

# 模块

## 电风扇无级调速器电路的制作与调试



### 模块引入

在日常生活中随处可见电风扇(见图 3-1),它在炎热的夏天给人们送来阵阵凉风,那么电风扇是由哪些元件构成的呢?它的工作原理又是什么?以往采用的有级调速的电风扇体积大,耗能高。现在的电风扇多采用无级调速器,其体积小,耗能很少,旋转旋钮可以方便平稳地调节电风扇的转速,这是如何做到的呢?本模块将从最简易的电风扇无级调速器开始进行分析讲解。



图 3-1 电风扇

### 学习目标

- (1)掌握双向晶闸管及双向触发二极管的原理及选择。
- (2)能说出调压电路的几种控制方式及其适用范围。
- (3)了解交流调功器、交流开关、固态开关的原理。
- (4)掌握简易电风扇的工作原理,能设计并制作调试电风扇无级调速器。
- (5)能够分析和设计简单的交流调压电路,并能对常见故障进行检修。

### 课题描述

电风扇无级调速器在日常生活中随处可见。图 3-2(a)是常见的电风扇无级调速器,旋转旋钮便可以调节电风扇的速度;图 3-2(b)为电路原理图。

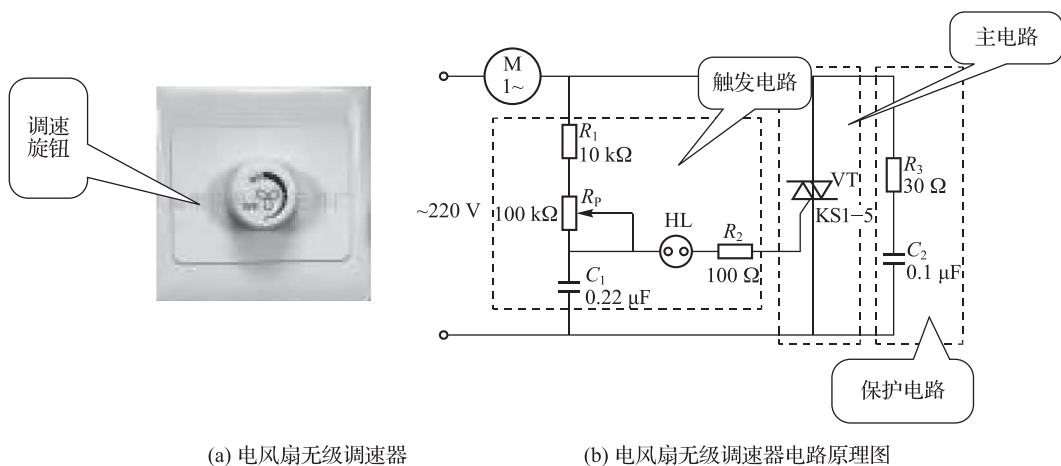


图 3-2 电风扇无级调速器及其电路原理图

无级调速一般采用双向晶闸管作为电风扇的开关。利用晶闸管的可控特性,通过改变晶闸管的控制角使晶闸管的输出电压发生改变,达到调节电动机转速的目的。如图 3-2(b)所示,调速器电路主要由主电路和触发电路两部分构成,在双向晶闸管的两端并接 RC 元件,是利用电容两端电压瞬时不能突变,作为晶闸管关断过电压的保护措施。

本模块通过对主电路及触发电路的相关知识,双向晶闸管、氖管、交流调压电路、交流开关等内容的介绍和分析,使学生能够理解调速器电路的工作原理,进而掌握分析交流调压电路的方法。

### 举一反三

如果将图 3-2(b)中的负载换成灯泡,能否实现连续调光? 具体电路工作原理请同学自行分析。若负载换成电熨斗、电热毯呢?

## 知识链接

# 任务一 双向晶闸管及双向触发二极管

## 一、双向晶闸管概述

双向晶闸管广泛应用于工业交通、家用电器等领域,实现交流调压、电机调速、交流开关、路灯自动开启与关闭、温度控制、台灯调光、家用全自动洗衣机调节、舞台调光灯调节等多种功能。双向晶闸管是一种控制交流功率的理想器件,主要应用于交流无触点继电器、交流相位控制等。双向晶闸管是由 N-P-N-P-N 五层半导体材料制成的,对外也引出三个电极,包括两个主电极  $T_1$ 、 $T_2$  和一个门极 G,但只有一个控制极。其内部结构、等效电路

及图形符号如图 3-3 所示。

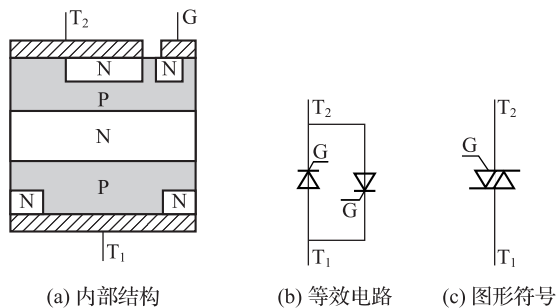


图 3-3 双向晶闸管的内部结构、等效电路及图形符号

由图 3-3 可见,双向晶闸管相当于两个普通晶闸管反并联,不过它只有一个门极 G。其内部结构特点使得门极 G 相对于  $T_1$  端无论是正的或是负的,都能触发,而且  $T_1$  相对于  $T_2$  既可以是正,也可以是负。双向晶闸管的外形与普通晶闸管类似,有塑封式、螺栓式、平板式,如图 3-4 所示。常见双向晶闸管的引脚排列如图 3-5 所示。

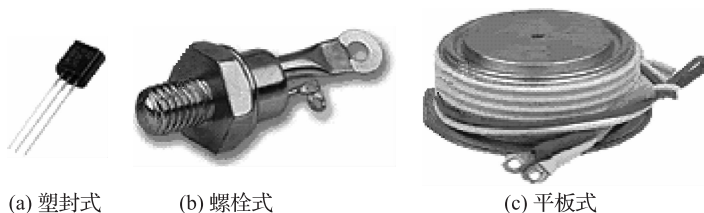


图 3-4 双向晶闸管的外形

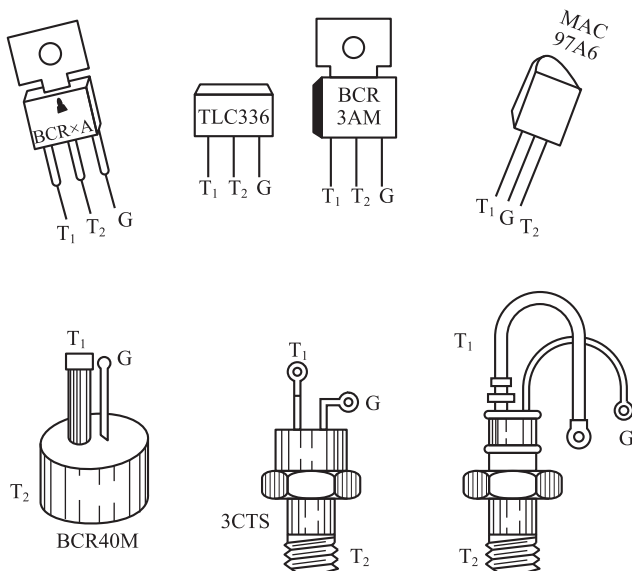


图 3-5 常见双向晶闸管的引脚排列

双向晶闸管与单向晶闸管一样,也具有触发控制特性。但它的触发控制特性与单向晶闸管有很大的不同,即无论在阳极和阴极间接入何种极性的电压,只要在它的控制极上加上一个触发脉冲,也不管这个脉冲是什么极性的,都可以使双向晶闸管导通。由于双向晶闸管在阳、阴极间接任何极性的工作电压都可以实现触发控制,因此双向晶闸管的主电极也就没有阳极、阴极之分,通常将接在 P 型半导体材料上的主电极称为  $T_1$  电极,将接在 N 型半导体材料上的电极称为  $T_2$  电极。由于双向晶闸管的两个主电极没有正负之分,所以它的参数中也就没有正向峰值电压与反向峰值电压,而只用一个最大峰值电压,双向晶闸管的其他参数则与单向晶闸管相同。

双向晶闸管的导通条件是主电极与主电极之间加足够的正向或反向电压,同时门极与主电极之间加足够的正反向电压,两个条件均须满足。关断条件是阳极电流小于维持电流或主电极与主电极之间电压降为零,两个条件满足其一即可。

## 二、双向晶闸管的特性

与普通晶闸管不同,双向晶闸管有正反向对称的伏安特性曲线。如图 3-6 所示,由于双向晶闸管正、反特性具有对称性,所以它可在任何一个方向导通,是一种理想的交流开关器件。正向部分位于第 I 象限,反向部分位于第 III 象限,并约定:双向晶闸管的  $T_1$  极为正、 $T_2$  极为负时的特性是第 I 象限特性,而  $T_1$  极为负、 $T_2$  极为正时的特性为第 III 象限特性。

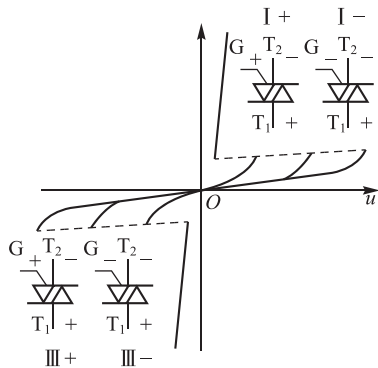


图 3-6 双向晶闸管的伏安特性

双向晶闸管正反两个方向都能导通,门极加正负电压都能触发。主电压与触发电压相互配合,可以得到四种触发方式。

(1) I + 触发方式。主电极  $T_1$  为正,  $T_2$  为负;门极 G 电压为正,  $T_2$  为负。特性曲线在第 I 象限。

(2) I - 触发方式。主电极  $T_1$  为正,  $T_2$  为负;门极 G 电压为负,  $T_2$  为正。特性曲线在第 I 象限。

(3) III + 触发方式。主电极  $T_1$  为负,  $T_2$  为正;门极 G 电压为正,  $T_2$  为负。特性曲线在第 III 象限。

(4) III - 触发方式。主电极  $T_1$  为负,  $T_2$  为正;门极 G 电压为负,  $T_2$  为正。特性曲线在

第Ⅲ象限。

由于双向晶闸管的内部结构原因,四种触发方式中灵敏度不相同,以Ⅲ+触发方式灵敏度最低,所需门极触发功率很大,所以实际使用时要尽量避免。双向晶闸管常用在交流调压电路中,触发方式常选(I+、Ⅲ-)或(I-、Ⅲ+)。

### 三、双向晶闸管的型号与参数

#### 1. 双向晶闸管的型号及含义

双向晶闸管的型号及含义如图 3-7 所示。

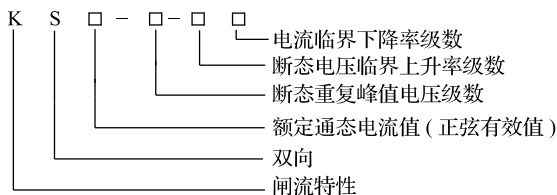


图 3-7 双向晶闸管的型号及含义

国产双向晶闸管用 KS 表示。例如,型号 KS50-10-21 表示额定电流为 50 A,额定电压为 10 级(1 000 V),断态电压临界上升率为 2 级(不小于 200 V/μs),换向电流临界下降率为 1 级(不小于 1% I<sub>T(RMS)</sub>)的双向晶闸管。

