

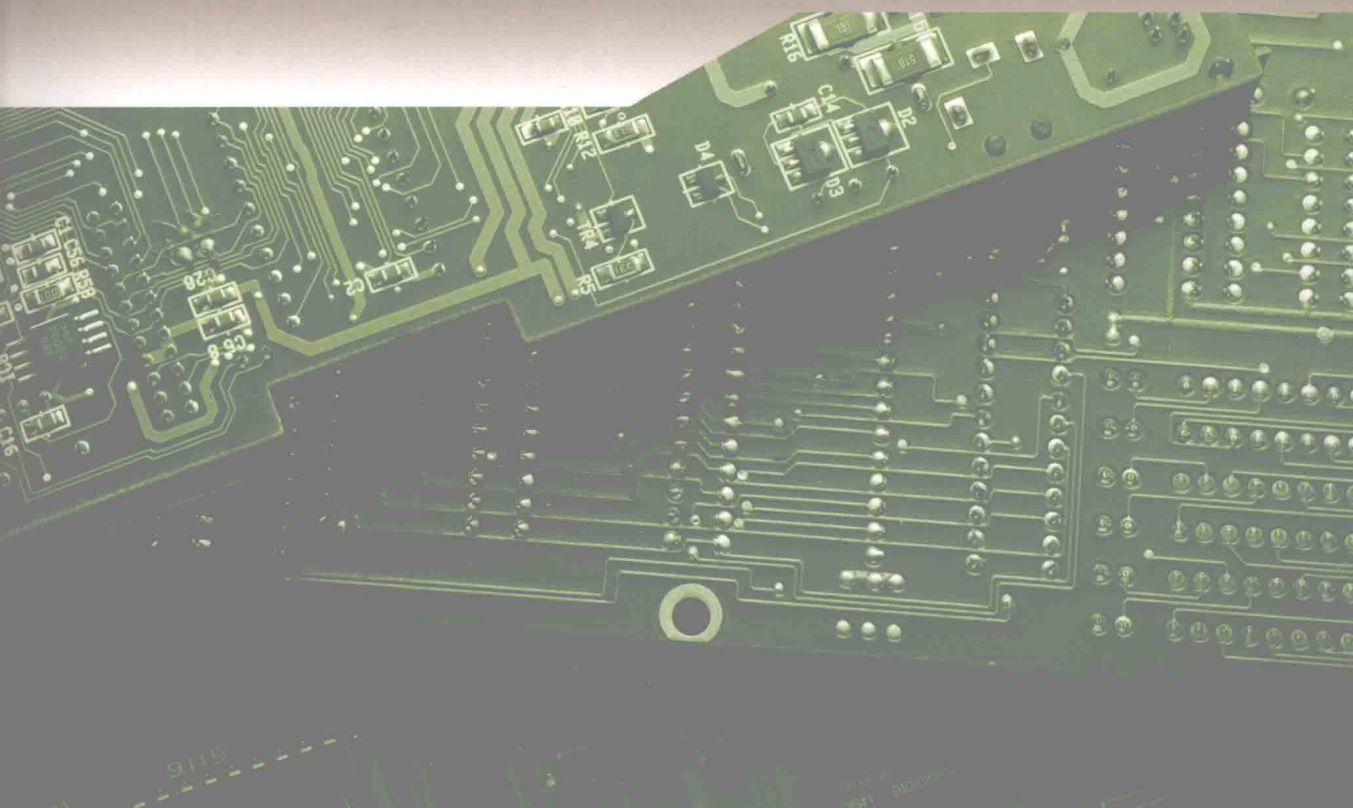


高职高专“十一五”规划教材

机械电子类

电力电子技术

周玲 主编



高职高专“十一五”规划教材·机电类

电力电子技术

主 编	周 玲		
副主编	曲昀卿	伍良常	陈 斗
	张玉芸	戴焰明	
主 审	赵承荻		

北 京
冶金工业出版社
2008

图书在版编目 (CIP) 数据

雅思考前 15 天·阅读/邓和刚编. —2 版 (修订本).
北京: 北京语言大学出版社, 2008.11
ISBN 978-7-5619-2225-5

I. 雅… II. 邓… III. 英语—阅读教学—高等教育—自学参考资料 IV. H310.41

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 173682 号

书 名: 雅思考前 15 天·阅读
责任印制: 陈 辉

出版发行: **北京语言大学出版社**

社 址: 北京市海淀区学院路 15 号 邮政编码: 100083

网 址: www.blcup.com

电 话: 发行部 82303648 /3591 /3651

编辑部 82303223

读者服务部 82303653 /3908

网上订购电话 82303668

客户服务信箱 service@blcup.net

印 刷: 北京外文印刷厂

经 销: 全国新华书店

版 次: 2009 年 1 月第 2 版 2009 年 1 月第 1 次印刷

开 本: 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张: 16.5

字 数: 408 千字 印数: 1—3000 册

书 号: ISBN 978-7-5619-2225-5 / H·08214

定 价: 29.80 元

凡有印装质量问题, 本社负责调换。电话: 82303590

前 言

本书为高职高专“十一五”规划教材。本书编写的指导思想和原则是：以培养综合素质为基础，以能力为本位，把提高学生的职业技能放在首位，在保证必要的基础理论知识的前提下，以“用”为核心，突出和加强实践性教学。在保证本学科知识内容体系基本完整的前提下，既紧跟电力电子技术发展的脉搏，反映本学科的先进技术，又遵循高等技术工程应用型人才的培养模式，使教材内容更具有实用性，符合培养应用型专科人才的要求。

