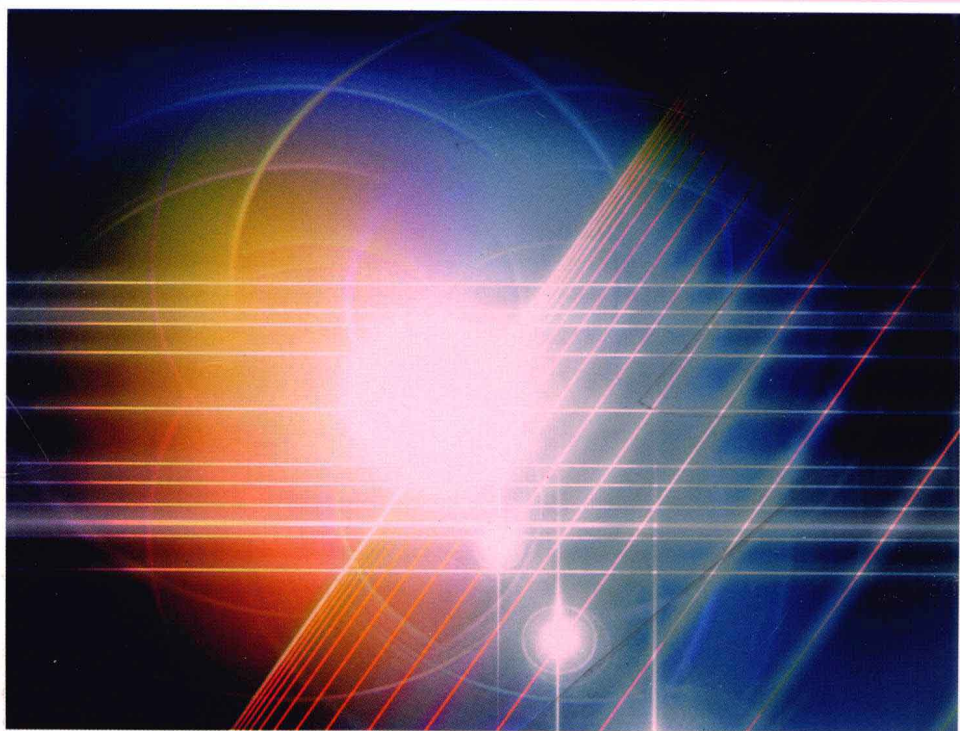


电气自动化专业高技能型人才教学用书

电力电子变流技术 操作实训及仿真

李爱军 郑 昆 编



适用层次：高职高专 高级技校
技师学院 职业培训



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

电气自动化专业高技

电力电子变流技术 操作实训及仿真

李爱军 郑 昆 编



机械工业出版社

本书针对机电类专业高技能人才培养的特点,以模块构建实训体系和项目任务驱动教学任务,系统地介绍了单相整流电路、三相可控整流电路、交流调压电路和基于 MATLAB 软件的电力电子仿真等内容。

本书可作为技师学院、高级技校、高职院校电气自动化、机电一体化等相关专业高技能型人才培养的实训教材,也可供工程技术人员使用参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力电子变流技术操作实训及仿真/李爱军,郑昆编. —北京:机械工业出版社, 2011.9

电气自动化专业高技能型人才教学用书

ISBN 978-7-111-35322-5

I. ①电… II. ①李…②郑… III. ①电力电子学—变流—教材②电力电子学—计算机仿真—教材 IV. ①TM46②TM1-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 137631 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:荆宏智 陈玉芝 责任编辑:林运鑫

版式设计:张世琴 责任校对:肖琳

封面设计:马精明 责任印制:乔宇

北京瑞德印刷有限公司印刷 (三河市胜利装订厂装订)

2011 年 11 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·9.5 印张·231 千字

0001—3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-35322-5

定价: 23.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010) 88361066 门户网: <http://www.cmpbook.com>

销售一部: (010) 68326294 教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售二部: (010) 88379649

读者购书热线: (010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

为完善高技能型人才培养体系建设,加快实现培养一大批结构合理、素质优良的技术技能型、复合技能型和知识技能型高技能人才的目标,针对机电类专业高技能人才培养的特点,我们编写了《电力电子变流技术操作实训及仿真》一书。

本书的主要特点是:

1. 以国家最新的《国家职业技能标准 维修电工》为依据,突出工艺要领和操作技能的培养。

2. 采用“模块化”教材结构,每个模块为一个知识单元,主题鲜明,重点突出,以易于阅读和便于综合的特点适应实践教学环节需求。

3. 在“相关知识点析”部分,将本项目中涉及的理论知识进行梳理,努力使实训不再依赖理论教材。

4. 将每个实训项目的训练效果进行量化,在“成绩评分标准”中对训练过程进行记录,并相应地给出量化参考标准。

5. 每个项目课后配有习题,以巩固知识,有效培养学生灵活运用基础知识、提高分析的能力。

6. 引进计算机仿真技术,将计算机虚拟实验与传统教学设备实验有机结合,提供给学生先进的实验技术和发挥想象力、创造力的空间。

本书由李爱军和郑昆编写,李爱军编写了模块一、二、三,郑昆编写了模块四。

在本书的编写过程中,编者参考了有关资料和文献,在此向其作者表示衷心的感谢!

