

DIANLI DIANZI YUANQIJIAN
XUANYONG YIBENTONG



电力电子元器件 选用一本通

刘晓琴 主编

吴云 副主编



化学工业出版社

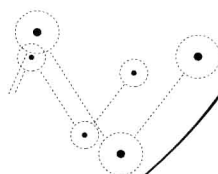
DIANLI DIANZI YUANQIJIAN
XUANYONG YIBENTONG



电力电子元器件 选用一本通

刘晓琴 主编

吴云 副主编



化学工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

电力电子元器件选用一本通/刘晓琴主编. —北京:
化学工业出版社, 2012. 10
ISBN 978-7-122-15266-4

I. ①电… II. ①刘… III. ①电力系统-电子器件
IV. ①TN303

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 210976 号

责任编辑: 宋 辉
责任校对: 边 涛

文字编辑: 云 雷
装帧设计: 王晓宇

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 装: 三河市延风印装厂
787mm×1092mm 1/16 印张 17 字数 459 千字 2013 年 2 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 49.00 元

版权所有 违者必究

前言

电力电子技术就是使用电力电子器件对电能进行变换和控制的技术。电力电子技术的应用范围十分广泛,不仅用于一般工业,也广泛用于交通运输、电力系统、通信系统、计算机系统、新能源系统等,在照明、空调等家用电器及其他领域中也有着广泛的应用。电力电子器件的选用与检测是电力电子技术的基础。随着技术的不断进步,电力电子器件越来越显示出其独特的魅力。

本书一共7章。书中绪论介绍了电力电子技术及其发展与应用。第1章~第4章分别介绍了典型电力电子器件的基本知识。第5章介绍了电力电子器件典型四种变换电路。第6章着重介绍了新型的电力电子器件模块特点与应用。第7章介绍了电力电子装置及应用。书中内容安排合理、丰富。

本书适合电气工程及其自动化专业、自动化、测控技术与仪器及其他相关专业的本科生使用,也可供工程技术人员参考。

本书由刘晓琴主编,吴云副主编,参与本书编写工作的还有杨冶杰、单海鸥、杜明娟等。在本书的编写过程中,还得到辽宁石油化工大学佟仕忠教授的大力支持,在此表示衷心的感谢!

由于编者的经验和水平有限,疏漏之处在所难免,谨请读者批评指正。

编者

目 录

CONTENTS

绪论	001
----------	-----

第1章 不可控电力电子器件	005
---------------------	-----

1.1 电力二极管的功能、分类与电路符号	006
1.1.1 电力二极管的功能	006
1.1.2 电力二极管的符号	006
1.1.3 电力二极管的分类	006
1.2 电力二极管的参数与标识	007
1.2.1 电力二极管的命名与标识方法	007
1.2.2 电力二极管的参数	008
1.3 电力二极管的特性	008
1.3.1 电力二极管的伏安特性	008
1.3.2 电力二极管的开关特性	008
1.4 电力二极管的结构与作用	009
1.4.1 电力二极管结构	009
1.4.2 电力二极管的作用	010
1.5 电力二极管模块	010
1.5.1 电力二极管模块的主要参数	010
1.5.2 单、双二极管模块	010
1.6 其他电力二极管	011
1.6.1 快恢复二极管	011
1.6.2 肖特基二极管	012
1.7 电力二极管的选用原则	012
1.8 电力二极管的检测	012
1.9 散热措施	013
1.9.1 散热的原理与重要性	013
1.9.2 电力二极管散热器及其安装	013

第2章 半控型元件	015
-----------------	-----

2.1 晶闸管的功能、分类与电路符号	016
2.1.1 晶闸管的功能	016
2.1.2 晶闸管的符号	016
2.1.3 晶闸管的分类	016
2.2 晶闸管的参数与标识	016
2.2.1 晶闸管的命名与标识方法	016
2.2.2 晶闸管的参数	017
2.3 晶闸管的静态特性与动态特性	018
2.3.1 晶闸管的静态特性	018

