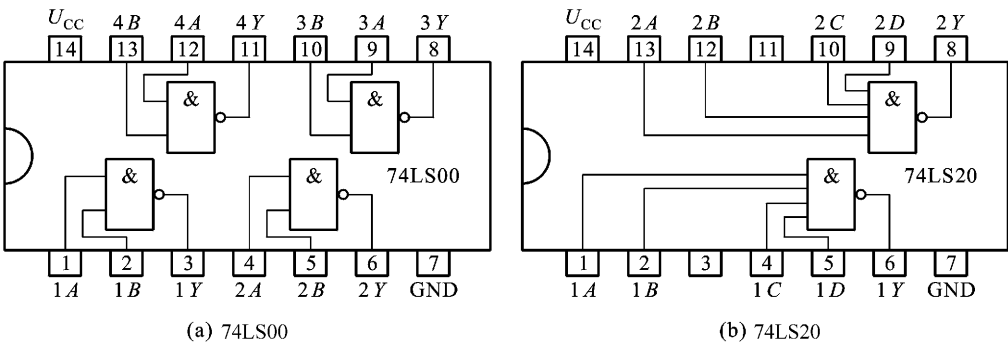


图 6.16 74LS00 和 74LS20 的外引线排列图

(2) 避免干扰信号

电路安装时,应尽量避免干扰信号的侵入,以保证电路稳定工作。可以在集成门电路的电源线上,并联几十微法的低频去耦电容和 $0.01 \sim 0.047 \mu\text{F}$ 的高频去耦电容,以防止 TTL 电路的动态尖峰电流产生的干扰,并有良好的接地系统。

(3) 输入和输出端的连接

各输入端不能直接与高于 5.5 V 或低于 -1.5 V 的低内阻电源连接,否则会因产生较大的电流而烧毁电路。输出端不允许与低内阻负载直接相连,需通过电阻相连,以提高输出电平。

2. MOS 集成门电路

以 MOS 管作为开关元件构成的门电路,称为 MOS 门电路。MOS 门电路具有制造工艺简单、集成度高、功耗低、抗干扰能力强等特点。中、大规模集成电路广泛采用 MOS 电路,所以发展很快,它的主要缺点是工作速度较低。MOS 门电路有 P 沟道型 PMOS、N 沟道型 NMOS 和互补型 CMOS 三种类型,其中 CMOS 是 N 沟道 MOS 管和 P 沟道 MOS 管组成的一种互补对称场效晶体管集成电路,目前用得最多。

CMOS 集成门电路的主要产品系列见表 6.8,其中 HC 和 HCT 系列为高速 CMOS 电路,其工作速度已与 LSTTL 系相当,而且其外引线排列和逻辑功能也与 LSTTL 系列相同。

CMOS 集成门电路在使用中应注意:

① 避免静电损坏。由于 CMOS 电路的输入阻抗高,极易产生感应较高的静电电压,从而击穿 MOS 管栅极极薄的绝缘层,损坏器件。为避免静电损坏,所有与 CMOS 直接接触的工具、仪表等都必须可靠接地,存储和运输 CMOS 电路,最好采用金属屏蔽层做包装材料。

② 多余的输入端不能悬空,其处理方法与前述的 TTL 电路相同。

在同一数字系统中,由于工作速度或功耗等指标的要求,需要采用不同类型的数字集成电路,最常见的就是 TTL 和 CMOS 两种电路的混合使用。由于 TTL 和 CMOS 电路的电压和电流参数各不相同,要考虑电平和电流匹配,因此常需采用接口电路来实现两者之间的连接。但对 HC-CMOST 系列,由于它的电源、电压、工作效率与 LSTTL 电路相同,因此这两个系列可以互换使用。

6.2.4 组合逻辑电路

前面介绍的几种简单组合门电路,其功能较为简单,在实际应用中,往往将它们组合起来,构成各种组合逻辑电路,以实现更复杂的逻辑功能。组合逻辑电路的特点是任何时刻的输出信号

仅由当时的输入信号决定,而与原来状态无关,当输入信号消失时,相应的输出信号也立即消失。

1. 逻辑代数

研究组合逻辑电路,需要用到逻辑代数。下面就对逻辑代数的基本知识作简单的介绍。

逻辑代数中的逻辑变量用大写字母表示,如 A 、 B 、 C …。逻辑变量的取值只有 **1** 和 **0** 两种,这里的 **1** 和 **0** 不表示数值的大小而是表示两个相反的逻辑状态。

(1) 逻辑运算法则

逻辑代数最基本的运算有三种,就是逻辑加、逻辑乘和逻辑非。任何复杂的逻辑运算,都是以这三种基本运算为基础的。

① 逻辑加。简称加法运算,反映的是或逻辑关系,所以也称或运算。其运算法则为

$$0 + A = A \quad (6.10)$$

$$1 + A = 1 \quad (6.11)$$

$$A + A = A \quad (6.12)$$

$$A + \bar{A} = 1 \quad (6.13)$$

② 逻辑乘。简称乘法运算,反映的是与逻辑关系,所以也称与运算。其运算法则为

$$0 \cdot A = 0 \quad (6.14)$$

$$1 \cdot A = A \quad (6.15)$$

$$A \cdot A = A \quad (6.16)$$

$$A \cdot \bar{A} = 0 \quad (6.17)$$

③ 逻辑非。简称非运算,也称为反运算,反映的是非逻辑关系。运算法则为

$$\overline{\bar{A}} = A \quad (6.18)$$

(2) 逻辑代数的基本定律

① 交换律

$$AB = BA \quad (6.19)$$

$$A + B = B + A \quad (6.20)$$

② 结合律

$$ABC = (AB)C = A(BC) \quad (6.21)$$

$$A + B + C = A + (B + C) = (A + B) + C \quad (6.22)$$

③ 分配律

$$A(B + C) = AB + AC \quad (6.23)$$

$$A + BC = (A + B)(A + C) \quad (6.24)$$

证: $(A + B)(A + C) = AA + AB + AC + BC = A + A(B + C) + BC$

$$= A[1 + (B + C)] + BC = A + BC$$

④ 吸收律

$$A + AB = A \quad (6.25)$$

证: $A + AB = A(1 + B) = A$

$$A + \bar{A}B = A + B \quad (6.26)$$

证: $A + \bar{A}B = A + AB + \bar{A}B = A + B(A + \bar{A}) = A + B$

⑤ 反演律(摩根定律)

$$\overline{AB} = \overline{A} + \overline{B} \tag{6.27}$$

$$\overline{A + B} = \overline{A} \overline{B} \tag{6.28}$$

对反演律(摩根定律)的证明可以利用真值表来检验。在表 6.9 中,对应于 A 和 B 的任何一种取值的组合 $\overline{AB}$ 和 $\overline{A} + \overline{B}$ 的逻辑值都相同,因此式(6.27)成立。同理可证式(6.28),请读者自行证明。

表 6.9 $\overline{AB} = \overline{A} + \overline{B}$

A	B	$\overline{AB}$	$\overline{A} + \overline{B}$
0	0	1	1
0	1	1	1
1	0	1	1
1	1	0	0

2. 逻辑电路的分析

在组合逻辑电路的应用中,往往会研究给定电路的输出与输入之间的逻辑关系,即根据逻辑图分析其逻辑功能,这类问题的应用称为组合逻辑电路的分析。

分析组合逻辑电路的一般步骤为：

已知逻辑图→写出逻辑式→运用逻辑代数化简或变换→列出真值表→分析逻辑功能。

例 6.1 分析图 6.17 所示电路的逻辑功能。

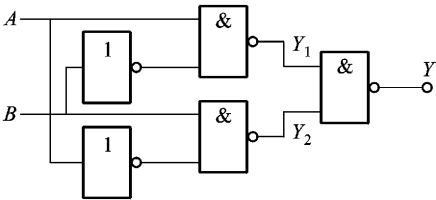


图 6.17 例 6.1 图

解 (1) 写出逻辑式

从输入端到输出端依次写出各级逻辑门输出的逻辑式,最后写出该电路的逻辑式

$$Y_1 = \overline{A} \overline{B} \qquad Y_2 = \overline{A} B$$
$$Y = \overline{Y_1 Y_2} = \overline{\overline{A} \overline{B} \overline{A} B}$$

(2) 化简

$$Y = \overline{\overline{A} \overline{B} \overline{A} B} = \overline{\overline{A} \overline{B}} + \overline{\overline{A} B} = \overline{A} B + \overline{A} \overline{B}$$

(3) 列真值表

A	B	Y
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

(4) 分析逻辑功能

从真值表可知,其逻辑功能为:当输入相同时,输出为 0;当输入相异时,输出为 1。该电路为异或门。

例 6.2 某一组合逻辑电路如图 6.18 所示,试分析其逻辑功能。

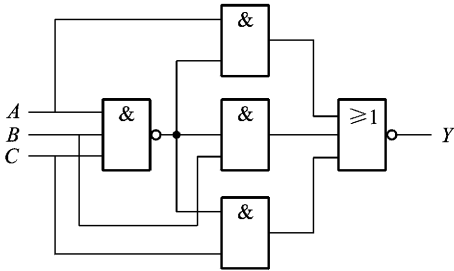


图 6.18 例 6.2 图

解 (1) 写出逻辑式

$$Y_1 = \overline{A}BCA, \quad Y_2 = \overline{A}BCB, \quad Y_3 = \overline{A}BCC$$
$$Y = Y_1 + Y_2 + Y_3 = \overline{A}BCA + \overline{A}BCB + \overline{A}BCC$$

(2) 化简

$$Y = \overline{A}BCA + \overline{A}BCB + \overline{A}BCC = \overline{A}BC(A + B + C)$$
$$= \overline{A}BC + \overline{A}B + \overline{A}C$$
$$= \overline{A}BC + \overline{A}B + \overline{A}C$$

(3) 列真值表

A	B	C	Y
0	0	0	1
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	0
1	0	0	0
1	0	1	0
1	1	0	0
1	1	1	1

(4) 分析逻辑功能

只有当 A、B、C 全为 0 或 1 时,输出 Y 才为 1,否则为 0。该电路称为“判一致电路”,可用于

判断三个输入端的状态是否一致。

3. 几种常用组合逻辑电路

组合逻辑电路的种类很多 ,常用的有加法器、编码器、译码器、数据选择器、数据分配器和比较器等典型的电路。

(1) 加法器

加法器是数字系统中最基本的运算部件之一 ,它分为半加器和全加器。半加器能完成一位数的相加 ,但在运算中只考虑了两个加数本身 ,而不考虑由低位来的进位。半加器的符号如图 6. 19(a)所示 ,它有两个输入端 A 、 B 和两个输出端 S 、 C ,其中 S 为本位和输出端 , C 为进位输出端。

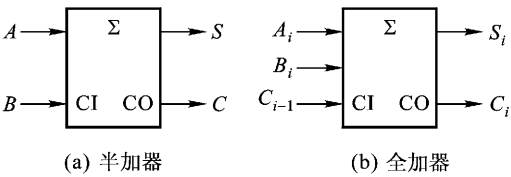


图 6. 19 半加器和全加器逻辑符号

全加器能进行两个同位二进制数及低位来的进位相加 ,得到“和”及“进位”。全加器可用两个半加器再加一个或门组成。图 6. 19(b)是全加器的逻辑符号 , A_i 、 B_i 分别为两个 1 位二进制数的输入端 , C_{i-1} 为低位来的进位输入 , S_i 和 C_i 分别为相加后得到本位的“和”及向高位的“进位”输出。具有全加功能的中规模集成电路的产品有双全加器、4 位全加器、8 位全加器等 ,例如 74LS82、74L183 是双两位全加器 ,74LS283 是四超前进位全加器。图 6. 20 是 74LS183 双全加器的管脚引线图。

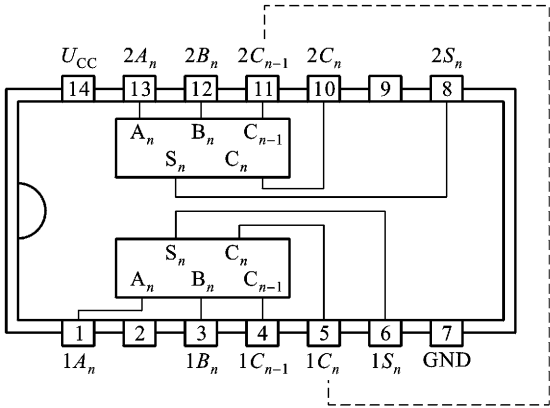


图 6. 20 74LS183 双全加器的管脚引线图

(2) 编码器

在数字电路中 ,经常要把各种输入信号(如符号、文字、十进制等)转换为二进制代码或二 – 十进制代码 ,这种转换过程称为编码。能够完成编码功能的组合逻辑电路称为编码器。用二进制代码对给定的输入信号进行编码的逻辑电路称为二进制编码器。把十进数 0 ~ 9 转化为二进

制代码的逻辑电路称为二 - 十进制编码器。二 - 十进制码又称为 BCD 码,二 - 十进制编码器又常称为 BCD 码编码器。编码器是一种多输入、多输出的逻辑电路。例如计算器的键盘就是由编码器组成。

(3) 译码器

译码是编码的逆过程,它是把二进制代码所表达的含义翻译出来。完成译码功能的电路称为译码器。

译码器按其功能,可分为二进制译码器、二 - 十进制译码器和显示译码器。二进制译码器能将二进制代码翻译成相应的控制信号,常见的有 2 线 - 4 线译码器、3 线 - 8 线译码器、4 线 - 16 线译码器。

二 - 十进制译码器能将二进制代码译成十进制数,它有四个输入端、十个输出端,所以又称为 4 线 - 10 线译码器。

显示译码器具有将译码后的数据或结果以十进制数的形式显示出来的功能。显示译码器通常由译码器、驱动器和显示器组成。

数字显示器是用来显示数字和符号的器件,常用的有荧光数码管、发光二极管显示器、液晶显示器。在经济型数控系统中,常用发光二极管显示器(也称 LED 显示器)。LED 显示器由七个发光二极管组成七段字型显示器,如图 6.21(a)所示。LED 显示有共阳极和共阴极两种接法,图 6.21(b)是共阳极接法,当某段二极管的阴极为低电平时,该段发光,图 6.21(c)是共阴极接法,当某段二极管的阳极为高电平时,该段发光。

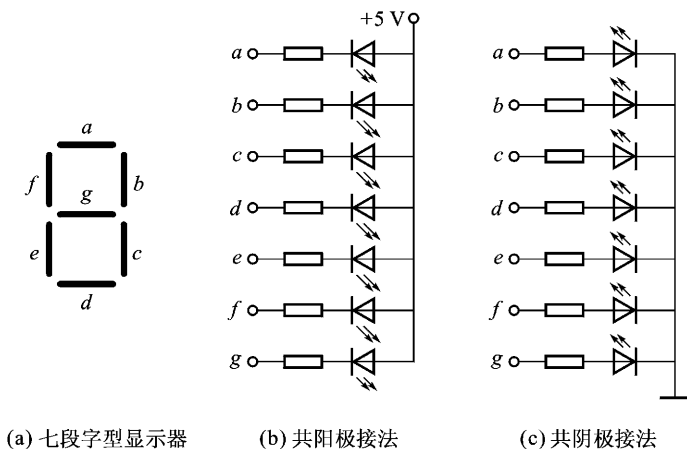


图 6.21 LED 显示器

图 6.22 是经济型数控系统中硬件译码的静态显示控制接口电路的一个实例。图中 74249 是四线七段 BCD 码译码器;它把 8031 输出的 4 位要显示的 BCD 码译成显示码送到锁存器 74LS373 锁存,锁存到哪一位由地址译码器 74LS138 选择。被选中的位经驱动器使相应的 LED 显示器显示数据。该电路与一般的译码显示器不同,多了锁存器和地址译码器。这是因为数据总线上的显示控制信号保持时间极短,导致显示是极短暂的,人眼无法分辨,所以需要数据锁存器来锁存 8031 送来的显示数据。

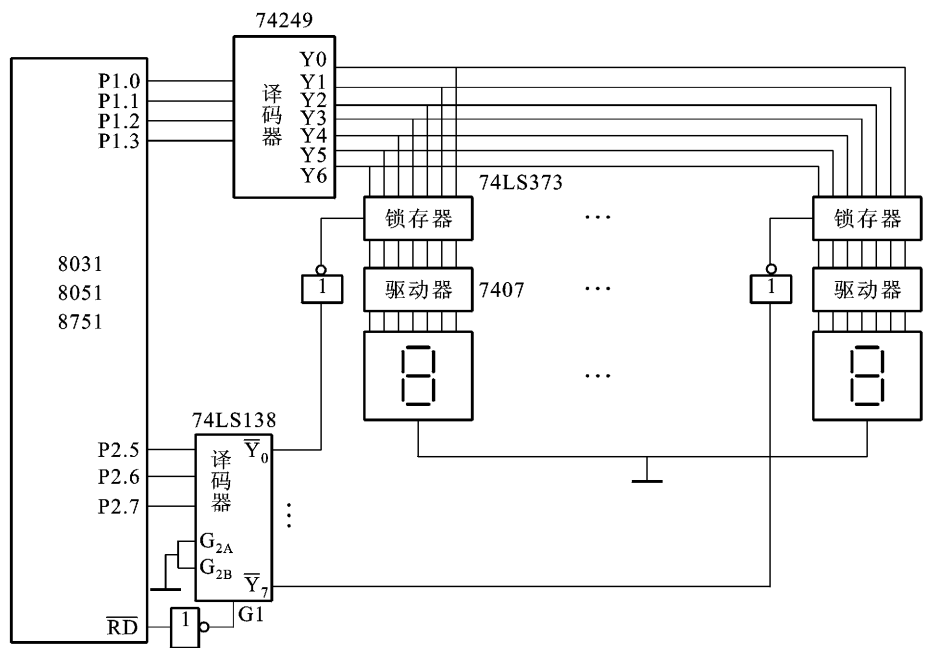


图 6.22 经济型数控系统显示控制接口电路

6.3 触发器和时序逻辑电路

上一节介绍的各种门电路及组合逻辑电路,它们输出的信号与电路原来的状态是无关的,也就是说它们不具有记忆功能,但在进行运算或自动控制的电路中,输入量常要与原来的状态进行比较,这就需要构成具有记忆功能的电路。这种电路在某一时刻的输出信号不仅与该时刻的输入信号有关,而且与电路原来的状态有关,这种电路称为时序逻辑电路。

6.3.1 触发器

触发器是时序逻辑电路的基本单元,它具有记忆功能。双稳态触发器有两种相反的稳定状态,按其逻辑功能可分为RS触发器、JK触发器、D触发器和T触发器。

1. 基本RS触发器

基本RS触发器由两个与非门交叉连接而成,如图6.23(a)所示。 $\overline{R_D}$ 和 $\overline{S_D}$ 是触发器的两个输入端, Q 和 $\overline{Q}$ 是两个输出端。在正常条件下, Q 和 $\overline{Q}$ 能保持相反的状态,通常把 Q 的状态规定为触发器的状态。当 $Q=1$, $\overline{Q}=0$ 时,触发器处于1态;当 $Q=0$, $\overline{Q}=1$ 时,触发器处于0态。可见,触发器有两种稳定的状态,所以称为双稳态触发器。

图6.23(b)是基本RS触发器的逻辑符号。图中输入端的小圆圈表示触发器由输入信号的低电平触发,或称低电平有效,故用 $\overline{R_D}$ 和 $\overline{S_D}$ 表示。

基本RS触发器输出与输入的逻辑关系如下:

① 当 $\overline{R_D}=0$, $\overline{S_D}=1$ 时,触发器为0状态。如果触发器原来处于1态,与非门G2的输入端 Q

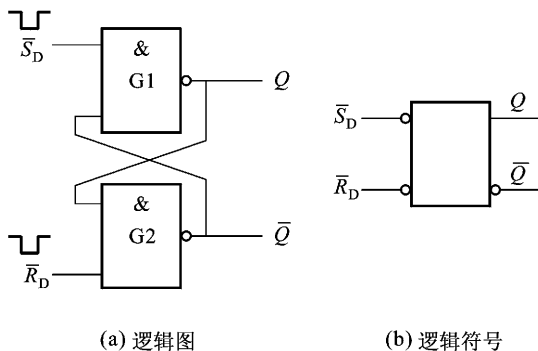


图 6.23 基本 RS 触发器

$=1, \overline{R_D}=0$, 则其输出端 $\overline{Q}$ 从 0 变为 1。这时, 与非门 G1 的两个输入端 $\overline{S_D}=1, \overline{Q}=1$, 使 G1 的输出端 Q 从 1 变为 0。

如果触发器原来处于 0 态, 则触发器仍保持 0 态。从以上的分析可以看出, $\overline{R_D}=0$ (即低电平) 能使触发器置 0, 所以把 $\overline{R_D}$ 称为置 0 端, 或称为复位端。

② $\overline{R_D}=1, \overline{S_D}=0$ 时, 触发器为 1 态。如果触发器原来处于 0 态, 与非门 G1 的输入端 $\overline{Q}=1, \overline{S_D}=0$, 则 G1 的输出端 Q 从 0 变为 1。这时, 与非门 G2 的两个输入端 $Q=1, \overline{R_D}=1$, 使 G2 的输出端 $\overline{Q}$ 从 1 变为 0。

如果触发器原来处于 1 态, 则触发器仍保持 1 态。由于 $\overline{S_D}=0$ (即低电平) 能使触发器置 1, 所以把 $\overline{S_D}$ 端称为置 1 端, 或称为置位端。

③ $\overline{R_D}=1, \overline{S_D}=1$ 时, 触发器保持原来状态不变。如果触发器原来处于 0 态, 则与非门 G2 的两个输入端 $Q=0, \overline{R_D}=1$, G2 的输出端 $\overline{Q}=1$; 与非门 G1 的两个输入端 $\overline{Q}=1, \overline{S_D}=1$, 则 G1 的输出端 $Q=0$, 因此触发器仍保持 0 态。

如果触发器处于 1 态, 同样 $\overline{R_D}=1, \overline{S_D}=1$ 使触发器仍保持 1 态, 这里请读者自行分析。

④ 当 $\overline{R_D}=0, \overline{S_D}=0$ 时, 触发器的状态不确定。由于 $\overline{R_D}=0, \overline{S_D}=0$, 使得两个与非门 G1 和 G2 的输出都为 1, 即 $Q=1, \overline{Q}=1$, 这时达不到 Q 与 $\overline{Q}$ 状态相反的逻辑要求, 触发器既不是 1 态, 也不是 0 态。当 $\overline{R_D}, \overline{S_D}$ 的低电平同时变为高电平时, 触发器可能变为 0 态, 也可能变为 1 态, 这将由各个偶然因素决定, 因此基本 RS 触发器是不允许 $\overline{R_D}$ 和 $\overline{S_D}$ 同时为 0 的。

综上所述, 可得基本 RS 的真值表, 见表 6.10。

表 6.10 基本 RS 触发器的真值表

$\overline{R_D}$	$\overline{S_D}$	Q
0	1	0
1	0	1
1	1	不定
0	0	不定

基本 RS 触发器电路简单, 它是组成功能更完善的各种双稳态触发器的基本部分。

2. 同步 RS 触发器

基本 RS 触发器的输出状态直接由 $\overline{R_D}$ 、 $\overline{S_D}$ 的触发脉冲控制。但在实际应用中,通常要求按一定的时间节拍来控制触发器的翻转。因此,在基本 RS 触发器的电路基础上,增加两个控制门(与非门)和一个时钟控制输入端,如图 6. 24(a)所示,这就是同步 RS 触发器,也称为钟控 RS 触发器。它的逻辑符号如图 6. 24(b)所示。

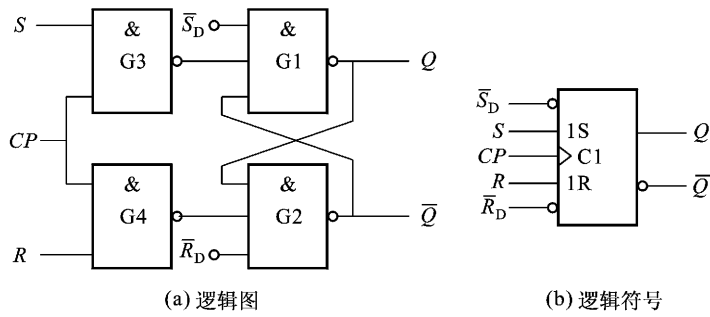


图 6. 24 同步 RS 触发器

由于 CP 端加时钟脉冲,RS 触发器的翻转就受时钟脉冲的控制。

① 当 $CP = 0$ 时,触发器的状态不变。这是因为与非门 G3、G4 被 CP 端的低电平关闭,无论输入端 R 和 S 的电平如何变化,G3、G4 门的输出都为 1,使得由 G1、G2 组成的基本 RS 触发器的状态保持不变。

② 当 $CP = 1$ 时,触发器按 R、S 端的输入状态来决定输出状态,时钟脉冲过去后,输出状态不变。触发器的输出状态的关系见表 6. 11。表中 Q^n 表示时钟脉冲来到之前触发器的输出状态, Q^{n+1} 表示时钟脉冲到来之后的状态。

$\overline{R_D}$ 和 $\overline{S_D}$ 分别是直接复位和直接置位端,用来使触发器直接置 0 和置 1。它们不受时钟脉冲的控制,一般在工作前用来清零或预置数,在工作过程中不用它们,不用时使它们处于 1 态(高电平)。

表 6. 11 同步 RS 触发器真值表

S	R	Q^{n+1}
0	0	Q^n
0	1	0
1	0	1
1	1	不定

图 6. 25 是同步 RS 触发器的工作波形图。当第一个时钟脉冲 CP 到来时, $S = R = 0$,触发器保持原来状态 $Q = 0$;第二个时钟脉冲 CP 到来时, $S = 1$ 、 $R = 0$,触发器翻转为 1,即 $Q = 1$;第三个时钟脉冲 CP 到来时, $S = 0$ 、 $R = 1$,触发器翻转为 0,即 $Q = 0$;第四个时钟脉冲 CP 到来时, $S = R = 1$,触发器输出端 $Q = 1$ 、 $\overline{Q} = 1$,当时钟脉冲过去后,触发器的状态可能为 1,也可能为 0,这是不定状态。

同步 RS 触发器的缺点是会产生“空翻”现象。这是因为在时钟脉冲 $CP = 1$ 的时间内,输入

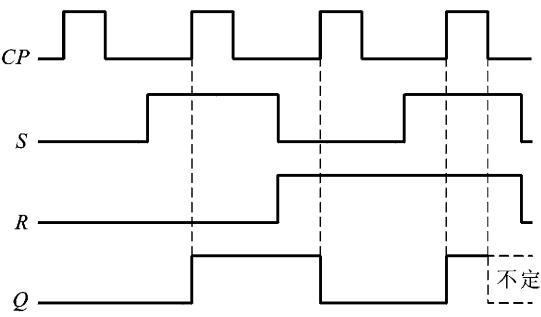


图 6.25 同步 RS 触发器工作波形图

端 R 、 S 的状态发生变化,导致触发器重新改变,这样触发器在一个时钟脉冲作用下,可能产生两次或多次翻转。为了防止空翻,可采用主从型触发器、维持阻塞型触发器等。

3. JK 触发器

JK 触发器是一种功能比较完善,应用很广的触发器,国内生产的主要是主从型触发器,它由两个同步 RS 触发器组成,此外还有边沿 JK 触发器等。JK 触发器的逻辑符号如图 6.26(a)所示,JK 触发器的两个输入端分别为 J 和 K ,时钟脉冲输入端为 CP , CP 端靠近边框处有一个小圆圈,表示下降沿触发,也就是触发器在时钟脉冲从 1 下跳为 0 时才能翻转。如果 CP 端无小圆圈,则表示为上升沿触发,即触发器在时钟脉冲从 0 上跳为 1 时才翻转。表 6.12 是 JK 触发器的真值表。

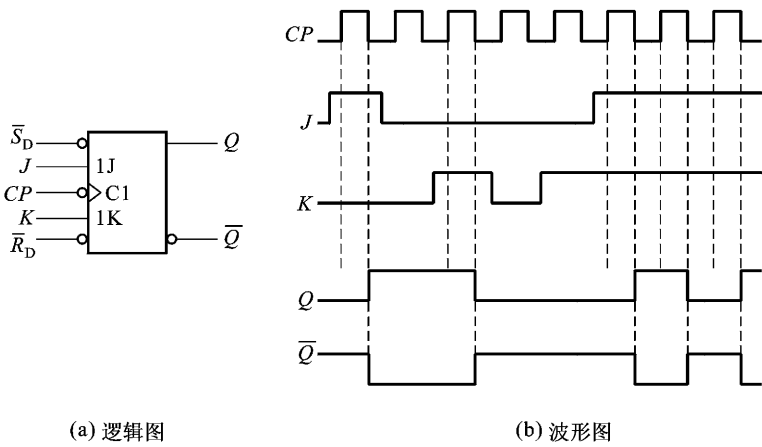


图 6.26 JK 触发器逻辑符号和波形图

表 6.12 JK 触发器真值表

J	K	Q^{n+1}
0	0	Q^n
0	1	0
1	0	1
1	1	$\overline{Q^n}$

从 JK 触发器的真值表上可以看出其逻辑功能如下：

- ① $J=0、K=0$ 时钟脉冲触发后 ,触发器的状态保持不变 ,即 $Q^{n+1}=Q^n$ 。
- ② $J=0、K=1$,不论触发器原来状态如何 ,时钟脉冲触发后 ,触发器状态均为 0 ,即 $Q^{n+1}=0$ 。
- ③ $J=1、K=0$,不论触发器原来状态如何 ,时钟脉冲触发后 ,触发器状态均为 1 ,即 $Q^{n+1}=1$ 。
- ④ $J=1、K=1$ 时钟脉冲触发后 ,触发器状态总与原来状态相反 ,即 $Q^{n+1}=\overline{Q^n}$ 。

图 6. 26(b)是 JK 触发器的工作波形图 ,由于该 JK 触发器是下降沿触发 ,所以 CP 上升沿时 ,触发器的状态不发生改变 ,只有 CP 下降沿时 ,触发器 Q 和 $\overline{Q}$ 的状态才随 $J、K$ 的波形发生变化。

4. D 触发器

D 触发器也是一种应用广泛的触发器 ,图 6. 27(a)是 D 触发器的逻辑符号 ,图 6. 27(b)是 D 触发器的工作波形图 ,表 6. 13 是 D 触发器的真值表。

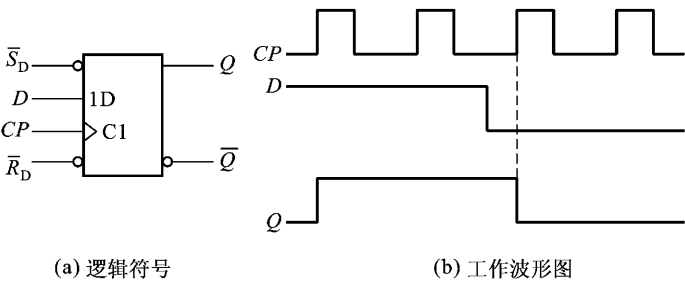


图 6. 27 D 触发器逻辑符号及工作波形图

表 6. 13 D 触发器真值表

D	Q^{n+1}
0	0
1	1

由表 6. 13 可以看出 , D 触发器的逻辑功能是 :在时钟脉冲触发后 ,触发器状态与 D 输入状态相同。

触发器的逻辑功能可以通过外部连接电路加以转换。图 6. 28 是由 JK 触发器与一个非门构成 D 触发器的连接图。值得注意的是 :这个 D 触发器与图 6. 27(a)所示的不同 ,是下降沿触发。

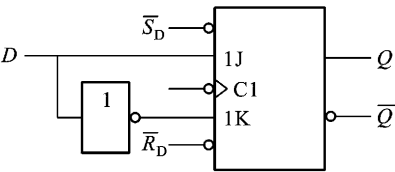


图 6. 28 用 JK 触发器接成的 D 触发器

5. *T* 触发器

T 触发器是一种可控制的计数触发器 ,其逻辑符号如图 6. 29(a)所示 ,将 *JK* 触发器 *J* 和 *K* 的输入端相接 ,作为 *T* 端 ,即构成 *T* 触发器 ,如图 6. 29(b)所示。

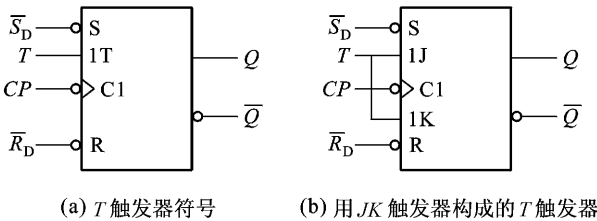


图 6. 29 *T* 触发器

表 6. 14 是 *T* 触发器的真值表。从真值表上可以看到 :当 $T=0$ 时 ,触发器无计数功能 ,时钟脉冲触发后状态不变 ;当 $T=1$ 时 ,触发器具有计数功能 ,每个时钟脉冲触发后 ,触发器都会翻转。

表 6. 14 *T* 触发器真值表

<i>T</i>	Q^{n+1}
0	Q^n
1	$\overline{Q^n}$

目前使用的触发器有 TTL 型 ,也有 MOS 型 ,虽然它们的内部结构不同 ,但功能相同。为了扩大触发器的使用范围常做成多输入结构 ,其符号如图 6. 30 所示 ,各同名输入端为与逻辑关系 ,即

$$J = J_1 J_2 \qquad K = K_1 K_2$$

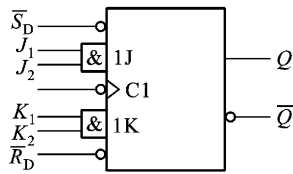


图 6. 30 多输入 *JK* 触发器符号

各类触发器的型号、外引线排列等资料可以从有关的数字集成手册中查找。图 6. 31 是触发器的外引线排列图 ,图(a)是 74110 单 *JK* 型触发器 ,图(b)是 CC4027 双 *JK* 型触发器。关于引线的符号表示有以下几点说明 :

- ① 图中符号上加横线的 表示负脉冲有效 ;不加横线的表示正脉冲有效。
- ② 双触发器以上的输入、输出符号前写同一数字的表示属于同一触发器 ,如 CC4027 中 1*K*、1*J*、1*CP* 等 1 字当头的是同一触发器 2 字当头的是第二个触发器。NC 表示空脚。
- ③ TTL 型与 MOS 型电源电压的表示是不同的 ,TTL 型用 U_{CC} 表示 ,MOS 型用 U_{DD} 表示 ,电源 U_{CC} 一般为 +5 V ;电源 U_{DD} 一般为 +3 ~ 18 V。同时 ,接地处 TTL 型用 GND 表示 ;MOS 型用 U_{SS} 表示。

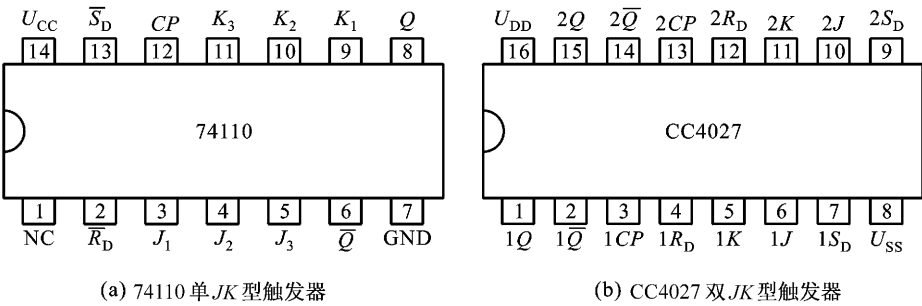


图 6.31 JK 触发器的外引线排列

6.3.2 寄存器

寄存器是用来暂时存放指令、数据或运算结果的一种时序逻辑电路。它由触发器和门电路构成,按功能可分为数码寄存器和移位寄存器。

1. 数码寄存器

数码寄存器有存储数码和清除原来数码的功能。一个触发器有两个稳定状态 1 和 0,可以存储 1 位二进制代码。用四个 D 触发器可以组成 4 位数码寄存器,如图 6.32 所示。

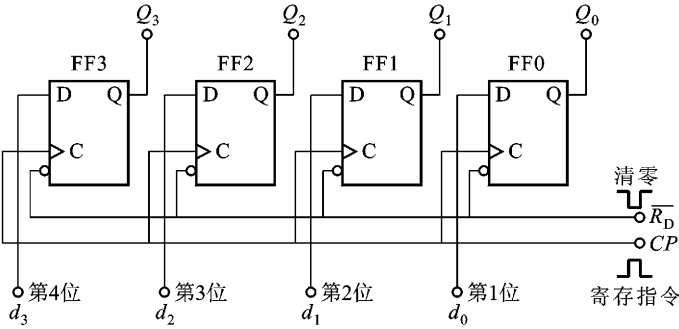


图 6.32 4 位数码寄存器

存入数据的过程为:首先清 0 (复位),即接受数码前在 $\overline{RD}$ 端加一个负脉冲,使所有触发器置 0,然后将要寄存的数码(例如 1011)送至各触发器的 D 输入端 $D_4D_3D_2D_1=1011$ 。当 CP 端的接收脉冲上升沿到达时,触发器 FF3、FF1、FF0 翻转为 1 态,FF2 保持 0 态不变,使 $Q_3Q_2Q_1Q_0=D_3D_2D_1D_0=1011$ 存储完毕。

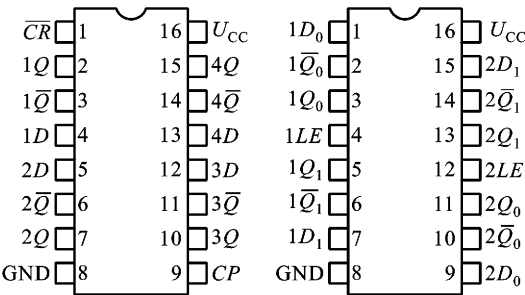
需要取出寄存的数码时,可在输出端 Q_3 、 Q_2 、 Q_1 、 Q_0 上同时取出。

从以上的存入和取出数据的过程看,各数码是同时存入,同时取出,因此这种寄存器称为并行输入、并行输出寄存器。

图 6.33(a)是 4 位集成寄存器 CT1175 的管脚引线图,表 6.15 是它的功能表。图中 CP 的“ $\uparrow$ ”表示为上升沿触发。从表上可以看出:只要 $\overline{CR}=0$,输出端 $Q_4 \sim Q_1$ 全部清零,而与时钟脉冲 CP 无关;当 $\overline{CR}=1$ 时,CP 脉冲的上升沿使 $Q_4Q_3Q_2Q_1=D_4D_3D_2D_1$ 、 $\overline{Q_4Q_3Q_2Q_1}=\overline{D_4D_3D_2D_1}$;当 $\overline{CR}=1$ 、CP=0 时,寄存器保持原来状态。

图 6.33(b)是双 2 位锁存器 CT4375 的管脚引线图,表 6.16 是它的功能表。锁存器是一种

具有锁存功能的寄存器 ,从表 6. 16 可以看出 ,只有当 $LE = 1$ 时 ,它才能接受信号(它无时钟 CP ,因为它是由门电路构成)。



(a) 4 位集成寄存器 CT1175 (b) 是双 2 位锁存器 CT4375

图 6. 33 寄存器和锁存器的管脚引线图

表 6. 15 CT1175 功能表

$\overline{CR}$	CP	$D_4 \sim D_1$	Q^{n+1}	$\overline{Q^{n+1}}$	功能
0	×	×	0	1	清除
1	↑	1	1	0	送数
1	↑	0	0	1	送数
1	0	×	Q^n	$\overline{Q^n}$	保持

表 6. 16 CT4375 功能表

D	LE	Q^{n+1}	$\overline{Q^{n+1}}$	功能
0	1	0	1	置 0
1	1	1	0	置 1
×	0	Q^n	$\overline{Q^n}$	保持

2. 移位寄存器

移位寄存器除了具有清除、存储数码的功能外 ,还具有移位功能。根据移位的方向 ,移位寄存器可分为单向移位寄存器和双向移位寄存器。

(1) 单向移位寄存器

图 6. 34 是由四个 D 触发器构成的 4 位右移寄存器逻辑图。各触发器的输出端 Q 与右边相邻的触发器输入端 D 相连 ,它们的 CP 端和清零端 $\overline{R_D}$ 分别相连。数码由高位触发器 D_3 端串行输入。所谓串行输入 ,就是寄存的数码由低位到高位(或由高到低位)依次输入。

工作过程 :设把数码 1011 右移输入寄存器。输入前先清零。第 1 个 CP 脉冲的上升沿到来时 ,输入数码 1011 中的最低位的 1 经输入端 D 存入触发器 FF3 ,寄存器 $Q_3Q_2Q_1Q_0 = 1000$;第 2 个 CP 脉冲的上升沿到来时 ,触发器 FF3 和 FF2 同时翻转 ,1011 右边向左第 2 位 1 经输入端 D 存

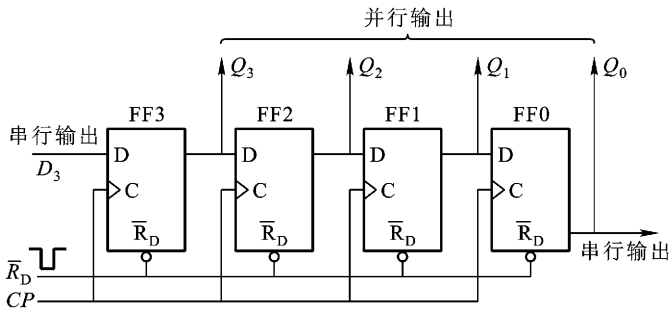


图 6.34 4 位右移寄存器

入触发器 FF3 ,而 FF3 中原来存入的 1 向右移动 1 位 ,存入 FF2 中 ,则 $Q_3Q_2Q_1Q_0 = 1100$,依此类推 ,第 3 个 CP 脉冲的上升沿到来时 , $Q_3Q_2Q_1Q_0 = 0110$;第 4 个 CP 脉冲的上升沿到来时 , $Q_3Q_2Q_1Q_0 = 1011$,这样要存入的数据 ,依次存入并右移 ,完成了数码的串行输入。以上串行输入数码右移寄存的过程 ,可用表 6.17 表示。

表 6.17 4 位右移寄存器状态表

CP	输入数据	输出				移位过程
		Q_3	Q_2	Q_1	Q_0	
0	1	0	0	0	0	清零
1	1	1	0	0	0	输入第一位
2	0	1	1	0	0	右移一位
3	1	0	1	1	0	右移二位
4	0	1	0	1	1	右移三位

如果要取出数码 1011 ,则有两种方式 :一是并行输出 ,即从四个触发器 Q 端得到数码 1011 ;另一种是串行输出 ,即再输入四个 CP 脉冲 ,则可以从 Q_0 端依次得到串行输出的 1011。

上述讨论的是单向移位寄存器中的右移寄存器 ,此外还有左移寄存器 ,其构成原理与右移寄存器相同 ,但数码是从高位到低位依次输入低位触发器的输入端。

(2) 双向移位寄存器

双向移位寄存器是指被输入的数码既可左移 ,也可右移 ,但在 CP 脉冲作用下 ,寄存器中的数据只能单向移动一次。

图 6.35 是 4 位双向移位寄存器 74LS194 的管脚引线图。74LS194 具有左移、右移、并行输入、保持等功能。 $\overline{CR}$ 是清零端。 $\overline{D_3D_2D_1D_0}$ 是并行输入端 ,CP 是时钟脉冲端。表 6.18 是 74LS194 的功能表。从表中可以看出当 $\overline{CR} = 0$ 时 ,寄存器清零。当 $\overline{CR} = 1$ 时 ,工作方式控制端 M_1 和 M_2 的取值 00、01、10、11 决定了寄存器的功能分别为保持、右移、左移、并行输入。

74LS194 4 位双向移位寄存器是一种常用的、功能较强的中规模集成电路 ,与它的逻辑功能和管脚引线都相容的集成电路有 CC40194 和 C422 等型号。

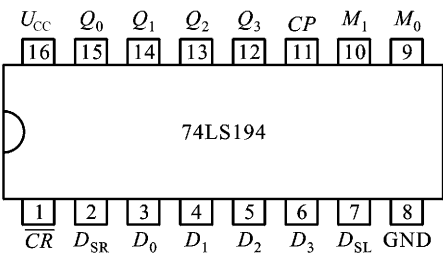


图 6.35 74LS194 双向移位寄存器管脚引线图

表 6.18 74LS194 功能表

$\overline{CR}$	CP	M_1	M_0	功能
1	×	0	0	保持
1	↑	0	1	右移(Q_0 向 Q_3 顺序移位)
1	↑	1	0	左移(Q_3 向 Q_0 顺序移位)
1	↑	1	1	并行输入
0	×	×	×	置 0

(3) 环形分配器

图 6.36 是环形分配器的逻辑图。它由三个 JK 触发器组成 ,各位触发器 J 、 K 端的逻辑关系为

$$\begin{aligned} J_0 &= \overline{Q_2} , & K_0 &= Q_2 \\ J_1 &= Q_0 , & K_1 &= \overline{Q_0} \\ J_2 &= Q_1 , & K_2 &= \overline{Q_1} \end{aligned}$$

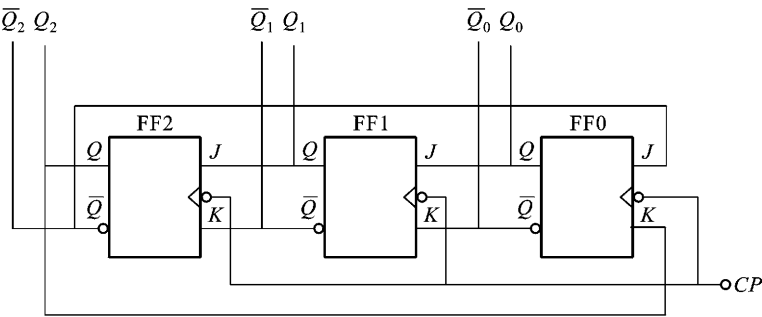


图 6.36 环形分配器

设初态 $Q_2 = Q_1 = Q_0 = 0$,则由此可以列出环形分配器的状态表 ,见表 6.19。由表 6.19 可画出环形分配器的波形图 ,如图 6.37 所示。