由于编者水平有限,且时间仓促,书中难免有疏漏、错误和不足之处,恳请读者批评指正。

编 者

目 录

前言

模块一 单相整流电路	1
项目 1.1 单相半波可控整流电路	1
项目 1.2 单相桥式全控整流电路	21
项目 1.3 单相桥式半控整流电路	35
模块二 三相可控整流电路	46
项目 2.1 三相半波可控整流电路	46
项目 2.2 三相桥式半控整流电路	61
项目 2.3 三相桥式全控整流电路	66
模块三 交流调压电路	76
项目 3.1 单相交流调压电路	76
项目 3.2 三相交流调压电路	85
模块四 基于 MATLAB 软件的电力 电子仿真	92

项目 4.1 MATLAB 软件及电力系统 工具箱的使用	92
项目 4.2 三相半波有源逆变电路及 MATLAB 仿真	112
项目 4.3 三相桥式全控有源逆变电路 及 MATLAB 仿真	122
项目 4.4 降压式直流斩波电路及 MATLAB 仿真	131
项目 4.5 升压式直流斩波电路及 MATLAB 仿真	135
项目 4.6 Cuk 真流斩波电路及 MATLAB 仿真	139
参考文献	145

模块一 单相整流电路

项目 1.1 单相半波可控整流电路

可控整流电路是应用广泛的电能变换电路，它的作用是将交流电变换成大小可以调节的直流电，为直流用电设备供电，如：电炉的温度控制、直流电动机的转速控制、同步发电机的励磁调节、电镀及电解电源等。

可控整流电路的结构型式视用电负载功率大小不同而定。通常小功率（4kW 以下）的负载供电采用单相可控整流，它具有电路简单、投资省、维护方便等优点。对于功率较大的负载，采用三相可控整流电路易于满足负载对高电压、大电流的需求，同时也保证负载上的直流电压脉动小，供电的交流电网三相平衡。本节主要介绍单相半波可控整流电路的基本知识，并完成单相半波可控整流电路的安装和调试。

项目目的

- 1) 理解晶闸管的工作原理，熟悉晶闸管的参数，并对晶闸管进行选择。
- 2) 掌握单相半波可控整流电路在电阻性负载及阻感性负载时的工作原理。
- 3) 掌握单结晶体管触发电路的工作原理。

项目内容

- 1) 晶闸管的测量。
- 2) 双踪示波器的使用。
- 3) 能够独立进行单结晶体管触发电路的安装与调试。
- 4) 能调试出单相半波可控整流电路在电阻性负载及阻感性负载时的工作波形。

相关知识点析

一、晶闸管工作原理的分析

如图 1-1a 所示，晶闸管是具有三个 PN 结的四层三端器件，它的三个 PN 结可以通过合金-扩散法或全扩散法形成，阳极（A）电极板一般采用钼（或钨）片，欧姆接触的钎料是高纯铝（或铝硅合金），阴极（K）和门极（G）由真空镀膜引出电极，镀层有铝、金或银，这样就制成了管芯。经过一定的表面处理，然后将管芯密封在陶瓷外壳内。外壳结构一般有螺栓形、平板形和塑封形，如图 1-1b 所示，这样就制成了器件。晶闸管的电气图形符号如图 1-1c 所示。

对于平板形晶闸管，它的两个平面分别是阳极和阴极，用两个互相绝缘的散热器把晶闸管紧紧地夹在中间，从细辫子线引出门极，用于额定电流 200A 以上。对于螺栓形晶闸管，螺栓是阳极 A，与散热器紧密连接，粗辫子线是阴极 K，细辫子线是门极 G，一般用于额定电流为 10 ~ 200A 以上。对于塑封形晶闸管，左边引脚是阴极，中间是阳极，右边是门极，

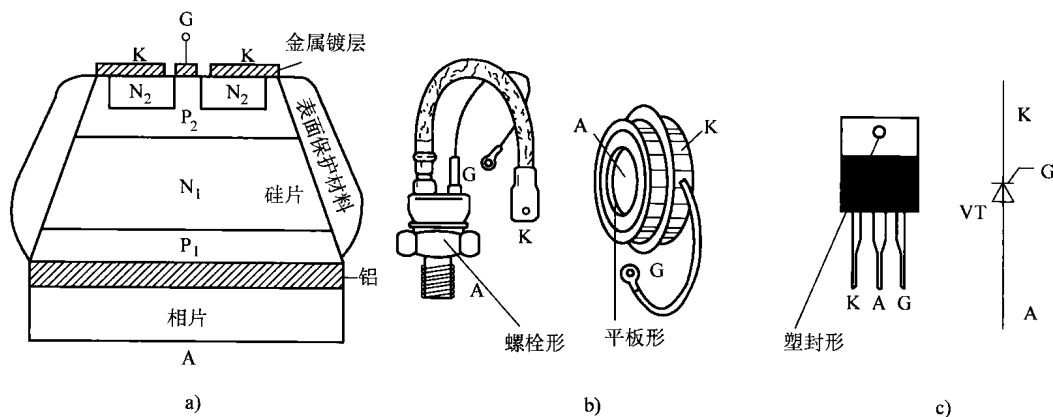


图 1-1 晶闸管的基本结构、外形及电气图形符号

a) 基本结构 b) 外形 c) 电气图形符号

用于额定电流 10A 以下。

晶闸管的管芯是 P_1 、 N_1 、 P_2 、 N_2 四层半导体，形成三个 PN 结 J_1 、 J_2 和 J_3 ，引出阳极 A、阴极 K 和门极 G，如图 1-2a 所示。若正向电压加于 A—K 极， J_2 结便成反偏，晶闸管中流过很小的漏电流，此状态称为正向阻断。若把电压反向加于 A—K 极， J_1 和 J_3 结便成反偏，晶闸管也只流过很小的漏电流，此状态称为反向阻断。以上两种电源接法，晶闸管流过的电流都很小，属于阻断状态。

晶闸管的 PNP 四层结构，可看成由 PNP 和 NPN 两个晶体管互连构成。由图 1-2b 可见，如果有门极电流 I_G 流入晶体管 V_2 的基极，便产生集电极电流 I_{C2} ，它也是 V_1 的基极电流，使 V_1 导通，产生 I_{C1} ， I_{C1} 加上 I_G 进一步加大 V_2 的基极电流，从而就形成强烈的正反馈，最后 V_1 和 V_2 都处于饱和导通状态，即晶闸管饱和导通。

此时如果撤掉外电路流入门极的电流 I_G ，晶闸管由于内部已形成了强烈的正反馈会仍然维持导通状态。而若要使晶闸管关断，必须去掉阳极所加的正向电压，或者给阳极施加反向电压，或者设法使流过晶闸管的电流降低到接近于零的某一数值以下，晶闸管才能关断。所以，将晶闸管的驱动过程称为触发，而把产生流入门极的触发电流 I_G 的电路称为门极触发电路。也正是由于通过其门极只能控制其开通，不能控制其关断，晶闸管才被称为半控型器件。

