


全国机械行业高等职业教育“十二五”规划教材
高等职业教育教学改革精品教材

电力电子技术

DIANLI DIANZI YINGYONG JISHU

周元一 主编

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



013037894

TM1-43

84

全国机械行业高等职业教育“十二五”规划教材
高等职业教育教学改革精品教材

电力电子应用技术

主 编 周元一
副主编 余丙荣
参 编 汤代斌 汤德荣
主 审 程 周



机械工业出版社



北航

C1645794

TM1-43
84

28700810

本书是根据高等职业教育的特点,结合生产企业岗位需求和高职学生的具体情况而编写的理论、实践一体化教材,适用于电气自动化技术、机电一体化技术、应用电子技术等专业。

全书设有五个项目,包含了电力电子技术 AC/DC、DC/DC、AC/AC 和 DC/AC 四个方面的电能转换电路,涉及的电力电子器件有普通晶闸管、双向晶闸管、电力晶体管、功率场效应晶体管和绝缘栅双极型晶体管。各项目内容相对独立,可进行适当的选择和组合。每个项目基本上都是在介绍电力电子器件的基础上进行典型的电力电子电路分析,最后进行电力电子电路制作。

本书内容具有理论与实际结合紧密及突出应用的特点,注重学生的创新精神和实践能力的培养。为完善课程的知识体系和因材施教的需要,书中还设置了相关知识和练习模块,供学生自学和练习。

本书配有电子教案,凡使用本书作为教材的教师可登录机械工业出版社教材服务网 www.cmpedu.com 下载。咨询邮箱: cmpgaozhi@sina.com。咨询电话: 010-88379375。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力电子应用技术/周元一主编. —北京:机械工业出版社,2013

全国机械行业高等职业教育“十二五”规划教材 高等职业教育教学改革精品教材

ISBN 978-7-111-41205-2

I. ①电… II. ①周… III. ①电力电子技术-高等教育-教材
IV. ①TM76

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 022297 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: 崔占军 边 萌 责任编辑: 边 萌 王 琪

版式设计: 霍永明 责任校对: 佟瑞鑫 常天培

封面设计: 鞠 杨 责任印制: 邓 博

北京华正印刷有限公司印刷

2013 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 11.75 印张 · 285 千字

0001—3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-41205-2

定价: 24.00 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

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售一部: (010) 68326294

机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010) 88379649

机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线: (010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

电力电子技术是对电能进行控制与变换的电子技术，它包括电压、电流和频率的控制与变换。自 20 世纪 60 年代开始，电力电子技术发展异常迅速，在工业自动化领域产生了举足轻重的影响，对工业技术革命起着有力的推动作用。随着电力电子技术的不断发展，目前它在国民经济各个领域中都得到了广泛应用。

电力电子技术以电力电子器件为基础。半个世纪以来各种新的电力电子器件不断涌现，应用范围已从传统的工业、交通、电力等领域，扩大到信息通信、常用电器以及环境保护等各种领域。

编者在本书编写过程中注重典型电路的分析与应用，理论紧密联系实际，突出学生的能力培养，也注意知识的扩展与深入，理论分析以定性为主，摒弃繁杂的计算与分析，技能培养以实际动手为主。

本书针对高等职业教育的特点，对原电力电子技术课程的教学进行了深层次的改革，以项目式教学并完成实际工作任务为主导，讲述常用的电力电子器件和典型的电力电子电路。在电力电子电路制作中，以学生为主体，突出装配工艺，元器件检测、故障分析与排除，技术文件编制以及任务评价等实践环节，加强学生分析问题和解决问题的能力并提高学生的学习兴趣。本书充分体现了“以学生为中心，能力培养为本位”的职业教育思想。

全书设有五个项目，项目 1 为单相可控整流电路及其应用；项目 2 为三相可控整流电路及其应用；项目 3 为直流斩波电路及其应用；项目 4 为交流变换电路及其应用；项目 5 为无源逆变电路及其应用。五个项目基本覆盖了电力电子技术 AC/DC、DC/DC、AC/AC 和 DC/AC 四个方面的电能转换电路及应用，涉及的电力电子器件有普通晶闸管、双向晶闸管、电力晶体管功率场效应晶体管和绝缘栅双极型晶体管。各项目内容相对独立，各院校在教学过程中可根据所处地域和当地行业和企业的特点进行适当的选择和组合。

本书由安徽机电职业技术学院周元一任主编，余丙荣任副主编，汤代斌、汤德荣为参编。周元一编写项目 1、项目 5、附录 A、附录 G，余丙荣编写项目 2、附录 B、附录 C，汤代斌编写项目 3、附录 D，汤德荣编写项目 4、附录 E、附录 F。全书由安徽职业技术学院程周主审。安徽扬子职业技术学院孙晗、安徽机电职业技术学院李必高对本书部分图稿进行了绘制和整理，在此表示感谢。

