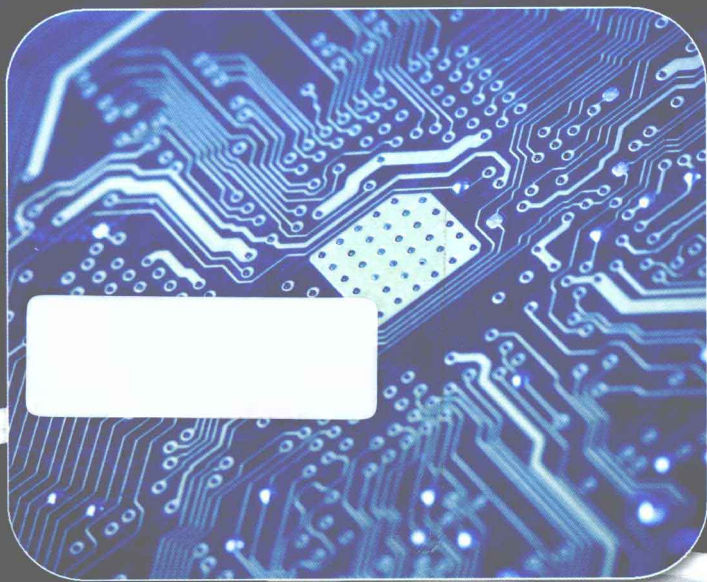


双证融通系列丛书

电力电子技术 简明教程

钟晓强 李方园 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



双证融通系列丛书

免费电子资源下载

电力电子技术简明教程

钟晓强 李方园 编著



机械工业出版社

电力电子技术是建立在电力半导体开关器件基础上实现电能变换的控制技术。本书反映了当前技术发展的主流和趋势,以加强基础、突出处理问题的思维方法,培养学生(或学员)分析问题和解决问题的能力为原则,详细介绍了常用电力电子器件分析与实践,触发电路分析与实践,可控整流电路分析与实践,直流斩波电路分析与实践,交流变换电路分析与实践,逆变电路分析与实践等内容。

本书可作为高职高专电气自动化、应用电子、机电一体化等专业的课程教材,也可作为广大电工技术爱好者、求职者、下岗再就业者、职业培训人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

电力电子技术简明教程/钟晓强等编著. —北京:机械工业出版社, 2013. 1

(双证融通系列丛书)

ISBN 978-7-111-40871-0

I. ①电… II. ①钟… III. ①电力电子技术—教材 IV. ①TM1

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第301074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:林春泉 责任编辑:赵 任

版式设计:赵颖喆 责任校对:丁丽丽

封面设计:路恩中 责任印制:乔 宇

北京机工印刷厂印刷(三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2013年2月第1版第1次印刷

184mm×260mm · 16.5印张 · 406千字

0 001—3 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-40871-0

定价:39.80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

序

本套“维修电工培训与电类人才培养”双证融通系列丛书（简称双证融通系列丛书）是在全社会大力推进“工学结合、产学合作”的大环境下推出的。丛书以服务为宗旨，以就业为导向，以提高学生（学员）素质为核心，以培养学生（学员）职业能力为本位，全方位推行产学合作，强调学校（培训机构）与社会的联系，注重理论与实践的结合，将分层化国家职业标准的理念融入课程体系，将国家职业资格标准、行业标准，融入课程标准。

目前，在很多高职院校、应用型本科中都有“电气自动化技术”专业，其对应的第一岗位就是电气设备及其相关产品的设计与维护，对应的考证为维修电工（中高级）。因此，本丛书以目前在各类高校中针对国家职业标准重新修订的“电类人才培养”教学计划为基础，将职业标准融入到课程标准中，并力求使各课程的理论教学、实操训练与国家职业标准的应知、应会相衔接对应，力求做到毕业后零距离上岗。

电类人才的培养目标定位于培养具有良好思想品德和职业道德，具备较为坚实的文化基础知识和电专业基础知识，要求学生能适应电气自动化行业发展的需要，从事电气控制设备和自动化设备的安装、调试与维护的高素质高技能专门人才。根据这一培养目标制订的教学计划，除了能够做到学历教育与职业资格标准的完全融合外，还具有一定的前瞻性、拓展性，既满足当前岗位的要求，又体现未来岗位的发展要求；既确保当前就业能力，又为学生后续可持续发展提供基础和保障；既包含职业资格证书的内容，又保证学历教育的教学内容；既符合教育部门对电气自动化技术毕业生学历培养的要求，又符合人力资源和社会保障部对“维修电工中（高）级”职业技能鉴定的要求。

本丛书推出7门“双证融通”课程，每门课程均有电子资源免费下载，它们分别是：

- （1）电工电子技术简明教程
- （2）数控机床电气控制简明教程
- （3）AutoCAD 工程绘图简明教程
- （4）电力电子技术简明教程
- （5）三菱 PLC 应用简明教程
- （6）西门子 S7 PLC 应用简明教程
- （7）变频器应用简明教程

特别感谢宁波市服务型教育重点专业建设项目（电子电气专业）的出版资助，同时也感谢机械工业出版社电工电子分社、浙江工商职业技术学院为丛书的策划与推广提供了必不可少的帮助。