电力电子技术集微电子技术、计算机技术、变流技术及控制理论于一身，理论性、实践性都非常强，技术新是特点之一。本教材努力反映电力电子技术方面的新知识、新技术、新产品、新工艺。删掉了一些陈旧的传统内容，为“四新”腾出时间和空间。注意启发和培养学生的创新意识和创新能力，以启迪学生的创新意识，增强学生的发展后劲。

本书共 7 章，可分为两大部分。第一部分主要以晶闸管为主，分别介绍由此器件所构成的电力电子技术中广泛应用的单相可控整流电路、三相可控整流电路以及有源逆变电路。第二部分以新型全控型电力电子器件为主，分别介绍由这些新型器件所构成的直流斩波电路、交流调压电路以及变频电路。本书具有较强的工程实用性。为了加强学生的工程实践能力，每章的后面提供了相关的实训内容及应用实例，还附有大量的习题。

本书可作为高等职业学校、高等专科学校、成人高校及本科院校举办的二级职业技术学院和民办高校电气技术、电气自动化、计算机控制技术等相关专业的教材，也可作为从事电力电子技术专业的工程技术人员和短期培训人员的教学参考用书。

本书由周玲任主编，曲昀卿、伍良常、陈斗、张玉芸、戴焰明任副主编，胡满红、孙涛、张兰红、周献立、张研参加编写。全书由周玲统稿。本书由赵承荻主审，他认真仔细地审阅了全书，并提出了许多宝贵意见，在此表示诚挚谢意。

由于编者水平所限，书中如有不足之处敬请使用本书的师生与读者批评指正，以便修订时改进。如读者在使用本书的过程中有其他意见或建议，恳请向编者(bjzhangxf@126.com)踊跃提出宝贵意见。

编 者

目 录

第 1 章 晶闸管及单相可控整流电路.....1

1.1 晶闸管.....1	
1.1.1 晶闸管的结构及工作原理.....1	
1.1.2 晶闸管的主要参数.....4	
1.1.3 晶闸管的型号及简单 测试方法.....5	
1.2 单相可控整流电路.....7	
1.2.1 单相全控桥式整流电路.....7	
1.2.2 单相半控桥式整流电路.....13	
1.3 晶闸管触发电路.....16	
1.3.1 触发电路的分类和要求.....16	
1.3.2 单结晶体管.....17	
1.3.3 单结晶体管触发电路.....20	
1.4 实训 1 晶闸管的简易测试及导通 关断条件实验.....21	
1.5 实训 2 单相半控桥式整流电路的 研究.....23	
习题.....25	

第 2 章 三相可控整流电路.....27

2.1 三相半波可控整流电路.....27	
2.1.1 电阻性负载.....27	
2.1.2 电感性负载.....31	
2.2 三相全控桥式整流电路.....34	
2.2.1 电阻性负载.....34	
2.2.2 电感性负载.....37	
2.3 集成触发电路.....39	
2.3.1 KC04 集成移相触发器.....39	
2.3.2 六路双脉冲发生器 KC041C.....42	
2.3.3 触发脉冲与主电路 电压的同步.....44	
2.4 三相可控整流电路应用实例.....46	

2.4.1 SCR-200A 晶闸管通用 直流调速系统.....46	
2.4.2 系统工作原理分析.....47	
2.5 实训 3 三相桥式全控整流 电路的研究.....49	
习题.....52	

第 3 章 有源逆变电路.....54

3.1 有源逆变电路基本工作原理.....54	
3.1.1 重物提升, 变流器工作 在整流状态.....54	
3.1.2 重物下降, 变流器工作 在逆变状态.....55	
3.2 三相半波逆变电路.....56	
3.3 三相桥式逆变电路.....58	
3.4 逆变失败原因分析及逆变角 的限制.....60	
3.4.1 逆变失败的原因.....60	
3.4.2 逆变角的限制.....62	
3.5 有源逆变电路应用实例.....63	
3.5.1 低同步串级调速的 基本原理.....63	
3.5.2 高压直流输电.....66	
3.6 实训 4 单相并联逆变器的研究.....66	
习题.....68	

第 4 章 全控型电力电子器件.....70

4.1 可关断晶闸管.....70	
4.1.1 GTO 的结构和工作原理.....70	
4.1.2 GTO 的主要参数.....72	
4.1.3 GTO 的应用.....74	
4.2 电力晶体管.....74	
4.2.1 电力晶体管的结构和工作 原理.....74	