综上所述，可以得出晶闸管的工作特性为：

1) 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，晶闸管均不导通，只有很小的反向漏电流流过晶闸管，这种状态称为反向阻断状态。

2) 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。

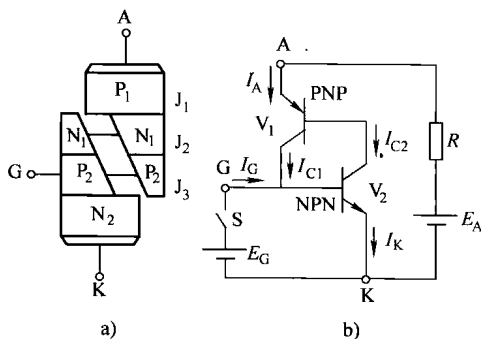


图 1-2 晶闸管的双晶体管模型及其工作原理

a) 双晶体管模型 b) 工作原理

3) 当晶闸管承受正向阳极电压时, 门极加上正向触发电压, 晶闸管导通, 这种状态称为正向导通状态。这就是晶闸管闸流特性, 即可控特性。

4) 晶闸管一旦导通后并维持阳极电压不变, 即使撤除触发电压, 晶闸管依然处于导通状态, 即门极对晶闸管不再具有控制作用。

二、主电路晶闸管的选择

在实际使用过程中, 往往要根据工作条件对晶闸管进行合理选择, 以达到满意的技术、经济效益。正确选择晶闸管主要包括两个方面: 一是要根据情况确定所需晶闸管的额定值; 二是根据额定值确定晶闸管的型号。

晶闸管的各项额定参数在晶闸管生产后, 由厂家经过严格测试而确定。而作为使用者, 只需要能够正确地选择晶闸管即可。

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 1000V 以下, 每 100V 为一级; 电压在 1000 ~ 3000 V, 每 200V 为一级。其标准电压等级见表 1-1。

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	2000
2	200	9	900	22	2200
3	300	10	1000	24	2400
4	400	12	1200	26	2600
5	500	14	1400	28	2800
6	600	16	1600	30	3000
7	700	18	1800		

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, 因此在选择晶闸管时, 应当使晶闸管的额定电压至少为实际工作时可能承受的最大电压 U_{TM} 的 2 ~ 3 倍, 即

$$U_{Tn} \geq (2 \sim 3) U_{TM} \quad (1-1)$$

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。但是晶闸管的额定电流又与流过晶闸管的有效电流 I_{Tn} 有关, 两者的关系为

$$I_{Tn} = 1.57 I_{T(AV)} \quad (1-2)$$

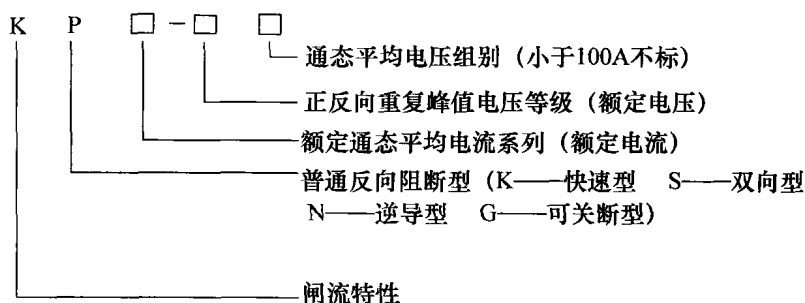
在实际选择晶闸管时, 其额定电流的确定一般按以下原则: 晶闸管的额定电流应大于或等于其所在电路中可能流过的最大电流的有效值 I_{TM} , 取 1.5 ~ 2 倍的余量, 即

$$1.57 I_{T(AV)} = I_{Tn} \geq (1.5 \sim 2) I_{TM} \quad (1-3)$$

$$\text{所以} \quad I_{T(AV)} \geq (1.5 \sim 2) \frac{I_{TM}}{1.57} \quad (1-4)$$

3. 晶闸管的型号

根据国家的有关规定, 普通晶闸管的型号及含义如下:



例如, 本节中晶闸管型号的确定步骤为:

- 1) 单相半波可控整流电路晶闸管可能承受的最大电压为

$$U_{TM} = \sqrt{2}U_2 = \sqrt{2} \times 220V \approx 311V \quad (1-5)$$

- 2) 考虑 2 ~ 3 倍的余量, 即

$$(2 \sim 3)U_{TM} = (2 \sim 3) \times 311V = 622 \sim 933V \quad (1-6)$$

- 3) 确定所需晶闸管的额定电压等级。因为电路无储能元器件, 所以选择电压等级为 8 的晶闸管就可以满足正常工作的需要。

- 4) 确定流过晶闸管电流的有效值。在单相半波可控整流电路中, 当 $\alpha = 0^\circ$ 时, 流过晶闸管的电流最大, 且电流的有效值是平均值的 1.57 倍。由前面的分析可以得到流过晶闸管的平均电流为

$$I_d = 0.45 \frac{U_2}{R_d} \frac{1 + \cos\alpha}{2} = 0.45 \times \frac{220V}{900\Omega} \times \frac{1 + \cos 0}{2} = 0.11A \quad (1-7)$$

由此可得, 当 $\alpha = 0^\circ$ 时, 流过晶闸管电流的最大有效值为

$$I_{TM} = 1.57I_d = 1.57 \times 0.11A = 0.1727A \quad (1-8)$$

- 5) 考虑 1.5 ~ 2 倍的余量。

- 6) 确定晶闸管的额定电流 $I_{T(AV)}$ 。因为电路无储能元器件, 所示选择额定电流为 1A 的晶闸管就可以满足正常工作的需要了。

由以上分析可以确定晶闸管应选用的型号为 KP1-8。

4. 门极参数 (门极触发电流 I_{GT} 和门极触发电压 U_{GT})

室温下, 在晶闸管的阳极和阴极间加上 6V 的正向阳极电压, 晶闸管由截止状态转为导通状态所需的最小门极电流, 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} 。一般为了保证晶闸管的可靠导通, 常采用触发电流比规定的触发电流大 3 ~ 5 倍且前沿陡峭的强触发脉冲。