丛书主编：李方园

2012 年 10 月

前 言

电力电子技术是一门利用电力电子器件对电能进行控制和转换的学科。美国电气电子工程师学会（IEEE）的电力电子学会对电力电子技术的定义是：“有效地使用电力半导体器件，应用电路和设计理论以及分析开发工具，实现多电能的高效能变换和控制的一门技术，它包括电压、电流、频率和波形等方面的变换”。电力电子技术突出对电力的变换，可以实现几瓦、几十瓦、数百瓦乃至数千兆瓦的功率变换，该技术已经被广泛地应用到生产、生活的各个领域。

电力电子技术包括电力电子器件、变流电路和控制电路3个部分，其中电力电子器件是基础，变流技术是电力电子技术的核心。随着科学技术的发展，电力电子技术又与现代控制理论、材料科学、电机工程、微电子技术等许多领域密切相关。目前，电力电子技术已逐步发展成为一门多科学相互渗透的综合性技术学科。

本书共分6讲，分别是：常用电力电子器件分析与实践、常见触发电路分析与实践、可控整流电路分析与实践、直流斩波电路分析与实践、交流调压电路分析与实践、逆变电路分析与实践等。

第1讲是常用电力电子器件分析与实践。包括电力二极管、普通晶闸管、双向晶闸管及其晶闸管派生器件、门极关断（GTO）晶闸管、电力晶体管（GTR）、电力场效应晶体管（MOSFET）、绝缘栅双极型晶体管（IGBT）及其他新型电力电子器件等。在内容上主要介绍器件的结构、工作原理及基本应用。

第2讲是常见触发电路分析与实践。包括单结晶体管触发电路分析与实践、锯齿波触发电路分析与实践、正弦波触发电路分析与实践、集成触发电路分析与实践等。

第3讲是可控整流电路分析与实践。包括单相半波可控整流电路分析与实践、单相桥式可控整流电路分析与实践、三相半波可控整流电路分析与实践、三相桥式全控整流电路分析与实践等。

第4讲是逆变电路分析与实践。包括有源逆变电路分析与实践、无源逆变电路分析与实践等。

第5讲是直流斩波电路分析与实践。包括直流降压斩波（BUCK）电路分析与实践、直流升压斩波（BOOST）电路分析与实践、直流升-降压（BUCK-BOOST）电路分析与实践、ZETA斩波电路等。

第6讲是交流调压电路分析与实践。包括单相交流调压电路分析与实践、三相交流调压电路分析与实践、交流开关及其应用电路分析与实践等。

在学习本课程时，要着重物理概念与基本分析方法的学习，理论与实际相结合，尽可能地做到器件、电路、应用三者相结合。要特别注意电路的波形分析与相位分析，在分析工作原理时要紧紧抓住电力电子器件在电路中导通与截止的变化过程，从波形分析中进一步理解电路

