

第一章 单相可控整流电路

本章主要讲述电力电子技术的初步知识，以单相半波整流电路、单相半控桥式整流电路、单相全控桥式整流电路为主要内容，结合触发电路的安装调试，辅以应用实例对单相可控整流电路进行介绍。让学生对电力电子应用中最常用的晶闸管单相可控整流电路有一个整体的认识，并结合维修电工中级工技能鉴定，对技能中的知识点、技能实训中的电路安装、调试过程做一个整体的阐述，为学生参加维修电工中级技能鉴定打下坚实的基础。



第一节 单相半波可控整流电路

学习目标

1. 理解单相半波晶闸管调光电路图及单结晶体管触发电路图
2. 了解晶闸管、单结晶体管的性能、工作原理及使用方法
3. 掌握单相半波晶闸管调光电路工作原理与单结晶体管触发电路控制原理

导入

观察日常使用的调光台灯会发现，其输入的是交流 220V 的电压，而输出光的亮度可以进行调节，如图 1-1 所示。调光灯是由什么元件构成的？它又是如何将灯的亮度进行调节的呢？本节将从最简单的调光电路开始分析讲解。



图 1-1 调光台灯

知识准备

一、晶闸管

1. 晶闸管外形与结构

晶闸管又称为可控硅，是一种由硅单晶材料制成的大功率半导体变流器件，简称

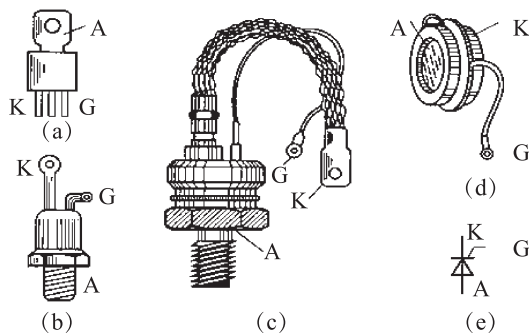


图 1-2 常见晶闸管实物图

(a) 塑封型 (b) (c) 螺栓型
(d) 平板型 (e) 图形符号

SCR。晶闸管的实物如图 1-2 (a) ~ (d) 所示, 各管脚名称标于图中, 分别为: 阳极 A、阴极 K、具有控制作用的控制极 G。图 1-2 (e) 所示为晶闸管的图形符号。

由于普通晶闸管电流容量大, 耐压高以及开通的可控性 (目前生产水平: 4 500A/8 000V) 已被广泛应用于相控整流、逆变、交流调压、直流变换等领域, 成为特大功率低频 (200Hz 以下) 装置中的主要器件。

晶闸管的结构如图 1-3 所示, 它具有四层半导体三个 PN 结。由最外层的 P_1 层和 N_2 层引出两个电极, 分别为阳极 A 和阴极 K, 由中间 P_2 层引出的电极是门极 G (也称控制极)。

2. 晶闸管导通与关断的条件

如图 1-4 所示晶闸管电路, 在晶闸管阳极和阴极之间所加的电压称为阳极电压 U_a , 流过晶闸管阳极的电流称为阳极电流 I_a , 在晶闸管门极与阴极之间所加电压称为门极触发电压 U_g ; 流过晶闸管门极的电流称为门极触发电流 I_g , HL 是导通指示灯。

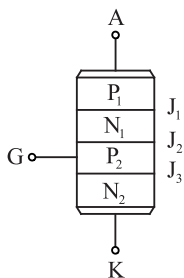


图 1-3 晶闸管的结构

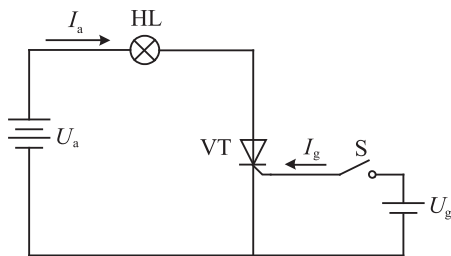


图 1-4 晶闸管电路

当晶闸管承受反向阳极电压时, 无论门极是否有正向触发电压或者承受反向电压, 晶闸管不导通, 只有很小的反向漏电流流过管子, 这种状态称为反向阻断状态。当晶闸管承受正向阳极电压时, 门极加上反向电压或者不加电压, 晶闸管仍然不导通, 这种状态称为正向阻断状态, 这是二极管所不具备的。

当晶闸管承受正向阳极电压, 且门极加上正向触发电压时, 晶闸管导通, 这种状态称为正向导通状态。这就是晶闸管流特性, 即可控特性。晶闸管一旦导通后维持阳极电压不变, 将触发电压拆除后, 晶闸管依然处于导通状态, 即门极对管子不再具有控制作用, 图 1-4 中 S 为门极控制开关。



3. 晶闸管的选型

1) 晶闸管额定电压 U_{Tn} 的确定

在晶闸管的铭牌上，额定电压是以电压等级的形式给出的，通常标准电压等级规定为：电压在 1 000V 以下，每 100V 为一级，1 000V ~ 3 000V，每 200V 为一级，用百位数或千位和百位数表示级数。电压等级如表 1-1 所示。

表 1-1 晶闸管标准电压等级

级 别	正反向重复峰值电压/V	级 别	正反向重复峰值电压/V	级 别	正反向重复峰值电压/V
1	100	8	800	20	2 000
2	200	9	900	22	2 200
3	300	10	1 000	24	2 400
4	400	12	1 200	26	2 600
5	500	14	1 400	28	2 800
6	600	16	1 600	30	3 000
7	700	18	1 800		

在使用过程中，环境温度的变化、散热条件以及出现的各种过电压都会对晶闸管产生影响，因此在选择管子的时候，应当使晶闸管的额定电压是实际工作时可能承受的最大电压的 2 ~ 3 倍，即

$$U_{Tn} \geq (2 \sim 3)U_{TM}$$

2) 晶闸管额定电流 $I_{T(AV)}$ 的确定

由于整流设备的输出端所接负载常用平均电流来表示，晶闸管额定电流的标定与其他电器设备不同，采用的是平均电流，而不是有效值，因此又称为额定通态平均电流 $I_{T(AV)}$ 。但是管子的发热又与流过管子的有效值 I_T 有关，两者的关系为

$$I_T = 1.57I_{T(AV)}$$

晶闸管在实际选择时，其额定电流的确定一般按以下原则：管子的额定电流大于其所在电路中可能流过的最大电流的有效值，同时取 1.5 ~ 2 倍的余量，即

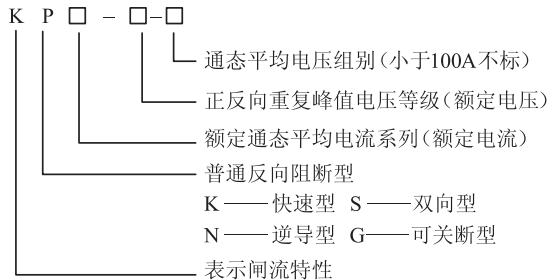
$$1.57I_{T(AV)} = I_T \geq (1.5 \sim 2)I_{Tm}$$

所以

$$I_{T(AV)} \geq (1.5 \sim 2) \frac{I_{Tm}}{1.57}$$

3) 晶闸管的型号

普通晶闸管的型号及含义如下：





二、单相半波可控整流主电路分析

单相半波可控整流调光灯电路实际上就是负载为阻性的单相半波可控整流电路,通过对电路的输出波形 u_d 和晶闸管两端电压 u_{VT} 波形的分析来判断电路工作是否正常,这是调试及维修过程中非常重要的方法。现在假设触发电路正常工作,对电路工作情况分析如下。

图 1-5 所示为单相半波可控整流调光灯主电路,当接通电源后,便可在负载两端得到脉动的直流电压,其输出电压的波形可以用示波器进行测量,分析如下:

在单相整流电路中,把晶闸管从承受正向阳极电压起到接受触发脉冲触发而导通之间的电角度 α 称为控制角,亦称为触发延迟角或移相角。

晶闸管在一个周期内导通时间对应的电角度用 θ 表示,称为导通角,且 $\theta = \pi - \alpha$ 。

改变晶闸管的触发时刻,即控制角 α 的大小即可改变输出电压的波形,图 1-6 (a) 为 $\alpha = 30^\circ$ 的输出电压的理论波形。在 $\alpha = 30^\circ$ 时,晶闸管承受正向电压,此时加入触发脉冲,晶闸管导通,负载上得到输出电压 u_d 的波形与电源电压 u_2 的波形相同;同样当电源电压 u_2 过零时,晶闸管承受反向电压关断,负载上得到的输出电压 u_d 为零;从电源电压过零点到 $\alpha = 30^\circ$ 之间的区间上,虽然晶闸管已经承受正向电压,但由于没有触发脉冲,晶闸管依然处于截止状态。

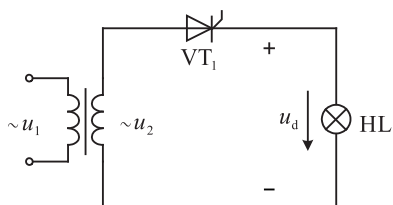


图 1-5 单相半波可控整流调光灯主电路

想一想

晶闸管导通时,晶闸管承受的电压是多少?晶闸管关断时,晶闸管承受的电压是多少?

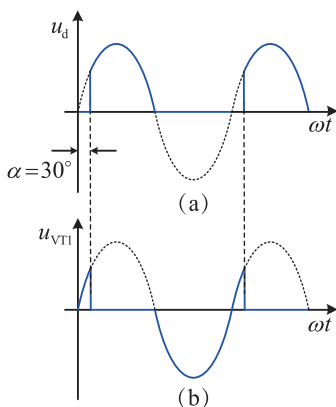


图 1-6 $\alpha = 30^\circ$ 时输出电压 u_d 和晶闸管 VT_1 两端电压的理论波形

(a) 输出电压 u_d 的理论波形 (b) 晶闸管 VT_1 两端电压的理论波形



图 1-6 (b) 为 $\alpha = 30^\circ$ 时晶闸管两端的理论波形图。在晶闸管导通期间，忽略晶闸管的管压降, $u_{VT1} = 0$, 在晶闸管截止期间，管子将承受全部反向电压。

三、不同控制角 α 下的电路工作波形分析

继续改变触发脉冲的加入时刻，可以分别得到控制角 α 为 60° 、 90° 时输出电压和管子两端电压的波形，如图 1-7、图 1-8 所示。其原理由学生自行分析。

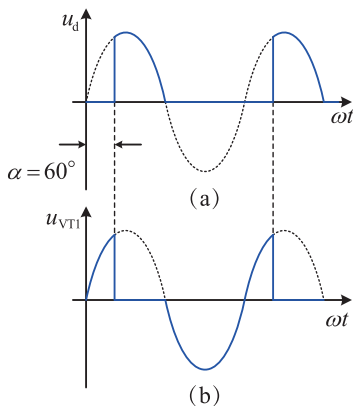


图 1-7 $\alpha = 60^\circ$ 时输出电压 u_d 和晶闸管 VT_1 两端电压的理论波形
(a) 输出电压 u_d 的理论波形 (b) 晶闸管 VT_1 两端电压的理论波形

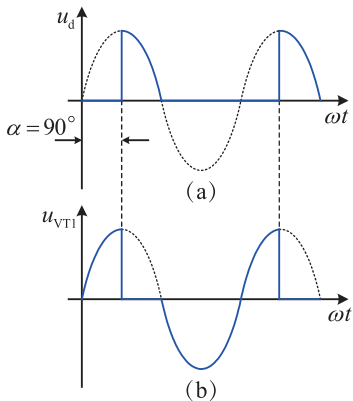


图 1-8 $\alpha = 90^\circ$ 时输出电压 u_d 和晶闸管 VT_1 两端电压的理论波形
(a) 输出电压 u_d 的理论波形 (b) 晶闸管 VT_1 两端电压的理论波形

这里必须指出的是：只有触发脉冲在晶闸管阳极电压为正的区间内出现，电路中晶闸管才能够被触发导通。因此必须根据被触发晶闸管的阳极电位，提供相应的触发电路的同步信号电压，以确保晶闸管需要脉冲的时刻触发电路能够准确送出脉冲。这种准确选择同步信号电压相位以及得到不同相位同步信号电压的方法，称为晶闸管装置的同步或定相。

触发电路与主电路是分别接在同一变压器的两套次级绕组上的，这就保证了触发电路的输入信号电压经桥式整流和稳压削波后得到的同步梯形波电压与晶闸管阳极电压的



过零点一致, 这样能够保证在每半周的开始, 电容从零开始充电, 触发电路每半周送出的第一个脉冲距离过零点的时刻即控制角 α 的大小是相同的, 起到同步的作用, 其主电路与触发电路的相位对应关系如图 1-9 所示。

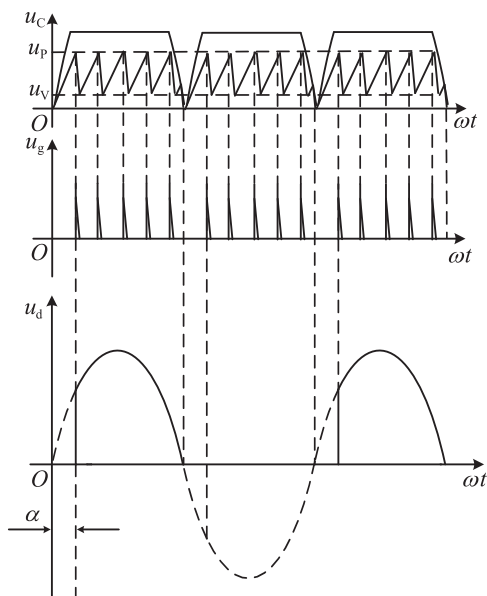


图 1-9 主电路与触发电路的相位对应关系

由以上的分析可以得出:

(1) 在单相半波整流电路中, 改变 α 大小即改变触发脉冲在每周期内出现的时刻, 则 u_d 和 i_d 的波形也随之改变, 但是直流输出电压瞬时值 u_d 的极性不变, 其波形只在 u_2 的正半周出现, 这种通过对触发脉冲的控制, 来实现改变直流输出电压大小的控制方式称为相位控制方式, 简称相控方式。

(2) 移相范围 $0^\circ \sim 180^\circ$ 。

(3) 单相半波可控整流带电阻性负载电路参数的计算如下:

① 当变压器次级电压有效值为 U_2 时, 输出电压 U_d 平均值的计算公式为

$$U_d = 0.45 U_2 \frac{1 + \cos\alpha}{2}$$

② 当电路中负载为 R_d 时, 负载电流平均值 I_d 的计算公式为

$$I_d = \frac{U_d}{R_d} = 0.45 \frac{U_2}{R_d} \frac{1 + \cos\alpha}{2}$$

负载电流有效值的计算公式为

$$I = \frac{U_2}{R_d} \sqrt{\frac{1}{4\pi} \sin 2\alpha + \frac{\pi - \alpha}{2\pi}}$$

③ 晶闸管可能承受的最大电压 U_{TM} 为

$$U_{TM} = \sqrt{2} U_2$$



四、单晶体管触发电路

1. 单晶体管

单晶体管又称为双基极二极管，它具有一个 PN 结，内部结构如图 1-10 (a) 所示，等效电路如图 1-10 (b) 所示，其三个引脚分别为发射极 e、第一基极 b₁、第二基极 b₂。