4.2.2 电力晶体管的主要参数	76	5.3.3 升降压斩波电路 (Buck-Boost 电路)	106
4.2.3 电力晶体管的二次击穿 与安全工作区	78	5.3.4 Cuk 斩波电路	107
4.3 电力场效应晶体管	79	5.3.5 Sepic 斩波电路	108
4.3.1 电力 MOSFET 的结构和 工作原理	79	5.3.6 Zeta 斩波电路	108
4.3.2 电力 MOSFET 的主要参数	81	5.4 实训 5 斩波电路的研究	109
4.3.3 MOSFET 的检测方法	81	习题	112
4.4 绝缘栅双极型晶体管(IGBT)	83	第 6 章 交流调压电路	114
4.4.1 绝缘栅双极型晶体管的 基本结构和工作原理	83	6.1 双向晶闸管	114
4.4.2 绝缘栅双极型晶体管的 主要特性	84	6.1.1 双向晶闸管的结构、原理	114
4.4.3 IGBT 的驱动与保护技术	86	6.1.2 双向晶闸管的参数	115
4.4.4 IGBT 检测方法	91	6.1.3 双向晶闸管的使用 注意事项	115
4.5 其他新型电力器件	91	6.2 单相交流调压电路	116
4.5.1 MOS 控制晶闸管(MCT)	92	6.2.1 电阻性负载	116
4.5.2 静电感应晶体管(SIT)	94	6.2.2 电感性负载	118
4.5.3 静电感应晶闸管(SITH)	94	6.3 三相交流调压电路	121
习题	94	6.3.1 不带中性线的三相全波相位 控制的星形联结调压电路	122
第 5 章 直流斩波电路	95	6.4 交流调压电路应用实例	123
5.1 直流斩波电路的基本工作原理	95	6.4.1 交流调光台灯的应用电路	123
5.2 普通晶闸管构成的直流斩波电路	96	6.4.2 电风扇无级调速器	124
5.2.1 普通晶闸管构成的降压 直流斩波器	96	6.5 实训 6 三相交流调压电路的研究	125
5.2.2 普通晶闸管构成的升压 直流斩波器	97	习题	128
5.2.3 普通晶闸管构成的第二 象限直流斩波器	98	第 7 章 变频电路	129
5.2.4 普通晶闸管构成的多象 限直流斩波器	98	7.1 变频电路的基本工作原理	129
5.2.5 普通晶闸管构成的直流 斩波器的换流电路	101	7.1.1 单相输出交—直—交 变频电路	129
5.3 其他直流斩波器	101	7.1.2 单相输出交—交变频电路	130
5.3.1 降压斩波电路 (Buck chopper)	101	7.1.3 两种变频电路的比较	131
5.3.2 升压斩波电路 (Boost 电路)	104	7.2 谐振式变频电路	131
		7.2.1 并联谐振式变频电路	131
		7.2.2 串联谐振式变频电路	133
		7.3 三相桥式变频电路	134
		7.3.1 电压源型桥式变频电路	134

7.3.2 电流源型三相桥式变频 电路.....	137	7.5.4 专用大规模集成电路芯片 形成 SPWM 波.....	148
7.3.3 两种变频电路的特点	139	7.5.5 PWM 变频电路的优点	150
7.4 交—交变频电路	140	7.6 变频电路应用实例	150
7.4.1 方波型交—交变频电路	140	7.6.1 变频技术在空调设备上 的应用	150
7.4.2 正弦波型交—交变频电路	142	7.6.2 变频技术在洗衣机中的 应用	153
7.5 脉宽调制(PWM)型变频电路	144	习题.....	154
7.5.1 脉宽调制变频电路概述	144	参考文献	156
7.5.2 单相 PWM 变频电路	146		
7.5.3 三相桥式 PWM 变频电路	147		

第 1 章 晶闸管及单相可控整流电路

1.1 晶 闸 管

晶闸管全称晶体闸流管，曾称可控硅(Silicon Controlled Rectifier)，简称 SCR。20 世纪 50 年代末问世后逐步发展成了一个大的家族。以后晶闸管获得了迅猛发展，除了它的性能与电压、电流容量不断提高外，还派生出快速晶闸管、可关断晶闸管、逆导晶闸管、光控晶闸管和双向晶闸管等，形成晶闸管系列，已被广泛应用于相控整流、逆变、交流调压和直流变换等领域，成为特大功率低频(200 Hz 以下)装置中的主要器件。现在使用的多是单向晶闸管，即普通晶闸管，由于它问世早，应用极为广泛，因此在无特别说明的情况下，本书所述的晶闸管都为普通晶闸管。

1.1.1 晶闸管的结构及工作原理

1.1.1.1 晶闸管的结构

晶闸管的外形有螺栓型封装和平板型封装两种。其封装形式可分为小电流塑封式、小电流螺栓式、大电流螺栓式和大电流平板式(额定电流在 200A 以上)，如图 1-1(a)、(b)、(c) 所示。晶闸管有 3 个电极，分别是阳极 A、阴极 K 和门极(或称控制极)G，它的图形及文字符号如图 1-1(d)所示。