工作情况，同时要注意培养读图与分析的能力，以及器件计算、测量、调整及故障分析等方面的实践能力。

在本书的编写过程中，曾参考和引用了国内外许多专家、学者最新发表的论文和著作等资料，在此一并致谢！

作 者
2012 年 10 月

目 录

序

前言

第 1 讲 常用电力电子器件的分析与实践····· 1

1.1 电力二极管和晶闸管的分析与实践····· 2

1.1.1 任务导入····· 2

1.1.2 理论知识····· 2

1.1.3 技能训练····· 19

1.1.4 相关习题····· 22

1.2 典型全控型电力电子器件分析与实践····· 23

1.2.1 任务引入····· 23

1.2.2 理论知识····· 24

1.2.3 技能训练····· 47

1.2.4 相关习题····· 51

1.3 全控型器件驱动电路的分析及实践····· 51

1.3.1 任务引入····· 52

1.3.2 理论知识····· 52

1.3.3 技能训练····· 58

1.3.4 相关习题····· 64

1.4 电力电子器件保护及缓冲电路的分析与实践····· 65

1.4.1 任务引入····· 65

1.4.2 理论知识····· 65

1.4.3 技能训练····· 74

1.4.4 相关习题····· 79

小结····· 80

思考题与习题····· 81

第 2 讲 常见触发电路的分析与实践····· 83

2.1 单结晶体管触发电路的分析与实践····· 84

2.1.1 任务导入····· 84

2.1.2 理论知识····· 85

2.1.3 技能训练····· 89

2.1.4 相关习题····· 90

2.2 正弦波与锯齿波触发电路的分析与实践····· 90

2.2.1 任务导入····· 91

2.2.2 理论知识····· 91

2.2.3 技能训练····· 97

2.2.4 相关习题····· 102

小结····· 102

思考题与习题····· 103

第 3 讲 可控整流电路的分析与实践····· 104

3.1 单相半波可控整流电路的分析与实践····· 105

3.1.1 任务导入····· 105

3.1.2 理论知识····· 105

3.1.3 技能训练····· 113

3.1.4 相关习题····· 115

3.2 单相桥式可控整流电路的分析与实践····· 116

3.2.1 任务导入····· 116

3.2.2 理论知识····· 116

3.2.3 技能训练····· 124

3.2.4 相关习题····· 127

3.3 三相半波可控整流电路的分析与实践····· 128

3.3.1 任务导入····· 128

3.3.2 理论知识····· 128

3.3.3 技能训练····· 139

3.3.4 相关习题····· 141

3.4 三相全控桥式整流电路的分析与实践····· 142

3.4.1 任务导入····· 142

3.4.2 理论知识····· 142

3.4.3 技能训练····· 151

3.4.4 相关习题····· 153

小结····· 155

思考题与习题····· 155

第 4 讲 逆变电路的分析与实践····· 159

4.1 有源逆变电路的分析与实践····· 160

4.1.1 任务导入····· 160

4.1.2 理论知识····· 160

4.1.3 技能训练····· 165

4.1.4 相关习题····· 167

4.2 无源逆变电路的分析及实践····· 168

4.2.1 任务导入	168	小结	209
4.2.2 理论知识	168	思考题与习题	210
4.2.3 技能训练	181	第 6 讲 交流调压电路的分析与实践	212
4.2.4 相关习题	183	6.1 单相交流调压电路的分析与实践	213
小结	185	6.1.1 任务导入	213
思考题与习题	185	6.1.2 理论知识	213
第 5 讲 直流斩波电路的分析与实践	186	6.1.3 技能训练	218
5.1 降压式直流斩波电路的分析与实践	187	6.1.4 相关习题	221
5.1.1 任务导入	187	6.2 三相交流调压电路的分析与实践	222
5.1.2 理论知识	187	6.2.1 任务导入	222
5.1.3 技能训练	194	6.2.2 理论知识	222
5.1.4 相关习题	196	6.2.3 技能训练	228
5.2 升压式直流斩波电路的分析与实践	198	6.2.4 相关习题	230
5.2.1 任务导入	198	6.3 交流开关及其应用电路的分析与实践	230
5.2.2 理论知识	198	6.3.1 任务导入	230
5.2.3 技能训练	202	6.3.2 理论知识	230
5.2.4 相关习题	203	6.3.3 技能训练	237
5.3 升降压式斩波电路的分析与实践	204	6.3.4 相关习题	239
5.3.1 任务导入	204	小结	240
5.3.2 理论知识	204	思考题与习题	241
5.3.3 技能训练	205	附录：维修电工题库（电力电子部分）	242
5.3.4 相关习题	209	参考文献	253

第1讲 常用电力电子器件的分析与实践

【导读】

在电力电子技术的学习与应用中对电力电子器件的认知与分析是基础，因而掌握各种常用电力电子器件的特征和正确使用方法是学好电力电子技术的关键。本学习项目在对电力电子器件的概念、特点和分类等问题作简要概述后，重点介绍了各种常用电力电子器件的工作原理、基本特性、主要参数、选择方法、保护方法及其使用中应注意的问题。



应
知

- ※ 了解电力二极管及晶闸管的结构、符号与类型，掌握晶闸管的工作原理和主要参数
- ※ 熟悉晶闸管的导通条件和关断机理，掌握晶闸管的门极触发方式
- ※ 熟悉常见全控型电力电子器件的结构、符号及其工作原理，掌握其基本特性与参数的计算方法
- ※ 熟悉全控型器件的驱动及保护电路设置的目的与要求，掌握驱动与保护电路的分类与实现方法
- ※ 熟悉电力电子器件的缓冲电路结构与类型，掌握三种基本缓冲电路的工作原理
- ※ 熟悉电力电子器件的串、并联使用结构与形式

- ☆ 学会用万用表判别电力二极管和晶闸管引脚极性以及质量状态的基本方法，掌握晶闸管通断状态检测的基本步骤
- ☆ 掌握构建全控型器件状态检测电路的基本要求与实现方法，并具备能根据器件参数手册进行参数测定的能力
- ☆ 正确理解电力电子器件驱动电路的作用，掌握驱动电路的设置要求并学会进行电路测试与故障排除
- ☆ 掌握电力电子器件保护电路的基本检测方法



应
会

1.1 电力二极管和晶闸管的分析与实践

1.1.1 任务导入

电力二极管和普通晶闸管都属于大功率半导体整流器件。由于它们具有体积小、重量轻、效率高、开关动作迅速、维护简单、操作方便和使用寿命长等特点，因而在生产实际中得到了广泛的应用。

1.1.2 理论知识

1. 电力二极管

电力二极管 (Power Diode) 在 20 世纪 50 年代初期就获得了应用, 当时也被称为半导体整流器。它的基本结构和工作原理与信息电子电路中的二极管是一样的, 都以半导体 PN 结为基础, 实现正向导通、反向截止的功能。电力二极管是不可控器件, 其导通和关断完全是由其在主电路中承受的电压和电流决定的。

(1) 结构与伏安特性

1) 结构 电力二极管的内部结构也是一个 PN 结, 结面积较大。在 PN 结的两端各引出一个电极, 分别称为阳极 A 和阴极 K, 使用的符号与中小功率电力二极管一样。由于电力二极管功率损耗较大, 它的外形有螺栓式和平板式两种, 其中螺栓式二极管的阳极紧栓在散热器上。平板式二极管又分为风冷式和水冷式, 它的阳极和阴极分别由两个彼此绝缘的散热器紧紧夹住。电力二极管的外形、结构与电气符号如图 1-1 所示。

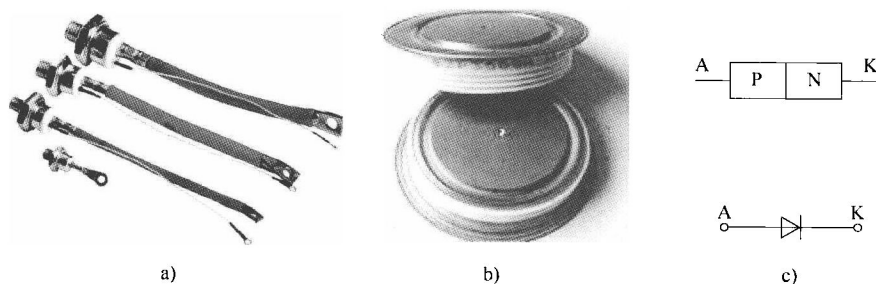


图 1-1 电力二极管外形、结构与电气符号

a) 外形 b) 内部结构 c) 电气符号

2) 伏安特性 电力二极管的阳极与阴极间的电压与流过管子的电流之间的关系称为伏安特性, 如图 1-2 所示。当从零逐渐增大二极管的正向电压时, 开始阳极电流很小, 这一段特性曲线很靠近横坐标轴。当正向电压大于 0.5V 时, 正向阳极电流急剧上升, 管子正向导通。如果电路中不接限流元件, 二极管将被烧毁。