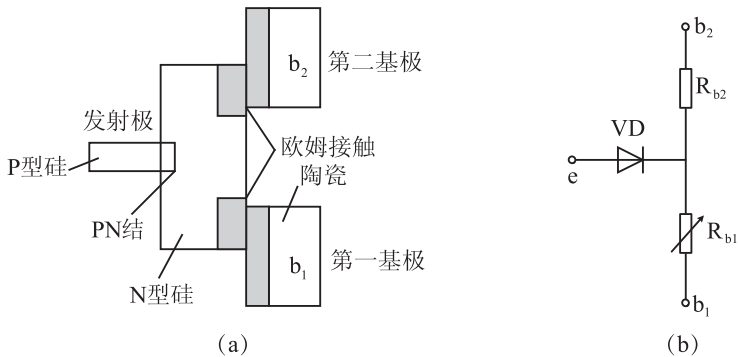


图 1-10 单晶体管的内部结构与等效电路

(a) 单晶体管的内部结构 (b) 单晶体管的等效电路

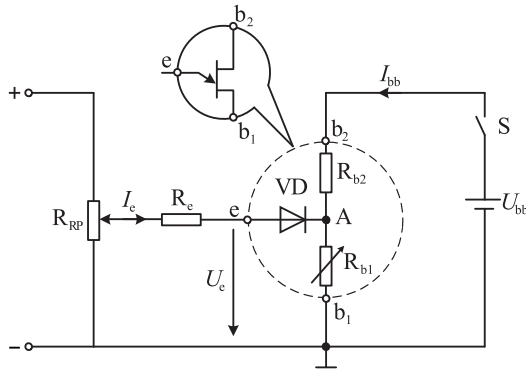


图 1-11 单晶体管实验电路

将单晶体管接成如图 1-11 所示试验电路，开关 S 接通时，两个基极之间的电压为 U_{bb} ，管子内部 A 点电位为

$$U_A = \frac{R_{b1}}{R_{b1} + R_{b2}} U_{bb} = \eta U_{bb}$$

式中 η ——单晶体管的分压比，由内部结构决定，通常在 0.3 ~ 0.9。

单晶体管的伏安特性曲线如图 1-12 所示。 U_e 从零开始增大，当 $U_e < U_A$ 时，二极管 VD 反偏，只有很小的反向漏电流， I_e 为负值，如图 1-12 中 ab 段曲线。

当 U_e 增大到与 U_A 相等时，二极管 VD 零偏， I_e 为零，如图 1-12 中的 b 点。

当 $U_A < U_e < U_A + U_D$ ，即 $U_A < U_e < U_A + 0.7V$ 时，二极管 VD 开始正偏，但未完全导通， I_e 大于零，但数值很小。

当 $U_e > U_A + U_D$ ，即 $U_e > U_A + 0.7V$ 时，二极管 I_e 流入发射极，由于发射极 P 区的空穴不断注入 N 区，使 N 区 R_{b1} 段中的载流子增加， R_{b1} 阻值减小，导致 U_A 值下降，

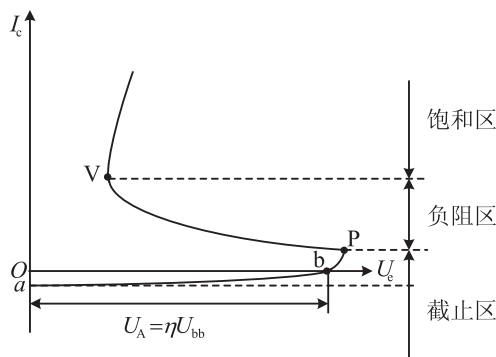


图 1-12 单结晶体管的伏安特性曲线

使 I_e 进一步增大。 I_e 增大使 R_{bi} 进一步减小，因此在元件内部形成强烈正反馈，使单结晶体管瞬时导通。当 R_{bi} 值的下降超过 I_e 的增大时，从元件 e 、 b_1 端观察， U_e 随 I_e 增加反而减小，即动态电阻 $\Delta R_{cb1} = \frac{\Delta U_e}{\Delta I_e}$ 为负值，这就是单结晶体管所特有的负阻特性。

当 U_e 增大到 $U_p = U_A + U_D$ (称峰点电压) 时，管子进入负阻状态，当 I_e 再继续增大，注入 N 区的空穴来不及复合，剩余空穴使 R_{bi} 值增大，管子由负阻进入正阻饱和状态。 U_V 称谷点电压，是维持管子导通的最小发射电压，一旦 $U_e < U_V$ 时，管子重新截止。

利用单结晶体管的负阻特性和 RC 电路的充放电特性，可以组成单结晶体管自激振荡电路，如图 1-13 所示。

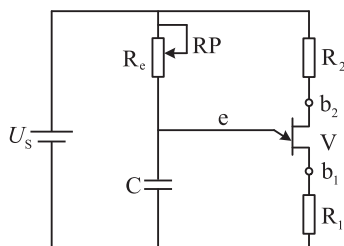


图 1-13 单结晶体管自激振荡电路

2. 触发电路各元件的选择

1) 充电电阻 R_e 的选择

改变充电电阻 R_e 的大小，就可以改变自激振荡电路的频率，但是频率的调节有一定的范围，如果充电电阻 R_e 选择不当，将使单结晶体管自激振荡电路无法形成振荡。

充电电阻 R_e 的取值范围为

$$\frac{U_s - U_V}{I_V} < R_e < \frac{U_s - U_P}{I_P}$$

式中 U_s ——加于 B-E 两端的触发电路电源电压；

U_V ——单结晶体管的谷点电压；

I_V ——单结晶体管的谷点电流；

U_P ——单结晶体管的峰点电压；

I_P ——单结晶体管的峰点电流。



2) 电阻 R_2 的选择

电阻 R_2 是用来补偿温度对峰点电压 U_p 的影响，通常取值范围为：200 ~ 600 Ω 。

3) 输出电阻 R_1 的选择

输出电阻 R_1 的大小将影响输出脉冲的宽度与幅值，通常取值范围为：50 ~ 100 Ω 。

4) 电容 C 的选择

电容 C 的大小与脉冲宽窄和 R_e 的大小有关，通常取值范围为：0.1 ~ 1 μF 。



任务实施

单相半波调光灯电路安装与调试

一、实验实训目的

1. 能判断晶闸管的好坏, 能判断单晶体管的管脚
2. 能进行单相半波晶闸管调光电路与单晶体管触发电路安装接线
3. 能使用电工电子仪表对单相半波晶闸管主电路与触发电路进行调试
4. 能对单相半波晶闸管调光电路及单晶体管触发电路进行维护

二、实验实训设备及器材

电工常用工具、电烙铁、万用表、仪器、印制电路板, 所用元器件明细表见表 1-2。

表 1-2 元件明细表

序号	符号	名称	型号与规格	件数
1	$VD_1 \sim VD_4$	二极管	1N4001	4
2	VD_z	稳压管	2CW64 (18 ~ 21V)	1
3	V	单晶体管	BT33A	1
4	VT_1	晶闸管	KP1-4	1
5	R_1	电阻	RT、2k Ω 、1W 或 1.2k Ω 、1W	1
6	R_2	电阻	RT、4.7k Ω 、1/8W	1
7	R_3	电阻	RT、510 Ω 、1/8W	1
8	R_4	电阻	RT、100 Ω 、1/8W	1
9	R_5	电阻	RT、51 Ω 、1/8W	1
10	RP	电位器	WT、100k Ω 、0.25W	1
11	C	电容器	CGZX、0.15 μ F/160V	1
12	HL	灯泡	12V	1

三、操作过程

1. 晶闸管的简单测试

在实际的使用过程中, 可用万用表对晶闸管的好坏进行简单的判断。

(1) 万用表档位放置于 $R \times 100\Omega$ 档, 将红表笔接在晶闸管的阳极, 黑表笔接在晶闸管的阴极, 万用表显示阻值应为 ∞ , 如图 1-14 所示。再将黑表笔接晶闸管的阳极,



红表笔接晶闸管的阴极，万用表显示阻值也应为 ∞ ，如图 1-15 所示。晶闸管正反相阻值均很大，其原因是：晶闸管是四层三端半导体器件，在阳极和阴极之间有三个 PN 结，无论如何加电压，总有一个 PN 结处于反向阻断状态。

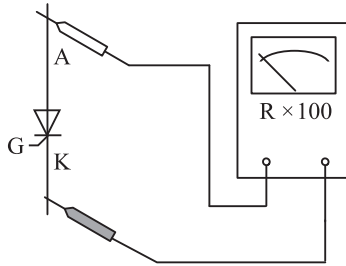


图 1-14 红表笔接阳极，黑表笔接阴极测试

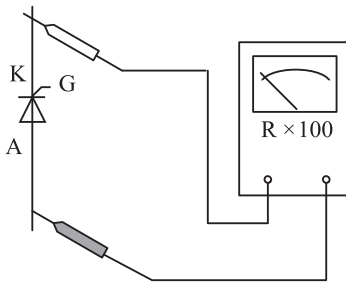


图 1-15 黑表笔接阳极，红表笔接阴极测试

(2) 将红表笔接晶闸管的控制极，黑表笔接晶闸管的阴极，测得阻值应不大，如图 1-16 所示。再将黑表笔接晶闸管的控制极，红表笔接晶闸管的阴极，测得阻值也应不大，如图 1-17 所示。

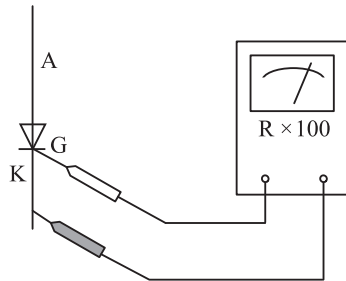


图 1-16 红表笔接控制极，黑表笔接阴极测试

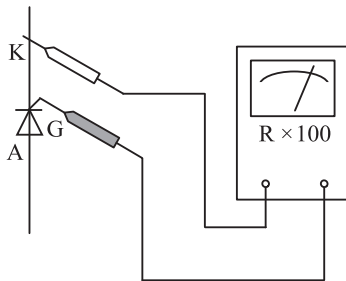


图 1-17 黑表笔接控制极，红表笔接阴极测试



2. 单晶体管外观和管脚的辨别

单晶体管实物图管脚分布如图 1-18 (a) 所示, 面对单晶体管的引脚, 从凸起处顺时针旋转, 其三个引脚分别为发射极 e、第一基极 b_1 、第二基极 b_2 。单晶体管的图形符号如图 1-18 (b) 所示。国产单晶体管的型号主要有 BT31、BT33、BT35 等。

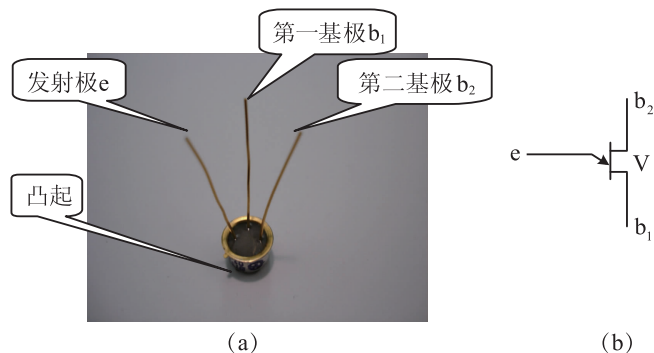


图 1-18 单晶体管外观识别与图形符号
(a) 单晶体管外观 (b) 单晶体管图形符号

采用万用表来测试管子的三个电极, 通过各管脚之间的相互关系对管子的好坏进行简单的辨别。常用的方法是万用表置于电阻 $R \times 1k$ 档, 将万用表红表笔接 e 端, 黑表笔接 b_1 端, 测量 b_1-e 两端的电阻, 如图 1-19 所示。再将万用表黑表笔接 b_2 端, 红表笔接 e 端, 测量 b_2-e 两端的电阻, 如图 1-20 所示。若单晶体管正常, 两次测量的电阻值均应较大, 通常为几十千欧。

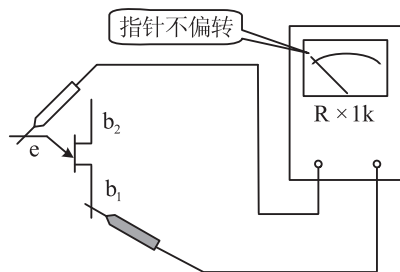


图 1-19 万用表红表笔接 e 端, 黑表笔接 b_1 端测量

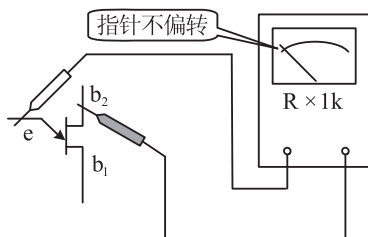


图 1-20 万用表黑表笔接 b_2 端, 红表笔接 e 端测量

将万用表黑表笔接 e 端, 红表笔接 b_1 端, 再次测量 b_1-e 两端的电阻, 如图 1-21 所示。再将万用表黑表笔接 e 端, 红表笔接 b_2 端, 再次测量 b_2-e 两端的电阻, 如图 1-22 所示。若单晶体管正常, 两次测量的电阻值均应较小, 通常为几千欧, 且 $R_{b1} > R_{b2}$ 。

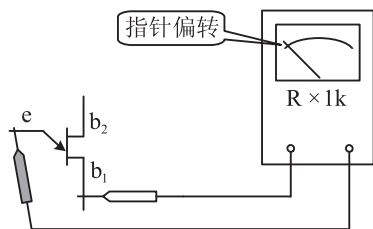


图 1-21 万用表黑表笔接 e 端，红表笔接 b₁ 端测量

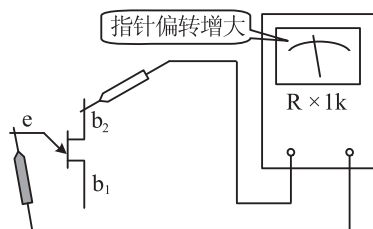


图 1-22 万用表黑表笔接 e 端，红表笔接 b₂ 端测量

将万用表红表笔接 b₁ 端，黑表笔接 b₂ 端，测量 b₁—b₂ 两端的电阻，如图 1-23 所示。再将万用表黑表笔接 b₁ 端，红表笔接 b₂ 端，再次测量 b₁—b₂ 两端的电阻，如图 1-24 所示。若单结晶体管正常，b₁—b₂ 两端的电阻 R_{bb} 应为固定值。