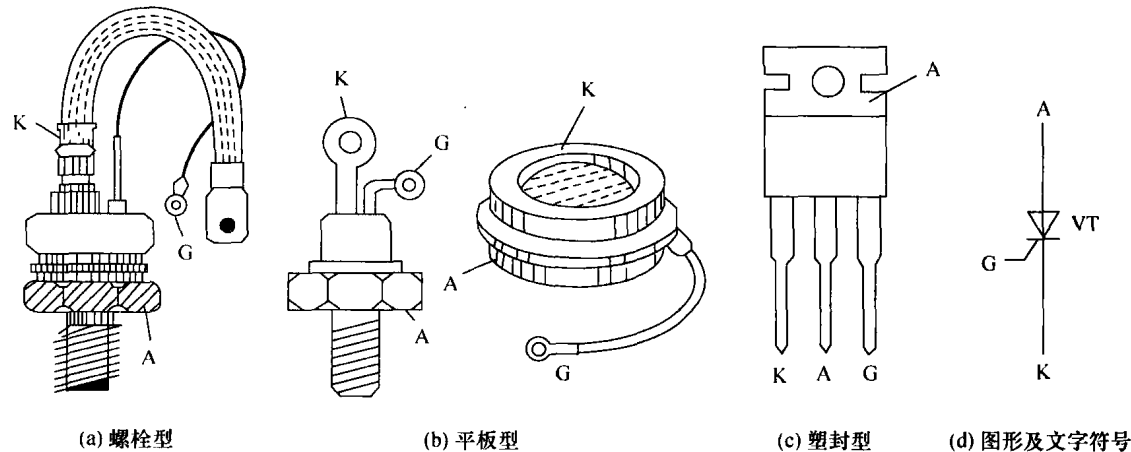


图 1-1 晶闸管的外形及符号

晶闸管是大功率器件，工作时发热大，必须安装散热器。如图 1-2 所示为晶闸管散热器。

1.1.1.2 晶闸管的工作原理

我们通过如图 1-3 所示的电路来说明晶闸管的工作原理。在该电路中，由电源 U_{AA} 、

白炽灯、晶闸管的阳极和阴极组成晶闸管主电路；由电源 U_{GG} 、开关 S 、晶闸管的门极和阴极组成控制电路，也称触发电路。

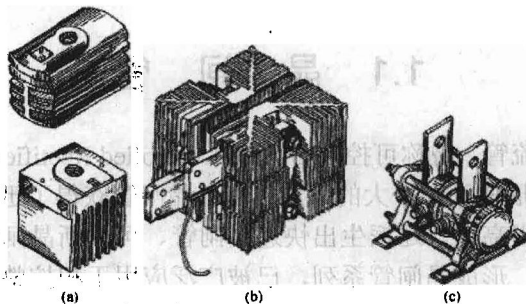


图 1-2 晶闸管散热器

(1) 如图 1-3(a)所示，晶闸管阳极经负载(白炽灯)接电源 U_{AA} 正极，阴极接电源负极，此时晶闸管承受正向电压。在触发电路中与控制极串联的开关 S 断开，灯不亮，说明晶闸管不导通。

(2) 如图 1-3(b)所示，晶闸管的阳极和阴极间加正向电压， S 闭合，但控制极相对于阴极加反向电压，这时灯不亮，说明晶闸管也不导通。

(3) 如图 1-3(c)所示，晶闸管的阳极和阴极间加正向电压， S 闭合，此时控制极相对于阴极加正向电压，这时灯亮，说明晶闸管导通，这一过程称为触发导通。晶闸管导通后去掉控制极上的电压，如图 1-3(d)所示，即开关 S 断开，灯仍然亮，表明晶闸管继续导通。这说明晶闸管一旦导通，控制极就失去了控制作用。

(4) 如图 1-3(e)所示，电路中灯原本是亮的，如果不断地减小阳极电流，当阳极电流小于某一数值之后，灯即灭，说明晶闸管重新关断，这一维持导通的最小电流称为维持电流 I_H ，此时晶闸管处于正向阻断状态。

(5) 如图 1-3(f)所示，控制极与阴极之间加正向电压，阳极加反向电压，此时灯不亮，晶闸管不导通，处于反向阻断状态。

通过上述实验可知，晶闸管导通必须同时具备如下两个条件：

- (1) 晶闸管主电路加正向电压。
- (2) 晶闸管控制电路加合适的正向电压。

普通晶闸管由 4 层半导体(P1、N1、P2、N2)组成，形成 3 个结 J1(P1N1)、J2(N1P2)、J3(P2N2)。并分别从 P1、P2、N2 引出 A、G、K 3 个电极，它和二极管一样，是一种单方向导电的器件，关键是多了一个控制极 G，这就使它具有与二极管完全不同的工作特性。

由于采用扩散工艺，具有三结四层结构的普通晶闸管可以等效成如图 1-4 所示的由两个晶体管 VT1(P1-N1-P2)和 VT2(N1-P2-N2)组成的等效电路。

当晶闸管阳极和阴极之间施加正向电压时，若给门极 G 也加正向电压 U_G ，门极电流 I_G 经晶体管 VT2 放大后成为集电极电流 I_{c2} ， I_{c2} 又是晶体管 VT1 的基极电流，放大后的集电极电流 I_{c1} 进一步使 I_G 增大且又作为 VT2 的基极电流流入。重复上述正反馈过程，两个晶体管 VT1、VT2 都快速进入饱和状态，使晶闸管阳极 A 与阴极 K 之间导通。