当二极管加上反向电压时, 起始段的反向漏电流也很小, 而且随着反向电压的增加, 反向漏电流只略微增大, 但当反向电压增加到反向不重复峰值电压时 (图 1-2 中的 U_{RSM}), 反向漏电流开始急剧增加。同样, 如果对反向电压不加限制的话, 二极管将被击穿而损坏。

(2) 主要参数

1) 额定电流 (正向平均值电流) I_F 在规定的环境温度 40°C 和标准散热条件下, 元件 PN 结温度稳定且不超过 140°C 时, 所允许长时间连续流过 50Hz 正弦半波的电流平均值。将此电流值取规定系列的电流等级, 即为元件的额定电流。

2) 反向重复峰值电压 U_{RRM} 在额定结温条件下, 取元件反向伏安特性不重复峰值电压 U_{RSM} (见图 1-2) 的 80% 称为反向重复峰值电压 U_{RRM} 。将 U_{RRM} 值取规定的电压等级就是该元件的额定电压。

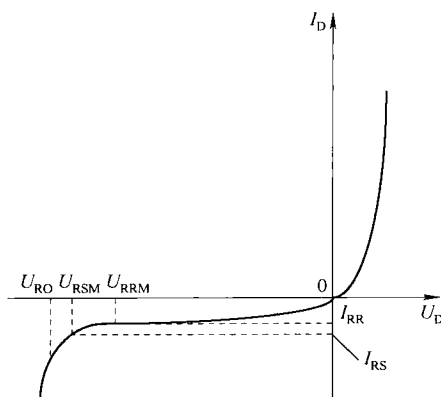


图 1-2 电力二极管伏安特性图

3) 正向平均电压 U_F 在规定环境温度为 40°C 和标准散热条件下, 当通过晶闸管的电流为额定电流时, 元件阳极与阴极之间的电压平均值, 取规定系列组别称为正向平均电压 U_F , 简称管压降, 一般在 $0.45 \sim 1\text{V}$ 范围内。

4) 最高工作结温 T_{JM} 结温是指管芯 PN 结的平均温度, 用 T_{JM} 表示。最高工作结温是指在 PN 结不致损坏的前提下所能承受的最高平均温度。 T_{JM} 通常在 $125 \sim 175^\circ\text{C}$ 范围之内。

(3) 电力二极管的参数选择及使用注意事项

1) 参数选择

① 额定正向平均电流 I_F 的选择原则: 在规定的室温和冷却条件下, 额定正向平均电流 I_F 可按式 (1-1) 计算后取相应标准系列值, 即

$$I_F = (1.5 \sim 2) \frac{I_{DM}}{1.57} \quad (1-1)$$

式中 I_{DM} ——流过二极管的最大电流有效值。

考虑到元件的过载能力较小, 因此选择时应考虑 $1.5 \sim 2$ 倍的安全裕量。

② 额定电压 U_{RRM} 的选择原则: 选择电力二极管的反向重复峰值电压 U_{RRM} 的原则应为管子所工作的电路中可能承受到的最大反向瞬时值电压 U_{DM} 的 $2 \sim 3$ 倍, 即取相应标准系列值。

$$U_{RRM} = (2 \sim 3) U_{DM} \quad (1-2)$$

2) 电力二极管使用注意事项

① 必须保证规定的冷却条件, 如强迫风冷或水冷。如不能满足规定的冷却条件, 必须降低容量使用。如规定风冷元件使用在自冷时, 只允许用到额定电流的 $1/3$ 左右。

② 平板型元件的散热器一般不应自行拆装。

③ 严禁用绝缘电阻表检查元件的绝缘情况。如需检查整机的耐压时, 应将元件短接。

(4) 电力二极管的主要类型

在实际应用中, 人们将根据不同场合的不同要求, 选择不同类型的电力二极管。而不同类型的电力二极管性能上的不同, 都是由半导体物理结构和工艺上的差别造成的, 它们的正向压降、反向耐压、反向漏电流及反向恢复特性等性能都各有差异。

1) 普通二极管 普通二极管又称整流二极管, 多用于开关频率不高 (1kHz 以下) 的整流电路中。其反向恢复时间较长, 一般在 $5\mu\text{s}$ 以上, 这在开关频率不高时并不重要, 在参数表中甚至不列出这一参数。但其正向电流定额和反向电压定额却可以达到很高, 分别可达数

千安和数千伏以上。

2) 快恢复二极管 恢复过程很短,特别是反向恢复过程很短(一般在 $5\mu\text{s}$ 以下)的二极管被称为快恢复二极管,简称快速二极管。这类二极管工艺上多采用掺金措施,结构上有的采用 PN 结型结构,也有的采用对此加以改进的 PiN 结构。特别是采用外延型 PiN 结构的所谓的快恢复外延二极管,其反向恢复时间更短(可低于 50ns),正向压降也很低(0.9V 左右),但其反向耐压多在 400V 以下。不管是什么结构,快恢复二极管从性能上可分为快速恢复和超快速恢复两个等级。前者反向恢复时间为数百纳秒或更长,后者则在 100ns 以下,甚至达到 $20\sim 30\text{ns}$ 。