#### 2. 双向晶闸管的主要参数

(1) 额定通态电流 I<sub>T(RMS)</sub> (额定电流)。双向晶闸管的主要参数中只有额定电流与普通晶闸管有所不同,其他参数定义相似。由于双向晶闸管工作在交流电路中,正反向电流都可以流过,所以它的额定电流不用平均值而是用有效值来表示。

双向晶闸管额定电流定义为:在标准散热条件下,当器件的单相导通角大于 170°时,允许流过器件的最大交流正弦电流的有效值,用 I<sub>T(RMS)</sub> 表示。表 4-1 中列出了部分电流系列对应的 I<sub>T(RMS)</sub> 值。

表 3-1 部分电流系列与额定电流(有效值) I<sub>T(RMS)</sub> 的规定

系 列	KS1	KS10	KS20	KS50	KS100	KS200	KS400	KS500
I <sub>T(RMS)</sub> /A	1	10	20	50	100	200	400	500

① 双向晶闸管额定电流与普通晶闸管额定电流之间的换算关系式为

$$I_{T(AV)} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} I_{T(RMS)} = 0.45 I_{T(RMS)}$$

例如,100 A 有效值的双向晶闸管,其峰值为  $100\sqrt{2}=141$  A,而普通晶闸管的额定电流是以正弦半波的平均值表示,峰值为 141 A 的正弦半波的平均值为  $141/\pi=45$  A。

由此推算,一个 100 A 的双向晶闸管与两个反并联 45 A 的普通晶闸管电流容量相等。

② 额定通态电流的选择。双向晶闸管交流开关多用于频繁起动、制动和要求可逆运转的交流电动机,要考虑起动或反接电流峰值来选取元件的额定通态电流。对于绕线转

子异步电动机,最大电流为电动机额定电流的3~6倍,对笼型电动机则取7~10倍。例如,对于30 kW的绕线转子异步电动机和11 kW的笼型异步电动机,要选用200 A的双向晶闸管。

(2)断态重复峰值电压 $U_{\text{DRM}}$ (额定电压)。双向晶闸管的断态重复峰值电压的分级规定列在表4-2中,实际应用时该电压通常取两倍的裕量,380 V线路用的交流开关,一般应选取1 000~1 200 V的双向晶闸管。

表 3-2 断态重复峰值电压 $U_{\text{DRM}}$ 的分级规定

等 级	1	2	3	4	5	6	7	8
$U_{\text{DRM}}/\text{V}$	100	200	300	400	500	600	700	800
等 级	9	10	12	14	16	18	20	
$U_{\text{DRM}}/\text{V}$	900	1 000	1 200	1 400	1 600	1 800	2 000	

双向晶闸管的其他参数列于表3-3和表3-4中。

表 3-3 断态电压临界上升率分级规定

等 级	0.2	0.5	2	5
$du/dt/(\text{A} \cdot \mu\text{s}^{-1})$	$\geq 20$	$\geq 50$	$\geq 200$	$\geq 500$

表 3-4 换向电流临界下降率分级规定

等 级	0.2	0.5	1
$di/dt/(\text{A} \cdot \mu\text{s}^{-1})$	$\geq 0.2\% I_{\text{T(RMS)}}$	$\geq 0.5\% I_{\text{T(RMS)}}$	$\geq 1\% I_{\text{T(RMS)}}$

(3)换向能力。电压上升率 $(du/dt)_c$ 是一个重要参数,它反映双向晶闸管的换向能力。一些双向晶闸管的交流开关经常发生短路事故,主要原因之一是元件允许的 $c$ 值太小。通常的解决方法如下。

①在交流开关的主电路中串入空心电抗器,抑制电路中换向电压上升率,降低对双向晶闸管换向能力的要求。

②选用 $c$ 值高的元件,一般选 $c$ 值为200 V/ $\mu\text{s}$ 。

为了保证交流开关的可靠运行,必须根据开关的工作条件,合理选择双向晶闸管的额定通态电流、断态重复峰值电压(铭牌额定电压)及换向电压上升率。KS型双向晶闸管的主要参数见表3-5。

表 3-5 KS 型双向晶闸管的主要参数

系列	参 数												
	额定通态电 流(有效值) $I_{T(RMS)}/A$	断态重复峰 值电压 (额定电压) $U_{DRM}/V$	断态重复 峰值电流 $I_{DRM}/mA$	额定结温 $T_{JM}/^{\circ}C$	断态电压 临界上升 率( $du/dt$ )/ ( $V \cdot \mu s^{-1}$ )	通态电流 临界上升 率( $di/dt$ )/ ( $A \cdot \mu s^{-1}$ )	换向电流 临界下降 率( $di/dt$ )/ ( $A \cdot \mu s^{-1}$ )	门极触发 电流 $I_{GT}/mA$	门极触发 电压 $U_{GT}/V$	门极峰值 电流 $I_{GM}/A$	门极峰值 电压 $U_{GM}/V$	维持电流 $I_H/mA$	通态平均 电压 $U_{T(AV)}/V$
KS1	1	100~ 200	<1	115	$\geq 20$	—	$\geq 0.2\%$ $I_{T(RMS)}$	3~100	$\leq 2$	0.3	10	实测值	上限值各厂 由浪涌电流和 结温的合格形 式试验决定,并 满足 $ U_{T1} - U_{T2}  \leq 0.5 V$
KS10	10		<10	115	$\geq 20$	—		5~100	$\leq 3$	2	10		
KS20	20		<10	115	$\geq 20$	—		5~200	$\leq 3$	2	10		
KS50	50		<15	115	$\geq 20$	10		8~200	$\leq 4$	3	10		
KS100	100		<20	115	$\geq 50$	10		10~300	$\leq 4$	4	12		
KS200	200		<20	115	$\geq 50$	15		10~400	$\leq 4$	4	12		
KS400	400		<25	115	$\geq 50$	30		20~400	$\leq 4$	4	12		
KS500	500		<25	115	$\geq 50$	30		20~400	$\leq 4$	4	12		

## 四、双向晶闸管的触发电路

双向晶闸管的常用控制方式有两种：一种是移相触发，与普通晶闸管一样，是通过控制触发脉冲的相位达到调压的目的；另一种是过零触发，适用于调功电路及无触点开关电路。

### 1. 简易触发电路

图 3-8 所示为双向晶闸管的简易触发电路。图 3-8(a) 为双向晶闸管阻容移相电路，图中当开关 S 拨至“2”，双向晶闸管 VT 只在 I+ 触发，负载  $R_L$  上仅得到正半周电压；当 S 拨至“3”时，VT 在正、负半周分别在 I+、III- 触发， $R_L$  上得到正、负两个半周的电压，因而比置“2”时电压大。

图 3-8(b)~图 3-8(d) 中均引入了具有对称极性的触发二极管 VD，这种二极管两端电压达到击穿电压数值（通常为 30 V 左右，不分极性）时被击穿导通，晶闸管便也触发导通。调节电位器  $R_P$  改变控制角  $\alpha$ ，实现调压。

目前生产的双向晶闸管，不少已经把 VD 和 VT 集成在一起，门极经过双向触发二极管 VD 引出，使用时更方便。

图 3-8(c) 与图 3-8(b) 的不同点在于前者中增设了  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $C_2$ 。在图 3-8(b) 中，当工作于大  $\alpha$  值时，因  $R_P$  阻值较大，使  $C_1$  充电缓慢，到  $\alpha$  角时电源电压已经过峰值并降得过低，则  $C_1$  上的充电电压过小，不足以击穿双向触发二极管 VD；而图 3-8(c) 在大  $\alpha$  时， $C_2$  上可获得滞后的电压  $u_{C2}$ ，给电容  $C_1$  增加一个充电电路，保证在大  $\alpha$  时 VT 能可靠触发，增大了调压范围；图 3-8(d) 是电机调速电路。

图 3-8(e) 是电风扇无级调速电路图，接通电源后，电容  $C_1$  充电，当电容  $C_1$  两端电压的峰值达到氖管 HL 的阻断电压时，HL 点亮，双向晶闸管 VT 被触发导通，电扇转动。改变电位器  $R_P$  的大小，即改变了  $C_1$  的充电时间常数，使 VT 的导通角发生变化，也就改变了电动机两端的电压，因此电扇的转速得以改变。由于可变电阻  $R_P$  是无级变化的，因此电风扇的转速也是无级变化的。

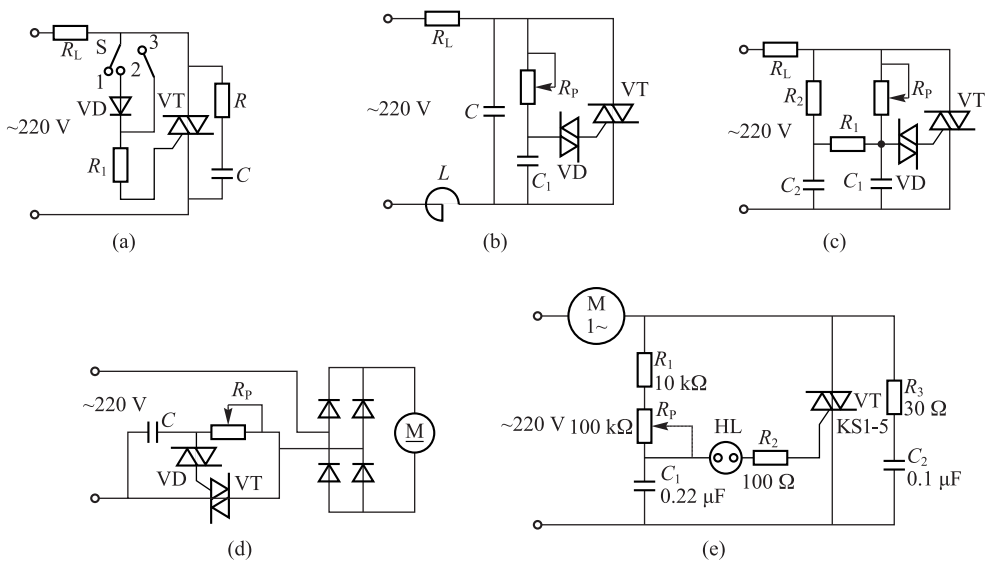


图 3-8 双向晶闸管的简易触发电路





续表

触发电路名称	优点	缺点	适用范围
单结晶体管触发电路	电路简单,成本低,工作可靠,触发脉冲前沿陡,抗干扰能力强,易于调试	脉冲宽度窄,输出功率小,控制线性度差,移相范围一般小于 $180^{\circ}$ 。电路参数差异性大,在多相电路中使用不易一致	不附加放大环节,可触发 $50\text{ A}$ 以下的晶闸管,常用于要求不高的小功率单相或三相半波电路中,但在大电感负载中不宜采用
集成触发电路	体积小,功耗低,调试方便,性能稳定可靠	移相范围小于 $180^{\circ}$ ,为保证触发脉冲对称度,要求交流电网波形畸变率小于 $5\%$	广泛应用于各种晶闸管装置中
数字式触发电路	触发准确,精度高	线路复杂,成本高	用于要求较高的场合
用小晶闸管放大脉冲功率的触发电路	电路简单、可靠,触发功率大,可获得宽脉冲	需要单晶体管电路触发小晶闸管,所用器件较多	用于触发大功率晶闸管或多只晶闸管串并联的场合
正弦波同步触发电路	触发电路简单,易于调整,能输出宽脉冲,直流输出电压与控制电压为线性关系,能部分补偿电网电压波动对输出电压的影响	由于同步信号为正弦波,故受电网电压的波动及干扰影响较大,实际移相范围只有 $150^{\circ}$ 左右	不适用于电网电压波动较大的场合,可用于功率较大场合
锯齿波同步触发电路	它不受电网电压波动与波形畸变的直接影响,抗干扰能力强,移相范围宽,具有强触发、双脉冲和脉冲封锁等环节,可触发 $200\text{ A}$ 的晶闸管	整流输出电压与控制电压间不是线性关系,电路比较复杂	在大中容量晶闸管装置中得到广泛的应用