由图 6.37 可见 Q_0 、 Q_1 、 Q_2 、 $\overline{Q_0}$ 、 $\overline{Q_1}$ 、 $\overline{Q_2}$ 依次滞后一个角度 ,并且 Q_0 和 $\overline{Q_0}$ 、 Q_1 和 $\overline{Q_1}$ 、 Q_2 和 $\overline{Q_2}$ 都是互为反量。这六个顺序脉冲可用作三相桥式逆变电路中晶闸管、功率晶体管或功率场效晶体管等开关元件的控制电压 ,这些内容后面将用到。

表 6.19 环形分配器的状态表

CP	Q_2	Q_1	Q_0
0	0	0	0
1	0	0	1
2	0	1	1
3	1	1	1
4	1	1	0
5	1	0	0
6	0	0	0

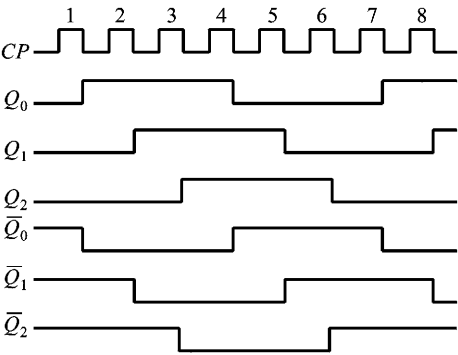


图 6.37 环形分配器的波形图

6.3.3 计数器

在计算机和自动控制系统中 ,往往需要对脉冲的个数进行计数 ,以实现测量、运算和控制 ,计数器就是具有这种计数功能的逻辑电路。

计数器的种类很多 ,按计数功能分 ,有加法计数器、减法计数器以及两者兼有的可逆计数器 ;按进位制分 ,有二进制计数器、十进制计数器等 ;按计数器内部触发器的动作步调分 ,有同步计数器和异步计数器。

1. 二进制异步加法计数器

图 6.38 是 4 位二进制异步加法计数器的逻辑电路。它由四个 JK 触发器组成 ,每个触发器 J、K 端都接高电平 ,所以都处于计数状态。图中低位触发器的 Q 端与相邻高位触发器的 C 端相连 ,即低位的 Q 输出作为相邻高位的时钟信号输入 ,最低位的 C 端为计数器时钟脉冲 CP 的输入端。这样 ,后一级触发器的翻转受前一级触发器的控制。

计数器前 ,先将计数器清零 , $\overline{R_0}$ 端加一负电平 ,则 $Q_3Q_2Q_1Q_0 = 0000$ 。第 1 个计数脉冲到来时 ,触发器 FF0 翻转为 1 ,其他各触发器状态不变 , $Q_3Q_2Q_1Q_0 = 0001$;当第 2 个计数脉冲到来后 ,

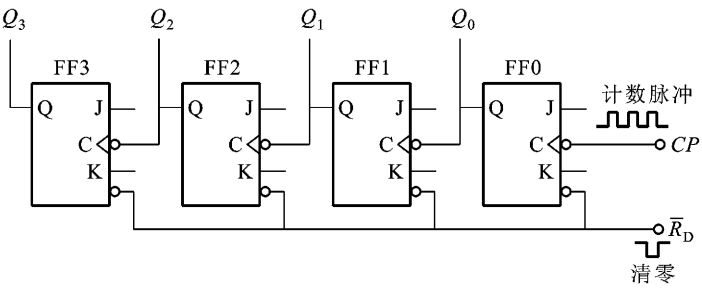


图 6.38 4 位二进制异步加法计数器

触发器 FF0 的输出 Q_0 由 1 变为 0 ,使得触发器 FF1 的 C 端受到一个进位的负脉冲 ,FF1 由 0 翻转为 1 ,FF2 和 FF3 状态不变 ,则 $Q_3Q_2Q_1Q_0 = 0010$,其余依此类推 ,可得计数器的状态表 ,见表 6.20。计数器的工作波形如图 6.39 所示。

表 6.20 4 位二进制加法计数器状态表

CP	Q_3	Q_2	Q_1	Q_0
0	0	0	0	0
1	0	0	0	1
2	0	0	1	0
3	0	0	1	1
4	0	1	0	0
5	0	1	0	1
6	0	1	1	0
7	0	1	1	1
8	1	0	0	0
9	1	0	0	1
10	1	0	1	0
11	1	0	1	1
12	1	1	0	0
13	1	1	0	1
14	1	1	1	0
15	1	1	1	1
16	0	0	0	0

从表 6.20 中可以看出 ,当第 16 个脉冲到来后 ,计数器又回到初态 , $Q_3Q_2Q_1Q_0 = 0000$,开始

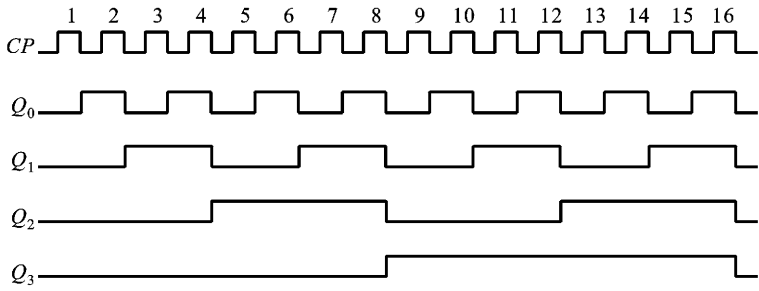


图 6.39 二进制异步加法计数器工作波形图

进入新的计数周期。

二进制异步加法计数器具有分频功能,这可以从图 6.39 中看出。二进制异步加法计数器后一级触发器输出脉冲的频率是它前一级低位触发器输出脉冲频率的二分之一,因此 Q_0 、 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 的脉冲频率分别是计数脉冲频率的二分频、四分频、八分频和十六分频。

这种计数器的计数速度较慢,这是因为计数器脉冲只加到最低位触发器 FF0 的 C 端,而其他触发器则由相邻低位触发器的输出信号来触发,因而各触发器的状态变化时刻不一致,与计算脉冲不同步,所以称为“异步”。

2. 二进制同步计数器

为了提高计数器的计数速度,可将计数脉冲 CP 同时加到计数器各触发器的 C 端,使它们状态的变换与 CP 同步,所以称为二进制同步计数器。图 6.40 是 4 位二进制同步计数器的逻辑电路。该电路由四个 JK 触发器构成,其中 FF2、FF3 为多输入的 JK 触发器。触发器 FF0 的 J、K 端接高电平,各触发器的输入状态分别为

$$J_0 = K_0 = 1 \quad J_1 = K_1 = Q_0 \quad J_2 = K_2 = Q_1 Q_0 \quad J_3 = K_3 = Q_2 Q_1 Q_0$$

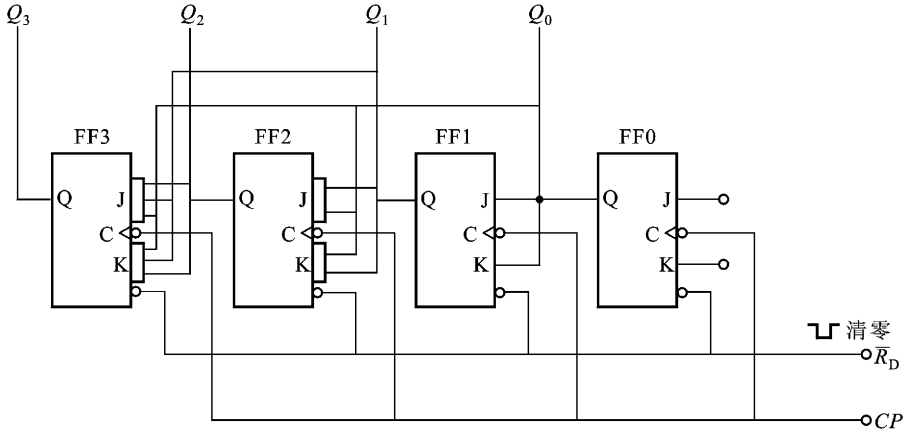


图 6.40 4 位同步二进制加法器

计数器清零后,输入计数脉冲 CP。由于计数脉冲 CP 同时加至各触发器的 C 端,因此当各个触发器翻转时就会同步翻转。计数器的状态表、工作波形图与二进制异步加法计数器完全相同。

3. 集成计数器

中规模集成计数器同样有 TTL 和 CMOS 两大系列的产品 ,各系列产品中又有二进制、十进制和任意进制等多种类型 ,而且功能齐全 ,使用方便。下面以 74LS161 为例作一介绍。

74LS161 是同步二进制计数器 ,它具有计数、清零、置数、保持多种功能 ,它的管脚引线图如图 6.41 所示。图中 $D_3、D_2、D_1、D_0$ 是数据输入端 , $Q_3、Q_2、Q_1、Q_0$ 是计数输出 Q_{CC} 是进位输出端 , CP 是计数脉冲输入端 , $\overline{CR}$ 是清零端 , $\overline{LD}$ 是置数端 , $P、T$ 是控制端。

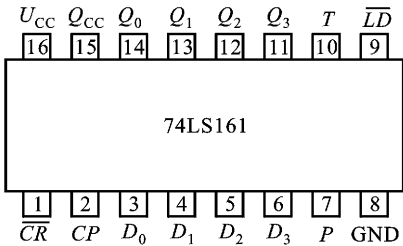


图 6.41 74LS161 管脚引线图

表 6.21 是 74LS161 的功能表。当 $CR = 0$ 时 ,清零 $Q_3Q_2Q_1Q_0 = 0000$;当 $\overline{CR} = 1、\overline{LD} = 0$ 时 ,在计数脉冲 CP 上升沿作用下 ,数据置入计数器 $Q_3Q_2Q_1Q_0 = D_3D_2D_1D_0$;当控制端 $P = T = 1、\overline{CR} = \overline{LD} = 1$ 时 ,在脉冲 CP 上升沿作用下 ,进行二进制计数。当输入到第 15 个脉冲后 , $Q_3Q_2Q_1Q_0 = 1111$,使进位输出端 $Q_{CC} = 1$ 。 Q_{CC} 接高位计数器 T 端 ,使高位计数器进入计数状态 ,从而完成向高位的进位。当 $P、T$ 任一端为 0 时 ,且 $\overline{CR} = \overline{LD} = 1$ 时 ,无论有无脉冲 ,计数器保持原状态不变。

表 6.21 74LS161 功能表

CP	$\overline{CR}$	$\overline{LD}$	P	T	$D_3D_2D_1D_0$	$Q_3Q_2Q_1Q_0$
×	0	×	×	×	× × × ×	0 0 0 0
↑	1	0	×	×	$D_3D_2D_1D_0$	$D_3D_2D_1D_0$
×	1	1	0	×	× × × ×	保持
×	1	1	×	0	× × × ×	保持
↑	1	1	1	1	× × × ×	计数

6.4 D/A 与 A/D 转换器

自动控制系统中监测、采集的信号(如温度、速度、位移等物理量)都是模拟信号 ,这些信号必须转换成数字信号后 ,计算机才能识别和处理。同样对于计算机处理结果 ,即数字信号 ,必须转换成模拟信号才能驱动控制系统的执行机构。将模拟信号转换成数字信号的电路称为模数转换器 ,简称 A/D 转换器 ;将数字信号转换成模拟信号的电路称为数模转换器 ,简称 D/A 转换器。

由于 D/A、A/D 转换器的应用十分广泛 ,因此目前有各种 D/A、A/D 集成电路芯片供选用 ,本节就着重介绍典型芯片及其应用。

6.4.1 D/A 转换器

D/A 转换器的集成芯片有多种型号 ,典型的有 DAC0832。DAC0832 是具有两个寄存器(输

入寄存器和数据寄存器)的8位电流输出型D/A转换器,它是DAC0830系列产品中的一种,此系列中还有DAC0830、DAC0831等其他产品,它们都是8位D/A转换器,完全可以相互代换。DAC0832采用CMOS工艺,所有引脚的逻辑电平与TTL兼容。DAC0832的管脚引线图如图6.42(a)所示,图6.42(b)是DAC0832的原理框图。

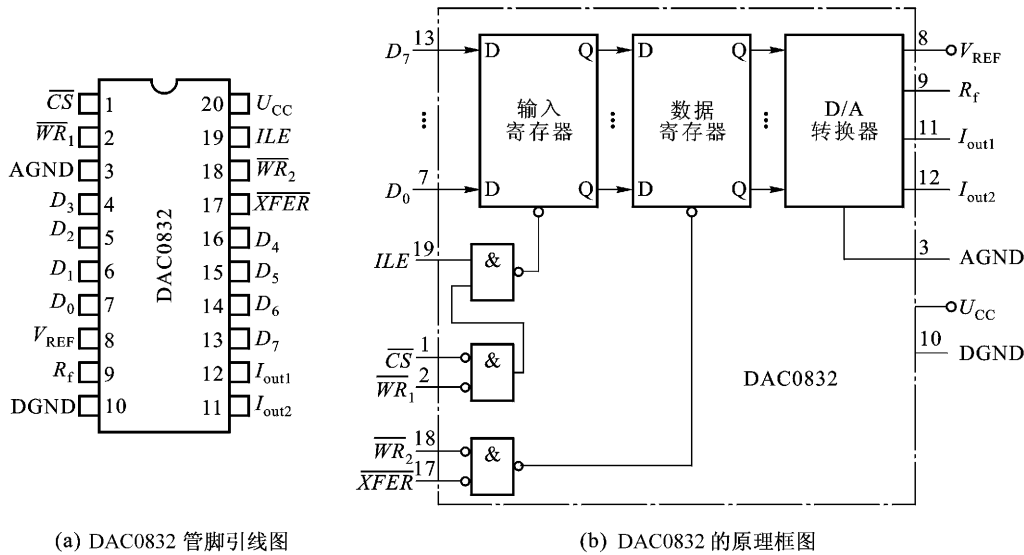


图 6.42 DAC0832 的管脚引线及原理框图

各引线的功能简述如下：

$D_0 \sim D_7$ 8 位数据输入线。

I_{out1} 、 I_{out2} : 电流(模拟信号)信号输出端。

ILE : 数据锁存允许信号,高电平有效。

$\overline{CS}$: 片选信号,低电平有效。

$\overline{XFER}$: 数据转移控制信号,低电平有效。

$\overline{WR_1}$: 写信号 1,低电平有效。当 $\overline{CS} = 0$ 、 $ILE = 1$ 、 $\overline{WR_1} = 0$ 时,输入数据被送入寄存器;当 $\overline{WR_1} = 1$ 时,输入寄存器中的数据被锁存,不能修改其中的内容。

$\overline{WR_2}$: 写信号 2,低电平有效。当 $\overline{XFER} = 0$ 、 $\overline{WR_2} = 0$ 时,输入寄存器的内容被送入数据寄存器,并进行 D/A 转换。

R_f : 反馈电阻,用作外接运算放大器的负反馈电阻。

V_{REF} : 参考电压输入端。

AGND : 模拟地。

DGND : 数字地。

U_{CC} : 工作电源输入端。

图 6.43 是 DAC0832 与单片微型计算机 8031 的单缓冲方式接口电路。DAC0832 在与单片微型计算机连接时,有直接、单缓冲和双缓冲三种工作方式。直接工作方式是将输入寄存器和数据寄存器都处于开通(跟随)状态。它除用于连续反馈控制的环路中外,其他实际应用较少。单缓冲输入方式是使输入寄存器和数据寄存器中的任意一个始终工作于直通(跟随)状态,另一个

处于受控的锁存器状态。当只有一路模拟信号输出 ,或几路模拟信号不需要同时输出时 ,可采用单缓冲方式的接口电路。双缓冲工作方式采用两步写操作 ,使 D/A 转换器输出一个数据的同时 ,采集下一个数据进入输入寄存器 ,提高转换速度。双缓冲方式主要用于多路 D/A 同步输出系统。当 8031 的地址线选通 DAC8032 后 ,只要发出 $\overline{WR}$ 信号(即 $\overline{WR} = 0$) ,就能一步完成数字量的输入锁存和 D/A 转换输出。

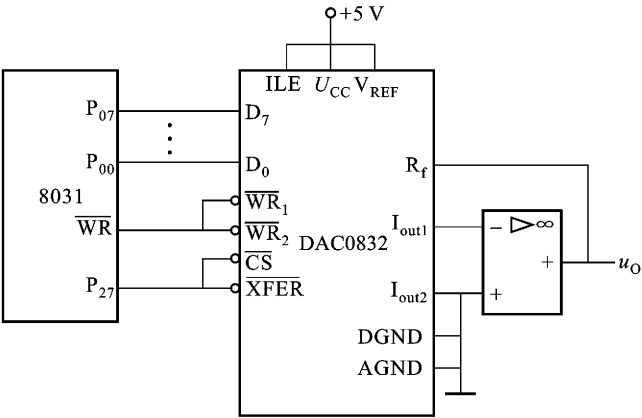


图 6.43 DAC0832 配接微机的接口电路

6.4.2 A/D 转换器

A/D 转换器按其转换的原理分有计数式、逐次逼近式、双积分式和并行式四种 ,其中在工业测量与控制系统中最常用的是逐次逼近式和双积分式两种。逐次逼近式 A/D 转换器是用比较器逐位进行比较 ,从最高位 D_{n-1} 至最低位 D_0 的逐次检测来逼近被转换的输入模拟电压 ,这类的典型产品有 ADC0801、ADC0809 等 ,下面以 ADC0809 为例作一介绍。

ADC0809 是 8 位逐次逼近式单片 CMOS 器件 ,有 8 路模拟量输入通道 ,输出为 8 位二进制数 ,输出具有三态锁存功能 ,可与 TTL 电平兼容 ,其管脚引线如图 6.44 所示。各引线的功能简介如下 :

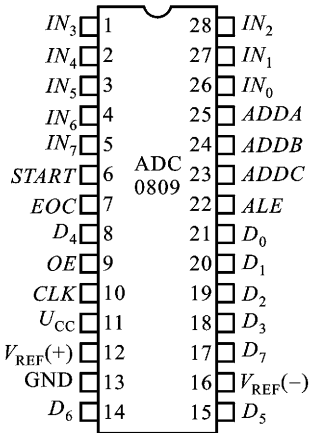


图 6.44 ADC0809 管脚引线图

$IN_0 \sim IN_7$ 8 个模拟量输入端。

$D_0 \sim D_7$ 8 位数字量输出端。

$START$:启动 A/D 转换 ,高电平有效。

EOC 转换结束信号。在 A/D 转换结束时 ,发出正脉冲 ,表示 A/D 转换结束。此信号可作为 CPU 查询 A/D 转换是否完成信号 ,也可作为向 CPU 发出中断申请的信号。

OE 输出允许控制端 ,高电平有效。当 $OE = 1$ 时 ,CPU 可从 ADC0809 中读取数据 ,同时也可以作为 ADC0809 的片选信号。

CLK :实时时钟。可通过外接 RC 电路改变频率 ,也可用系统 ALE 分频获得。

ALE 地址锁存信号 ,高电平有效。当 $ALE = 1$ 时 ,允许 $ADDA \sim ADDC$ (A、B、C)所示通道地址读入地址锁存器 ,选中模拟量输入。

$ADDA$ 、 $ADDB$ 、 $ADDC$ (A、B、C) 通道号选择端口。根据 A、B、C 的组合 ,可对 8 个模拟量输入通道选通 1 个 ,其排列序从低到高依次为 A、B、C ,例如 $CBA = 000$ 选通 IN_0 通道 ; $CBA = 001$,选通 IN_1 通道 ; $CBA = 101$,选通 IN_5 通道等。

$V_{REF}(+)$ 、 $V_{REF}(-)$:外接参考电压端口 ,给 ADC0809 提供基准参考电压 ,一般 $V_{REF}(+)$ 接 +5 V , $V_{REF}(-)$ 接地。

V_{CC} 、 GND :电源电压和接地端。

图 6.45 是 ADC0809 与 8031 单片机的接口电路。因为 ADC0809 的输出部分有三态缓冲器 ;所以其输出数据线 $D_0 \sim D_7$ 可以直接与 PO 口连接。ADC0809 的通道号选择端口 $ADDA$ 、 $ADDB$ 、 $ADDC$ 均经 74LS373 锁存 ,与 PO 口的三根 I/O 线相连接 ,由单片机控制 ,选择不同的模拟量输入通道。单片机的写控制信号 $\overline{WR}$ 和片选信号(P2.7)经或非门与 $START$ 及 ALE 相连 ,控制被选中通道的模拟量接入 A/D 转换器 ,启动 A/D 转换。单片机的读控制信号 $\overline{RD}$ 和片选信号(P2.7)通过或非门与 ADC0809 的 OE 相连 ,控制读出转换结果(即允许输出数字量)。

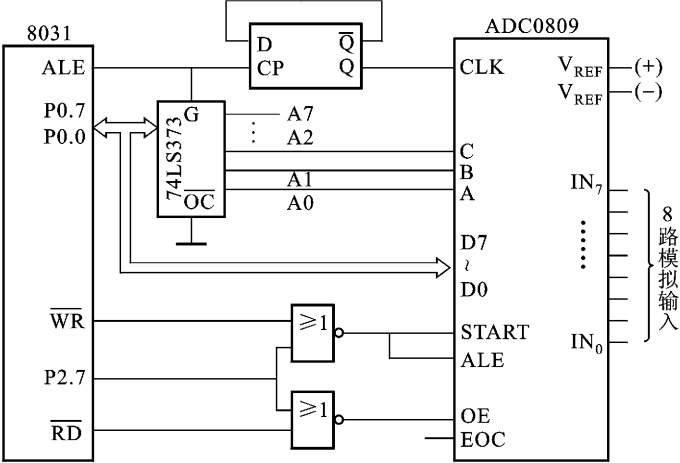


图 6.45 ADC0809 与单片机的接口电路

在读取转换器结果时 ,如果采用软件延时方法 ,则 ADC0809 的 EOC 可悬空 ;如果采用查询方式 , EOC 需接 8031 的 I/O 口 ;如果采用中断方式 , EOC 需经非门(即反向)与 INT_1 相连。

思考与练习

6.1 试从工作信号和晶体管的工作状态来说明模拟电子电路和数字电子电路的区别。

6.2 逻辑运算中的 1 和 0 是否表示两个数字？

6.3 将下列二进制数转换为十进制数：

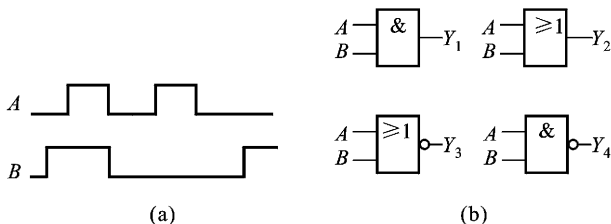
(1) 1011 (2) 11010 (3) 100101 (4) 101110

6.4 将下列十进制数转换成二进制数：

(1) 15 (2) 37 (3) 153 (4) 256

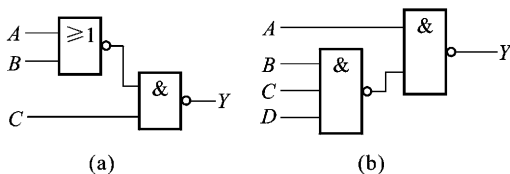
6.5 画出与门、或门、非门、与非门、或非门和异或门的逻辑符号,并写出它们的逻辑函数表达式。

6.6 已知各门电路输入信号 A 、 B 的波形如题图 6.6 所示,试画出图中所示各门电路的输出波形。



题图 6.6

6.7 写出题图 6.7 所示电路的逻辑函数式。



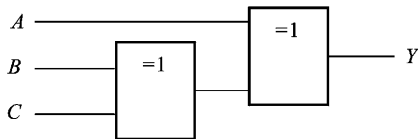
题图 6.7

6.8 画出以下逻辑函数的逻辑图。

(1) $Y = \overline{A + B + C}$ (2) $Y = AB + C$

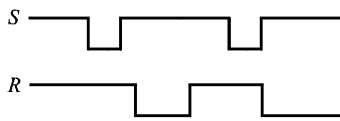
(3) $Y = \overline{ABAC}$ (4) $Y = \overline{\overline{AB}BC}$

6.9 分析题图 6.9 所示电路的逻辑功能并列出逻辑状态表。



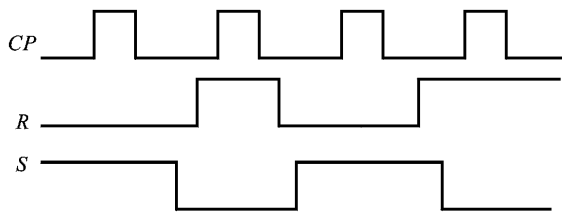
题图 6.9

- 6.10 什么是半加器 ,什么是全加器 ?
- 6.11 什么是编码 ,什么是译码 ?
- 6.12 画出用与非门组成的基本 RS 触发器的逻辑图 ,列出真值表 ,并说出有哪些功能 ?
- 6.13 题图 6.13 是图 6.23 所示的基本 RS 触发器的输入波形 ,试画出 Q 的波形。



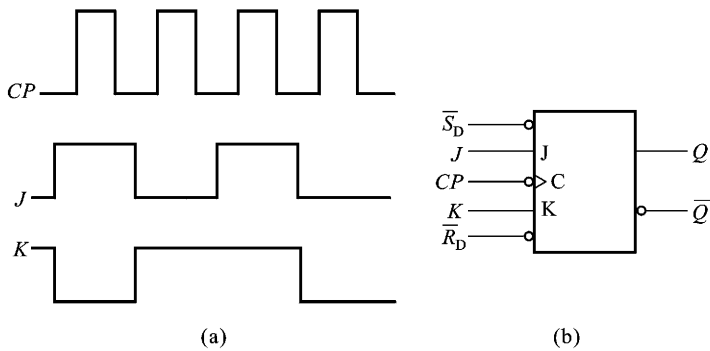
题图 6.13

- 6.14 题图 6.14 是图 6.24 所示的同步 RS 触发器 R 、 S 端和 CP 端的输入波形 ,设初状态 $Q = 0$,试画出 Q 、 $\overline{Q}$ 的波形。



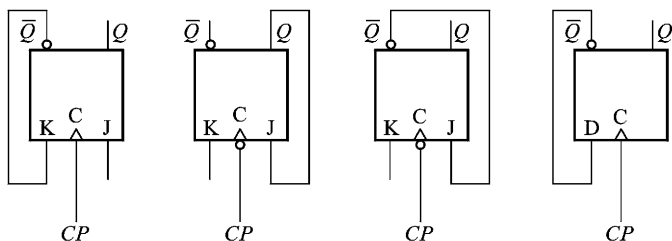
题图 6.14

- 6.15 设题图 6.15(b)所示的 JK 触发器的初始状态 $Q = 0$,试画出题图 6.15(a)所示的 Q 端波形图。



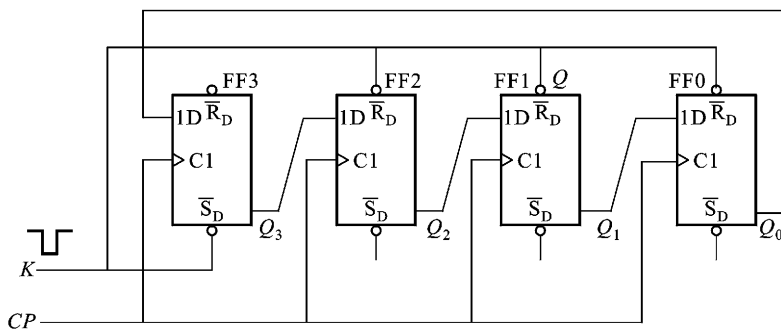
题图 6.15

- 6.16 设题图 6.16 所示各触发器初始状态 $Q = 0$,试画出各电路分别对应于 5 个 CP 脉冲下输出端 Q 的波形。
- 6.17 时序逻辑电路与组合逻辑电路的主要区别是什么 ?
- 6.18 同步计数器和异步计数器有何区别 ?
- 6.19 画出用 D 触发器组成的 3 位二进制加法计数器电路。



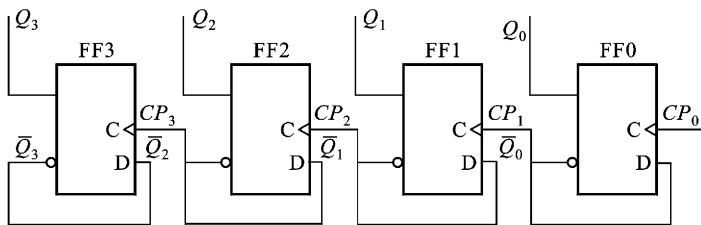
题图 6.16

6.20 设题图 6.20 所示电路的初始状态 $Q_3Q_2Q_1Q_0 = 1000$, 试画出在 6 个 CP 脉冲作用下 Q_3 、 Q_2 、 Q_1 、 Q_0 的波形图。



题图 6.20

6.21 题图 6.21 所示电路是用 D 触发器构成的 4 位异步二进制计数器, 设初态 $Q_3Q_2Q_1Q_0 = 0000$, 试画出在 16 个 CP 脉冲作用下的 Q_0 、 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 的波形图。



题图 6.21

第 7 章

数控机床的控制系统概述

本章将学到：

1. 什么是数控技术、数控系统和数控机床 ,数控系统对机床的控制包括哪几方面？
2. 数控机床控制系统的组成有哪些 ,它们的作用各是什么？
3. 数控机床的控制方式有几种 ,各有什么特点？
4. 数控机床的接口有几类 ,它们的接口规范是什么？

7.1 数控机床的控制系统

随着科学技术和社会生产的不断发展 ,机械制造技术发生了深刻的变化。近年来 ,由于市场竞争日趋激烈 ,传统的普通加工设备已经难以适应高效率、高质量、多品种的加工要求 ,而以微电子技术为基础 ,将传统的机械制造技术与现代控制技术、传感检测技术、信息处理技术以及网络通信技术有机地结合在一起构成高度信息化、自动化的柔性制造系统正好满足当今市场竞争和工艺发展的需要。可以说 ,微机数字控制技术的应用是机械制造行业现代化的标志。

7.1.1 数字控制技术简介

1. 数字控制技术

数字控制(Numerical Control)技术 ,简称数控技术 ,是用数字化信号对机床运动及其加工过程进行自动控制的一种方法。它是近代发展起来的一种自动控制技术。

数控技术不仅用于机床的控制 ,而且还用于其他设备的控制 ,产生了诸如数控绘图机、数控测量机等数控设备 ,但其中最早产生的、目前应用最广泛的是机械加工行业中的各种机床 ,因此数控技术一般是指机床的数控技术。

2. 数控系统和数控机床

用数字控制技术实现自动控制的系统称为数控系统。数控系统中的控制信息是数字量 ,其硬件基础是数字逻辑电路。最初的数控系统是由数字逻辑电路构成的 ,因此也被称为硬件数控系统。随着微机技术的发展 ,现代数控系统采用存储程序的专用计算机或通用计算机来实现部分或全部基本数控功能 ,这类数控系统就称为计算机数控系统(Computer Numerical Control) ,简称 CNC 系统。计算机数控系统是在硬件和软件的共同作用下完成数控任务的 ,具有真正的“ 柔性 ”。

数控系统对机床的控制包括顺序控制和数字控制两个方面。顺序控制是指对刀具交换、主轴调速、冷却液开关、工作台的极限位置等一类开关量的控制,数字控制是指机床进给运动的控制,用于实现对工作台或刀架的位移、速度这一类数字量的控制。数控系统与机床的有机结合称为数控机床,如数控车床、数控铣床、数控加工中心等。数控机床是机电一体化的典型产品,是集机床、计算机、电力拖动、自动控制、检测等技术为一体的自动化设备,图 7.1 所示为配置 FANUC 系统的 XK5032 数控铣床的外观示意图。图中,床身固定在底座上,用于安装机床各部件。操纵箱上有 CRT 显示器、机床操作按钮和各种开关及指示灯。纵向工作台、横向滑板安装在升降台上,通过纵向进给伺服电动机、横向进给伺服电动机和垂直升降进给伺服电动机的驱动,完成 X、Y、Z 方向进给。强电柜中装有机床电气部分的接触器、继电器等。变压器箱安装在床身立柱的后面。数控柜内装有机床数控系统。保护开关可控制纵向行程硬限位,挡块为纵向参考点设定挡铁,主轴变速手柄和按钮板用于手动调整主轴的正、反转、停止及冷却液开、停等。

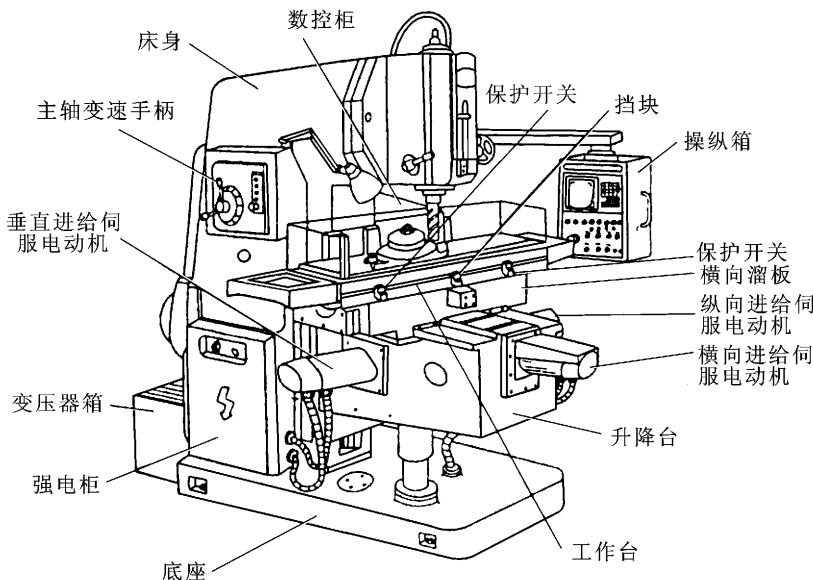


图 7.1 XK5032 型数控铣床外形图

7.1.2 数控机床控制系统的组成

数控机床主要由输入/输出装置、计算机数控装置(CNC 装置)、可编程控制器、主轴控制模块、进给伺服控制模块及位置检测装置等部分组成,如图 7.2 所示。

1. 输入/输出装置

输入/输出装置的主要作用是输入程序和数据、打印和显示。数控机床是严格按照外部输入的加工程序完成自动加工的。数控加工程序是用字母、数字和其他编码指令表示的程序,是按零件加工顺序记载机床加工所需的各种信息,它包括零件加工的轨迹(如几何尺寸、几何形状等)、工艺信息(如进给速度、主轴转速等)及开关命令(如换刀、冷却液开或关等)。加工程序常常记录在各种信息载体上,这些载体可以是穿孔带、磁带、磁盘等。

输入装置是将程序载体上的数控代码转换成相应的电脉冲信息,传送并存入数控装置内。

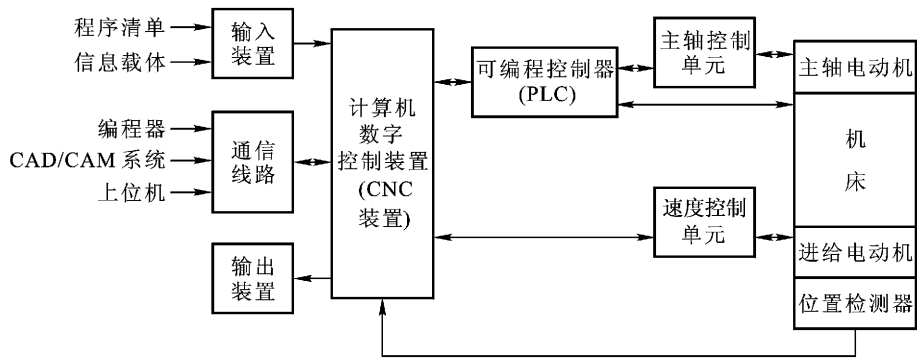


图 7.2 数控机床的组成

输出装置显示输入的内容及数控工作状态等信息 , 监控数控系统的运行。常用的输入/输出装置有光电阅读机、磁带录放机、磁盘驱动器、键盘和 CRT 显示器等。

2. 计算机数控装置

计算机数控装置又称 CNC 装置 , 它是数控系统的核心。其主要作用是根据输入的程序和数据 , 完成数值计算、系统诊断、逻辑判断、轨迹控制运算等任务 , 输出相应的指令脉冲信号 , 控制机床的运动。

CNC 装置一般由输入/输出接口、存储器、控制器和运算器等部分组成。它将加工程序信息按两类控制量分别输出 : 一类是连续控制量 , 送往主轴驱动装置或进给伺服驱动装置 ; 另一类是离散的开关量 , 送往可编程控制器 , 从而控制机床各组成部分 , 实现各种数控功能。

随着计算机技术的发展 , CNC 装置的 CPU 芯片也逐步由 8086 发展到 80586、P II 等 , 而且由单微处理器系统向多微处理器系统方向发展。

3. 可编程控制器

可编程控制器介于 CNC 装置和机床机械和液压部件之间 , 取代了传统机床电器逻辑控制装置 , 实现了数控机床的各种继电器逻辑控制。它的作用是接收 CNC 装置输出的开关命令 , 进行机床操作面板及机床各种机电控制/监测机构的逻辑处理和监控 , 并为 CNC 装置提供机床的状态和有关应答信号。主要完成机床主轴的变速、变向 , 刀具的选择交换 , 工件的装夹、冷却、液压、气动 , 润滑系统的控制功能和其他辅助功能。

4. 主轴控制模块

主轴控制模块的主要作用是接收 CNC 装置的控制信号 , 实现主轴的调速和主轴定向。主轴控制模块主要由主轴控制单元和主轴电动机等部分组成。

5. 进给伺服控制模块

进给伺服控制模块的主要作用是将来自 CNC 装置的指令信号转换成机床移动部件的运动。进给伺服控制模块主要由进给电动机、速度控制单元等部分组成。

6. 位置检测模块

位置检测模块的主要作用是完成主轴、进给轴的位置检测、配合主轴控制模块、进给伺服控制模块完成位置的控制。位置控制模块主要由检测装置(如光电编码器、光栅等)和各种信号处理电路组成。

图 7.3 所示为数控车床的电气控制柜示意图。

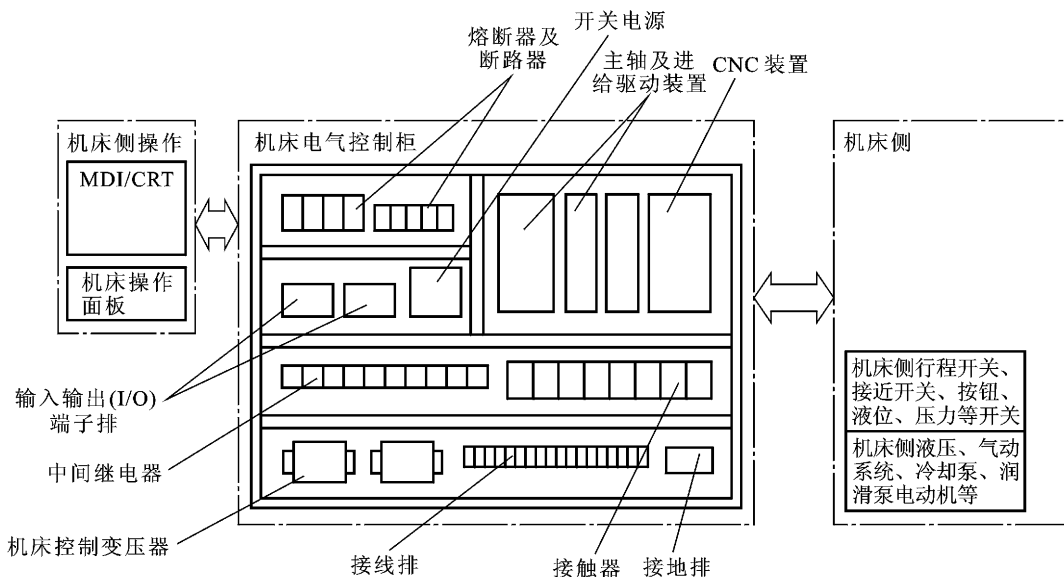


图 7.3 数控车床的电气控制柜示意图

7.2 数控机床的控制方式及其接口技术常识

数控机床的种类很多,分类方式不一。按机械运动的轨迹可分为点位控制系统、直线控制系统和轮廓控制系统;按数控系统的功能水平可分为高、中、低三挡,本节主要介绍数控机床的各类控制方式。

7.2.1 数控机床的控制方式

数控机床按伺服控制方式可以分为开环控制的数控机床、闭环控制的数控机床和半闭环控制的数控机床三类。

1. 开环控制的数控机床

这类数控机床的进给伺服驱动系统是开环控制系统,该系统没有检测反馈装置,如图 7.4 所示。该伺服驱动部件通常为反应式步进电动机或混合式步进电动机。CNC 装置每发出一个进给脉冲指令,经驱动电路功率放大后,驱动步进电动机旋转一个角度,通过丝杠转动使机床运动一个距离(该单位长度为脉冲当量)。这类系统的信息流程是单向的,对机床移动部件的实际位移不作检验和反馈,机床的加工精度不高,所以称为开环控制。

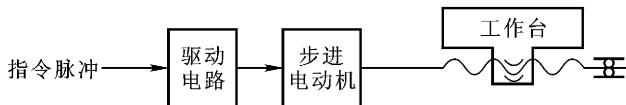


图 7.4 开环控制系统

开环控制系统的特点是结构简单、成本较低、技术容易掌握。机床的加工精度取决于伺服装置的性能。一般适用于中、小型的经济型数控机床,特别适用于旧机床改造的简易数控机床。

2. 闭环控制的数控机床

这类数控机床的进给伺服驱动系统是按闭环反馈控制方式工作的,该控制系统装有检测反馈装置,伺服驱动部件通常用直流伺服电动机或交流伺服电动机,在加工中随时检测移动部件的实际位置,使之和 CNC 装置所要求的位置相符合,以期达到很高的加工精度。

图 7.5 所示为闭环控制系统框图。图中 A 为速度测量元件,C 为位置测量元件。当 CNC 装置发出的指令值到位置比较电路时,此时若工作台没有移动,则无反馈量。指令值使得伺服电动机转动,通过 A 将速度反馈信号送到速度控制电路,通过 C 将工作台实际位移量反馈回去。在位置比较电路中,与指令值进行比较,用比较差值进行控制,直到差值消除为止,最终实现精确定位。这类系统将机床工作台纳入控制环节,故称为闭环控制系统。

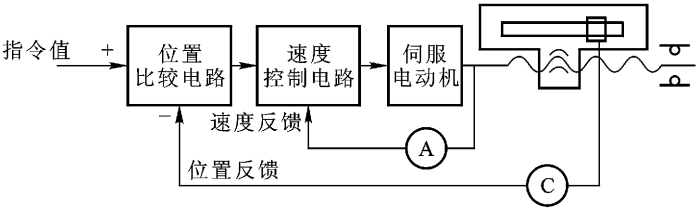


图 7.5 闭环控制系统

闭环控制系统的特点是精度高、速度快,但调试维修较困难,系统复杂,成本高。一般适用于精度较高的数控设备,如数控精密镗铣床。

3. 半闭环控制的数控机床

这类数控机床与闭环控制系统的区别是将检测元件安装在伺服电动机的轴端或丝杠端,通过角位移的测量间接计算出机床工作台的实际位置。这类控制系统的伺服驱动元件通常是宽调速直流伺服电动机。

图 7.6 所示为半闭环控制系统框图。图中 A 为测速发电机,B 为光电编码盘或旋转变压器,反馈到位置比较电路和速度控制电路中的信号是由 A、B 测出的转角推算出的工作台实际位移量,用此值与指令值进行比较,用差值实现控制。由于工作台等机械传动环节没有包括在控制回路中,故称为半闭环。

半闭环控制系统的特点是结构简单,系统不易受机械传动装置干扰,工作稳定性好,精度虽没有闭环高,调试却比闭环方便。中等精度以上的数控机床大多数采用半闭环控制系统,如加工中心等。

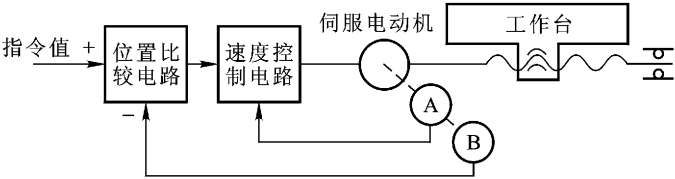


图 7.6 半闭环控制系统

7.2.2 数控机床的接口

数控装置是数控机床的核心,它通过多种输入/输出接口与外界进行信息交换,其中有开关量输入/输出接口、模拟量输入/输出接口、数字通信接口和一些其他标准计算机输入/输出设备接口等。这些接口电路的作用是进行电平转换和功率放大,将 CNC 装置和机床之间的信号在电气上加以隔离,防止噪声引起误操作,在 CNC 装置和机床电气设备间进行 D/A 和 A/D 转换。

根据国际标准《ISO4336—1981(E)机床数字控制——数控装置和数控机床电气设备之间的接口规范》的规定,数控装置与机床及机床电器之间的接口分为四类,如图 7.7 所示。

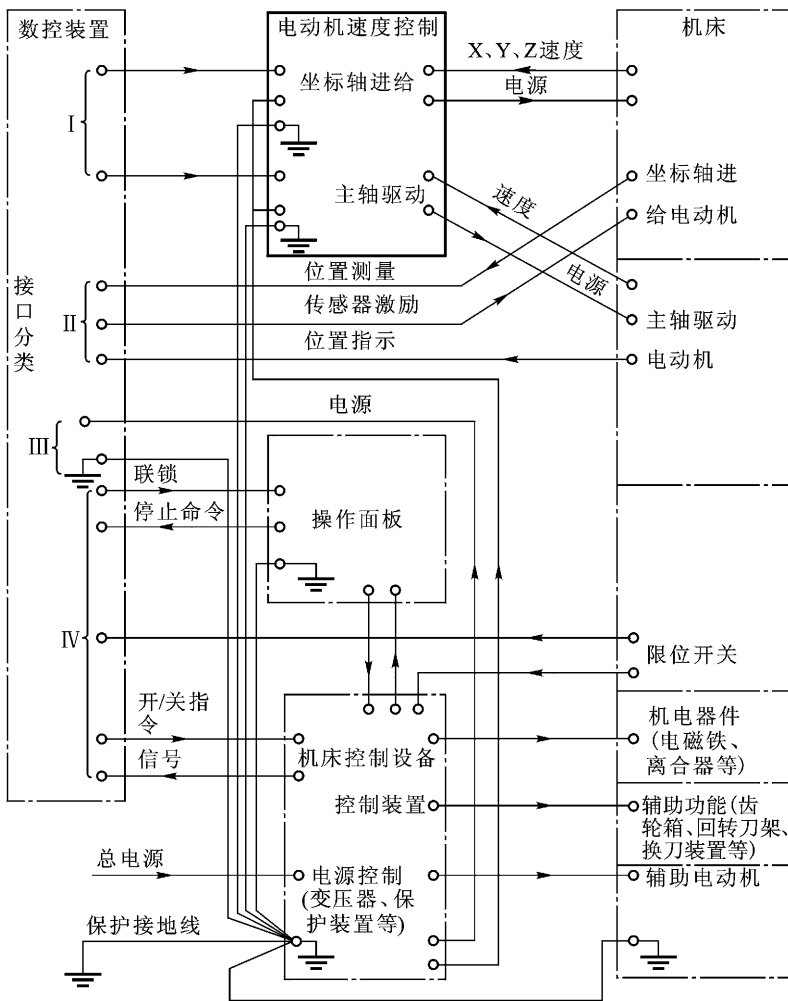


图 7.7 CNC 装置、控制设备和机床之间的连接

第 I 类：与驱动有关的连接电路,主要是指与坐标轴进给驱动和主轴驱动的连接电路。

第 II 类：数控装置与检测系统和检测传感器之间的连接电路。

第 III 类：电源及保护电路。

第 IV 类：开/关信号和代码信号连接电路。

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

第Ⅲ类电源及保护电路由数控机床强电线路中的电源控制电路构成。强电线路由电源变压器、控制变压器、各种断路器、保护开关、接触器、熔断器等连接而成,为辅助交流电动机(如风扇电动机、冷却泵电动机等)、电磁铁、离合器、电磁阀等功率执行元件供电。强电线路不能与低压下工作的控制电路或弱电线路直接连接,只能通过断路器、热动开关、中间继电器等器件转换成在直流低电压下工作的触点的开合动作,才能成为继电器逻辑电路、可编程控制器(PLC)可以接受的电信号,反之亦然。

第Ⅳ类开/关信号和代码信号是数控装置与外部传送的输入/输出控制信号。当数控机床没有 PLC 时,这些信号直接在数控装置和机床间传送;当数控机床有 PLC 时,这些信号除极少的高速信号外,均通过 PLC 传送。

不同的输入/输出设备与 CNC 装置相接时,应使用与其相应的 I/O 接口电路和接口芯片。接口芯片一般可分为专用接口芯片和通用接口芯片两类。前者专门用于某种输入/输出设备的接口,后者用于多种设备的接口。

思考与练习

- 7.1 数控技术、数控系统和数控机床的概念是什么?
- 7.2 数控机床有哪几部分组成,它们的作用各是什么?
- 7.3 数控机床按控制方式可分成哪几类,各有何特点?
- 7.4 数控装置接口电路的作用是什么?
- 7.5 数控装置与机床及机床电器之间的接口有哪几类?它们之间传递的信息各是什么?