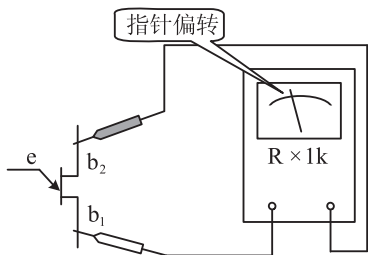


图 1-23 万用表红表笔接 b₁ 端，黑表笔接 b₂ 端测量

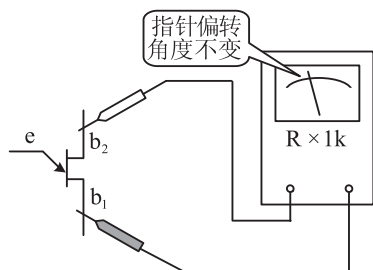


图 1-24 万用表黑表笔接 b₁ 端，红表笔接 b₂ 端测量

3. 电路的安装

调光灯在日常生活中的应用非常广泛，其种类繁多，图 1-25 (a) 是一个由晶闸管构成的单相半波可控整流调光灯实际电路板图，图 1-25 (b) 是电路原理图。

图 1-25 中电路由主电路和触发电路两部分构成，主电路为单相半波可控整流电路，其触发电路为单结晶体管触发电路。

(1) 按表 2-1 中给出的元器件的参数选择元件。

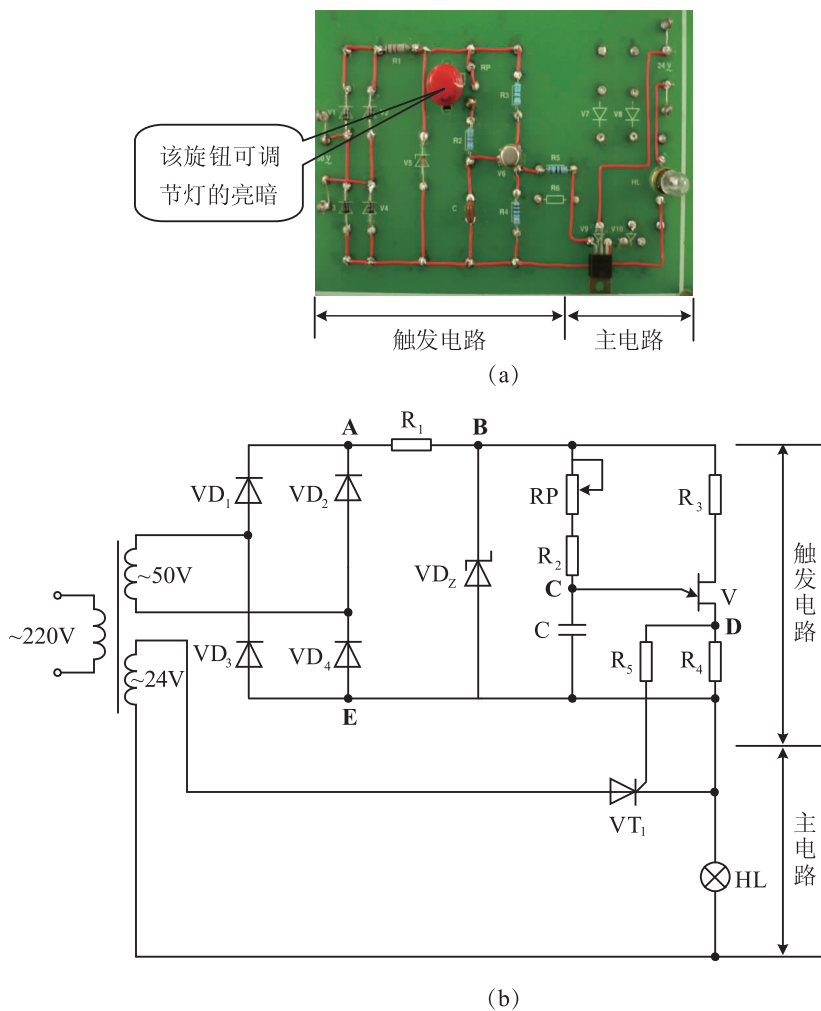


图 1-25 单相半波可控整流调光灯实际电路图与原理图

(a) 实际电路图 (b) 电路原理图

(2) 进行元件的简单测试, 确保能够正常使用后, 根据铆钉板上焊孔的距离将各元件的管脚掰成相应的形状, 按照焊接工艺的要求将各元件固定在铆钉板上。

(3) 按照焊接工艺的要求用导线进行线路的连接, 完成电路的安装。

4. 单结晶体管触发电路调试

图 1-25 (b) 上半部分所示为主电路与单结晶体管触发电路。单结晶体管触发电路的调试以及在今后的使用过程中的检修主要是通过几个点的典型波形来判断各元器件是否正常。

1) 桥式整流后脉动电压的波形 (图 1-25 (b) 中“ A ”点)

将示波器探头的测试端接于“ A ”点, 接地端接于“ E ”点, 调节旋钮“ t/div ”和“ V/div ”, 使示波器稳定显示至少一个周期的完整波形, 测得波形如图 1-26 (a) 所示, 读者可于图 1-26 (b) 中根据测量信号记录脉动电压的波形。

2) 同步电压的波形 (图 1-25 (b) 中“ B ”点)

将示波器探头的测试端接于“ B ”点, 测得 B 点的波形如图 1-27 (a) 所示。读者



可于图 1-27 (b) 中根据测量信号记录梯形波的波形。

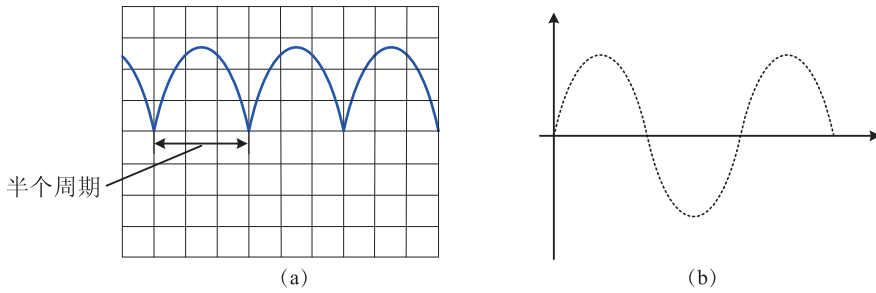


图 1-26 桥式整流后脉动电压的波形

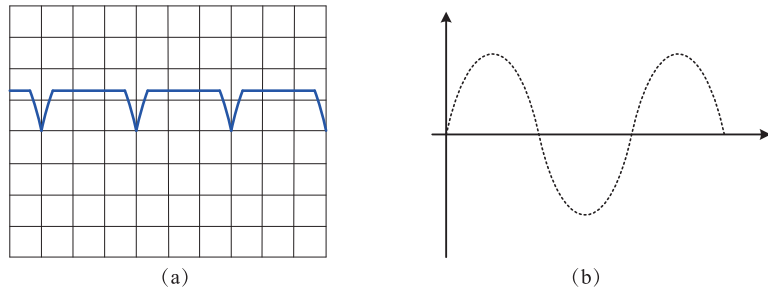


图 1-27 梯形电压的波形

3) 电容电压的波形 (图 1-25 (b) 中“C”点)

将示波器探头的测试端接于“C”点, 测得 C 点的波形如图 1-28 (a) 所示。调节电位器 RP 的旋钮, 观察 C 点波形的变化范围。读者可于图 1-28 (b) 中根据测量信号记录锯齿波的波形。

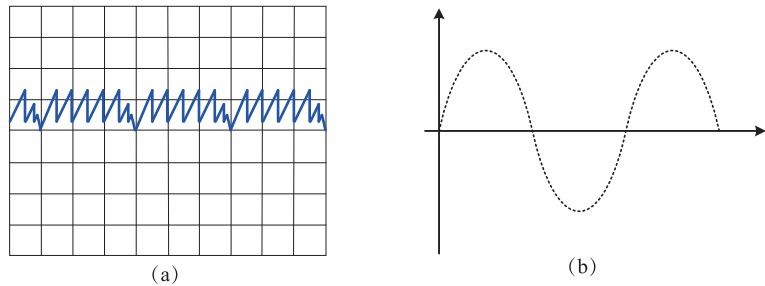


图 1-28 电容充放电形成的锯齿波

4) 输出脉冲的波形 (图 1-25 (b) 中“D”点)

将示波器探头的测试端接于“D”点, 测得 D 点的波形如图 1-29 (a) 所示。调节电位器 RP 的旋钮, 观察 D 点波形的变化范围。读者可于图 1-29 (b) 中根据测量信号记录脉冲的波形。

5) 单相半波可控整流调光电路的调试

焊接完成经检查合格后, 将主电路和触发电路的电源端按电压等级接到具有两个次级绕组的变压器上, 然后送电对各点进行相应的调试和测量。

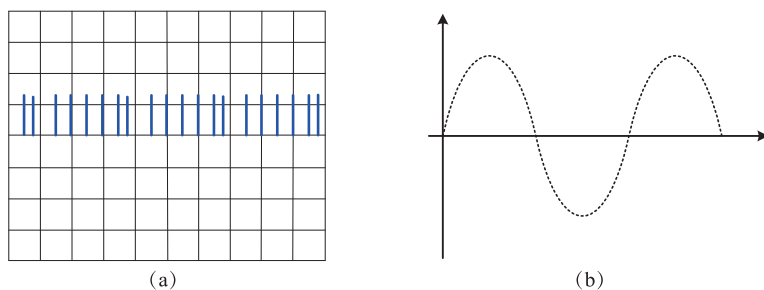


图 1-29 脉冲波形

6) 输出电压 u_d 和晶闸管两端承受的电压 u_{VT1} 波形的测量

(1) 将示波器探头接与负载两端，探头的测试端接高电位，探头的接地端接低电位，荧光屏上显示的应为单相半波可控整流调光灯 $180^\circ \sim 0^\circ$ 变化时输出电压 u_d 的波形。如图 1-30 (a) ~ 1-32 (a) 中所示为 $30^\circ \sim 90^\circ$ 输出电压波形，可对照调节，在图 1-30 (c) ~ 1-32 (c) 中根据测量信号记录不同控制角 α 时的输出电压 u_d 的波形。

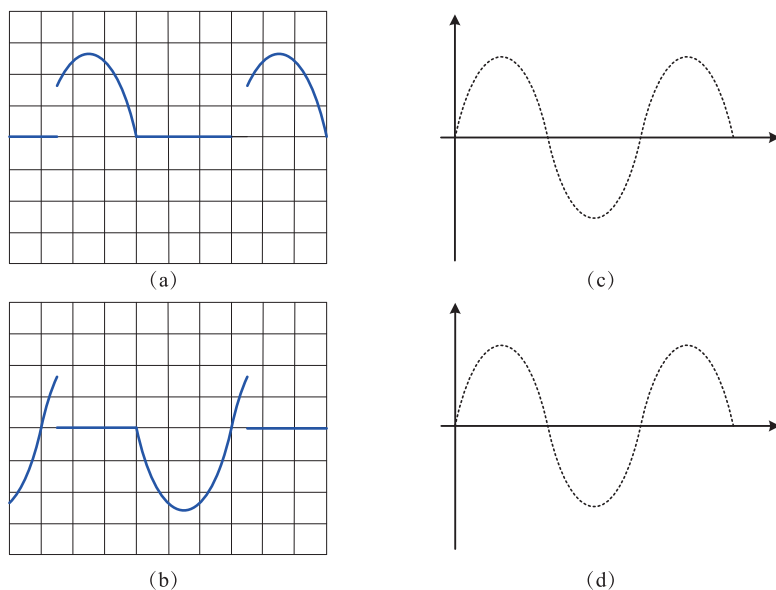
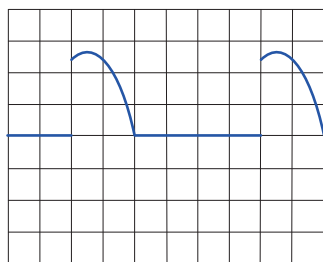


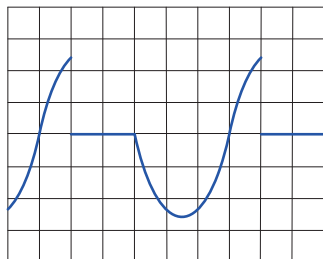
图 1-30 $\alpha = 30^\circ$ 时输出电压波形和晶闸管两端波形
 (a) $\alpha = 30^\circ$ 时输出电压波形 (b) $\alpha = 30^\circ$ 时晶闸管两端波形

(2) 调节 RP 电阻观察控制角 α 从 $180^\circ \sim 0^\circ$ 变化时输出电压 u_d 及对应的晶闸管两端承受的电压 u_{VT1} 波形。注意：在测量 u_{VT1} 时，探头的测试端接管子的阳极，接地端接管子的阴极。如图 1-30 (b) ~ 1-32 (b) 中所示为 $30^\circ \sim 90^\circ$ 晶闸管 VT_1 两端波形，可对照调节。读者可于图 1-30 (d) ~ 1-32 (d) 中根据测量信号记录不同控制角 α 时晶闸管两端承受的电压 u_{VT1} 波形。

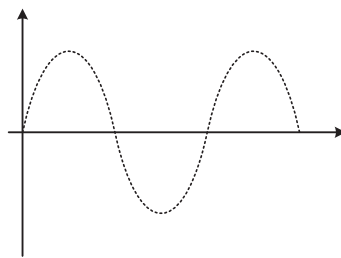
触发电路各点与主电路波形对比关系如图 1-33 (a) 所示，读者可于图 1-33 (b) 中根据测量信号记录不同控制角 α 时的各点电压波形。



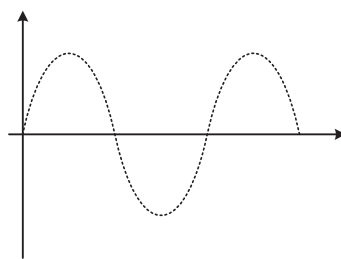
(a)



(b)



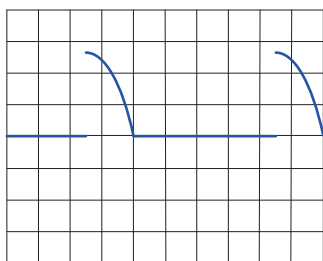
(c)



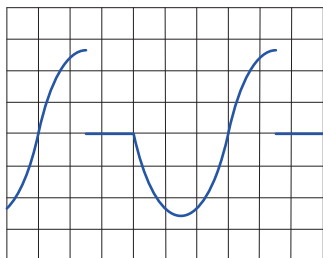
(d)

图 1-31 $\alpha = 60^\circ$ 时输出电压波形和晶闸管两端波形

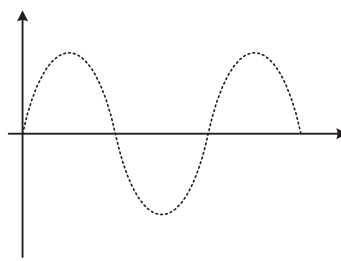
(a) $\alpha = 60^\circ$ 时输出电压波形 (b) $\alpha = 60^\circ$ 时晶闸管两端波形



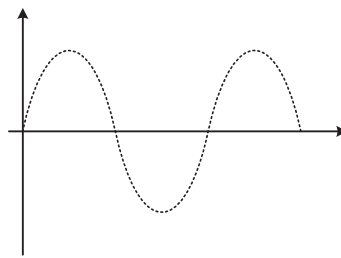
(a)



(b)



(c)



(d)