本书在编写体系和内容上做了一些新的尝试。限于编者的学术水平和实践经验，错误之处在所难免，敬请同行专家和广大读者指正。

本书在编写时参阅了许多同行专家的教材和资料，得到了不少启发，在此表示诚挚的谢意！

编 者

目 录

前言	
项目 1 单相可控整流电路及其应用	1
1.1 晶闸管	1
1.1.1 晶闸管的基本结构与导通、关断条件	1
1.1.2 晶闸管的主要参数	3
1.1.3 晶闸管的型号	6
1.2 单相可控整流电路分析	6
1.2.1 单相半波可控整流电路	7
1.2.2 单相全控桥式整流电路	13
1.2.3 单相半控桥式整流电路	18
1.3 单结晶体管触发电路	21
1.3.1 单结晶体管	21
1.3.2 单结晶体管自激振荡电路	23
1.3.3 单结晶体管同步触发电路	24
1.4 直流调光电路制作	25
1.4.1 任务的提出	25
1.4.2 直流调光电路分析	26
1.4.3 电路装配准备	27
1.4.4 整机装配	29
1.4.5 电路调试	29
1.4.6 故障设置与排除	31
1.5 任务评价与总结	32
1.5.1 任务评价	32
1.5.2 任务总结	34
1.6 相关知识	34
1.6.1 其他派生晶闸管	34
1.6.2 简易移相触发电路	35
1.7 练习	36
项目 2 三相可控整流电路及其应用	41
2.1 三相可控整流电路的分析	41
2.1.1 三相半波可控整流电路	41
2.1.2 三相全控桥式整流电路	45
2.1.3 晶闸管可控整流供电直流电动机的特性	50
2.2 有源逆变电路	53
2.2.1 有源逆变电路的原理	53
2.2.2 逆变失败及最小逆变角限制	55
2.3 TC787 (788) 集成移相触发电路	57
2.3.1 TC787 (788) 内部电路框图及各引脚功能	57
2.3.2 TC787 (788) 典型电路应用	58
2.4 晶闸管的保护	59
2.4.1 晶闸管过电压保护	59
2.4.2 晶闸管过电流保护	62
2.4.3 电压与电流上升率的限制	63
2.5 直流电动机调速电路制作	64
2.5.1 任务的提出	64
2.5.2 直流电动机调速电路分析	64
2.5.3 电路装配准备	64
2.5.4 电路安装方案设计	67
2.5.5 电路装配	69
2.5.6 电路调试	70
2.5.7 故障设置与排除	72
2.6 任务评价与总结	73
2.6.1 任务评价	73
2.6.2 任务总结	73
2.7 相关知识	75
2.7.1 三相半控桥式整流电路	75
2.7.2 整流变压器漏抗对变流电路的影响	78
2.8 练习	80
项目 3 直流斩波电路及其应用	84
3.1 功率场效应晶体管	84
3.1.1 功率 MOSFET 的结构和工作原理	84
3.1.2 功率 MOSFET 的特性	85
3.1.3 功率 MOSFET 的主要参数	87
3.1.4 功率 MOSFET 的驱动	87
3.1.5 功率 MOSFET 的保护	88
3.2 基本直流斩波电路	89
3.2.1 直流斩波电路的基本工作原理	89
3.2.2 降压型斩波电路	90
3.2.3 升压型斩波电路	91

3.2.4 升—降压型斩波电路	92	4.5 软起动电路的装配	129
3.3 隔离型直流斩波电路	92	4.5.1 任务的提出	130
3.3.1 正激电路	93	4.5.2 软起动电路分析	130
3.3.2 反激电路	94	4.5.3 电路装配准备	133
3.4 直流斩波电路的控制	95	4.5.4 电路安装方案设计	134
3.4.1 直流斩波电路的控制方式	95	4.5.5 整机装配	135
3.4.2 PWM 控制器的原理	96	4.5.6 电路调试	137
3.4.3 PWM 控制器集成芯片介绍	97	4.5.7 故障设置与排除	139
3.5 太阳能光伏电源	98	4.6 任务评价与总结	139
3.5.1 太阳电池方阵	99	4.6.1 任务评价	139
3.5.2 太阳能光伏电源控制器	100	4.6.2 任务总结	141
3.5.3 太阳能光伏电源系统的设计	101	4.7 相关知识	141
3.6 太阳能光伏电源电路制作	102	4.7.1 交-交变频电路	141
3.6.1 任务的提出	102	4.7.2 过零触发开关电路与交流 调功器	144
3.6.2 太阳能光伏电源电路分析	102	4.8 练习	146
3.6.3 电路装配准备	104	项目5 无源逆变电路及其应用	148
3.6.4 整机装配	106	5.1 绝缘栅双极型晶体管 (IGBT)	148
3.6.5 电路调试	107	5.1.1 IGBT 的结构和工作原理	148
3.6.6 故障设置与排除	110	5.1.2 IGBT 的基本特性	148
3.7 任务评价与总结	110	5.1.3 IGBT 的主要参数	149
3.7.1 任务评价	110	5.1.4 IGBT 的特点	149
3.7.2 任务总结	111	5.1.5 IGBT 的符号含义	149
3.8 相关知识	111	5.2 无源逆变原理	150
3.8.1 电力晶体管	111	5.2.1 逆变器的基本工作原理	150
3.8.2 蓄电池	115	5.2.2 电力电子器件的换相方式	150
3.9 练习	116	5.2.3 逆变电路的分类	151
项目4 交流变换电路及其应用	118	5.3 电压型逆变电路	151
4.1 双向晶闸管	118	5.3.1 电压型单相半桥逆变电路	151
4.1.1 结构	118	5.3.2 电压型单相全桥逆变电路	152
4.1.2 型号	118	5.3.3 电压型逆变电路的特点	154
4.1.3 触发方式	120	5.4 电流型逆变电路	154
4.1.4 主要参数及选择	120	5.4.1 单相电流型逆变电路工作原理	154
4.2 晶闸管交流开关及应用电路	121	5.4.2 电流型逆变电路的特点	155
4.2.1 简单交流开关及应用	121	5.5 逆变器的 SPWM 控制技术	155
4.2.2 固态开关	121	5.5.1 SPWM 控制的基本原理	155
4.3 单相交流调压电路	122	5.5.2 SPWM 逆变电路的控制方式	156
4.3.1 带电阻性负载和电感性负载的 单相交流调压电路	122	5.5.3 脉宽调制芯片 SG3525	159
4.3.2 几种单相交流调压的触发电路	125	5.6 中频感应加热电路制作	161
4.4 三相交流调压电路	126	5.6.1 任务的提出	161
4.4.1 三相全波星形联结调压电路	126	5.6.2 中频感应加热电源电路的 装配准备	161
4.4.2 其他三相交流调压电路形式	128	5.6.3 整机装配	163
4.4.3 三相交流调压触发电路	129		