第 8 章

PLC 及其应用基础

本章将学到：

1. 什么是 PLC？PLC 有哪几部分组成，它们的作用各是什么？
2. PLC 是如何与外部设备连接的，它的工作过程如何，它的主要技术性能有哪些？
3. 数控机床中常用的 PLC 有哪几种形式，它们与数控机床的接口技术有哪些，数控机床中的 PLC 传递的信息有哪些？
4. PLC 常用的编程语言有哪几种，FANUC 系统专用 PLC 的指令有哪些，它们的含义是什么，如何完成程序指令的输入、修改？

8.1 PLC 概述

PLC 是 20 世纪 60 年代发展起来的一种新型自动化控制装置。它最早是用于替代传统的继电器控制装置，功能上只有逻辑计算、计时、计数以及顺序控制等，而且只能进行开关量的控制，因此 PLC 也称可编程逻辑控制器。随着技术的进步，其控制功能已远远超出逻辑控制的范畴，其名称相应改为“可编程控制器”，简称 PC。但 PC 又容易与个人计算机产生混淆，所以近年来人们又倾向于使用 PLC 这一简称。

8.1.1 PLC 的基本组成

根据 IEC 的标准，给 PLC 下的定义为：它是一种在工业环境下使用的数字运算操作的电子系统，它采用可程序的存储器，用于存储执行逻辑运算、顺序操作、定时、计数和算术运算操作等特定功能的用户指令，并通过数字式或模拟式输入/输出来控制各种类型的机械或生产过程。由上述 PLC 的定义，可以看到现代的 PLC 实际上也是一种计算机控制系统，它具有面向工业现场、有更多功能、更强的 I/O 接口和面向电气工程技术人员的特点。

1. PLC 的硬件组成

图 8.1 所示为三菱 FX 系列 PLC 配置，其他品牌的 PLC 也具有类似的配置。图中输入/输出信号接线端子用于与外部设备的连接，编程器及个人计算机用于程序的编制、编辑、调试和监视，它通过通信接口与 PLC 相连，各类指示灯可用于诊断 PLC 自身故障或外围设备的故障，如电源正常，则电源指示灯亮；PLC 处于运行状态，则运行指示灯亮等。

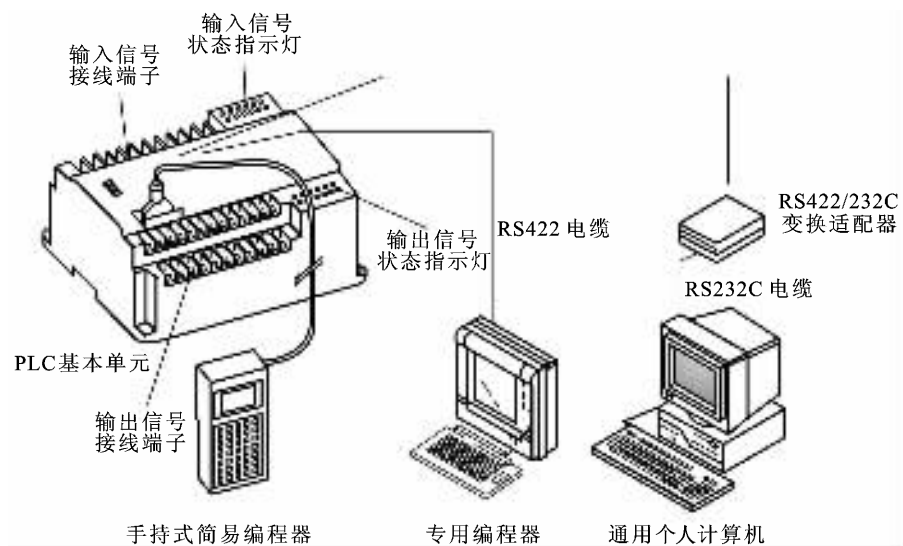


图 8.1 PLC 的配置

图 8.2 所示为 PLC 控制系统硬件结构框图。由图可知 PLC 主要由微处理器(CPU)、存储器、输入/输出模块、电源和外部设备等组成。



图 8.2 PLC 的硬件结构

(1) 微处理器

微处理器是系统的核心,它可直接使用通用微处理器来实现。它通过输入模块将现场信息采入,并按用户程序规定的逻辑进行处理,然后将结果输出去控制外部设备。

(2) 存储器

存储器主要用于存放系统程序、用户程序和工业数据。PLC 所用存储器基本上有只读存储器 EPROM 和随机存储器 RAM(通常为带掉电保护的 CMOS RAM)两种形式,其存储器总量随 PLC 的类型或规模的不同而改变。通常,系统程序由制造厂家固化在 EPROM 型存储器中;用户程序由用户固化在 EPROM 中或存储在 RAM 中;工作数据则是 PLC 运行过程中需要经常存取、随时改变的一些中间数据,一般存放在 RAM 中。

(3) 输入/输出模块

输入/输出模块是 PLC 内部与现场之间的桥梁。它一方面将现场信号转换成标准的逻辑电平信号;另一方面将 PLC 内部逻辑信号电平转换成外部执行元件所要求的信号。

(4) 电源单元

电源单元是将交流电转换为 PLC 内部所需的直流电源,有的还提供外部传感器等使用的直

流 +24 V 输出。一般来讲,电源单元有三路输出:一路供 CPU 模块使用;一路供编程器接口使用,还有一路供各种接口模板使用。PLC 对电源的要求很高,不但要有较好的电磁兼容性能,而且还要求工作稳定度高,并有过电流和过电压保护等功能。另外电源单元还配有后备电池(锂电池),用于断电时能及时保护 COMS RAM 中的信息和标志信号。

此外,大、中型 PLC 还配置有扩展接口和智能 I/O 模板。所谓扩展接口主要用于连接扩展 PLC 单元,从而扩大 PLC 的规模。智能 I/O 模板本身含有单独的 CPU,能够独立地完成某种专用的功能。由于它和主 PLC 是并行工作的,从而大大提高了 PLC 的运行速度和效率。

2. PLC 的软件系统

PLC 在上述硬件环境下,还必须要有相应的执行软件配合工作。PLC 基本软件包括系统程序和用户程序。系统程序是指控制和完成 PLC 各种功能的程序,它包括监控程序、指令解释程序、故障自诊断程序、模块化应用功能子程序及各种管理程序等。它由 PLC 生产厂家提供,并固化在 EPROM 中,用户不能直接存取,故也不需要用户干预;用户程序是用户根据电气控制线路图采用梯形图语言等编写的逻辑处理程序,用于实现现场的各种控制要求。对于数控机床来说,数控机床 PLC 中的用户程序由机床制造厂提供,并固化到用户 EPROM 中,机床用户不需写入和修改。只是当机床发生故障时,根据机床厂提供的梯形图和电气原理图来查找故障点,进行维修。

8.1.2 PLC 的工作过程

PLC 对用户程序的执行过程是通过 CPU 的周期性循环扫描,并采用集中采样、集中输出的方式来完成的。当 PLC 在加电运行时,首先清除输入/输出寄存器状态表中的原有内容,然后进行自诊断,即检查机内硬件(如 CPU、各输入输出模块等),确认其正常工作后,开始循环扫描。在每个扫描周期内,PLC 对用户程序的扫描过程可分成输入采样、用户程序执行和输出处理三个阶段,如图 8.3 所示。

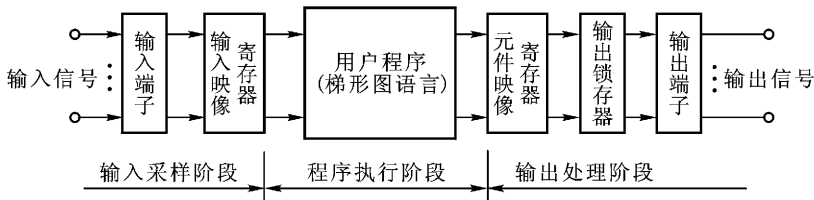


图 8.3 PLC 的工作过程

1. 输入采样阶段

在输入采样阶段,CPU 以扫描方式,顺序读入所有输入端对应输入暂存器的状态(接通状态或断开状态),并将此状态存入 PLC 内存中的输入映像寄存器中,然后以此信息为输入,执行用户程序。

2. 用户程序执行阶段

在用户程序执行阶段,PLC 按一定规律扫描用户程序,并将输入映像寄存器中的状态取出,进行算术和逻辑运算,其结果被存入元件映像寄存器中。对于每个元件而言,元件映像寄存器所寄存的内容会随程序执行的进程而变化。

3. 输出处理阶段

在输出处理阶段,PLC 执行完所有指令后,将元件映像寄存器的所有状态转存到输出锁存器中,驱动输出电路,使输出设备作出相应的动作。

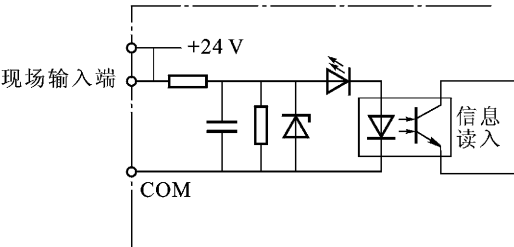
需要指出的是,在一个扫描周期内,输入端的信号只能在输入采样阶段才能被读取,并存入输入映像寄存器。进入用户程序执行阶段后,不管输入端的状态作如何改变,输入映像寄存器的内容仍保持不变,直到下一个循环的输入采样阶段才根据当时扫描到的状态予以刷新。

8.1.3 PLC 的输入、输出

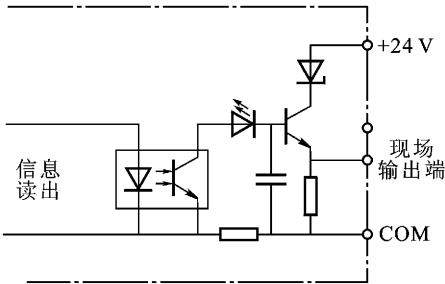
PLC 的输入、输出模块是 PLC 与现场 I/O 装置或其他外部设备的连接部件。PLC 提供了各种操作电平和输出驱动能力的输入、输出模块供用户选用。

1. PLC 的输入、输出接口

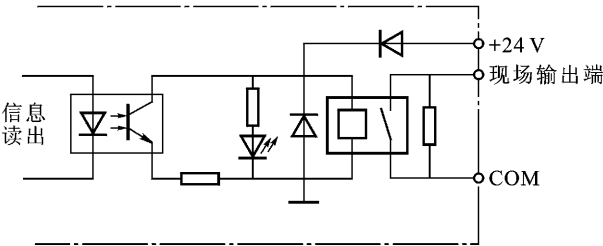
PLC 的现场输入装置有控制按钮、转换开关、行程开关、接近开关、压力开关及温控开关等,这些信号必须经过光电耦合电路、消抖动电路和滤波电路等抗干扰电路后,才能送入 PLC 的输



(a) 开关量输入接口



(b) 直流+24 V 输出接口



(c) 继电器信号输出接口

图 8.4 PLC 的输入/输出接口

入寄存器 ;PLC 的现场输出装置有指示灯、中间继电器、接触器、电磁阀和电磁制动器等 ,由于经 CPU 计算处理后的控制信号较弱 ,不能直接驱动外部的负载 ,故必须经过功率放大电路完成输出信号的放大工作。按输出放大电路器件类型的不同 ,PLC 通常有三种输出形式 ,即用于交/直流输出电路的继电器输出方式、用于直流输出电路的晶体管输出方式和用于交流输出电路的晶闸管输出方式。

图 8.4 所示为 PLC 常用的输入/输出接口。

2. PLC 与外部设备的连接

PLC 与外部设备的接线方式有独立式和汇点式两种。独立式每点构成单元电路 ,汇点式多点构成单元电路 ,其接线采用分组形式 ,以适应同机使用不同电源的要求 ,各组的端子数可以是 2 点、4 点、8 点、16 点和 32 点等 ,一般接线形式如图 8.5 所示 ,具体的接线应参照产品说明操作书。

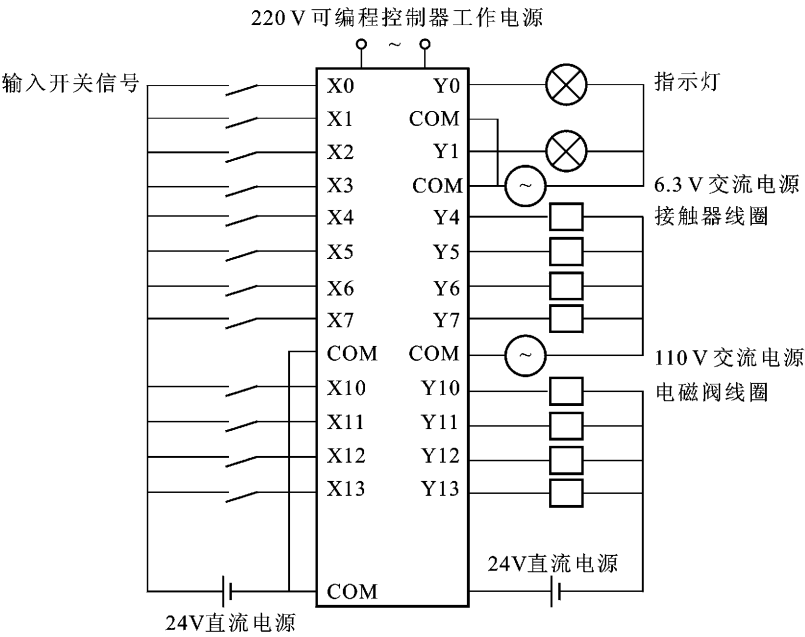


图 8.5 PLC 与外部设备的连接

PLC 的接线正确与否关系到 PLC 能否正常工作和本身的使用寿命 ,因此在使用前一定要认真阅读有关的说明 ,并注意以下几点 :

- ① 按规定正确连接电源电路 ,如三菱 FX 系列的 AC 电源电压为 110 ~ 240 V ,直流 24 V 可为传感器提供备用电源等。
- ② 输入 COM 端(公共端)与输出 COM 端(公共端)切不可相接 ,输入接线一般不超过 10 m ;输出线不能用同一根电缆 ,输入线、输出线与交、直流线应分开连线 ,输出线应尽量远离高压线或动力线。
- ③ 保证良好的接地 ,PLC 应接专用地线 ,接地点应尽量与动力设备的接地点分开。

8.1.4 PLC 的主要技术性能

评价 PLC 较为普遍的方法是根据输入/输出(I/O)总数及程序存储器容量为标准。I/O 点数小于 40/40、用户存储器容量 1 KB 为小型 ;I/O 点数小于 128/128、用户存储器容量 4 KB 为中型 ;I/O 点数大于 128/128、用户存储器容量大于 4 KB 为大型。

除了 I/O 点和存储容量外 ,程序的执行速度也是一个重要指标 ,通常以扫描速度(毫秒/千字)来表示。

8.2 PLC 在数控机床控制中的应用

数控机床除了要控制机床实现轮廓加工外 ,还要对机床实施如主轴启动、停止和换向、刀具的交换、工件夹紧或松开、冷却液的开或关 ,润滑系统的开关和运行、液压系统的起或停等辅助功能的控制。这类控制都应遵循一定的逻辑关系、顺序关系 ,因此称为顺序控制或逻辑控制。早期的数控机床大多采用继电器控制线路来实现。20 世纪 70 年代可编程逻辑控制器的出现 ,为机床控制提供了新的可靠性高、结构紧凑、功能强大的顺序控制装置 ,现代数控系统的电器逻辑控制装置均采用 PLC。

8.2.1 数控机床中 PLC 的类型

在数控机床中应用的 PLC 按结构形式可分成两类 :一类称为内装型 ,另一类称为独立型。

1. 内装型 PLC

内装型 PLC 有时也称为集成式 PLC。是指 PLC 内含在 CNC 装置内 ,从属于 CNC 装置 ,与 CNC 装置集于一体 ,如图 8.6 所示。对于内装型 PLC 来讲 ,它既可以与 CNC 装置共用一个 CPU ,也可以为 PLC 设置专用的 CPU。

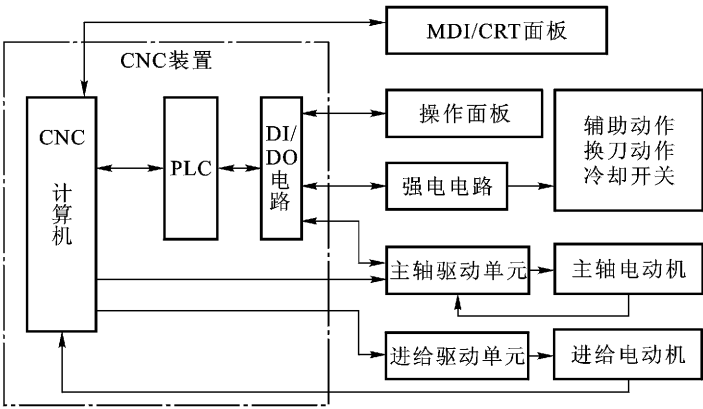


图 8.6 内装型 PLC 的结构示意图

内装型 PLC 与一般的工业控制 PLC 相比具有如下特点 :

① 内装型 PLC 与 CNC 装置其他电路同装在有关机箱内 ,共同使用有关电源和地线 ,可采用一块单独的附加印制电路板 ,或 PLC 与 CNC 装置同时制作在一块大印制电路板上。

② 内装型 PLC 对外没有单独配置的 I/O 电路,而是使用 CNC 装置本身的 I/O 电路。

③ 内装型 PLC 的性能指标依赖于所从属的 CNC 装置的性能和规格(如 I/O 点数、程序存储器容量、每步执行的时间以及功能指令及条数等),它的硬件和软件要与 CNC 装置的其他功能统一考虑,统一设计。

④ 采用内装型 PLC 扩大了 CNC 内部直接处理数据的能力和窗口通信功能,可以使用梯形图编辑和传送高级控制功能,且造价便宜,提高了 CNC 系统的性能/价格比。

由于具有以上的特点,单微处理器的 CNC 系统均应用内装型 PLC。我国采用内装型 PLC 的数控系统较多,FANUC 公司的 0 系统采用 PMC-L/M 内装型 PLC,6 系统采用 PC-A/B 内装型 PLC,15/16/18 系统采用 PMC-M 内装型 PLC,西门子公司的 SINUMERIK820 采用 S5-135W 内装型 PLC,A-B 公司 8200、8400 采用与 NC 共同的 8086CPU 的内装型 PLC。

在数控机床中,内装式 PLC 的输入/输出采用直流 +24 V 电源,由于受到输出容量的限制,直流开关输出量信号一般用于机床强电箱中的中间继电器线圈和指示灯等,每个 +24 V 中间继电器的典型驱动电流为数十毫安。在开关量输出电路中,当被控制的对象是电磁阀、电磁离合器等交流负载,或虽是直流负载,但工作电压或电流超过 PLC 输出信号的最大允许值时,应首先驱动 +24 V 中间继电器,然后用其触点控制强电路中的接触器。同时应注意,中间继电器线圈上要并联续流二极管,以便当线圈断电时,为电流提供放电路径,否则极易损坏驱动电路。图 8.7 所示为内装式 PLC 的输出控制。

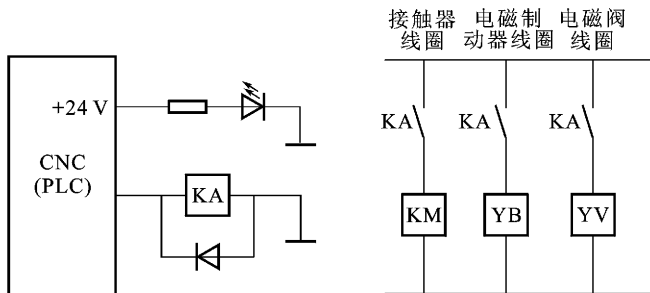


图 8.7 内装型 PLC 的输出控制

2. 独立型 PLC

图 8.8 所示为独立型 PLC 的 CNC 系统框图。独立型 PLC 实际上也就是一个通用型 PLC,它完全独立于 CNC 装置,能独立完成 CNC 系统的控制任务。对于独立型 PLC,它不仅要进行机床侧的 I/O 连接,还要进行 CNC 装置侧的 I/O 连接,这时 CNC 和 PLC 均具有自己的 I/O 接口电路。

独立型 PLC 按结构分类又可分成整体式和模块式两种。整体式又称单元式或箱体式。整体式 PLC 是将电源、CPU、I/O 部件都集中在一个机箱内,结构紧凑、体积小,一般小型 PLC 采用这种结构,模块式结构是将各部分分成若干个单独的模块,如 CPU 模块、I/O 模块、电源模块和各种功能模块。模块式 PLC 由框架和各种模块组成,模块插在框架(也有底板上的)的插座上。其配置灵活、装配方便、便于扩展和维修。一般大、中型 PLC 都采用模块式结构。

独立型 PLC 有自己的硬件和软件配置,可以根据相配的机床和设备的需要灵活配置 I/O 点数,其功能较内装型 PLC 增强许多,如采用通信模块,可与外部输入输出设备、编程设备、上位机

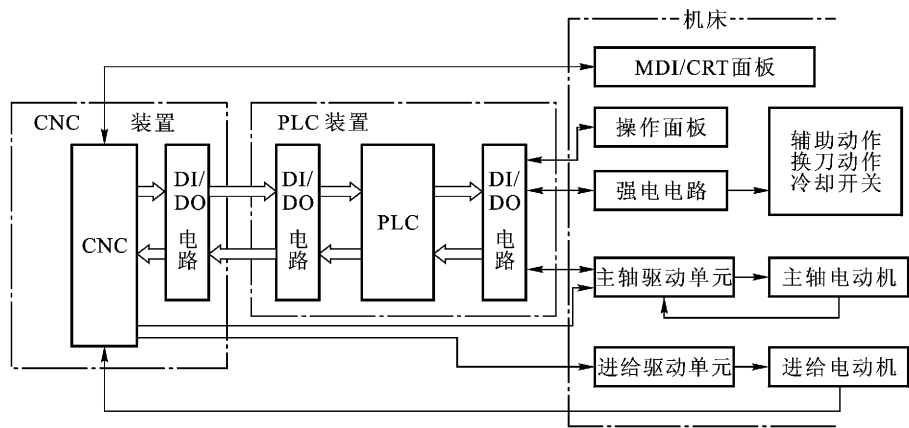


图 8.8 外装型 PLC 的结构示意图

等进行数据交换 ;采用 D/A 模块 ,可以对伺服装置直接控制 ;采用计数模块 ,可对加工工件数量、刀具使用次数、回转体的回转分度进行检测和控制 ;采用定位模块 ,可直接对刀库、转台、直线运动轴等的机械运动装置进行控制 ,但其造价较高 ,性能/价格比不如内装型 PLC ,常用于多微处理器的 CNC 系统中。常用的独立型 PLC 有德国西门子公司的 SIMATIC S5、S7 系列、FANUC 的 PMC-J 等。

8.2.2 数控机床中 PLC 的配置及信息交换

通过上述介绍可知 ,数控机床中的 PLC 处于 CNC 装置和机床之间 ,通过 DI/DO 接口实现互连 ,并对二者间的输入输出信号进行处理。

1. PLC 在数控机床中的配置

PLC 在数控机床中的配置方式有三种 ,如图 8.9 所示。

如图 8.9(a)所示 ,PLC 在机床一侧 ,代替了传统的继电器 - 接触器的逻辑控制 ,此时 PLC 有 $(m+n)$ 个输入/输出点 ;如图 8.9(b)所示 ,PLC 在电气控制柜中 ,PLC 有 m 个输入/输出点 ;如图 8.9(c)所示 ,PLC 在电气控制柜中 ,而输入/输出接口在机床一侧 ,这种配置方式可使 CNC 装置与机床接口的电缆大为减少。

2. 数控机床中 PLC 的信息交换

PLC 与 CNC 装置之间的信息交换主要是 :由 CNC 装置发给 PLC 的功能代码 M(辅助功能)、S(主轴功能)、T(刀具功能) ;PLC 给 CNC 装置的信息主要是通过 CNC 装置设置各坐标的机床基准点以及 M、S、T 功能的应答信号等。

PLC 与机床间的信息交换也分为两部分 :PLC 向机床传递的信息主要是控制机床的执行元件 ,如电磁阀、接触器、继电器 ,以及确保机床各运动部件状态的信号及故障显示 ;机床给 PLC 的信息主要是机床操作面板上各开关、按钮信号及机床侧的行程开关、接近开关、压力开关、温控开关等开关信号 ,其中包括机床的启动、停止、机构变速选择、主轴正反转和停止、切削液的开/关、各坐标轴的点动以及刀架卡盘夹紧/松开等信号 ,主轴伺服保护状态监视信号和控制伺服系统运行准备的使能信号等。

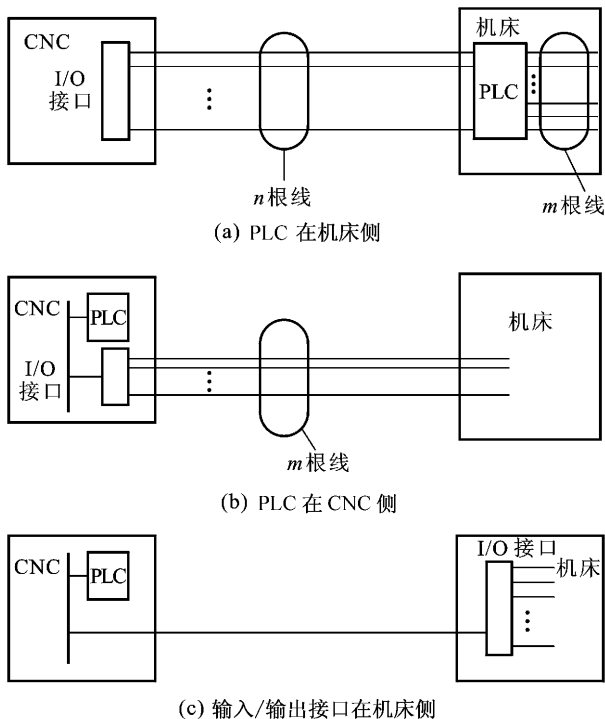


图 8.9 PLC 的配置方式

* 8.3 PLC 编程基础

PLC 为用户提供了编程语言及丰富的指令,用户可根据不同的控制要求编制不同的控制程序。而 PLC 的各种逻辑指令是针对 PLC 内部器件的状态而言的,PLC 中每个器件的功能是独立的,并可用规定的编号来表示,故在编制用户程序时,首先必须熟悉每条指令涉及的元器件的功能及其规定的编号。

8.3.1 PLC 内部器件的类型

PLC 中的内部器件有 1 和 0 两种状态,分别对应于继电器的接通“ON”、断开“OFF”两种状态。

1. 输入继电器

输入继电器对应 PLC 的输入端口,它提供了许多对动断、动合触点供内部电路编程使用,一旦某一输入端子上的外部信号与 COM 端(公共端)输入电源形成通路,则相对应的继电器动作。输入继电器的各触点只能由外部输入信号驱动,而不能由内部编程指令控制。

不同品种的 PLC 输入接线端子的个数不同,输入继电器的个数也不同。输入继电器的编号既是输入端口的编号,也是输入状态寄存器对应位的地址代号。如三菱 FX 系列中,X 表示输入继电器,其基本单元编号采用八进制,有 X000 ~ X007、X010 ~ X017 等。

2. 输出继电器

输出继电器对应 PLC 的输出端口,其作用是把 PLC 的输出信号通过一对动合触点,传送到输出端子驱动外部负载。输出继电器动作与否,是由程序内部的指令决定的,外部信号无法直接驱动。在 PLC 内部编程电路中,输出继电器有一个等效线圈,可直接驱动负载,同时还提供了无数对内部动合、动断触点,供编程使用。

不同品种 PLC 的输出继电器的数量不同,它等于输出点数,其编号与输出端号相同。如三菱 FX 系列中,Y 表示输出继电器,其基本单元编号采用八进制,有 Y000 ~ Y007、Y010 ~ Y017 等。

3. 内部辅助继电器

内部辅助继电器实质是一些存储器单元,它可以用 PLC 指令与输入或输出继电器建立一定的逻辑关系,但不能直接输出控制外部负载。每个辅助继电器有无数对动合、动断触点,其作用相当于继电器控制线路中的中间继电器。辅助继电器又分为通用型辅助继电器和断电保护型辅助继电器两类。内部辅助继电器的编号可查阅相关说明。如三菱 FX 系列中,M 表示辅助继电器,其编号采用十进制,M000 ~ M499 为通用型辅助继电器,M500 ~ M1023 为断电保护型辅助继电器。

4. 定时器

PLC 的定时器类似于继电器控制系统中的时间继电器,定时器的延时时间可由用户在编程时设定,当定时器到达设定值时,定时器触点动作;当定时器开始计时或未到达设定值时,定时器触点不动作。定时器提供无数对动合、动断触点供编程使用,定时器的编号可查阅相关使用说明书。如三菱 FX 系列中,T 表示定时器,其编号采用十进制,有 T000 ~ T199 等。

5. 计数器

计数器是用以记录脉冲信号的内部器件,有单向计数器也有可逆计数器。当计数器输入信号(脉冲)从 OFF 到 ON 变化一次,计数器进行一次计数。计数值由程序设定,当计数器的当前值达到设定值时,计数器的动合触点闭合,动断触点断开,否则计数器触点不动作。计数器的编号可查阅相关的使用说明书,如三菱 FX 系列中,C 表示计数器,其编号采用十进制,有 C000 ~ C099 等。

6. 数据存储器

数据存储器是存储数据的软元件,它用于输入输出处理、模拟量控制及位置控制时存储数据和参数。

除此之外,PLC 内还有很多特殊辅助继电器,各有其特殊功能,具体含义和用法可查阅用户手册,不明白它的功能以及未定义的不可在用户程序中使用。

8.3.2 PLC 的编程语言

PLC 是为工程应用而设计的,因此它提供了适应工业环境使用的多种编程方法,如梯形图编程法、指令编程法、功能图编程法、布尔代数编程法等,这里仅介绍常用的梯形图编程法和指令编程法。

1. 梯形图编程

梯形图编程语言是一种图形语言,它是由继电器控制系统变换而来的,它沿用了传统继电器控制中的继电器触点、线圈、串并联等术语,如图 8.10 所示。

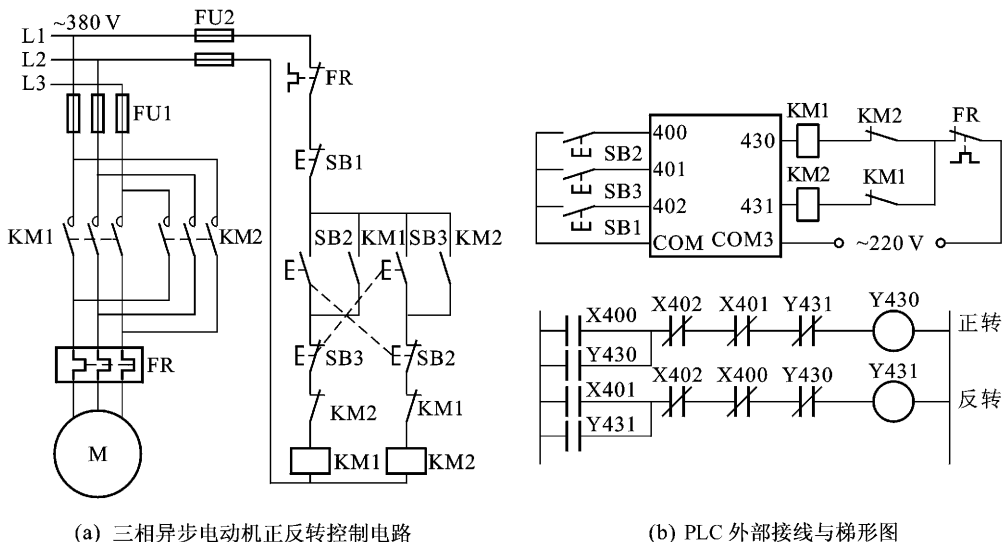


图 8.10 三相异步电动机正反转控制

由图可知 梯形图编程有如下特点：

① 梯形图按自上而下、自左而右的顺序排列,最左边为输入母线,最右边为输出母线,两母线间是动合触点(如 X400)、动断触点(如 X402)的各种连接和线圈(如 Y430)输出,形成一条平行的逻辑行,即梯级。

② 梯形图在电路的结构上与继电器控制电路图相同,但梯形图是逻辑关系的一种图形表达形式,并非实际的物理电路。梯形图中的继电器并非实际的物理继电器,它实质上是存储器中的触发器,称为“软继电器”。触发器的状态为 1,表示该线圈通电,动合触点闭合、动断触点断开;触发器的状态为 0,表示该线圈不通电,动合触点不闭合,动断触点不断开。在梯形图中,继电器的线圈包括输出继电器、定时器、计数器、移位寄存器等器件的线圈。图 8.11 所示为几种梯形图符号与继电器控制系统相似符号的对比图。

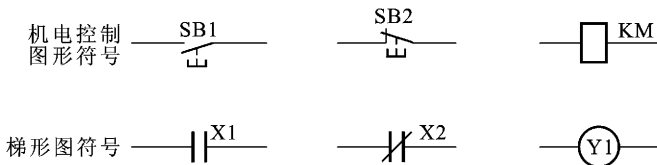


图 8.11 几种梯形图符号与机电控制符号的对比

③ 在梯形图中,PLC 的触点可使用无限次,但线圈只能使用一次。

④ PLC 在运行时,对梯形图是按扫描方式从左到右、从上到下顺序执行。故不存在几条并列支路的同时动作。

综上所述 梯形图编程具有逻辑关系清楚、易于阅读和设计的特点,但必须在全功能编程器或计算机(配相应软件)上才能完成程序的输入。

2. 指令编程

指令编程也称为语句表编程,类似于计算机汇编语言,是一种以语句形式表达的用户控制程

序。通常程序的一条指令由指令助记符(即指令操作码)和操作数据(即作用器件的地址编号)两部分组成。

指令编程能够实现可编程控制器的所有功能,用户可以用简易编程器将编制的程序通过键盘直接输入。但要注意不同厂家的产品或型号,其指令助记符及其含义各有不同(但原理是相通的),编程者一定要认真阅读相关的说明书。

8.3.3 FANUC 专用 PLC 指令简介

数控机床用 FANUC PLC 有 PMC - A、PMC - B、PMC - C、PMC - D、PMC - G 和 PMC - L 等多种型号,它们分别适用于不同的 FANUC 数控系统,组成内装型 PLC。它们的编程方法是使用惯用的继电器符号和简单的逻辑指令、功能指令编制梯形图,其读/写存储器 RAM 主要用于存放随机变化的数据、表格等,并接有锂电池实现断电自保,输出负载能力一般小于 $5\text{ V} \cdot \text{A}$,最大可达到 $25\text{ V} \cdot \text{A}$ 。

在 FANUC 系列的 PLC 中,有基本指令和功能指令两种指令,规格型号不同时,只是功能指令的数目不同,除此之外,指令系统是完全相同的。

在基本指令和功能指令执行中,FANUC 设置了一个堆栈寄存器,用于暂存逻辑操作的中间结果。堆栈寄存器有 9 位,如图 8.12 所示。其中 ST0 存放正在执行的操作结果,其他 8 位(ST1 ~ ST8)寄存中间操作的结果。堆栈寄存器按先进后出,后进先出的原理工作。“写”操作结果压入时,堆栈各原状态左移一位,相反地“取”操作结果时,堆栈全部右移一位,最后压入的信号首先恢复读出。

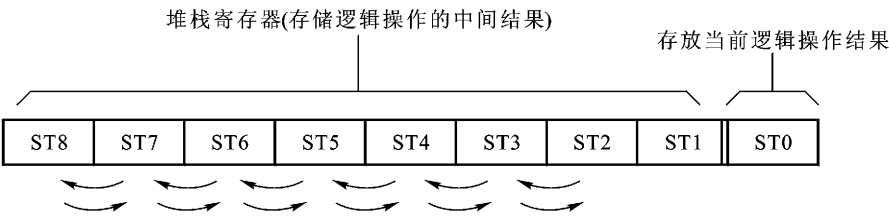


图 8.12 堆栈寄存器操作顺序

1. 基本指令

基本指令共 12 条,指令操作码和处理内容如表 8.1 所示。

表 8.1 基本指令及其处理内容

序号	指令	处 理 内 容
1	RD	读指令信号的状态并写入 ST0 中,在一个梯级开始的节点是常开节点时使用
2	RD. NOT	读指令信号非状态写入 ST0 中,在一个梯级开始的节点是常闭节点时使用
3	WRT	输出运算结果(ST0 的状态)到指定地址

续表

序号	指令	处 理 内 容
4	WRT. NOT	输出运算结果(ST0 的状态)的非状态到指定地址
5	AND	将 ST0 的状态与指定地址的信号状态相与后 ,再置入 ST0 中
6	AND. NOT	将 ST0 的状态与指定地址的信号的 非状态相与后 ,再置入 ST0 中
7	OR	将指定地址的信号状态与 ST0 的状态相或后 ,再置入 ST0 中
8	OR. NOT	将指定地址信号的 非状态与 ST0 的状态相或后 ,再置入 ST0 中
9	RD. STK	堆栈寄存器左移一位 ,并把指定地址的状态置入 ST0 中
10	RD. NOT. STK	堆栈寄存器左移一位 ,并把指定地址的状态取非后置入 ST0 中
11	AND. STK	将 ST0 和 ST1 的内容执行逻辑与 ,结果存于 ST0 ,堆栈寄存器右移一位
12	OR. STK	将 ST0 和 ST1 的内容执行逻辑或 ,结果存于 ST0 ,堆栈寄存器右移一位

基本指令的格式如下：

□ □ ○ ○ ○ ○ . ○

指令操作码 操作数据

如 RD50.6 ,其中 RD 为指令操作码。50.6 为操作数据 ,即指令操作对象。它实际上是 PLC 内部数据存储器某一单元中的一位。50.6 表示第 50 号存储单元中的第 6 位。RD50.6 执行的结果 ,就是把 50.6 这一位的数据状态 1 或 0 读出 ,并写入结果寄存器 ST0 中。

为了帮助大家对各基本指令的了解 ,现以图 8.13 所示的梯形图为例进行分析 ,表 8.2 所示为相应的指令编码表及运算结果状态。

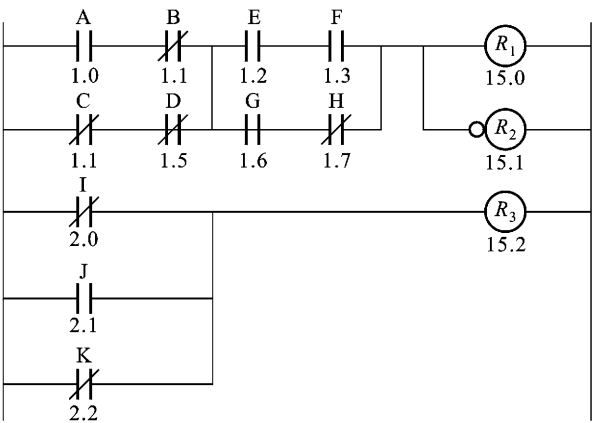


图 8.13 梯形图举例

表 8.2 图 8.13 梯形图例子相映的指令编码及运算结果状态

序号	指 令	地址号位数	备注	运算结果状态		
				ST2	ST1	ST0
1	RD	1.0	A			A
2	AND. NOT	1.1	B			$A \cdot \overline{B}$
3	RD. NOT. STK	1.4	C		$A \cdot \overline{B}$	$\overline{C}$
4	AND. NOT	1.5	D		$A \cdot \overline{B}$	$\overline{C} \cdot \overline{D}$
5	OR. STK					$A \cdot \overline{B} + \overline{C} \cdot \overline{D}$
6	RD. STK	1.2	E		$A \cdot \overline{B} + \overline{C} \cdot \overline{D}$	E
7	AND	1.3	F		$A \cdot \overline{B} + \overline{C} \cdot \overline{D}$	$E \cdot F$
8	RD. STK	1.6	G	$A \cdot \overline{B} + \overline{C} \cdot \overline{D}$	$E \cdot F$	G
9	CND. NOT	1.7	H	$A \cdot \overline{B} + \overline{C} \cdot \overline{D}$	$E \cdot F$	$G \cdot \overline{H}$
10	OR. STK				$A \cdot \overline{B} + \overline{C} \cdot \overline{D}$	$E \cdot F + G \cdot \overline{H}$
11	AND. STK					$(A \cdot \overline{B} + \overline{C} \cdot \overline{D})$ $(E \cdot F + G \cdot \overline{H})$
12	WRT	15.0	R_1			$(A \cdot \overline{B} + \overline{C} \cdot \overline{D})$ $(E \cdot F + G \cdot \overline{H})$
13	WRT. NOT	15.1	R_2			$(A \cdot \overline{B} + \overline{C} \cdot \overline{D})$ $(E \cdot F + G \cdot \overline{H})$
14	RD. NOT	2.0	I			$\overline{I}$
15	OR	2.1	J			$\overline{I} + J$
16	OR. NOT	2.2	K			$\overline{I} + J + \overline{K}$
17	WRT	15.2	R_3			$\overline{I} + J + \overline{K}$

上例中 ,A、B、C、D 等均是来自机床的各种按钮、行程开关等输入的开关信号 ,接通为 1 ,断开为 0 ;它们的状态存入相应的数据存储单元的相应位 ,如信号 A 存入 1.1 位 ,信号 B 存入 1.2 位等 ,R₁、R₂ 等为输出继电器的编号 ,也就是说 15.0、15.1 这两个位的状态表明了输出继电器的状态 ,输出继电器的状态由梯形图逻辑运算结果来决定。梯形图中 ,动合触点、动断触点的含义与一般继电器电路一致 ,运算的结果均存于 ST0 中。

2. 功能指令

数控机床所用 PLC 的指令必须满足数控机床信息处理和动作控制的特殊要求,例如,由 CNC 输出的 M、S、T 二进制代码信号的译码(DEC),机械运动状态或液压系统动作状态的延时(TMR)确认,刀库、分度工作台沿最短路径旋转和现在位置至目标位置步数的计算(ROT),换刀时数据检索(DSCH)等。对于上述的译码、定时、最短路径选择,以及比较、检索、转移、代码转换、四则运算、信息显示等控制功能,仅用一位操作的基本指令编程,实现起来将会十分困难,因此要增加一些具有专门控制功能的指令,这些专门指令就是功能指令。

功能指令不能使用继电器的符号,必须使用规定的格式,这种格式一般包括控制条件、指令、参数和输出几个部分,如图 8.14 所示。

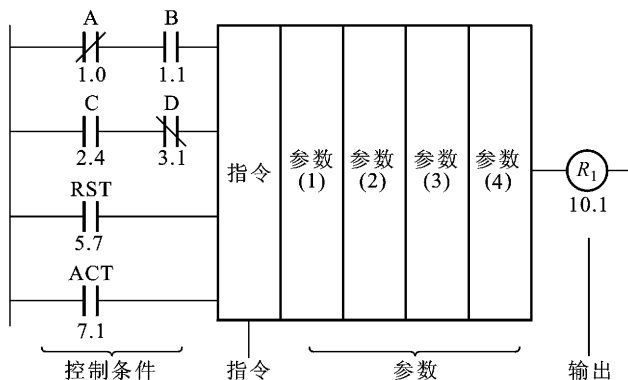


图 8.14 功能指令格式

数控机床中 PLC 的功能指令是针对其操作功能要求而设计的。每条功能指令的控制条件是不同的,也就是说,功能指令格式图中的控制条件的数量和含义是不同的,控制条件存于操作结果堆栈寄存器中,各控制条件的编程顺序是固定的,不能颠倒。有些功能指令,如定时器处理 TMR 指令、译码 DEC 指令,在编程器上有专用键输入,而其他功能指令则用编程器上的 SUB 键及与功能指令对应序号来输入。与基本指令不同,功能指令能用数值来处理,因此参考数据或存有数据的地址可写入参数内(用 PLC 编程器的 PRM 键写入)。此外,每条功能指令的输出软继电器 R_i 的含义是不同的,它的地址由编程人员在允许范围内任意指定。

限于篇幅,对于 FANUC PLC 的功能指令使用说明不作具体的介绍,在实际使用时,大家可参照相应型号和规格的 PLC 操作说明书。附录 1 为 FANUC PMC-L 的 35 条功能指令及其处理内容。

思考与练习

- 8.1 什么是 PLC,它有哪几部分组成?
- 8.2 PLC 硬件和软件的作用各是什么?
- 8.3 PLC 的工作方式是什么,其工作过程分成哪几个阶段?
- 8.4 PLC 的现场输入、输出装置有哪些,它们与外部设备连接时应注意哪些?
- 8.5 数控机床中的 PLC 按结构形式可分成哪几类,各有何特点?
- 8.6 PLC 在数控机床中的配置形式有几种,它与数控机床的信息交换有哪些?