三、单相半波可控整流电路的工作原理

用晶闸管组成的可控整流电路有多种形式, 电路的负载有电阻、电感及具有反电动势的负载等。负载不同, 电路形式不同, 可控整流电路的工作情况也不一样。图 1-3a 所示为单相半波可控整流电路电阻性负载, 它由晶闸管 VT_1 、负载电阻 R 及单结晶体管触发电路组成。

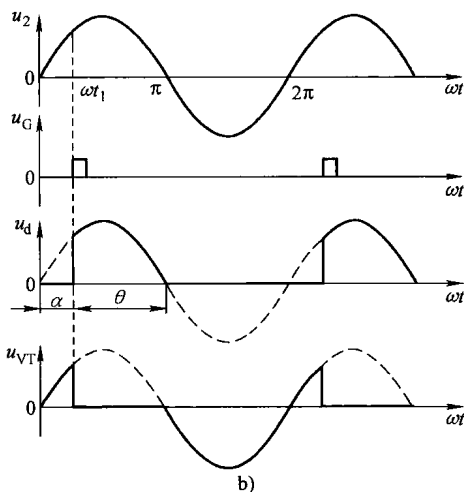
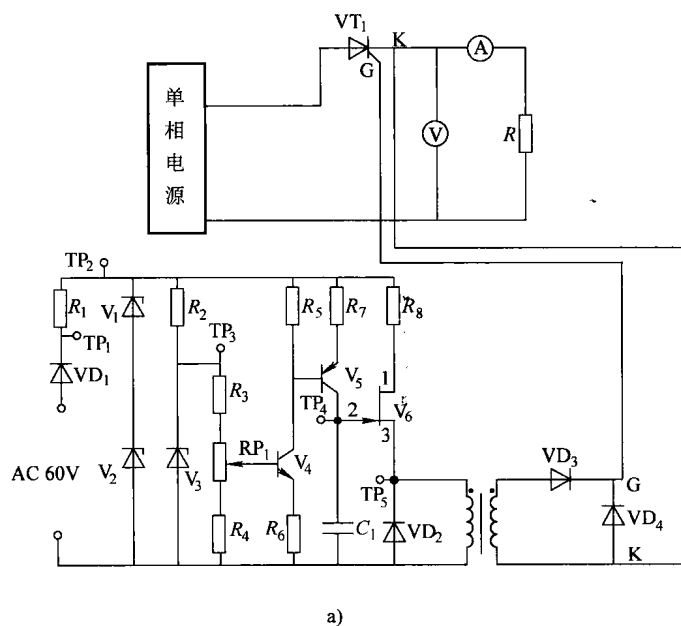


图 1-3 单相半波可控整流电阻性负载电路及波形
a) 电阻性负载电路 b) 电阻性负载波形

1. 电阻性负载

电炉、白炽灯等均属于电阻性负载。电阻性负载的特点是负载两端电压波形和流过的电流波形相似，电流、电压均允许突变。

设 u_d 、 i_d 为整流输出电压和负载电流的瞬时值， u_2 为单相电源输出电压， u_{VT} 、 i_{VT} 分别为晶闸管两端电压和流过晶闸管电流的瞬时值。

交流电压通过电阻 R 施加到晶闸管的阳极和阴极两端，在 $0 \sim \pi$ 区间的 ωt_1 之前，晶闸管虽然承受正向电压，但因触发电路尚未向门极送出触发脉冲，所以晶闸管仍保持阻断状态，无直流电压输出。

在 ωt_1 时刻，触发电路向门极送出触发脉冲 u_g ，晶闸管被触发导通。若不计晶闸管电压

降的影响,则负载电阻 R 两端的电压波形 u_d 就是单相电源输出电压 u_2 的波形,流过负载的电流 i_d 波形与 u_d 的波形相似。由于晶闸管以及负载电阻是串联的,故 u_d 波形也就是流过晶闸管的电流 i_{VT} 及流过负载电阻 R 两端的电压 u_d 的波形,如图 1-3b 所示。

在 $\omega t = \pi$ 时, u_2 下降到零,晶闸管因阳极电流也下降到零而被关断,电路无输出。在 u_2 的负半周即 $\pi \sim 2\pi$ 区间,由于晶闸管承受反向电压而处于反向阻断状态,负载两端电压 u_d 为零。 u_2 的下一个周期情况与上面所述相同,循环往复。

在单相半波可控整流电路中,从晶闸管开始承受正向电压,到触发脉冲出现之间的电角度称为触发延迟角(用 α 表示)。晶闸管在一周期内导通的电角度称为导通角(用 θ 表示),如图 1-3b 所示。

在单相半波可控整流电阻性负载电路中,触发延迟角 α 的控制范围为 $0 \sim \pi$,对应的导通角 θ 的可变范围是 $\pi \sim 0$,两者关系为 $\alpha + \theta = \pi$ 。直流输出电压平均值为

$$U_d = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2} U_2 \sin \omega t d(\omega t) = \frac{\sqrt{2} U_2}{2\pi} (1 + \cos \alpha) = 0.45 U_2 \frac{1 + \cos \alpha}{2} \quad (1-9)$$

当 $\alpha = 0$ 时,整流输出电压平均值最大,用 U_{d0} 表示, $U_d = U_{d0} = 0.45 U_2$ 。随着 α 增大, U_d 减小,当 $\alpha = \pi$ 时, $U_d = 0$,该电路中晶闸管 VT_1 的 α 范围为 180° 。从图 1-3b 所示波形可知, α 减小, U_d 增大;反之, U_d 减小。可见,调节 α 即可控制 U_d 的大小。这种通过控制触发脉冲的相位来控制直流输出电压大小的方式称为相位控制方式,简称相控方式。