图 1-32 $\alpha = 90^\circ$ 时输出电压波形和晶闸管两端波形

(a) $\alpha = 90^\circ$ 时输出电压波形 (b) $\alpha = 90^\circ$ 时晶闸管两端波形

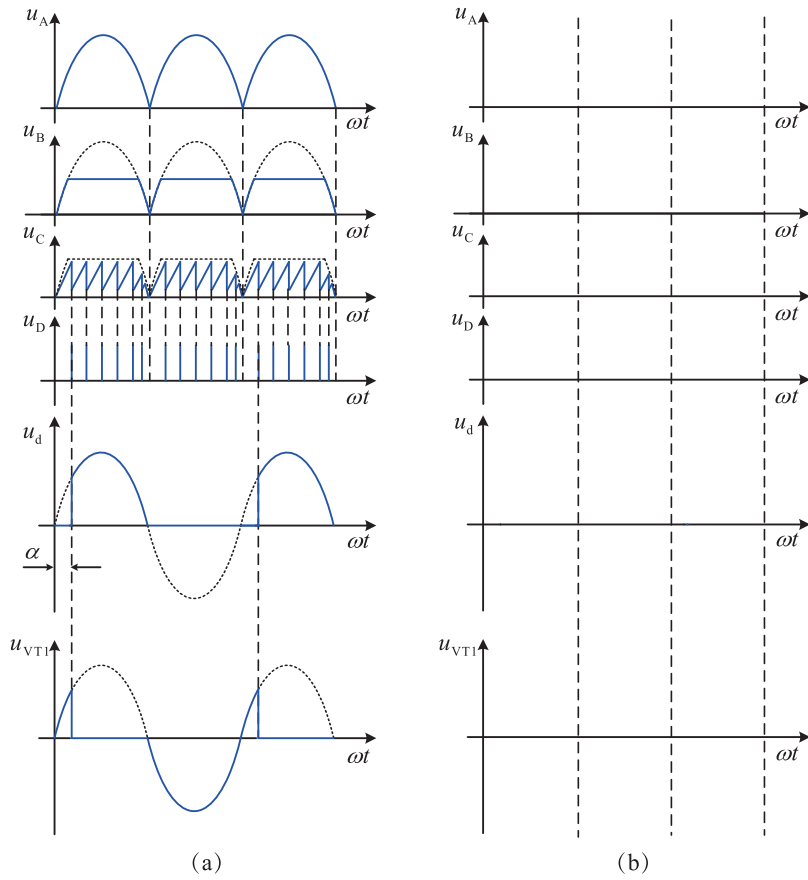


图 1-33 触发电路与主电路波形对应关系
(a) 电路各点波形 (b) 记录波形



任务评价

表 1-3 任务评价表

项目	技术要求	配 分	评 分 细 则	评分记录
元件检测	1. 检测元件方法	20 分	检测方法错, 每次扣 5 分	
	2. 元件参数选择		元件参数选择错, 每件扣 5 分	
元件安装	1. 元件安装位置	20 分	元件安装位置错, 每件扣 5 分	
	2. 元件排列要求		元件排列不整齐, 扣 5 分	
调试	1. 示波器使用	30 分	示波器使用错, 扣 10 分	
	2. 调试顺序		调试顺序错, 扣 10 分	
	3. 观察点波形		观察点波形不对, 每个扣 5 分	
原理叙述	1. 触发电路工作原理	30 分	不会叙述, 扣 6 分 叙述不全面, 扣 3~5 分	
	2. 同步的原理		不会叙述, 扣 6 分 叙述不全面, 扣 3~5 分	
安全 文明生产	1. 工具、仪表完好无损	从总分 扣 5~20 分	凡有损坏, 酌情扣 5~10 分	
	2. 安全生产文明操作		有违反安全操作者, 酌情扣 5~10 分	
工时: 定额时间 90 分钟				
备注: 对发生事故者扣 50 分				



知识拓展

晶闸管特性原理及参数

一、晶闸管的工作原理

为了进一步说明晶闸管的工作原理，可把晶闸管看成是由一个 PNP 型和一个 NPN 型晶体管连接而成的，连接形式如图 1-34 所示。阳极 A 相当于 PNP 型晶体管 V_1 的发射极，阴极 K 相当于 NPN 型晶体管 V_2 的发射极。

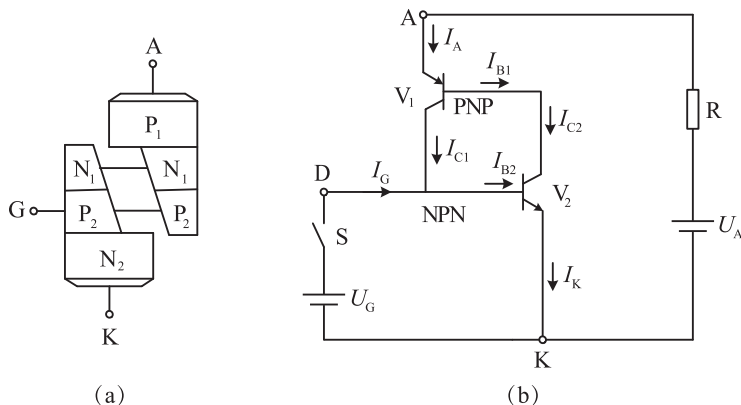


图 1-34 晶闸管工作原理等效电路

(a) 晶闸管结构分解 (b) 晶闸管等效电路

工作原理如下：当晶闸管阳极承受正向电压，控制极也加正向电压时，晶体管 V_2 处于正向偏置， U_G 产生的控制极电流 I_G 就是 V_2 的基极电流 I_{B2} ， V_2 的集电极电流 $I_{C2} = \beta_2 I_G$ 。而 I_{C2} 又是晶体管 V_1 的基极电流， V_1 的集电极电流 $I_{C1} = \beta_1 I_{C2} = \beta_1 \beta_2 I_G$ (β_1 和 β_2 分别是 V_1 和 V_2 的电流放大系数)。电流 I_{C1} 又流入 V_2 的基极，再一次放大。这样循环下去，形成了强烈的正反馈，使两个晶体管很快达到饱和导通，这就是晶闸管的导通过程。导通后，晶闸管上的压降很小，电源电压几乎全部加在负载上，晶闸管中流过的电流即负载电流。

在晶闸管导通之后，它的导通状态完全依靠管子本身的正反馈作用来维持，即使控制极电流消失，晶闸管仍将处于导通状态。因此，控制极的作用仅是触发晶闸管使其导通，导通之后，控制极就失去了控制作用。要想关断晶闸管，最根本的方法就是必须将阳极电流减小到使之不能维持正反馈的程度，也就是将晶闸管的阳极电流减小到小于维持电流。可采用的方法有：将阳极电源断开；改变晶闸管的阳极电压的方向，即在阳极和阴极间加反向电压。

二、晶闸管的伏安特性曲线

晶闸管阳极与阴极之间的电压 U_a 与阳极电流 I_a 的关系曲线称为晶闸管的阳极伏安特性，如图 1-35 所示。第一象限是正向特性、第三象限是反向特性。

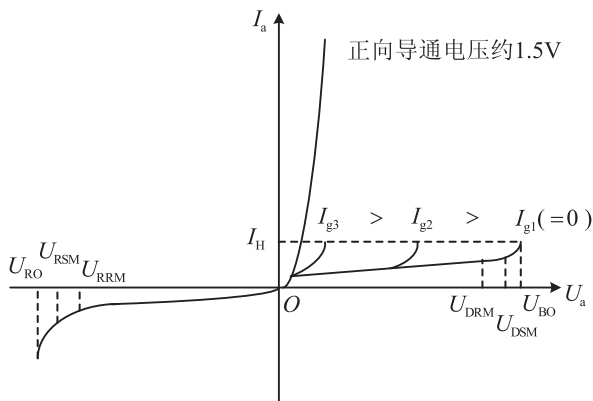


图 1-35 晶闸管阳极伏安特性曲线

图中 U_{DRM} ——正向断态重复峰值电压； U_{RRM} ——反向断态重复峰值电压；
 U_{DSM} ——正向断态不重复峰值电压； U_{RSM} ——反向断态不重复峰值电压；
 U_{BO} ——正向转折电压； U_{RO} ——反向击穿电压。

1) 晶闸管的正向特性

晶闸管的正向特性又有阻断状态和导通状态之分。在正向阻断状态时，晶闸管的伏安特性是一组随门极电流 I_g 的增加而不同的曲线簇。当 $I_g = 0$ 时，逐渐增大阳极电压 U_A ，只有很小的正向漏电流，晶闸管正向阻断；随着阳极电压的增加，当达到正向转折电压 U_{BO} 时，漏电流突然剧增，晶闸管由正向阻断突变为正向导通状态。这种在 $I_g = 0$ 时，依靠增大阳极电压而强迫晶闸管导通的方式称为“硬开通”。多次“硬开通”会使晶闸管损坏，因此通常不允许这样做，这即是晶闸管的过压。

随着门极电流 I_g 的增大，晶闸管的正向转折电压 U_{BO} 迅速下降，当 I_g 足够大时，晶闸管的正向转折电压很小，可以看成与一般二极管一样，只要加上正向阳极电压，管子就导通了。晶闸管正向导通的伏安特性与二极管的正向特性相似，即当流过较大的阳极电流时，晶闸管的压降很小。

晶闸管正向导通后，要使晶闸管恢复阻断，只有逐步减小阳极电流 I_a ，使 I_a 下降到小于维持电流 I_H （维持晶闸管导通的最小电流），则晶闸管又由正向导通状态变为正向阻断状态。

2) 晶闸管的反向特性

晶闸管上施加反向电压时，伏安特性类似二极管的反向特性。晶闸管处于反向阻断状态时，只有极小的反向漏电流流过。当反向电压超过一定限度，到反向击穿电压后，外电路如 unlimited 措施，则反向漏电流急剧增加，导致晶闸管发热损坏，这时对应的电压为反向击穿电压 U_{RO} 。

三、晶闸管的常用参数

1. 正向重复峰值电压 U_{DRM}

门极断开 ($I_g = 0$)，元件处在额定结温时，正向阳极电压为正向阻断不重复峰值



电压 U_{DSM} (此电压不可连续施加) 的 80% 所对应的电压 (此电压可重复施加, 其重复频率为 50Hz, 每次持续时间不大于 10ms)。

2. 反向重复峰值电压 U_{RRM}

元件承受反向电压时, 阳极电压为反向不重复峰值电压 U_{RSM} 的 80% 所对应的电压。

3. 通态平均电流 $I_{T(AV)}$

在环境温度小于 40°C 和标准散热及全导通的条件下, 晶闸管可以连续导通的工频正弦半波电流平均值称为通态平均电流 $I_{T(AV)}$ 或正向平均电流。

注意: 晶闸管标称的电流是指平均电流, 而非电流有效值。通常所说晶闸管是多少安就是指这个电流。

4. 维持电流 I_H

在室温且控制极开路时, 维持晶闸管继续导通的最小电流称为维持电流 I_H 。维持电流大的晶闸管容易关断。维持电流与元件容量、结温等因素有关, 同一型号的元件其维持电流也不相同。通常在晶闸管的铭牌上标明了常温下 I_H 的实测值。

5. 掣住电流 I_L

给晶闸管门极加上触发电压, 当元件刚从阻断状态转为导通状态时就撤除触发电压, 此时元件维持导通所需要的最小阳极电流称为掣住电流 I_L 。对同一晶闸管来说, 掣住电流 I_L 要比维持电流 I_H 大 2~4 倍。

6. 门极触发电流 I_{gT} 和门极触发电压 U_{gT}

室温下, 在晶闸管的阳极—阴极加上 6V 的正向阳极电压, 管子由断态转为通态所必需的最小门极电流, 称为门极触发电流 I_{gT} 。产生门极触发电流 I_{gT} 所必需的最小门极电压, 称为门极触发电压 U_{gT} 。

需要注意的是, 为了保证晶闸管的可靠导通, 常常采用实际的触发电流比规定的触发电流大 3~5 倍的、前沿陡峭的强触发脉冲。

**小 结**

1. 晶闸管是一种大功率半导体变流器件，它具有三个 PN 结、四层半导体结构，三个引出极分别为阳极 A、阴极 K 和门极（也称控制极）G。

2. 单相半波调光灯电路移相范围 $0^\circ \sim 180^\circ$ 。

3. 单相半波可控整流带电阻性负载电路参数的计算

① 输出电压平均值的计算公式

$$U_d = 0.45U_2 \frac{1 + \cos\alpha}{2}$$

② 负载电流平均值的计算公式

$$I_d = \frac{U_d}{R_d} = 0.45 \frac{U_2}{R_d} \frac{1 + \cos\alpha}{2}$$

负载电流有效值的计算公式

$$I = \frac{U_2}{R_d} \sqrt{\frac{1}{4\pi} \sin 2\alpha + \frac{\pi - \alpha}{2\pi}}$$

③ 晶闸管可能承受的最大电压为

$$U_{TM} = \sqrt{2}U_2$$

4. 利用单结晶体管的负阻特性和 RC 电路的充放电特性，可以组成单结晶体管自激振荡电路。



测试题

一、选择题

- 单结晶体管是由_____组成的。
A. NPN管 B. PNP管 C. 一个PN结 D. 一个PN结与两个基极
- 单结晶体管的两个基极 b_1 、 b_2 在使用时_____。
A. 可以交换接线 B. b_2 电位必须高于 b_1
C. b_2 电位必须低于 b_1 D. 需要查手册才能确定接法
- 单结晶体管伏安特性的负阻区是在_____。
A. 峰点与谷点之间 B. 电压大于峰点电压的区域
C. 电压小于谷点电压的区域 D. 电流大于谷点电流的区域
- 单结晶体管弛张振荡电路, 电容上的电压波形是_____。
A. 锯齿波 B. 正弦波 C. 矩形波 D. 尖脉冲
- 单结晶体管弛张振荡电路输出的电压波形是_____。
A. 锯齿波 B. 正弦波 C. 矩形波 D. 尖脉冲
- 单结晶体管触发电路中的同步电压波形是_____。
A. 锯齿波 B. 正弦波 C. 梯形波 D. 尖脉冲
- 单结晶体管触发电路中的同步电压波形是由_____产生的。
A. 整流、滤波、稳压电路 B. 整流、限幅电路
C. RC 振荡电路 D. 脉冲变压器
- 单相半波可控整流电路带电阻性负载, 在 $\alpha = 60^\circ$ 时输出电流平均值为 10A, 则晶闸管电流的有效值_____。
A. 5A B. 10A C. 15A D. 需要查波形系数才能确定
- 单相半波可控整流电路带电阻性负载, 在 $\alpha = 60^\circ$ 时输出电压平均值为_____。
A. $0.34 U_2$ B. $0.45 U_2$ C. $0.75 U_2$ D. $0.9 U_2$

二、判断题

- 某晶闸管, 若其断态重复峰值电压为 500V, 反向重复峰值电压为 700V, 则该晶闸管的额定电压是 700V。 ()
- 晶闸管导通后, 流过晶闸管的电流大小由管子本身电特性决定。 ()
- 在晶闸管的电流上升到其维持电流后, 去掉门极触发信号, 晶闸管仍能维持导通。 ()
- 晶闸管具有可以控制的单向导电性, 而且控制信号很小, 阳极回路被控制的电流可以很大。 ()
- 在规定条件下, 不论流过晶闸管的电流波形如何, 也不管晶闸管的导通角是多大, 只要通过管子的电流有效值不超过该管额定电流的有效值, 管心的发热就



- 是允许的。 ()
6. 晶闸管的正向阻断峰值电压,即在控制极断开和正向阻断条件下的电压,可以重复加于晶闸管的正向峰值电压,其值低于转折电压。 ()
7. 通过晶闸管的电流平均值,只要不超过晶闸管的额定电流值,就是符合使用要求的。 ()
8. 晶闸管关断的条件是阳极电流小于维持电流,即 $I_a < I_H$ 。 ()
9. 晶闸管的关断条件是阳极电流小于管子的擎住电流,即 $I_a < I_L$ 。 ()
10. 晶闸管的额定电流是指正弦波的有效电流值。 ()
11. 单相半波可控整流电路,其移相范围为 $0^\circ \sim 180^\circ$ 。 ()
12. 单相半波可控整流电路,带大电感负载时,必须并联续流二极管才能正常工作。 ()
13. 可控整流电路带电阻负载时,控制角越大,则电流的波形系数就越大,即电流有效值与电流平均值之比越大。 ()
14. 单结晶体管是一种特殊类型的三极管。 ()
15. 单结晶体管是一种具有负阻特性的双基极二极管。 ()
16. 单结晶体管触发电路中,发射极电阻 R_e 无论取多大都能正常工作。 ()
17. 单结晶体管触发电路中,同步电路是由同步变压器、整流桥及稳压管组成的,输出的是梯形波。 ()