## 五、双向触发二极管

双向触发二极管亦称二端交流器件(DIAC),其结构与符号如图 3-11 所示。双向触发二极管对于电子爱好者来说是比较熟悉的,在可控硅调压电路、日光灯电子整流器中都可以看到它的身影。它与双向晶闸管同时同世,由于其结构简单、价格低廉,所以常用来触发双向晶闸管;还可构成过压保护等电路。采用双向触发二极管触发双向晶闸管的调压电路是一种典型而常用的触发电路。

在一般情况下,当器件两端所加电压低于正向转折电压时,器件呈高阻态,双向触发二

极管截止,只有当外加电压(不论正负)的幅值大于双向触发二极管的转折电压时,它才会击穿导通。双向触发二极管的正向转折电压值一般有三个等级:20~60 V、100~150 V、200~250 V。由于转折电压都大于20 V,测量双向触发二极管的转折电压方法为:将兆欧表的正极(E)和负极(L)分别接双向触发二极管的两端,用兆欧表提供击穿电压,同时用万用表的直流电压挡测量出电压值,将双向触发二极管的两极对调后再测量一次。比较一下两次测量的电压值的偏差(一般为3~6 V),此偏差值越小,说明此二极管的性能越好。

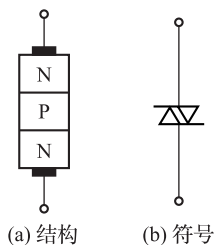


图 3-11 双向触发二极管的结构与符号

## 任务二 交流调压电路

交流变换实质上就是交流变交流(AC/AC 变换),也就是把一个交流电变化为另一个交流电,是交流信号之间的变换。交流变换电路是把一种形式的交流电变成另一种形式的交流电的电路。这里包含两部分内容:第一部分是交流调压电路,它把一种交流电转换为另一种交流电,输出的电压大小发生变化,频率不变。第二部分是交交变频电路,它使交流信号的频率发生变化,在直接变频的同时也可实现电压变换,即直接实现降频、降压变换。本任务将重点介绍交流调压电路。

### 一、交流调压电路的控制方式

交流调压电路是用来变换交流电压幅值(或有效值)的电路。交流调压电路的控制方式一般有通断控制、相位控制和斩波控制。

#### 1. 通断控制

如图 3-12 所示,通断控制就是在交流电压过零时刻让两个管子导通一段时间,再关断一段时间,如此交替,这种控制方式在导通时输出电压为正弦波,关断时输出电压为 0。由于输出电压时有时无,电压调节不连续,那么这种控制方式适合于什么场合呢?用这种控制方式能否控制电机?如果接异步电机,电压通一下断一下,实质上每次接通,电机都会受到一个冲击,电机震动得很厉害,噪声很大,因此它不适合控制异步电机。

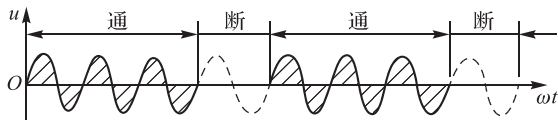


图 3-12 通断控制

这种控制方式对于电炉这种负载比较合适。例如,要控制电炉的温度,等电炉的炉丝热起来后,在很短的时间断一下,通一下,再断一下时,电炉炉丝的温度不会很快降下来,因为它的时间常数很大。因此,这种方式适合时间常数较大的负载,如电炉调温等交流功率调节的场合。其优点是控制方式简单,功率因数高;缺点是输出的电压或者功率调节不连续,不平滑。

## 2. 相位控制

相位控制是用得最多的一种控制方式。如图 3-13 所示,正半周时  $T_1$  触发导通,产生正的波形;负半周时  $T_2$  触发导通,产生负的波形。如此正负交替,只要调节控制角的大小,就可以调节控制输出电压的有效值。它和整流电路方法类似。

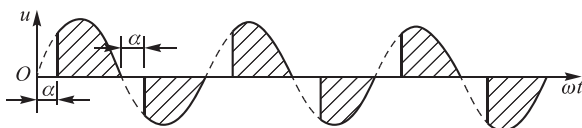


图 3-13 相位控制

用一个三相的交流调压器接电机负载,采用这种控制方式可以运行,只是波形较差,谐波成分较多,对电机的运行会有一些影响。如常见的电机软起动器,实质上是一种调压电路,使用相位控制时,可以使电机起动时起动电流不会太大。电机起动时,其起动电流会达到额定电流的 7~8 倍,可能会引起很大的冲击,使局部电网崩溃。一般在起动时要采取一定的措施,如串电阻起动、降压起动等。软起动实质上是把电机端电压降下来,慢慢地按照一定的变化规律增加端电压,使电机逐步起动。这一般也是用调压电路。

相位控制的特点是:方法简单,能连续调节输出电压的大小;但输出波形非正弦波,含有丰富的谐波分量,在异步电动机调压调速时会引起附加谐波损耗,产生脉动转矩等。

## 3. 斩波控制

斩波控制是利用脉宽调制技术将交流电压波形分割成脉冲列,通过改变脉冲的宽度来改变输出电压大小,如图 3-14 所示。斩波控制的波形很好,输出电压波形就是一个正弦波,谐波分量非常小,但是也存在问题,即在半个周期内需要实现较高频率的通、断,不能采用普通晶闸管,必须采用自关断器件(全控型器件)控制,如 GTO、GTR、MOSFET、IGBT 等。

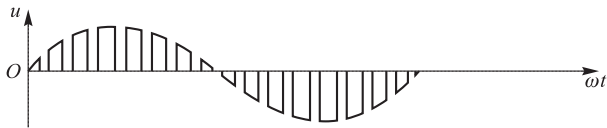


图 3-14 斩波控制

### 想一想

总结三种电压控制方式各自的优缺点及适用的负载。

## 二、单相交流调压原理

电风扇无级调速器实际上就是负载为电感性的单相交流调压电路。交流调压是将一种

幅值的交流电能转化为同频率的另一种幅值的交流电能。单向交流调压电路的工作情况与它的负载性质有关。

### 1. 电阻性负载

图 3-15(a)所示为一双向晶闸管与电阻负载组成的交流调压主电路,图中的双向晶闸管也可改用两只反并联的普通晶闸管,但需要两组独立的触发电路分别控制两只晶闸管。

在电源正半周,  $\omega t = \alpha$  时触发 VT 导通,有正向电流流过  $R_L$ ,负载端电压  $u_R$  为正值,电流过零时 VT 自行关断;在电源负半周,  $\omega t = \pi + \alpha$  时,再触发 VT 导通,有反向电流流过  $R_L$ ,其端电压  $u_R$  为负值,到电流过零时 VT 再次自行关断。然后重复上述过程。改变  $\alpha$  即可调节负载两端的输出电压有效值,达到交流调压的目的。各电压的波形图如图 3-14 所示。

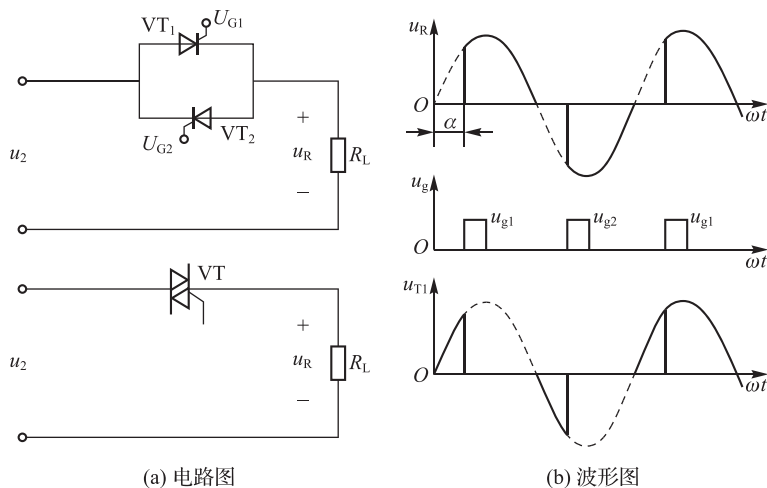


图 3-15 单相交流调压电路电阻负载电路及波形

电阻负载上的交流电压有效值为

$$U_R = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} (\sqrt{2}U_2 \sin \omega t)^2 d\omega t} = U_2 \sqrt{\frac{1}{2\pi} \sin 2\alpha + \frac{\pi - \alpha}{\pi}}$$

电流有效值为

$$I = \frac{U_R}{R} = \frac{U_2}{R} \sqrt{\frac{1}{2\pi} \sin 2\alpha + \frac{\pi - \alpha}{\pi}}$$

电路功率因数为

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{U_R I}{U_2 I} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \sin 2\alpha + \frac{\pi - \alpha}{\pi}}$$

电路的移相范围为  $0 \sim \pi$ 。

通过改变  $\alpha$  可得到不同的输出电压有效值,从而达到交流调压的目的。由双向晶闸管组成的电路,只要在正负半周对称的相应时刻( $\alpha, \pi + \alpha$ )供给触发脉冲,就可和反并联电路一样得到同样的可调交流电压。

交流调压电路的触发电路完全可以套用整流移相触发电路,但脉冲的输出必须通过脉冲变压器,其两个二次线圈之间要有足够的绝缘。

**例 3-1** 一电阻炉由单相交流调压电路供电,若  $\alpha = 0^\circ$  时为输出功率最大值,试求功率为

最大值的 80%, 50% 时的控制角  $\alpha$ 。

解  $\alpha=0^\circ$  时为输出电压最大值, 即

$$U_{\text{omax}} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^\pi (\sqrt{2}U \sin \omega t)^2 d\omega t} = U_1$$

负载上的最大电流为

$$I_{\text{omax}} = \frac{U_{\text{omax}}}{R} = \frac{U_1}{R}$$

输出最大功率为

$$P_{\text{max}} = U_{\text{omax}} I_{\text{omax}} = \frac{U_1^2}{R}$$

输出功率为最大值的 80% 时, 有

$$P = 0.8P_{\text{max}} = \frac{(\sqrt{0.8}U_1)^2}{R}, U_o = \sqrt{0.8}U_1$$

而

$$U_o = U_1 \sqrt{\frac{1}{2\pi} \sin 2\alpha + \frac{\pi - \alpha}{\pi}}$$

故  $\alpha = 60.54^\circ$ 。

输出功率为最大值的 50% 时, 有

$$P = 0.5P_{\text{max}} = \frac{(\sqrt{0.5}U_1)^2}{R}, U_o = \sqrt{0.5}U_1$$

而

$$U_o = U_1 \sqrt{\frac{1}{2\pi} \sin 2\alpha + \frac{\pi - \alpha}{\pi}}$$

故  $\alpha = 90^\circ$ 。

## 2. 电感性负载

图 3-16 所示为电感性负载的交流调压电路。由于电感的作用, 在电源电压由正向负过零时, 负载中电流要滞后一定  $\varphi$  角度才能到零, 即管子要继续导通到电源电压的负半周才能关断。晶闸管的导通角  $\theta$  不仅与控制角  $\alpha$  有关, 而且与负载的功率因数角  $\varphi$  有关。控制角越小, 则导通角越大, 负载的功率因数角  $\varphi$  越大, 表明负载感抗大, 自感电动势使电流过零的时间越长, 因而导通角  $\theta$  越大, 见图 3-17。三种情况下调压电路的工作情况如表 3-7 所示。