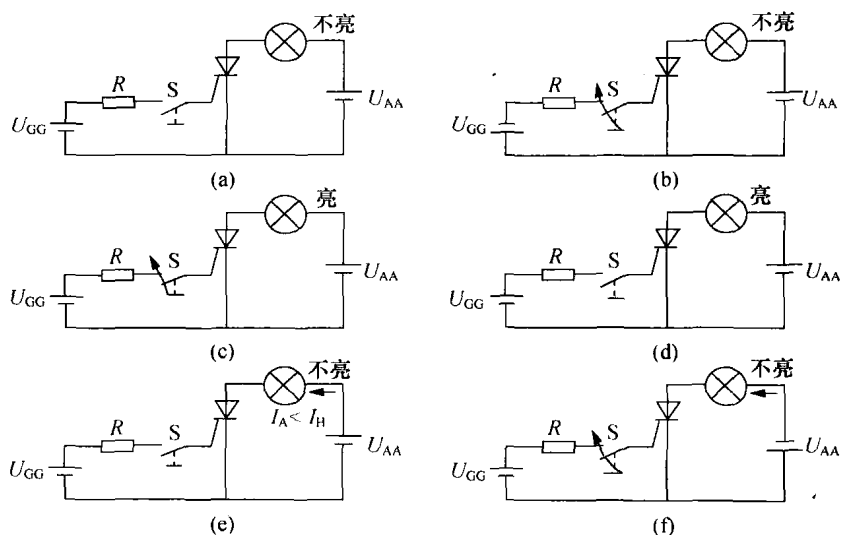


图 1-3 晶闸管工作情况的实验

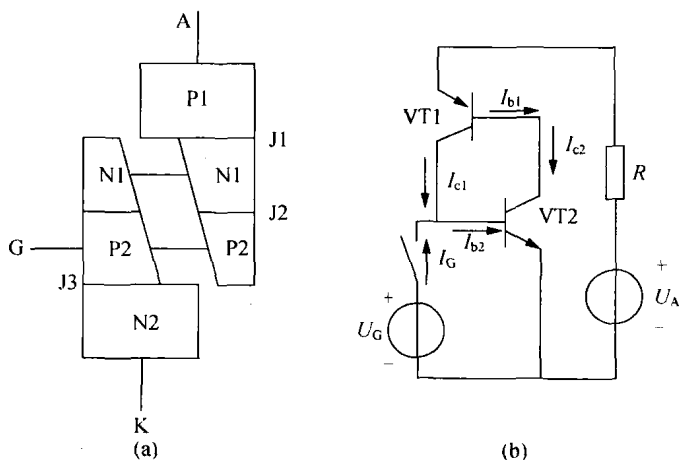


图 1-4 晶闸管的等效电路

$$I_G \uparrow \rightarrow I_{b2} \uparrow \rightarrow I_{c2} (= \beta_2 I_{b2}) \uparrow = I_{b1} \uparrow \rightarrow I_{c1} (= \beta_1 I_{b1}) \uparrow$$

此时若撤除 U_G , VT1、VT2 内部电流仍维持原来的方向, 只要满足阳极正偏的条件, 晶闸管就一直导通。就像二极管一样正向导通。由此可见, 晶闸管与二极管一样具有单向导电特性, 电流只能从阳极流向阴极。与二极管不同的是晶闸管具有正向阻断特性。

当晶闸管 A、K 间承受正向电压, 而门极电流 $I_G=0$ 时, 上述 VT1 和 VT2 之间的正反馈不能建立起来, 晶闸管 A、K 之间只有很小的正向漏电流, 它处于正向阻断状态。当加上正向电压时管子还不能导通, 必须同时加上门极电压, 有足够的门极电流流入后才能使晶闸管正向导通。因此, 晶闸管具有正向导通的可控特性, 这种门极电压对晶闸管正向导通所起的控制作用称为闸流特性, 也称为晶闸管的可控单向导电性。门极电压只能触发晶闸管开通, 不能控制它的关断, 从这个意义上讲, 晶闸管是半控型电力器件。

综上所述,我们可得出如下结论。

(1) 在晶闸管阳极和阴极之间外加正向电压,但控制极不加触发电压时,晶闸管一般不会导通。

(2) 晶闸管导通需要同时满足两个条件:

1) 阳极和阴极外加正向电压;

2) 控制极外加一定幅度的正触发电压。

(3) 普通的晶闸管一旦导通,触发信号则失去控制作用,只要阳极、阴极间的正向电压存在,即使控制电压减小到零或反向,晶闸管仍导通。

(4) 要使晶闸管从导通变为阻断,必须减小阳极电流或切断正向电压或加反向电压才可以。

1.1.2 晶闸管的主要参数

1.1.2.1 晶闸管的重复峰值电压——额定电压 U_{Te}

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,称为正向重复峰值电压 U_{DRM} (此电压可重复施加,其重复频率为 50 Hz,每次持续时间不大于 10ms)。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,称为反向重复峰值电压 U_{RRM} 。

由于晶闸管工作时,外加电压峰值瞬时超过反向不重复峰值电压即可造成永久损坏,且环境温度升高或散热不良均可能使晶闸管正、反向转折电压下降,特别是在使用中会出现各种过电压,因此,选用元件的额定电压值时,应比实际正常工作时的最大电压大 2~3 倍。

1.1.2.2 晶闸管的额定通态平均电流——额定电流 $I_{T(AV)}$

在环境温度为 40℃和规定的冷却条件下,晶闸管工作在电阻性负载且导通角不小于 170°的单相工频正弦半波电路中,当结温稳定且不超过额定结温时所允许的最大通态平均电流,称为额定通态平均电流,用 $I_{T(AV)}$ 表示,简称为元件的额定电流。

实际应用中应按照流过晶闸管实际波形电流与工频正弦半波平均电流热效应相等(即有效值相等)的原则来选取晶闸管的额定电流,然后根据管子的额定电流(通态平均值)求出元件允许流过的最大有效电流。不论流过晶闸管的电流波形如何,只要流过元件的实际电流最大有效值小于或等于管子的额定有效值,且散热、冷却在规定的条件下,管芯的发热就能限制在允许范围内。

由于晶闸管的电流过载能力比一般电机、电器要小得多,因此,在选用晶闸管额定电流时,根据实际最大的电流计算后至少还要乘以 1.5~2 的安全系数,使其有一定的电流裕量。

1.1.2.3 门极触发电流 I_{GT} 和门极触发电压 U_{GT}

在室温下,晶闸管加 6V 正向阳极电压时,使元件完全导通所必需的最小门极电流称为门极触发电流 I_{GT} 。对应于门极触发电流的门极电压称为门极触发电压 U_{GT} 。门极触发电流、电压的大小必须有一定的范围限制。元件所需的触发电流、电压太小,容易受干扰而造成误触发;元件所需的触发电流、电压太大又会造成触发困难,但即使同一工厂生产的

同一型号的晶闸管, 由于门极特性的差异, 其触发电流、触发电压也相差很大, 所以, 对不同系列的元件只规定了触发电流、电压的上、下限值。例如, 100 A 的晶闸管, 其触发电流、电压分别不应超过 250 mA/4 V, 也不应小于 1mA/0.15 V。