2.3.2 晶闸管的动态特性	019
2.4 晶闸管的结构与作用	019
2.4.1 晶闸管的结构	019
2.4.2 晶闸管的作用	020
2.5 其他半控型器件	020
2.5.1 快速晶闸管	020
2.5.2 双向晶闸管	021
2.5.3 光控晶闸管	022
2.5.4 逆导晶闸管	022
2.5.5 静电感应晶闸管	023
2.5.6 MOS 控制晶闸管	023
2.5.7 普通晶闸管与 GTO 的区别	024
2.6 晶闸管的触发电路	024
2.6.1 对触发电路的基本要求	024
2.6.2 触发电路的形式	025
2.6.3 单结晶体管触发电路	026
2.6.4 集成化触发电路	026
2.7 半控型器件的选用原则与检测	028
2.7.1 半控型器件的选用	028
2.7.2 半控型器件的检测	028

第3章 全控型元件 031

3.1 绝缘栅双极晶体管的功能、分类与电路符号	032
3.1.1 绝缘栅双极晶体管的功能	032
3.1.2 绝缘栅双极晶体管的符号	032
3.1.3 绝缘栅双极晶体管的分类	032
3.2 绝缘栅双极晶体管的参数与标识	032
3.2.1 绝缘栅双极晶体管的命名与标识方法	032
3.2.2 绝缘栅双极晶体管的参数	033
3.3 绝缘栅双极晶体管的特性与作用	033
3.3.1 绝缘栅双极晶体管的结构特性	033
3.3.2 绝缘栅双极晶体管的作用	035
3.4 其他全控型元件	035
3.4.1 门极可断晶闸管	035
3.4.2 电力晶体管	036
3.4.3 电力 MOS 场效应管	039
3.4.4 静电感应晶体管	041
3.4.5 双极型静电感应晶体管	041
3.4.6 电子注入增强栅晶体管	042
3.4.7 绝缘栅双极晶体管与电力 GTR、电力 MOSFET 的区别	042
3.5 门极控制技术	043
3.5.1 栅极电压的选择	043
3.5.2 几种典型 IGBT 栅极驱动方式	043
3.5.3 IGBT 的保护	043

3.6	门极驱动特性	044
3.6.1	栅极驱动电压	044
3.6.2	对电源的要求	044
3.6.3	对驱动功率的要求	044
3.6.4	栅极电阻及栅极布线要求	044
3.6.5	隔离问题	045
3.7	门极控制信号波形分析	045
3.8	门极驱动型式	045
3.8.1	脉冲变压器驱动电路	045
3.8.2	光耦隔离驱动电路	046
3.9	绝缘栅双极晶体管的选用原则与检测	047
第4章	电力电子器件保护与驱动电路	049
4.1	晶闸管 (SCR) 的保护、缓冲电路与驱动电路	050
4.1.1	晶闸管 (SCR) 的保护电路	050
4.1.2	过电流保护	054
4.1.3	晶闸管的串联、并联	057
4.1.4	晶闸管的缓冲电路	059
4.1.5	晶闸管的门极驱动电路	063
4.2	GTR 的驱动与保护电路	065
4.2.1	GTR 驱动电路的设计原则	065
4.2.2	基极驱动电路的基本形式	067
4.2.3	过电流的检测与保护	074
4.3	GTR 的缓冲电路	077
4.3.1	概述	077
4.3.2	耗能式缓冲电路	078
4.3.3	馈能式缓冲电路	081
4.3.4	无缓冲技术	081
4.4	功率场效应晶体管 (Power MOSFET) 栅极驱动与保护电路	083
4.4.1	栅极驱动特性	084
4.4.2	栅极驱动电路	086
4.4.3	功率场效应晶体管并联应用	094
4.4.4	使用中的保护措施	094
4.5	门关断晶闸管 (GTO) 的缓冲电路	095
4.5.1	缓冲电路的工作原理	096
4.5.2	缓冲电路的作用	098
4.5.3	缓冲电路的参数估算与安装工艺	099
4.6	GTO 的过电流保护电路	100
4.6.1	过电流的产生与 GTO 的过电流特性	100
4.6.2	状态识别过电流保护法	101
4.6.3	桥臂互锁保护法	103
4.6.4	逆变器的过电流保护	104
4.6.5	门极电路的过电流保护	107