- 8.7 PLC 的内部器件有哪些 ,它们各有什么作用 ?
- 8.8 PLC 常用的编程语言有哪几种 ,它们各有何特点 ?
- 8.9 FANUC 系列中 PLC 的基本指令有哪些 ,它们的含义是什么 ?
- 8.10 什么是 FANUC 系列中 PLC 的功能指令 ,它们可以完成哪些功能 ?

第 9 章

位置检测及控制基础

本章将学到：

- 1. 数控机床中检测元件的作用是什么 ,常用的检测元件有哪些？
- 2. 数控机床常用检测元件的基本结构是什么 ,它们是如何工作的？
- 3. 数控机床的位置控制系统有哪些 ,各有何特点 ,它们使用的检测元件各是什么？
- 4. 数控机床是如何实现位置控制的 ,位置控制模块与检测元件是如何连接的？

9.1 常用位置检测装置及其应用

位置检测装置是数控机床进给伺服系统中的重要组成部分 ,其精度对数控机床的定位精度和加工精度均有很大的影响。

数控机床中的位置检测装置由检测元件(传感器)和测量电路组成 ,其作用是检测位移和速度 ,发送反馈信号 ,构成闭环或半闭环控制。数控机床检测装置能够测量的最小位移量称为分辨率 ,分辨率越小 ,则检测精度越高。分辨率不仅取决于检测元件本身 ,还取决于测量电路。

数控机床检测元件的种类很多 ,按其检测信号的选取和反馈方式 ,可分为数字式和模拟式两类 ,按其测量方式可分为增量式和绝对值式两类 ,按其运动型式可分为回转型和直线型两类。表 9.1 为数控机床常用的检测装置。

表 9.1 数控机床常用检测元件

类 别	数 字 式		模 拟 式	
	增 量 式	绝 对 式	增 量 式	绝 对 式
回转型	光电盘、圆光栅	编码盘	旋转变压器、圆型磁尺、圆感应同步器	多极旋转变压器、三速圆感应同步器
直线型	光栅、激光干涉仪	编码尺、多通道透射光栅	感应同步器、磁尺	三速感应同步器 绝对式磁尺

9.1.1 脉冲编码器及其应用

脉冲编码器是一种旋转式脉冲发生器。它通常安装在被测轴上,与被测轴一起转动,将机械转角变成电脉冲信号,是一种常用的角位移检测元件。

脉冲编码器分为光电式、接触式和电磁感应式三种,就精度和可靠性来讲,光电式脉冲编码器优于其他两种。数控机床上主要使用光电式脉冲编码器,它的型号是由每转发出的脉冲数来区分。光电式脉冲编码器又称为光电码盘,按其编码方式的不同可分为增量式和绝对式两种。

1. 增量式光电编码器

增量式光电编码器的结构最为简单,它的特点是每产生一个输出脉冲信号,就对应一个增量角位移。

(1) 基本结构

光电编码器由 LED(带聚光镜的发光二极管)、光栏板、码盘、光敏元件及印制电路板(信号处理电路)组成,如图 9.1 所示。图中码盘与转轴连在一起,它一般是由真空镀膜的玻璃制成的圆盘,在圆周上刻有间距相等的细密狭缝和一条零标志槽,分为透光和不透光两部分;光栏板是一小块扇形薄片,制有和码盘相同的三组透光狭缝,其中 A 组与 B 组条纹彼此错开 $1/4$ 节距,狭缝 A 、 $\bar{A}$ 和 B 、 $\bar{B}$ 在同一圆周上,另外一组透光狭缝 C 、 $\bar{C}$ 称为零位狭缝,用以每转产生一个脉冲,光栏板与码盘平行安装且固定不动,LED 作为平行光源与光敏元件分别置于码盘的两侧。

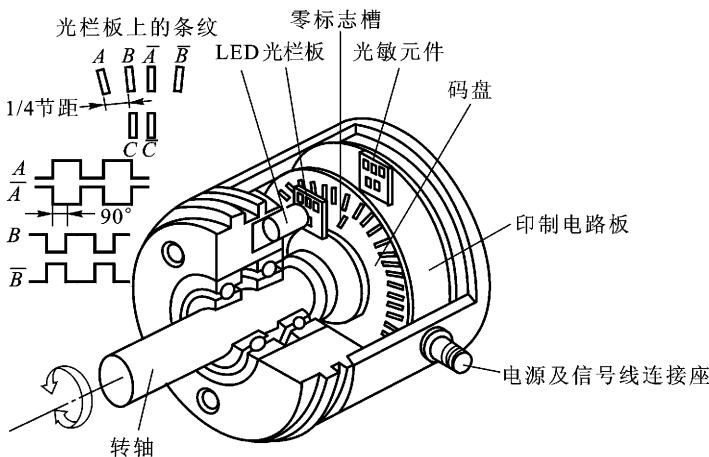


图 9.1 增量式光电编码器结构示意图

(2) 工作过程

当码盘随轴一起,每转过一个缝隙就发生一次光线的明暗变化,由光敏元件接受后,变成一次电信号的强弱变化,这一变化规律近似于正弦函数。光敏元件输出的信号经信号处理电路的整形、放大和微分处理后,便得到脉冲输出信号,脉冲数就等于转过的缝隙数(即转过的角度),脉冲频率就表示了转速。

由于 A 组与 B 组的狭缝彼此错开 $1/4$ 节距,故此两组信号有 90° 相位差,用于辨向,即光电码盘正转时 A 信号超前 B 信号 90° ,反之 B 信号超前 A 信号 90° ,如图 9.1 所示。而 A 、 $\bar{A}$ 和 B 、 $\bar{B}$ 为差分信号,用于提高传输的抗干扰能力。 C 、 $\bar{C}$ 也为差分信号对应于码盘上的零标志槽,产生

的脉冲为基准脉冲,又称零点脉冲,它是轴旋转一周在固定位置上产生的一个脉冲,可用于机床基准点的找正。

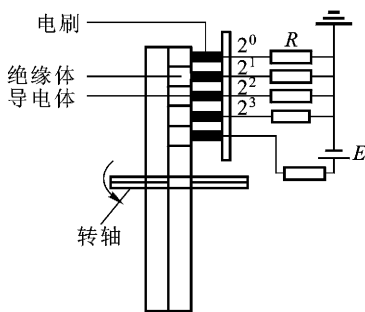
增量式光电编码器的测量精度取决于它所能分辨的最小角度,这与码盘圆周内的狭缝数有关,其分辨角 $\alpha = \frac{360^\circ}{\text{狭缝数}}$ 。

2. 绝对式脉冲编码器

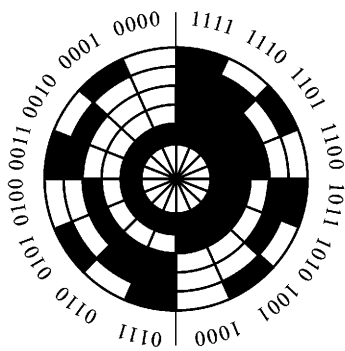
绝对式脉冲编码器可直接将被测角用数字代码表示出来,且每一个角度位置均有对应的测量代码,因此这种测量方式即使断电也能测出被测轴的当前位置,即具有断电记忆功能,绝对式编码器可分为接触式、光电式和电磁式三种。

(1) 接触式码盘

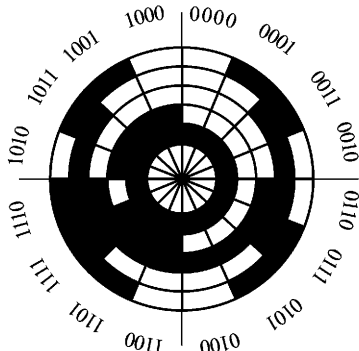
图 9.2 所示为一个 4 位二进制编码盘的示意图,图 9.2(a)中码盘与被测轴连在一起,涂黑的部分是导电区,其余是绝缘区,码盘外四圈按导电为 1、绝缘为 0 组成二进制码。通常把组成编码的各圈称为码道,对应于四个码道并排安装有四个固定的电刷,电刷经电阻接电源负极。码盘最里面的一圈是公用的,它和各码道所有导电部分连在一起接电源正极。当码盘随轴一起转动时,与电刷串联的电阻上将出现两种情况:有电流通过,用 1 表示;无电流,用 0 表示。出现相应的二进制代码,其中码道的圈数为二进制的位数,高位在内、低位在外,如图 9.2(b)所示。



(a) 结构简图



(b) 4 位 BCD 码盘



(c) 4 位格雷码盘

图 9.2 接触式码盘

图 9.2(c)所示为 4 位格雷码盘,其特点是任何两个相邻数码间只有一位是变化的,它可减少因电刷安装位置或接触不良造成的读数误差。

通过上述分析可知,对于一个 n 位二进制码盘,就有 n 圈码道,且圆周均分 2^n 等分,即共用 2^n 个数据来表示其不同的位置,其能分辨的角度为 $\alpha = \frac{360^\circ}{2^n}$ 。显然,位数越大,测量精度越高。

(2) 绝对式光电码盘

绝对式光电码盘与接触式码盘结构相似,只是将接触式码盘导电区和绝缘区改为透光区和不透光区,由码道上的一组光电元件接受相应的编码信号,即受光输出为高电平,不受光输出为低电平。光电码盘的特点是没有接触磨损、码盘寿命高、允许转速高、精度高,但结构复杂、光源寿命短。

3. 脉冲编码器在数控机床上的应用

光电式脉冲编码器在数控机床中可用于工作台或刀架的直线位移的测量;在数控回转工作台,通过在回转轴末端安装编码器,可直接测量回转台的角位移;在数控车床的主轴上安装编码器后,可实现 C 轴控制,用以控制自动换刀时的主轴准停和车削螺纹时的进刀点和退刀点的定位;在交流伺服电动机中的光电编码器可以检测电动机转子磁极相对于定子绕组的角度位置,控制电动机的运转,并可以通过频率/电压(f/U)转换电路,提供速度反馈信号等,此外,在进给坐标轴中,还应用一种手摇脉冲发生器,用于慢速对刀和手动调整机床。

图 9.3 所示为典型的光电编码器与数控装置的连接,图中 MC3487、MC3486 是常用的差分信号输出、接收器件。

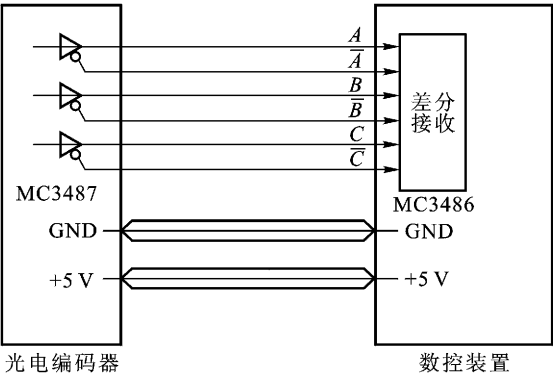


图 9.3 光电编码器与数控装置的连接

9.1.2 光栅及其应用

光栅是在透明玻璃上或金属镜面上刻制的平行等间距的线纹,是数控机床和数显系统常用的光电检测元件,它具有精度高、响应快的特点。常见的光栅可分为长光栅和圆光栅,长光栅用于直线位移的检测,又称为直线光栅;圆光栅用于角位移的检测,二者原理相似,这里仅介绍透射式直线光栅。

1. 光栅的结构和检测原理

图 9.4 所示的光栅位置测量装置主要由光源、聚光镜、短光栅(指示光栅)、长光栅(标尺光

栅)、硅光电池组等光电元件组成。通常标尺光栅固定在机床活动部件(如工作台)上,指示光栅连同光源、聚光镜及光电池组等安装在机床的固定部件上,标尺光栅和指示光栅间保持一定的间隙,重叠在一起,并在自身的平面内转一个很小的角度 θ ,如图9.5所示。

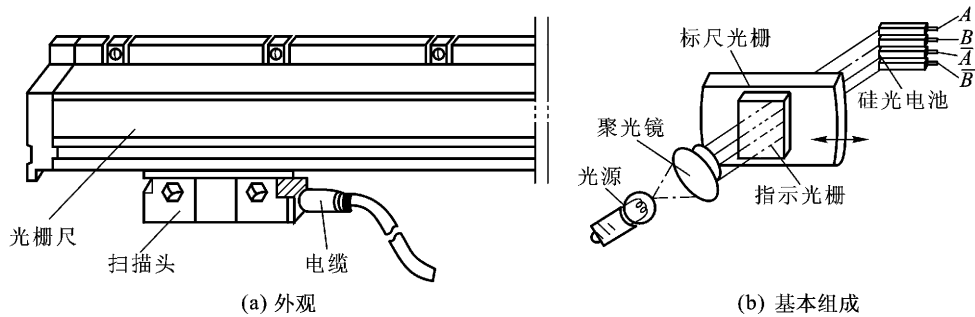


图9.4 光栅的结构

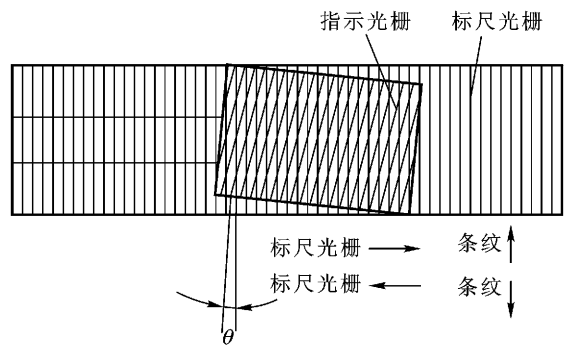


图9.5 指示光栅和标尺光栅

图9.5中指示光栅和标尺光栅上均刻有很多等距的条纹,形成透光和不透光两个区域,通常情况下光栅尺刻线的透光和不透光宽度相等。当光源的光线经聚光镜呈平行光线垂直照射到标尺光栅上时,在与两块光栅线纹相交的钝角角平分线上,出现粗大条纹,并随标尺光栅的移动而上下明暗交替地运动,此条纹称为莫尔条纹,如图9.6所示。图中相邻两条亮带(或暗带)之间的距离称为莫尔条纹的纹距 W ,则 W 与光栅的栅距 W_0 、两光栅线纹间的夹角 α (θ 较小时)之间的关系可近似地表示成

$$W = \frac{W_0}{\theta}$$

光栅的莫尔条纹具有以下特点:

- ① 莫尔条纹具有放大作用,莫尔条纹宽度把光栅栅距放大 $1/\theta$ 倍。
- ② 莫尔条纹有平均误差的作用,能消除栅距不均匀造成的影响。
- ③ 莫尔条纹的移动与两光栅之间的相对移动具有对应关系,即当两光栅相对移动时,莫尔条纹就沿垂直于光栅运动的方向移动,并且光栅每移动一个栅距 W_0 ,莫尔条纹就准确地移动一个纹距 W ,只要测出莫尔条纹的数目,就可知道光栅移动了多少栅距。

表9.2为莫尔条纹移动方向与光栅相对移动方向及光栅线纹夹角的关系。

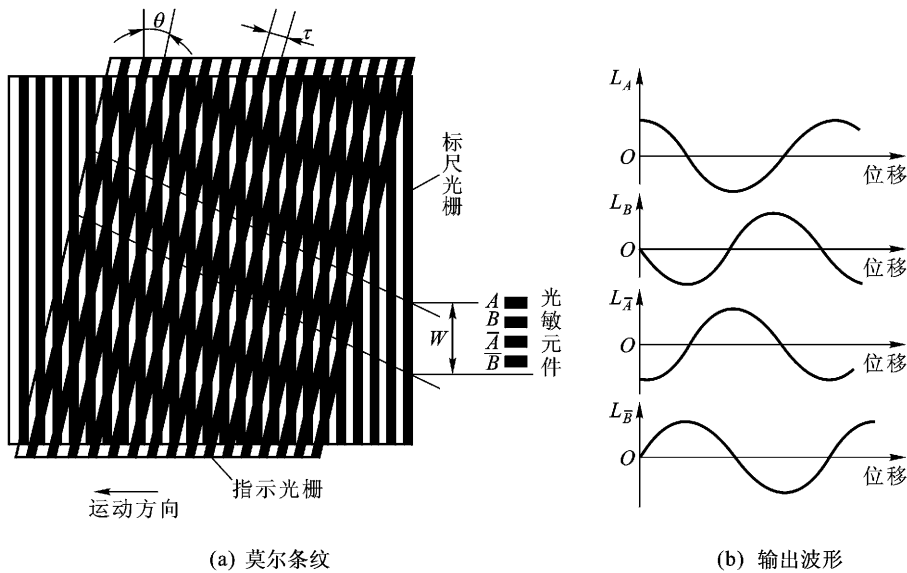


图 9.6 莫尔条纹及输出波形

表 9.2 莫尔条纹移动方向与两光栅相对移动方向及光栅线纹夹角的关系

指示光栅相对标尺光栅的转角方向	标尺光栅相对于指示光栅的移动方向	莫尔条纹移动方向
顺时针方向转角	向右	向上
	向左	向下
逆时针方向转角	向右	向下
	向左	向上

2. 光栅测量系统

图 9.7 所示为光栅测量系统 A 、 B 两组光电池用于接收光栅移动时产生的莫尔条纹明暗信号,其中 A 、 $\bar{A}$ (或 B 、 $\bar{B}$) 为差分信号,起到抗传输干扰的作用; A 组和 B 组的光电池之间彼此错开 $W/4$,使莫尔条纹经光电转换后形成的脉冲信号相位差 90° ,这样可根据相位的超前和滞后来判别光栅移动的方向。

上述两组信号,经差分放大、整形、鉴向等电路的处理后,就可根据莫尔条纹的移动方向形成正向脉冲或反向脉冲,用可逆计数器进行计数,测量出光栅的实际位移。

9.1.3 旋转变压器和感应同步器

旋转变压器和感应同步器都属于电磁式位置检测装置,旋转变压器可单独和滚珠丝杠相连,也可以与伺服电动机组成一体,用于角位移的测量;感应同步器可以安装在机床的床身及移动部件上,用于直线位移的测量。

1. 旋转变压器

旋转变压器(又称同步分解器)是一种旋转式小型电动机,由定子和转子组成,分为有刷和

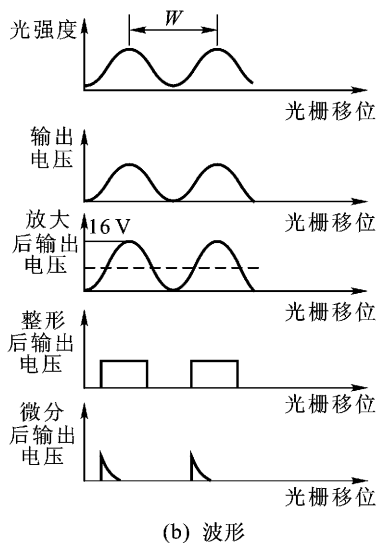
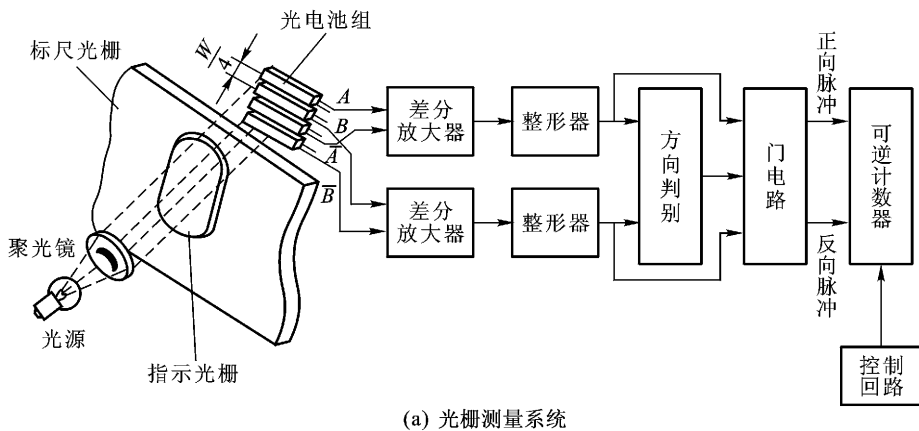


图 9.7 光栅测量系统及波形

无刷两种。常用的无刷旋转变压器,因无滑环和电刷,因此可靠性高、寿命长,更适用于数控机床。

(1) 无刷旋转变压器的结构

图 9.8 所示为无刷旋转变压器的结构。由图可知,它由两部分组成:一部分称为分解器,由旋转变压器的定子和转子组成;另一部分称为变压器,其一次绕组与分解器转子上的分解器绕组相连,并与转子轴固连在一起,随转子一起旋转,其二次绕组与分解器中的定子绕组一样固定在旋转变压器的壳体上。工作时,分解器的定子绕组外加励磁电压,转子绕组即耦合出与偏转角相关的感应电压,此信号接在变压器的一次绕组上,经耦合由变压器的二次绕组输出。

(2) 工作过程

旋转变压器是根据互感原理工作的,如图 9.9 所示。其定子与转子之间的气隙磁通呈正弦规律,因此当定子绕组加上交流电压 u_1 时,转子绕组输出电压的大小取决于定子和转子两绕组

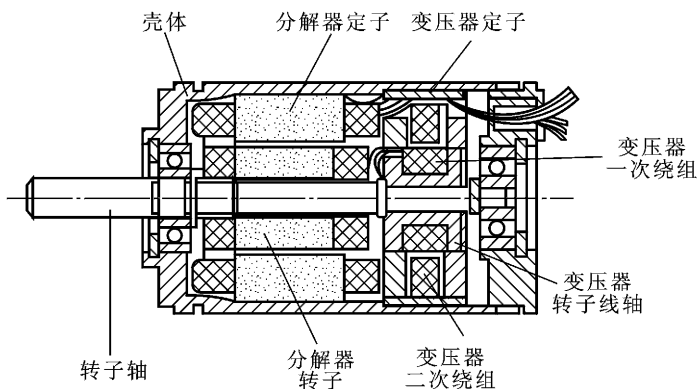


图 9.8 无刷旋转变压器的结构

磁轴在空间的相对位置。若定子和转子绕组匝数之比为 k ，两绕组轴线间夹角为 θ ，则转子绕组产生的感应电压

$$u_2 = k u_1 \cos \theta = k U_m \sin \omega t \cos \theta$$

只要测出转子绕组输出电压的幅值，即可得出转子相对定子的角位移 θ 的大小。

(3) 旋转变压器的应用

实际应用的旋转变压器为正、余弦旋转变压器，其定子和转子各有互相垂直的两个绕组，如图 9.10 所示。其中，定子绕组上分别为正弦绕组和余弦绕组，励磁电压用 u_{1s} 和 u_{1c} 表示，转子绕组中一个绕组为输出电压 u_2 ，另一绕组接高阻抗作为补偿。 θ 为转子的偏转角。当定子绕组通入不同的励磁电压，可得到相位和幅值两种工作方式。

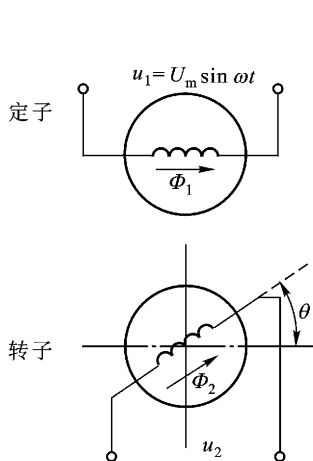


图 9.9 变压器工作过程

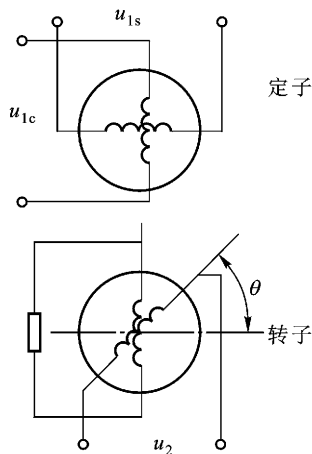


图 9.10 定子和转子两相绕组

① 处于相位工作方式时，旋转变压器定子的正、余弦绕组分别通以同频率、同幅值而相位差为 90° 的交流励磁电压，即

$$u_{1s} = U_m \sin \omega t$$

$$u_{1c} = U_m \cos \omega t$$

则转子绕组中的感应电压

$$u_2 = kU_m \cos(\omega t - \theta)$$

转子输出电压的相位角和转子的偏转角之间有严格的对应关系。这样,只要检测出转子输出电压的相位角,就可知道转子的转角。

② 处于幅值工作方式时,旋转变压器的定子正、余弦绕组分别通以同频率、同相位、但幅值不同的交流励磁电压,即

$$u_{1s} = u_{sm} \sin \omega t \quad \mu_{1c} = u_{cm} \sin \omega t \quad \mu_{sm} = U_m \sin \alpha \quad \mu_{cm} = U_m \cos \alpha \quad (\alpha \text{ 为给定的电气角})$$

则转子绕组中的感应电压

$$u_2 = kU_m \cos(\alpha - \theta) \sin \omega t$$

转子感应电压的幅值随转子偏转角 θ 而变化。测量出幅值,即可求得转子的转角。

2. 感应同步器

感应同步器是由旋转变压器演变而来的,它相当于一个展开的多极旋转变压器,它是利用滑尺上的励磁绕组和定尺上的感应绕组之间相对位置变化而产生电磁耦合的变化,从而发出相应的位置电信号来实现位移检测。

(1) 感应同步器的结构

图 9.11 所示为直线式感应同步器的外观及安装示意图。由图可知,直线式感应同步器由相对平行移动的定尺和滑尺组成,定尺安装在床身上,滑尺安装在移动部件上与定尺保持 $0.2 \sim 0.3 \text{ mm}$ 间隙平行放置,并随工作台一起移动。定尺上的绕组是单向、均匀、连续的;滑尺上有两组绕组,一组为正弦绕组 u_s ,另一组为余弦绕组 u_c ,其节距均与定尺绕组节距相同,为 2 mm ,用 φ 表示。当正弦绕组与定尺绕组对齐时,余弦绕组与定尺绕组相差 $\frac{1}{4}$ 节距,即 90° 相位角,如图 9.12 所示。

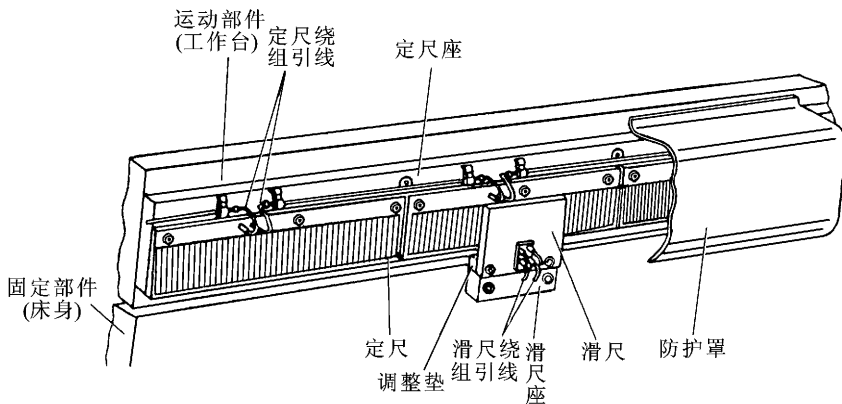


图 9.11 直线式感应同步器的外观及安装示意图

(2) 感应同步器的工作过程

感应同步器的工作原理和旋转变压器相似,当滑尺相对定尺移动时,定尺上感应电压的大小取决于定尺和滑尺的相对位置,且呈周期性变化。滑尺移动一个节距 φ ,感应电压变化一个周期。当定尺和滑尺的相对位移是 x ,定子绕组感应电压因机械位移引起的相位角的变化为 θ 时,

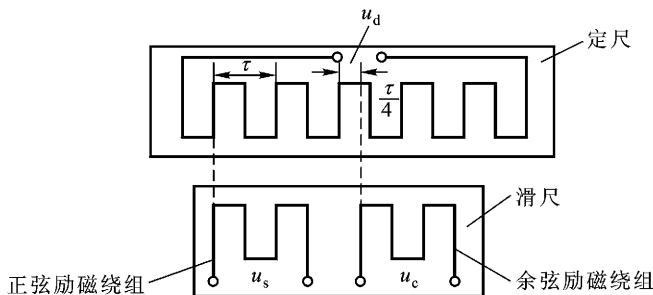


图 9.12 感应同步器的结构

定尺绕组中的感应电压 $u_d = kU_m \cos \theta \sin \omega t = kU_m \cos \frac{2\pi x}{\lambda} \sin \omega t$ 。只要测量出 u_d 的值,便可得出 θ 角和滑尺相对于定尺移动的距离 x 。

(3) 感应同步器的应用

同旋转变压器一样,根据励磁绕组中励磁方式的不同,感应同步器也有相位和幅值两种工作方式。

① 处于相位工作方式时,滑尺的正弦绕组和余弦绕组分别通以与旋转变压器相同的同频率、同幅值而相位差相差 90° 的励磁电压,则滑尺移动 x 时,定子绕组的感应电压

$$u_d = KU_m \sin(\omega t - \theta) = kU_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda}\right)$$

说明定尺绕组上感应电压的相位与滑尺的位移严格对应,只要测出定尺感应电压的相位,即可测得滑尺的位移量。

② 处于幅值工作方式时,滑尺的正弦绕组和余弦绕组分别通以与旋转变压器相同的同频率、同相位但幅值不同的励磁电压,则定尺绕组产生的感应电压可近似表示为 $u_d = KU_m \frac{2\pi \Delta x}{\lambda} \sin \omega t$ 。当滑尺的位移量 Δx 较小时,感应电压的幅值和 Δx 成正比,因此可以通过测量 u_d 的幅值来测定 Δx 的大小。

9.1.4 磁栅及其应用

磁栅(又称为磁尺)是一种利用电磁特性和录磁原理进行位移检测的元件,它具有调整方便、对环境条件的要求低、对周围电磁场的抗干扰能力强,在油污、粉尘较多的场合下使用有较好的稳定性的特点,故在数控机床、精密机床上得到广泛应用。

1. 磁栅的基本结构

磁栅按其结构可分为直线型磁栅和圆型磁栅,分别用于直线位移和角位移的测量,如图 9.13 所示。磁栅主要由磁尺(磁性标尺)、磁头和检测线路组成。

磁性标尺常采用不导磁材料作为基体,在上面镀上一层 $10 \sim 30 \mu\text{m}$ 厚的高导磁性材料,形成均匀磁膜,再用录磁磁头在磁膜上记录相等节距的周期性磁化信号(如方波和正弦波等),用以作为测量基准,最后在磁膜的表面涂上一层 $1 \sim 2 \mu\text{m}$ 厚的保护层,以防磨损。

磁头是一种磁电转换器,它把磁性标尺上的磁化信号检测出来并转换成电信号,数控机床常

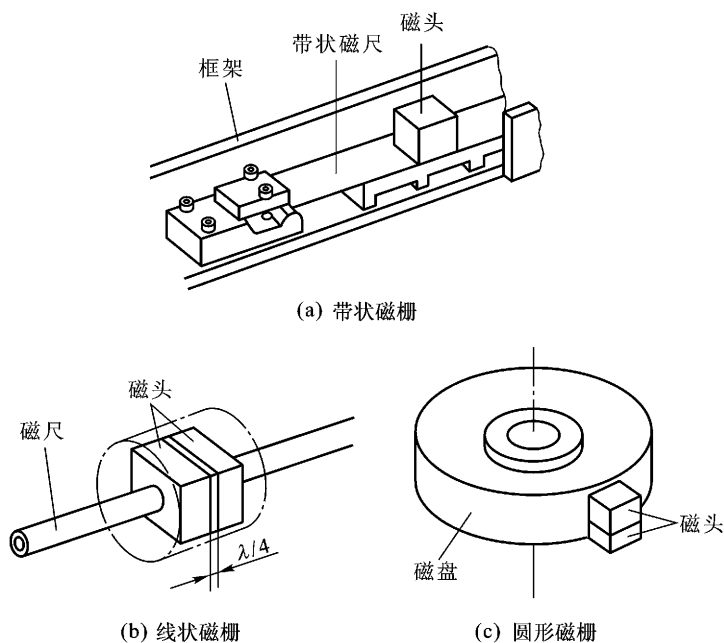


图 9.13 磁栅的外观

用的磁头为磁通响应式磁头,它在低速和静止时也能测出磁性标尺的磁化信号。

检测电路包括磁头励磁电路、信号放大电路、滤波及辨向电路、细分内插电路、显示及控制电路等。

2. 磁头的工作过程

图 9.14 所示为磁通响应式磁头及双磁头辨向示意图。由图可知,每个磁通响应式磁头由可饱和铁心、两个串联的励磁绕组和两个串联的拾磁绕组(用于输出信号)组成,磁性标尺的节距为 λ 。

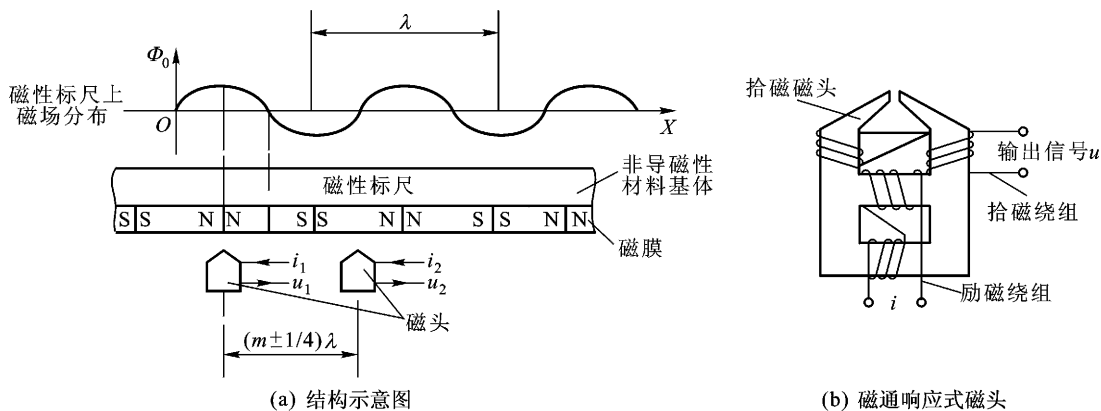


图 9.14 磁通响应式磁头及双磁头辨向示意图

当磁头的励磁绕组通入高频励磁电流 $i = I_0 \sin \omega t$ 时,则励磁电流在可饱和铁心中产生的磁

通与磁性标尺作用于磁头的磁通相叠加,使输出绕组上感应出频率为两倍高频励磁电流频率的输出电压,若磁头相对于磁性标尺的位移为 x ,则输出电压为

$$u_1 = U_m \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) \sin 2\omega t$$

说明拾磁磁头输出电压的幅值是位移 x 的函数,与拾磁磁头和磁性标尺的相对速度无关。

图 9.14 中,在间距为 $\left(m \pm \frac{1}{4}\right)\lambda$ (m 为正整数)的位置上安装的另一只磁头,其输出电压 u_2 与 u_1 相位差为 90° 。磁头在磁性标尺上的移动方向正是通过这两个磁头输出信号的超前和滞后来进行辨别的。

3. 磁栅的应用

由于单个磁头输出的信号较小,为了提高输出信号的幅值,同时降低对录制的磁化信号正弦波形和节距误差的要求,在实际使用时,常将几个或几十个磁头以一定的方式连接起来,组成多间隙磁头。多间隙磁头中的每一个磁头都以相同的间距 $\lambda/2$ 放置,相邻两磁头的输出绕组反向串联,这样,输出信号为各磁头输出信号的叠加。

磁栅作为检测元件,根据对磁头上拾磁绕组输出电压的不同处理方式也可分为相位和幅值两种工作方式,其中相位工作方式应用较多。

9.2 数控机床的位置控制基础

数控机床位置控制的作用是精确地控制机床运动部件的坐标位置,快速而准确地执行由 CNC 装置发来的运动命令。位置控制按其结构可分为开环、半闭环和闭环控制,开环伺服系统位置控制比较简单,根据进给系统的需要由 CNC 装置发送所需的脉冲指令便实现了位置控制。就闭环和半闭环伺服系统而言,位置控制的实质是位置随动控制。

9.2.1 数控机床的位置控制系统

数控机床位置闭环控制系统是由指令信号与反馈信号相比较得到偏差,再实现偏差控制的。按位置检测元件不同,位置指令信号与反馈信号比较方式通常分为三种:脉冲比较伺服系统、相位比较伺服系统、幅值比较伺服系统。

1. 脉冲比较伺服系统

在数控机床中,CNC 装置发出的指令信号是数字脉冲,如果选择光栅、光电编码器等元件作为机床移动部件位移量的检测装置,输出的位置反馈信号也是数字脉冲。这样给定量和反馈量的比较就是直接的脉冲比较,由此构成的位置控制系统就称为脉冲比较伺服系统。

图 9.15 所示是以光栅为检测元件的脉冲比较伺服系统的结构框图。

由图可知,该系统位置检测元件光栅产生的位置负反馈脉冲 P_f 与指令脉冲 F 相比较,得到位置偏差信号 $e = F - P_f$ 。现假设指令脉冲 $F = 0$,且工作台原来处于静止状态,此时反馈脉冲 $P_f = 0$,经比较环节可得 $e = 0$,工作台保持静止不动。若此时有指令脉冲加入,则在工作台尚未动之前反馈脉冲 P_f 仍为零,经比较判别后 $e \neq 0$ 。当 $e = F - P_f > 0$,该系统驱动工作台正向进给,随着电动机的运转,光栅将输出反馈脉冲 P_f 进入比较环节,直至 $e = 0$ 时,工作台才重新稳定在指

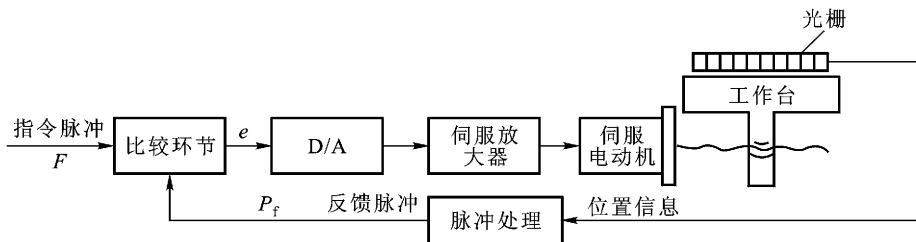


图 9.15 脉冲比较伺服系统的结构框图

令所规定的位置上。由于比较后的偏差 e 为数字量,只有经过 D/A 转换后得到相应的模拟电压,才能控制电动机的运动。

该系统的比较环节采用可逆计数器,当指令脉冲为正,反馈脉冲为负时,计数器作加法运算;当指令脉冲为负,反馈脉冲为正时,计数器作减法运算。

由于指令脉冲来自于 CNC 装置,反馈脉冲来自于检测元件,这两个脉冲源是相互独立的,故 F 和 P_f 到来的时间可能不同,或执行加法计数与减法计数时发生重叠,引起误操作,因此在可逆计数器前还有脉冲分离处理电路。

2. 相位比较伺服系统

在高精度的数控伺服系统中,旋转变压器和感应同步器或磁栅是应用广泛的位置检测元件。如果它们采用相位工作方式时,控制系统要将指令信号与反馈信号都变成某个载波的相位,然后通过二者相位的比较,得到实际位置与指令位置的偏差,该系统称为相位比较伺服系统。

图 9.16 是以感应同步器为检测元件的相位比较伺服系统的结构框图。

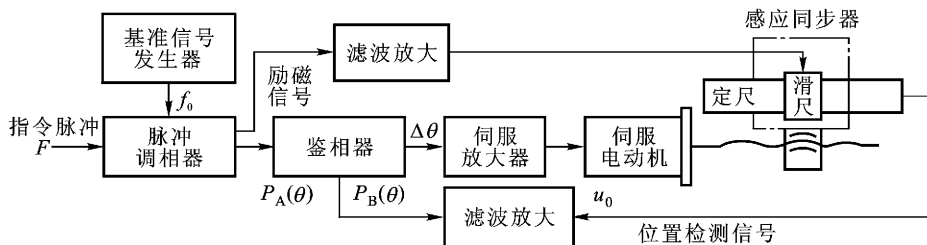


图 9.16 相位比较伺服系统的结构框图

图中,脉冲调相器也称为脉冲——相位变换器,其作用是将输入的指令脉冲数变换成输出信号的相位位移,鉴相器又称相位比较器,其作用是鉴别指令信号与反馈信号的相位,判别二者之间相位差的大小以及相位的超前、滞后变化,把它变成一个带极性的误差电压信号。

当感应同步器处于相位工作方式时,它是以定尺的相位检测信号经整形放大后所得到的 $P_B(\theta)$ 作为位置检测信号。指令脉冲 F 经脉冲调相器变换成重复频率为 f_0 的脉冲信号 $P_A(\theta)$,它与 $P_B(\theta)$ 是两个同频率的脉冲信号,其相位差 $\Delta\theta = P_A(\theta) - P_B(\theta)$,即为指令位置和实际位置的偏差。调相器对 $P_A(\theta)$ 和 $P_B(\theta)$ 两个信号进行比较,判别出 $\Delta\theta$ 的大小和极性,并输出与 $\Delta\theta$ 成正比的电压信号,此信号经放大后驱动机床移动部件朝指令位置进给,实现精确的位置控制。

假设指令脉冲 $F = 0$,即工作台处于静止状态, $P_A(\theta)$ 和 $P_B(\theta)$ 为两个同频率、同相位的脉冲信号,经鉴相器进行相位比较,其输出的相位差 $\Delta\theta = 0$,此时工作台维持静止状态;当指令脉冲

$F \neq 0$ 时, 工作台将从静止状态向指令位置移动。若 F 为正, 经脉冲调相 $P_A(\theta)$ 产生正的相位移 $+\theta_0$, 经与反馈脉冲信号 $P_B(\theta)$ 比较后, 鉴相器输出 $\Delta\theta = +\theta_0 > 0$, 伺服系统按指令脉冲的方向使工作台正向移动, 以消除 $P_A(\theta)$ 和 $P_B(\theta)$ 间的相位差。反之, 当指令脉冲为负时, 则 $P_A(\theta)$ 产生负的相位移 $-\theta_0$, 此时 $\Delta\theta = -\theta_0 < 0$, 伺服电动机驱动工作台反向运动, 直到 $\Delta\theta = 0$ 为止。

3. 幅值比较伺服系统

在数控机床中, 位置检测元件旋转变压器或感应同步器采用幅值工作方式, 输出模拟信号, 其特点是幅值的大小与机械位移成正比。若将此信号作为位置反馈信号与指令信号比较而构成的闭环系统就称为幅值比较伺服系统。