3) 肖特基二极管 以金属和半导体接触形成的势垒为基础的二极管称为肖特基势垒二极管,简称为肖特基二极管。肖特基二极管在信息电子电路中早就得到了应用,但直到 20 世纪 80 年代,由于工艺的发展才得以在电力电子电路中广泛应用。与以 PN 结为基础的电力二极管相比,肖特基二极管的优点在于:反向恢复时间很短($10\sim 40\text{ns}$),正向恢复过程中也不会有明显的电压过冲;在反向耐压较低的情况下其正向压降也很小,明显低于快恢复二极管。因此,其开关损耗和正向导通损耗都比快速二极管要小,且效率高。肖特基二极管的弱点在于:当所能承受的反向耐压提高时,其正向压降也会高得不能满足要求,因此多用于 200V 以下的低压场合;反向漏电流较大且对温度敏感,因此反向稳态损耗不能忽略,而且必须更严格地限制其工作温度。

2. 晶闸管

晶闸管(Thyristor)是晶体闸流管的简称,又称作晶闸管整流器(Silicon Controlled Rectifier, SCR),是一种能够承受高电压、大电流的半控型电力电子器件。1956 年美国贝尔实验室发明了晶闸管技术,1957 年美国通用电气公司(General Electric Company)成功地开发出世界上第一只工业用晶闸管。由于其在开通时刻可以控制,而且各方面的性能均明显优于以前的汞弧整流器,一面世立即受到了普遍的欢迎,从此开辟了电力电子技术迅速发展和广泛应用的崭新时代。晶闸管的特点是具有半控型,即通过在其控制门极上施加触发电压可以控制其导通,如果要对其进行关断则必须利用换相电路。

(1) 晶闸管的结构

晶闸管的外形大致有三种:塑封形、螺栓形和平板形,图 1-3a 为塑封形,多用于额定电流在 10A 以下的电路,图 1-3b 为平板形,用于额定电流大于 200A 的电路,图 1-3c 为螺栓形,一般用于额定电流在 $10\sim 200\text{A}$ 的电路。晶闸管工作时,由于器件本身损耗会产生热量,因此需要通过加装散热器来降低管芯温度,而器件外形结构设计是为了便于安装散热器。

晶闸管是四层($\text{P}_1\text{N}_1\text{P}_2\text{N}_2$)半导体元件,具有 3 个 PN 结,分别是 J_1 、 J_2 、 J_3 ,引出 3 个极分别是阳极(A)、阴极(K)、门极(G),其结构和电气图形符号如图 1-4 所示,其中图 1-4a 为晶闸管的内部结构,图 1-4b 为其电气图形符号。

(2) 晶闸管的导通与关断条件

为了说明晶闸管的工作原理,先做一个实验,实验电路如图 1-5 所示。阳极电源 E_A 连接负载(白炽灯)接到晶闸管的阳极(A)与阴极(K),组成晶闸管的主电路。流过晶闸管阳极的电流称阳极电流 I_A ,晶闸管阳极和阴极两端电压称阳极电压 U_A 。门极电源 E_G 连接晶闸管的门极(G)与阴极(K),组成控制电路亦称触发电路。流过门极的电流称门极电流 I_G ,门极与阴极之间的电压称门极电压 U_G 。用白炽灯来观察晶闸管的通断情况。

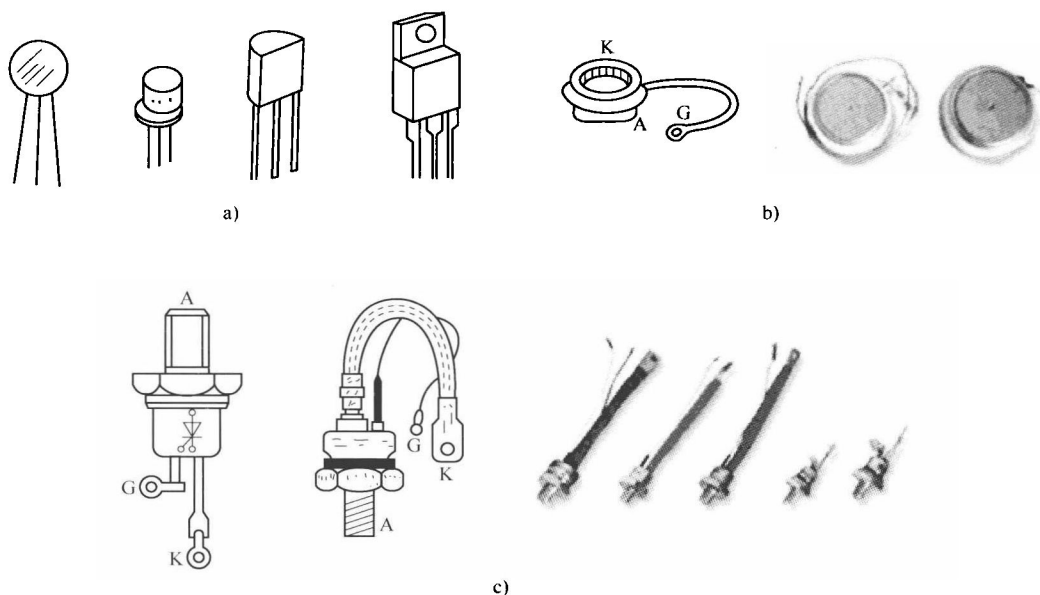


图 1-3 常见晶闸管的外形结构

a) 塑封形 b) 平板形 c) 螺栓形

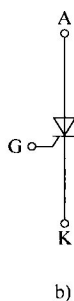
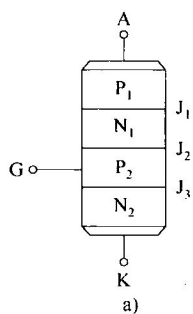