第5章 电力电子器件典型电路及其应用 109

5.1 整流电路	110
5.1.1 单相半波晶闸管可控整流电路	110
5.1.2 单相全波晶闸管可控整流电路	116
5.1.3 单相桥式晶闸管全控整流电路	118
5.1.4 二相零式晶闸管整流电路	125
5.1.5 二相式晶闸管整流电路	125
5.1.6 三相可控整流电路	125
5.1.7 多重化整流电路	137
5.2 斩波电路	139
5.2.1 DC-DC 变换的基本控制方式	139
5.2.2 基本 DC 变换器	141
5.2.3 晶闸管斩波器	154
5.2.4 桥式可逆斩波器	158
5.3 交流变换电路	161
5.3.1 交流电力电子开关	161
5.3.2 交流调压电路	165
5.4 逆变电路	174
5.4.1 单相逆变器	174
5.4.2 三相逆变器	178

第6章 新型的电力电子器件模块 193

6.1 概述	194
6.2 半导体二极管模块	194
6.2.1 半导体二极管模块的主要参数	194
6.2.2 单、双二极管模块	195
6.2.3 单相全桥二极管整流模块	197
6.2.4 三相半桥二极管整流模块	199
6.2.5 三相全桥二极管整流模块	200
6.3 高压集成电路	201
6.4 智能功率集成电路	203
6.5 晶闸管模块	211
6.5.1 晶闸管模块的主要参数	212
6.5.2 普通单、双晶闸管模块	212
6.5.3 普通晶闸管/整流管模块	214
6.5.4 单相半控桥晶闸管模块和单相全控桥晶闸管模块	216
6.5.5 单相半控桥+整流管模块和单相全控桥+整流管模块	218
6.5.6 本相半控桥晶闸管模块和三相全控桥晶闸管模块	221
6.5.7 三相半控桥+整流管模块和三相全控桥+整流管模块	221
6.6 固态继电器	223
6.7 恒流恒压控制模块应用	225

第7章 电力电子装置及应用 229

7.1 开关电源	230
----------------	-----

7.1.1 直流稳压电源概述	230
7.1.2 开关电源的设计	231
7.2 不间断电源	235
7.3 静止无功补偿装置	239
7.3.1 晶闸管控制电抗器	239
7.3.2 晶闸管投切电容器	240
7.3.3 静止无功发生器	240
7.4 电力储能系统	241
7.5 电力电子器件的发热与散热	245
7.5.1 电力电子器件的发热	246
7.5.2 电力电子器件的散热	247
7.6 电力电子技术在可再生能源中的应用	250
7.6.1 电力电子技术在光电电力系统中的应用	251
7.6.2 电力电子技术在风力电力系统中的应用	254
7.7 柔性交流输电系统	257

参考文献	259
-------------------	------------



绪 论

1. 什么是电力电子技术？

电子技术包括信息电子技术和电力电子技术两大分支。通常所说的模拟电子技术和数字电子技术都属于信息电子技术。所谓电力电子技术就是应用于电力领域的电子技术。

电力电子技术中的“电力”又区别于“电力系统”所指的“电力”，后者特指电力网的“电力”，前者则更一般些。而电力电子技术就是使用电力电子器件对电能进行变换和控制的技术。电力电子器件的制造技术是电力电子技术的基础。电力电子器件的制造技术和用于信息变换的电子器件制造技术的理论基础（都是基于半导体理论）是一样的，其大多数工艺也是相同的。电力电子电路和信息电子电路的许多分析方法也是一致的。变流技术则是电力技术的核心。如表 0.1 所示。

表 0.1 电力的基本变换

输入 \ 输出	交流 (AC)	直流 (DC)
直流 (DC)	整流	直流斩波
交流 (AC)	交流电力控制、变频、变相	逆变

2. 电力电子技术的发展史

晶闸管出现前的时期可称为电力电子技术的史前期或黎明期。1904 年出现了电子管，

它能在真空中对电子流进行控制，并应用于通信和无线电，从而开启了电子技术用于电力领域的先河。20 世纪 30~50 年代，水银整流器广泛用于电化学工业、电气铁道直流变电所以及轧钢用直流电动机的传动，甚至用于直流输电。这一时期，各种整流电路、逆变电路、周波变流电路的理论已经发展成熟并广为应用。在这一时期，也应用直流发电机组来变流。1947 年美国著名的贝尔实验室发明了晶体管，引发了电子技术的一场革命。如图 0.1 所示。随之晶闸管时代到来。由于其优越的电气性能和控制性能，使之很快就取代了水银整流器和旋转变流机组，并且其应用范围也迅速扩大。电力电子技术的概念和基础