5.6.4 电路调试	165	清单	171
5.6.5 故障设置与排除	165	附录 B 直流电动机调速电路元器件及	
5.7 任务评价与总结	165	材料清单	172
5.7.1 任务评价	165	附录 C 直流调速电路主板加工制作图	173
5.7.2 任务总结	166	附录 D 太阳能光伏电源电路元器件及	
5.8 相关知识	167	材料清单	174
5.8.1 感应加热的基本原理	167	附录 E 软起动电路元器件及材料清单	175
5.8.2 电压型三相桥式逆变电路	167	附录 F 软起动电路主板加工制作图	177
5.8.3 电流型三相桥式逆变电路	168	附录 G 感应加热电源电路元器件及材料	
5.9 练习	169	清单	177
附录	171	参考文献	179
附录 A 直流调光电路元器件及材料			

项目 1 单相可控整流电路及其应用

在生产中有大量需要电压可调的直流电源的场合，如电阻加热炉、电解、电镀、同步发电机的励磁、直流电动机的调速等。在晶闸管出现之前，为了得到电压可调的直流电源，曾采用过电动机-发电机组、汞弧整流器、闸流管等，这些设备都存在体积大、效率低、有噪声、寿命短等缺点。晶闸管整流装置则具有体积小、重量轻、效率高、控制灵敏等优点。

当为某一生产机械制造一台晶闸管整流装置时，首先应根据负载容量的大小及性质，决定采用什么类型的整流电路，计算并选择整流变压器、电抗器、晶闸管、熔断器等元器件的容量和规格。

根据所取交流电源的相数，晶闸管可控整流装置可分为单相可控整流和三相可控整流。对于容量较小（4kW 以下）的负载，通常采用单相可控整流装置。所谓单相可控整流就是将某一固定电压值的单相交流电变换成一个电压大小可调的直流电，向直流负载供电。

本项目任务是制作一套晶闸管单相可控整流装置。在设计、安装、调试和维修晶闸管可控整流装置的过程中，需要掌握晶闸管以及由晶闸管组成的单相可控整流电路的工作原理、波形和参数计算等基本知识。在分析晶闸管整流电路的工作原理、波形时，常把晶闸管和整流二极管看成理想的器件，即导通时的正向管压降和关断时的漏电流忽略不计，且导通和关断都是瞬时完成的。

1.1 晶闸管

晶闸管的全称是硅晶体闸流管，俗称可控硅（SCR）。它是一种用硅材料制作而成的大功率开关型半导体器件，它能以较小的电流控制上千安培的电流和数千伏特的电压。

晶闸管包括普通晶闸管、双向晶闸管、逆导晶闸管和门极关断晶闸管等。由于普通晶闸管的普遍使用，人们习惯用“晶闸管”来代替普通晶闸管的名称而省略“普通”二字，其他晶闸管则冠以别的名称。

1.1.1 晶闸管的基本结构与导通、关断条件

目前大功率晶闸管的外形结构有螺栓式和平板式两种，如图 1-1 所示。平板式又分为风冷式和水冷式。

晶闸管有三个电极：阳极 A、阴极 K 和门极 G。螺栓式晶闸管的阳极是紧拴在铝制散热器上的，而平板式是由两个彼此绝缘的相同形状散热器把管子的阳极与阴极紧紧夹住，如图 1-2 所示。