2. 阻感性负载

实际生产中,更常见的负载是既有电阻也有电感,当负载中感抗 ωL 与电阻 R 相比不可忽略时即为阻感性负载。若 $\omega L \gg R$,则负载主要表现为电感性,称为电感性负载。例如,直流电动机的励磁线圈、滑差电动机电磁离合器的励磁线圈以及输出串联平波电抗器的负载等,均属于电感性负载。电感对电流变化有阻碍作用。流过电感器件的电流变化时,在其两端产生感应电动势 $L di/dt$,它的极性是阻止电流变化的。当电流增加时,它的极性阻止电流增加;当电流减小时,它的极性反过来阻止电流减小。这使得流过电感的电流不能发生突变,这是阻感性负载的特点。为了便于分析,通常电阻与电感分开,视为电阻串联电感形式的负载,如图 1-4a

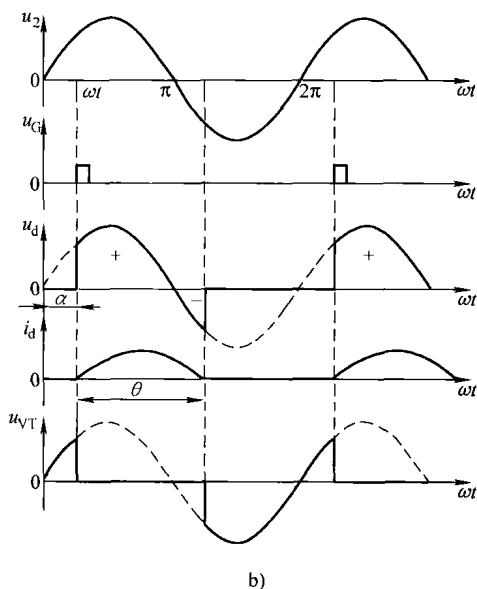
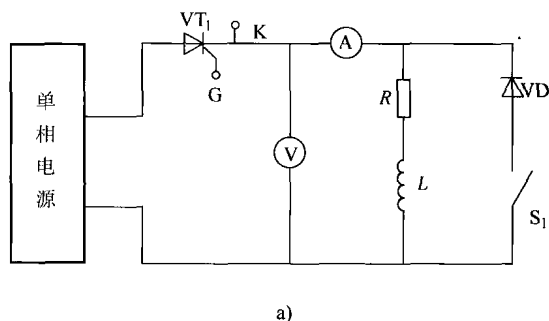


图 1-4 单相半波可控整流阻感性负载电路及波形
a) 阻感性负载电路 b) 阻感性负载波形

所示。

(1) 无续流二极管时(图 1-4a 中开关 S_1 断开时) 电感线圈是储能元件, 当电流流过线圈时, 该线圈就储存磁场能量, 流过的电流越大, 线圈储存的磁场能量就越大。当 i_d 减小时, 电感线圈将所储存的磁场能量释放出来, 试图维持原有的方向电流。这就是电感对电流的阻碍作用, 因而流过电感中的电流是不能突变的。当流过电感线圈的电流变化时, 电感两端产生感应电动势, 其方向总是阻止电流的变化。

电感线圈既是储能元件, 又是电流的滤波元件, 它使负载电流波形平滑。图 1-4b 所示为单相半波可控整流阻感性负载电路波形。在 $0 \leq \omega t \leq \omega t_1$ 区间, u_2 虽然为正, 但晶闸管无触发脉冲而不导通, 负载上的电压 u_d 、电流 i_d 均为零, 晶闸管承受着电源电压 u_2 。当 $\omega t = \omega t_1 = \alpha$ 时, 晶闸管被触发导通, 电源电压 u_2 突然加在负载上, 由于电感性负载中的电流不能突变, 电路需经过一段过渡过程, 此时电路电压瞬时值方程为

$$u_2 = L_d \frac{di_d}{dt} + i_d R_d = u_L + u_R \quad (1-10)$$

在 $\omega t_1 \leq \omega t \leq \omega t_2$ 区间, 晶闸管被触发导通后, 由于 L 的作用, 电流 i_d 只能从零逐渐增大。当到 ωt_2 时, i_d 已上升到最大值, 即 $di_d/dt = 0$ 。所以 $u_L = 0$, $u_2 = I_d R_d = u_R$ 。这段时间电源 u_2 不仅要向负载 R 供给有功功率, 而且还要向电感线圈 L 供给磁场能量的无功功率。

在 $\omega t_2 \leq \omega t \leq \omega t_3$ 区间, 由于 u_2 继续在减小, 所以 i_d 也逐渐减小。在电感线圈 L 作用下, i_d 的减小是要滞后于 u_2 的减小。这段时间 L 两端的感应电动势方向是阻碍 i_d 减小的, 如图 1-5 所示。负载 R 所消耗的能量, 除电源电压 u_2 供给外, 还有部分是由电感线圈 L 所释放的能量供给。这区间电路电压瞬时值方程为

$$u_2 + L_d \frac{di_d}{dt} = i_d R_d \quad (1-11)$$

在 $\omega t_3 \leq \omega t \leq \omega t_4$ 区间, u_2 过零后开始变负, 对晶闸管来说是反向电压, 但是, 由于 i_d 的减小在 L 两端所产生的电动势 u_L 极性对晶闸管是正向电压。故只要 u_L 略大于 u_2 , 晶闸管就仍然承受着正向电压而继续导通, 直至 i_d 减小到零才被关断。在这区间 L 不断释放出磁场能量, 除部分继续向负载电阻 R 提供消耗能量外, 其余就回馈给交流电网。此区间电路电压瞬时值方程为

$$u_L = L_d \frac{di_d}{dt} = u_2 + i_d R_d \quad (1-12)$$

当 $\omega t = \omega t_4$ 时, $i_d = 0$, 即 L 磁场释放完毕, 晶闸管被关断。此后, 周而复始。

(2) 接续流二极管时(图 1-4a 中开关 S_1 闭合时) 为了使 u_2 过零变负时能及时地关断晶闸管, u_d 波形不出现负值, 又能给电感线圈 L 提供续流的旁路, 可以在整流输出端并联二极管, 如图 1-4a 所示。由于该二极管是为电感性负载在晶闸管关断时提供续流电路, 故将此二极管简称续流二极管, 用 VD 表示。