第二节 单相桥式可控整流电路

学习目标

1. 能阅读单相桥式晶闸管可控整流电路图及单结晶体管触发电路图
2. 能理解单相桥式晶闸管可控整流电路工作原理
3. 能分析绘制单相桥式晶闸管可控整流电路波形
4. 能理解单结晶体管触发电路控制原理

导入

观察生产中使用的各类直流调速器，会发现其输入的是交流 220V 的电压，而输出的电机转速可以根据需要进行调节，如图 1-36 所示。这类调速装置通常称为单相直流不可逆调速器。单相直流不可逆调速器是采用调节直流电动机的电枢电压来完成调速的，但电枢电压的调节电路由什么元件构成的？它又是如何调整输出电压的呢？本节将从最典型的单相可控整流电路开始分析讲解。



图 1-36 单相直流调速器

知识准备

一、单相全控桥式整流电路主电路分析

1. 单相全控桥式整流电路电阻性负载

图 1-37 所示为单相全控桥式整流电阻性负载主电路，当接通电源后，便可在负载两端得到脉动的直流电压，其输出电压的波形可以用示波器进行测量，分析如下：

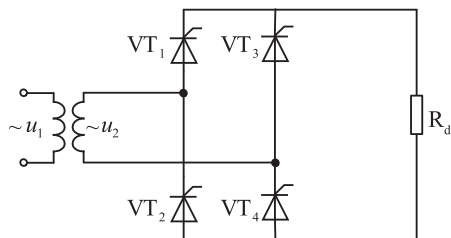


图 1-37 单相全控桥式整流电阻负载主电路

改变晶闸管的触发时刻，即控制角 α 的大小即可改变输出电压的波形，图 1-38 所示为 $\alpha = 30^\circ$ 时输出电压的理论波形。当电源电压 u_2 处于正半周时，在 ωt_1 时刻即 $\alpha = 30^\circ$ 加入触发脉冲使 VT_1 和 VT_4 同时导通，忽略晶闸管的管压降，电源电压 u_2 全部加在电阻两端，整流输出的电压波形 u_d 与电源电压 u_2 正半周的波形相同，在 ωt_2 时刻电源电压 u_2 过零时晶闸管 VT_1 和 VT_4 承受反向电压关断；当电源电压 u_2 处于负半周时，在相同的控制角 ωt_3 时刻即 $\alpha = 30^\circ$ 时触发晶闸管 VT_3 和 VT_2 同时导通，在此段时间输出电压波形仍为正向，电阻两端获得与 u_2 正半周相同的整流输出电压波形， ωt_4 时刻电源电压 u_2 过零重新变正时， VT_3 和 VT_2 承受反向电压关断。如此循环工作下去，在电阻两端得到脉动的直流输出电压如图 1-38 (a) 所示。

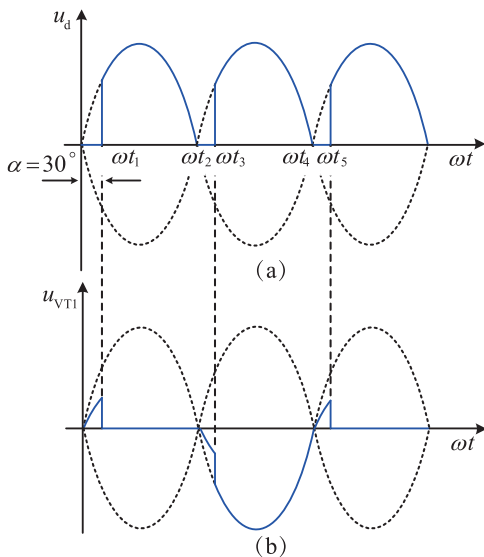


图 1-38 $\alpha = 30^\circ$ 单相全控桥电阻性负载时的理论波形
(a) 输出电压 u_d 的理论波形 (b) 晶闸管 VT_1 两端电压的理论波形

图 1-38 (b) 所示为 $\alpha = 30^\circ$ 晶闸管 u_{VT1} 两端电压的理论波形。从图中可以看出，在一个周期内整个波形也分为四个部分：在 $0 \sim \omega t_1$ 期间，电源电压 u_2 正半周，触发脉冲尚未加入， $VT_1 \sim VT_4$ 均处于截止状态，如果共阴极的两只晶闸管 VT_1 、 VT_3 的漏电阻相等，则晶闸管 VT_1 承担一半的电源电压 u_2 ，即 $\frac{1}{2}u_2$ ；在 $\omega t_1 \sim \omega t_2$ 期间，晶闸管 VT_1 导通，忽略管压降，晶闸管两端的电压 $u_{VT1} \approx 0$ ；在 $\omega t_2 \sim \omega t_3$ 期间，由于 $VT_1 \sim VT_4$ 均处于截止状态，使得晶闸管 VT_1 承担一半的电源电压 u_2 ，即 $\frac{1}{2}u_2$ ； $\omega t_3 \sim \omega t_4$ 期间，当



晶闸管 VT_3 被触发导通后, VT_1 将承受 u_2 的全部反向电压波形。

可见, 在单相全控桥式整流电阻电路中两组晶闸管(VT_1 、 VT_4 和 VT_2 、 VT_3)是在相位上互差 180° 轮流导通, 将交流电转变成脉动的直流电。晶闸管 VT_1 与 VT_3 的阴极接在一起, 构成共阴极接法, VT_2 与 VT_4 的阳极接在一起, 构成共阳极接法。在管子导通期间, 管压降约等于零, 其波形为一条直线; 当处于同一组的另一个管子导通时, 管子将承受 u_2 的全部反向电压波形; 当四个晶闸管都处于截止状态时, 如果管子的漏电阻相等, 则管子承担电源电压 u_2 的一半。电路的移相范围为 $0^\circ \sim 180^\circ$ 。

单相全控桥式整流电阻性负载电路参数的计算公式如表 1-4 所示。

表 1-4 单相全控桥式整流电阻性负载电路的计算公式

电 路 参 数	计 算 公 式
输出电压平均值	$U_d = 0.9U_2 \frac{1 + \cos\alpha}{2}$
负载电流平均值	$I_d = \frac{U_d}{R_d} = 0.9 \frac{U_2}{R_d} \frac{1 + \cos\alpha}{2}$
流过晶闸管电流平均值	$I_{dT} = \frac{1}{2}I_d$
流过晶闸管电流有效值	$I_T = \frac{1}{\sqrt{2}}I_d$
晶闸管可能承受的最大电压	$U_{TM} = \sqrt{2}U_2$

2. 单相全控桥式整流电路电感性负载

实际应用中我们采用的电动机负载是反电动势负载, 为保证电流连续需加装平波电抗器(即大电感), 其电路可按大电感负载电路进行分析, 单相全控桥式整流电路电感性负载电路如图 1-39 所示。

图 1-40 (a) 为 $\alpha = 30^\circ$ 单相全控桥大电感负载时输出电压的理论波形图。当电源电压 u_2 为正半周时, ωt_1 时刻即在 $\alpha = 30^\circ$ 时刻, 由触发电路送出的触发脉冲触发晶闸管 VT_1 和 VT_4 导通, 忽略管压降, 电源电压 u_2 加于负载两端, 整流输出的电压 u_d 的波形与电源电压 u_2 正半周的波形相同。在 ωt_2 时刻电源电压 u_2 过零变负, 在 L_d 两端产生感应电动势 e_L , 极性为上“-”下“+”, 且大于电源电压 u_2 。在 e_L 的作用下, 负载电流方向不变, 且大于管子 VT_1 和 VT_4 的维持电流, 负载电压 u_d 出现负半周, 将电感 L_d 中的能量反送回电源。在 ωt_3 时刻电源电压 u_2 负半周同一控制角 $\alpha = 30^\circ$ 触发电路送出的触发脉冲触发晶闸管 VT_3 和 VT_2 导通, VT_1 和 VT_4 因承受反压而关断, 负载电流从 VT_1 和 VT_4 换流到 VT_3 和 VT_2 。在 ωt_4 时刻电源电压 u_2 过零变正时, 在 L_d 两端感应电动势 e_L 的作用下, 晶闸管 VT_3 和 VT_2 维持导通状态, 将电感 L_d 中的能量反送回电源, 直到晶闸管 VT_1 和 VT_4 再次被触发导通。

图 1-40 (b) 为 $\alpha = 30^\circ$ 时晶闸管 VT_1 两端承受电压的理论波形图。在单相全控桥式整流大电感负载电路中, 每只晶闸管导通 180° , 当晶闸管 VT_1 导通时, 忽略管压降 $u_{VT1} \approx 0$; 当晶闸管 VT_1 处于截止状态时, VT_3 导通, VT_1 承受全部的反向电源电压 u_2 。

可见, 单相全控桥式整流大电感负载当控制角 α 在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 变化时, 负载电压 u_d 出

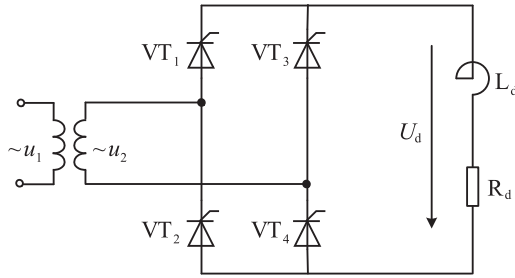


图 1-39 单相全控桥式整流大电感负载主电路

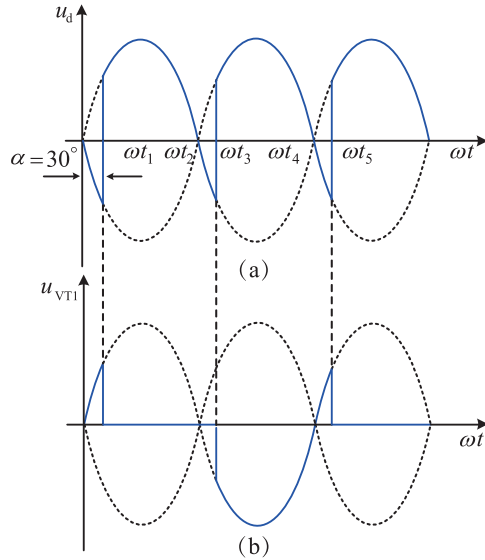


图 1-40 $\alpha = 30^\circ$ 单相全控桥大电感负载时的理论波形
(a) 输出电压 u_d 的理论波形 (b) 晶闸管 VT_1 两端电压的理论波形

现负半周，在 $\alpha = 90^\circ$ 时，负载电压 u_d 波形的正负面积近似相等，其平均值 $U_d \approx 0$ ，所以移向范围为 $0^\circ \sim 90^\circ$ 。

单相全控桥式整流带大电感负载电路参数的计算公式见表 1-5。

表 1-5 单相全控桥式整流大电感负载电路的计算公式

电 路 参 数	计 算 公 式
输出电压平均值	$U_d = 0.9U_2 \cos\alpha$
负载电流平均值	$I_d = \frac{U_d}{R_d} = 0.9 \frac{U_2}{R_d} \cos\alpha$
流过晶闸管电流平均值	$I_{dT} = \frac{1}{2} I_d = 0.45 \frac{U_2}{R_d} \cos\alpha$
流过晶闸管电流有效值	$I_T = \frac{1}{\sqrt{2}} I_d$
晶闸管可能承受的最大电压	$U_{TM} = \sqrt{2} U_2$



3. 单相全控桥式整流电路带续流二极管感性负载

单相全控桥式整流大电感负载电路在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 时, 负载电压 u_d 的波形出现负半周, 从而使电路输出电压平均值 u_d 下降, 可以在负载两端并接续流二极管来解决这个问题, 电路如图 1-41 所示。

接入续流二极管后, $\alpha = 60^\circ$ 时输出电压 u_d 及晶闸管 VT_1 两端的理论波形如图 1-42 所示, 以此为例来简单分析其工作原理:

电源电压正半周晶闸管 VT_1 和 VT_4 在 $\alpha = 60^\circ$ 时刻被触发导通, 整流输出的电压 u_d 的波形与电源电压 u_2 正半周的波形相同。忽略管压降, 晶闸管 VT_1 两端电压 $u_{VT1} \approx 0$ 。当电源电压 u_2 过零变负时, 续流二极管 VD 承受正向电压而导通, 晶闸管 VT_1 和 VT_4 承受反向电压而关断, $u_d = 0$, 波形与横轴重合, 此时负载电流 i_d 不再流回电源, 而是经过续流二极管 VD 进行续流, 释放电感中储存的能量。此时晶闸管 VT_1 承受一半的电源电压。

在电源电压 u_2 负半周相同的时刻, 晶闸管 VT_3 和 VT_2 被触发导通, 续流二极管 VD 承受反向电压关断, 在负载两端获得与 VT_1 和 VT_4 导通时相同的整流输出电压波形, 晶闸管 VT_1 承受全部的反向电源电压; 当电源电压 u_2 过零重新变正时, 续流二极管 VD 再次导通进行续流, 直至晶闸管 VT_1 和 VT_4 再次被触发导通, 如此电路完成一个周期的工作。

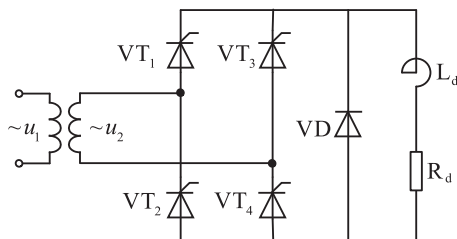


图 1-41 单相全控桥式整流大电感负载接续流二极管电路

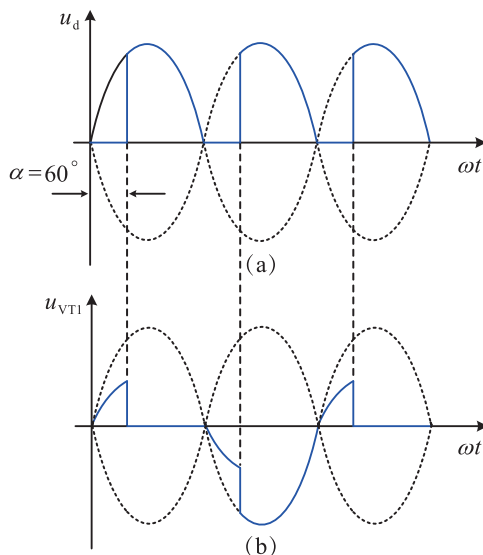


图 1-42 $\alpha = 60^\circ$ 单相全控桥带续流二极管大电感负载时的理论波形

(a) 输出电压 u_d 的理论波形 (b) 晶闸管 VT_1 两端电压的理论波形



想一想

若电路中的续流二极管损坏，输出波形将如何变化？

可见，接入续流二极管以后，其波形与电阻性负载波形相同，单相全控桥式整流带续流二极管大电感负载电路参数的计算公式见表 1-6。

表 1-6 单相全控桥式整流带续流二极管大电感负载电路的计算公式

电 路 参 数	计 算 公 式
输出电压平均值	$U_d = 0.9U_2 \frac{1 + \cos\alpha}{2}$
负载电流平均值	$I_d = \frac{U_d}{R_d} = 0.9 \frac{U_2}{R_d} \frac{1 + \cos\alpha}{2}$
流过晶闸管电流平均值	$I_{dT} = \frac{\pi - \alpha}{2\pi} I_d$
流过晶闸管电流有效值	$I_T = \sqrt{\frac{\pi - \alpha}{2\pi}} I_d$
流过续流二极管电流平均值	$I_{dD} = \frac{\alpha}{\pi} I_d$
流过续流二极管电流有效值	$I_D = \sqrt{\frac{\alpha}{\pi}} I_d$
晶闸管、续流二极管可能承受的最大电压	$U_{TM} = \sqrt{2} U_2$