通常每一个晶闸管的铭牌上都标明了其触发电流和电压在常温下的实测值, 但触发电流、触发电压受温度的影响很大。温度升高, I_{GT} 和 U_{GT} 值会显著降低; 温度降低, I_{GT} 和 U_{GT} 值又会增大。为了保证晶闸管的可靠触发, 在实际应用中, 外加门极电压的幅值应比 U_{GT} 大几倍。

1.1.2.4 通态平均电压 $U_{T(AV)}$

在规定环境温度、标准散热条件下, 元件通以正弦半波额定电流时, 阳极与阴极间电压降的平均值称为通态平均电压(又称管压降)。在实际使用中, 从减小损耗和元件发热的角度出发, 应选择 $U_{T(AV)}$ 小的晶闸管。

1.1.3 晶闸管的型号及简单测试方法

1.1.3.1 晶闸管的型号

如图 1-5 所示。如 KP5-7E 表示额定电流为 5 A、额定电压为 700 V 的普通晶闸管。

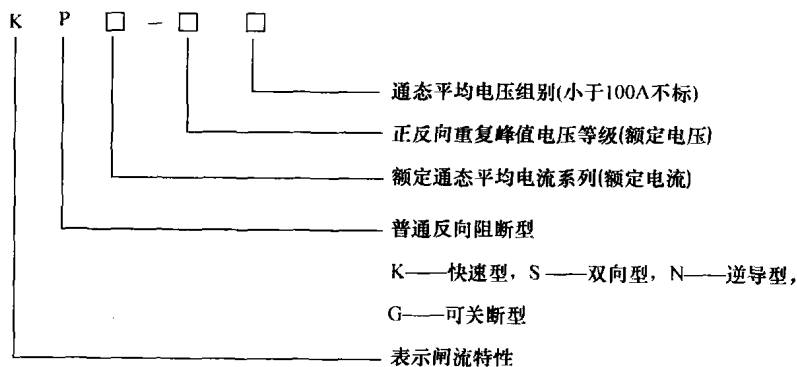


图 1-5 晶闸管的型号

1.1.3.2 晶闸管的简单测试方法

对于晶闸管的 3 个电极, 可以用万用表粗测其好坏。依据 PN 结单向导电原理, 用万用表欧姆挡测试元件的 3 个电极之间的阻值, 可初步判断管子是否完好。如用万用表 $R \times 1k\Omega$ 挡测量阳极 A 和阴极 K 之间的正、反向电阻都很大, 在几百千欧以上, 且正、反向电阻相差很小; 用 $R \times 10$ 或 $R \times 100$ 挡测量控制极 G 和阴极 K 之间的阻值, 其正向电阻应小于或接近于反向电阻, 这样的晶闸管是好的; 如果阳极与阴极或阳极与控制极间有短路, 阴极与控制极间为短路或断路, 则晶闸管是坏的。

【例 1-1】某晶闸管接在 220V 交流回路中, 通过器件的电流有效值为 100A, 应选择什么型号的晶闸管?

解 晶闸管额定电压

$$U_{Tn} = (2 \sim 3)U_{TM} = (2 \sim 3)\sqrt{2} \times 220V = 622 \sim 933V$$

按晶闸管参数系列取 800V，即 8 级。

晶闸管的额定电流

$$I_{T(AV)} = (1.5 \sim 2) \frac{I_T}{1.57} = (1.5 \sim 2) \times \frac{100}{1.57} A = 96 \sim 127 A$$

按晶闸管参数系列取 100A，所以选取晶闸管型号 KP100-8E。

【例 1-2】 现有晶闸管型号为 KP50-7，用于某电路中时，流过的电流波形如图 1-6 所示，试求 I_m 允许多大？

解 KP50-7 晶闸管允许流过的电流有效值为

$$I_T = 1.57 \times I_{T(AV)} = 1.57 \times 50 A = 78.5 A$$

实际流过该管的电流有效值可由下式计算求得

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{3}}$$

当考虑两倍的安全余量时， I_m 的允许值为

$$I_m = \frac{\sqrt{3} \times 78.5}{2} A \approx 68 A$$

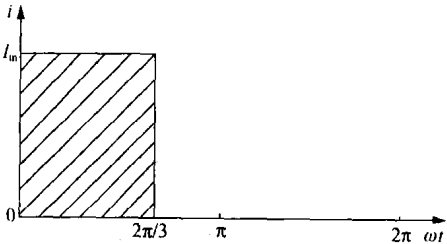


图 1-6 流过晶闸管的电流波形

表 1-1 KP 型晶闸管元件主要额定值

参数 单位 系列	通态 平均 电流	正向重复 峰值电压、 反向重复 峰值电压	正向不重 复平均电 流、反向不 重复平均 电流	额 定 结 温	门极触 发电流	门极 触发 电压	断态电 压临界 上升率	通态电 流临界 上升率	浪涌 电流
	$I_{T(AV)}$	U_{DRM} U_{RRM}	$I_{DS(AV)}$ $I_{RS(A)}$	t_{JM}	I_{GT}	U_{GT}	du/dt	di/dt	I_{TSM}
	A	V	mA	℃	mA	V	V/μs	A/μs	A
序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
KP1	1	100~3000	≤1	100	3~30	≤2.5	25~ 1 000	25~ 500	20
KP5	5	100~3000	≤1	100	5~70	≤3.5			90
KP10	10	100~3000	≤1	100	5~100	≤3.5			190
KP20	20	100~3000	≤1	100	5~100	≤3.5			380
KP30	30	100~3000	≤2	100	8~150	≤3.5			560
KP50	50	100~3000	≤2	100	8~150	≤3.5			940
KP100	100	100~3000	≤4	115	10~250	≤4			1880
KP200	200	100~3000	≤4	115	10~250	≤4			3770
KP300	300	100~3000	≤8	115	20~300	≤5			5650
KP400	400	100~3000	≤8	115	20~300	≤5			7540
KP500	500	100~3000	≤8	115	20~300	≤5			9420
KP600	600	100~3000	≤9	115	30~350	≤5			11160
KP800	800	100~3000	≤9	115	30~350	≤5			14920
KP1000	1000	100~3000	≤10	115	40~400	≤5			18600