在接有续流二极管的阻感性负载单相半波可控整流电路中, 当 u_2 过零变负时, 续流二

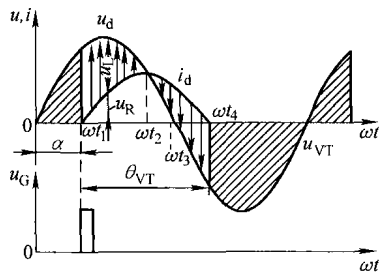


图 1-5 单相半波可控整流阻感性负载电路波形

极管承受正向电压而导通,晶闸管因承受反向电压而关断。 i_d 就改经续流二极管而继续流通。续流期间续流二极管的管电压降可忽略不计,所以负载电压波形 u_d 与电阻性负载的电压波形相同。但是流过负载的电流 i_d 的波形就大不相同了,对于大电感而言,流过负载的电流 i_d 不但连续而且波动很小。电感 L 越大, i_d 波形越接近于一条水平线,其值为 $I_d = U_d/R_d$,如图1-6所示。负载电流由晶闸管和续流二极管共同分担,晶闸管导通期间,负载电流从晶闸管流过;续流期间,负载电流经续流二极管形成电路。流过晶闸管电流 i_{VT} 的波形与流过续流二极管电流 i_{VD} 的波形均近似为方波。晶闸管和续流二极管可能承受的最大正反向电压为 $1.414U_2$,移相范围与阻性负载相同,即 $0 \sim \pi$ 。

3. 触发电路

本节的触发电路可以选用单结晶体管触发电路、正弦波同步移相触发电路和锯齿波同步移相触发电路。这里选择单结晶体管触发电路为晶闸管提供触发脉冲,其电路原理图如图1-7所示。

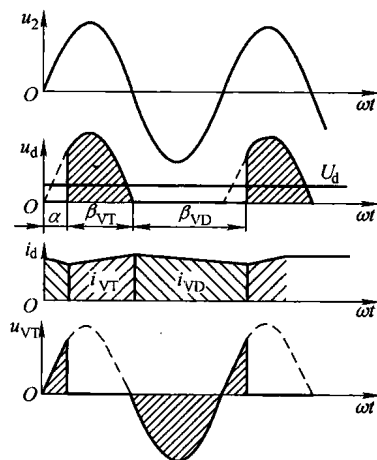


图1-6 有续流二极管的单相半波可控整流电路

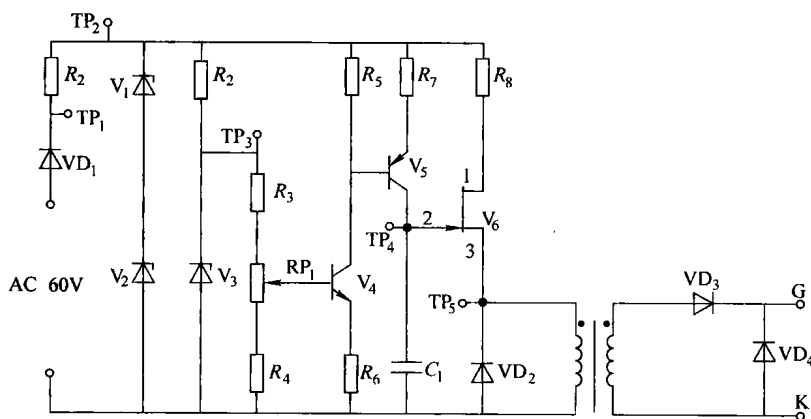


图1-7 单结晶体管触发电路原理图

利用单结晶体管的负阻特性和 RC 的充放电特性,可组成频率可调的自激振荡电路。图1-7中 V_6 为单结晶体管,其常用的型号有BT33和BT35两种,由 V_5 的等效电阻和 C_1 组成 RC 充电电路,由 C_1 - V_6 -脉冲变压器组成电容放电电路,调节 RP_1 即可改变 RC 充电电路中的等效电阻。由同步变压器二次侧输出60V的交流同步电压,经 VD_1 半波整流,再由稳压二极管 V_1 、 V_2 进行削波,从而得到梯形波电压,其过零点与电源电压的过零点同步,梯形波通过 R_7 及 V_5 的等效可变电阻向电容 C_1 充电,当充电电压达到单结晶体管的峰值电压 U_p 时,单结晶体管 V_6 导通,电容通过脉冲变压器一次侧放电,脉冲变压器二次侧输出脉冲。同时由于放电时间常数很小, C_1 两端的电压很快下降到单晶体管的谷点电压 U_v ,使 V_6 关断, C_1 再次充电,周而复始,在电容 C_1 两端呈现锯齿波形,在脉冲变压器二次侧输出尖脉冲。在一个梯形波周期内, V_6 可能导通、关断多次,但只有输出的第一个触发脉冲对晶闸管的触发时刻起作用。充电时间常数由电容 C_1 和等效电阻等决定,调节 RP_1 改变 C_1 的充

电的时间，控制第一个尖脉冲的出现时刻，实现脉冲的移相控制。

电路中晶闸管能够被触发导通是因为触发脉冲在晶闸管阳极电压为正的区间内出现。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，以确保触发电路能够在晶闸管需要脉冲的时刻正确送出脉冲。这种正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。

在本节中，触发电路与主电路是分别接在同一变压器的两个二次绕组上的，这就保证了触发电路的输入电压信号经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，从而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触发延迟角 α 的大小是相同的（起同步作用），其主电路与触发电路的相位对应关系如图 1-8 所示。