螺栓式安装、更换管子方便，但仅靠阳极散热器散热效果较差。平板式由于阳极、阴极均装有散热器，散热效果好，但安装、更换管子较困难。两者的比较项目见表 1-1。

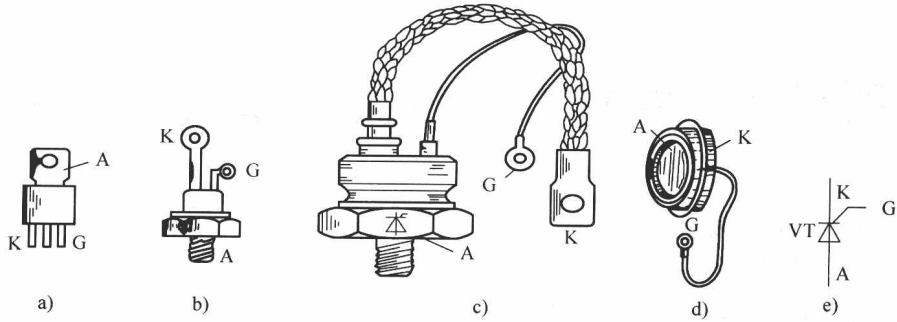


图 1-1 晶闸管的外形及符号

a) 塑封式 b) 小电流螺栓式 c) 大电流螺栓式 d) 平板式 e) 图形符号

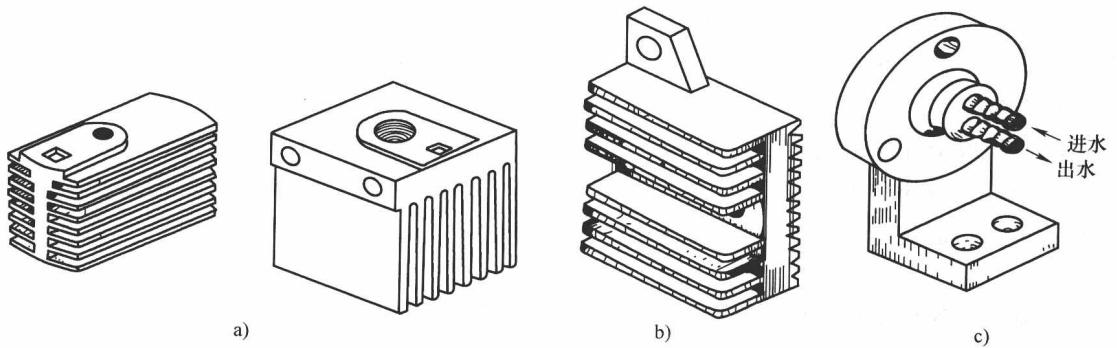


图 1-2 晶闸管散热器

a) 螺栓式散热器 b) 平板式风冷散热器 c) 平板式水冷散热器

表 1-1 螺栓式与平板式晶闸管的比较项目

比较	形式	螺栓式	平板式	
			风冷	水冷
阳极		带散热器	阳、阴极都装有相同的风冷散热器	阳、阴极都装有相同的水冷散热器
阴极		不带散热器		
门极		细小硬导线或软线引出	用细小软导线引出,并且比较靠近阴极	
优缺点		易安装和更换,但散热差	散热好,但安装、更换麻烦,必须安装冷却装置	
适用场合		一般用于 100A 以下	一般用于超过 200A 时	

图 1-3 所示为晶闸管的内部结构和等效电路。晶闸管是具有三个 PN 结的四层 ($P_1N_1P_2N_2$) 三端 (A、K、G) 器件,由最外的 P_1 层和 N_2 层引出两个电极,分别为阳极 A 和阴极 K,由中间的 P_2 层引出的电极是门极 G (也称控制极)。晶闸管内部具有三个 PN 结,即 J_1 、 J_2 、 J_3 ,它的 PNP 结构又可以等效为两个互相连接的晶体管,其中

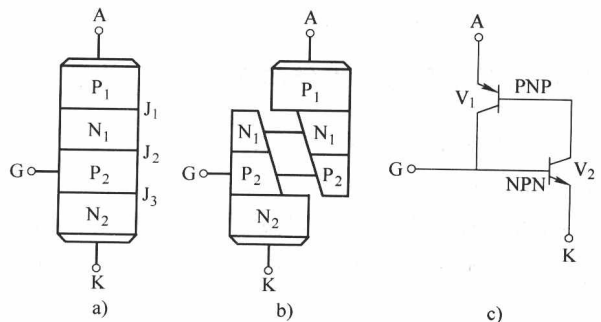


图 1-3 晶闸管的内部结构和等效电路

a) 内部结构 b) 结构等效 c) 等效晶体管电路

N_1 和 P_2 区既是一个晶体管的集电极，同时又是另一个管子的基极。

晶闸管在工作过程中，阳极 A、阴极 K 和电源、负载相连，组成了晶闸管的主电路，门极 G、阴极 K 和控制装置相连，组成了晶闸管的控制电路（或称触发电路）。下面以灯泡作负载，接入直流电源组成一实验装置，来说明晶闸管的工作情况，如图 1-4 所示。

当 S_1 正向闭合时，主电源通过负载加在晶闸管上，此时阳极接正、阴极接负，称晶闸管阳极承受正向电压。若门极开路，或接入反向电压，灯泡不亮。当 S_1 反向闭合，阳极接负、阴极接正时，称晶闸管承受反向电压，门极无论承受何种电压灯泡都不亮，晶闸管则一直处于高电阻、小电流状态，称为断态。断态时，若接入电流计，可以看到有极微小的正、反向漏电流流过电路。

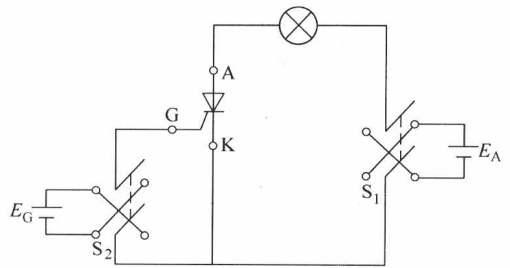


图 1-4 晶闸管的导通关断实验电路

当晶闸管承受正向阳极电压时，门极接入正向电压（G 正 K 负），则灯泡立即燃亮，说明晶闸管处于低电阻、低电压的状态，称为通态。通态时，晶闸管两主端管压降很小（1V 多），全部压降落在负载上，即电路电流将由电源和负载决定， $I_A = E_A / R_{KT}$ 。当晶闸管导通后，如果拆去门极电压，甚至门极加反向电压（G 负 K 正），电路仍然导通。说明门极只需要一正向脉冲电压即可，这个电压常称为门极触发电压（简称触发脉冲）。若要使灯泡熄灭，只有将电源电压降低，使负载电流减小到某一值（维持电流 I_H ）以下，电路恢复阻断。

通过以上说明，可得到如下结论：

- 1) 晶闸管的导通条件：在晶闸管的阳极和阴极间加正向电压，同时在它的门极和阴极间也加适当的正向电压，两者缺一不可。
- 2) 晶闸管一旦导通，门极即失去控制作用，此时可以把门极电压撤去。因此，门极电压不需要保持直流电压，常采用脉冲电压。晶闸管从阻断变为导通的过程称为触发导通，一般门极的触发电流只有几十毫安到几百毫安，而晶闸管导通后，却可以通过几百、几千安的电。所以说，通过晶闸管实现了弱电对强电的控制。
- 3) 晶闸管的关断条件：使流过晶闸管的阳极电流小于维持电流。维持电流是保持晶闸管导通的最小电流。由于门极只能控制晶闸管的导通，无法控制其关断，因此又称晶闸管为半控型器件。

1.1.2 晶闸管的主要参数

为了正确选择和使用晶闸管，需要理解和掌握晶闸管的主要参数。

1. 电压参数

(1) 额定电压 U_{Tn} 在门极开路和晶闸管正向阻断的条件下，可重复加在晶闸管两端的正向峰值电压称为正向重复峰值电压 U_{DRM} ，可以重复加在晶闸管两端的反向峰值电压称为反向重复峰值电压 U_{RRM} 。一般把 U_{DRM} 和 U_{RRM} 中较小的那个值按百位取整后作为该晶闸管的额定电压值，然后根据表 1-2 所示的标准电压等级标定晶闸管额定电压。在实际应用中选择元器件的额定电压时应注意留有充分的裕量，一般应按工作电路中可能承受到的最大瞬时电压 U_{TM} 的 2~3 倍来选择，即