表 1-2 KP 型晶闸管元件的其他特性参数

参数 单位 系列 序号	正向重复平均 电流、反向 重复平均 电流	通态平 均电压	维持 电流	门极 不触发 电流	门极 不触发 电压	门极正 向峰值 电流	门极反 向峰值 电压	门极平 均功率	门极 峰值 功率	门极 控制 开通 时间	电路 换向 关断 时间
	$I_{DR(AV)}$	$U_{T(AV)}$	I_H	I_{GD}	U_{GD}	I_{GFM}	U_{GRM}	$P_{G(AV)}$	P_{GM}	t_{gl}	t_g
	mA	V	mA	mA	V	A	V	W	W	μs	μs
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
KP1	<1	① 实 测 值	① 实 测 值	0.4	0.3	—	5	0.5 0.5 1 1 1 1 2 2 4 4 4	—	② 典 型 值	② 典 型 值
KP5	<1			0.4	0.3	—	5		—		
KP10	<1			1	0.25	—	5		—		
KP20	<1			1	0.25	—	5		—		
KP30	<2			1	0.15	—	5		—		
KP50	<2			1	0.15	—	5		—		
KP100	<4			1	0.15	—	5		—		
KP200	<4			1	0.15	—	5		—		
KP300	<8			1	0.15	4	5		15		
KP400	<8			1	0.15	4	5		15		
KP500	<9	1	0.15	4	5	15					
KP600	<9	—	—	4	5	15					
KP800	<9	—	—	4	5	15					
KP1000	<10	—	—	4	5						

① 元件出厂上限值由各厂根据合格的产品度验自定。

② 同类产品中最有代表的数值。

1.2 单相可控整流电路

单相可控整流电路主要分为单相半波可控整流电路、单相全波可控整流电路和单相全控桥式整流电路。但由于单相半波可控整流电路的性能较差，单相全波可控整流电路中晶闸管承受的反向电压较高，因此，这两种电路在实际中很少采用，在中、小功率场合更多的采用单相全控桥式整流电路。

1.2.1 单相全控桥式整流电路

1.2.1.1 电阻性负载

单相全控桥式整流带电阻性负载的电路如图 1-7(a)所示。VT1、VT4 、VT3、VT2 组成 a、b 两个桥臂，变压器二次电压 u_2 接在 a、b 两点， $u_2=U_{2m}\sin \omega t=\sqrt{2} U_2\sin \omega t$ ，4 只晶闸管组成整流桥。负载电阻是纯电阻 R_d 。

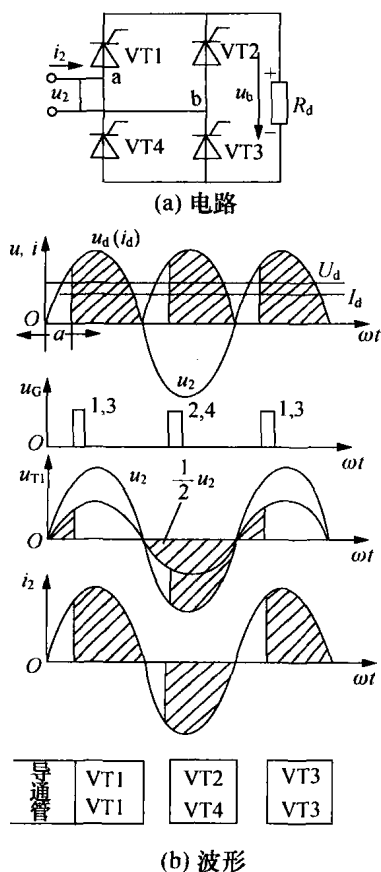


图 1-7 单相全控桥电阻性负载

当交流电源电压 u_2 进入正半周时，a 端电位高于 b 端电位，两个晶闸管 VT1、VT3 同时承受正向电压，如果此时门极无触发信号 u_G ，则两个晶闸管仍处于正向截止状态，电源电压 u_2 将全部加在 VT1 和 VT3 上， $u_{T1} \approx u_{T3} = \frac{1}{2} u_2$ ，负载上电压 $u_d = 0$ 。

在 $\omega t = \alpha$ 时，给 VT1 和 VT3 同时加触发脉冲，则两晶闸管立即触发导通，电源电压 u_2 将通过 VT1 和 VT3 加在负载电阻 R_d 上。在 u_2 正半周，VT2 和 VT4 均承受反向电压而处于截止状态。由于晶闸管导通时管压降可视为零，则负载 R_d 两端的整流电压 $u_d = u_2$ 。当电源电压 u_2 降到零时，电流 i_d 也降为零，VT1 和 VT3 截止。

电源电压 u_2 进入负半周时，b 端电位高于 a 端电位，两个晶闸管 VT2、VT4 同时承受正向电压，在 $\omega t = \pi + \alpha$ 时，同时给 VT2、VT4 加触发脉冲使其导通，电流从 b 经 VT2、负载电阻 R_d 、VT4 回到电源 a 端。在负载 R_d 两端获得与 u_2 正半周相同波形的整流电压和电流，这期间 VT1 和 VT3 均承受反向电压而处于截止状态。