图 9.17 所示是以感应同步器为检测元件的幅值比较伺服系统框图。

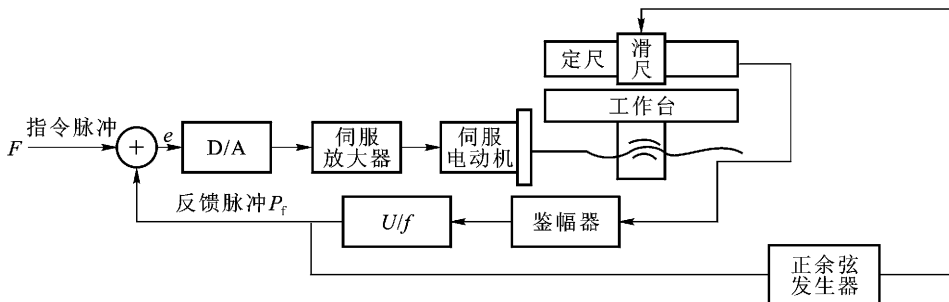


图 9.17 幅值比较伺服系统框图

图中, 比较环节采用的是与脉冲比较伺服系统中相同的可逆计数器, 鉴幅器的作用是将感应同步器输出的交变信号转换成相应的直流信号; U/f 变换器, 即电压/频率器, 其作用是将鉴幅器输出的直流电压信号变换成相应的脉冲序列。实现电压/频率变换的方法很多, 其中比较简单常用的电路是由 CMOS 施密特触发器组成的压控振荡器(简称 VCO); 正、余弦发生器是一些高频变压器绕组, 其作用是供给滑尺正、余弦绕组的励磁信号, 此信号为一系列脉宽可调的方波脉冲, 它将给定的电气角与励磁脉冲宽度联系起来。

幅值比较伺服系统工作前, 指令脉冲 F 与反馈脉冲信号 P_f 均为零, 比较器输出 $e = 0$, 这时伺服电动机不会转动。当指令脉冲 F 建立后, 比较器输出 $e \neq 0$, 其数据给 D/A 转换后, 向速度控制电路发出电动机运转的信号, 电动机带动工作台移动, 同时位置检测元件将工作台的位移检测出来, 经鉴幅器和电压/频率变换器处理后, 转换成相应的数字脉冲信号, 其输出一路作为位置反馈脉冲 P_f , 另一路经正、余弦发生器送入检测元件的励磁电路。当指令脉冲与反馈脉冲相等时, 比较器输出为 0, 说明工作台实际移动的距离等于指令信号要求的距离, 电动机停止运转; 若二者不相等, 则电动机就会继续运转, 带动工作台移动直到比较器输出为 0 时停止。

在以上三种位置控制系统中, 相位比较和幅值比较从结构和安装维护上都比脉冲比较伺服系统复杂, 所以一般情况下脉冲比较伺服系统应用最广泛。随着微电子技术、计算机技术和伺服控制技术的发展, 数控机床已开始采用高速、高精度的全数字伺服系统, 使伺服控制技术从模拟方式、混合方式走向全数字方式。由位置、速度、电流构成的三环反馈全部数字化、软件处理数字 PID, 使用灵活、柔性好。此外在位置伺服控制中引入前馈控制、预测控制、自适应控制、自学习控制方法, 使位置伺服的响应速度和控制精度得到很大提高。

9.2.2 位置控制的实现和运动控制技术

进给轴的位置控制一般采用大规模集成电路位置控制芯片,也可采用通用芯片构成位置控制模板。

1. 位置控制芯片

MB8739 是 FANUC 公司设计的专用位置控制芯片,该芯片适用的位置检测装置为增量式的光栅或光电编码器。MB8720 也是 FANUC 公司专用的位置芯片,该芯片适配的位置检测装置为工作在幅值方式下的旋转变压器或感应同步器。

2. 位置控制模板

图 9.18 为采用位置控制模板的 CNC 系统结构框图。它的位置控制功能由软件和硬件共同实现。软件负责计算位置跟随误差和进给速度指令值,硬件由位置控制输出组件和位置测量组件组成。

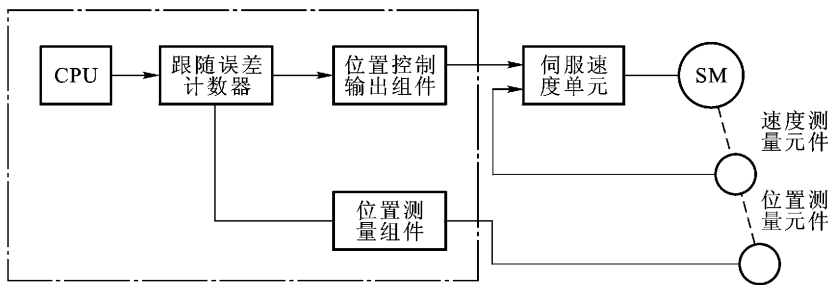


图 9.18 位置控制模板的 CNC 系统结构框图

位置控制输出组件的作用是将数控系统以数字形式输出的跟随误差转换成伺服驱动所需的速度电压信号,位置输出组件由 D/A 转换和放大两个环节;位置测量组件的作用是对位置反馈信号进行整形、放大、辨向,必要时进行倍频处理,输出脉冲至跟随误差计数器进行位置比较。

西门子数控系统使用的位置控制模板,如 MS230、MS250 和 MS300 等都是典型的产品。图 9.19 所示为 SINUMERIK 810 系统测量模块(又称位控模块)接口示意图。

图 9.20 所示为西门子数控系统位置控制模块与位置检测装置的连接关系。图中增量式旋转测量装置或直线式测量装置的输出信号有电压(或电流)正弦信号或 TTL 电平信号两种。EXE 为脉冲整形插值器,它由基本电路印制线路板和细分电路板通过 J3 连接器连接而成。其作用是将光栅尺或编码器的增量信号进行放大、整形、倍频和报警处理,输出到 CNC 进行位置控制。

3. 运动控制器

随着计算机技术、电力电子器件的发展,位置控制从传统的电气传动控制发展到了运动控制。运动控制是近 10 年来发展起来的一种技术,它通常将预定的控制方案、指令转变成成为期望的运动,实现运动控制的控制器使被控的机械运动实现精确的位置、速度、加速度、转矩和力的控制。运动控制器由大规模集成电路组成,具有位置、速度、电流控制功能,用此大规模集成电路配上功率放大器就能控制一台或多台电动机的运动。美国 DELTA 公司生产的 PMAC 多轴运动控制卡是性能好、功能较全的产品,它以高速数字处理器 DSP 为主要元器件,可通过卡上的控制信

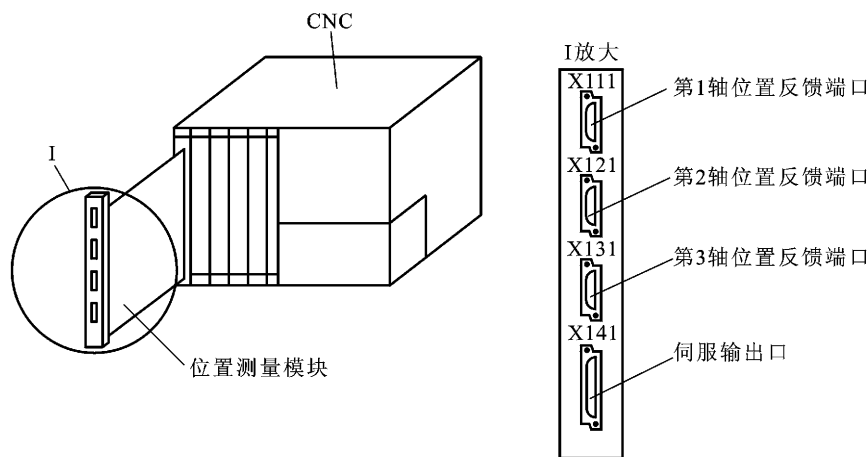


图 9.19 SINUMERIK 810 测量模块

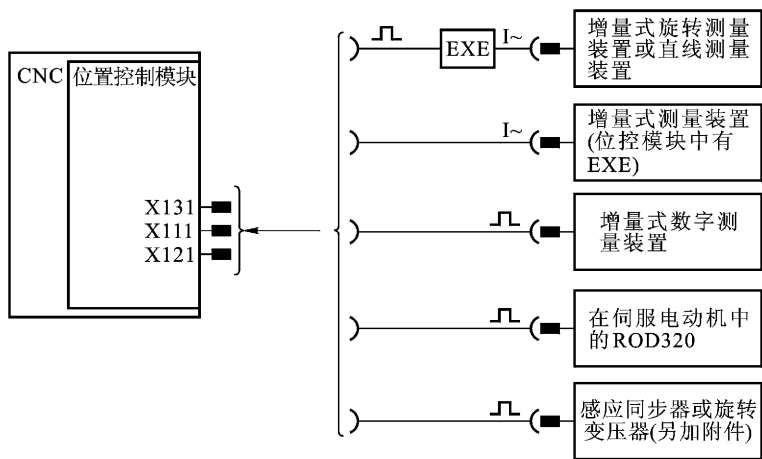


图 9.20 位置控制模块与位置检测装置的连接

号端子、多路数字输入/输出接口等与步进电动机和伺服电动机连接,接收增量式编码器、绝对式编码器和旋转变压器等检测元件的反馈信号,在 PC 机标准总线槽中插入此卡,并运行相应的运动控制软件,就构成开放式控制系统,实现自动控制。

思考与练习

- 9.1 数控机床中的位置检测装置由哪几部分组成,常用的位置检测元件有哪些?
- 9.2 什么是脉冲编码器,它有哪些种?
- 9.3 增量式光电编码器由哪几部分组成,它是如何工作的?
- 9.4 简述脉冲编码器在数控机床中的应用。
- 9.5 直线光栅有哪几部分组成,它在数控机床中是如何安装的?
- 9.6 莫尔条纹的作用有哪些?

- 9.7 旋转变压器和感应同步器各有哪些部件组成,它们在数控机床中的应用有哪些?相位工作方式和幅值工作方式的依据是什么?
- 9.8 磁栅由哪几部分组成,有何特点,它是如何实现方向判别的?
- 9.9 脉冲比较伺服系统常用的检测元件是什么,它有何特点?
- 9.10 相位比较伺服系统常用的检测元件是什么,其主要组成部分的作用是什么?
- 9.11 幅值比较伺服系统常用的检测元件是什么,其主要组成部分的作用是什么?
- 9.12 数控机床位置控制组件有哪几部分组成的,各有什么作用?
- 9.13 什么是运动控制器,它有何特点?

第 10 章

进给驱动及控制技术基础

本章将学到：

1. 数控机床的进给伺服系统有何基本要求 ,常见的进给伺服系统根据执行电动机可分成哪几类？
2. 步进电动机有哪几部分组成 ,它是如何工作的 ,有何特性 ,步进电动机的驱动控制系统有哪几部分组成 ,各部分的作用是什么 ,步进电动机的驱动控制系统是如何连接的？
3. 永磁直流伺服电动机有哪几部分组成 ,它是如何工作的 ,有何特性？直流伺服电动机 PWM 进给驱动控制系统有哪几部分组成 ,各部分的作用是什么？它和数控装置是如何连接的？
4. 永磁交流伺服电动机有哪几部分组成 ,它是如何工作的 ,有何特性？SPWM 调速控制是如何实现的 ,永磁交流伺服电动机变频调速系统有哪几种？

10.1 概 述

数控机床的进给系统是数控装置和机床机械传动部件间的联系环节 ,它包含机械、电子、电动机等各种部件 ,并涉及强电与弱电控制 ,是一个比较复杂的控制系统。

10.1.1 进给伺服系统的基本要求

数控机床进给伺服系统的高性能在很大程度上决定了数控机床的高效率、高精度和高柔性 ,因此数控机床对进给伺服系统的位置控制、速度控制、伺服电动机等方面都有很高的要求。

1. 可逆行

可逆行是指进给部件能灵活地正反向运行的特性。在加工过程中 ,机床工作总是处于随机状态 ,根据加工轨迹的要求 ,随时可能实现正向或反向运动。这就要求当工作台的运动方向发生变化时 ,不应有反向间隙和运动的损失 ;当工作台由运动变成静止时 ,电动机能实现快速制动。

2. 调速范围宽

调速范围是指机械装置要求电动机能提供的最高转速和最低转速之比。数控加工中 ,为保证在任何情况下都能得到最佳切削条件 ,就要求进给伺服系统具有足够宽的调速范围和优异的调速特性。经机械传动后 ,电动机转速的变化范围即可转化为进给速度的变化范围。对一般数

控机床而言,进给速度范围在 $0 \sim 24 \text{ m/min}$ 时,即可满足加工要求,具体技术要求如下:

- ① 在 $1 \sim 24\,000 \text{ mm/min}$ 调速范围内,要求均匀、稳定、无爬行,且速降小。
- ② 在 1 mm/min 以下时,具有一定的瞬时速度,但平均速度要低。
- ③ 在零速时,即工作台停止时,要求电动机有电磁转矩以维持定位精度,即电动机处于伺服锁定状态。

3. 跟踪速度

跟踪速度是指进给伺服系统的快速响应性能。为了保证轮廓切削精度和降低加工表面粗糙度,就要求进给伺服系统有良好的快速响应特性。一方面,伺服系统处于频繁起动、制动、加速、减速等动态过程中,为了提高生产率和保证加工质量,则要求加、减速度足够大,以缩短过渡时间,一般电动机速度从零升至最高,或从最高降至零时,所需时间均应在 0.2 s 以下;另一方面,当负载有突变时,要求恢复其正常速度的时间要短,并无振荡。

4. 低速大转矩

数控机床的加工特点,大都是低速时进行重切削,因此要求进给伺服系统在低速时有大的转矩输出,以满足切削加工的要求。

5. 控制精度高、稳定可靠

要实现加工的高精度,进给伺服系统就必须具备较高的控制精度。该要求一方面体现在定位准确,其定位误差特别是重复定位误差应较小;另一方面要求系统的分辨率应较高,一般其分辨率取决于系统所采用的位置检测元件。

此外,还要求进给伺服系统还应有较强的抗干扰能力,保证进给速度均匀、平稳。

10.1.2 进给伺服驱动系统的分类

进给伺服系统的任务就是要完成各坐标轴的运动控制,按执行电动机的种类不同,它可分为步进驱动系统、直流进给驱动系统、交流进给驱动系统和直线电动机驱动系统。

1. 步进驱动系统

步进驱动系统一般选用功率型步进电动机作为驱动元件,它在我国经济型数控领域和老式机床改造过程中发挥了极大的作用,典型的产品有 KT400 数控系统和 KT300 步进驱动装置。SI-NUMERIK 802S 数控系统配 STEP DRIVE 步进驱动装置和 IMP5 五相步进电动机等。

2. 直流进给驱动系统

直流进给驱动系统一般选用直流伺服电动机为驱动元件。它具有良好的调速性能,20 世纪 80 年代开始,FANUC 公司陆续推出了小惯量 L 系列,中惯量 M 系列和大惯量 H 系列的直流伺服电动机。其中,中、小惯量电动机采用 PWM 速度控制单元,大惯量伺服电动机采用晶闸管速度控制单元,驱动装置也具有过速、过电流等多种保护功能,70 年代中期,SIEMENS 公司推出了 1HU 系列永磁直流伺服电动机,并配套有 6RH20 和 6RA26 两个系列的速度控制单元,前者采用晶体管 PWM 控制,后者采用晶闸管控制。

3. 交流进给驱动系统

交流进给驱动系统一般选用交流同步电动机为驱动元件,它克服了直流伺服电动机使用机械(电刷、换向器)换向的缺点,具有不需维护、制造简单、适合于恶劣环境下工作的特点。随着微电子技术和功率半导体器件的发展,其调速性能得到极大提高,正越来越多地被广泛应用于数

控机床中。

FANUC 公司在 20 世纪 80 年代中期推出了晶体管 PWM 控制的交流驱动单元和永磁式三相交流同步电动机,电动机有 S 系列、L 系列等,驱动装置有 α 系列交流驱动单元等。图 10.1 所示为 FANUC 数控系统与用于车床进给控制的 α 系列两轴交流驱动单元的伺服系统,伺服电动机上的脉冲编码器将检测信号直接反馈于数控系统,经位置处理和速度处理,输出速度控制信号、速度反馈信号及使能信号(使能信号就是伺服驱动条件的满足信号)至驱动单元 JV1B 和 JV2B 端口中。

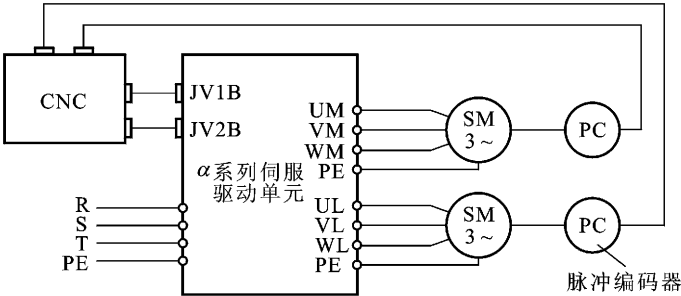


图 10.1 FANUC 进给伺服系统

1983 年,SIEMENS 公司推出了交流驱动系统,由 6SC610 系列进给驱动装置和 6SC611A(SIMODRIVE611A)系列永磁式交流同步电动机组成,其驱动采用 PWM 控制技术。图 10.2 所示为 SINUMERIK800 系列数控系统与 SIMODRIVE611A 进给驱动模块和 IFT5 伺服电机构成的进给伺服系统。其中,数控系统位置控制模块上 X141 端口的 25 针插座为伺服输出口,输出 0 ~ ± 10 V 的模拟信号及使能信号至进给驱动模块上 56、14 速度控制信号接线端子和 65、9 使能信号接线端子,位置控制模块上的 X111、X121 和 X131 端口的 15 针插座为位置检测信号输入口,由

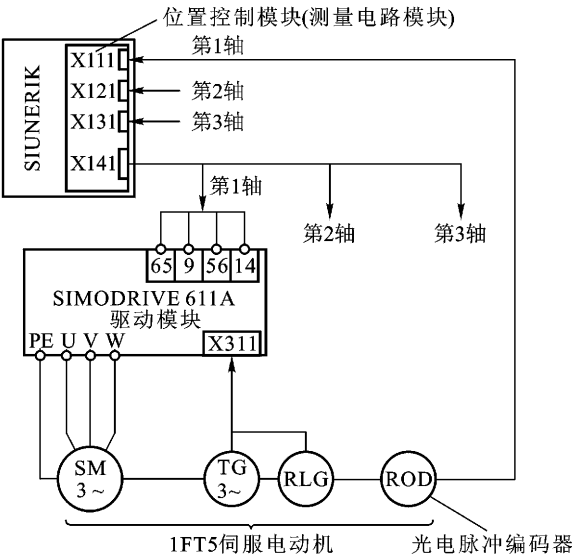


图 10.2 SIEMENS 进给伺服系统

1FT5 伺服电动机上的光电脉冲编码器(ROD320)检测获得 速度反馈信号由 1FT5 伺服电动机上的三相交流测速发电机检测反馈至驱动模块 X311 插座中。

4. 直线进给驱动系统

直线进给驱动系统采用直线电动机作为驱动元件 ,该电动机的实质是把旋转电动机沿径向剖开 ,然后拉直演变而成 ,它是使电能直接转化成直线机械运动的一种推力装置 ,如图 10.3 所示。采用直线电动机直接驱动机床工作台后 ,即取消了原旋转电动机到工作台之间的一切机械中间传动环节(如丝杠传动) ,它将机床进给传动链的长度缩短为零 ,故这种传动方式被称为“ 零传动 ”,也称为“ 直接驱动 ”。科尔摩根 PLATINNDDL 系列直线电动机和 SEVOSTAR CD 系列数字伺服放大器构成的一种典型的直线永磁伺服系统。它能提供很高的动态响应速度和加速度 ,极高的刚性、高的定位精度和平滑的无差运动。可以说直线电动机在机床进给系统中的应用已被世界同行专家评价为当今国际机床工业的一个新技术高峰。

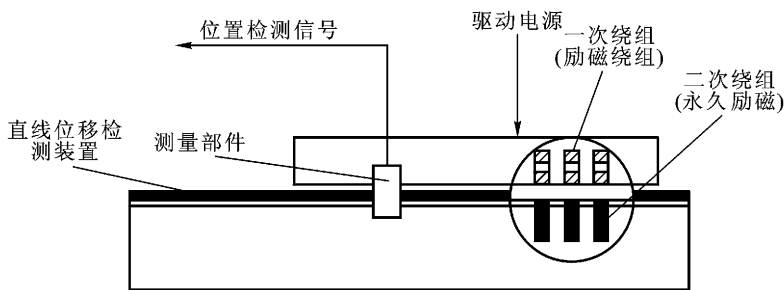


图 10.3 直线电动机的结构

10.2 步进电动机及其驱动控制

步进电动机主要用于经济型数控机床的进给驱动 ,一般采用开环的控制结构 ,如图 10.4 所示。它受驱动控制线路的控制 ,将代表进给脉冲的电平信号直接变换成具有一定方向、大小和速度的机械角位移 ,并通过齿轮和丝杠带动工作台移动。由于没有反馈检测环节 ,故这类控制系统的运动精度和速度主要取决于步进电动机的性能。

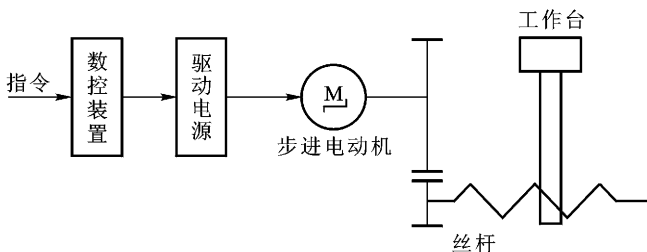


图 10.4 步进电动机的控制结构

10.2.1 步进电动机

步进电动机是一种能将数字脉冲输入转换成旋转增量运动的执行元件。每输入一个脉冲 ,

步进电动机就旋转一个增量角度。因此,它具有定位精度高、无累积误差、控制方便等特点,在速度和精度要求不太高的场合有一定的使用价值。

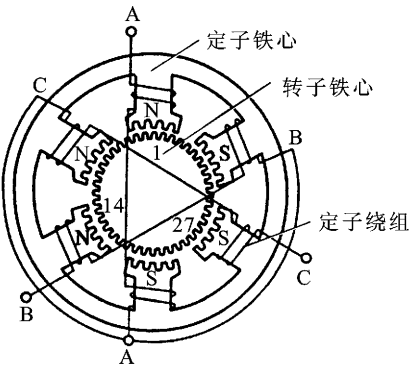
1. 步进电动机的分类及结构

步进电动机的分类方式很多,按运动方式可分为旋转式、直线式和平面式,按各相绕组的分布可分为径向分相式和轴向分相式,按定子绕组相数的不同可分为三相、四相、五相等,按输出力矩的大小可分为反应式(VR)、永磁式(PM)和混合式(HB)。数控机床常采用功率型反应式或混合式步进电动机,功率型步进电动机可以直接驱动较大的负载。

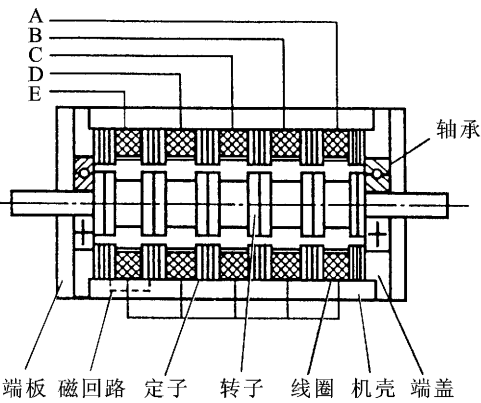
(1) 反应式步进电动机的结构

图 10.5(a)所示为单定子径向分相反应式步进电动机的结构图。由图可知,它和普通电动机一样分为定子和转子两部分。其中定子又可分为定子铁心和定子绕组。定子铁心由电工硅钢片叠压而成,定子绕组是绕在定子铁心的 6 个均匀分布齿上的线圈,在直径方向上相对两个齿上的线圈是串联在一起,构成一相控制绕组。若任一相绕组通电,便形成一组定子磁极(即 NS 极),图 10.5(a)所示的步进电动机可构成三相控制绕组,故称为三相步进电动机。

图 10.5(a)中,定子的每个磁极上,即定子铁心的每个齿上,又开 5 个小齿,其齿槽等宽,齿距角(也称为齿间夹角,即相邻两齿对应的角度)为 9° 。转子上没有绕组,只有均匀分布的 40 个小齿,齿槽也是等宽的,齿距角为 $360^\circ/40 = 9^\circ$,与定子磁极上小齿的齿距角相等。此外,三相定子磁极上的小齿与转子上的小齿依次错开 $1/3$ 齿距角,这样当 A 相磁极上的小齿与转子上的小齿对齐时,B 相磁极上的小齿正好超前(或滞后)转子上的小齿 $1/3$ 齿距角,C 相磁极上的小齿超前(或滞后)转子上的小齿 $2/3$ 齿距角。



(a) 单定子径向分相步进电动机的结构



(b) 五定子轴向分相步进电动机的结构

图 10.5 反应式步进电动机的结构

图 10.5(b)为五定子轴向分相反应式步进电动机结构图。从图中可以看出,步进电动机的定子和转子在轴向分为五段,每一段都形成独立的一相定子铁心、定子绕组和转子。各段定子铁心形如内齿轮,由硅钢片叠成,转子形如齿轮,也由硅钢片制成。各段定子上的齿在圆周方向均匀分布,彼此错开 $1/5$ 齿距,而转子齿彼此不错位。当定子铁心环形槽内的定子绕组通电时,形成一相绕组,构成图中的磁回路。

(2) 混合式步进电动机的结构

图 10.6 是混合式步进电动机的结构示意图。它的定子结构与反应式步进电动机基本相同,

即分成若干磁极,每个磁极上有小齿和线圈。转子由环形磁钢和两段铁心组成,环形磁钢在转子的中部,轴向充磁,两段铁心分别装在磁钢的两端。转子铁心上也有如反应式步进电动机那样的小齿,但两段铁心上的小齿相互错开半个齿距。

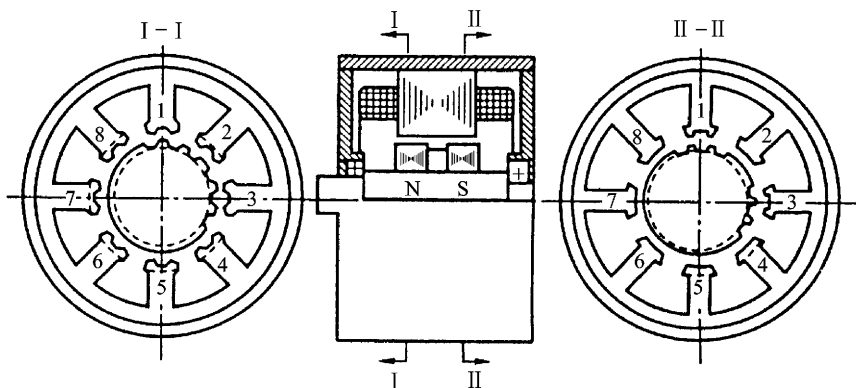


图 10.6 混合式步进电动机的结构

2. 步进电动机的工作原理及主要技术特性

反应式步进电动机和混合式步进电动机的结构虽然不同,但其工作原理相同,下面以反应式步进电动机为例,来分析说明步进电动机的工作原理。

(1) 步进电动机的工作原理

图 10.7 所示为三相反应式步进电动机的工作原理图。它的定子上有六个齿,分别绕有 A、B、C 三相绕组,构成三对磁极,转子上有四个齿。当定子绕组按顺序轮流通电时,如图 10.7(b) 所示, A、B、C 三对磁极就依次产生磁场,对转子上的齿产生电磁转矩,并吸引它,使它一步一步地转动。具体过程如下:

当 A 相通电时,便会在 AA 方向上产生磁场,在磁场力的作用下,吸引转子,使转子的 1、3 两齿与 AA 磁极上的齿对齐,此时, B 相通电, A 相断电,新磁场力又吸引转子 2、4 两齿与 BB 磁极齿对齐,转子顺时针转过 30° 。如果控制线路不断地按 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A$ 的顺序控制步进电动机绕组的通、断电,步进电动机的转子便会不停地顺时针转动。通常,将步进电动机绕组通、断电状态改变一次,其转子转过的角度称为步距角,图 10.7(a) 中的步距角 $\alpha = 30^\circ$ 。

若图 10.7(a) 中的通电顺序变成 $A \rightarrow C \rightarrow B \rightarrow A$,同理可知,步进电动机的转子将逆时针不停地转动。上述的这种通电方式称为三相单三拍。“拍”是指从一种通电状态转变为另一种通电状态;“单”是指每次只有一相绕组通电;“三拍”是指一个循环中,通电状态切换的次数是三次,如图 10.7(b) 所示。采用这种通电方式时,由于每次只有一相绕组通电,因此在切换瞬间,电动机将失去自锁转矩,容易造成失步。此外,因为只有一相绕组通电吸引转子,易在平衡位置附近产生振荡,稳定性不好。故在实际场合往往采用三相双三拍控制方式,即通电顺序按 $AB \rightarrow BC \rightarrow CA \rightarrow AB$ 或按 $AC \rightarrow CB \rightarrow BA \rightarrow AC$ 进行。由于双三拍控制每次有两相绕组通电,而且切换时总保持一相绕组通电,所以工作较稳定。

此外还有一种三相六拍的通电方式,它的通电顺序是:顺时针为 $A \rightarrow AB \rightarrow B \rightarrow BC \rightarrow C \rightarrow CA \rightarrow A \dots$,逆时针为 $A \rightarrow AC \rightarrow C \rightarrow CB \rightarrow B \rightarrow BA \rightarrow A \dots$ 。

若以三相六拍的通电方式工作时,当 A 相断电, A、B 相同时通电时,转子的齿将同时受到 A

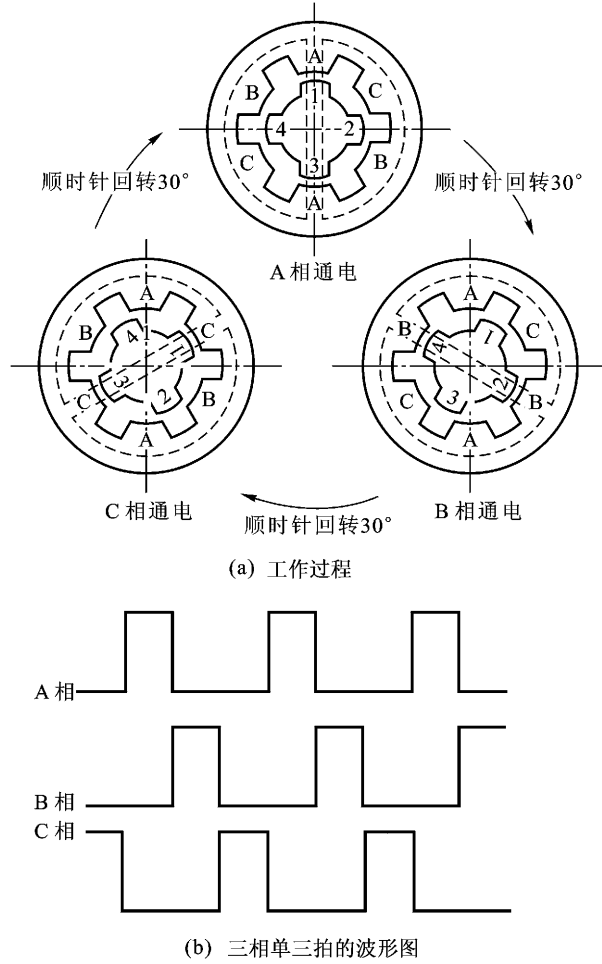


图 10.7 三相反应式步进电动机的工作原理

相和 B 相绕组产生的磁场的共同吸引力,转子的齿只能停在 A 相和 B 相磁极齿之间;当由 A、B 相同时通电转成 B 相通电时,转子上的齿沿顺时针转动,并与 B 相磁极齿对齐,其余依次类推。此时,步进电动机的步距角 $\alpha = 15^\circ$ 。

上述讨论的步进电动机,其步距角都比较大,往往不能满足传动设备对精度的要求,为了减小步距角,常采用图 10.5(a)所示的实际结构,同理分析可知,图 10.5(a),所示步进电动机采用三相六拍方式运行时,步距角 $\alpha = 1.5^\circ$ 。

通过上述原理分析,可以得出以下结论:

- ① 步进电动机定子绕组通电状态每改变一次,其转子便转过一个确定的角度,即步进电动机的步距角 α 。步进电动机的步距角与绕组的相数 m 、转子的齿数 z 、通电方式系数 k (m 相 m 拍时 $k = 1$, m 相 $2m$ 拍时 $k = 2$;依次类推)有关,可以表示为 $\alpha = 360^\circ / (mzk)$ 。
- ② 同一相数的步进电动机可有两种步距角(如 $1.2^\circ/0.6^\circ$ 、 $3^\circ/1.5^\circ$ 等)。步距角越小,数控机床的控制精度越高,常用的步距角为 $0.5^\circ \sim 3^\circ$ 。
- ③ 改变步进电动机定子绕组的通电顺序,转子的旋转方向随之改变。

④ 步进电动机定子绕组通电状态改变速度越快(即变化频率越高),转子旋转的速度也越快(即转速越高)。

(2) 步进电动机的主要技术特性

① 静态转矩和矩角特性。当步进电动机不改变通电状态时,转子处于不动状态。如果在电动机轴上外加一个负载转矩,使转子按一定的方向转过一个角度 θ ,此时转子所受的电磁转矩 T ,称为静态转矩,角度 θ 称为失调角。描述静态时 T 和 θ 的关系为矩角特性 $T_{\max}$,该特性上转矩的最大值称为最大静态转矩。它表示了电动机的承载能力,如图10.8所示。 $T_{\max}$ 愈大,电动机带负载的能力愈强,运行的快速性和稳定性愈好。在静态稳定区内,当去除负载转矩后,转子在电磁转矩下,仍能回到平衡点。最大静态转矩与通电状态和各相绕组电流有关。

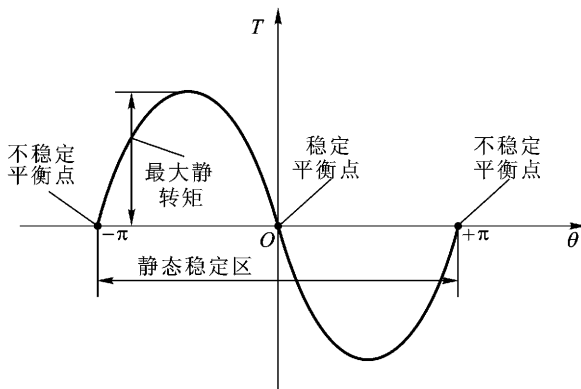


图 10.8 静态矩角特性

② 步距误差。步距误差通常是指步进电动机运行时,转子实际转过的角度与理论步距角的差值。由于步进电动机转子转过一圈时,将重复上一圈的稳定位置,即步进电动机的步距角累积误差(转子连续走若干步时,步距角的总误差)将以一圈为周期重复出现,转一周的累积误差为零。通常步进电动机的静态步距误差在 $10'$ 以内。

③ 起动频率。空载时,步进电动机由静止状态突然起动,并进入不失步的正常运行状态的最高频率,称为起动频率(又称为突跳频率)。它是衡量步进电动机快速性能的重要数据。如果加给步进电动机的指令脉冲频率大于起动频率,步进电动机就不能够正常工作。起动频率不仅与电动机本身的参数(包括最大静态转矩、步距角及转子惯量等)有关,而且还与负载转矩有关。步进电动机在带负载(尤其是惯性负载)下的起动频率比空载时要低,且随着负载的加重,起动频率会进一步降低。

④ 连续运行频率。步进电动机起动后,其运行速度能跟踪指令脉冲频率连续工作而不失步的最高频率,称为连续运行频率(或最高工作频率)。它比起动频率大得多。它与电动机所带负载的性质、大小及驱动电源有关,它是决定定子绕组通电状态最高变化频率的参数,即影响步进电动机的最高转速。步进电动机常采用升、降速控制,起停时,频率降低;正常运行时,频率升高。

⑤ 矩频特性与动态转矩。矩频特性是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,如图10.9所

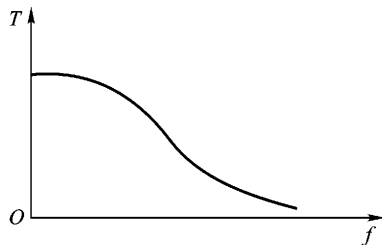


图 10.9 矩频特性

示。该特性上每一个频率对应的转矩称为动态转矩。随着连续运行频率的上升,动态转矩将下降。使用时,一定要考虑这个特点,否则会出现失步现象。

10.2.2 步进驱动控制基础

步进电动机的运行特性不仅与步进电动机本身和负载有关,还与配套使用的驱动控制装置有着十分密切的关系。步进电动机驱动控制装置的作用是将数控机床控制系统送来的脉冲信号和方向信号按要求的配电方式自动地循环给步进电动机的各相绕组,以驱动步进电动机转子正、反向旋转。它由脉冲分配器、功率驱动器等组成。

1. 环形脉冲分配器

环形脉冲分配器用于控制步进电动机的通电方式。它将数控装置送来的一系列进给脉冲指令转换成控制步进电动机定子绕组通、断电的电平信号,且电平信号状态改变的次数及顺序与进给脉冲个数及方向相对应。环形脉冲分配器可分为硬件环分器和软件环分器两类。

(1) 硬件环分器

图 10.10 所示为硬环分驱动与数控装置的连接图。图中环形脉冲分配器的输入、输出信号一般均为 TTL 电平,输出信号为高电平,则表示相应的绕组通电,反之则失电。*CLK* 为数控装置所发脉冲信号,每个脉冲信号的上升或下降沿到来时,输出则改变一次绕组的通电状态;*DIR* 为数控装置发出的方向信号,其电平的高低即对应电动机绕组通电顺序的改变(转向的改变);*FULL/HALF* 用于控制电动机的整步或半步(即三拍或六拍)运行方式,一般情况下,根据需要将其接在固定电平上即可。

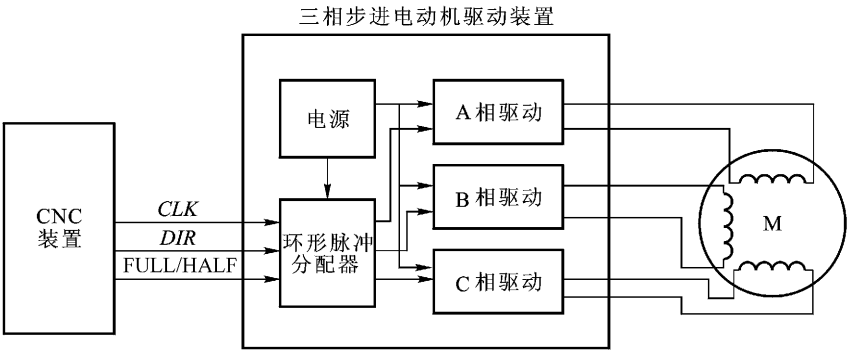
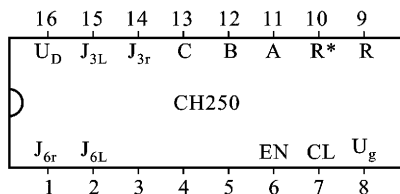


图 10.10 硬环分驱动与数控装置的连接

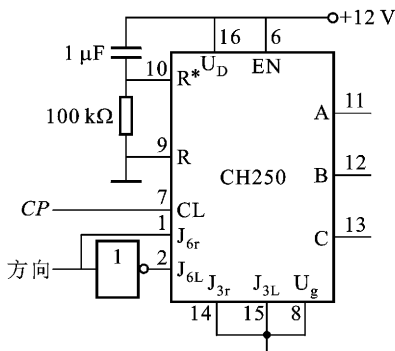
硬件环分器是一种特殊的可逆循环计数器,可以由门电路及逻辑电路构成。按其电路构成的不同,可分为 TTL 脉冲分配器和 CMOS 脉冲分配器。

目前市场上提供的国产 TTL 脉冲分配器有三相(YB013)、四相(YB014)、五相(YB015)和六相(YB016)等,它们均为 18 个引脚的直插式封装形式;CMOS 脉冲分配器也有不同的型号,例如 CH250 集成芯片用来驱动三相步进电动机,封装形式为 16 脚直插式。

图 10.11 所示为 CH250 集成芯片的引脚图和三相六拍接线图。图 10.11(a)中,管脚 A、B、C 为相输出端,管脚 R、R* 用于确定初始励磁相,若为 10,则为 A 相,若为 01,则为 A、B 相,若为 00,则为环形分配器工作状态;管脚 CL、EN 为进给脉冲输入端,若 EN = 1,进给脉冲接 CL,脉冲上升沿使环形分配器工作,若 CL = 0,进给脉冲接 EN,脉冲下降沿使环形分配器工作,否则环形



(a) 引脚图



(b) 接线图

图 10.11 CH250 集成芯片的引脚图和三相六拍接线图

分配器状态锁定；管脚 J_{3r} 、 J_{3L} 、 J_{6r} 、 J_{6L} 为三拍或六拍工作方式的控制端；管脚 U_D 、 U_S 为电源端。

图 10.11(b) 所示为三相六拍工作方式，进给脉冲 CP 的上升沿有效。方向信号为 1 则正转，为 0 则反转。

(2) 软件环分器

图 10.12 所示为软环分驱动与数控装置的连接。由图可知，软环分驱动的环形分配是由 CNC 装置中的计算机软件来完成，即 CNC 装置直接控制步进电动机各绕组的通、断电。不同种类、不同相数、不同通电方式的步进电动机，用软环分只需编制不同的程序，将其存入 CNC 装置的 EPROM 中即可。

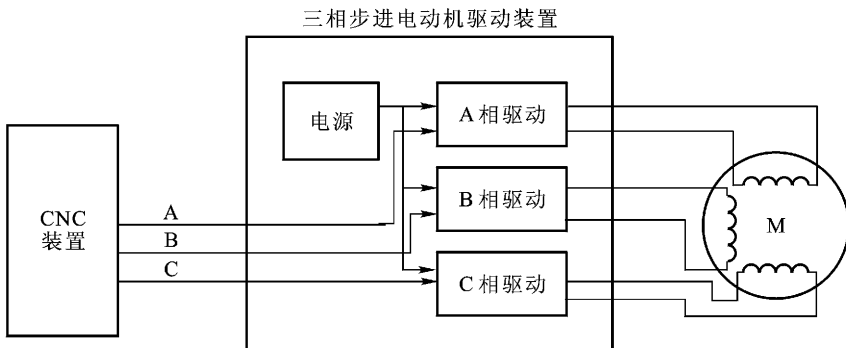


图 10.12 软环分驱动与数控装置的连接

2. 功率驱动器

步进电动机的功率驱动器又称功率放大电路。由于来自环形分配器的脉冲电流只有几毫安，而步进电动机的定子绕组需要几安的电流才能驱动转子。功率驱动器的作用正是将来自环

形分配器的脉冲信号进行功率放大。功率放大器一般由两部分组成,即前置放大器和大功率放大器。前者是为了放大环形脉冲分配器送来的进给控制信号并推动大功率驱动部分而设置的。它一般由几级反相器、射极跟随器或带脉冲变压器的放大器等组成。后者是进一步将前置放大器送来的电平信号放大,得到步进电动机各相绕组所需用的电流。

功率放大电路的控制方式种类较多,常使用单电压驱动、高低压切换驱动、恒流斩波驱动、调频调压驱动等。所采用的功率半导体元件可以是大功率晶体管 GTR,也可以是功率场效晶体管 MOSFET 或可关断晶闸管 GTO。

图 10.13(a)所示为恒流斩波驱动电路。它的工作原理是,将环形脉冲分配器输出的脉冲作为输入信号,若为正脉冲,则 V1、V2 导通,由于 U_1 电压较高,绕组回路又没串联电阻,所以绕组中的电流迅速上升。当绕组中的电流上升到额定值以上某个数值时,由于采样电阻 R_e 的反馈作用,经整形、放大后送至 V1 的基极,使 V1 截止。接着绕组由 U_2 低压供电,绕组中的电流立即下降,但刚降到额定值以下时,由于采样电阻 R_e 的反馈作用,使整形电路无信号输出,此时高压前置放大电路又使 V1 导通,电流又上升。如此反复进行,形成一个在额定电流值上下波动呈锯齿状的绕组电流波形,近似恒流,如图 10.13(b)所示。锯齿波的频率可通过调整采样电阻 R_e 和整形电路的电位器来改变。