图 1-4 晶闸管的结构和电气图形符号

a) 内部结构 b) 电气图形符号

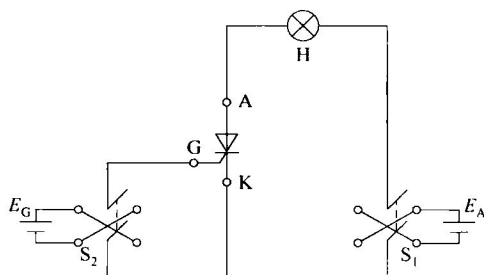


图 1-5 晶闸管导通与关断实验电路

实验说明：

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触发电压，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。说明晶闸管像整流二极管一样，具有单向导电性。

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。

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) 晶闸管一旦导通后维持阳极电压不变，将触发电压撤除管子依然处于导通状态，即门极对管子不再具有控制作用。

(3) 晶闸管工作原理

晶闸管的 PNP 结构可以等效为两个互补连接的晶体管。其中, N_1 和 P_2 区既是一个晶体管的集电极同时又是另一个晶体管的基极。分析原理时可以把晶闸管看成由一个 PNP 型和一个 NPN 型两个晶体管连接而成, 每一个晶闸管的基极与另一个晶闸管的集电极相连, 阳极 (A) 相当于 PNP 型晶体管 VT_1 的发射极, 阴极 (K) 相当于 NPN 型晶体管 VT_2 的发射极。其双晶体管模型及工作原理如图 1-6 所示。

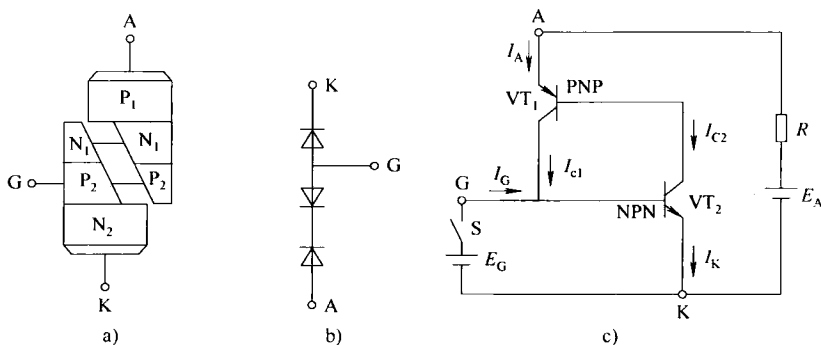


图 1-6 晶闸管的双晶体管模型及其工作原理

a) 双晶体管模型 b) PN 结等效结构 c) 工作原理示意图

当晶闸管阳极承受正向电压 (即 A 接电源正极, K 接电源负极), 门极 (G) 不加电压, 这时晶闸管相当于由 3 个 PN 结相串接, 其中一只反接, 因而不导通, 如图 1-6b 所示。在晶闸管阳极承受正向电压, 门极 (G) 也加上适当电压 ($U_{GK} > 0$) 时, 则有电流 I_G 从门极流入 NPN 型管的基极, 即 I_{B2} , 经放大后的集电极电流 I_{C2} ($I_{C2} = \beta_2 I_{B2} = \beta_2 I_G$) 流入 PNP 型管的基极, 再经 PNP 管的放大, 其集电极电流 I_{C1} 又流入 NPN 型管的基极, 如此循环, 则产生强烈的增强式正反馈过程, 即

$$I_G(I_{B2}) \xrightarrow{VT_2 \text{ 放大}} I_{C2}(\beta_2 I_{B2}) \longrightarrow I_{B1} \xrightarrow{VT_1 \text{ 放大}} I_{C1}(\beta_1 \beta_2 I_{B1})$$

↑
形成正反馈, 很快使晶闸管触发导通

使两个晶闸管很快饱和导通, 从而使晶闸管由阻断迅速的变为导通。流过晶闸管的电流将取决于外加电源电压和主回路的阻抗的大小。

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, 即使门极电流消失, 晶闸管仍将处于导通状态。因此, 门极的作用仅是触发晶闸管使其导通, 导通之后, 门极就失去了控制作用。

欲使晶闸管关断, 最根本的方法就是必须使其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维持电流以下, 这只有用使阳极电压减小到零或反向的方法来实现。

结论:

- 1) 晶闸管导通条件 阳极加正向电压, 门极加适当正向触发电压。
- 2) 关断条件 流过晶闸管的电流小于维持电流。

(4) 晶闸管基本特性

1) 晶闸管的阳极伏安特性 晶闸管的阳极与阴极间电压和阳极电流之间的关系,称为阳极伏安特性。其伏安特性曲线如图 1-7 所示。

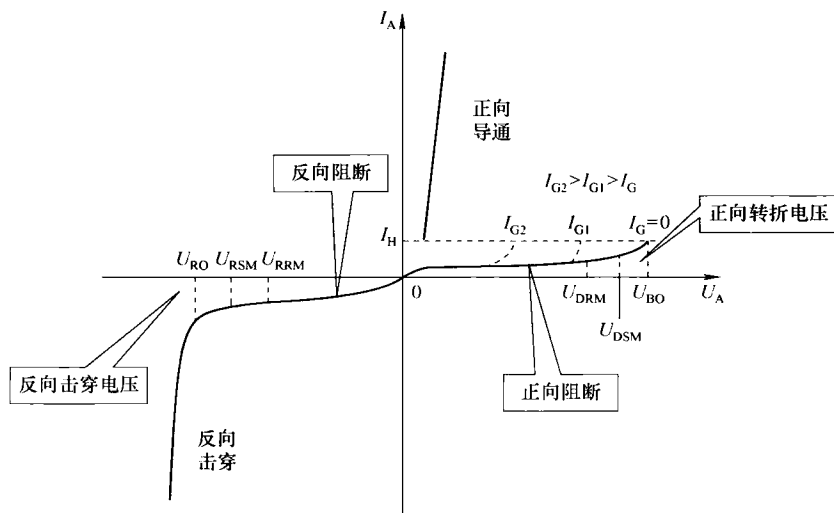


图 1-7 晶闸管阳极伏安特性曲线

图中第 I 象限为正向特性,当 $I_G=0$ 时,如果在晶闸管两端所加正向电压 U_A 未增到正向转折电压 U_{BO} 时,晶闸管都处于正向阻断状态,只有很小的正向漏电流。当 U_A 增到 U_{BO} 时,则漏电流急剧增大,晶闸管导通,正向电压降低,其特性和二极管的正向伏安特性相仿,称为正向转折或“硬开通”。多次“硬开通”会损坏管子,晶闸管通常不允许这样工作。一般采用对晶闸管的门极加足够大的触发电流使其导通,门极触发电流越大,正向转折电压越低。

晶闸管的反向伏安特性如图 1-7 中第 III 象限所示,它与整流二极管的反向伏安特性相似。处于反向阻断状态时,只有很小的反向漏电流,当反向电压超过反向击穿电压 U_{RO} 时,反向漏电流急剧增大,造成晶闸管反向击穿而损坏。

2) 晶闸管的门极伏安特性 晶闸管门极伏安特性是指门极电压与电流的关系,晶闸管的门极和阴极之间只有一个 PN 结,所以电压与电流的关系与普通二极管的伏安特性相似,门极伏安特性曲线如图 1-8 所示。图中 ABCGFEDA 所围成的区域为可靠触发区;图中阴影部分为不触发区;图中 ABCJIH 所围成的区域为不可靠触发区。