二、单相半控桥式整流电路主电路分析

1. 单相半控桥式整流电路电阻性负载

图 1-43 为单相半控桥式整流电阻性负载主电路，当接通电源后，便可在负载两端得到脉动的直流电压，分析如下：

改变晶闸管的触发时刻，即控制角 α 的大小即可改变输出电压的波形，图 1-44 为 $\alpha = 30^\circ$ 的理论波形。当电源电压 u_2 处于正半周时，在 $\alpha = 30^\circ$ (ωt_1 时刻) 触发晶闸管 VT_1 导通，此时二极管 VD_4 也因承受正向电压而导通，负载电压 u_d 等于 u_2 ，在 ωt_2 时刻电源电压 u_2 过零时晶闸管 VT_1 关断；当电源电压 u_2 处于负半周时，在 ωt_3 时刻相同的控制角 $\alpha = 30^\circ$ 触发晶闸管 VT_3 导通，此时二极管 VD_2 也因承受正向电压而导通，负载电压是与前半个周期形状相同的电压波形，直到 ωt_4 时刻 u_2 过零时， VT_3 截止，图 1-44 (a) 为 $\alpha = 30^\circ$ 的输出电压的理论波形。

图 1-44 (b) 为 $\alpha = 30^\circ$ 晶闸管 u_{VT1} 两端电压的理论波形。我们将一个周期内的波形分为四个部分来分析：在 $0 \sim \omega t_1$ 期间，电源电压 u_2 正半周，触发脉冲尚未加入，二极管 VD_4 承受正向电压处于导通状态，二极管 VD_2 反偏截止，晶闸管 VT_1 承受 u_2 的全部正向电压；在 $\omega t_1 \sim \omega t_2$ 期间，晶闸管 VT_1 导通，忽略管压降，管子两端的电压近似为



零；在 $\omega t_2 \sim \omega t_3$ 期间，晶闸管 VT_1 关断，由于二极管 VD_2 承受正向电压处于导通状态，使得晶闸管 VT_1 两端不承受电压； $\omega t_3 \sim \omega t_4$ 期间，晶闸管 VT_2 被触发导通后， VT_1 承受 u_2 全部反向电压波形。

可见，两只晶闸管 VT_1 和 VT_3 的阴极接在一起，触发脉冲同时送给两管的门极，能被触发导通的只能是承受正向电压的一只晶闸管。两只二极管 VD_2 和 VD_4 的阳极接在一起，它们能否导通仅取决于电源电压的正负，也就是说，两只管子阴极电位低的二极管导通。电路的移相范围为 $0^\circ \sim 180^\circ$ 。

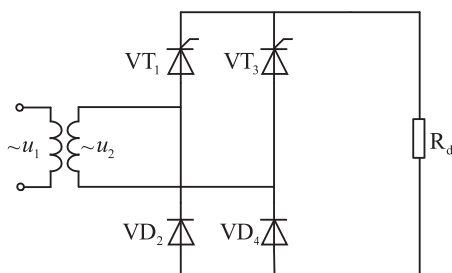


图 1-43 单相半控桥式整流电阻负载主电路

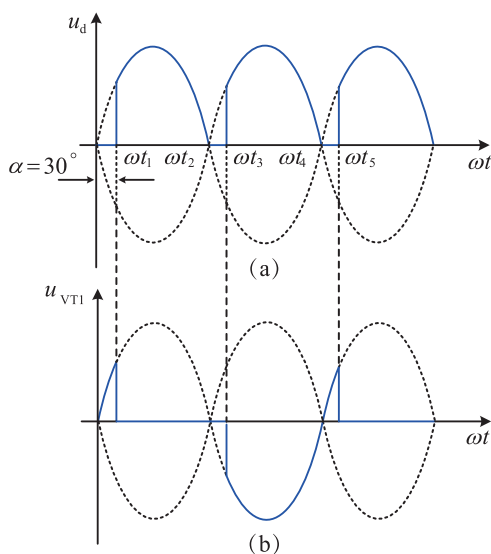


图 1-44 $\alpha = 30^\circ$ 单相半控桥电阻性负载时的理论波形
(a) 输出电压 u_d 的理论波形 (b) 晶闸管 VT_1 两端电压的理论波形

单相半控桥式整流电阻性负载电路参数的计算公式见表 1-7。

表 1-7 单相半控桥式整流电阻性负载电路的计算公式

电路参数	计算公式
输出电压平均值	$U_d = 0.9U_2 \frac{1 + \cos\alpha}{2}$
负载电流平均值	$I_d = \frac{U_d}{R_d} = 0.9 \frac{U_2}{R_d} \frac{1 + \cos\alpha}{2}$



(续表)

电路参数	计算公式
流过晶闸管和二极管电流平均值	$I_{dT} = I_{dD} = \frac{1}{2}I_d$
流过晶闸管和二极管电流有效值	$I_T = I_D = \frac{1}{\sqrt{2}}I_d$
晶闸管可能承受的最大电压	$U_{TM} = \sqrt{2}U_2$

2. 单相半控桥式整流电路感性负载

实际应用中我们采用的电动机负载是反电动势负载，为保证电流连续需加装平波电抗器（即大电感），其电路分析可按大电感负载电路进行分析，单相半控桥式整流电路感性负载电路如图 1-45 所示。

$\alpha = 30^\circ$ 时当电源电压 u_2 处于正半周时，在 ωt_1 时刻 $\alpha = 30^\circ$ 触发晶闸管 VT_1 导通，此时二极管 VD_4 也因承受正向电压而导通，整流输出电压 $u_d = u_2$ ，晶闸端 VT_1 两端承受的电压 $u_{VT1} \approx 0$ ，其波形依然与横轴重合。当 ωt_2 时刻电源电压 u_2 过零进入负半周时，电感上产生的感应电动势 e_L 下“+”上“-”，在它的作用下， VT_1 依然处于导通状态，此时二极管 VD_2 正偏导通，同时使 VD_4 承受反向电压关断，由 VT_1 、 VD_2 构成回路进行续流，这一过程称为自然续流，其换流过程称为自然换流，忽略 VT_1 、 VD_2 的管压降，整流输出电压 $u_d \approx 0$ ，由于晶闸管 VT_1 仍处于导通状态，其两端承受的电压波形依然与横轴重合，与电阻性负载波形相同，如图 1-44 所示。

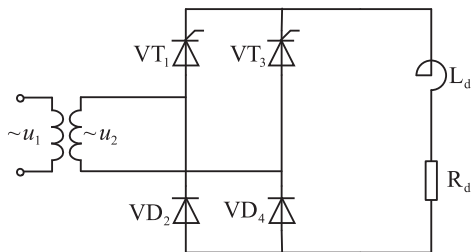


图 1-45 单相半控桥式整流大电感负载主电路

在电源电压 u_2 的负半周 ωt_3 时刻触发晶闸管 VT_3 导通，在负载两端得到与 u_2 正半周时相同的输出电压，晶闸管 VT_1 因 VT_3 导通而承受反向电源电压 u_2 关断。当 ωt_4 时刻电源电压 u_2 过零进入正半周时，电路进入自然续流状态，整流输出电压 $u_d \approx 0$ ，晶闸管 VT_1 承受正向电源电压 u_2 。

可见，在单相半控桥式整流大电感负载电路中，两只晶闸管触发换流，两只二极管则在电源过零时进行换流。电路内部有自然续流的作用，输出电压 u_d 没有负半周，负载电流 i_d 也不再流回电源，只要负载中的电感量足够大，则负载电流 i_d 连续。电路移相范围为 $0^\circ \sim 180^\circ$ 。

单相半控桥式整流带大电感负载电路参数的计算公式如表 1-8 所示。

表 1-8 单相半控桥式整流大电感负载电路的计算公式

电路参数	计算公式
输出电压平均值	$U_d = 0.9U_2 \frac{1 + \cos\alpha}{2}$
负载电流平均值	$I_d = \frac{U_d}{R_d} = 0.9 \frac{U_2}{R_d} \frac{1 + \cos\alpha}{2}$



(续表)

电路参数	计算公式
流过晶闸管电流平均值	$I_{dT} = \frac{1}{2}I_d$
流过晶闸管电流有效值	$I_T = \frac{1}{\sqrt{2}}I_d$
晶闸管可能承受的最大电压	$U_{TM} = \sqrt{2}U_2$

3. 单相半控桥式整流电路带续流二极管感性负载

在单相半控桥式整流大电感负载电路中不接续流二极管，电路也能正常工作，但工作的可靠性不高。在实际使用时容易出现失控现象。图 1-46 为单相半控桥式整流大电感负载电路失控时输出电压 u_d 的波形图。

在 ωt_3 时刻，电源电压 u_2 处于正半周，触发电路正常送出触发脉冲 u_{g1} 使晶闸管 VT_1 被触发导通，此时， VT_1 和 VD_4 导通，电路处于整流状态。当电源电压 u_2 过零进入负半周时，负载电流 i_d 由 VD_4 换流到 VD_2 ， VT_1 和 VD_2 导通，电路进入自然续流状态。在 ωt_4 时刻，电源电压 u_2 处于负半周，触发电路本应送出触发脉冲 u_{g3} 使晶闸管 VT_3 被触发导通，同时使 VT_1 承受反向电压关断，但是由于某种原因造成触发脉冲 u_{g3} 突然丢失，这样一来， VT_3 无法导通，只要电感 L_d 中储存的能量足够大，图 1-46 中的续流过程将继续进行直至电源电压 u_2 的负半周结束。

当电源电压 u_2 再次过零进入正半周时， VT_1 承受正向电压继续导通，负载电流 i_d 由 VD_2 换流到 VD_4 ，电路再次进入整流状态。如此循环下去，电路输出的电压波形如图 1-46 所示。

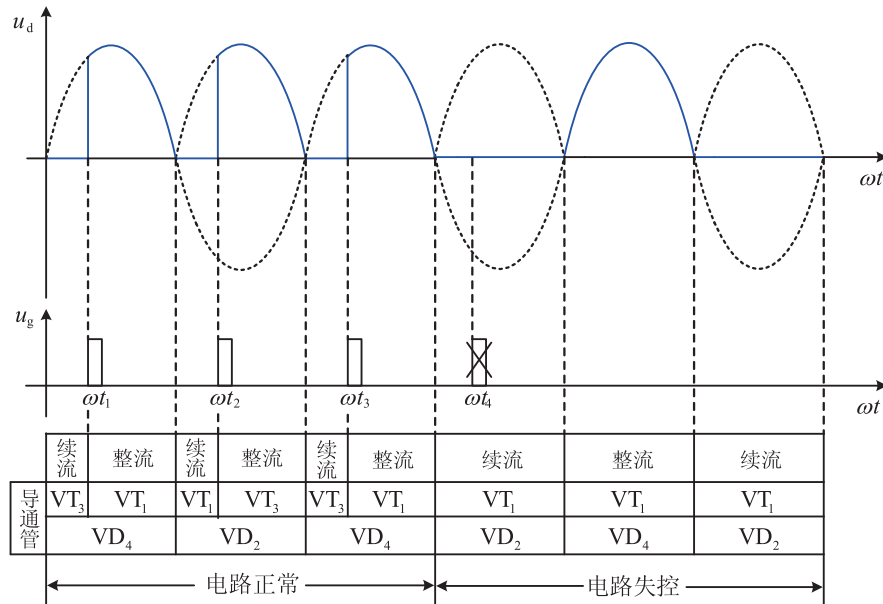


图 1-46 单相半控桥式整流大电感负载电路失控时输出电压波形

也就是说，在单相半控桥式整流大电感负载电路中出现控制角 α 突然移到 180° 或



者脉冲突然丢失的情况，将会发生已导通的晶闸管持续导通无法关断，而两个整流二极管轮流导通的不正常现象，这种现象被称为失控现象。在生产实际中当电路一旦出现失控，已经导通的晶闸管将因过热而损坏，这是不允许的。

为了防止失控现象的产生，可以在负载两端并联两只二极管 VD，称为续流二极管。电路如图 1-47 所示。

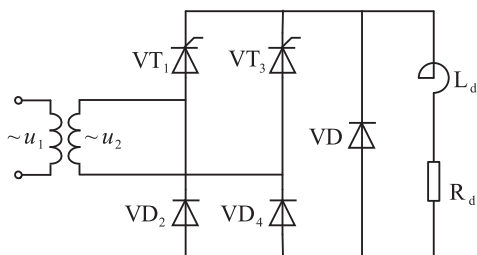


图 1-47 单相半控桥式整流大电感负载接续流二极管电路

可见，接入续流二极管以后，其波形与电阻性负载波形相同，单相半控桥式整流带续流二极管大电感负载电路参数的计算公式见表 1-9。

表 1-9 单相半控桥式整流带续流二极管大电感负载电路的计算公式

电 路 参 数	计 算 公 式
输出电压平均值	$U_d = 0.9U_2 \frac{1 + \cos\alpha}{2}$
负载电流平均值	$I_d = \frac{U_d}{R_d} = 0.9 \frac{U_2}{R_d} \frac{1 + \cos\alpha}{2}$
流过晶闸管电流平均值	$I_{dT} = \frac{\pi - \alpha}{2\pi} I_d$
流过晶闸管电流有效值	$I_T = \sqrt{\frac{\pi - \alpha}{2\pi}} I_d$
流过续流二极管电流平均值	$I_{dD} = \frac{\alpha}{\pi} I_d$
流过续流二极管电流有效值	$I_D = \sqrt{\frac{\alpha}{\pi}} I_d$
晶闸管、续流二极管可能承受的最大电压	$U_{TM} = \sqrt{2} U_2$



任务实施

单相半控桥式调光灯电路安装与调试

一、实训目的

1. 能判断晶闸管的好坏，能判断单晶体管的管脚
2. 能进行单相半控桥式晶闸管调光电路安装接线
3. 能使用电工电子仪表进行单相桥式晶闸管主电路与触发电路调试
4. 能对单相桥式晶闸管调光电路及单晶体管触发电路进行维护

二、实验实训设备

电工常用工具、电烙铁、万用表、仪器、印制电路板及材料如表 1-10 所示。

表 1-10 元件明细表

序号	符号	名称	型号与规格	件数
1	$VD_1 \sim VD_4$	二极管	1N4001	4
2	VD_z	稳压管	2CW64 (18 ~ 21V)	1
3	V	单晶体管	BT33A	1
4	VT_1 、 VT_2	晶闸管	KP1-4	2
5	VD_5 、 VD_6	二极管	2CZ11D	2
6	R_1	电阻	RT、 $2k\Omega$ 、1W 或 $1.2k\Omega$ 、1W	1
7	R_2	电阻	RT、 $4.7k\Omega$ 、1/8W	1
8	R_3	电阻	RT、 510Ω 、1/8W	1
9	R_4	电阻	RT、 100Ω 、1/8W	1
10	R_5	电阻	RT、 51Ω 、1/8W	1
11	RP	电位器	WT、 $100k\Omega$ 、0.25W	1
12	C	电容器	CGZX、 $0.15\mu F/160V$	1
13	HL	灯泡	12V	1