表 1-2 晶闸管的正反向电压等级

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		

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

(2) 通态平均电压 $U_{T(AV)}$ 当流过正弦半波电流并达到稳定的额定结温时, 晶闸管阳极与阴极之间电压降的平均值称为通态平均电压。额定电流大小相同的元器件, 通态平均电压越小, 耗散功率越小, 元器件质量就越高。晶闸管通态平均电压分为 9 个等级, 分别用字母 A ~ I 表示, 其标准值见表 1-3。

表 1-3 晶闸管的通态平均电压分组 U_T

组别	A	B	C
通态平均电压/V	$U_T \leq 0.4$	$0.4 < U_T \leq 0.5$	$0.5 < U_T \leq 0.6$
组别	D	E	F
通态平均电压/V	$0.6 < U_T \leq 0.7$	$0.7 < U_T \leq 0.8$	$0.8 < U_T \leq 0.9$
组别	G	H	I
通态平均电压/V	$0.9 < U_T \leq 1.0$	$1.0 < U_T \leq 1.1$	$1.1 < U_T \leq 1.2$

2. 电流参数

(1) 额定电流 $I_{T(AV)}$ 晶闸管的额定电流也称为额定通态平均电流。在环境温度小于 40°C 和标准散热及晶闸管全导通 (不小于 170°) 的条件下, 晶闸管允许通过的工频正弦半波电流平均值并按晶闸管标准电流系列取值后, 称为该晶闸管的额定电流, 通常所说晶闸管是多少安就是指这个电流。如果正弦半波电流的最大值为 I_m , 则

$$I_{T(AV)} = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi I_m \sin\omega t d(\omega t) = \frac{I_m}{\pi} \quad (1-2)$$

额定电流有效值 I_{Tn} 为

$$I_{Tn} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^\pi (I_m \sin\omega t)^2 d(\omega t)} = \frac{I_m}{2} \quad (1-3)$$

根据式 (1-2) 和式 (1-3) 可求出晶闸管额定电流有效值 I_{Tn} 与额定通态平均电流 $I_{T(AV)}$ 关系为

$$I_{Tn} = 1.57 I_{T(AV)} \quad (1-4)$$

这说明额定电流 $I_{T(AV)} = 100\text{A}$ 的晶闸管, 其额定电流有效值 $I_{Tn} = 157\text{A}$ 。

在选用晶闸管的时候, 不论流过晶闸管的电流波形如何, 只要流过器件的实际电流最大有效值 I_T 小于或等于器件的额定电流有效值 I_{Tn} , 且散热冷却在规定的条件下, 管芯的发热就可以限制在允许范围内。考虑到晶闸管的电流过载能力比一般电动机、电器要小得多, 因此在选用晶闸管额定电流时, 要根据实际最大的电流 I_T 计算后至少乘以 1.5 ~ 2 的安全系数, 即

$$I_{T(AV)} = (1.5 \sim 2) \frac{I_T}{1.57} \quad (1-5)$$

(2) 维持电流 I_H 在室温和门极断开时，元器件从较大的通态电流降至维持通态所必需的最小电流称为维持电流，它一般为十几毫安到几百毫安。维持电流与元器件的容量、结温有关，元器件的额定电流越大，维持电流也越大，而维持电流大的晶闸管更容易关断。

(3) 擎住电流 I_L 在晶闸管由断态转入通态时去掉触发信号，能够使器件保持导通所需的最小阳极电流称为擎住电流 I_L 。 I_L 为维持电流 I_H 的 2~4 倍。欲使晶闸管触发导通，必须使触发脉冲保持到阳极电流上升到擎住电流以上，否则会造成晶闸管重新回到阻断状态，因此触发脉冲必须具有一定的宽度。

3. 其他参数

(1) 门极触发电流 I_{GT} 和门极触发电压 U_{GT} 在室温下，对晶闸管加上 6V 正向阳极电压时，使器件由断态转入通态所必需的最小门极电流称为门极触发电流 I_{GT} ，相应的门极电压称为门极触发电压 U_{GT} 。同一型号的晶闸管，由于门极特性的差异， I_{GT} 与 U_{GT} 都相差很大。

(2) 断态电压临界上升率 du/dt 和通态电流临界上升率 di/dt 在额定结温和门极开路情况下，使器件从断态到通态所需的最低阳极电压上升率称为断态电压临界上升率。晶闸管使用中要求断态下阳极电压的上升率要低于此值，否则易使晶闸管误导通。为了限制断态电压上升率，可以在器件两端并接阻容电路，利用电容两端电压不能突变的性质来限制电压上升率。

在规定的条件下，晶闸管在门极触发开通时能够承受而不致损坏的最大通态电流上升率称为通态电流临界上升率。为限制通态电流临界上升率，可以在阳极回路中串入小电感，来对增长过快的电流进行限制。