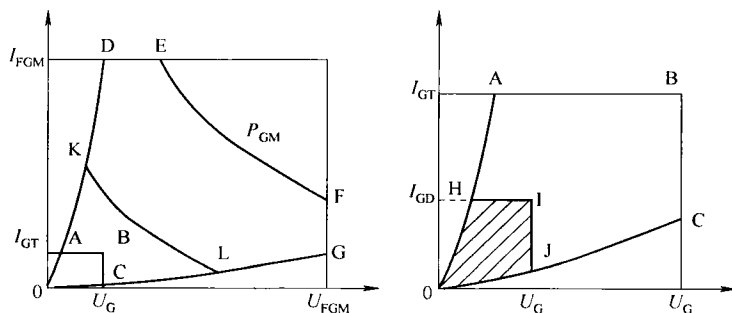


图 1-8 晶闸管门极伏安特性曲线

晶闸管是单向可控器件，即仅在晶闸管的阳极和阴极两端加正向电压时，晶闸管仍处于正向阻断状态，必须在它的门极和阴极也加适当的正向触发电压，晶闸管才能导通。

3) 晶闸管的动态特性 晶闸管的动态特性主要是指晶闸管的开通与关断过程，其波形如图 1-9 所示。

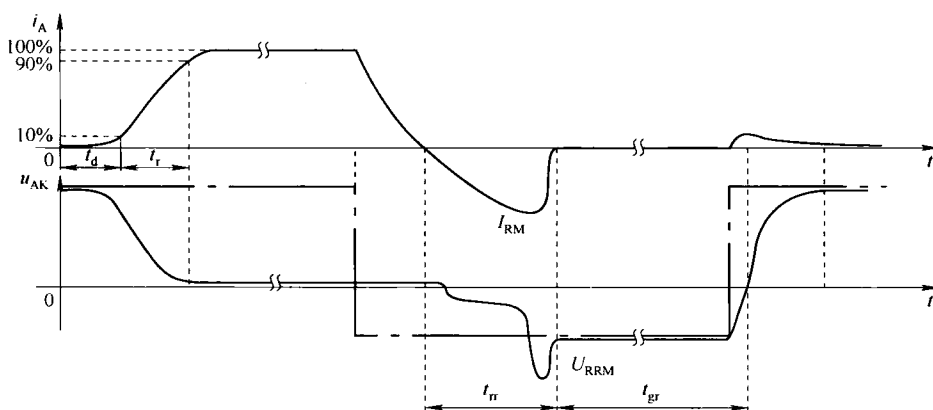


图 1-9 晶闸管的开通与关断过程波形

开通过程：

开通时间 t_{gt} 包括延迟时间 t_d 与上升时间 t_r ，即

$$t_{gt} = t_d + t_r$$

延迟时间 t_d ：门极电流阶跃时刻开始，到阳极电流上升到稳态值的 10% 的时间。

上升时间 t_r ：阳极电流从稳态值的 10% 上升到稳态值的 90% 所需的时间。

普通晶闸管延迟时间为 0.5 ~ 1ms，上升时间为 0.5 ~ 3ms。

关断过程：

关断时间 t_q 包括反向阻断恢复时间 t_{rr} 与正向阻断恢复时间 t_{gr} ，即

$$t_q = t_{rr} + t_{gr}$$

普通晶闸管的关断时间一般为几百微秒。

反向阻断恢复时间 t_{rr} ：正向电流降为零到反向电流衰减至接近零的时间。

正向阻断恢复时间 t_{gr} ：晶闸管要恢复其对正向电压的阻断能力还需要一段时间。

注：

1) 在正向阻断恢复时间内如果重新对晶闸管施加正向电压，晶闸管会重新正向导通。

2) 在实际应用中，应对晶闸管施加足够长时间的反向电压，使晶闸管充分恢复其对正向电压的阻断能力，电路才能可靠工作。

(5) 晶闸管主要参数

在实际使用的过程中，往往要根据实际的工作条件进行管子的合理选择，以达到满意的技术经济效果。怎样才能正确地选择管子呢？这主要包括两个方面：一方面要根据实际情况确定所需晶闸管的额定值；另一方面要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，作为使用者来说，只需要能够正确地选择管子就可以了。表 1-1 列出了晶闸管的主要参数。

表 1-1 晶闸管的主要参数

型号	通态平均电流 /A	通态峰值电压 /V	断态正向重复峰值 值电流/mA	断态反向重复峰值电 压/V	门极触发电流/mA	门极触发电压/V	断态电压临界上升率/ (V/ μ s)	推荐用散热器	安装力 /kN	冷却方式
KP5	5	≤ 2.2	≤ 8	100 ~ 2000	< 60	< 3		SZ14		自然冷却
KP10	10	≤ 2.2	≤ 10	100 ~ 2000	< 100	< 3	250 ~ 800	SZ15		自然冷却
KP20	20	≤ 2.2	≤ 10	100 ~ 2000	< 150	< 3		SZ16		自然冷却
KP30	30	≤ 2.4	≤ 20	100 ~ 2400	< 200	< 3	50 ~ 1000	SZ16		强迫风冷 水冷
KP50	50	≤ 2.4	≤ 20	100 ~ 2400	< 250	< 3		SL17		强迫风冷 水冷
KP100	100	≤ 2.6	≤ 40	100 ~ 3000	< 250	< 3.5		SL17		强迫风冷 水冷
KP200	200	≤ 2.6	≤ 0	100 ~ 3000	< 350	< 3.5		L18	11	强迫风冷 水冷
KP300	300	≤ 2.6	≤ 50	100 ~ 3000	< 350	< 3.5		L18B	15	强迫风冷 水冷
KP500	500	≤ 2.6	≤ 60	100 ~ 3000	< 350	< 4	100 ~ 1000	SF15	19	强迫风冷 水冷
KP800	800	≤ 2.6	≤ 80	100 ~ 3000	< 350	< 4		SF16	24	强迫风冷 水冷
KP1000	1000			100 ~ 3000				SS13		
KP1500	1000	≤ 2.6	≤ 80	100 ~ 3000	< 350	< 4		SF16	30	强迫风冷 水冷
KP2000								SS13		
	1500	≤ 2.6	≤ 80	100 ~ 3000	< 350	< 4		SS14	43	强迫风冷 水冷
	2000	≤ 2.6	≤ 80	100 ~ 3000	< 350	< 4		SS14	50	强迫风冷 水冷

1) 晶闸管的电压定额

① 断态重复峰值电压 U_{DRM} ：在图 1-7 所示的晶闸管的阳极伏安特性中，规定当门极断开，晶闸管处在额定结温时，允许重复加在管子上的正向峰值电压为晶闸管的断态重复峰值电压，用 U_{DRM} 表示。它是由伏安特性中的正向转折电压 U_{B0} 减去一定裕量，成为晶闸管的断态不重复峰值电压 U_{DSM} ，然后再乘以 90% 而得到的。至于断态不重复峰值电压 U_{DSM} 与正向转折电压 U_{B0} 的差值，则由生产厂家自定。这里需要说明的是，晶闸管正向工作时有两种工作状态：阻断状态（简称断态）；导通状态（简称通态）。

② 反向重复峰值电压 U_{RRM} ：相似的，规定当门极断开，晶闸管处在额定结温时，允许重复加在管子上的反向峰值电压为反向重复峰值电压，用 U_{RRM} 表示。它是由伏安特性中的反向击穿电压 U_{R0} 减去一定裕量，成为晶闸管的反向不重复峰值电压 U_{RSM} ，然后再乘以 90% 而得到的。至于反向不重复峰值电压 U_{RSM} 与反向转折电压 U_{R0} 的差值，则由生产厂家自定。

③ 额定电压 U_{Tn} ：将 U_{DRM} 和 U_{RRM} 中的较小值按百位取整后作为该晶闸管的额定值。例如：一晶闸管实测 $U_{\text{DRM}} = 812\text{V}$ ， $U_{\text{RRM}} = 756\text{V}$ ，将两者较小的 756V 按表 1-2 取整得 700V，该晶闸管的额定电压为 700V。

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，1000 ~ 3000V，每 200V 为一级，用百位数或千位和百位数表示级数。晶闸管标准电压等级见表 1-2。