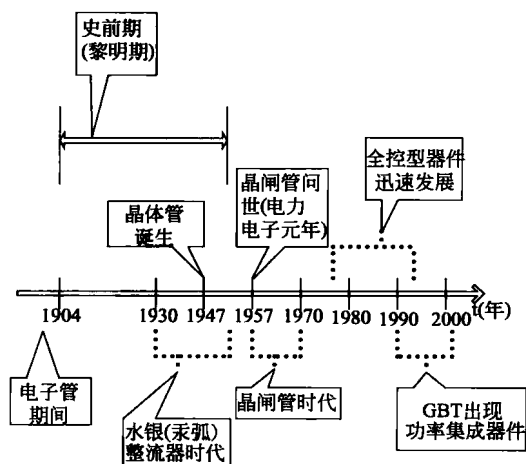


图 0.1 电力电子技术的发展史

就是由于晶闸管及晶闸管变流技术的发展而确立的。

晶闸管是通过对门极的控制能够使其导通而不能使其关断的器件，属于半控型器件。对晶闸管电路的控制方式主要是相位控制方式，简称相控方式。晶闸管的关断通常依靠电网电压等外部条件来实现。这就使得晶闸管的应用受到了很大的局限。20 世纪 70 年代后期，全控型器件和电力电子集成电路 (PIC) 以及门极可关断晶闸管 (GTO)、电力双极型晶体管 (BJT) 和电力场效应晶体管 (Power-MOSFET) 为代表的全控型器件迅速发展。全控型器件的特点是，通过对门极（基极、栅极）的控制既可使其开通又可使其关断。采用全控型器件的电路的主要控制方式为脉冲宽度调制 (PWM) 方式。相对于相位控制方式，可称之为斩波控制方式，简称斩控方式。在 80 年代后期，以绝缘栅极双极型晶体管 (IGBT) 为代表的复合型器件异军突起。它是 MOSFET 和 BJT 的复合，综合了两者的优点。与此相对，MOS 控制晶闸管 (MCT) 和集成门极换流晶闸管 (IGCT) 复合了 MOSFET 和 GTO。它把驱动、控制、保护电路和电力电子器件集成在一起，构成

了电力电子集成电路 (PIC)，这代表了电力电子技术发展的一个重要方向。电力电子集成技术包括以 PIC 为代表的单片集成技术、混合集成技术以及系统集成技术。

随着全控型电力电子器件的不断进步，电力电子电路的工作频率也不断提高。与此同时，软开关技术的应用在理论上可以使电力电子器件的开关损耗降为零，从而提高了电力电子装置的功率密度。

3. 电力电子技术的应用

电力电子技术的应用范围十分广泛。它不仅用于一般工业，也广泛用于交通运输、电力系统、通信系统、计算机系统、新能源系统等，在照明、空调等家用电器及其他领域中也有着广泛的应用。

(1) 一般工业

工业中大量应用各种交直流电动机，都是用电力电子装置进行调速的。一些对调速性能要求不高的大型鼓风机等近年来也采用了变频装置，以达到节能的目的。

(2) 交通运输

电气化铁道中广泛采用电力电子技术。电气机车中的直流机车中采用整流装置，交流机车采用变频装置。直流斩波器也广泛用于铁道车辆。在未来的磁悬浮列车中，电力电子技术更是一项关键技术。除牵引电机传动外，车辆中的各种辅助电源也都离不开电力电子技术。电动汽车的电机依靠电力电子装置进行电力变换和驱动控制，其蓄电池的充电也离不开电力电子装置。一台高级汽车中需要许多控制电机，它们也要靠变频器和斩波器驱动并控制。飞机、船舶和电梯都离不开电力电子技术。

(3) 电力系统

据估计，发达国家在用户最终使用的电能中，有 60% 以上的电能至少经过一次以上电力电子变流装置的处理。直流输电在长距离、大容量输电时有很大的优势，其送电端的整流阀和受电端的逆变阀都采用晶闸管变流装置，而轻型直流输电则主要采用全控型的 IGBT 器件。近年发展起来的柔性交流输电 (FACTS) 也是依靠电力电子装置才得以实现的。晶闸管控制电抗器 (TCR)、晶闸管投切电容器 (TSC)、静止无功发生器 (SVG)、有源电力滤波器 (APF) 等电力电子装置大量用于电力系统的无功补偿或谐波抑制。在配电网系统，电力电子装置还可用于防止电网瞬时停电、瞬时电压跌落、闪变等，以进行电能质量控制，改善供电质量。在变电所中，给操作系统提供可靠的交直流操作电源，给蓄电池充电等都需要电力电子装置。