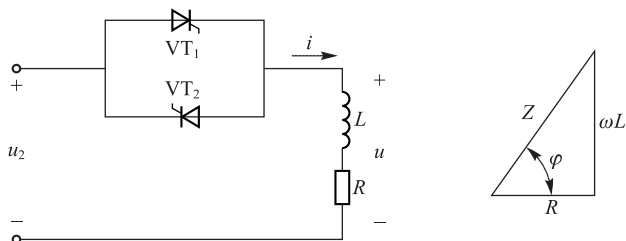


图 3-16 电感性负载的交流调压电路

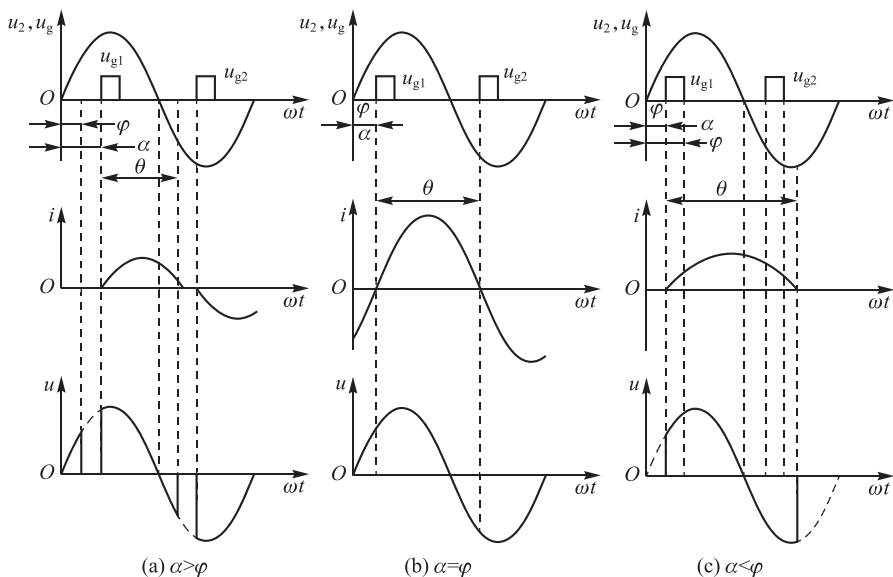


图 3-17 单相交流调压电感负载波形图

表 3-7 三种情况下调压电路的工作情况

情 况	调压电路的工作情况
$\alpha > \varphi$	①由图 3-16 可见,此时 $\theta < 180^\circ$ ,即正负半波电流断续。 ② $\alpha$ 越大, $\theta$ 越小,波形断续越严重。 ③可见, $\varphi < \alpha < 180^\circ$ 范围内,交流电压连续可调。 电流电压波形如图 3-17(a) 所示
$\alpha = \varphi$	①由图 3-16 可知,此时 $\theta = 180^\circ$ ,即正负半周电流临界连续。 ②此时晶闸管失去控制,不起电压调节作用,电流电压波形如图 3-17(b) 所示情况
$\alpha < \varphi$	①此种情况会出现失控现象。若开始给 $VT_1$ 以触发脉冲, $VT_1$ 导通,且 $\theta > 180^\circ$ 。如果触发脉冲为窄脉冲,当 $u_{g2}$ 出现时, $VT_1$ 的电流还未到零, $VT_1$ 关不断, $VT_2$ 不能导通。当 $VT_1$ 电流到零关断时, $u_{g2}$ 脉冲已消失,此时 $VT_2$ 虽已受正压,但也无法导通。到第三个半波时, $u_{g1}$ 又触发 $VT_1$ 导通。这样负载电流只有正半波部分,出现很大直流分量,无法维持电路正常工作。 ②解决失控现象的办法:电感性负载时,晶闸管不能用窄脉冲触发,可采用宽脉冲或脉冲列触发

综上所述,单相交流调压有如下特点。

(1)电阻性负载时,负载电流波形与单相桥式可控整流交流侧电流一致。改变控制角  $\alpha$  可以连续改变负载电压有效值,达到交流调压的目的。

(2)电感性负载时,不能用窄脉冲触发,否则当  $\alpha < \varphi$  时,会有一个晶闸管无法导通,产生很大直流分量电流,烧毁熔断器或晶闸管。

(3)电感性负载时,最小控制角  $\alpha_{\min} = \varphi$ (阻抗角),所以  $\alpha$  的移相范围为  $\varphi \sim 180^\circ$ ,电阻负载时移相范围为  $0 \sim 180^\circ$ 。

**例 3-2** 一交流单相晶闸管调压器,用作控制从 220 V 交流电源送至电阻为  $0.5 \Omega$ ,感

抗为  $0.5 \Omega$  的串联负载电路的功率。

- (1) 求控制角的范围；
- (2) 求负载电流的有效值。

解 (1) 负载阻抗角为

$$\varphi = \arctan \frac{\omega L}{R} = \arctan \frac{0.5}{0.5} = \frac{\pi}{4}$$

最小控制角为  $\alpha_{\min} = \varphi = \frac{\pi}{4}$

故控制角的范围为  $\frac{\pi}{4} \leq \alpha \leq \pi$

(2)  $\alpha_{\min} = \varphi = \frac{\pi}{4}$  处, 输出电压最大, 电流也最大, 故最大有效值为

$$I_o = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_L^2}} = \frac{220}{\sqrt{0.5^2 + 0.5^2}} = 311 \text{ A}$$

### 三、三相交流调压原理

单相交流调压适用于单相容量小的负载, 当交流功率调节容量较大时, 通常采用三相交流调压电路, 如三相电热器、电解与电镀等设备。三相交流调压电路有多种形式, 负载可连接成三角形或星形。

#### 1. 三相交流调压电路的形式

##### 1) 三相四线制交流调压电路

三相四线制交流调压电路如图 3-18 所示, 电路特点如下。

- (1) 相当于三个独立的单相交流调压电路组合而成。
- (2) 存在中性线, 但 3 次谐波在中性线中的电流大, 故中性线的导线截面要求与相线一致。
- (3) 晶闸管的门极触发脉冲信号同相间两管的触发脉冲要互差  $180^\circ$ 。
- (4) 各晶闸管的导通顺序为  $T_1 \sim T_6$ , 依次滞后间隔  $60^\circ$ 。
- (5) 因存在中性线, 可采用窄脉冲触发。

##### 2) 三相三线制交流调压电路

(1) 如图 3-19 所示, 电路特点如下。

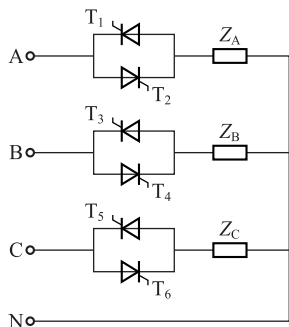


图 3-18 三相四线制交流调压电路

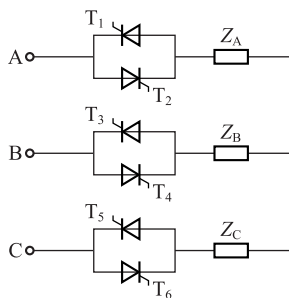


图 3-19 三相三线制交流调压电路

- ① 每相电路必须通过另一相形成回路。
- ② 负载接线灵活, 且不用中性线。



③晶闸管的触发电路必须是双脉冲,或者是宽度大于  $60^\circ$  的单脉冲。

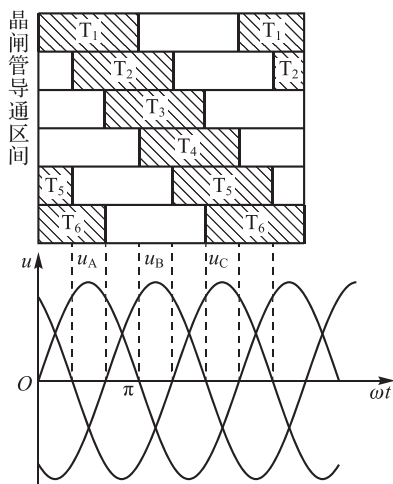
④触发脉冲顺序和三相全控桥一样,为  $T_1 \sim T_6$ ,依次间隔  $60^\circ$ 。

⑤电压过零处定为控制角的起点, $\alpha$  移相范围是  $0^\circ \sim 150^\circ$ ;

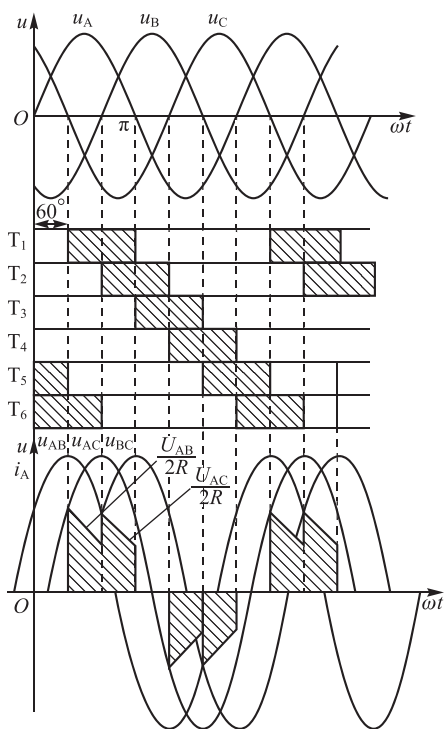
⑥输出谐波含量低,无 3 次谐波分量。

(2)三相三线制交流调压电路,改变  $\alpha$ ,电路中晶闸管的导电模式如下。

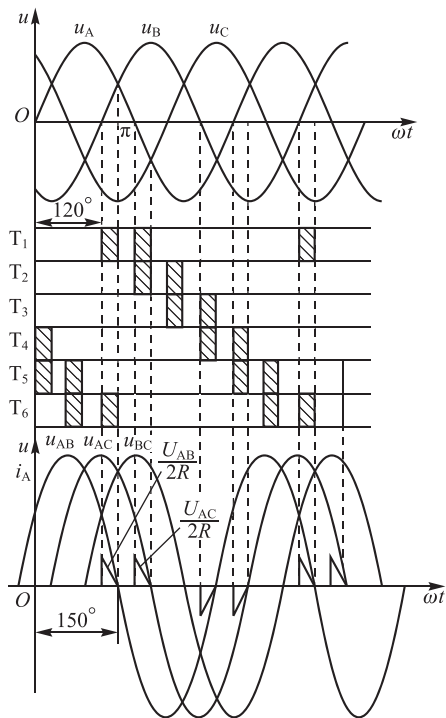
①当  $0^\circ \leq \alpha < 60^\circ$  时,三个晶闸管导通与两个晶闸管导通交替,每管导通  $180^\circ - \alpha$ ;但  $\alpha = 0^\circ$  时一直是三管导通,图 3-20(a) 所示为  $\alpha = 30^\circ$  时的负载相电压波形。