三、操作过程

1. 晶闸管的测试与单晶体管外观和管脚的辨别与第一节方法相同，在此不再赘述。



2. 电路的安装

电阻性负载在日常生活中的应用非常广泛，其种类繁多，图 1-48 (a) 是一个由晶闸管构成的单相桥式可控整流电阻性负载实际电路，图 1-48 (b) 为电路原理。

单相半控桥式整流调光灯电路实物如图 1-48 (a) 所示，图 1-48 (b) 为原理图。该电路采用的触发电路与单相半波可控整流调光灯电路完全一致，请自行分析。

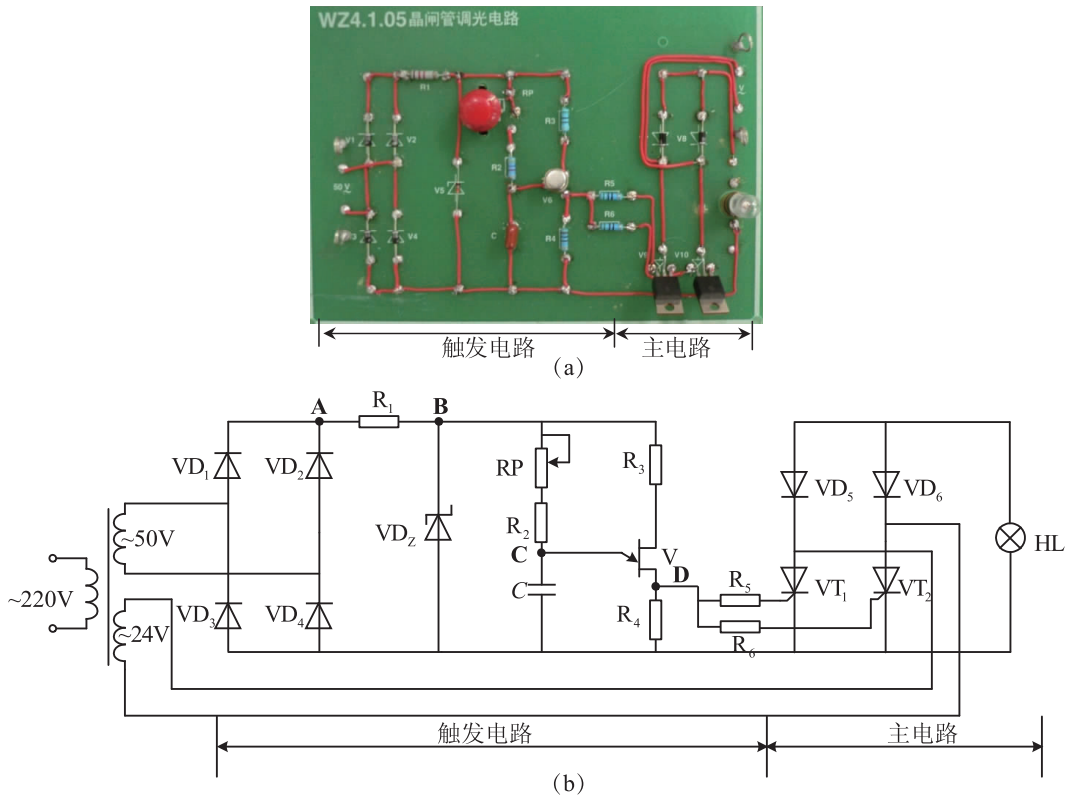


图 1-48 单相半控桥式整流调光灯电路

(a) 单相半控桥式整流调光灯电路实物图 (b) 单相半控桥式整流调光灯电路原理

如图 1-48 所示，电路由主电路和触发电路两部分构成，其主电路为单相桥式可控整流电路，其触发电路为单结晶体管触发电路，我们将分别对主电路和触发电路进行分析、安装与调试。

(1) 按表 1-9 中给出的元器件参数选择元件。

(2) 进行元件的简单测试，确保能够正常使用后，根据铆钉板上焊孔的距离将各元件的管脚掰成相应的形状，按照焊接工艺的要求将各元件固定在铆钉板上。

(3) 按照焊接工艺的要求用导线进行线路的连接，完成电路的安装。

3. 单结晶体管触发电路调试

参看第一节。

4. 单相半控桥式可控整流调光电路的调试

焊接完成经检查合格后，将主电路和触发电路的电源端按电压等级接到具有两个次级绕组的变压器上，然后送电对各点进行相应的调试和测量。



5. 输出电压 u_d 和晶闸管两端承受的电压 u_{VT} 波形的测量

(1) 将示波器探头接与负载两端，探头的测试端接高电位，探头的接地端接低电位，荧光屏上显示的应为单相桥式可控整流电阻性负载 $180^\circ \sim 0^\circ$ 时输出电压 u_d 的波形。图 1-49 ~ 1-51 (a) 为 $30^\circ \sim 90^\circ$ 时输出电压波形，可对照调节比较。读者可于图 1-51 (d) 中根据测量信号记录不同控制角 α 时的输出电压 u_d 的波形。

(2) 调节 RP 电阻观察控制角 α 从 $180^\circ \sim 0^\circ$ 变化时输出电压 u_d 及对应的晶闸管两端承受的电压 u_{VT} 波形。注意：在测量 u_{VT1} 时，探头的测试端接管子的阳极，接地端接管子的阴极。图 1-49 ~ 1-51 (b)、(c) 为 $30^\circ \sim 90^\circ$ 时晶闸管 VT_1 、 VT_3 两端波形，可对照调节比较，读者可于图 1-51 (e)、(f) 中根据测量信号记录不同控制角 α 时晶闸管两端承受的电压 u_{VT1} 、 u_{VT3} 波形。

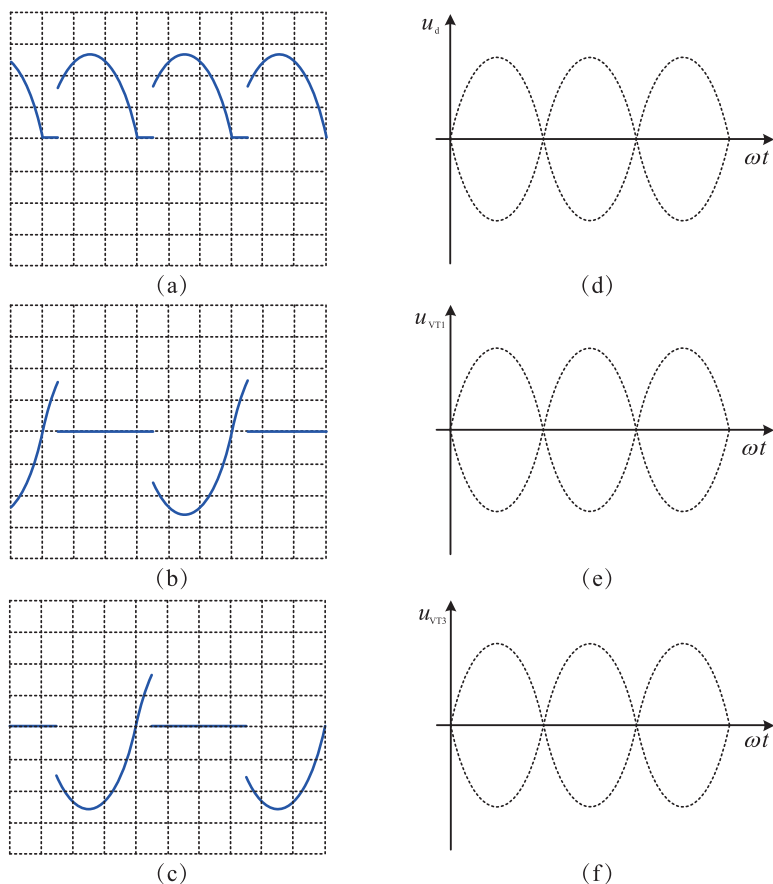


图 1-49 $\alpha = 30^\circ$ 时输出电压波形和晶闸管 VT 两端波形

(a) $\alpha = 30^\circ$ 时输出电压波形 (b) $\alpha = 30^\circ$ 时晶闸管 VT_1 两端波形

(c) $\alpha = 30^\circ$ 时晶闸管 VT_3 两端波形

想一想

1. 若一只晶闸管断路，输出波形将有何变化？
2. 若 VT_3 晶闸管脉冲丢失，输出波形将有何变化？

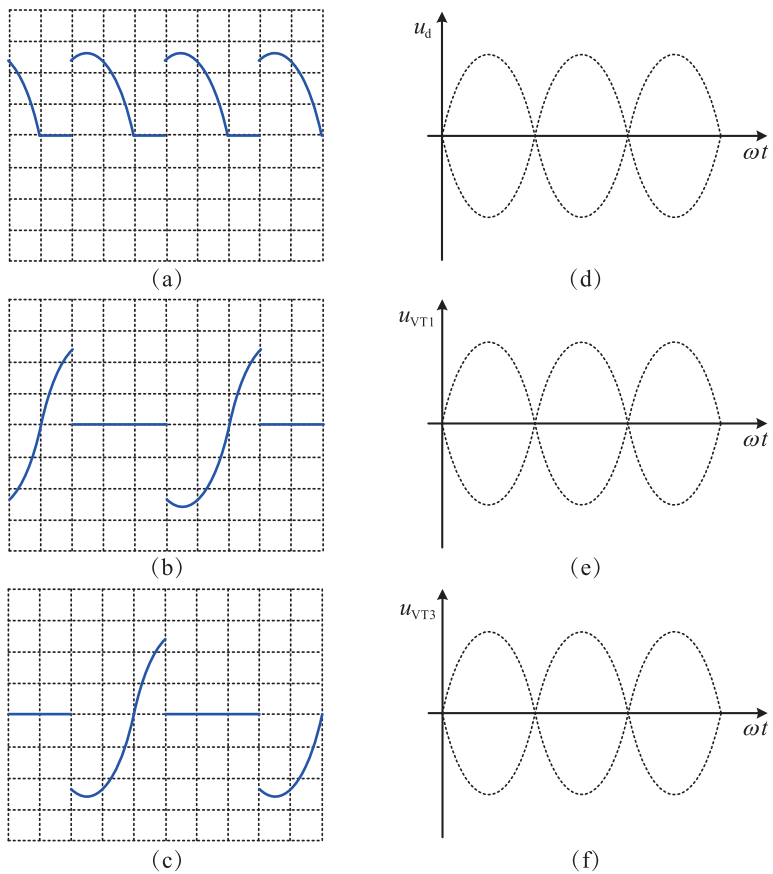
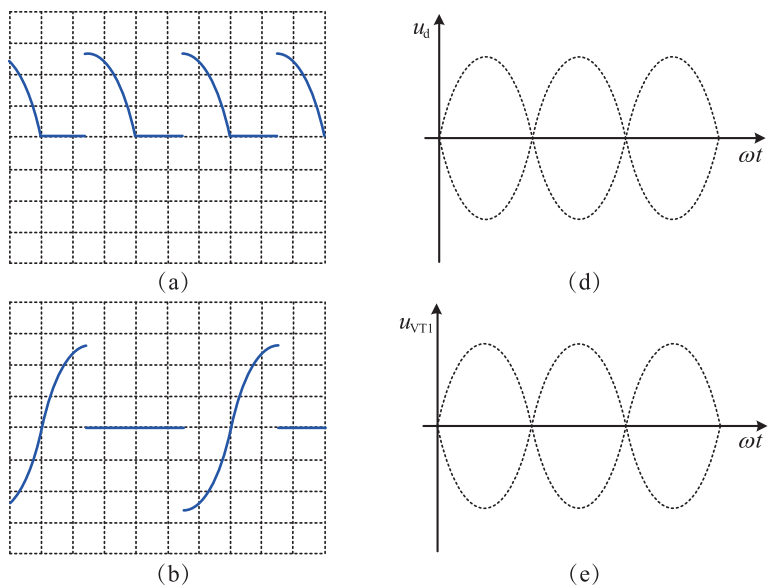


图 1-50 $\alpha = 60^\circ$ 时输出电压波形和晶闸管 VT 两端波形
 (a) $\alpha = 60^\circ$ 时输出电压波形 (b) $\alpha = 60^\circ$ 时晶闸管 VT_1 两端波形
 (c) $\alpha = 60^\circ$ 时晶闸管 VT_3 两端波形



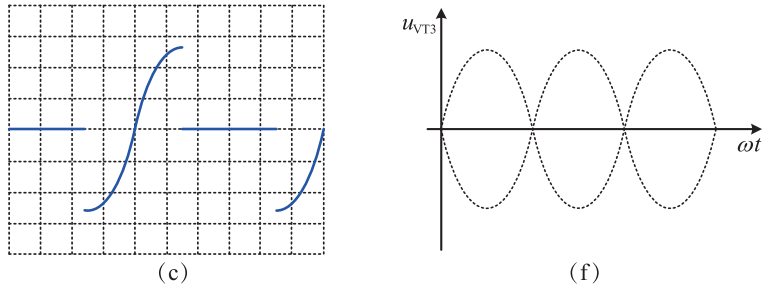


图 1-51 $\alpha = 90^\circ$ 时输出电压波形和晶闸管 VT 两端波形
 (a) $\alpha = 90^\circ$ 时输出电压波形 (b) $\alpha = 90^\circ$ 时晶闸管 VT_1 两端波形
 (c) $\alpha = 90^\circ$ 时晶闸管 VT_3 两端波形

触发电路各点与主电路波形对比关系如图 1-52 (a) 所示，读者可于图 1-52 (b) 中根据测量信号记录不同控制角 α 时的各点电压波形。

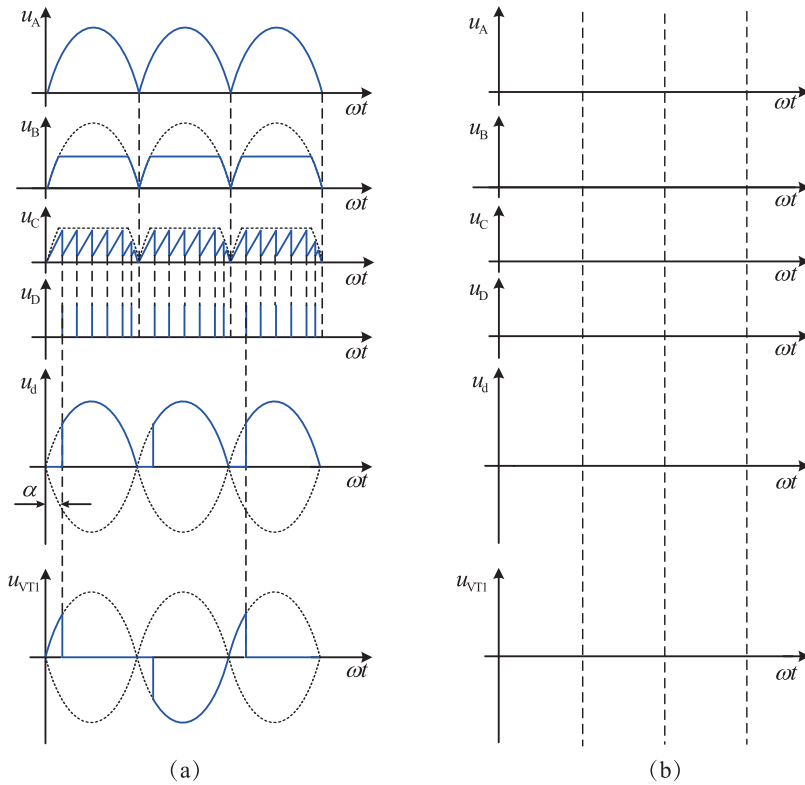


图 1-52 触发电路与主电路波形对应关系
 (a) 电路各点波形图 (b) 记录波形图



任务评价

表 1-11 任务评价表

项目	技术要求	配 分	评分细则	评分记录
元件检测	1. 检测元件方法	20 分	检测方法错, 每次扣 5 分	
	2. 元件参数选择		元件参数选择错, 每件扣 5 分	
元件安装	1. 元件安装位置	20 分	元件安装位置错, 每件扣 5 分	
	2. 元件排列要求		元件排列不整齐, 扣 5 分	
调试	1. 示波器使用	30 分	示波器使用错, 扣 10 分	
	2. 调试顺序		调试顺序错, 扣 10 分	
	3. 观察点波形		观察点波形不对, 每个扣 5 分	
原理叙述	1. 触发电路工作原理	30 分	不会叙述, 扣 6 分 叙述不全面, 扣 3~5 分	
	2. 同步的原理		不会叙述, 扣 6 分 叙述不全面, 扣 3~5 分	
安全 文明生产	1. 工具、仪表完好无损	从 总分扣 5~20 分	凡有损坏, 酌情扣 5~10 分	
	2. 安全生产文明操作		有违反安全操作者, 酌情扣 5~10 分	
工时: 定额时间 90 分钟				
备注: 对发生事故者扣 50 分				