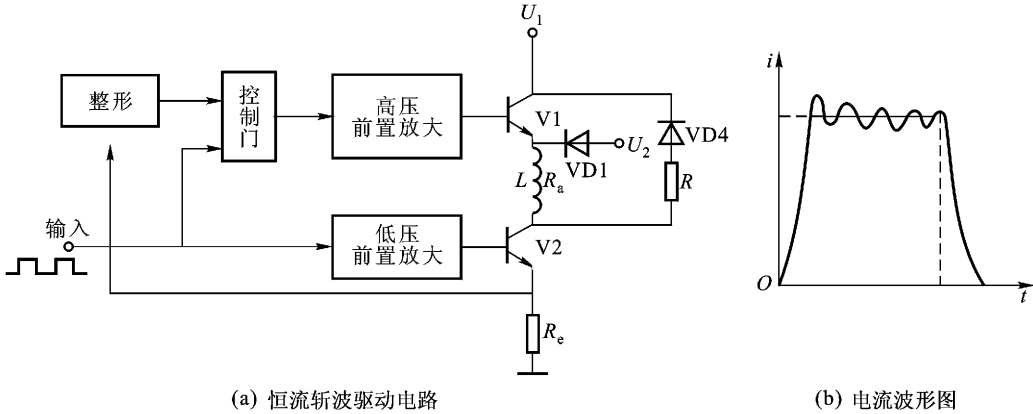


图 10.13 恒流斩波驱动电路及电流波形图

斩波驱动电路具有绕组的脉冲电流前、后沿陡,快速响应好,功耗小,效率高,输出恒定转矩等特点。但它的电路较复杂,实际应用时,常将它集成化。

SLA7026M 是由图 10.13 所示原理构成的集成斩波恒流功率放大芯片之一。图 10.14 是一个实际使用 SLA7026M 模块组成的四相步进电动机驱动电路。其中 A、B、C、D 是相控制信号输入端,经分压电阻 R_2 、 R_3 得到的控制信号 V_{REF} 由芯片的 REFA、REFB 端输入; R_5 、 R_6 是绕组电流采样电阻(1Ω),分别接在 RSA、RSB 端,控制绕组电流;功率输出端 $OUTA$ 、 $\overline{OUTA}$ 、 $OUTB$ 、 $\overline{OUTB}$ 分别接到步进电动机的 A、B、C、D 四极上;VZ 是稳压管,用来防止输入的电流超过额定值而损坏芯片和电动机。

该芯片的最大输出电流为 2A,可直接连接驱动小功率电动机。对于数控机床所用的较大功率的步进电动机,可在芯片输出端接大功率管以扩展输出电流和功率。

3. 细分技术

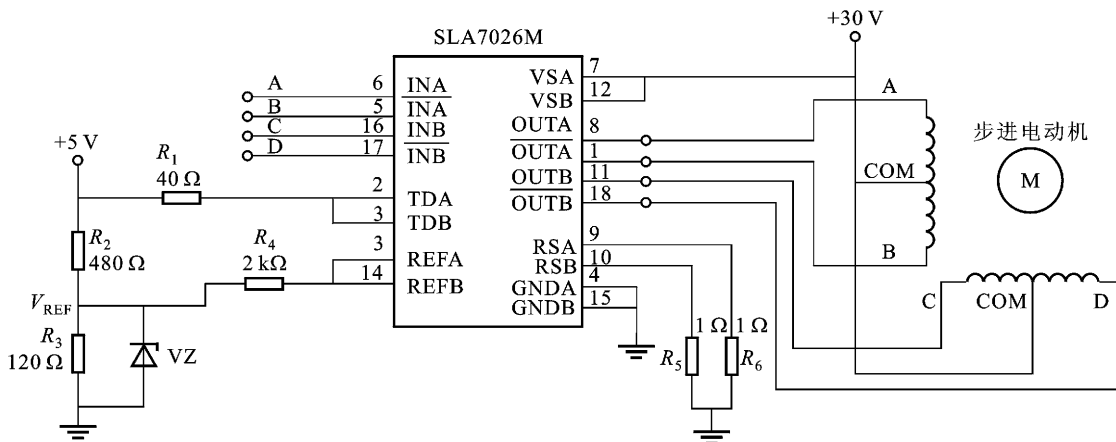


图 10.14 SLA7026M 模块组成的四相步进电动机驱动电路

在前述步进电动机的工作原理中,讲到步距角由步进电动机的齿距角和绕组相数等电动机的结构所决定,在实际应用中,为了提高进给运动的分辨率,要求对步距角进一步细分。在不改变步进电动机结构的前提下,为了达到这一目的,将额定电流以阶梯波方式输入。此时,电流分成多少台阶,则转子就以同样的步数转过电动机固有的一个步距角。这样将一个步距角细分成若干步的驱动技术称为细分技术,与之相对应的电路称为细分线路。如十细分线路,即将原来输入一个进给脉冲,步进电动机走一步,变为输入 10 个脉冲才走一步。换句话说,采用十细分线路后,在进给速度不变的情况下,可使脉冲当量缩小到原来的 $1/10$ 。

图 10.15 是细分前后的一步角位移波形比较图。若无细分,定子绕组的电流是由零跃升到额定值的,相应的角位移如图 10.15(a)所示;采用细分后,定子绕组的电流要经过若干小步的变化,才能达到额定值,相应的角位移如图 10.15(b)所示。

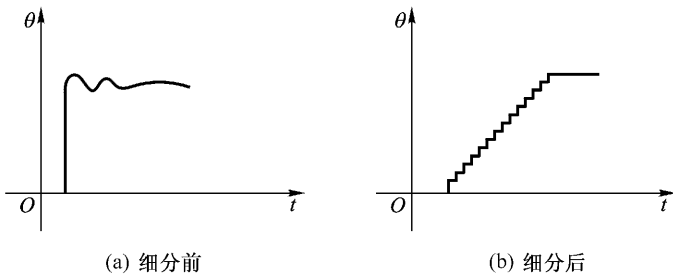


图 10.15 细分前后的一步角位移波形比较图

获得阶梯电流一般有两种方法:一是先产生时序脉冲,经放大后在电动机的电枢内叠加;二是先在加法器内将时序脉冲叠加成阶梯电压,后进行放大,再在电枢绕组内获得阶梯电流波形。在电动机和机械系统都不变的情况下,通过细分驱动技术可得到更小的脉冲当量,因此提高定位精度。

10.2.3 步进电动机驱动器及应用

随着步进电动机在各方面的广泛应用,步进电动机的驱动装置也从分立元件电路发展到集成元件电路,目前已发展到系列化、模块化的步进电动机驱动器。虽然各生产厂家的驱动器标准

不统一,但其接口定义基本相同,只要了解接口中接线端子、标准接口及拨动开关的定义和使用,即可利用驱动器构成步进电动机控制系统,下面以上海开通数控有限公司KT350系列混合式步进电动机驱动器为例作介绍。

图10.16为KT350步进电动机驱动器的外形及接口图。其中接线端子排A、 $\bar{A}$ 、B、 $\bar{B}$ 、C、 $\bar{C}$ 、D、 $\bar{D}$ 、E、 $\bar{E}$ 接至电动机的各相;AC为电源进线,用于接50Hz、80V的交流电源;端子G用于接地;

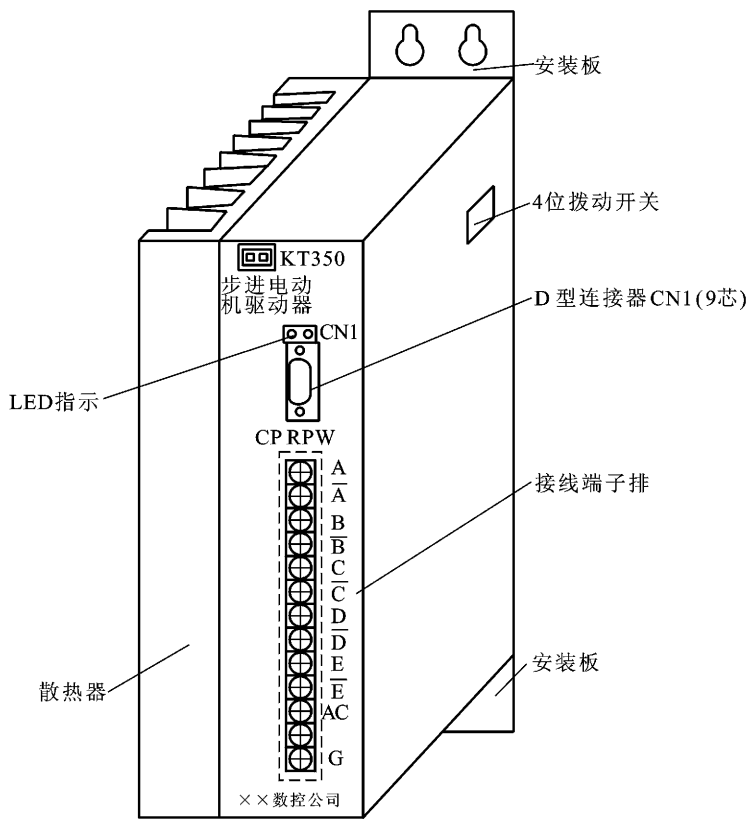


图 10.16 KT350 步进电动机驱动器的外形及接口图

连接器 CN1 为一个 9 芯连接器,可与控制装置连接,各脚号的定义可见附录 2。RPW、CP 为两个 LED 指示灯,拨动开关 SW 是一个四位开关,用于设置步进电动机的控制方式。

图 10.17 为拨动开关示意图,其中第 1 位用于脉冲控制模式的选择,OFF 位置为单脉冲控制方式,ON 位置为双脉冲控制方式;第 2 位用于运行方向的选择(仅在单脉冲方式时有效),OFF 位置为标准运行,ON 位置为单方向运行;第 3 位用于整/半步运行模式选择,OFF 位置时,电动机以半步方式运行,ON 位置时,电动机以整步方式运行;第 4 位用于运行状态控制,OFF 位置时,驱动器接受外部脉冲控制运行,ON 位置时,自动试机运行(不需外部脉冲)。

图 10.18 为 KT350 系列混合式步进电动机驱动器的典型接线图。

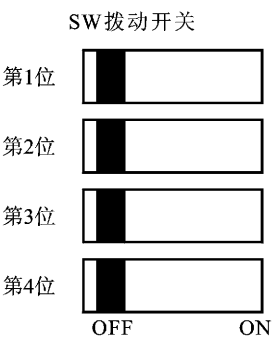


图 10.17 拨动开关示意图

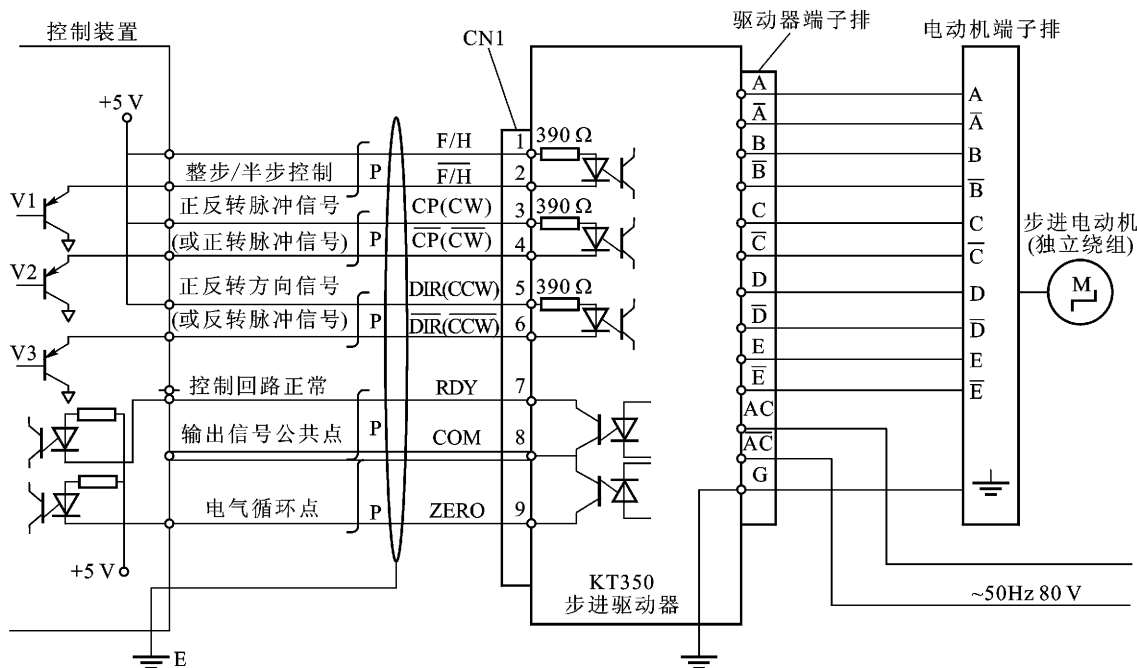


图 10.18 KT350 系列混合式步进电动机驱动器的典型接线图

10.3 直流伺服电动机及其进给驱动控制

由于数控机床对于进给驱动装置的要求较高,而直流电动机具有良好的调速特性,因此以往数控机床的闭环、半闭环控制系统的伺服驱动大多采用大功率直流伺服电动机。

10.3.1 直流伺服电动机

常用的直流伺服电动机有永磁式直流电动机、混合式直流电动机、无刷直流电动机和直流力矩电动机等。直流进给伺服系统通常使用永磁式直流电动机类型中的有槽电枢永磁直流电动机。此外,永磁式直流电动机还包括无槽电枢永磁直流电动机、杯型电枢永磁直流电动机和印刷绕组电枢永磁直流电动机等,这几种电动机均为小惯量电动机,其主要特点是以减小电枢转动惯量来改善动态性能,因此低速时运转稳定、换向性能好,但过载能力低,与机械传动匹配性较差,适用于要求快速响应和频繁起动的伺服系统。

1. 永磁式直流伺服电动机的结构

普通型永磁式直流伺服电动机转子惯性大,调速范围宽,故又称为大惯量宽调速永磁直流伺服电动机。

图 10.19 所示为永磁式宽调速直流电动机结构示意图。由图可知,它由定子和转子两大部分组成,定子包括磁极、电刷装置、机座、机盖等部件;转子通常称为电枢,包括电枢铁心、电枢绕组、换向器、转轴等部件。此外在转子尾部装有测速机、旋转变压器(或光电编码器)等检测元件。

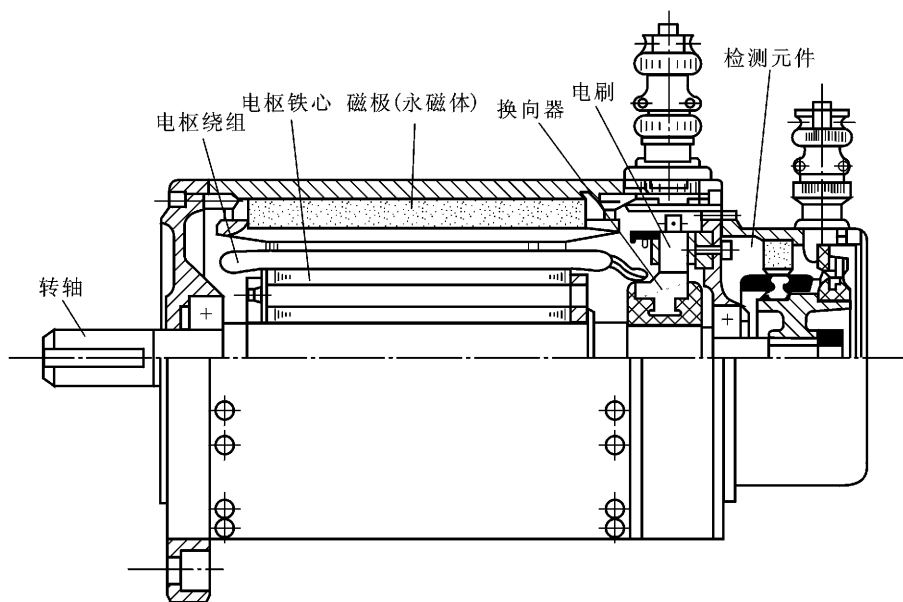


图 10.19 永磁式宽调速直流电动机结构示意图

定子磁极是一个永久磁体(高性能直流电动机采用稀土永磁材料),由此建立磁场,磁极的形状大都为瓦状结构,并加上极靴或磁轭,以聚集气隙磁通;换向器由电刷和换向片等组成,它的作用是将外加直流电源引向电枢绕组,完成换向工作。

2. 工作原理

图 10.20 所示为永磁式宽调速直流电动机的工作原理示意图。给电刷通以图示方向的直流电,则电枢绕组中的任一根导体的电流方向如图所示。当转子转动时,由于电刷和换向器的作用使得原来 N 极范围下的导体一转过中性面进入 S 极范围,电流就反向;反之原来 S 极范围下的导体只要一过中性面进入 N 极范围,电流也就马上反向。根据电流在磁场中受到电磁力方向可知,图中转子受顺时针方向力矩的作用,转子作顺时针转动。如果要使转子反转,只需改变电枢绕组的电流方向,即电枢两端电压的方向。

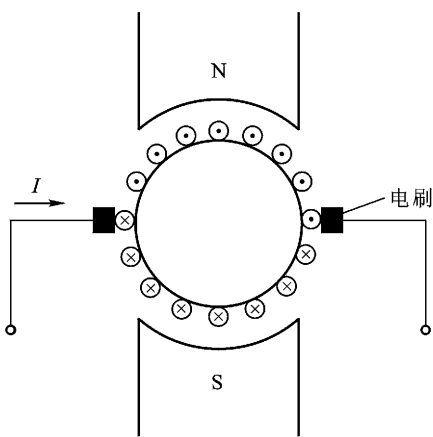


图 10.20 直流电动机的工作原理示意图

3. 直流伺服电动机的工作特性

(1) 静态特性

直流伺服电动机的静态特性是指电动机在稳态情况下工作时,其转速、电磁力矩和电枢控制电压三者之间的关系。

图 10.21 为直流伺服电动机电枢等效电路,图中 U_d 为电枢电压; i_d 为电枢电流; E_d 为电枢反电动势; R_d 为电枢电阻。

① 若定子磁极产生的磁通为 Φ , 转矩常数为 K_T , 则电枢电流切割磁感线所产生的电磁转矩

$$T_m = K_T \cdot \Phi \cdot I_d$$

② 若电动机的电动势常数(与电动机结构有关)为 K_E , 则电动机的角速度为

$$\omega = \frac{U_d}{K_E \Phi} - \frac{R_d}{K_E K_T \Phi^2} \cdot T_m$$

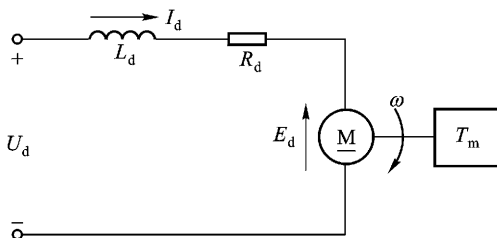
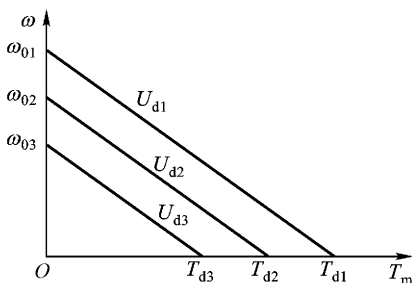


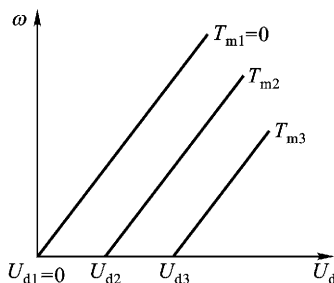
图 10.21 电枢等效电路

图 10.22 所示为直流伺服电动机的机械特性曲线

线和调节特性曲线。由图 10.22(a)可见,直流伺服电动机的机械特性是一组斜率相同的直线。每条机械特性和一种电枢电压相对应,与 ω 轴的交点是该电枢电压下的理想空载角速度,与 T_m 轴的交点是该电枢电压下的起动转矩。由图 10.22(b)可见,直流伺服电动机的调节特性也是一组斜率相同的直线,每条调节特性和一种电磁转矩相对应,与 U_d 轴的交点是起动时的电枢电压。此外由图中还可以看出,调节特性的斜率为正,说明在一定负载下,电动机转速随电枢电压的增加而增加,而机械特性的斜率为负,说明在电枢电压不变时,电动机转速随负载转矩的增大而降低。



(a) 机械特性曲线



(b) 调节特性曲线

图 10.22 直流伺服电动机的机械特性曲线和调节特性曲线

(2) 转矩 - 速度特性曲线

图 10.23 所示为永磁直流伺服电动机的转矩 - 速度特性曲线(又称为工作曲线)。由图可知,其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线分成三个区域:Ⅰ区为连续工作区,在该区域内对转矩和转速做任意组合,都可连续工作;Ⅱ区为断续工作区,此时电动机处于接通 - 断开的断续工作方式,换向器与电刷工作于无火花的换向区,可承受低速大转矩的工作状态;Ⅲ区为瞬时加减速区,此时电动机只能作加速或减速,工作一段极短的时间。

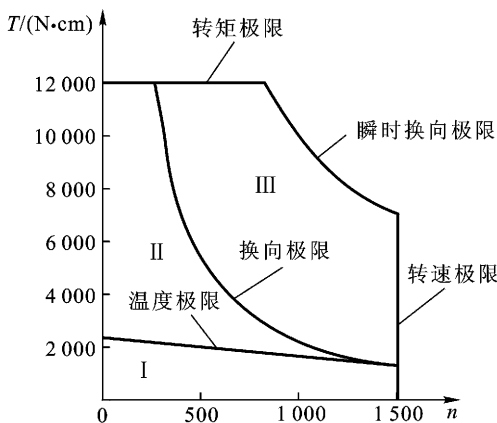


图 10.23 永磁直流伺服电动机的工作曲线

10.3.2 直流进给伺服驱动控制基础

数控机床直流进给伺服系统多采用永磁式直流伺服电动机作为执行元件,为了与伺服系统所要求的负载特性相吻合,通常采用控制电动机电枢电压的方法来控制输出转矩和转速。直流伺服电动机电枢电压控制是在定子磁场不变的情况下,通过施加在电枢绕组两端的电压信号来控制电动机的。由于磁场保持不变,其电枢电流可以达到额定值,相应输出的转矩也可以达到额定值,因此电枢电压控制又称为恒转矩调速,在这种调速方式下,电动机的最高转速不能超过其额定转速。

直流伺服电动机的速度控制按主回路的类型来分主要有晶闸管(SCR)调速系统和晶体管脉宽调制(PWM)调速系统两种。由于 PWM 调速系统具有响应快、效率高、调速范围宽、低速平稳、结构简单等优点,被广泛应用于直流进给驱动系统中。

1. 直流 PWM 调速的基本原理

晶体管直流脉宽调制(PWM)是利用对大功率晶体管开关时间的控制,将直流电压转换成一定频率的方波电压,加在直流电动机的电枢两端,通过方波脉冲宽度的控制改变电枢的平均电压,达到调压调速的目的。

图 10.24 所示为直流电动机电枢两端电压 U_d ,由图可知,它是一串方波脉冲,脉冲的幅值 U_m 是常数,周期 T 为常数,脉冲宽度 S 是可变的,其平均电压 $\overline{U_d} = U_m \cdot \frac{S}{T}$ 。如果利用控制信号的大小来改变每一周期内“接通”和“断开”的时间长短,即改变脉宽,就可以改变电枢两端的平均电压。

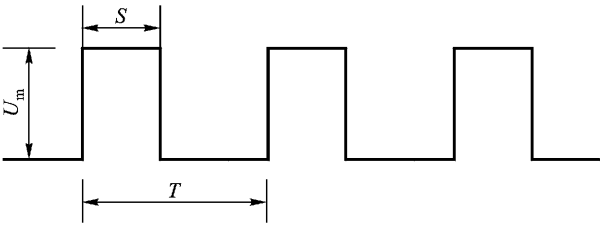


图 10.24 电枢两端的 PWM 脉冲电压

2. FANUC 系统 PWM 直流进给驱动

图 10.25 所示为 FANUC PWM 直流进给驱动框图,图中功率开关晶体管 V1 ~ V4 组成的 H 型驱动电路是主回路。其中,CDR 用于检测电枢电流,作为电流反馈,其压降由 CD1 和 CD2 端输出,MOL 为热继电器,串联于电枢电路,用于电动机的过载保护,DBR 为能耗制动电阻,并联于电枢,当主回路电源切断时,MCC 动断触点闭合,实现电动机的能耗制动。

图中速度控制单元与 CNC 系统的连接信号有：

- ① VCMD 信号是 CNC 发送至速度单元用来控制伺服电动机转速的模拟电压控制信号,通常为 $-10 \sim +10V$ 。
- ② TSA、TSB 信号是 CNC 系统发送到速度控制单元的伺服电动机转速的反馈信号,通常为 $-10 \sim +10V$ 。

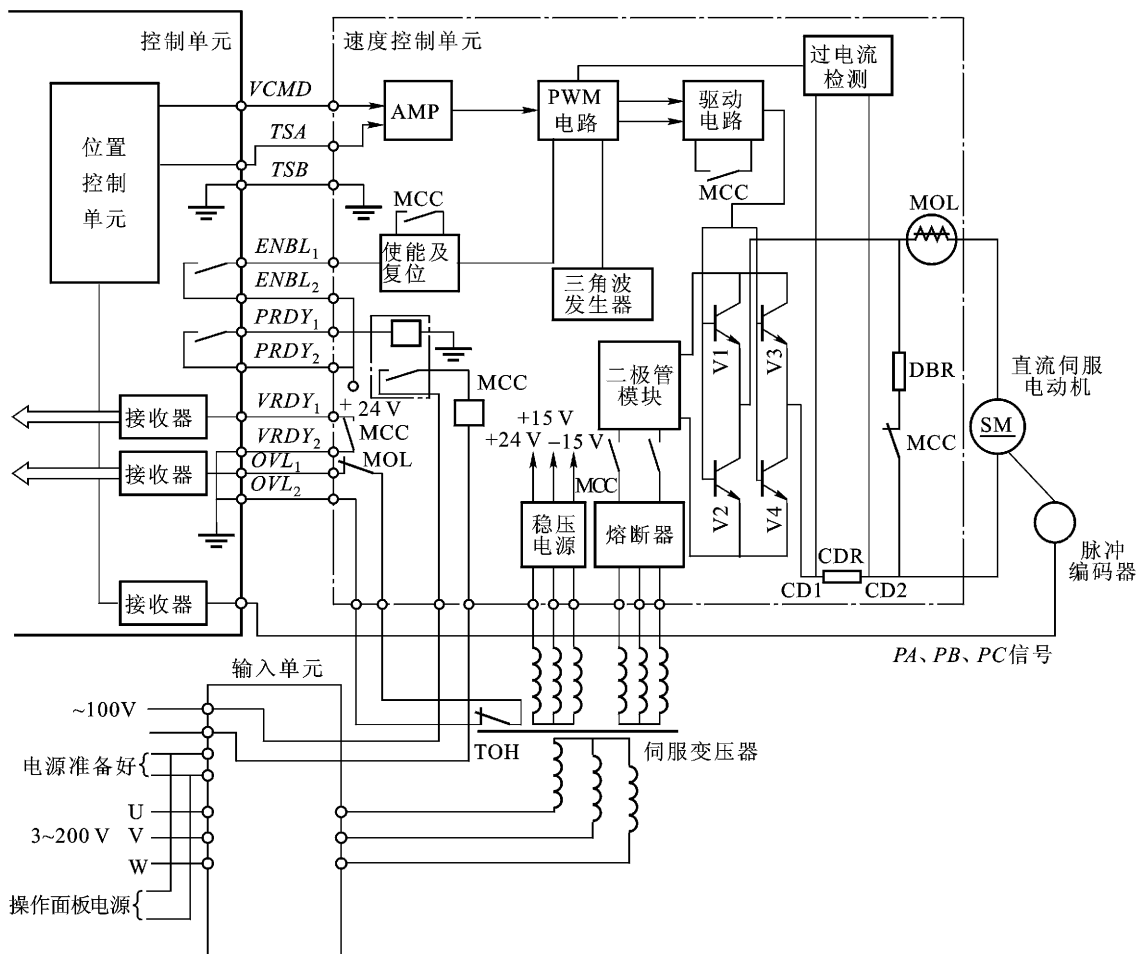


图 10.25 FANUC PWM 直流进给驱动框图

③ $ENBL_1$ 、 $ENBL_2$ 信号是使能控制信号。当 $ENBL_1$ 和 $ENBL_2$ 短接时,速度控制单元开始正常工作,并接受 VCMD 信号的控制。

④ $PRDY_1$ 、 $PRDY_2$ 信号是位置准备好控制信号。当 $PRDY_1$ 和 $PRDY_2$ 短接时,速度控制单元主回路接通。

⑤ $VRDY_1$ 、 $VRDY_2$ 信号是速度控制单元通知 CNC 系统正常工作的触点信号。当速度控制单元出现报警时, $VRDY_1$ 和 $VRDY_2$ 立即断开,系统封闭。

⑥ OVL_1 、 OVL_2 信号是用于过载保护的动断触点信号。当速度控制单元中的过载继电器 MOL 或变压器内的热控开关 TOH 动作时,该触点立即断开,并通知 CNC 产生过热报警。

FANUC 系统 PWM 进给驱动单元的速度控制过程是:数控系统中的 CPU 发出进给信号 VCMD 送到速度控制单元。伺服电动机旋转时,脉冲编码器发出脉冲,经位置控制单元转换成速度反馈信号,通过 TSA 送往速度控制单元,并与 VCMD 进行比较,从而完成伺服电动机的速度控制。

3. PWM 速度控制单元的组成及功用

图 10.26 所示为直流伺服电动机的速度控制单元电气组成框图,由图可知它是一个转速、电流双闭环 PWM 控制电路,电流调节环为内环,速度环为外环。它主要由以下几部分组成。

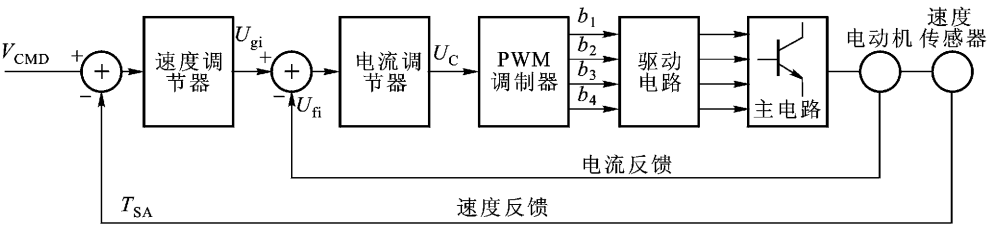


图 10.26 直流伺服电动机的速度控制单元电气组成框图

(1) 速度调节器

速度调节器的作用是将 CNC 系统发送过来的 V_{CMD} 指令信号,与速度反馈信号 T_{SA} 进行计算,算出差值后输出信号 U_{gi} ,作为电流调节器的给定输入信号。

(2) 电流调节器

电流调节器的作用是将电流给定信号 U_{gi} 与电流反馈信号 U_{fi} (来自与电动机电枢相串联的电流检测元件)进行计算,算出电流误差,并发出信号 U_c 作为 PWM 脉宽调制器的控制信号。电流调节器和速度调节器均采用比例积分调节器,如 LM1485。

(3) PWM 调制器

PWM 调制器是产生一个宽度可由速度给定信号 U_c 调节且与之成比例的脉宽电压的装置,它的输出是主电路基极驱动信号 U_{b1} 、 U_{b2} 、 U_{b3} 、 U_{b4} 。

(4) 驱动电路

它的全称为大功率管(GTR)的基极驱动电路,其主要作用是将控制电路输出的 PWM 脉冲放大到足以驱动功率晶体管。

(5) 主电路

它是由四只大功率晶体管组成的 PWM 变换器,其作用是将直流信号变换成宽度可调的方波脉冲,加在电动机的电枢两端,以驱动电动机。

(6) 速度检测元件

速度检测元件的作用是在伺服电动机旋转时,发出速度反馈信号给速度控制单元。

4. PWM 调制器

PWM 调制器是一种电压-脉宽变换装置,即脉宽调制器。它由三角波发生器、加法器和比较器组成,如图 10.27 所示,其中三角波发生器发出正负对称的三角波信号 U_T 。

控制信号(由电流调节器输出) U_c 和一定频率的三角波信号 U_T ,经加法器产生信号 $U_c + U_T$,然后送入比较器(一个工作在开环状态下的运算器)。一般情况下,比较器负端接地, $U_c + U_T$ 从正端输入。

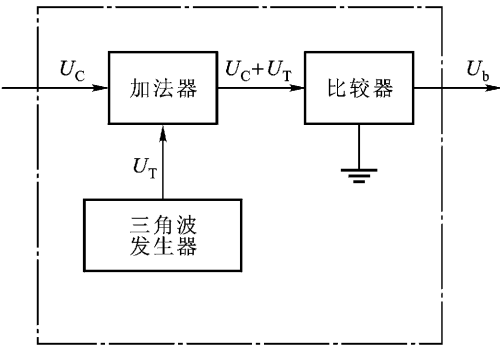


图 10.27 PWM 调制器

当 $U_c + U_T > 0$ 时,比较器输出满幅度正电平;当 $U_c + U_T < 0$ 时,比较器输出满幅度的负电平。

电压-脉宽变换器对信号波形的调制过程如图 10.28 所示。由图可知,比较器输出电压 U_b 的幅值不变,但脉冲宽度随 U_c 的变化而变化,即调节控制电压 U_c 的极性和大小,可调节输出正负脉冲的宽度,从而调节输出平均电压的大小和极性。当 $U_c = 0$ 时,输出信号为正负脉冲宽度相等的矩形脉冲;当 $U_c > 0$ 时, U_b 的正脉冲宽度大于负脉冲宽度;当 $U_c < 0$ 时, U_b 的正脉冲宽度小于负脉冲宽度。

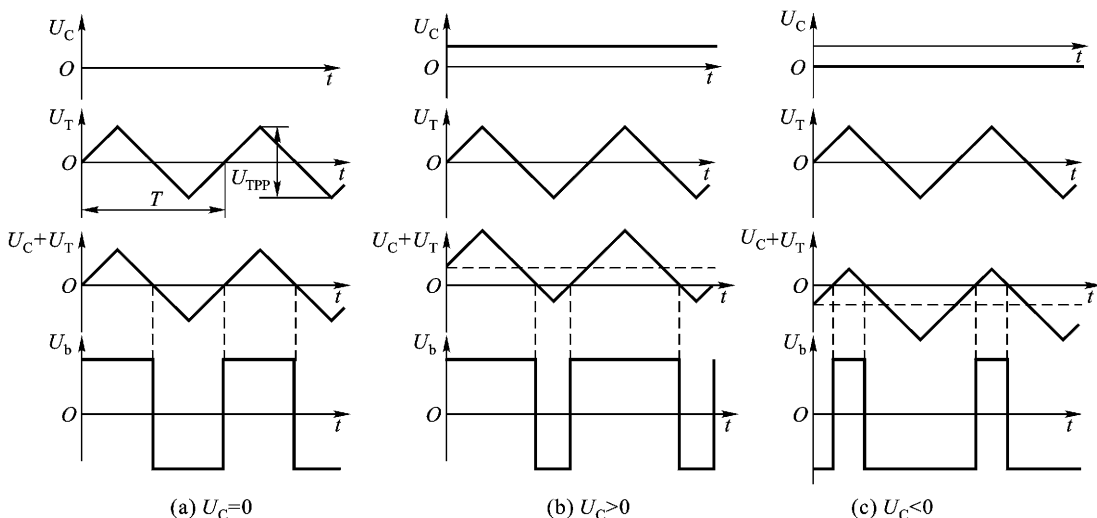


图 10.28 PWM 脉宽调制波形

实际应用的 PWM 调制器,为了产生四路基极驱动信号,常采用相反控制的两路 PWM 调制电路,经分路而形成回路 PWM 信号 U_{b1} 、 U_{b2} 、 U_{b3} 、 U_{b4} 。

5. PWM 主电路

PWM 主电路的结构形式有多种,按输出极性有单极性输出和双极性输出之分,而双极性输出又分为 H 型和 T 型两类。在数控机床直流进给伺服驱动中常采用 H 型电路。

图 10.29 所示为 H 型变频 PWM 主电路。图中 V1 ~ V4 为四个大功率晶体管,它们工作于饱和或截止状态,其基极控制电压 $U_{b1} \sim U_{b4}$ 来自脉宽调制器 PWM。 $+U_D$ 为直流电源电压,它来自交流电源的整流输出。在基极电压控制下,V1、V4 导通时,V2、V3 截止;或相反,V1、V4 截止时,V2、V3 导通。VD1 ~ VD4 为四只续流二极管,它们在晶体管关断时,构成直流伺服电动机绕组中能量的释放回路。

当控制信号 $U_c > 0$ 时,V1 ~ V4 四个大功率晶体管的基极控制电压为 $U_{b1} \sim U_{b4}$,此时电动机电枢两端的电压 U_{AB} 和电枢电流 I_d 的波形如图 10.30 所示。从图中可以看出,电枢两端电压 U_{AB} 的波形只有正波形,没有负波形,其波形频率为晶体管开关频率的两倍。平均电压为正值,电动机处于正转状态。此时只有 V1、V4 工作,V2、V3 截止,直流电源 U_D 通过 V1、V4 向电枢供电。主电路运行方式见表 10.1。

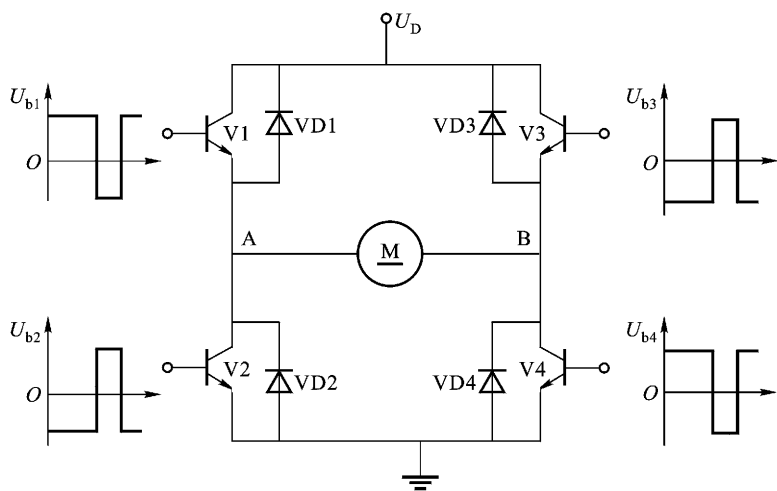


图 10.29 H 型倍频 PWM 主电路

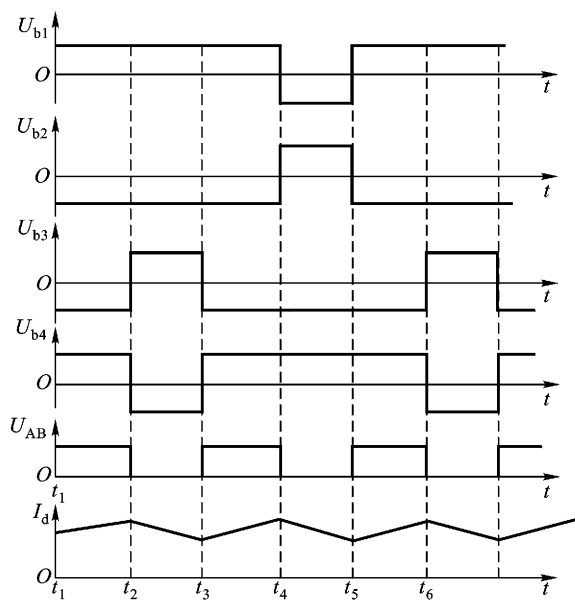


图 10.30 单极性 H 型 PWM 主回路工作波形

表 10.1 电动机正转 ,电枢电压 $U_{AB} >$ 电枢感应电动势 E

	$t_1 \leq t < t_2$	$t_2 \leq t < t_3$	$t_3 \leq t < t_4$	$t_4 \leq t < t_5$
等效电路			同 $t_1 \leq t < t_2$	
说明	电源 U_D 经 V1、V4 向电动机供给能量	电枢电流 I_d 经 V1 和 VD3 继续流通	同 $t_1 \leq t < t_2$	电枢电流 I_d 经 VD2 和 V4 继续流通

这时 ,若控制信号 U_c 突然下降 ,则基极控制电压 $U_{b1} \sim U_{b4}$ 的脉宽将发生变化 ,最后使电枢电压的正波形脉宽变窄 ,平均电压下降 ,电动机就开始了制动过程 ,见表 10. 2。当转速下降并达到给定值 ,电动机才在新的平衡状态下运行。

表 10.2 速度控制电压 U_c 下降 $U_{AB} < E$,电动机制动

	$t_1 \leq t < t_2$	$t_2 \leq t < t_3$	$t_3 \leq t < t_4$	$t_4 \leq t < t_5$
等效电路			同 $t_1 \leq t < t_2$	
说明	电枢电流 I_d 经 VD4 和 VD1 向电源回输能量	反向制动电流 I_d 经 V3 和 VD1 产生能耗制动	同 $t_1 \leq t < t_2$	电枢电流 I_d 经 VD4 和 V2 继续能耗制动

同理 ,若控制 $U_{b1} \sim U_{b4}$ 基极电压 ,使 V2、V3 同时导通 ,则直流电源通过 V2、V3 向电枢供电 ,则电枢两端电压波形始终为负 ,电动机即可实现反转。

10.4 交流伺服电动机及其调速控制

直流伺服电动机具有优良的调速性能 ,但存在固有的缺点 ,如电刷和换向器易磨损 ,换向时会产生火花等 ,使其最高转速、应用环境均受到限制。随着大功率半导体器件、变频技术等的飞速发展 ,在数控机床上交流伺服电动机被广泛应用 ,并有取代直流伺服电动机的趋势。

10.4.1 交流伺服电动机

交流伺服电动机分为异步型和同步型两种。同步型交流伺服电动机按转子的不同结构又可分为永磁式、磁滞式和反应式等多种类型,数控机床的交流进给伺服系统多采用永磁式交流同步伺服电动机。

1. 永磁交流同步伺服电动机的结构

图 10.31 所示为永磁交流同步伺服电动机的结构示意图。由图可知,它主要由定子、转子和检测元件(转子位置传感器和测速发电机)等组成,定子内侧有齿槽,槽内装有三相对称绕组,其结构和普通感应电动机的定子相似。定子上有通风孔,外形呈多边形,且无外壳以便于散热,转子主要由多块永久磁铁和铁心组成,这种结构的优点是磁极对数较多,气隙磁通密度较高。

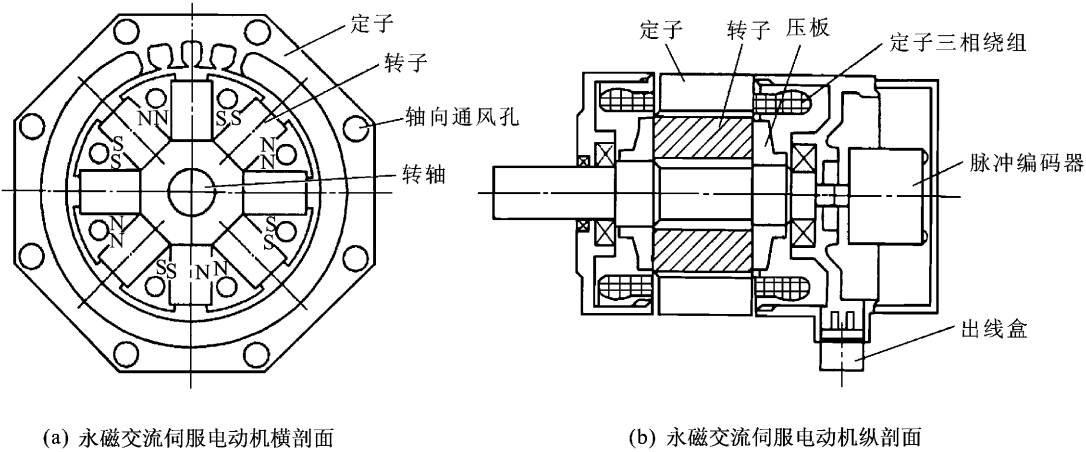


图 10.31 永磁交流同步伺服电动机的结构示意图

2. 工作原理

当三相定子绕组通入三相交流电后,就会在定子和转子间产生一个转速为 n_0 的旋转磁场,转速 n_0 称为同步转速。设转子为两极永久磁铁,定子的旋转磁场用一对旋转磁极表示,由于定子的旋转磁场与转子的永久磁铁的磁力作用,使转子跟随旋转磁场同步转动,如图 10.32 所示。当转子加上负载转矩后,转子磁极轴线将落后定子旋转磁场轴线一个 θ 角,随着负载增加 θ 角也将增大;负载减小时 θ 角也减小。只要负载不超过一定限度,转子始终跟着定子的旋转磁场以恒定的同步转速 n_0 旋转。若三相交流电源的频率为 f ,电动机的极对数为 p ,则同步转速 $n_0 = \frac{60f}{p}$ 。

负载超过一定限度后,转子不再按同步转速旋转,甚至可能不转,这就是交流同步伺服电动机的失步现象。此负载的极限称为最大同步转矩。

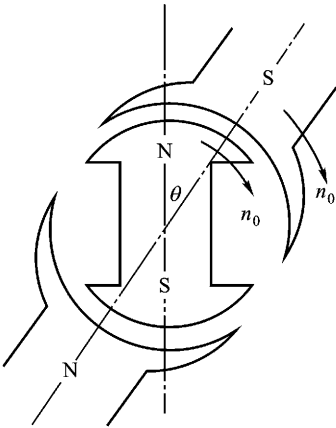


图 10.32 永磁同步交流电动机的工作原理

永磁交流同步伺服电动机在起动时由于惯性作用跟不上旋转磁场,定子、转子磁场之间转速相差太大,会造成起动困难。解决这一问题通常要用减小转子惯量,或采用多极磁极,使定子旋转磁场的同步转速不很大,同时也可在速度控制单元中让电动机先低速起动,然后再提高到所要求的速度。

3. 永磁交流同步伺服电动机的特性

永磁交流同步伺服电动机的性能如同直流伺服电动机一样,也可用特性曲线来表示。图 10.33 所示为永磁同步电动机的工作曲线,即转矩-速度特性曲线。由图可知,它由连续工作区和断续工作区两部分组成。在连续工作区 I 中,速度和转矩的任何组合都可连续工作;在断续工作区 II 内,电动机只允许短时间工作或周期内间歇工作。