晶闸管型号、种类较多，正确了解其性能参数是正确使用晶闸管的前提。表 1-4 列出了几种国产 KP 型普通晶闸管的主要参数。

表 1-4 KP 型普通晶闸管的主要参数

型号 \ 参数	通态平均电流 $I_{T(AV)}$ /A	断态正反向重复峰值电压 $U_{DRM}、U_{RRM}$ /V	维持电流 I_H /mA	门极触发电流 I_G /mA	门极触发电压 U_{GT} /V	断态电压临界上升率 du/dt / (V/ μ s)	通态电流临界上升率 di/dt / (A/ μ s)			
KP1	1	50 ~ 1600	≤ 10	≤ 20	≤ 2.5					
KP5	5	100 ~ 2000	≤ 60	≤ 60	≤ 3.0	25 ~ 800	25 ~ 50			
KP10	10		≤ 100	≤ 100						
KP20	20		≤ 150	≤ 150						
KP30	30		≤ 150	≤ 150						
KP50	50	100 ~ 2400	≤ 200	≤ 200	≤ 3.5	50 ~ 1000				
KP100	100	100 ~ 3000	≤ 200	≤ 250	≤ 3.5	100 ~ 1000	25 ~ 100			
KP200	200									50 ~ 200
KP300	300		≤ 300	≤ 350	≤ 4.0	100 ~ 1000	50 ~ 300			
KP400	400									
KP500	500									
KP600	600									
KP800	800			≤ 450		100 ~ 1000	50 ~ 500			
KP1000	1000									

1.1.3 晶闸管的型号

国产晶闸管的一般命名结构和含义如下：

KP[额定电流系列]—[额定电压等级][通态平均电压组别]

其中 K 表示晶闸管；P 表示类型为普通型，不同类型用不同字母表示如 S（双向型）、G（门极关断型）、N（逆导型）等；额定电流系列用数字标注也称额定电流值；额定电压等级也用数字标注，乘以 100 即为额定电压值，见表 1-2；通态平均电压组别表示通态平均电压的大小，用英文字母标注，其含义见表 1-3，当额定电流小于 100A 时，通态平均电压组别可以不标。

例如：KP100—12G，表示额定电流为 100A，额定电压为 1200V，通态平均电压小于 1V 的普通型晶闸管。

例 1-1 一晶闸管接在 220V 交流电路中，通过器件的电流有效值为 100A，问选择什么型号的晶闸管？

解：晶闸管额定电压为

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

按晶闸管额定电压等级取 800V，即 8 级。

晶闸管的额定电流为

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

按晶闸管参数系列取 100A，所以选取晶闸管型号 KP100—8。

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 1-5 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 I_{Tn} 为

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

实际流过该管的电流有效值 I_T 可根据电流波形

计算求得，即 $I_T = \frac{I_m}{\sqrt{3}}$ ，当考虑 2 倍的安全裕量时， I_m 的允许值为 $I_m = \frac{\sqrt{3} \times 78.5}{2} A = 68A$ 。

到目前为止，世界上普通晶闸管的最大额定电流可达 4000A，最大额定电压可达 7000V，导通压降在 1000V 额定电压时为 1.5V，在 5000V 额定电压时仅为 3V。

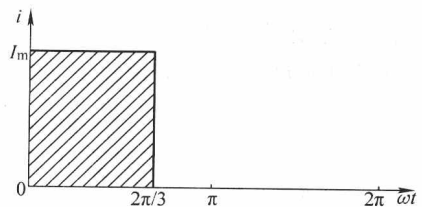


图 1-5 流过晶闸管的电流波形

1.2 单相可控整流电路分析

在分析可控整流电路时，常忽略（或暂时忽略）系统中某些次要的或非本质因素，即在理想条件下研究分析，获得主要结论。在获得主要结论后，再将暂时被忽略的因素考虑进去加以修正和完善，使得结论接近实际。这种近似随着控制技术和控制方法的不断进步，误差越来越小，因而一般能够满足工程的要求。

假设的理想条件如下：

(1) 理想开关器件 开关器件（晶闸管）导通时，通态压降为零，关断时电阻为无穷大。

(2) 理想变压器 变压器漏抗为零、绕组的电阻为零、励磁电流为零。

(3) 理想电源 交流电网有足够大的容量，电源为恒频、恒压和三相对称，因而整流电路接入点的电压为无畸变正弦波。

1.2.1 单相半波可控整流电路

晶闸管可控整流电路有多种形式，电路的负载也有多种性质，电路形式或负载性质不同，可控整流电路的工作情况也不一样。

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负载的电流波形相同、大小成比例，电流、电压均允许突变。

(1) 电路组成及电路工作原理 图1-6a为单相半波电阻性负载可控整流电路，由晶闸管 VT、负载电阻 R_d 及单相整流变压器 TR 组成。TR 用来变换电压，将一次侧电网电压 u_1 变成与负载所需电压相适应的二次电压 u_2 。 u_2 为二次侧正弦电压瞬时值： $u_2 = \sqrt{2}U_2 \sin \omega t$ ； u_d 、 i_d 分别为整流输出电压瞬时值和负载电流瞬时值； u_T 、 i_T 分别为晶闸管两端电压瞬时值和流过的电流瞬时值； i_1 、 i_2 分别为流过整流变压器一次绕组和二次绕组电流的瞬时值。

交流电压 u_2 通过 R_d 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，晶闸管 VT 承受全部 u_2 电压。

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。若管压降忽略不计，则负载电阻 R_d 两端的波形 u_d 就是变压器二次侧 u_2 的波形，流过负载的电流 i_d 波形与 u_d 相似。由于二次绕组、晶闸管以及负载电阻是串联的，故 i_d 波形也就是 i_T 及 i_2 的波形，如图 1-6b 所示。