(4) 电子装置用电源

各种电子装置一般都需要不同电压等级的直流电源供电。通信设备中的程控交换机所用的直流电源以前用晶闸管整流电源，现在已改为采用全控型器件的高频开关电源。大型计算机所需的工作电源、微型计算机内部的电源现在也都采用高频开关电源。在大型计算机等场合，常常需要不间断电源 (Uninterruptible Power Supply, UPS) 供电，不间断电源实际就是典型的电力电子装置。

(5) 家用电器

电力电子照明电源体积小、发光效率高、可节省大量能源，正在逐步取代传统的白炽灯和日光灯。空调、电视机、音响设备、家用计算机，不少洗衣机、电冰箱、微波炉等电器也应用了电力电子技术。

(6) 其他

航天飞行器中的各种电子仪器需要电源，载人航天器也离不开各种电源，这些都必须采用电力电子技术。抽水储能发电站的大型电动机需要用电力电子技术来启动和调速。超导储能是未来的一种储能方式，它需要强大的直流电源供电，这也离不开电力电子技术。

Chapter 1

电力电子器件选用一本通



第1章

不可控电力电子器件

1.1 电力二极管的功能、分类与电路符号

1.1.1 电力二极管的功能

电力二极管 (Power Diode) 在 20 世纪 50 年代初期就获得应用, 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, 它实现正向导通、反向截止的功能, 电力二极管可直接用于处理电能的主电路中, 完成电能的变换或控制作用。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。

1.1.2 电力二极管的符号

图 1.1 为电力二极管的外形、结构和电气图形符号。

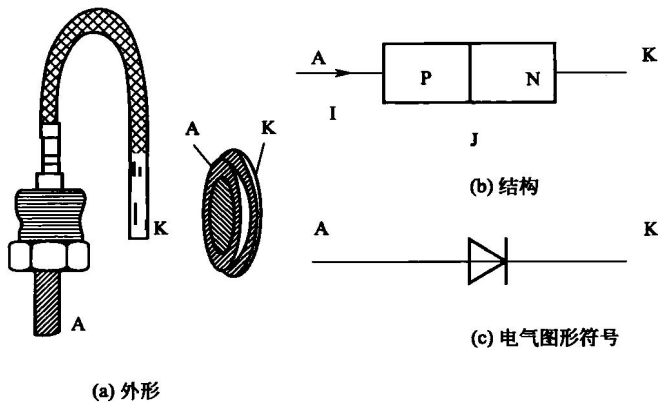


图 1.1 电力二极管的外形、结构和电气图形符号

1.1.3 电力二极管的分类

电力二极管只有两个端子, 器件的通和断是由其在主电路中承受的电压和电流决定的, 如图 1.2 所示。

(1) 按照驱动电路加在器件控制端和公共端之间信号的性质分

① 电流驱动型 (Current Driving Type)——通过从控制端注入或者抽出电流来实现导通或者关断的控制。

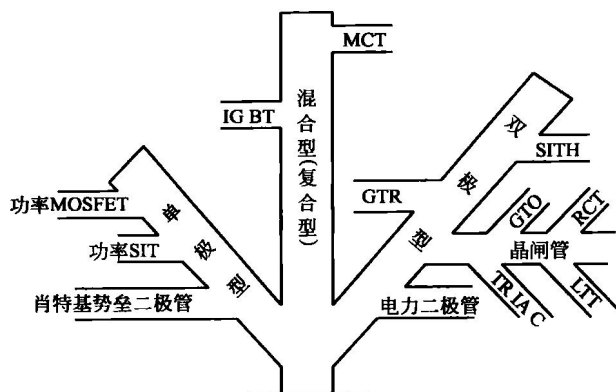
② 电压驱动型 (Voltage Driving Type)——仅通过在控制端和公共端之间施加一定的电压信号就可实现导通或者关断的控制。电压驱动型器件实际上是通过加在控制端上的电压在器件的两个主电路端子之间产生可控的电场来改变流过器件的电流大小和通断状态, 所以又称为场控器件 (Field Controlled Device), 或场效应器件。

(2) 按照器件内部电子和空穴两种载流子参与导电的情况分

① 单极型器件 (Unipolar Device)——由一种载流子参与导电的器件;