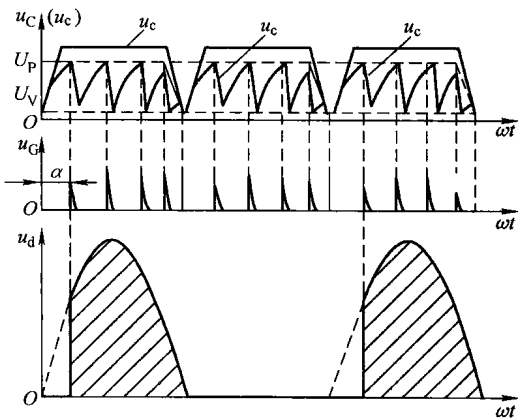


图 1-8 主电路与触发电路的相位对应关系

设备、工具和材料准备

- (1) 工具 电工通用工具、电烙铁、镊子等。
- (2) 仪表 MF47 型万用表、双踪示波器。
- (3) 器材 训练器材见表 1-2、表 1-3。

表 1-2 主电路训练器材

序号	符号	名称	型号与规格	件数
1	VT_1	晶闸管	KP1-8	1
2	R	电阻	900Ω	2
3	L	电感	700mH	1

表 1-3 触发电路训练器材

序号	符号	名称	型号与规格	件数
1	R_1	电阻	560Ω/8W	1
2	R_2	电阻	1kΩ	1
3	$R_3、R_4、R_5、R_6$	电阻	2kΩ	4
4	R_7	电阻	2.2kΩ	1
5	R_8	电阻	300Ω/1W	1
6	RP_1	电位器	4kΩ	1
7	C_1	电容	0.022μF	1
8	$VD_1、VD_2、VD_3、VD_4$	二极管	1N4007	4
9	$V_1、V_2、V_3$	稳压二极管	1N4738	3

(续)

序号	符号	名称	型号与规格	件数
10	V_6	单结晶体管	BT350J	1
11	V_5	晶体管	9012	1
12	V_4	晶体管	9013	1

操作步骤

一、技能训练要求

- 1) 根据要求完成元器件选择，并能够运用仪表对元器件进行简单测试。
- 2) 在规定的时间内完成电路的安装、焊接、调试等工作，并符合焊接和电气安装的工艺要求。

二、技能训练内容

技能训练1 晶闸管的引脚辨别

晶闸管是一种由硅单晶材料制成的大功率半导体元器件，其管芯由四层半导体材料组成，具有三个 PN 结，实物图如图 1-9a 所示，各引脚名称标于图中，分别为：阳极（A）、阴极（K）和门极（G）。晶闸管的图形符号如图 1-9b 所示。

在实际的使用过程中，首先需要对晶闸管的好坏进行简单的判断，一般用万用表进行判别。

1. 正常情况

- 1) 将万用表置于 $R \times 100$ 挡，红表笔接晶闸管的阳极，黑表笔接晶闸管的阴极，观察指针摆动情况，如图 1-10 所示。
- 2) 将黑表笔接晶闸管的阳极，红表笔接晶闸管的阴极，观察指针摆动情况，如图 1-11 所示。

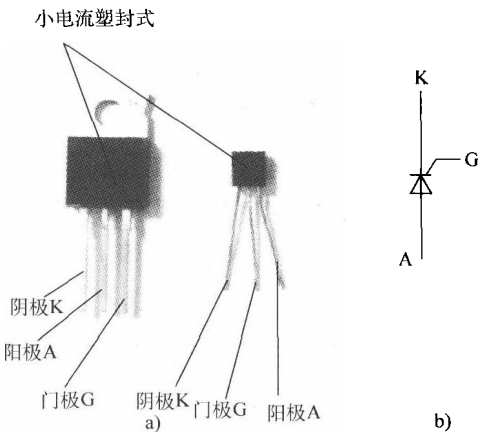


图 1-9 晶闸管实物图及图形符号
a) 实物图 b) 图形符号

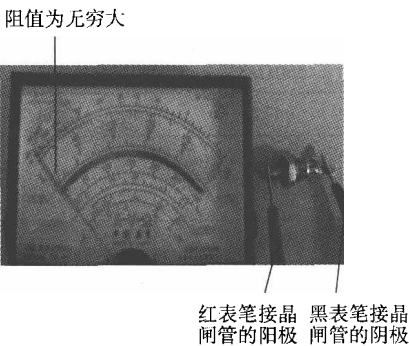


图 1-10 红表笔接阳极，黑表笔接阴极

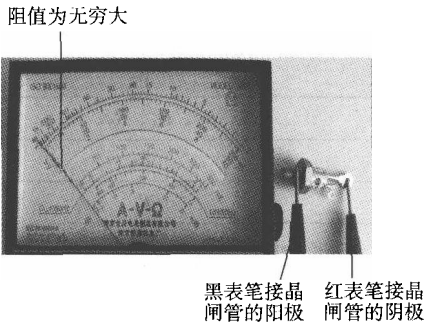


图 1-11 黑表笔接阳极，红表笔接阴极

分析原因：因为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，至少有一个 PN 结处于反向阻断状态，因此正反向阻值均为无穷大。

实测结果：正反向阻值均为无穷大。

3) 红表笔接晶闸管的门极，黑表笔接晶闸管的阴极，观察指针摆动情况，如图 1-12 所示。

4) 黑表笔接晶闸管的门极，红表笔接晶闸管的阴极，观察指针摆动情况，如图 1-13 所示。理论结果：当黑表笔接门极，红表笔接阴极时，万用表显示的阻值较小；当红表笔接门极，黑表笔接阴极时，万用表显示的阻值略大一些。

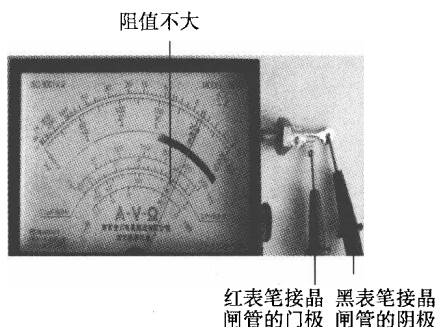


图 1-12 红表笔接门极，黑表笔接阴极

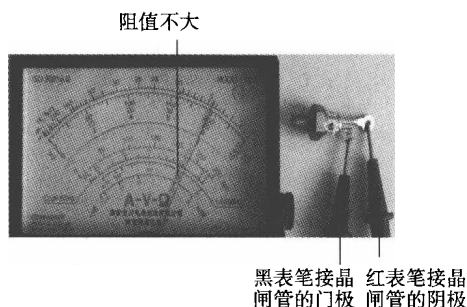


图 1-13 黑表笔接门极，红表笔接阴极

分析原因：在晶闸管内部门极与阴极之间反并联一只二极管，对加到门极与阴极之间的反向电压进行限幅，防止晶闸管门极与阴极之间的 PN 结反向击穿。

实测结果：两次测量的阻值均不大。

2. 故障情况

1) 用 $R \times 1k$ 或 $R \times 100$ 挡测量阳极与阴极之间的电阻，电阻值很小表明晶闸管已经损坏，如图 1-14 所示。

2) 用 $R \times 1k$ 或 $R \times 100$ 挡，测门极和阴极之间的 PN 结的正反向电阻，如出现正向阻值接近于零值或为无穷大，表示门极与阴极之间的 PN 结已经损坏。反向阻值应很大，但不能为无穷大。正常情况是反向阻值明显大于正向阻值，如图 1-15 所示。