(a)  $\alpha = 30^\circ$  时的负载相电压波形



(b)  $\alpha = 60^\circ$  时的负载相电压波形



(c)  $\alpha = 120^\circ$  时的负载相电压波形

图 3-20 负载相电压波形

②当  $60^\circ \leq \alpha < 90^\circ$  时,两管导通,每管导通  $120^\circ$ 。图 3-20(b)所示为  $\alpha=60^\circ$  时的负载相电压波形。

③当  $90^\circ \leq \alpha < 150^\circ$  时,两管导通与无晶闸管导通交替,导通角为  $300^\circ - 2\alpha$ 。图 3-20(c)所示为  $\alpha=120^\circ$  时的负载相电压波形。

## 2. 三相交流调压电路接线方式及性能特点

三相交流调压电路接线方式及性能特点如表 3-8 所示。

表 3-8 三相交流调压电路接线方式及性能特点

电路名称	电路图	晶闸管 工作电压 (峰值)	晶闸管 工作电流 (峰值)	移相 范围	线路性能特点
星形带中性线的三相交流调压电路		$\sqrt{\frac{2}{3}}U_1$	$0.45I_1$	$0^\circ \sim 180^\circ$	(1) 是三个单相电路的组合。 (2) 输出电压、电流波形对称。 (3) 因有中性线,可流过谐波电流,特别是 3 次谐波电流。 (4) 适用于中小容量可接中性线的各种负载
晶闸管与负载连接成三角形的三相交流调压电路		$\sqrt{2}U_1$	$0.26I_1$	$0^\circ \sim 150^\circ$	(1) 是三个单相电路的组合。 (2) 输出电压、电流波形对称。 (3) 与星形联结比较,在同容量时,此电路可选电流小、耐压高的晶闸管。 (4) 此种接法实际应用较少
三相三线交流调压电路		$\sqrt{2}U_1$	$0.45I_1$	$0^\circ \sim 150^\circ$	(1) 负载对称且三相皆有电流时,如同三个单相电路组合。 (2) 应采用双窄脉冲或大于 $60^\circ$ 的宽脉冲触发。 (3) 不存在 3 次谐波电流。 (4) 适用于各种负载
控制负载中性点的三相交流调压电路		$\sqrt{2}U_1$	$0.68I_1$	$0^\circ \sim 210^\circ$	(1) 线路简单,成本低。 (2) 适用于三相负载星形联结,且中性点能拆开的场合。 (3) 因线间只有一个晶闸管,属于不对称控制

## 四、交流调功电路

除相位控制和斩波控制的交流电力控制电路外,还有以交流电源周波数为控制单位的交流调功电路。

交流调功电路以交流电源周波数为控制单位,对电路通断进行控制,改变通断周波数的比值来调节负载所消耗的平均功率。与调压电路相比,其电路形式完全相同,但控制方式不同。交流调功电路的直接调节对象是电路的平均输出功率,常用于电路温度控制。控制对象的时间常数很大,以周波数为单位控制;通常晶闸管导通时刻为电源电压过零的时刻,负载电压电流都是正弦波,不对电网电压电流造成通常意义的谐波污染。

当为电阻性负载时,控制周期为  $M$  倍电源周期,晶闸管在前  $N$  个周期导通,在后  $M-N$  个周期关断;负载电压和负载电流(即电源电流)的重复周期为  $M$  倍电源周期。 $M=3$ 、 $N=2$  时的电路波形如图 3-21 所示。

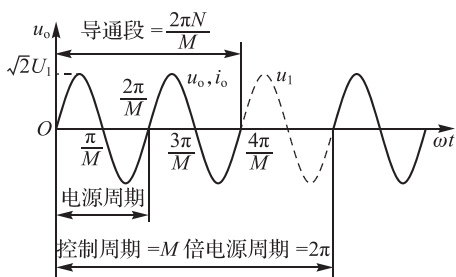


图 3-21 交流调功电路的典型波形

前述各种晶闸管可控整流电路都是采用移相触发控制。这种触发方式的主要缺点是其所产生的缺角正弦波中包含较大的高次谐波,对电力系统形成干扰。过零触发(亦称零触发)方式则可以克服这种缺点。晶闸管过零触发开关是在电源电压为零或接近零的瞬时给晶闸管以触发脉冲,使之导通,利用管子电流小于维持电流使管子自行关断。这样,晶闸管的导通角是  $2\pi$  的整数倍,不再出现缺角正弦波,因而对外界的电磁干扰最小。

利用晶闸管的过零控制可以实现交流功率调节,这种装置称为调功器或周波控制器。其控制方式有全周波连续式和全周波断续式两种,如图 3-22 所示。如果在设定周期内,将电路接通几个周波,然后断开几个周波,通过改变晶闸管在设定周期内通断时间的比例,达到调节负载两端交流电压有效值即负载功率的目的。

如在设定周期  $T_c$  内导通的周波数为  $n$ ,每个周波的周期为  $T$ (工频 50 Hz 时,  $T=20$  ms),则调功器的输出功率为

$$P = \frac{nT}{T_c} P_n$$

调功器的输出电压有效值为

$$U = \sqrt{\frac{nT}{T_c}} U_n$$

$P_n$ 、 $U_n$  为在设定周期  $T_c$  内晶闸管全导通时调功器输出的功率与电压有效值。显然,改变导通的周波数  $n$  就可改变输出电压或功率。

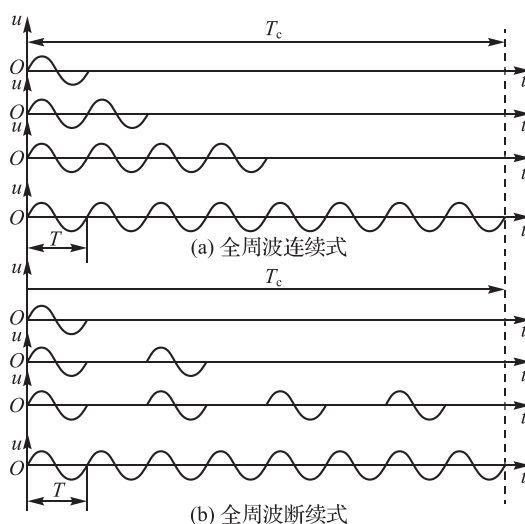


图 3-22 全周波过零触发输出电压波形

调功器可以用双向晶闸管,也可以用两只晶闸管反并联连接,其触发电路可以采用集成过零触发器,也可利用分立元件组成的过零触发电路。图 3-23 所示为全周波连续式的过零触发电路,它由锯齿波发生、信号综合、直流开关、过零脉冲输出与同步电压五个环节组成。

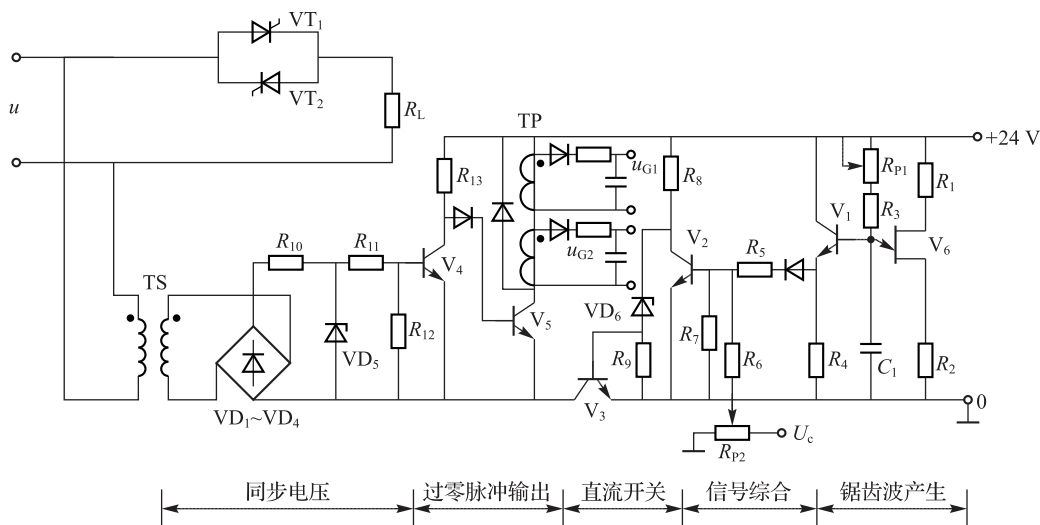


图 3-23 全周波连续式的过零触发电路

(1) 锯齿波是由单晶体管  $V_6$  和  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 、 $R_{P1}$ 、 $C_1$  组成的张弛振荡器产生的,经射极跟随器 ( $V_1$ 、 $R_4$ ) 输出,其波形如图 3-24(a) 所示。锯齿波的底宽对应着一定的时间间隔 ( $T_c$ ),调节电位器  $R_{P1}$  即可改变锯齿波的斜率。由于单晶体管的分压比一定,故电容  $C_1$  放电电压一定,斜率的减小,就意味着锯齿波底宽增大 ( $T_c$  增大),反之,底宽减小。

(2) 控制电压 ( $U_c$ ) 与锯齿波电压进行叠加后送至  $V_2$  基极,合成电压为  $u_s$ 。当  $u_s > 0$  ( $0.7\text{ V}$ ) 时,  $V_2$  导通;当  $u_s < 0$  时,  $V_2$  截止,如图 3-24(b) 所示。

(3)由  $V_2$ 、 $V_3$  及  $R_8$ 、 $R_9$ 、 $VD_6$  组成一直流开关。当  $V_2$  基极电压  $U_{be2} > 0(0.7 \text{ V})$  时,  $V_2$  导通,  $U_{be3}$  接近零电位,  $V_3$  截止, 直流开关阻断。

当  $U_{be2} < 0$  时,  $V_2$  截止, 由  $R_8$ 、 $VD_6$  和  $R_9$  组成的分压电路使  $V_3$  导通, 直流开关导通, 输出 24 V 直流电压,  $V_3$  通断时刻如图 3-24(c) 所示。  $VD_6$  为  $V_3$  基极提供一阈值电压, 使  $V_2$  导通时,  $V_3$  更可靠地截止。

(4)过零脉冲输出。由同步变压器 TS, 整流桥  $VD_1 \sim VD_4$  及  $R_{10}$ 、 $R_{11}$ 、 $VD_5$  组成一削波同步电源, 波形如图 3-24(d) 所示。它与直流开关输出电压共同控制  $V_4$  和  $V_5$ , 只有在直流开关导通期间,  $V_4$  和  $V_5$  集电极和发射极之间才有工作电压, 才能进行工作。在此期间, 同步电压每次过零时,  $V_4$  截止, 其集电极输出一正电压, 使  $V_5$  由截止转为导通, 经脉冲变压器输出触发脉冲。此脉冲使晶闸管导通, 如图 3-24(e) 所示。于是在直流开关导通期间, 便输出连续的正弦波, 如图 3-24(f) 所示。增大控制电压, 便可加长开关导通的时间, 也就增多了导通的周波数, 从而增加了输出的平均功率。

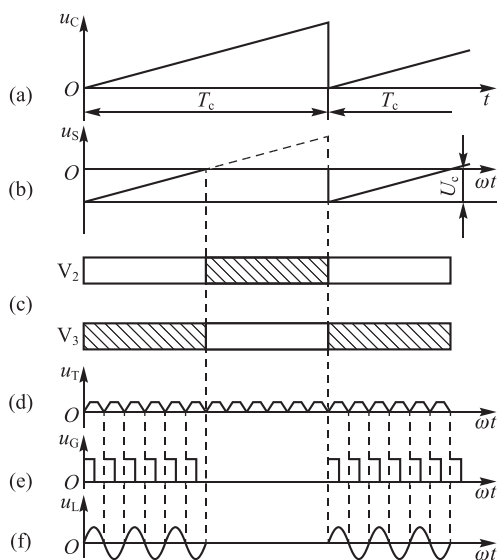


图 3-24 过零触发电路的电压波形

过零触发虽然没有移相触发高频干扰的问题, 但其通断频率比电源频率低, 特别是当通断频率比较小时, 会出现低频干扰, 使照明出现人眼能觉察到的闪烁, 以及电表指针的摇摆等。因此, 调功器通常用于热惯性较大的电热负载。

**想一想**

交流调压电路和交流调功电路有何区别?