永磁交流同步伺服电动机的机械特性比直流伺服电动机的机械特性更硬,其直线更接近水平线,而断续工作区范围更大,尤其在高速区,这有利于提高电动机的加、减速能力。

交流伺服电动机的主要特性参数有:

① 额定功率。即电动机长时间连续运行所能输出的最大功率,其数值为额定转矩与额定转速的乘积。

② 额定转矩。即电动机在额定转速以下所能输出的长时间工作转矩。

③ 额定转速。它由额定功率和额定转矩决定,通常在额定转速以上工作时,随着转速的升高,电动机所能输出的长时间工作转矩要下降。

此外,交流伺服电动机的特性参数还有瞬时最大转矩、最高转速和电动机转子惯量等。

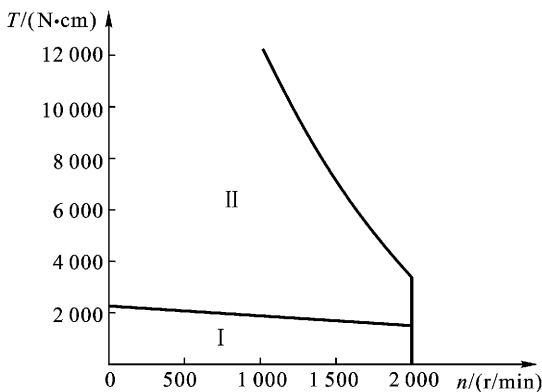


图 10.33 永磁同步电动机工作曲线

10.4.2 永磁交流同步伺服电动机的调速控制

永磁交流同步伺服电动机的同步转速与电源的频率存在严格的对应关系,即在电源电压和频率固定不变时,它的转速是稳定不变的。当采用变频电源供电时,可方便地获得同频率成正比的可变转速。

当交流电动机进行变频调速时,若保持定子电压 U 不变时(忽略定子绕组的阻抗压降),则随着频率 f 的上升,气隙磁通 Φ 势必减小,导致电动机的输出转矩和最大转矩的降低,相反,若频率 f 下降,势必造成磁通 Φ 的增加,使磁路饱和,励磁电流上升,电动机发热就较严重。故变频调速时,必须根据不同的要求,在调节频率的同时,也要相应地改变定子电压,即采用恒定定子电压频率比($U/f = \text{常数}$)的控制方式,以维持气隙磁通 Φ 不变。

1. 变频调速的基本原理

变频调速技术近年来发展得很快,方法很多。变频调速的主要环节是为交流电动机提供变频电源的变频器。变频器有交-交变频器和交-直-交变频器两大类,其结构框图如图 10.34 所示。

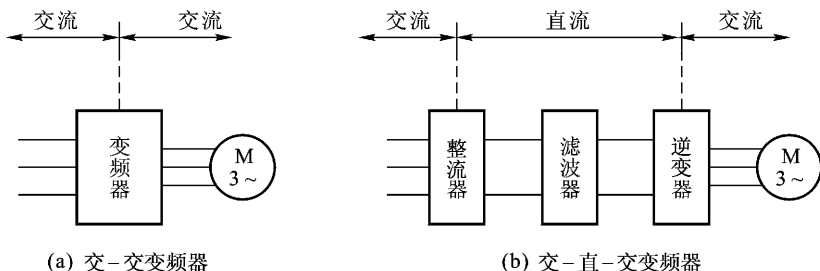


图 10.34 两种类型的变频器

由图可知,交-交变频器没有明显的中间环节,电网交流电被直接变成可调频调压的交流电,又称为直接变频器。而交-直-交变频器先由整流器把电网交流电转换成直流电,经过中间滤波环节之后,再由逆变器把直流电变成频率电压连续可调的交流电,故称为间接变频器。交-直-交变频器具有频率调节范围宽、交流电波动小、线性好的特点,故在数控机床上一般采用交-直-交型的 SPWM 变频器。

SPWM 变频器,即正弦 PWM 变频器。它先将 50 Hz 交流电经变压器得到所需的电压,经二极管不可控整流和电容滤波后,形成恒定的直流电压,送到逆变器上,控制逆变器功率开关器件(如大功率晶体管 GTR、可关断晶体管 GTO 和绝缘栅双极型晶体管 IGBT 等)的通、断,使其输出端获得频率和电压均可调整的等效于正弦波的脉宽调制波(SPWM 波)。

(1) 正弦波与等效的 SPWM 波形

把一个正弦波分成 n 等份,例如 $n=12$,如图 10.35 所示。然后把每一份的正弦曲线与横轴所包围的面积都用一个与此面积相等的等幅矩形脉冲代替,这样就可得到 n 个等幅不等宽的脉冲序列,它对应于一个正弦波的正半周,如图 10.35 所示。对于负半周,同样可以这样处理,即可得到相应的 $2n$ 个脉冲,这就是与正弦波等效的正弦脉宽调制波。

(2) SPWM 波形的产生

和控制波形为直流电压的 PWM 相比,SPWM 调制的控制信号为幅值和频率均可调的正弦波参考信号 u_r ,载波信号 u_T 为三角波。正弦波和三角波相交可得到一组矩形脉冲,其幅值不变,而脉冲宽度是按正弦规律变化的,如图 10.36 所示。如果用此矩形脉冲作为逆变器开关元件的控制信号,则逆变器的输出端可以获得一组类似的矩形脉冲,其幅值为直流侧的整流电压,宽度也是按正弦规律变化的,这组矩形波的基波为 $U_d \sin \omega t$ 。改变正弦参考信号的幅值和频率时,逆变器输出电压的大小和频率也将随之变化。

SPWM 波可以通过模拟式电路和专用大规模集成电路产生,如 HEF4752 和 SLE4520 等 PWM 大规模集成电路。

(3) 三相 SPWM 电路

对于三相 SPWM,逆变器必须产生互差 120° 的三相正弦波脉宽调制波。为了得到这些三相调制波,三角波载频信号可以共用,但是必须有一个三相正弦波发生器产生可变频、可变幅且互差 120° 的三相正弦波参考信号,然后将它们分别与三角波载波信号相比较后,产生三相脉宽调制的调制波。

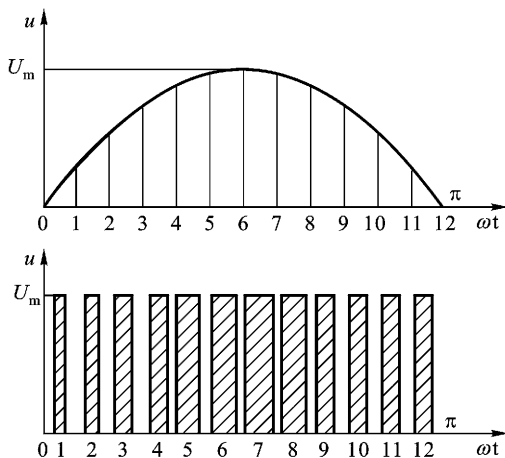


图 10.35 等效的 SPWM 波形

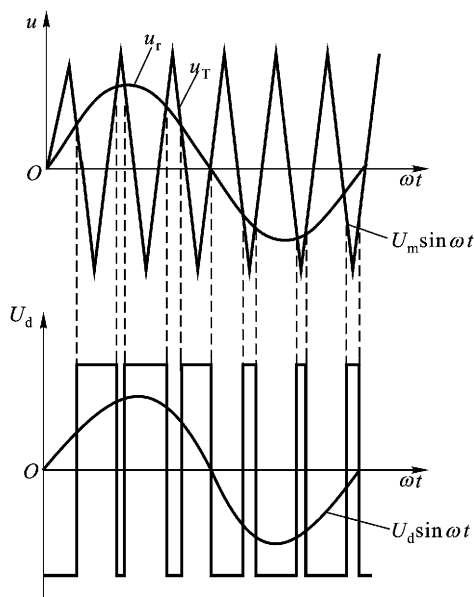
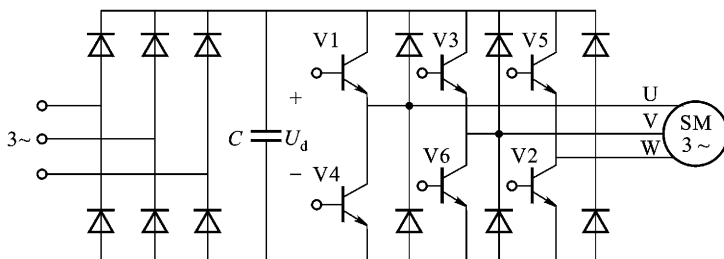
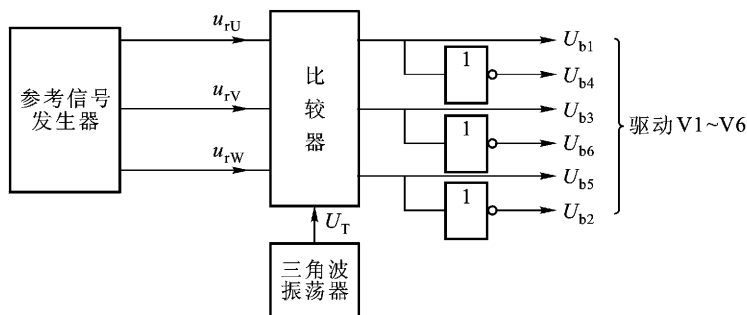


图 10.36 SPWM 调制波形

图 10.37 所示是三相 SPWM 变频控制器电路。图 10.37(a) 为主电路, V1 ~ V6 是逆变器的六个功率开关器件, 各与一个续流二极管反并联, 由三相整流桥提供恒值直流电压 U_d 供电。图



(a) 主电路



(b) 控制电路

图 10.37 三相 SPWM 变频控制器电路

10.37(b)是控制电路,一组三相对称的正弦参考电压信号 u_{rU} 、 u_{rV} 、 u_{rW} 由参考信号发生器提供,其频率决定逆变器输出的基波频率,应在所要求的输出频率范围内可调。参考信号幅值也可在一定范围内变化,决定输出电压的大小。三角波载波信号(u_T)是共用的,分别与每相参考电压比较后产生逆变器功率开关器件的驱动控制信号。

2. 永磁同步电动机的自控变频调速

同步电动机的自变频控制是通过电动机轴上的转子位置检测器发出的信号来控制逆变器的输出频率,达到一定转速的调节。

图 10.38 所示为西门子 6SC610 交流伺服进给驱动装置和 1FT5 系列三相交流永磁同步伺服电动机组成的交流进给驱动系统。图中, TG 为 1FT5 伺服电动机上的三相交流测速发电机, RLG 为霍尔式转子位置检测器,它们通过电动机上 12 芯圆插座与变频器接线端子相连,相关的接口可查阅其说明书。图中,测试孔 X 为转速实际值, R 为转速给定值, W 为电流实际值, T 为电流给定值, M15 为 $\pm 24\text{ V}$ 和 $\pm 15\text{ V}$ 参考地, NZ 为转速辅助给定值。发光二极管 LED1 不用, LED2 为速度调节器 200 ms 监控有效时亮, LED3 为 I^2t 监控(即任一进给轴中电流实际值长时间大于额定值的 1.1 倍)有效时亮, LED4 为电动机过热监控有效时亮。

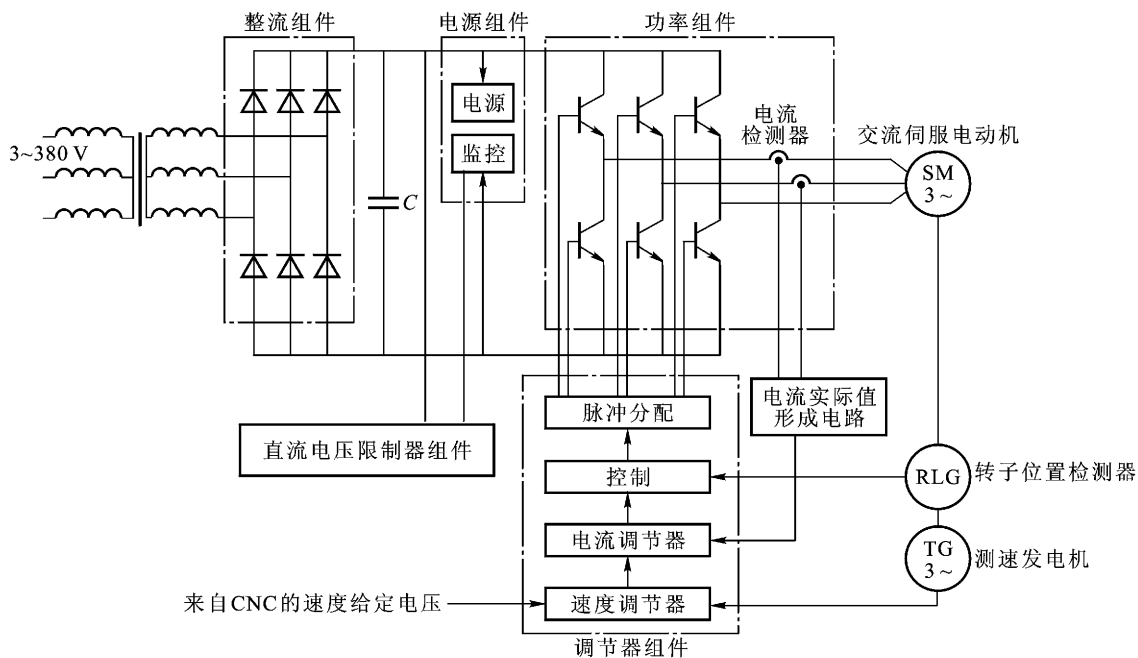
同步电动机的自变频控制在原理上与直流电动机相似,如图 10.39 所示。直流电动机的磁极在定子上,电枢是旋转的,电枢中的电流本来是交变的,只是通过电刷和换向器才在外部表现为直流;而同步电动机的磁极在转子上,电枢是静止的,电力电子逆变器相当于直流电动机的换向器,转子位置检测器 BQ 相当于直流电动机的三个电刷,转子每转过 60° ,通过换向控制电路,顺序地使功率晶体管 V6 和 V1 导通,然后依次 V1 和 V2、V2 和 V3……。如当 V6 和 V1 导通时,电流从电源正极 $\rightarrow$ V1 $\rightarrow$ U 相绕组 $\rightarrow$ V 相绕组 $\rightarrow$ V6 $\rightarrow$ 电源负极,其他依次类推,产生的电磁力矩使得电动机转子连续转动。

上述控制回路中是通过转子位置检测器 BQ 检出的转子磁通与电枢磁通之间的相对位置来控制逆变器的换流,从而改变同步电动机的供电频率,实现调速。调速时,逆变器的直流输入电压由外部控制。

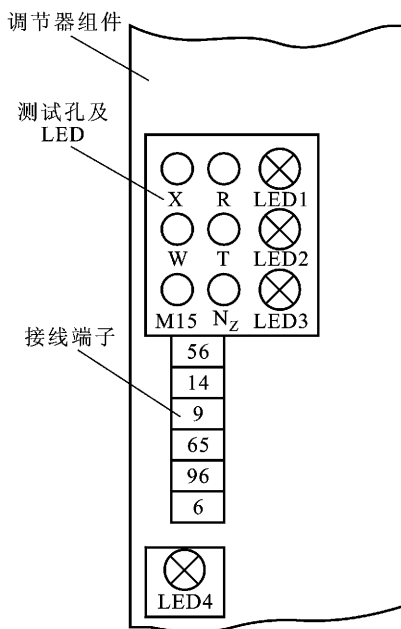
3. 永磁同步电动机的矢量变频控制

交流永磁同步电动机矢量控制是转子位置定向的矢量控制,如图 10.40 所示。由电动机上转子检测装置(如光电编码器),测得转子位置角 θ ,经正弦波发生器得到三个单位正弦波位置信号 a 、 b 、 c (它们的相位差为 120°),用以控制定子三个绕组的电流。

从图 10.40 可知,这种控制系统也是由速度外环和电流内环组成,类似直流调速系统。速度指令 U_n^* 与速度反馈信号 U_n 经比较后,通过速度调节器 ASR 输出与转矩指令 T^* 成正比的电流幅值指令 I^* 。指令 I^* 在交流电流指令发生器中与单位正弦波位置信号相乘,输出交流电指令 i_U^* 、 i_V^* 、 i_W^* 与定子绕组的电流实际值 i_U 、 i_V 、 i_W 比较后,通过电流调节器 ACR,得到 u_U^* 、 u_V^* 和 u_W^* 电压指令,然后经 SPWM 控制及驱动电路控制逆变器的开关状态,使得电动机按规定的转速旋转,并输出所需要的转矩值。



(a) 系统框图



(b) 调节器组件上的测试孔及LED

图 10.38 6SC610 交流伺服进给驱动系统

等效直流电动机

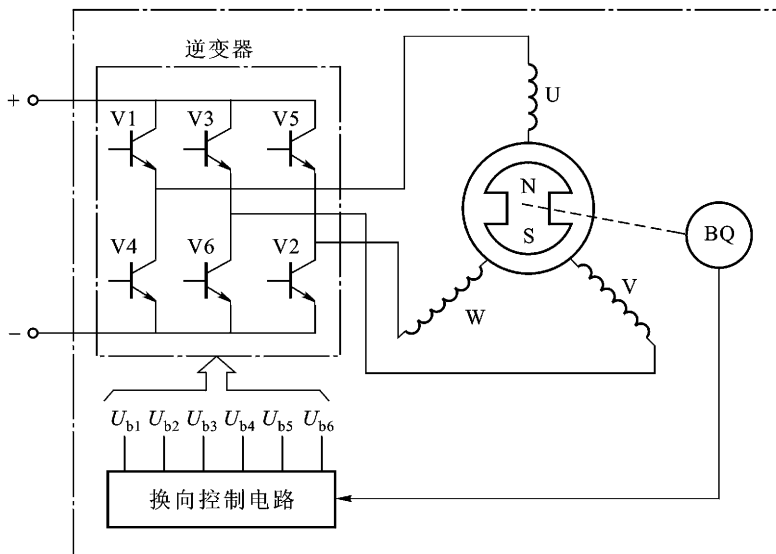


图 10.39 同步电动机的自变频控制框图

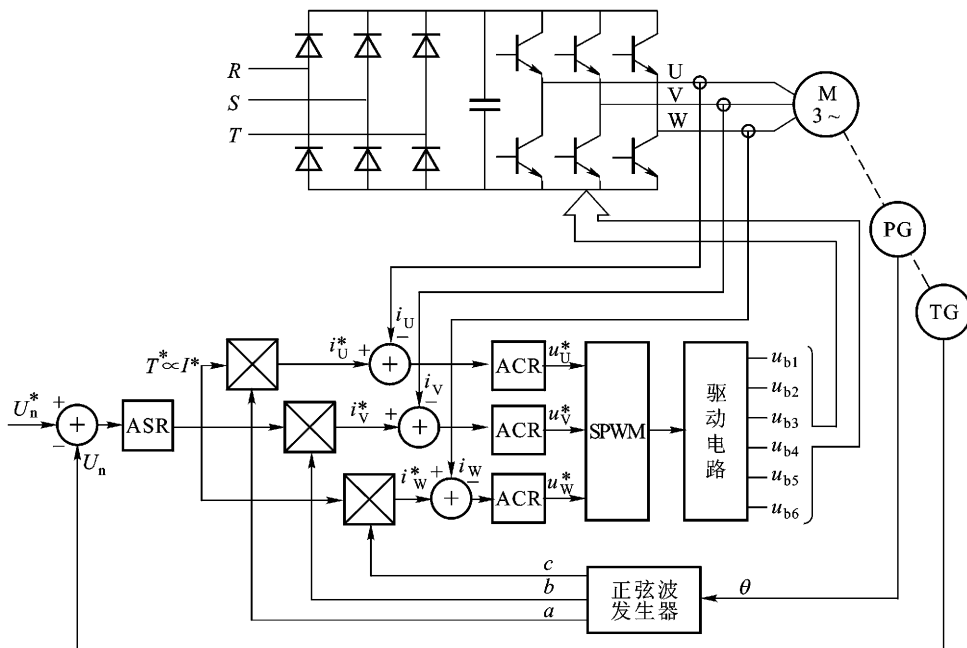


图 10.40 交流永磁同步电动机矢量变频控制框图

思考与练习

10.1 数控机床的进给伺服系统有何基本要求？

- 10.2 调速范围、跟踪速度的概念是什么？数控机床进给时，对它们有何具体要求？
- 10.3 进给伺服驱动的任务是什么？试举例说明步进驱动、直流进给驱动系统和交流进给驱动系统的不同特性。
- 10.4 直线电动机的实质是什么，它有何应用特点？
- 10.5 步进电动机可分成哪几类，数控机床中常用的是何种步进电动机？
- 10.6 反应式步进电动机和混合式步进电动机的结构有何差异？
- 10.7 步进电动机的工作过程是怎样的，它是如何实现变速、变向的？
- 10.8 步进电动机的主要技术特性有哪些，什么情况下步进电动机会出现“失步”现象？
- 10.9 环形脉冲分配器的功用是什么，它可以分成哪几类？
- 10.10 步进电动机的功率驱动器有哪几部分组成，其作用是什么？
- 10.11 步进电动机常用的功率放大电路有哪些？举例说明步进电动机的功率驱动器与数控装置的连接状况。
- 10.12 什么是细分技术，它的作用是什么？
- 10.13 永磁式直流伺服电动机由哪几部分组成，其转子绕组中导体的电流是通过什么来实现换向的？
- 10.14 直流伺服电动机的工作特性曲线包括哪些，它们有何实际意义？
- 10.15 数控机床直流进给伺服系统通常采用什么方法来实现调速的，该调速方法有何特点？
- 10.16 直流 PWM 调速的基本原理是什么，它有何特点？
- 10.17 说出 FANUC 系统 PWM 直流进给速度控制单元与 CNC 系统各连接信号的作用。
- 10.18 PWM 速度控制单元由哪几部分组成，它们的作用各是什么？
- 10.19 PWM 主电路的结构形式有哪几种？试结合实际说明 H 型倍频 PWM 主电路的调速过程。
- 10.20 交流伺服电动机有哪几种，数控机床的交流进给伺服系统通常使用何种交流伺服电动机？
- 10.21 永磁交流伺服电动机的结构有何特点，其同步转速与哪些因素有关？
- 10.22 交流伺服电动机的主要特性参数有哪些？
- 10.23 SPWM 变频器由哪几部分组成，它们的作用是什么？
- 10.24 什么是 SPWM 波，它是如何产生的，有何特点？
- 10.25 SPWM 变频控制电路一般有哪几部分组成，它们的作用是什么？
- 10.26 什么是永磁同步电动机的自变频调速？说出 6SC610 交流伺服进给驱动装置调速控制的基本过程。
- 10.27 永磁同步电动机是如何实现矢量变频控制的？

第 11 章

主轴驱动及控制技术基础

本章将学到：

1. 数控机床的主轴伺服系统有何基本要求 ,常见的主轴伺服系统根据执行电动机的不同可分成哪几类？
2. 直流主轴电动机有哪几部分组成 ,它是如何工作的 ,有何特性？直流主轴电动机调速控制系统有哪几部分组成 ,各部分的作用是什么 ,直流主轴驱动控制系统与 CNC 系统是如何连接的？
3. 交流主轴电动机有哪几部分组成 ,它是如何工作的 ,有何特性？交流主轴电动机变频调速控制系统有哪几种 ,如何正确使用通用变频器 ,矢量变频的基本思路是什么 , δ SC650 矢量变频调速系统的基本组成有哪些 ,其工作过程是如何的？
4. 什么是主轴的电气准停控制 ,它有什么特点？主轴电气准停控制的方式有哪几种 ,它们的工作过程是如何的？

11.1 概 述

数控机床的主轴驱动是指产生主切削运动的传动 ,它是数控机床的重要组成部分之一。

11.1.1 主轴驱动的基本要求

在数控机床上 ,主轴的最高、最低转速、转速范围、传递功率和动力特性决定了数控切削加工的效率 and 工艺能力。随着数控技术的不断发展 ,现代数控机床对主轴驱动也提出了更高的要求。

1. 调速范围足够大

数控加工时切削用量的合理选择 ,特别是切削速度的选择 ,关系到加工质量和生产效率。对于自动换刀的数控机床 ,为适应各种工序和不同材料加工的要求 ,更需要主传动有较宽的自动变速范围。一般要求有 $1:(100 \sim 1\,000)$ 的恒转矩调速范围 , $1:10$ 的恒功率调速范围 ,并能实现四象限驱动功能。

主轴驱动主要有两种形式 :一是主轴电动机带齿轮换挡 ,达到降低主轴转速 ,增大传动比 ,放大主轴功率的目的 ,满足切削要求 ;二是主轴电动机通过同步齿形带驱动主轴 ,这类主轴电动机又称强切削电动机 ,具有恒功率宽、调速比大和无需机械变速等特点。由于省去了齿轮和离合器 ,主轴箱实际成了主轴支架 ,简化了主传动系统。

目前,电主轴在数控机床的主轴驱动中得到了越来越多的应用。所谓电主轴就是将主轴和主轴电动机合为一体,电动机转子轴本身就是主轴,这样进一步简化了机床结构,提高了主轴的传动精度。

2. 主轴输出功率大

为了满足生产率的要求,数控机床要求主轴在整个速度范围内均能提供切削所需的功率或转矩,特别是在低速强力切削时。并且有一定的过载能力和较硬的调速机械特性,即在负载变化时,电动机转速波动小。

3. 动态响应好

要求主轴升降速时间短,调速时运转平稳,能实现正、反转切削,且换向时均可以进行自动加速减速控制。

4. 旋转轴联动控制

在加工螺纹时,主轴转速与坐标轴的进给量必须保持一定的关系,即主轴每转一周,沿工件的轴向坐标必须按导程进给相应的脉冲量。

5. 恒线速切削控制

利用车床和磨床进行端面切削时,为了保持加工端面的表面粗糙度 R_a 小于某一值,要求工件与刀尖接触点的线速度为恒值,即随着刀具径向进给切削直径逐渐减小,主轴的转速应不断提高且维持为常数。

6. 主轴定向准停控制

对于某些机床,为了换刀时机械手对准抓刀槽,主轴必须停在固定的径向位置。在固定循环切削过程中,有的刀具必须在某一径向位置才能退出,这就要求主轴能准确地停在某一固定位置上,即要求主轴有高精度的准停控制。

11.1.2 主轴驱动系统的分类

主轴驱动最重要的控制要求是主轴速度的调节,主轴变速分为有级变速、无级变速和分段无级调速三种形式,其中有级变速仅用于经济型数控机床,大多数数控机床均采用无级变速或分段无级变速。

主轴驱动系统按主轴电动机的种类不同可分为直流主轴驱动系统和交流主轴驱动系统两类。

1. 直流主轴驱动系统

直流主轴驱动系统采用直流主轴电动机为执行元件,为了缩小体积,改善冷却效果,以免电动机过热,常采用轴向强迫风冷或采用热管冷却技术。SIEMENS 公司生产的直流主轴电动机有 1GG5、1GF5、1GL5、1GH5 四个系列,与上述四个系列电动机配套的 6RA24、6RA27 系列驱动装置均采用晶闸管控制。

2. 交流主轴驱动系统

交流主轴驱动系统多采用笼型异步电动机为执行元件。由于数控机床主轴驱动系统不必像进给驱动那样需要很高的动态性能和调速范围,因此结构简单、价格便宜、可靠的笼型异步电动机配上矢量变频控制的主轴驱动装置完全可以满足数控机床主轴的要求。20 世纪 80 年代初,SIEMENS 公司推出了 1PH5、1PH6 两个系列的主轴电动机,配置的 6SC650 系列交流驱动装置或

6SC611A(SIMODRIVE611A)主轴驱动模块 ,主回路采用晶体管 SPWM 变频方式 ,具有能量再生制动功能。

11.2 直流主轴电动机及其驱动控制

机床主轴驱动和进给驱动有很大差别 ,对直流主轴伺服电动机要求有很宽的调速范围和提供大的转矩和功率。

11.2.1 主轴直流电动机

当采用直流电动机作为主轴电动机时 ,其主磁极不是永磁式 ,而是采用铁心加励磁绕组。

1. 直流主轴电动机的结构

图 11.1 所示为直流主轴电动机结构示意图。直流主轴电动机也是由定子和转子两大部分组成。转子与永磁式宽脉冲直流伺服电动机相同 ,都由电枢绕组和换向器等组成。而定子则完全不同 ,它由主磁极和换向极等组成 ,主磁极上绕组的励磁电流由另外独立直流电源供电 ,其励磁方式称为他励式 ,换向极的作用是改善换向性能 ,主磁极和换向极均采用硅钢片叠成 ,以便在负荷变化或在加减时有良好的换向性能。为了改善磁场分布 ,有的主轴电动机在主磁极上除励磁绕组外还有补偿绕组。主轴电动机外壳的结构为密封式 ,以适应恶劣的机械加工车间环境。

直流主轴电动机的尾部一般都同轴安装有测速发电机 ,测速发电机分为直流测速发电机、交流测速发电机等。直流测速发电机是一种微型直流发电机 ,其定子和转子的结构与直流伺服电动机基本相同 ,它可作为伺服电动机的检测传感器 ,将伺服电动机的实际转速转换成输出电压或输出脉冲 ,成为闭环控制的反馈信号。

2. 直流主轴电动机的工作原理和特性

直流主轴电动机虽然结构上有了很大的变化 ,但其工作原理和永磁式直流电动机相似 ,也是建立在电磁力定律基础上的 ,由励磁绕组和磁极产生磁场 ,通电导体(电枢绕组)与磁场相互作用产生电磁力和电磁转矩 ,从而驱动转子作旋转运动。

直流主轴伺服电动机的性能主要表现在转矩 - 速度性曲线上 ,如图 11.2 所示。图中 1 为转

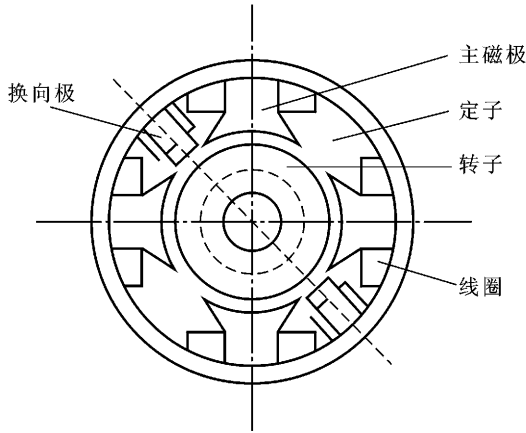
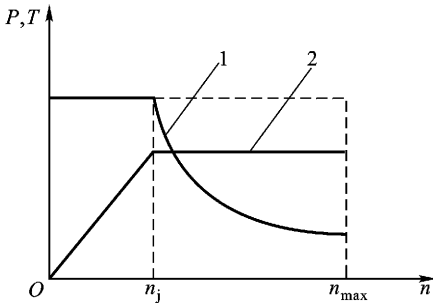


图 11.1 直流主轴电动机结构示意图



1—转矩特性曲线 2—功率特性曲线

图 11.2 直流主轴电动机特性曲线

矩特性曲线 2 为功率特性曲线。由图可知,在基本转速 n_j 以下属于恒转矩(T)调速范围,采用改变电枢电压的方法实现调速;在基本转速 n_j 以上属于恒功率(P)调速范围,采用控制励磁电流的方法实现调速。一般来说恒转矩和恒功率速度范围之比为 1:2。

图 11.3 所示为直流电动机调磁调速的机械特性。在采用调磁调速(即控制励磁电流)方式时,通常保持电枢电压为额定值,且励磁电流总是向减小的一方调整。由图可知,理想空载转速 n_0 将随励磁磁通 Φ 的下降而上升,调整的结果是减小磁通使电动机转速升高,但输出转矩将下降。由于调速过程中,电枢电压不变,若电枢电流 I_d 也不变,则调速前后功率是不变的,故调磁调速属于恒功率调速。

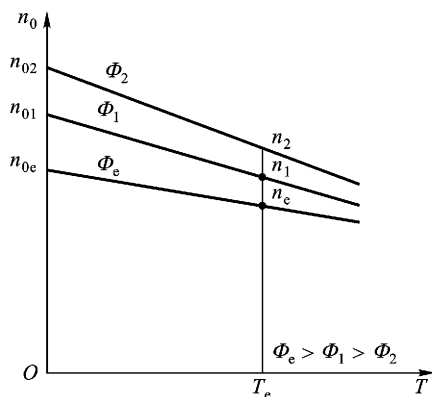


图 11.3 调磁调速的机械特性

另外,直流主轴伺服电动机的过载能力,一般约为 1.5 倍。

11.2.2 主轴驱动控制基础

在数控机床的主轴驱动中,常采用调磁调速和调压调速相互配合的方法,即高速段采用恒功率特性的调磁调速,在低速段采用具有恒转矩特性的调压调速,从而获得很宽的调速范围。其中,调压调速广泛采用晶闸管(SCR)调速系统。

1. 晶闸管调速的基本原理

图 11.4 所示为晶闸管调速原理框图,由晶闸管组成的主电路在交流电源电压不变的情况下,通过控制电路可方便地改变直流输出电压的大小,该电压作为直流电动机的电枢电压 U_d ,即可实现直流电动机的调压调速。

图 11.5 所示为三相桥式全控整流电路,其作用是将交流电变成输出可控的直流电。其实质是一组共阳极组和一组共阴极组的三相半波可控整流电路的串联。图中 V1、V3、V5 三个晶闸管的阴极连在一起,构成共阴极组,它们的阳极分别接到三相交流电源上;V2、V4、V6 晶闸管的阳极连在一起,构成共阳极组,它们的阴极分别接到三相交流电源上。

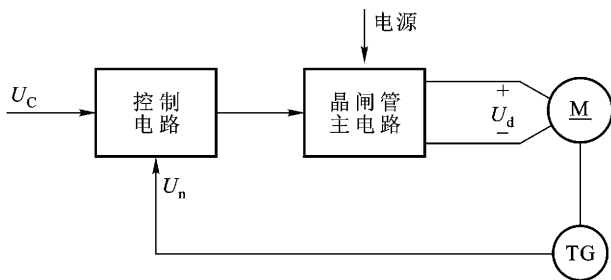


图 11.4 晶闸管调速原理框图

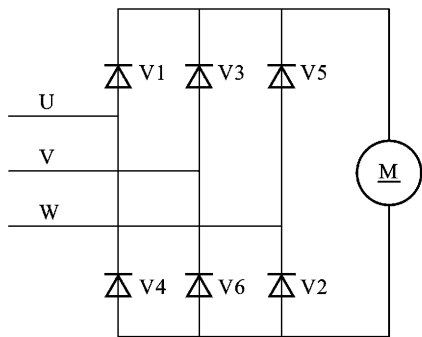


图 11.5 三相桥式全控整流电路

图 11.6 所示为三桥桥式全控整流电路在不同控制角(晶闸管的触发角) α 下的电枢电压波形,由图可知,不同的控制角 α ,电枢电压的波形不同,电压的平均值也不同,即 $U_1 \neq U_2 \neq U_3$ 。晶闸管直流调速的实质是通过改变控制角,获得任意大小的直流电压,从而改变直流电动机的电枢电压,达到控制直流电动机转速的目的。

2. FANUC 晶闸管直流主轴驱动的连接

图 11.7 所示为 FANUC 主轴晶闸管驱动装置的连接图。图中与 CNC 系统的连接信号 OVL_1 、 OVL_2 、 $VCMD$ 、 GND 、 $PRDY_1$ 、 $PRDY_2$ 、 $ENBL_1$ 、 $ENBL_2$ 、 $VRDY_1$ 、 $VRDY_2$ 均与 PWM 直流进给驱动的定义一致。

200 U、200 V、200 W 为三相交流 200 V 电源,用于控制晶闸管的同步触发;18 A、0 T、18 B 为带中心抽头的 18 V 交流电源,用于提供驱动装置中 +15 V 直流电压;TOH1、TOH2 为装在变压器内部的常闭热控开关,当变压器过热时,热控开关断开;R、S、T 为交流 120 V 电源,用于提供主回路电源; U_1 、 U_2 为驱动装置输出的伺服电动机电枢电压;TSA、TSB 为装在电动机轴上测速发电机输出的电压信号。

FANUC 直流他励式主轴电动机的驱动装置采用的是三相全控晶闸管无环流可逆调速系统,可实现基速以下的调压调速和基速以上的调磁调速,调速范围 35 ~ 3 500 r/min(1:100) 输出电流 33 ~ 96 A。

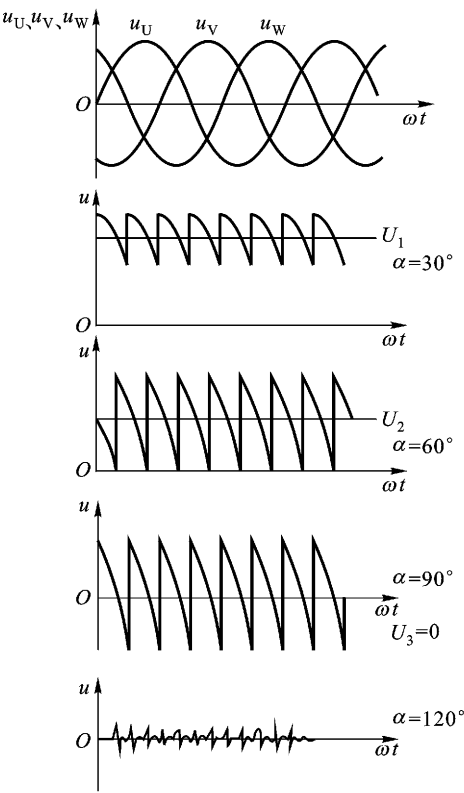


图 11.6 三相桥式全控整流电路电压波形

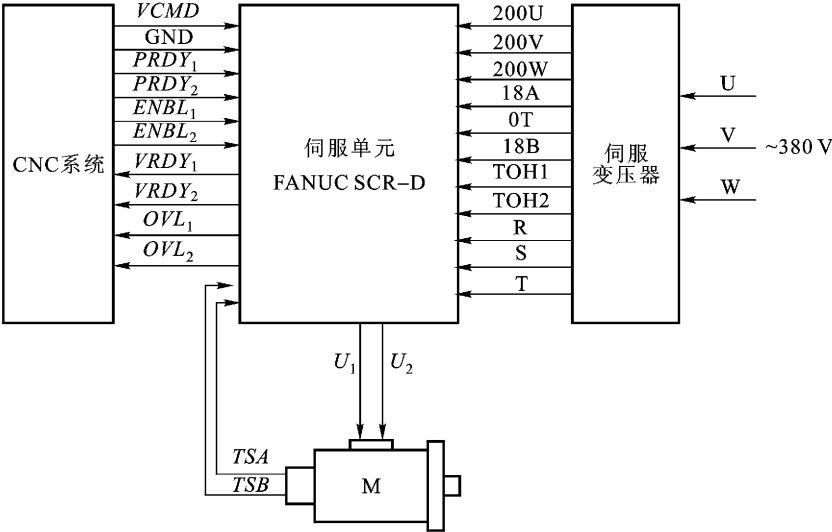


图 11.7 FANUC 主轴晶闸管驱动装置的连接

3. 直流主轴驱动控制系统

图 11.8 所示为 FANUC 直流主轴电动机驱动控制示意图。该控制系统由调压调速和调磁调速两部分组成。

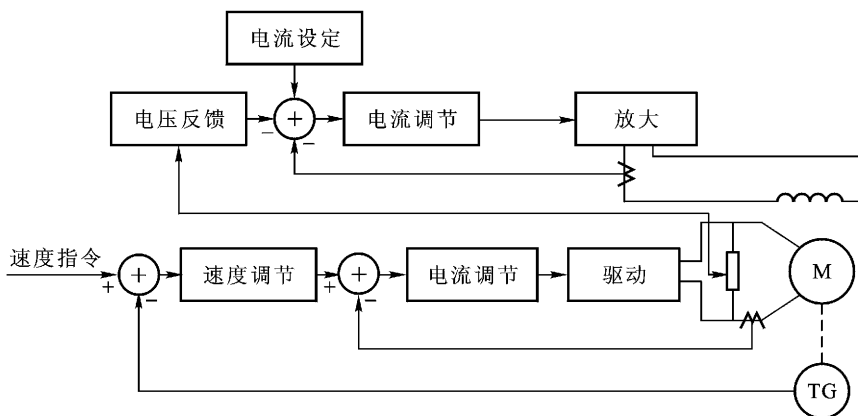


图 11.8 FANUC 直流主轴电动机驱动控制示意图

（1）调磁调速回路

因为主轴电动机为他励式电动机，励磁绕组需要由另一直流电源供电。图 11.8 中的上半部分是调磁调速回路，它由励磁电流设定回路、电枢电压反馈回路和励磁电流反馈回路三者的输出信号经比较后，实现励磁电流的控制。当电枢电压低于 210 V 时，磁场控制回路中的电枢电压反馈环节不起作用，只有励磁电流反馈作用，维持励磁电流不变，实现额定转速以下的恒转矩调压调速；当电枢电压高于 210 V 后，此时励磁电流反馈环节不起作用，而引入电枢反馈电压，随着电枢电压的提高，励磁电流减小，使转速上升，实现额定转速以上的恒功率调磁调速。

（2）调压调速回路

图 11.8 中的下半部分为调压调速回路，它和直流进给伺服驱动系统相似，也是由速度环和电流环构成的双闭环控制系统。

速度环的作用是，根据 CNC 系统发出的速度指令模拟电压信号与测速发电机（TG）反馈的实际转速电压信号的差值，经速度调节器输出，作为电流调节器的给定信号，控制电动机的电流和转矩；电流环的作用是当系统受到外来干扰时，能迅速做出抑制响应，保证系统的最佳加速和制动时间特性。由于主轴电动机的功率较大，故主回路功率元件常采用晶闸管元件。

4. 主回路及其工作过程

数控机床主轴要求正、反转，且切削功率应尽可能大，并希望能迅速停止和改变转向，其驱动装置往往采用三相桥式反并联逻辑无环流可逆调速系统，如图 11.9 所示。

由图可知，主回路有 12 只晶闸管组成，它们分成 V1、V2，如图 11.9(b) 所示，每组按三相桥式连接形成变流桥，两组变流桥反极性并联（即反并联），由一个交流电源供电，分别实现电动机的正转和反转的控制（即可逆驱动），其中 V1 为正组晶闸管，V2 为反组晶闸管。

为了避免因两组桥路同时工作在整流状态，形成未流经电动机的环流，而出现元件的损耗和发热烧坏现象，应采用逻辑控制电路（它包括方向控制、逻辑判断、及输出切换等环节），保证在任何时间内只允许一组桥路工作，另一组桥路阻断。

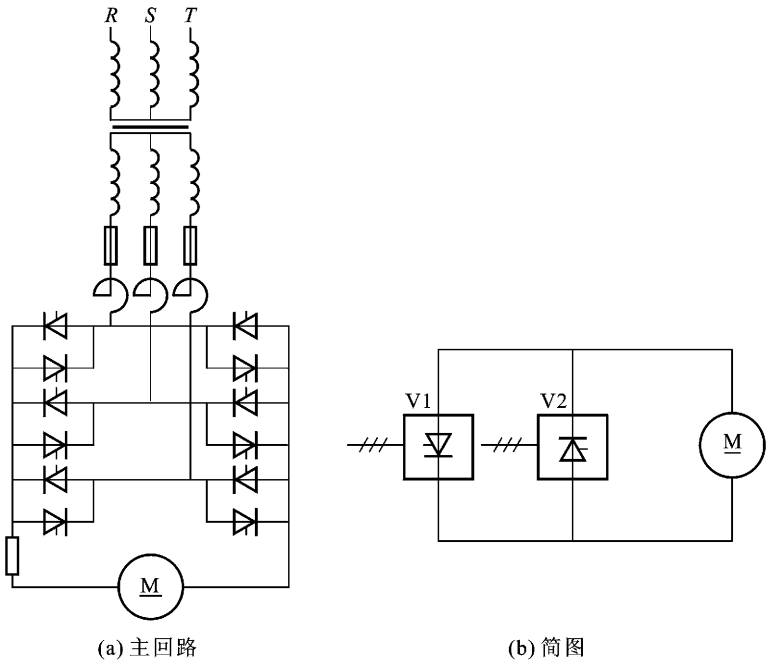


图 11.9 三相桥式反并联逻辑无环流可逆调速系统的主回路

图 11.10 所示为主回路实现电动机正、反向转动和反馈发电制动,即四象限运行示意图。

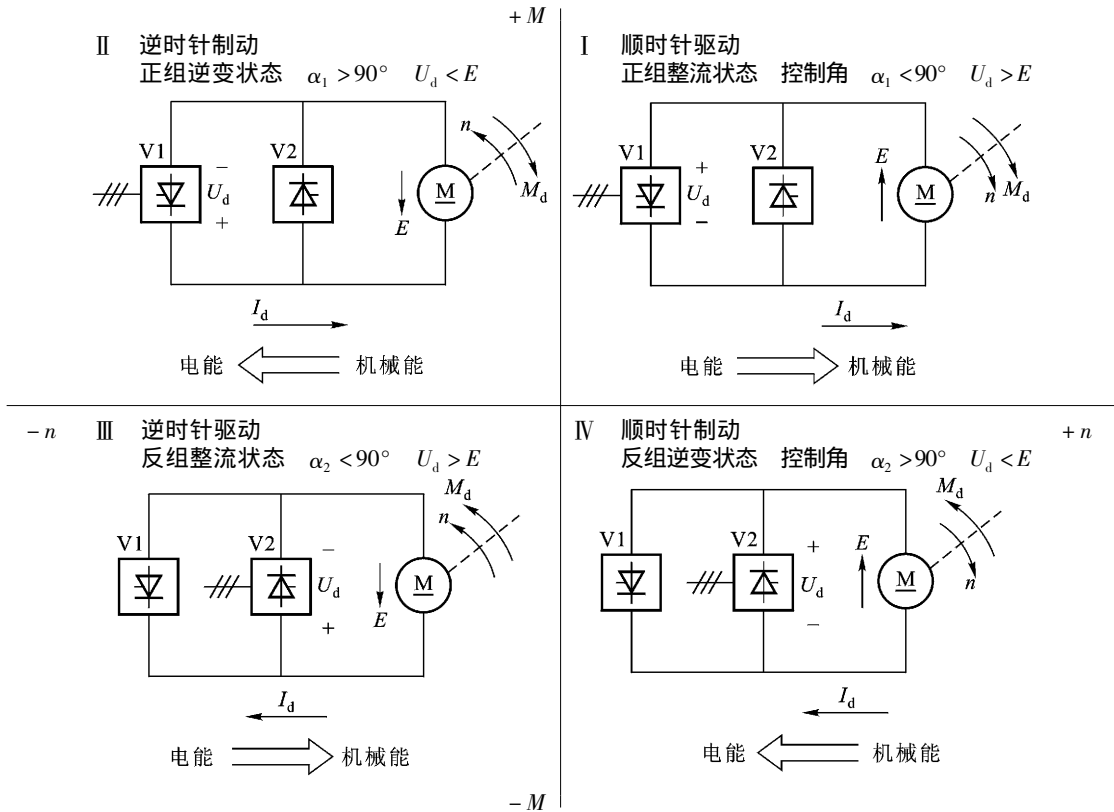


图 11.10 三相桥式反并联逻辑无环流可逆调速系统四象限运行示意图

电动机正向运行时,正组晶闸管工作在整流状态,提供正向直流电流;电动机反向运动时,则由反组晶闸管工作在整流状态,提供反向直流电流,此时电网的电能转化成电动机的机械能,即可控制在第Ⅰ、Ⅲ象限的起动和升、降速。