在 $\omega t = \pi$ 时， u_2 下降到零，晶闸管阳极电流也下降到零，晶闸管关断，电路无

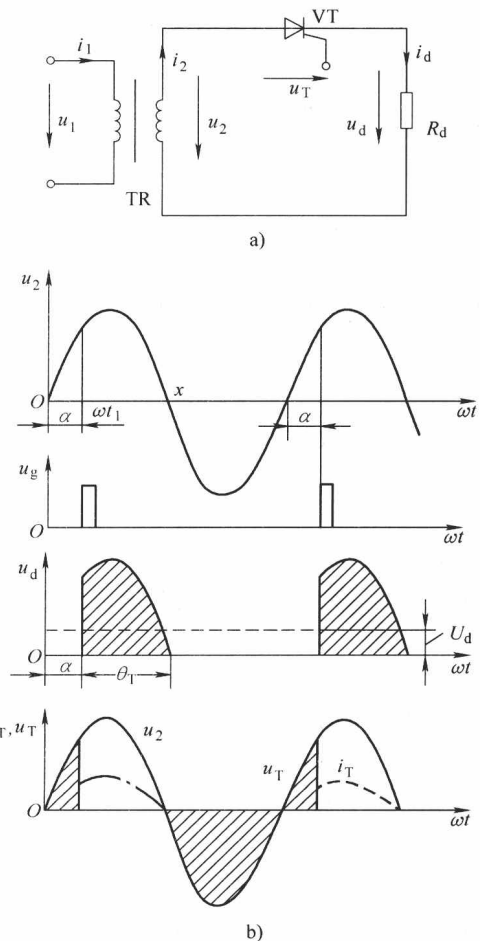


图 1-6 单相半波电阻性负载可控整流电路及波形
a) 电路原理图 b) 电压、电流波形

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 的下一个周期将重复上述过程。

在单相半波可控整流电路中, 从晶闸管开始承受正向电压, 到触发脉冲出现之前的电角度称为触发延迟角 (也称移相角), 用 α 表示。晶闸管在一周期内导通的电角度, 用 θ_T 表示, 如图 1-6b 所示。

在单相半波电阻性负载可控整流电路中 α 的移相范围为 $0 \sim \pi$, 对应的导通角 θ_T 的范围为 $\pi \sim 0$, 两者关系为 $\alpha + \theta_T = \pi$ 。从图 1-6b 波形可知, 改变 α 的大小, 输出整流电压 u_d 波形和输出直流电压平均值 U_d 大小也随之改变, α 减小, U_d 就增加, 反之, U_d 减小。

(2) 各电量的计算 根据平均值定义, 输出电压平均值 U_d 为

$$U_d = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2} U_2 \sin \omega t d(\omega t) = 0.45 U_2 \frac{1 + \cos \alpha}{2} \quad (1-6)$$

由式 (1-6) 可知, 输出电压平均值 U_d 与整流变压器二次侧交流电压有效值 U_2 和触发延迟角 α 有关; 当 U_2 一定后, 仅与 α 有关。当 $\alpha = 0$ 时, 则 $U_d = 0.45 U_2$ 为最大输出电压。当 $\alpha = \pi$ 时, 则 $U_d = 0$ 。只要改变触发延迟角 α (改变触发脉冲送出的时刻), U_d 就可以在 $0 \sim 0.45 U_2$ 之间连续可调。

输出电流平均值 I_d 为

$$I_d = \frac{U_d}{R_d} \quad (1-7)$$

在选择变压器容量、晶闸管额定电流、熔断器以及负载电阻的有功功率时, 均需按有效值计算。

根据有效值的定义, 输出电压有效值 U 为

$$U = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} (\sqrt{2} U_2 \sin \omega t)^2 d(\omega t)} = U_2 \sqrt{\frac{\pi - \alpha}{2\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{4\pi}} \quad (1-8)$$

负载电流有效值 I 为

$$I = \frac{U}{R_d} \quad (1-9)$$

在单相半波可控整流电路中, 因晶闸管与负载串联, 所以负载电流的有效值也就是流过晶闸管电流的有效值, 即晶闸管电流有效值 I_T 为

$$I_T = I = \frac{U}{R_d} \quad (1-10)$$

由图 1-6b 中 u_T 的波形可知, 晶闸管可能承受的正、反向峰值电压为

$$U_{TM} = \sqrt{2} U_2 \quad (1-11)$$

功率因数 λ 为

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{UI}{U_2 I} = \sqrt{\frac{1}{4\pi} \sin 2\alpha + \frac{\pi - \alpha}{2\pi}} \quad (1-12)$$

从式 (1-12) 看出, 功率因数 λ 是 α 的函数, $\alpha = 0$ 时 λ 最大为 0.707, 可见单相半波可控整流电路, 尽管是电阻性负载, 但由于存在谐波电流, 变压器最大利用率也仅有 70%。 α 越大, λ 越小, 设备利用率就越低。

例 1-3 单相半波可控整流电路，电阻性负载。要求输出的直流平均电压为 50 ~ 92V 之间连续可调，最大输出直流平均电流为 30A，直接由交流电网 220V 供电，试求：

- (1) 触发延迟角 α 的可调范围；
- (2) 负载电阻的最大有功功率及最大功率因数；
- (3) 选择晶闸管型号规格。

解：(1) 由式 (1-6) 求得

当 $U_d = 50V$ 时

$$\cos\alpha = \frac{2 \times 50}{0.45 \times 220} - 1 \approx 0$$

$$\alpha = 90^\circ$$

当 $U_d = 92V$ 时

$$\cos\alpha = \frac{2 \times 92}{0.45 \times 220} - 1 \approx 0.87$$

$$\alpha = 30^\circ$$

(2) $\alpha = 30^\circ$ 时，输出直流电压平均值最大为 92V，这时负载消耗的有功功率也最大，由式 (1-8)、式 (1-9) 和式 (1-12) 可求得

$$R_d = \frac{92V}{30A} = 3.07\Omega$$

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

$$= \frac{220V}{3.07\Omega} \sqrt{\frac{180^\circ - 30^\circ}{360^\circ} + \frac{\sin 60^\circ}{4\pi}} = 49.9A \approx 50A$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{1}{4\pi} \sin 2\alpha + \frac{\pi - \alpha}{2\pi}} = \sqrt{\frac{1}{4\pi} \sin 60^\circ + \frac{\pi - \pi/6}{2\pi}} = 0.693$$

$$P = I^2 R_d = 50^2 \times 3.07W = 7675W$$

(3) 选择晶闸管，因 $\alpha = 30^\circ$ 时，流过晶闸管的电流有效值最大为 50A。

$$I_{T(AV)} = (1.5 \sim 2) \times \frac{I_{Tm}}{1.57} = (1.5 \sim 2) \times \frac{50}{1.57}A = 48 \sim 64A \quad \text{取} 50A$$