## 五、交流电力电子开关

交流电力电子开关是将晶闸管反并联后串入交流电路代替机械开关, 起接通和断开电路的作用。其优点是响应速度快, 无触点寿命长, 可频繁控制通断; 另外, 控制晶闸管总是在电流过零时关断, 在关断时不会因负载或线路电感存储能量而造成过电压和电磁干扰, 特别适合于操作频繁、有易燃气体及多风粉尘的场合。

交流电力电子开关与交流调功电路的区别是只控制通断,而并不控制电路的平均输出功率,没有明确的控制周期,只是根据需要控制电路的接通和断开,控制频率通常比交流调功电路低得多。

### 1. 晶闸管交流开关的基本形式

晶闸管交流开关是以其门极中毫安级的触发电流,来控制其阳极中几安至几百安大电流通断的装置。在电源电压为正半周时,晶闸管承受正向电压并触发导通;在电源电压过零或为负时,晶闸管承受反向电压,在电流过零时自然关断。由于晶闸管总是在电流过零时关断,因而在关断时不会因负载或线路中电感储能而造成暂态过电压。

图 3-25 所示为晶闸管交流开关的基本形式。图 3-25(a)是普通晶闸管反并联形式。当开关 S 闭合时,两只晶闸管均以管子本身的阳极电压作为触发电压进行触发,这种触发属于强触发,对要求大触发电流的晶闸管也能可靠触发。随着交流电源的正负交变,两管轮流导通,在负载上得到基本为正弦波的电压。图 3-25(b)为双向晶闸管交流开关,双向晶闸管工作于 I +、III - 触发方式,这种线路比较简单,但其工作频率低于反并联电路。图 3-25(c)为带整流桥的晶闸管交流开关。该电路只用一只普通晶闸管,且晶闸管不受反压。其缺点是串联元件多,压降损耗较大。

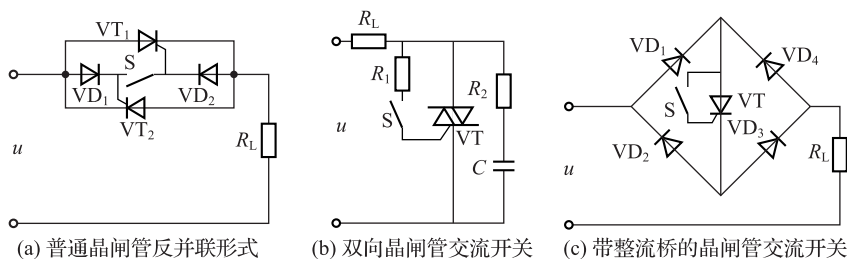


图 3-25 晶闸管交流开关的基本形式

图 3-26 是三相自动控温电热炉电路,它采用双向晶闸管作为功率开关,与 KT 温控仪(调节式毫伏温度计)配合,实现三相电热炉的温度自动控制。控制开关 S 有三个挡位:自动、手动、停止。当 S 拨至“手动”位置时,中间继电器 KA 得电,主电路中三个本相强触发电路工作,VT<sub>1</sub>~VT<sub>3</sub> 导通,电路一直处于加热状态,须由人工控制 SB 按钮来调节温度。当 S 拨至“自动”位置时,KT 温控仪自动控制晶闸管的通断,使炉温自动保持在设定温度上。若炉温低于设定温度,KT 温控仪使常开触点 KT 闭合,晶闸管 VT<sub>4</sub> 被触发,KA 得电,使 VT<sub>1</sub>~VT<sub>3</sub> 导通,RL 发热使炉温升高。炉温升至设定温度时,温控仪控制触点 KT 断开,KA 失电,VT<sub>1</sub>~VT<sub>3</sub> 关断,停止加热。待炉温降至设定温度以下时,再次加热。如此反复,则炉温被控制在设定温度附近的小范围内。由于继电器线圈 KA 导通电流不大,故 VT<sub>4</sub> 采用小容量的双向晶闸管即可。各双向晶闸管的门极限流电阻(R<sub>1</sub><sup>\*</sup>、R<sub>2</sub><sup>\*</sup>)可由实验确定,其值以使双向晶闸管两端交流电压减到 2~5 V 为宜,通常为 30 Ω~3 kΩ。

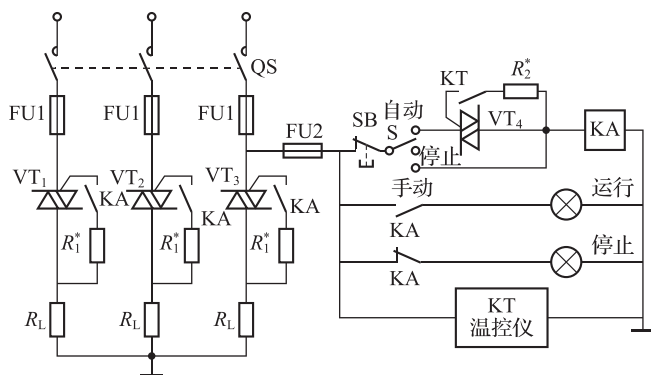


图 3-26 三相自动控温电热炉电路

## 2. 晶闸管投切电容器

晶闸管交流电力电子开关常用于交流电网中代替机械开关投切电容器。晶闸管投切电容器(thyristor switched capacitor, TSC)代替机械开关投切电容器,对电网无功进行控制,提高功率因数,稳定电网电压,改善用电质量,是一种很好的无功补偿方式。

(1)电路结构和工作原理(晶闸管反并联)。图 3-27 所示为 TSC 基本原理图。电路中两个反并联的晶闸管起着把电容并入电网或从电网断开的作用,如图 3-27(a)所示。串联电感很小,用来抑制电容器投入电网时的冲击电流。实际工作中,为避免电容器组投切造成较大电流冲击,一般把电容器分成几组,如图 3-27(b)所示,可根据电网对无功的需求而改变投入电容器的容量。实际中经常使用三相 TSC,可三角形联结,也可星形联结。

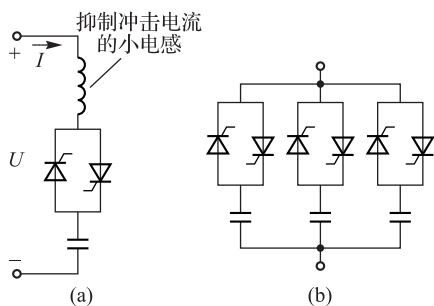


图 3-27 TSC 基本原理图

(2)晶闸管投切时间的选择。

①选择原则。投入时刻交流电源电压和电容器预充电电压相等,防止冲击电流。

②理想选择。理想情况下,希望电容器预充电电压为电源电压峰值,这时电源电压的变化率为零,电容投入过程不但没有冲击电流,电流也没有阶跃变化。图 3-28 所示为 TSC 理想投切时刻原理说明。

晶闸管和二极管反并联方式的 TSC 如图 3-29 所示。由于二极管的作用,在电路不导通时, $u_c$  总会维持在电源电压峰值;由于二极管不可控,响应速度要慢一些,投切电容器的最大时间滞后为一个周波。

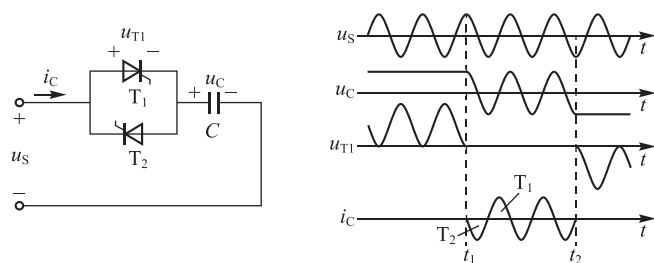


图 3-28 TSC 理想投切时刻原理说明

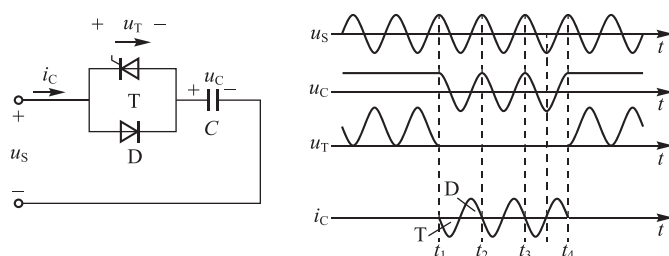


图 3-29 晶闸管和二极管反并联方式的 TSC

## 六、固态开关

固态开关也称为固态继电器或固态接触器,它是双向晶闸管为基础构成的无触点通断组件。

图 3-30(a)所示为采用光电三极管耦合器的“0”压固态开关内部电路。1、2 为输入端,相当于继电器或接触器的线圈;3、4 为输出端,相当于继电器或接触器的一对触点,与负载串联后接到交流电源上。

输入端接上控制电压,使发光二极管  $VD_2$  发光,光敏管  $V_1$  阻值减小,使原来导通的晶体管  $V_2$  截止,原来阻断的晶闸管  $VT_1$  通过  $R_4$  被触发导通。输出端交流电源通过负载、二极管  $VD_3 \sim VD_6$ 、 $VT_1$  及  $R_6$  构成通路,在电阻  $R_5$  上产生电压降,作为双向晶闸管  $VT_2$  的触发信号,使  $VT_2$  导通,负载得电。由于  $VT_2$  的导通区域处于电源电压的“0”点附近,因而具有“0”电压开关功能。

图 3-30(b)所示为光电晶闸管耦合器“0”电压开关。由输入端 1、2 输入信号,光电晶闸管耦合器 B 中的光控晶闸管导通;电流经 3— $VD_4$ —B— $VD_1$ — $R_4$ —4 构成回路;借助  $R_4$  上的电压向双向晶闸管 VT 的控制极提供分流,使 VT 导通。由  $R_3$ 、 $R_2$  与 V 组成“0”电压开关功能电路,即当电源电压过“0”并升至一定幅值时,V 导通,光控晶闸管则被关断。

图 3-30(c)所示为光电双向晶闸管耦合器非“0”电压开关。由输入端 1、2 输入信号时,光电双向晶闸管耦合器 B 导通;电流经 3— $R_2$ —B— $R_3$ —4 形成回路, $R_3$  提供双向晶闸管 VT 的触发信号。这种电路相对于输入信号的任意相位,交流电源均可同步接通,因而称为非“0”电压开关。