② 双极型器件 (Bipolar Device)——由电子和空穴两种载流子参与导电的器件;

③ 复合型器件 (Complex Device)——由单极型器件和双极型器件集成混合而成的器件。



1.2 电力二极管的参数与标识

1.2.1 电力二极管的命名与标识方法

(1) 标识

国家标准国产二极管的型号命名分为五个部分。

第一部分：主称。例如：2：二极管。

第二部分：材料与极性。

例如：A：N型锗材料；B：P型锗材料；C：N型硅材料；D：P型硅材料；E：化合物材料。

第三部分：类别。

例如：P：小信号管（普通管）；W：电压调整管和电压基准管（稳压管）；L：整流堆；N：阻尼管；Z：整流管；U：光电管；K：开关管；B或C：变容管；V：混频检波管；J_D：激光管；S：隧道管；C_M：磁敏管；H：恒流管；Y：体效应管；E_F：发光二极管。

第四部分：序号。用数字表示同一类别产品序号。

第五部分：规格号。用字母表示产品规格、档次。

(2) 参数

① 正向平均电流 $I_{F(AV)}$ 额定电流是指在指定的管壳温度（简称壳温，用 T_C 表示）和散热条件下，其允许流过的最大工频正弦半波电流的平均值。

正向平均电流是按照电流的发热效应来定义的，因此使用时应按有效值相等的原则来选取电流定额，并应留有一定的裕量。当用在频率较高的场合时，开关损耗造成的发热往往不能忽略。当采用反向漏电流较大的电力二极管时，其断态损耗造成的发热效应也不小。

② 正向压降 U_F 指电力二极管在指定温度下, 流过某一指定的稳态正向电流时对应的正向压降。有时参数表中也给出在指定温度下流过某一瞬态正向大电流时器件的最大瞬时正向压降。

③ 反向重复峰值电压 U_{RRM} 指对电力二极管所能重复施加的反向最高峰值电压。通常是其雪崩击穿电压 U_B 的 $2/3$ 。使用时, 往往按照电路中电力二极管可能承受的反向最

高峰值电压的两倍来选定。

④ 最高工作结温 T_{JM} 结温是指管芯 PN 结的平均温度, 用 T_J 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。

⑤ 反向恢复时间 t_{rr} $t_{rr} = t_d + t_f$, 关断过程中, 电流降到 0 起到恢复反向阻断能力的时间。

⑥ 浪涌电流 I_{FSM} 指电力二极管所能承受最大的连续一个或几个工频周期的过电流。

1.2.2 电力二极管的参数

电力二极管的主要参数如下。

C_T —势垒电容。

C_j —结(极间)电容, 表示在二极管两端加规定偏压下, 二极管的总电容。

C_{jv} —偏压结电容。

C_o —零偏压电容。

C_{jo} —零偏压结电容。

C_{jo}/C_{jn} —结电容变化。

C_s —管壳电容或封装电容。

C_t —总电容。

C_{TV} —电压温度系数。在测试电流下, 稳定电压的相对变化与环境温度的绝对变化之比。

C_{TC} —电容温度系数。

C_{vn} —标称电容。

I_{CM} —最大输出平均电流。

I_{FMP} —正向脉冲电流。

I_P —峰点电流。

I_V —谷点电流。

I_{GT} —晶闸管控制极触发电流。

I_{GD} —晶闸管控制极不触发电流。

I_{GFM} —控制极正向峰值电流。

$I_{R(AV)}$ —反向平均电流。

1.3 电力二极管的特性

1.3.1 电力二极管的伏安特性

正向伏安特性是当正向电压大于门槛电压时, 管子开始导通, 电流缓慢上升, 当电压超过一定伏值时, 正向电流急剧上升, 此后电压不再随电流变化。反向特性也有类似的现象, 即当反向电压加在管子两端时, 如果反向电压小于管子的最大反向击穿电压, 管子仅有很小的反向饱和漏电流流过, 基本上可以忽略不计, 但是当反向电压大于管子的反向击穿电压时, 管子发生电击穿即雪崩击穿和齐纳击穿, 这时管子反向电流激增, 而管子端电压等于击穿电压基本维持常数, 不随电流的变化而变化。如图 1.3 所示。

1.3.2 电力二极管的开关特性

电力二极管在有正向电压, 并且正向电压大于 1V 左右(每个管子不一样, 但大约在