当 u_2 由负半周电压过零变正时，VT2、VT4 关断， u_d 、 i_d 又降为零。此后 VT1、VT3 又承受正向电压，并在相应时刻 $\omega t = 2\pi + \alpha$ 又被触发导通，依次循环工作。

由以上电路工作原理可知，在交流电源 u_2 的正、负半周里，VT1、VT3 和 VT2、VT4 两组晶闸管轮流触发导通，将交流电变成脉动的直流电。改变触发脉冲出现的时刻，即改变 α 的大小， u_d 、 i_d 的波形和平均值大小随之改变。

整流输出电压的平均值可按式计算

$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2} U_2 \sin \alpha x d(\alpha x) = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_2 (1 + \cos \alpha) = 0.9 U_2 \frac{1 + \cos \alpha}{2} \quad (1-1)$$

由式(1-1)可知, U_d 为最小值时, $\alpha = 180^\circ$; U_d 为最大值时, $\alpha = 0^\circ$, 所以单相全控桥式整流电路带电阻性负载时, α 的移相范围是 $0 \sim 180^\circ$ 。

整流输出电压的有效值为

$$U = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} (\sqrt{2} U_2 \sin \alpha x)^2 d(\alpha x)} = U_2 \sqrt{\frac{\sin 2\alpha}{2\pi} + \frac{\pi - \alpha}{\pi}} \quad (1-2)$$

输出电流的平均值和有效值分别为

$$I_d = \frac{U_d}{R_d} = 0.9 \frac{U_2}{R_d} \frac{1 + \cos \alpha}{2} \quad (1-3)$$

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

流过每个晶闸管的平均电流为输出电流平均值的一半, 即

$$I_{\alpha T} = \frac{1}{2} I_d = 0.45 \frac{U_2}{R_d} \cdot \frac{1 + \cos \alpha}{2} \quad (1-5)$$

流过每个晶闸管的电流有效值为

$$I_T = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} \left(\frac{\sqrt{2} U_2 \sin \alpha x}{R_d} \right)^2 d(\alpha x)} = \frac{U_2}{\sqrt{2} R_d} \sqrt{\frac{\sin 2\alpha}{2\pi} + \frac{\pi - \alpha}{\pi}} = \frac{I}{\sqrt{2}} \quad (1-6)$$

分析可得晶闸管承受的最大电压为 $\pm \sqrt{2} U_2$ 。

电路的功率因数可以按下式计算

$$\cos \varphi = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \sin 2\alpha + \frac{\pi - \alpha}{\pi}} \quad (1-7)$$

采用同样的方法, 读者可对单相半波可控整流电路进行分析。

通过分析可知, 对单相全控桥式整流电路与单相半波可控整流电路可作如下比较。

- (1) α 的移相范围相等, 均为 $0 \sim 180^\circ$ 。
- (2) 桥式整流电路输出电压平均值 U_d 是半波整流电路的 2 倍。
- (3) 在相同的负载功率下, 桥式整流电路流过晶闸管的平均电流减小一半。
- (4) 桥式整流电路功率因数提高了 $\sqrt{2}$ 倍。

【例 1-3】 如图 1-8 所示的单相全控桥式整流电路, $R_d = 4\Omega$, 要求 I_d 在 $0 \sim 25\text{ A}$ 之间变化, 负载电流有效值 $I = 1.11 I_d$, 求:

- (1) 整流变压器 T 的变比(不考虑裕量);
- (2) 选择晶闸管的型号(考虑两倍裕量);

- (3) 在不考虑损耗的情况下, 选择整流变压器的容量;
- (4) 计算负载电阻的功率;
- (5) 计算电路的最大功率因数。

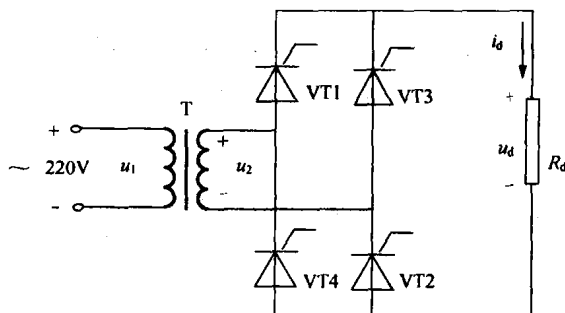


图 1-8 单相全控桥式整流电路

解 (1) 负载上的最大平均电压为

$$U_{d\max} = R_d I_{d\max} = 25 \times 4 = 100\text{V}$$

又因为

$$U_d = 0.9U_2 \frac{1 + \cos \alpha}{2}$$

当 $\alpha = 0$ 时, U_d 最大, 即 $U_{d\max} = 0.9U_2$, 则

$$U_2 = \frac{U_{d\max}}{0.9} = \frac{100}{0.9} = 111\text{V}$$

所以变压器的变化为

$$k \approx \frac{U_1}{U_2} = \frac{220}{111} \approx 2$$

(2) 因为 $\alpha = 0$ 时 i_d 的波形系数为

$$K_f = \frac{\sqrt{\pi \sin 2\alpha + 2\pi(\pi - \alpha)}}{2(1 + \cos \alpha)} = \frac{\sqrt{2\pi^2}}{4} \approx 1.11$$

所以负载电流有效值为

$$I = K_f I_d = 1.11 \times 25 = 27.75\text{A}$$

因为 $I_T = \frac{1}{\sqrt{2}}$

$$I_{T(AV)} \geq \frac{I_T}{1.57} = \frac{27.75}{\sqrt{2} \times 1.57} \approx 12.5\text{A}$$

考虑两倍裕量, 取 30A。