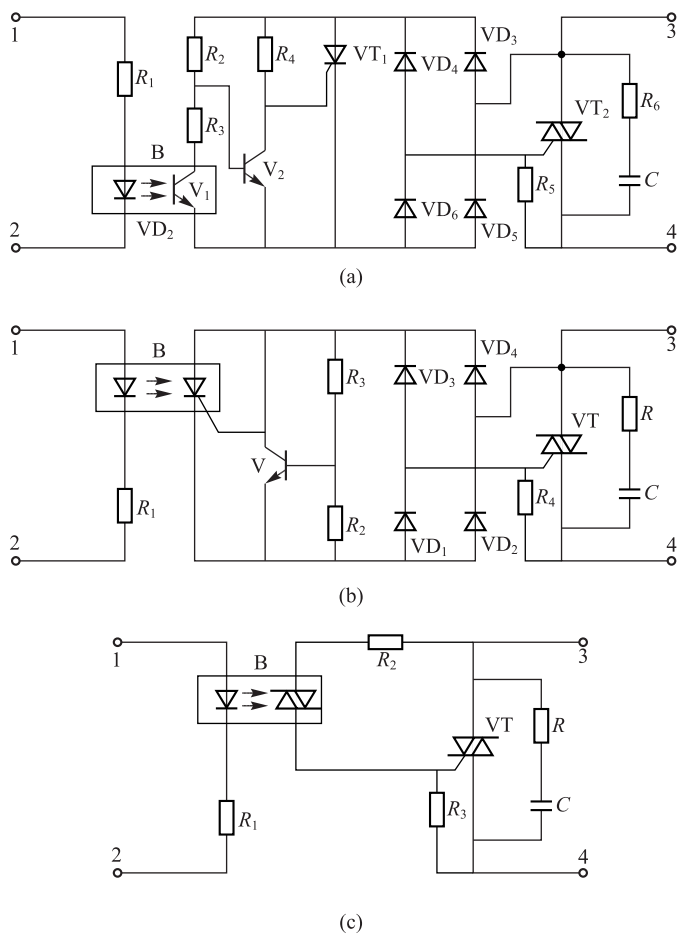


图 3-30 固态开关

实践提高

实操一 电风扇无级调速器电路制作与调试

家用电风扇的调速形式大致有以下四种。

- (1) 自耦变压器多抽头降压。
- (2) 电机绕组抽头, 一般只用于台扇。
- (3) 电容容抗降压, 大多用于吊扇。
- (4) 双向晶闸管调压, 无级调速。

做一做

查阅资料完成电风扇无级调速器电路的制作与调试。

图 3-31 所示为电风扇无级调速器电路, 该电路采用双向晶闸管作为电风扇电动机的开

关。在电源电压每个半周起始部分,双向晶闸管 VT 为阻断状态,电源电压通过电位器  $R_p$  和电阻  $R_1$  向电容  $C_1$  充电,当电容  $C_1$  上的充电电压达到双向晶闸管 VT 的触发电压时,VT 导通, $C_1$  通过  $R_2$  向 VT 的控制极放电,使 VT 导通,有电流流过电机绕组。通过调节电位器  $R_p$  阻值的大小,可调节电容  $C_1$  的充电时间常数,也就调节了双向晶闸管 VT 的控制角  $\alpha$ 。 $R_p$  越大,控制角  $\alpha$  越大,负载电动机 M 上的电压越小,转速越慢;反之,转速越快。元件参数见图 3-31。考核标准同模块一中调光灯电路考核标准。

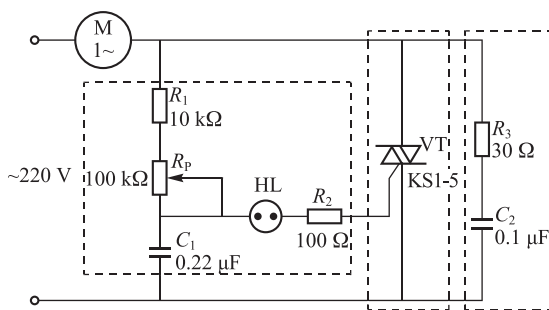


图 3-31 电风扇无级调速器电路

## 实操二 西门子 TCA785 集成触发电路调试

### 1. 实训目的

- (1) 熟悉 TCA785 集成触发电路的工作原理及电路中各元件的作用。
- (2) 掌握 TCA785 集成触发电路的调试方法。
- (3) 熟悉 TCA785 集成触发电路各主要观测点的波形测量与分析。

### 2. 实训所需挂件及附件

西门子 TCA785 集成触发电路调试所需挂件及附件如表 3-9 所示。

表 3-9 西门子 TCA785 集成触发电路调试所需挂件及附件

序号	挂件及附件	备注
1	PMT01 电源控制屏	
2	PMT-02 晶闸管主电路	
3	PMT-06 单相晶闸管触发电路	
4	双踪示波器	自备

### 3. 实训线路及原理

TCA785 是德国西门子(Siemens)公司于 1988 年前后开发的第三代晶闸管单片移相触发电集成电路。与原有的 KJ 系列或 KC 系列晶闸管移相触发电路相比,它对零点的识别更加可靠,输出脉冲的齐整度更好,而移相范围更宽,且由于它输出脉冲的宽度可人为自由调节,所以适用范围较广。西门子 TCA785 集成触发电路的引脚分布及内部框图如图 3-32 所示。

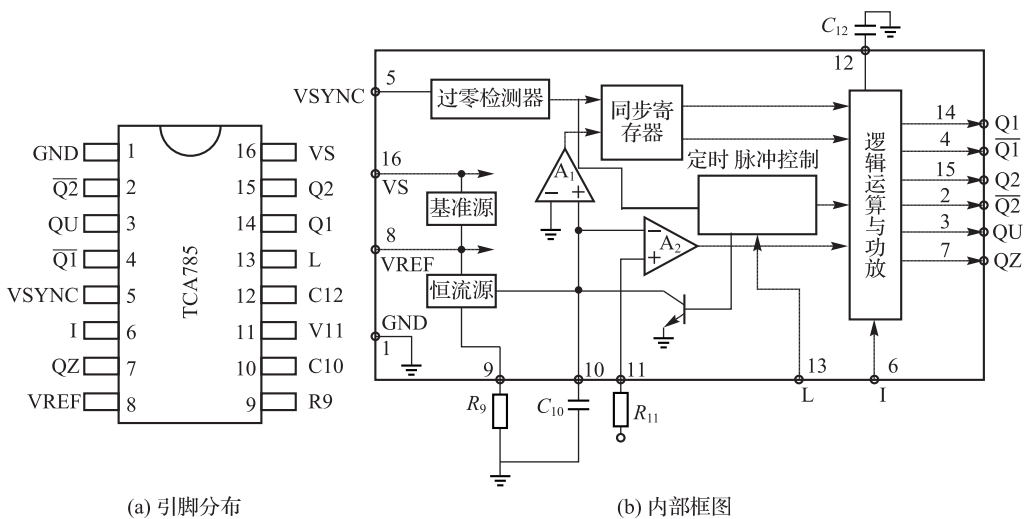


图 3-32 TCA785 集成触发电路的引脚分布及内部框图

TCA785 集成块内部主要有同步寄存器、基准电源、锯齿波形成电路、移相电压、锯齿波比较电路和逻辑控制功率放大等功能块。

同步信号从 TCA785 集成电路的第 5 脚输入，过零检测部分对同步电压信号进行检测，当检测到同步信号过零时，信号送到同步寄存器。

同步寄存器输出控制锯齿波发生电路，锯齿波的斜率大小由第 9 脚外接电阻和 10 脚外接电容决定；输出脉冲宽度由 12 脚外接电容的大小决定；14、15 脚输出对应负半周和正半周的触发脉冲，移相控制电压从 11 脚输入。其具体电路如图 3-33 所示。

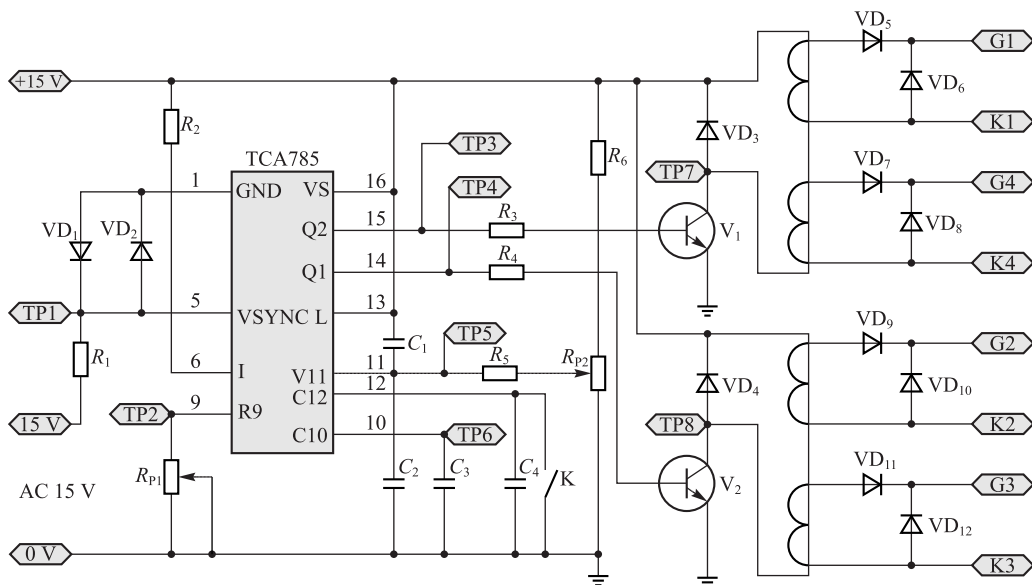


图 3-33 TCA785 集成触发电路原理图

电位器  $R_{P1}$  主要调节锯齿波的斜率, 电位器  $R_{P2}$  则调节输入的移相控制电压, 脉冲从 14、15 脚输出, 输出的脉冲恰好互差  $180^\circ$ , 可供单相整流及逆变实验用, 各点波形可参考图 3-34。电位器  $R_{P1}$ 、 $R_{P2}$  均已安装在挂箱的面板上, 同步变压器副边已在挂箱内接好, 所有的测试点都已在面板上引出。

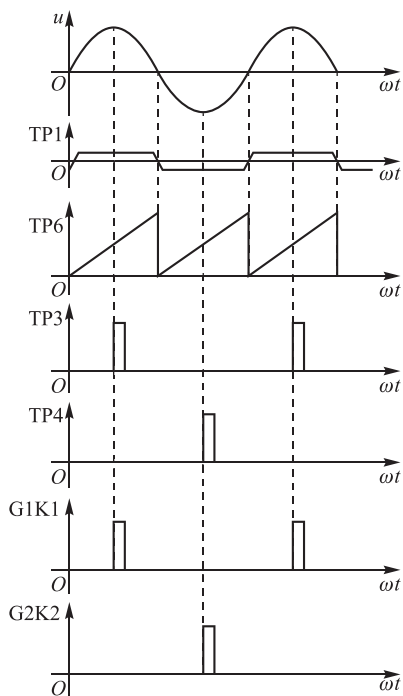


图 3-34 TCA785 集成触发电路各点电压波形 ( $\alpha=90^\circ$ )