晶闸管的额定电压为

$$U_{Tn} = (2 \sim 3) U_{TM} = (2 \sim 3) \sqrt{2} \times 220V = 622 \sim 933V \quad \text{取} 700V$$

故选择 KP50—7 型号的晶闸管。

2. 电感性负载

电动机的励磁线圈、转差电动机电磁离合器的励磁线圈以及输出电路中串接平波电抗器的负载等均属于电感性负载。电感性负载的特点是：流过电感的电流不能突变，变化的电流会在电感中产生自感电动势，其方向总是阻碍着电流的变化。电感性负载的等效电路可用一个电感和电阻的串联电路来表示。

(1) 电路组成及电路工作原理 单相半波电感性负载可控整流电路及波形如图 1-7 所示。

在 $\omega t = 0 \sim \omega t_1$ 期间，晶闸管阳极承受正向电压，但此时没有触发信号，晶闸管处于正

向关断状态，输出电压、电流都等于零，其波形如图 1-7b 所示。

当 $\omega t = \omega t_1$ 时，门极加触发信号，晶闸管触发导通，电源电压加到负载上，输出电压 $u_d = u_2$ 。由于电感的存在，负载电流 i_d 只能从零逐渐上升。

在 $\omega t = \omega t_1 \sim \omega t_2$ 期间，输出电流 i_d 从零增至最大值。在 i_d 的增长过程中，电感产生的感应电动势总是阻碍电流增大，其方向与电流方向相反。电源提供的能量一部分供给负载电阻，一部分为电感的储能。

在 $\omega t = \omega t_2 \sim \omega t_4$ 期间，负载电流从最大值开始下降，电感产生的感应电动势方向改变企图维持电流不变，此时电感释放能量。在 $\omega t = 180^\circ$ 时，交流电压 u_2 过零，由于电感能量的存在，电感的感应电动势使晶闸管阳极继续承受正向电压而导通，此时电感储存的磁能一部分释放变成电阻的热能，另一部分磁能变成电能送回电网。在 $\omega t = \omega t_4$ 时刻，电感的储能全部释放完后， $i_d = 0$ ，晶闸管在 u_2 反压作用下而截止。到下一个周期的正半周，即 $\omega t = 360^\circ + \alpha$ 时，晶闸管再次被触发导通，如此循环，周而复始。 u_d 、 i_d 和 u_T 波形如图 1-7b 所示。

表 1-5 列出了一个周期内晶闸管的导通、负载电压、晶闸管端电压的情况。由图 1-7b 可见，由于电感的作用，负载两端出现负电压，结果使负载电压平均值减少了，若电感越大，则维持导电的时间越长，负电压部分占的比例越大，使输出直流电压下降得越多。特别是大电感负载 ($X_L \geq 10R_d$) 时，输出电压正负面积趋于相等，输出电压平均值趋于零，如不采取措施，电路则无法满足输出一定直流平均电压的要求。

表 1-5 各区间晶闸管的导通、负载电压和晶闸管端电压情况

ωt	$0 \sim \alpha(\omega t_1)$	$\alpha \sim 180^\circ$	$180^\circ \sim \omega t_4$	$\omega t_4 \sim 360^\circ$	$360^\circ \sim 360^\circ + \alpha$
晶闸管工作情况	VT 截止	VT 导通	VT 导通	VT 截止	VT 截止
u_d	0	$u_2 > 0$	$u_2 < 0$	0	0
u_T	u_2	0	0	u_2	u_2

为了使 u_2 过零变负时能及时关断晶闸管，使 u_d 波形不出现负值，又能给电感 L 提供一条新的续流通路，可以在负载两端并联二极管 VD，如图 1-8a 所示。由于该二极管是为电感负载在晶闸管关断时提供续流回路，故此二极管称为续流二极管，简称续流管。

在电源电压正半波，电压 $u_2 > 0$ ，晶闸管承受正向电压，在 $\omega t = \alpha$ 处触发晶闸管，晶闸管导通，输出电压 u_d 等于电源电压 u_2 ，形成负载电流 i_d ，此时续流二极管 VD 承受反向电压不导通。

当电源电压变负时，由于电流减少，负载上电感 L 产生的自感电动势使续流二极管 VD

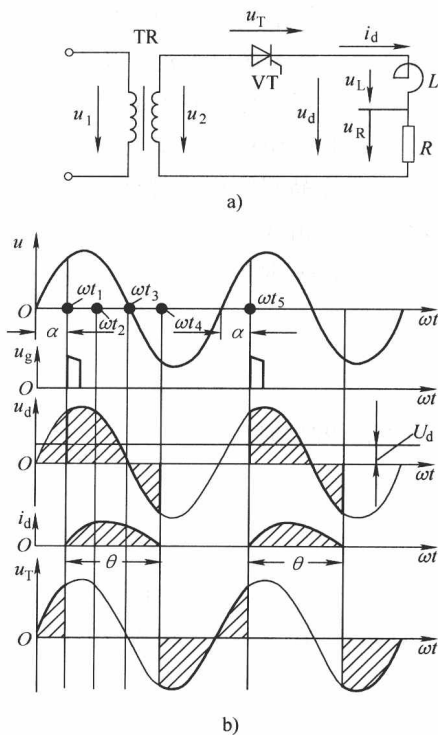


图 1-7 单相半波电感性负载可控整流电路及波形
a) 电路原理图 b) 电压、电流波形