知识拓展

晶闸管串联均压和并联均流

1. 晶闸管的串联使用

当要求晶闸管应有的电压值大于单个晶闸管的额定电压时，可以用两个以上同型号的晶闸管相串联。由于器件特性的分散性，同型号管子串联后正反向阻断时流过反向漏电流虽然一样，但分配的反向电压不一样，图 1-53 (a) 为反向阻断特性略有差异的晶闸管串联时二管承受的反向电压值，显然存在不均压，这样会使晶闸管不能被充分利用，严重时还会使承受高压的管子先过压击穿，随之低压管也连锁击穿。因此晶闸管和其它电力电子器件串联时必须考虑均压措施。

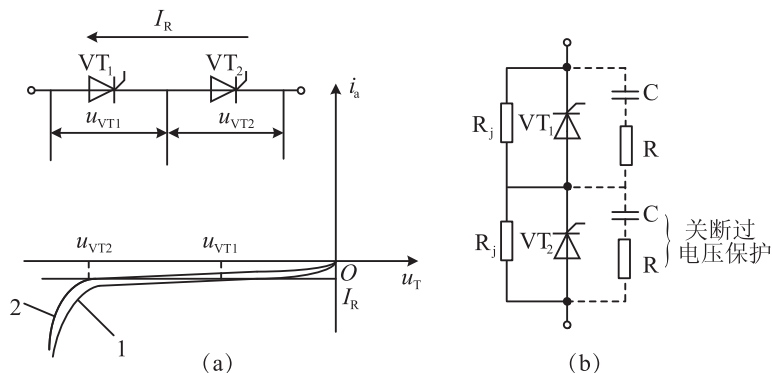


图 1-53 晶闸管串联与均压措施
(a) 反向电压分配不均 (b) 均压措施

1) 静态均压 (正反向阻断状态下的均压)

静态均压有效的办法是在串联的晶闸管上并联阻值相等的电阻 R_j ，叫均压电阻，如图 1-53 (b) 所示，通常均压电阻 R_j 按下式计算。

$$R_j \leq (0.1 \sim 0.25) \frac{U_{TN}}{\pi I_{dr}}$$

式中 U_{TN} ——晶闸管额定电压；

I_{dr} ——断态重复平均电流；

πI_{dr} 近似为漏电流峰值 I_{DRM} (或 I_{RRM})。

均压电阻 R_j 远小于晶闸管的漏电阻，则电压分配主要取决于 R_j 。

2) 动态均压 (开通过程与关断过程的均压)

均压电阻 R_j 只能使直流电压或变化缓慢的电压均匀分配，晶闸管在开关过程中，瞬时电压的分配决定于各晶闸管的结电容、导通与关断时间、外部触发脉冲等因素。串联的晶闸管在开通时，后导通的管子将承受全部正向电压，易造成硬开通；关断时先关断的晶闸管将承受全部反抽电压，可能导致器件反向击穿而损坏。为使串联器件在开与关的过程中电压均匀分配称动态均压。

动态均压的方法是在串联的晶闸管上并联数值相等的电容 C ，同时为了限制管子开



通时，电容放电产生过大的电流上升率和防止因并联电容使电路产生振荡，通常在并联电容的支路中串入电阻 R，成为 RC 支路，如图 1-53 (b) 中虚线所示。由于晶闸管两端的阻容吸收电路在串联时可起动态均压作用，故不必再另接电阻电容。

虽然采取了均压措施，但仍然不可能完全均压，因此在选择每个管子要降低电压额定值使用，通常降低 10%，这样一来，选择晶闸管额定电压计算式修正为

$$0.9U_{TN} \cdot n_s = (2 \sim 3)U_{TM}$$

所以

$$U_{TN} = \frac{(2 \sim 3)U_{TM}}{0.9n_s}$$

式中 n_s ——串联元件的个数。

2. 晶闸管的并联使用

当要求晶闸管应有的电流值大于单个晶闸管的额定电流时，就需要将同型号的晶闸管并联使用。器件并联时由于正向导通的伏安特性不可能完全一致，在相同管压降时，使导通的晶闸管电流分配不均，如图 1-54 (a) 所示。因此并联使用的晶闸管除了选用特性尽量一致的管子外，还要采取均流措施。

1) 电阻均流

如图 1-54 (b) 所示，在并联的各晶闸管中串入一小电阻 R_j 是最简便的均流方法。均流电阻 R_j 由下式决定

$$R_j = \frac{(0.5 \sim 2)U_{UT}}{I_{Ta}}(\Omega)$$

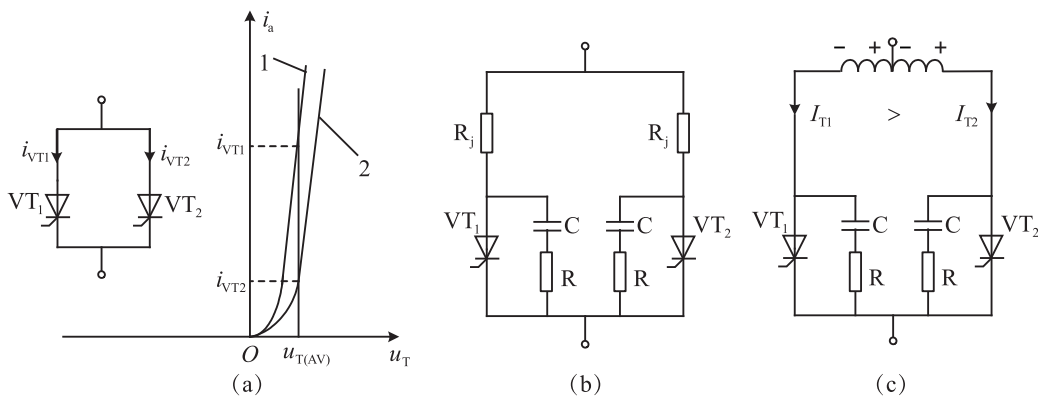


图 1-54 晶闸管并联与均流措施

(a) 电流分配不均 (b) 电阻均流 (c) 电抗均流

串入均流电阻 R_j 后，电流分配不均匀度可大大地改善，但因电阻上有损耗，并且对动态均流不起作用，只适用于小功率场合。对于大电流器件的并联，均流可由各并联支路的快熔电阻、电抗器电阻和连接导线电阻的总和来实现。

2) 电抗均流

如图 1-54 (c) 所示，用一个均流电抗器（铁芯上带有两个相同的线圈）同名端相反接在并联的晶闸管电路中，均流的原理是利用电抗器中感应电动势的作用达到均流。即：当两器件中电流均匀一致时铁心内励磁安匝相互抵消，电抗不起作用，若电流不相等合成励磁安匝产生电感，在两管与电抗回路中产生环流，使电流小的增大、电流大的减小，从而达到均流目的。显然，电抗均流可以起到动态均流的作用，但体积和成本也



会额外增加。

3. 晶闸管串、并联使用时的注意事项

晶闸管在实际使用中，若要将晶闸管串联（或并联）使用应注意以下几点：

- (1) 筛选管子，尽量选用特性一致的管子，管子的开通时间也要尽量一致。
- (2) 采用强触发脉冲，前沿要陡，幅值要大。
- (3) 串联时要采取均压措施，并联时要采取均流措施。需要同时采用串联和并联晶闸管的时候，通常采用先串后并的方法。
- (4) 降低电压（串联时）或电流（并联时）额定值的 10% 使用，即降额使用。



小结

1. 单相全控桥式整流电路电阻性负载两组晶闸管轮流导通,将交流电转变成脉动的直流电。在晶闸管导通期间,管压降约等于零,其波形为一条直线;当处于同一组的另一只晶闸管导通时,晶闸管将承受 u_2 的全部反向电压波形;当四只晶闸管都处于截止状态时,如果四只晶闸管的漏电阻相等,则晶闸管承担电源电压 u_2 的一半,电路的移相范围为 $0^\circ \sim 180^\circ$ 。

2. 单相全控桥式整流电路电感性负载当控制角 α 在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 变化时,负载电压 u_d 出现负半周,在 $\alpha = 90^\circ$ 时,负载电压 u_d 波形的正负面积近似相等,其平均值 $U_d \approx 0$,故移相范围为 $0^\circ \sim 90^\circ$ 。

3. 单相全控桥式整流电路带续流二极管电感性负载其波形与电阻性负载波形相同,电路的移相范围为 $0^\circ \sim 180^\circ$ 。

4. 单相半控桥式整流电路电阻性负载时,两只晶闸管 VT_1 和 VT_3 的阴极接在一起,触发脉冲同时送给两管的门极,能被触发导通的只能是承受正向电压的一只晶闸管。两只二极管 VD_2 和 VD_4 的阳极接在一起,它们能否导通仅取决于电源电压的正负,也就是说,两只二极管中阴极电位低的二极管导通。电路的移相范围为 $0^\circ \sim 180^\circ$ 。

5. 单相半控桥式整流大电感负载电路中,两只晶闸管触发换流,两只二极管则在电源过零时进行换流。电路内部有自然续流的作用,输出电压 u_d 没有负半周,负载电流 i_d 也不再流回电源,只要负载中的电感量足够大,则负载电流 i_d 连续。电路移相范围为 $0^\circ \sim 180^\circ$ 。

6. 在单相半控桥式整流大电感负载电路,工作的可靠性不高,在实际使用时容易出现失控现象。为了防止失控现象的产生,可以在负载两端并联续流二极管。接入续流二极管以后,其波形与电阻性负载波形相同。



测试题

一、选择题

1. 单相半控桥,带电阻性负载,在 $\alpha = 45^\circ$ 时,输出电压的平均值为_____。
 A. $0.45 U_2$ B. $0.77 U_2$ C. $0.9 U_2$ D. $1.17 U_2$
2. 单相半控桥的移相范围为_____。
 A. $0^\circ \sim 90^\circ$ B. $0^\circ \sim 120^\circ$ C. $0^\circ \sim 150^\circ$ D. $0^\circ \sim 180^\circ$
3. 输出电压公式 $U_d = 0.9 U_2 \frac{1 + \cos\alpha}{2}$ 可以适用于_____。
 A. 单相半控桥 B. 单相全控桥
 C. 单相半波可控整流 D. 三相半波可控整流
4. 单相半控桥带大电感负载,在控制角 $\alpha = 60^\circ$ 时,如输出电流为 100A 则晶闸管的电流有效值为_____。
 A. 25A B. 33.3A C. 50A D. 57.7A
5. 单相半控桥带大电感负载,在控制角 $\alpha = 90^\circ$ 时,如输出电流为 100A 则晶闸管的电流平均值为_____。
 A. 25A B. 33.3A C. 50A D. 57.7A
6. 单相全控桥带大电感负载,无续流二极管,在 $\alpha = 30^\circ$ 时的输出电压为_____。
 A. $0.45 U_2$ B. $0.78 U_2$ C. $0.84 U_2$ D. $0.9 U_2$
7. 单相全控桥的移相范围为_____。
 A. 与负载性质无关均为 $0^\circ \sim 180^\circ$
 B. 电阻负载为 $0^\circ \sim 180^\circ$ 、大电感为 $0^\circ \sim 90^\circ$
 C. 有续流二极管为 $0^\circ \sim 180^\circ$ 、大电感负载无续流二极管时为 $0^\circ \sim 90^\circ$
 D. 有续流二极管为 $0^\circ \sim 180^\circ$ 、无续流二极管为 $0^\circ \sim 90^\circ$
8. 输出电压公式 $U_d = 0.9 U_2 \cos\alpha$ 可以适用于_____。
 A. 单相半控桥
 B. 单相半波可控整流
 C. 单相全控桥带大电感负载
 D. 单相全控桥带大电感负载、无续流二极管
9. 可控整流电路中,_____电路必须有续流二极管才能正常工作。
 A. 单相半波可控整流电 B. 三相半波可控整流电路
 C. 半控桥带大电感负载 D. 全控桥带大电感负载
10. 单相桥式可控整流电路带电阻性负载,在 $\alpha = 60^\circ$ 时输出电压平均值为_____。
 A. $0.34 U_2$ B. $0.45 U_2$ C. $0.75 U_2$ D. $0.9 U_2$

二、判断题

1. 单相半控桥式整流电路,带大电感负载时,必须并联续流二极管才能正常工作。

()



2. 单相半控桥式整流电路,无论是电阻负载还是大电感负载,其输出电压的计算公式相同。 ()
3. 无论是单相全控还是半控桥式整流电路,带电阻负载时,其输出电压的计算公式相同。 ()
4. 单相全控桥无论带电阻负载还是大电感负载,在控制角 $\alpha = 90^\circ$ 时,输出电压一定是 $0.45U_2$ 。 ()
5. 可控整流电路带大电感负载时,无论是否接有续流二极管,其输出电压的波形与电阻负载相同。 ()
6. 可控整流电路带大电感负载时,无论是否接有续流二极管,其输出电压的波形都可能出现负值。 ()
7. 单相全控桥式整流电路,带大电感负载时,如果不接续流二极管,则无论控制角有多大,每个晶闸管轮流导通 180° 。 ()

三、简答题

1. 画出单相全控桥式可控整流电路带大电感负载时的电路图(不带续流二极管),画出控制角 $\alpha = 30^\circ$ 时输出电压的波形及一个晶闸管的电流波形,简述其工作原理。
2. 画出单相半控桥式可控整流电路带大电感负载时的电路图,画出控制角 $\alpha = 60^\circ$ 时输出电压的波形及一个晶闸管的电流波形,简述其工作原理。

四、计算题

1. 单相全控桥式整流电路,带大电感负载无续流二极管,交流输入电压 U_2 为 60V ,控制角 α 的变动范围为 $30^\circ \sim 60^\circ$,请计算输出电压的调节范围,如负载电流最大为 50A 则晶闸管上的电流有效值和最高反压分别为多大?
2. 有一大电感负载采用单相半控桥式有续流二极管整流电路进行供电。负载电阻为 10Ω ,输入电压为 220V ,晶闸管控制角 $\alpha = 60^\circ$,求流过晶闸管、二极管的电流平均值及有效值?