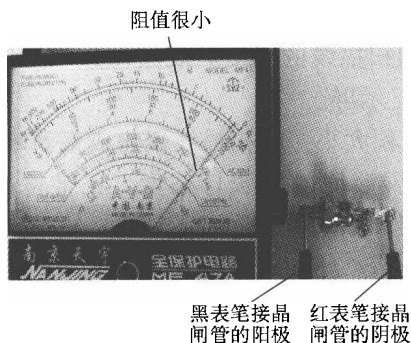


图 1-14 黑表笔接阳极，红表笔接阴极

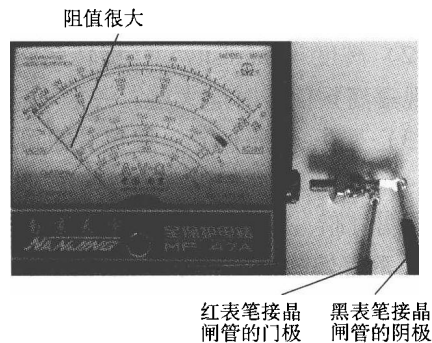


图 1-15 红表笔接门极，黑表笔接阴极

技能训练2 双踪示波器的使用

示波器种类、型号很多,功能也不同。使用较多的是 20MHz 或者 40MHz 的双踪示波器。这些示波器用法大同小异。本部分以型号 YB4320C 介绍示波器的常用功能。双踪示波器的屏幕及部分操作面板如图 1-16 所示。

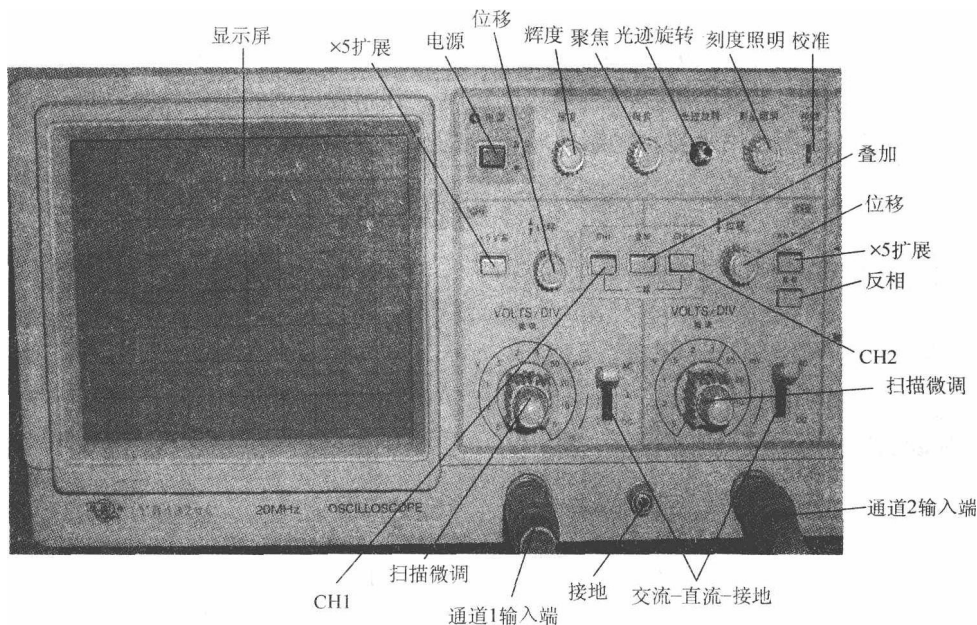


图 1-16 双踪示波器的屏幕及部分操作面板

1. 显示屏

显示屏是示波管的显示部分。屏的水平方向和垂直方向各有多条标度线,指示出信号波形的电压和时间之间的关系。水平方向指示时间,垂直方向指示电压。水平方向分为 10 格,垂直方向分为 8 格,每格又分为 5 份。垂直方向标有 0%、10%、90%、100% 等标志,水平方向标有 10% 和 90% 标志,供测直流电平、交流信号幅度、延迟时间等参数使用。根据被测信号在屏幕上占的格数乘以适当的比例常数 (V/DIV, TIME/DIV) 能得出电压值与时间值。

2. 示波管和电源系统

(1) 电源 (Power) 示波器主电源开关。当按下此开关时,电源指示灯亮,表示电源接通。

(2) 辉度 (Intensity) 旋转此旋钮能改变光点和扫描线的亮度。观察低频信号时可小些,观察高频信号时应大些。一般不应太亮,以保护显示屏。

(3) 聚焦 (Focus) 聚焦旋钮可调节电子束截面积大小,将扫描线聚焦成最清晰状态。

(4) 标尺亮度 (Illuminance) 此旋钮调节显示屏后面的照明灯亮度。正常室内光线下,照明灯暗一些好。室内光线不足的环境中,可适当调亮照明灯。

3. 垂直偏转因数和水平偏转因数 (见图 1-17)

(1) 垂直偏转因数选择 (VOLTS/DIV) 和微调 在单位输入信号作用下,光点在屏幕上偏移的距离称为偏移灵敏度,这一定义对 X 轴和 Y 轴都适用。灵敏度的倒数称为偏转因数。垂直灵敏度的单位是为 cm/V、cm/mV,或者 DIV/mV、DIV/V。垂直偏转因数的单位