当电动机需要从正转向反转运行时,电动机先由正转降速至零,此时电动机处于制动状态(即工作在第Ⅱ象限),电动机的机械能转化成电能送回电网,电动机转速迅速下降,当转速到零后,反组晶闸管进入整流状态,电动机反向起动至规定的转速,完成正转到反转的切换过程,即完成了从第Ⅰ象限到第Ⅲ象限的工作转换。

同理,电动机从反转到正转是由第Ⅲ象限经第Ⅳ象限到第Ⅰ象限。

正组和反组晶闸管导通角 α 的大小是通过控制触发电路的脉冲输出时间来实现的。FANUC系统的移相脉冲触发装置由三片HA166 12G大规模集成电路组件构成,其触发控制电压信号为电流调节器的输出信号。对于三相全波全控桥式电路,触发脉冲采用间隔相差 60° 的双窄脉冲触发方式。三块集成芯片输出的12路触发脉冲经功率放大后,分别送往12只晶闸管的触发极,实现导通角 α 的控制。

11.3 交流主轴伺服电动机及其调速控制

交流主轴电动机是一种具有笼式转子的三相感应电动机,它具有转子结构简单、坚固、价格便宜、过载能力强、使用维护方便等特点。随着电子技术的发展,特别是计算机控制技术的发展,交流主轴电动机的调速性能得到了极大改善,正越来越多地被数控机床应用。

11.3.1 交流主轴伺服电动机

三相异步交流伺服电动机有笼型和线绕型之分,笼式转子被认为是所能采用的最简单、最牢固的机械结构,能传递很大的转矩,承受很高的转速,得到广泛的应用。

1. 交流主轴伺服电动机的结构

图11.11所示为西门子1PH5系统交流主轴电动机外形,同轴连接的ROD323光电编码器用于测速和矢量变频控制。

交流主轴电动机的总体结构由定子和转子组成。它的内部结构和普通交流异步电动机相似,定子上有固定的三相绕组,转子铁心上开有许多槽,每个槽内装有一根导线,所有导体两端短接在端环上,如果去掉铁心,转子绕组的形状像一个鼠笼,所以称为笼型转子。

2. 工作原理

异步交流伺服电动机的工作原理和普通交流异步电动机基本相似。定子绕组通入三相交流电后,在电动机气隙中产生一个励磁的旋转磁场,当旋转磁场的同步转速与转子转速有差异时,转子的导体切割磁感线产生感应电流,与励磁磁场相互作用,从而产生转矩。由此可以看出,在异步伺服电动机中,只要转子转速小于同步转速,转子就会受到电磁转矩的作用而转动。若异步伺服电动机的极对数为 p ,转差率为 s ,定子绕组供电频率为 f ,则转子的转速 $n = \frac{60f}{p}(1-s)$ 。异步电动机的供电频率发生变化时,转子的转速也将发生变化。

3. 交流主轴伺服电动机的特性

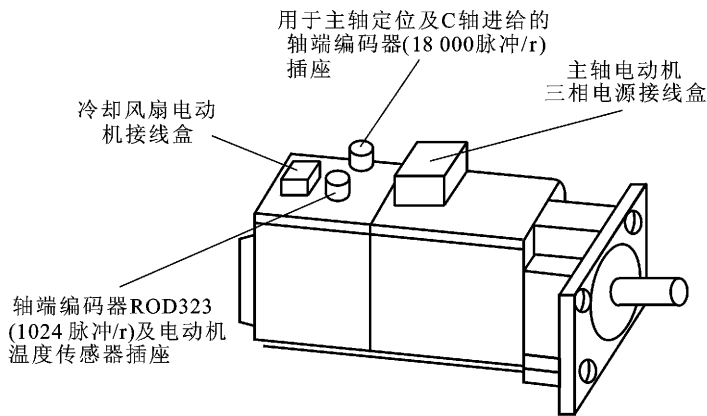
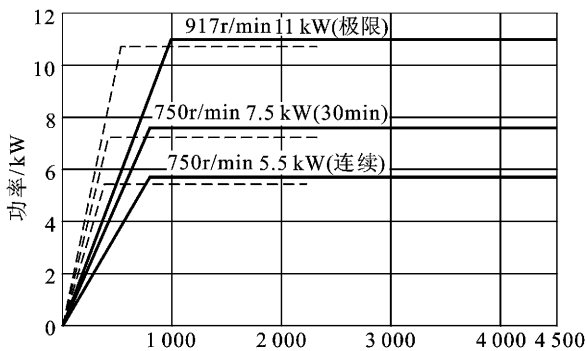


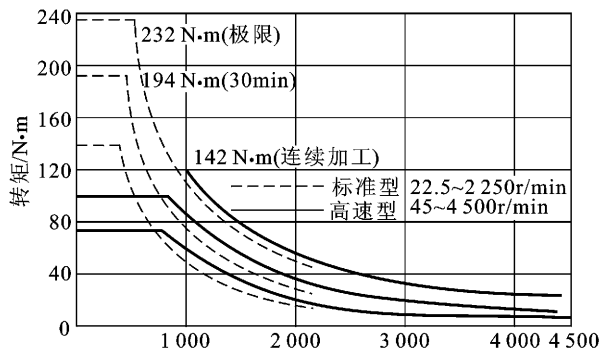
图 11.11 1PH5 交流主轴电动机

和直流主轴伺服电动机一样,交流主轴伺服电动机的特性主要体现在转速、转矩、功率的关系曲线上。

图 11.12 所示为某交流主轴驱动的特性曲线,其功率为 5.5 ~ 7.5 kW。从图中的特性曲线可看出,交流主轴电动机的特性曲线和直流主轴电动机相类似,在基本转速以下是恒转矩调速,在基本转速以上是恒功率调速。交流主轴电动机恒转矩和恒功率调速之比约为 1:3,过载能力



(a) 功率-速度特性曲线



(b) 转矩-速度特性曲线

图 11.12 某交流主轴驱动装置的特性曲线

约为 1.2 ~ 1.5 倍,过载时间从几分钟到半小时不等。

11.3.2 交流主轴电动机的变频调速

在数控机床的交流主轴电动机驱动中,广泛使用通用变频器来实现调速控制。近几年来,大规模集成电路、高速数字处理器(DSP)和矢量控制、直接转矩控制理论的应用使得通用变频器的性能得到了很大提高。通用变频器具有两个特点:一是可以和通用的异步电动机配套使用;二是具有多种可供选择的功能,以适应各种不同性质的负载。

1. 交流主轴电动机的通用变频器控制系统

通用变频器是以恒电压频率比(U/f)保持磁通不变为基础,控制正弦波的产生,再经 SPWM 调制和驱动主电路,从而产生 U、V、W 三相交流电,驱动三相异步电动机的装置。

图 11.13 所示为三菱 FR-A500 系列变频器系统的配置。图中,交流电抗器的作用是减小

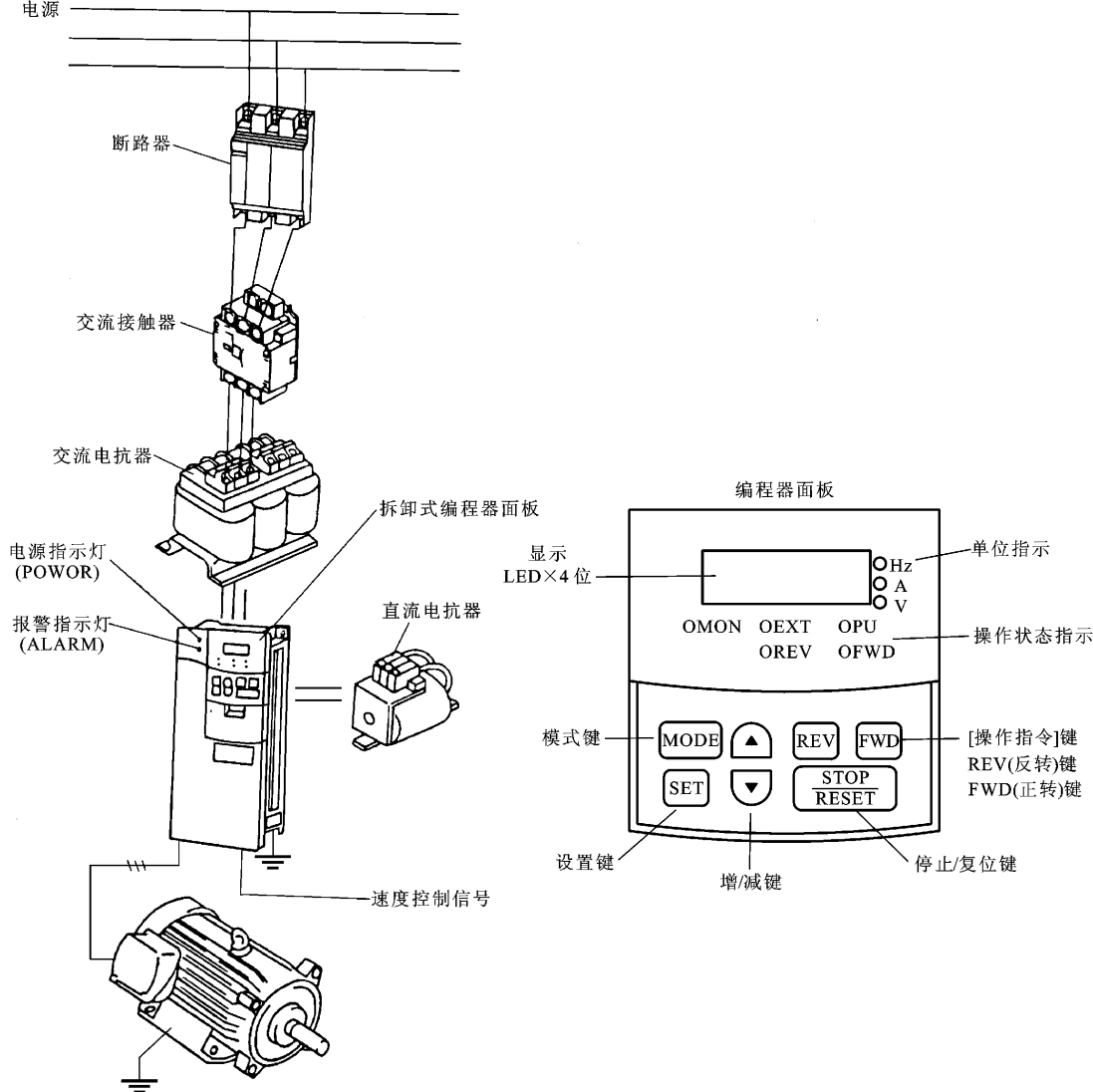


图 11.13 三菱 FR-A500 系列变频器系统的配置

输入电流的高次谐波,直流电抗器则是用于功率因数的校正,编程器面板用于显示和功能设置。

(1) 变频器的显示功能

变频器配置的发光二极管主要用于显示当前的操作状态,如 REV(反转)、FWD(正转);变频器配置的数据显示屏主要用于运行数据显示(如频率、电压等)、编程状态功能代码显示及故障代号显示等。

(2) 变频器功能预置

变频器在和主轴电动机配用时,需根据加工的特性要求预先进行一系列的功能设定,如基本频率、最高频率、升降速时间、 U/f 比等,称为预置设定,简称预置。功能预置的方法主要有两种:一种是手动设定,即通过电位器、拨码开关和键盘来设定;另一种是程序设定,即通过编程器上的键盘和数码管显示进行参数的输入和修改。程序设定的一般步骤是:

- ① 按模式转换键,使变频器处于程序设定状态。
- ② 按数字键或数字增减键,找出预置的功能码。
- ③ 按读出键或设定键,读出该功能中原来的设定数据。
- ④ 如需修改,则通过数字键或数字增减键来修改设定数据,并按写入键或设定键,将修改的数据写入。

(3) 接线端子

图 11.14 所示为三菱 FR-A500 变频器的接线端子及接口定义。该变频器可以通过 2、5 端,接收 CNC 系统输出的速度模拟控制信号,可以通过拨动开关的编码开关量输出或 CNC 系统的数字信号输出至 RH、RM 和 RL 端,由变频器的参数设置,实现从最低速到最高速的调速控制。

2. 交流主轴电动机的矢量变频控制

矢量控制是一种新型的控制技术,应用这种技术可以使得异步电动机调速后的机械特性和动态特性接近或达到直流电动机的高性能。

(1) 矢量控制的基本思路

在伺服系统中,直流伺服电动机获得优良的调速性能,其根本原因是被控量只有电动机磁场主磁通 Φ 和电枢电流 I_d ,且这两个量是相互独立的。由于磁场主磁通 Φ 正比于励磁电流,电磁转矩 T 正比于电枢电流 I_d ,故分别控制励磁电流和电枢电流,即可方便地实现转矩和转速的线性控制。但三相交流异步电动机却不一样,其定子和转子间存在着强烈的电磁耦合关系,只有定子的电流能被直接控制,不能形成像直流电动机那样的变量。

矢量控制的基本思路是应用适合处理多变量系统的现代控制理论及坐标变换和反变换等数学工具,将异步电动机的定子电流矢量分解为产生磁场的电流分量(励磁电流)和产生转矩的电流分量(转矩电流),分别加以控制,并同时控制两分量间的幅值和相位,从而得到与直流电动机相同的调速性能。

矢量控制可分为基于转差频率控制的矢量控制方式和无速度传感器矢量控制方式等。基于转差频率控制的矢量控制方式是在恒压频比控制的基础上,通过检测异步电动机的实际转速,并得到对应的控制频率,然后根据希望得到的转矩,分别控制定子电流矢量及两个分量的相位,对通用变频器的输出频率进行控制;无速度传感器的矢量控制方式是根据输入电动机的铭牌参数,按照转矩计算公式分别对作为基本量的励磁电流(或磁通)和转矩电流检测,控制电动机定子绕组上的电压的频率,使励磁电流和转矩电流的指令值和检测值达到一致并输出转矩,从而实现矢

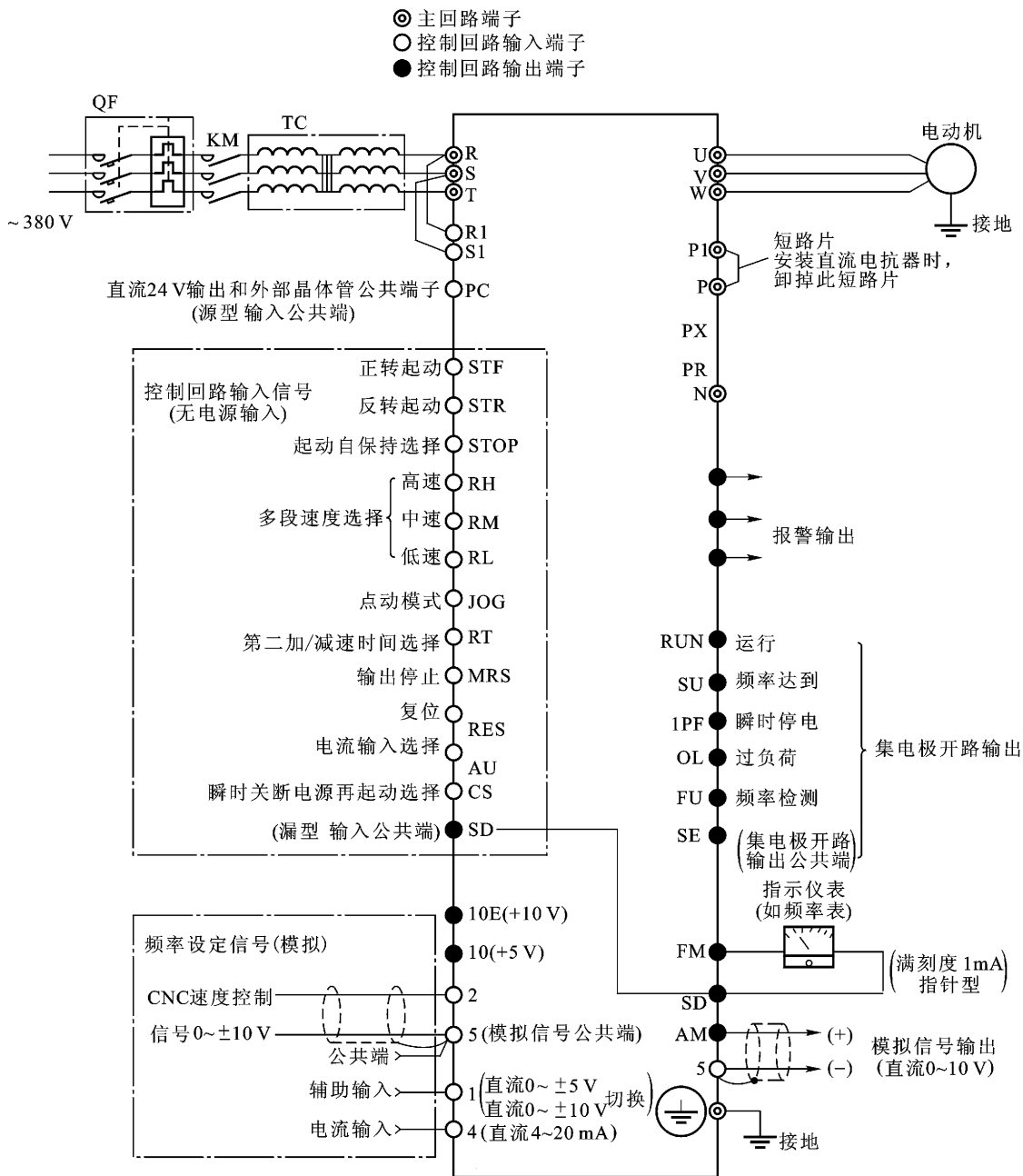


图 11.14 三菱 FR-A500 变频器的接线端子及接口定义

量控制。

(2) 交流主轴电动机的矢量变频调速系统

西门子 6SC650 系列交流主轴驱动装置为矢量变换 SPWM 调速变频器,它与 1PH5、1PH6 系列交流主轴电动机组成数控机床的主轴驱动系统,采用基于转差频率控制的矢量控制方式,实现主轴的自动变速、主轴定位控制和 C 轴进给。

① 6SC650 系列主轴驱动变频器的组件。图 11.15 所示为西门子 6SC650 主轴变频器的组件,由图可知,它主要由 I/O 模块(U1)、控制模块(N1)、电流模块(G01)、中央控制模块(G02)及选件(S1)组成。

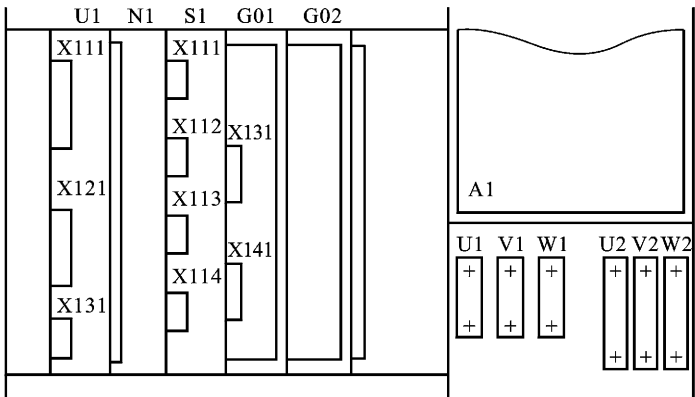


图 11.15 6SC650 主轴变频器的组件

控制模块(N1)主要有两片 80186 微处理器及扩展电路组成,完成矢量变换计算、电网端逆变器触发脉冲控制及变频器的 SPWM 调制。

I/O 模块(U1)主要由 U/f 变换器、A/D、D/A 电路组成,为 N1 组件处理各种 I/O 模拟信号。

电源模块(G01)、中央控制模块(G02)除供给控制电路所需的各种电源外,在 G02 上还输出各种继电器信号至 CNC 系统。

选件(S1)用于配置主轴定位电路板或 C 轴进给控制电路板,通过内装轴端编码器或外装轴端编码器实现主轴的定位或 C 轴控制。

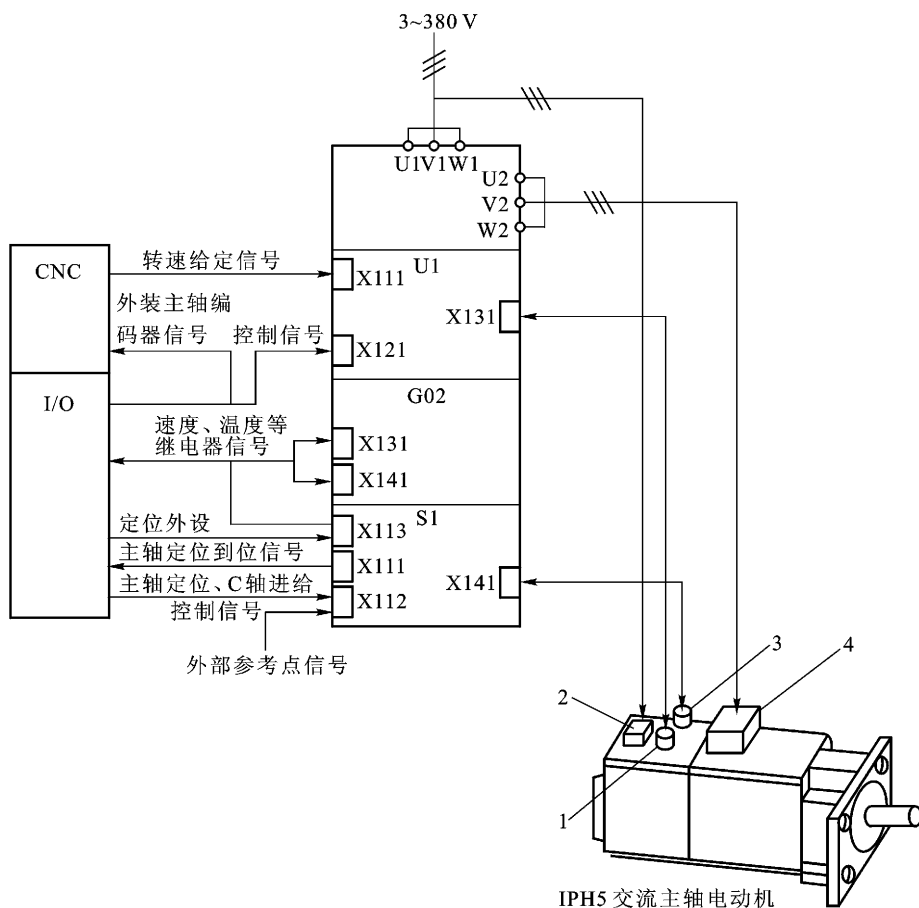
6SC650 系列交流主轴驱动变频器主要组件基本相同,只是功率部件的安装方式有所不同。较小功率的变频器,其功率部件安装在印制线路板 A1 上,如图 11.15 所示;较大功率的变频器,其功率部件安装在散热器上。

图 11.16 所示为 6SC650 主轴驱动变频器与交流伺服电动机及 CNC 系统的接线图及有关接口定义。

② 6SC650 系列主轴驱动变频器的调速控制。图 11.17 所示为西门子 6SC650 系列主轴驱动控制系统框图。电动机通过轴上的编码器测出实际转速,形成反馈信号,通过两片 16 位的 80186 微处理器构成控制电路,实现转速和转矩的闭环控制。其中微处理器 1 负责速度控制、转矩控制、矢量计算、调节器控制、电网端逆变器的整流和逆变控制等;微处理器 2 负责磁场定向控制、正弦波生成控制、SPWM 调制以及电流调节控制。由于使用了微处理器,该驱动变频器的驱动特性可通过键盘和数码管显示设置参数,由软件执行。

③ 6SC650 系列主轴驱动主回路。图 11.18 所示为西门子 6SC650 系列主轴驱动装置主回路。它有电网端逆变器、中间电路及电压控制调节器和负载端逆变器三部分组成。

电网端逆变器是由六只晶闸管组成的三相桥式全控整流电路,受微处理器 1 控制。电动机处于工作状态时,控制角 $\alpha = 0^\circ$,它们工作在整流方式,整流电压为 535 V;电动机处于制动状态时,控制角 $\alpha = 150^\circ$,它们工作在逆变方式,将电能回馈给电网。



1—轴端编码器 ROD323(1024 脉冲/r)及电动机温度传感器插座 2—主轴冷却风扇接线盒 ;
3—用于主轴定位及 C 轴进给的编码器插座 4—主轴电动机三相电源接线盒

图 11.16 6SC650 主轴变频器与交流伺服电动机及 CNC 系统的接线图及有关接口定义

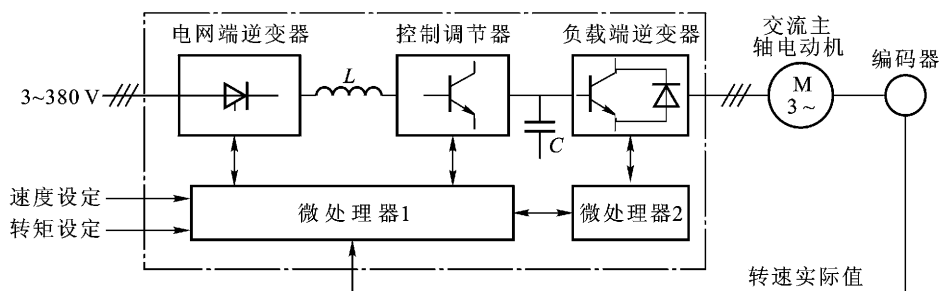


图 11.17 6SC650 系列主轴驱动控制系统框图

中间电路及电压控制调节器的作用是斩波调压,受微处理器 1 控制。改变 V_1 、 V_5 基极的输入脉冲,便可控制 V_1 、 V_5 的通、断时间。当电网端逆变器处于整流方式时,它可以将整流电压从 535 V 上调到 575 V;当电网端逆变器处于逆变方式时,能实现能量回馈的控制。

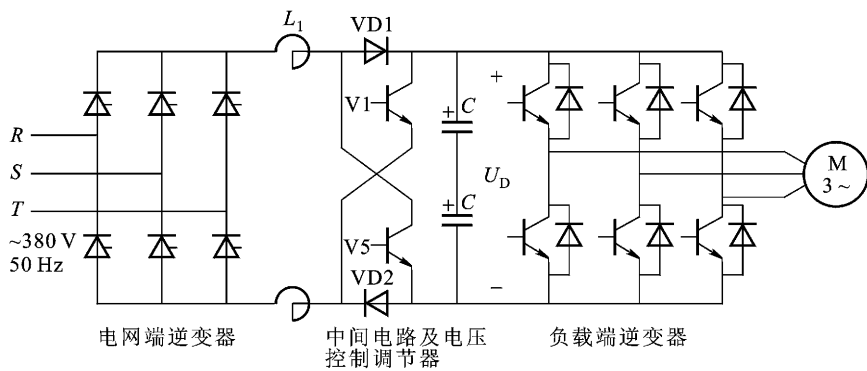


图 11.18 6SC650 交流主轴驱动装置主回路

负载端逆变器是由带反并联续流二极管的六只功率晶体管组成的 SPWM 主电路,受微处理器 2 控制。其输出的三相 SPWM 电压幅值控制范围为 0 ~ 430V,频率控制范围为 0 ~ 300Hz。在回馈制动时,电动机的能量可通过逆变器的六只续流二极管向电容 C 充电。当电容 C 上的电压超过 600V 时,通过控制调节器和电网端逆变器将电容 C 上的电能回馈给电网。

11.4 主轴准停控制技术常识

主轴准停控制,即主轴定向控制,它是将主轴准确地停在某一固定位置上,以便在该处完成换刀操作等动作。传统的方法是采用机械挡块等来定向。而在现代数控机床上,一般均采用电气控制方式,即只要数控系统发出 M19 指令,主轴就能准确地定向。

11.4.1 电气准停控制的特点

电气方式的主轴定向控制就是利用装在主轴上的磁性传感器或编码器作为位置反馈元件,由它们输出信号,使主轴准确地停在规定的位置上。它具有以下特点:

- (1) 简化机械结构
与机械准停相比,它只需要与主轴联上一个磁性传感器或编码器即可实现定向。
- (2) 减少定向时间
主轴在高速转动时,可以直接定向,而不必用齿轮减速,定向时间大为缩短。
- (3) 只需简单的强化控制

只需主轴定向指令信号、定向完成信号和主轴高/低速信号,即可完成主轴定向控制,而不需要定向速度指令、顺序和转矩极限指令等其他信号。

- (4) 增加了可靠性

由于采用了全部电子部件,不需复杂的机械、开关、液压缸等装置,避免了机械冲击,因此准停控制的寿命与可靠性大大增加。

11.4.2 主轴准停控制的实现方式

主轴定向控制,实际上是在主轴速度控制基础上,增加了一个位置控制环节,它可以分为磁

传感器主轴准停方式、编码器型主轴准停方式和数控系统准停控制三种方式。

1. 磁传感器主轴准停方式

图 11.19 所示为磁传感器准停控制系统的结构图。采用磁性传感器时,磁发体直接安装在主轴上,并随主轴一起旋转,而磁传感器则固定在主箱体上(距磁发体 $1 \sim 2 \text{ mm}$),磁性传感器与主轴驱动控制单元连接。当主轴需要准停时,数控系统便发出准停开关量信号,主轴立即加速或减速至某一准停速度(可在主轴驱动装置中设定)。主轴到达准停速度且准停位置到达时(即磁发体与磁传感器对准),主轴立即减速至某一爬行速度(可在主轴驱动装置中设定),然后当磁传感器信号出现时,主轴驱动立即进入磁性传感器作为反馈元件的位置闭环控制,直至磁发体的判别基准孔转到对准磁性传感器上的基准槽时,主轴便停在规定的位置上。主轴驱动装置便输出准停完成信号给数控系统,从而进行其他动作。

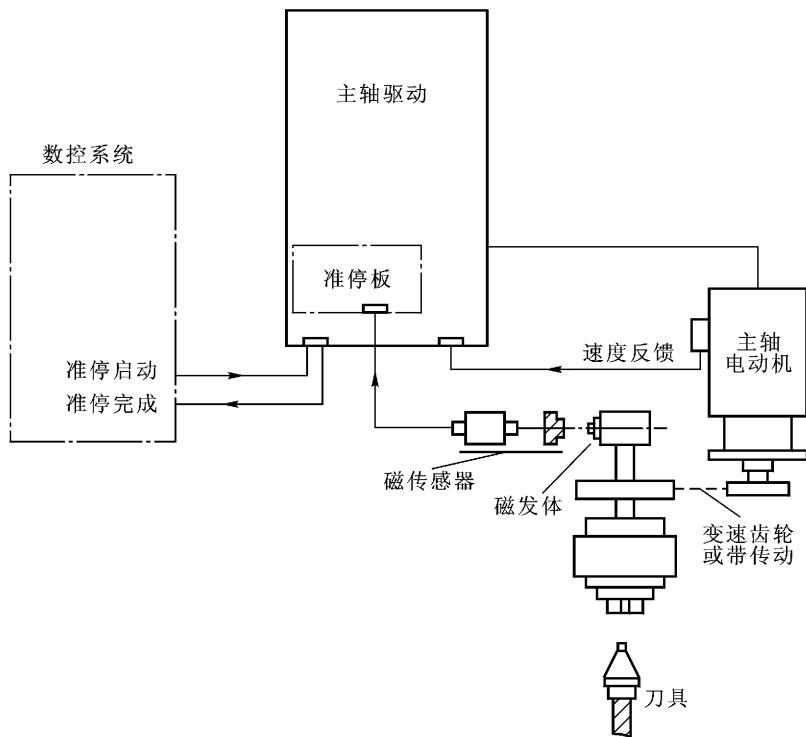


图 11.19 磁传感器准停控制系统的结构图

采用磁传感器主轴准停控制时,为了减少干扰,应避免它们与其他产生磁场的元件,如电磁线圈、电磁阀等安装在一起,具体的安装要求可参照有关说明书。另外要注意磁准停的角度无法随意指定,要想调整准停角度,只有调整磁发体与磁传感器的相对位置。

2. 编码器型主轴准停方式

图 11.20 所示为编码器型主轴准停控制系统结构图。该控制系统中的编码器可采用主轴电动机内部安装的编码器,也可采用在主轴上直接安装的另一编码器。采用编码器主轴定向时,主轴驱动控制单元可自动转换,使其处于速度控制或位置控制状态,其工作过程与磁传感器控制系统相似,但准停角度可由外部开关量设置,在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 间任意定向。

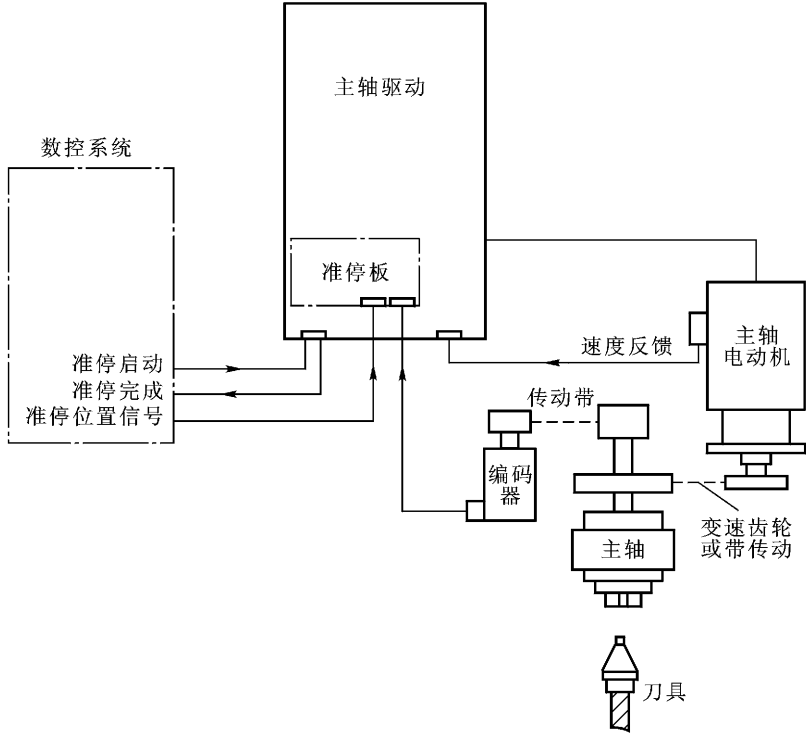


图 11.20 编码器准停控制系统的结构图

3. 数控系统准停控制

采用数控系统准停控制方式时 ,要求主轴驱动控制单元具有闭环控制功能。此时 ,一般均采用电动机轴端编码器信号反馈给数控系统 ,这样主轴传动链精度可能对准停精度产生影响。

图 11.21 所示为数控系统主轴准停结构图 ,其控制原理与进给位置控制原理相似。采用数控系统控制主轴准停的角度由数控系统内部设定 ,因此准停角度可以更方便地设定。当数控系统执行 M19 指令时 ,首先将 M19 送至 PLC ,PLC 经译码送出控制信号 ,使主轴驱动进入伺服状态 ,同时数控系统控制主轴电动机降速 ,并寻找零位脉冲 CP ,然后进入位置闭环控制状态。

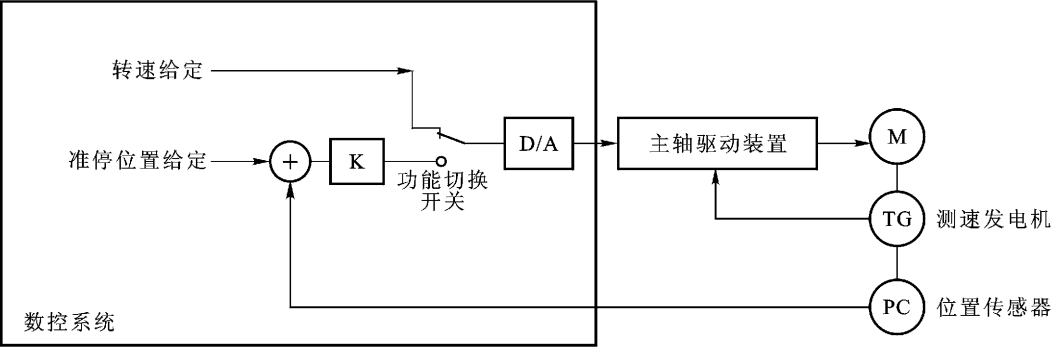


图 11.21 数控系统主轴准停结构图

思考与练习

- 11.1 数控机床主轴驱动的基本要求有哪些？
- 11.2 数控机床主轴驱动的形式有哪几种,各有何特点？
- 11.3 直流主轴电动机有哪几部分组成,它在结构上和直流进给电动机有何不同？
- 11.4 常用的测速发电机有几种,它的作用是什么？
- 11.5 直流主轴电动机的调速方式有几种,调磁调速有何特点？
- 11.6 晶闸管调速系统的主电路有哪几部分组成,它是如何实现调速的？
- 11.7 FANUC 晶闸管直流主轴驱动的连接信号有哪些？
- 11.8 试说明 FANUC 直流主轴驱动控制系统的调速过程。
- 11.9 交流主轴电动机有哪几部分组成,其轴端光电编码器的作用是什么？
- 11.10 交流主轴伺服电动机的调速特性有哪些？
- 11.11 什么是通用变频器,它有何特点？
- 11.12 什么是变频器的功能预置,程序设定的操作步骤有哪些？
- 11.13 三菱 FR - A500 系列变频器主回路中的交、直流电抗器有何作用？
- 11.14 试说明 FR - A500 系列变频器接线端子的功能及定义。
- 11.15 矢量变频调速的基本思路是什么,矢量变频调速有哪几种？
- 11.16 西门子 6SC650 系列主轴驱动变频器组件各组成部分的作用是什么？
- 11.17 试说明 6SC650 系列主轴驱动变频器调速控制的基本过程。
- 11.18 什么是主轴准停控制,电气准停控制有何特点？
- 11.19 主轴电气准停控制实现的方式有哪些,它们各有何特点？
- 11.20 磁传感器主轴准停控制系统有哪几部分组成,它是如何实现准停控制的？

附录 1

FANUC PMC – L 功能指令和处理内容

序号	指 令			处 理 内 容
	格式 1 用于梯形图	格式 2 用于纸带穿孔和程序显示	格式 3 用于程序输入	
1	END1	SUB1	S1	1 级(高级)程序结束
2	END2	SUB2	S2	2 级程序结束
3	END3	SUB48	S48	3 级程序结束
4	TMR	TMR	T	定时器处理
5	TMRB	SUB24	S24	固定定时器处理
6	DEC	DEC	D	译码
7	CTR	SUB5	S5	计数处理
8	ROT	SUB6	S6	旋转控制
9	COD	SUB7	S7	代码转换
10	MOVE	SUB8	S8	数据"与"后传输
11	COM	SUB9	S9	公共线控制
12	COME	SUB29	S29	公共线控制结束
13	JMP	SUB10	S10	跳转
14	JMPE	SUB30	S30	跳转结束
15	PARI	SUB11	S11	奇偶检查
16	DCNV	SUB14	S14	数据转换(二进制数↔BCD 码)
17	COMP	SUB15	S15	比较
18	COIN	SUB16	S16	符合检查
19	DSCH	SUB17	S17	数据检索
20	XMOV	SUB18	S18	变址数据传输
21	ADD	SUB19	S19	加法运算
22	SUB	SUB20	S20	减法运算
23	MUL	SUB21	S21	乘法运算
24	DIV	SUB22	S22	除法运算

续表

序号	指 令			处 理 内 容
	格式 1 用于梯形图	格式 2 用于纸带穿孔和程序显示	格式 3 用于程序输入	
25	NUME	SUB23	S23	定义常数
26	PACTL	SUB25	S25	位置 Mate – A
27	CODB	SUB27	S27	二进制代码转换
28	DCNVB	SUB31	S31	扩展数据转换
29	COMPB	SUB32	S32	二进制数比较
30	ADDB	SUB36	S36	二进制数加
31	SUBB	SUB37	S37	二进制数减
32	MULB	SUB38	S38	二进制数乘
33	DIVB	SUB39	S39	二进制数除
34	NUMEB	SUB40	S40	定义二进制常数
35	DISP	SUB49	S49	在 NC 的 CRT 上显示信息

附录 2

连接器 CN1 脚号定义

脚 号	记 号	名 称	意 义	线 径
CN1 - 1 CN1 - 2	F/H $\overline{F/H}$	整步/半步控制端(输入信号)	F/H 与 $\overline{F/H}$ 间电压为 4 ~ 5V 时 : 整步 ,步距角 0.7°/P F/H 与 $\overline{F/H}$ 间电压为 0 ~ 0. 5V 时 :半步 ,步距角 0.36°/P	0.15mm ² 以上
CN1 - 3 CN1 - 4	CP(CW) $\overline{CP}$ ($\overline{CW}$)	正/反转运行脉冲信号 (或正转脉冲信号)(输入信号)	单脉冲方式时 ,正、反转运行脉 冲($CP/\overline{CP}$)信号 ;双脉冲时 ,正转 脉冲($CW/\overline{CW}$)信号	0.15mm ² 以上
CN1 - 5 CN1 - 6	DIR(CCW) $\overline{DIR}$ ($\overline{CCW}$)	正、反转运行方向信号 (或反转脉冲信号)(输入信号)	单脉冲方式时 ,正、反转运行方 向($DIR/\overline{DIR}$)信号 ;双脉冲方式时 , 反转脉冲($CCW/\overline{CCW}$)信号	
CN1 - 7	RDY	控制回路正常 (输出信号)	当控制电源、回路正常时 ,输出 低电平信号	
CN1 - 8	COM	输出信号公共点	RDY、ZERO 输出信号的公共点	
CN1 - 9	ZERO	电气循环原点(输出信号)	半步运行时 ,第二十拍送出一电 气循环原点。整步运行时 ,第十拍 送出一电气循环原点 ,原点信号为 低电平信号	

参 考 文 献

- 1 周绍敏. 电工基础. 北京 :高等教育出版社 2001
- 2 曹建林 ,许传清. 电工技术. 北京 :高等教育出版社 2000
- 3 赵承荻. 电机与电气控制技术. 北京 :高等教育出版社 2002
- 4 李书堂. 电工基础. 北京 :中国劳动社会保障出版社 2001
- 5 陈惠群. 电工仪表与测量. 北京 :中国劳动社会保障出版社 2001
- 6 林红. 电工技术. 北京 :北方交通大学出版社 2003
- 7 林善明. 电路与电机技术. 北京 :机械工业出版社 2001
- 8 熊伟林. 电工技术. 北京 :电子工业出版社 2001
- 9 周军. 电气控制及 PLC. 北京 :机械工业出版社 2001
- 10 周庆贵. 电气控制技术. 北京 :化学工业出版社 2001
- 11 王风蕴 ,张超英. 数控原理与典型数控系统. 北京 :高等教育出版社 2003
- 12 卓迪仕. 数控技术及应用. 北京 :国防工业出版社 ,1997
- 13 林其骏. 数控技术与应用. 北京 :机械工业出版社 ,1995
- 14 王侃夫. 数控机床故障诊断及维护. 北京 :机械工业出版社 2000
- 15 全国数控培训网络天津分中心. 数控原理. 北京 :机械工业出版社 ,1997
- 16 张柱银. 数控原理与数控机床. 北京 :化学工业出版社 2003
- 17 王侃夫. 数控机床控制技术与系统. 北京 :机械工业出版社 2001
- 18 廖兆荣. 机床电气自动控制. 北京 :化学工业出版社 2003
- 19 张忠夫. 机电传动与控制. 北京 :机械工业出版社 2001
- 20 孙汉卿. 数控机床维修技术. 北京 :机械工业出版社 2000
- 21 陈其纯. 电子线路. 北京 :高等教育出版社 2001
- 22 秦曾煌. 电子技术. 北京 :高等教育出版社 2001
- 23 吕国泰 ,吴项. 电子技术. 北京 :高等教育出版社 2001
- 24 张汉友. 电子技术. 北京 :高等教育出版社 2001
- 25 彭利标. 电子技术基础. 北京 :高等教育出版社 2001
- 26 吴文龙 ,王猛. 数控系统. 北京 :高等教育出版社 2001