#### 4. 实训方法

(1) 用两根导线将 PMT01 电源控制屏“主电路电源输出”的 220 V 交流电压接到 PMT-06 的“外接 220V”端, 按下“起动”按钮, 打开 PMT-06 电源开关, 这时挂件中所有的触发电路都开始工作, 用双踪示波器一路探头观测 15 V 的同步电压信号, 另一路探头观察 TCA785 触发电路同步信号和 TP1 点的波形, TP6 点为锯齿波波形。调节斜率电位器  $R_{P1}$ , 观察 TP6 点锯齿波的斜率变化, TP3 和 TP4 互差  $180^\circ$  的触发脉冲; 最后观测输出的四路触发电压波形, 其能否在  $30^\circ \sim 170^\circ$  范围内移相。

- ① 同时观察同步电压和 TP1 点的电压波形, 了解 TP1 点波形形成的原因。
- ② 观察 TP6 点的锯齿波波形, 调节电位器  $R_{P1}$ , 观测 TP6 点锯齿波斜率的变化。
- ③ 观察 TP3 和 TP4 两点输出脉冲的波形, 记下各波形的幅值与宽度。

(2) 调节触发脉冲的移相范围。调节  $R_{P2}$  电位器, 用示波器观察同步电压信号和 TP3 点电压的波形, 观察和记录触发脉冲的移相范围。

#### 5. 实训报告

- (1) 整理、描绘实验中记录的各点波形, 并标出其幅值和宽度。
- (2) 讨论、分析实验中出现的各种现象。

### 实操三 单相交流调压电路调试

#### 1. 实训目的

- (1) 理解单相交流调压电路的工作原理。
- (2) 加深理解单相交流调压电路带感性负载对脉冲及移相范围的要求。
- (3) 了解 TCA785 集成触发电路的原理和应用。

#### 2. 实训所需挂件及附件

单相交流调压电路调试所需挂件及附件如表 3-10 所示。

表 3-10 单相交流调压电路调试所需挂件及附件

序号	挂件及附件	备注
1	PMT01 电源控制屏	
2	PMT-02 晶闸管主电路	
3	PMT-03 三相晶闸管触发电路	
4	PWD-17 可调电阻器	
4	双踪示波器	自备
5	万用表	自备

#### 3. 实训线路及原理

本实验采用 TCA785 集成触发电路。该触发电路具有零点识别可靠,输出脉冲齐整度好,移相范围宽,且输出脉冲宽度可人为自由调节等优点。

单相交流调压器的主电路由两个反向并联的晶闸管组成,如图 3-35 所示。图中电阻  $R$  用  $450\ \Omega$  (将两个  $900\ \Omega$  并联),晶闸管则利用 PMT-02 上的  $VT_1$ 、 $VT_4$  元件,交流电压表、电流表由 PMT-02 挂件上得到,电抗器  $L_d$  从 PMT-02 上得到,用  $700\ \text{mH}$ 。

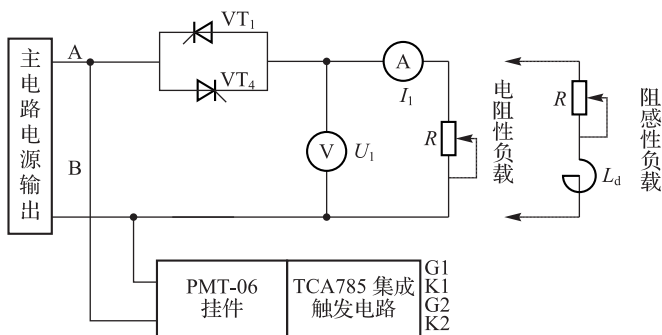


图 3-35 单相交流调压主电路原理图

#### 4. 实训方法

(1) TCA785 集成触发电路调试。用两根导线将 PMT01 电源控制屏“主电路电源输出”的  $220\ \text{V}$  交流电压接到 PMT-06 的“外接  $220\ \text{V}$ ”端,按下“起动”按钮,打开 PMT-06 电源开关,用示波器观察 TCA785 集成触发电路的各观测点及脉冲输出的波形。调节电位器  $R_{P1}$ ,

观察锯齿波斜率是否变化;调节  $R_{P2}$ , 观察输出脉冲的移相范围如何变化, 移相能否达到  $170^\circ$ 。记录上述过程中观察到的各点电压波形。

(2)带电阻性负载的单相交流调压电路的调试。将 PMT-02 面板上的两个晶闸管反向并联而构成交流调压器, 将触发器的输出脉冲端 G1、K1、G2 和 K2 分别接至主电路相应晶闸管的门极和阴极。接上电阻性负载, 用示波器观察负载电压、晶闸管两端电压  $U_{VT}$  的波形。调节 TCA785 集成触发电路上的电位器  $R_{P2}$ , 观察在不同  $\alpha$  角时各点波形的变化, 并记录  $\alpha=30^\circ、60^\circ、90^\circ、120^\circ$  时的波形。

### 5. 实训报告

(1)整理、画出实验中所记录的各类波形。

(2)分析阻感性负载时,  $\alpha$  角与  $\varphi$  角相应关系的变化对调压器工作的影响。

### 6. 注意事项

由于 G、K 输出端有电容影响, 故观察触发脉冲电压波形时, 需将输出端 G 和 K 分别接到晶闸管的门极和阴极(也可用约  $100\ \Omega$  的电阻接到 G、K 两端, 来模拟晶闸管门极与阴极的阻值), 否则无法观察到正确的脉冲波形。

## 典型案例



### 案例 基于双向晶闸管的简易的调光台灯电路

调光灯在日常生活中的应用非常广泛, 是通过调光旋钮来调光的。除模块一中讲述的方案外, 其实现方法很多, 图 3-36 所示为基于双向晶闸管的简易的调光台灯电路。

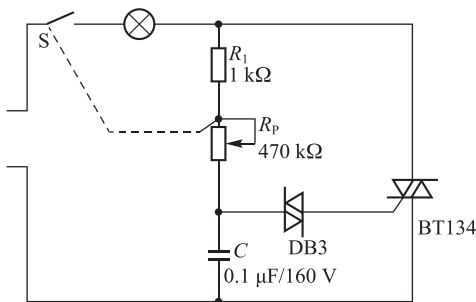


图 3-36 基于双向晶闸管的简易的调光台灯电路

此调光台灯电路是由一只双向的晶闸管组成的单相交流调压电路, 还包括由移相电容  $C$ 、移相电阻  $R_1$  和调光电位器  $R_p$  构成调光电路的移相环节及灯泡和开关。

电路的工作原理是: 接通 220 V 交流电源并闭合开关 S 后, 在交流电源的正半周作用期间, 电源经过开关、灯泡、电阻、电位器给电容  $C$  充电; 当电容  $C$  上充电的电压未达到双向触发二极管的转折电压 (30 V) 时, 双向二极管截止, 双向晶闸管因未得到触发而不导通, 灯泡不亮。当电容不断充电, 电容上的电压达到双向二极管的转折电压时, 二极管导通, 此时电容放电来触发双向晶闸管导通, 灯泡点亮。

当交流电由正半周过零进入负半周时,双向晶闸管电流为零截止。负半周电容进入反向充电,当电容上的反向电压未达到二极管的反向转折电压时,二极管截止,双向晶闸管因为得到触发而不导通,灯泡不亮。当电容上的反向电压达到二极管的反向转折电压时,二极管两端的电压急剧下降,电容反向放电触发双向晶闸管,使得双向晶闸管导通,灯泡又被点亮。可见,调节  $R_p$  的大小将改变电源电压对电容的充电时间,从而改变电容端达到双向晶闸管所需要的触发电平的时间,即改变了双向晶闸管的控制角  $\alpha$  的大小,达到了交流调压的目的。

### 巩固与提高

3-1 双向晶闸管额定电流的定义和普通晶闸管额定电流的定义有何不同? 额定电流为 100 A 的两只普通晶闸管反并联可以用额定电流为多少的双向晶闸管代替?

3-2 双向晶闸管有哪几种触发方式? 一般选用哪几种? 试说明图 3-37 所示电路的原理,指出双向晶闸管的触发方式。

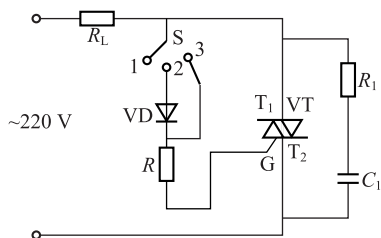


图 3-37 题 3-2 图

3-3 晶闸管相控整流电路和晶闸管交流调压电路在控制上有何区别?

3-4 在交流调压电路中,采用相位控制和通断控制各有何优缺点? 为什么通断控制适用于大惯性负载? 交流调压和交流调功电路有何区别?

3-5 单相交流调压电路,负载阻抗角为  $30^\circ$ ,求控制角  $\alpha$  的有效移相范围。

3-6 单相交流调压主电路中,对于阻感性负载,为什么晶闸管的触发脉冲要用宽脉冲或脉冲列?

3-7 一台 220 V/10 kW 的电炉,采用单相交流调压电路,现使其工作在功率为 5 kW 的电路中,试求电路的控制角  $\alpha$ 、工作电流及电源侧功率因数。

3-8 图 3-38 所示单相交流调压电路,  $U_2 = 220\text{ V}$ ,  $L = 5.516\text{ mH}$ ,  $R = 1\ \Omega$ 。

(1) 求控制角  $\alpha$  的移相范围。

(2) 求负载电流最大有效值。

(3) 求最大输出功率和功率因数。

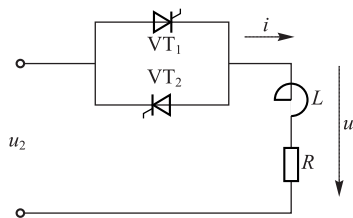


图 3-38 题 3-8 图

3-9 由双向晶闸管组成的单相调功电路采用过零触发,  $U_2=220\text{ V}$ , 负载电阻  $R=1\ \Omega$ , 在控制的设定周期  $T_c$  内, 使晶闸管导通  $0.3\text{ s}$ , 断开  $0.2\text{ s}$ 。

- (1) 求输出电压的有效值。
- (2) 求负载上所得平均功率与假定晶闸管一直导通时的输出功率。
- (3) 选择双向晶闸管的型号。

3-10 一电阻炉由单相交流调压电路供电, 如  $\alpha=0^\circ$  时为输出功率最大值, 试求功率为最大值的  $60\%$  和  $85\%$  时的控制角  $\alpha$ 。

3-11 一交流单相晶闸管调压器, 用作控制从  $220\text{ V}$  交流电源送至电阻为  $0.5\ \Omega$ , 感抗为  $0.5\ \Omega$  的串联负载电路的功率。

- (1) 求控制角范围。
- (2) 求负载电流的最大有效值。

3-12 单相交流调压电路电阻性负载的功率因数为  $1$  吗? 为什么?

3-13 交流调压电路如图 3-39 所示。  $u_1 = 220\sqrt{2}\sin 314t\text{ V}$ ,  $R=12\ \Omega$ ,  $L=0.06\text{ H}$ , 求控制角  $\alpha$  的变化范围。设  $\alpha=80^\circ$  时导通角为  $140^\circ$ , 求输出电压有效值, 画出  $u_o$  波形。

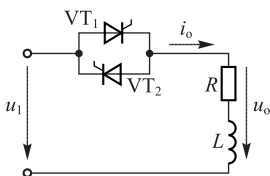


图 3-39 题 3-13 图