


普通高等教育“九五”部级重点教材

普通高等教育机电类规划教材

电力电子技术基础

应建平 林渭勋 黄敏超 编著



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“九五”部级重点教材
普通高等教育机电类规划教材

电力电子技术基础

应建平 林渭勋 黄敏超 编著



机械工业出版社

本书覆盖了电力电子学的主要内容。本书的第一章深入浅出地介绍了各种常用的电力电子器件,包括快恢复二极管、晶闸管、GTR、功率MOSFET和IGBT。第二章介绍了可控整流电路、有源逆变电路和负载换流逆变电路,将负载换流逆变电路和有源逆变电路安排在同一章有助于对有源逆变电路及负载换流逆变电路的深入理解。第三章介绍了交流变换电路。第四章介绍了BUCK电路、BOOST电路、BUCK-BOOST电路、CUK电路、正激式变换电路和反激式变换电路。第五章介绍了逆变电路和逆变电路输出谐波控制。第六章介绍了缓冲、驱动和保护电路及散热技术。

本书适合于大专院校电气信息类专业师生,也可供从事电力电子技术工作和电源研发的工程技术人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

电力电子技术基础/应建平等编著. —北京:机械工业出版社, 2003.2
普通高等教育机电类规划教材
ISBN 7-111-11334-9

I. 电... II. 应... III. 电力电子学—高等学校—教材 IV. TM1

中国版本图书馆CIP数据核字(2002)第100350号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)
责任编辑:王小东 版式设计:霍永明 责任校对:唐海燕
封面设计:饶薇 责任印制:闫焱
北京第二外国语学院印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行
2003年2月第1版第1次印刷
787mm×1092mm $\frac{1}{16}$ ·10 印张·243千字
0001—4000册
定价:15.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话(010)68993821、88379646
封面无防伪标均为盗版

前 言

从 20 世纪 50 年代晶闸管问世以来, 电力电子技术以非常快的速度发展起来。目前, 电力电子技术虽然已过了不惑之年, 已被成功地用于各行各业, 但它还在很快地发展着, 并对国民经济产生越来越大的影响。这种影响可以从社会对电力电子技术方面的人才需求反映出来。目前, 有真才实学的电力电子技术人才在社会上供不应求。

如何成为有真才实学的电力电子技术人才? 首先, 应该学好电力电子学的基本理论, 掌握电力电子电路的基本分析方法; 第二, 要熟悉主要的电力电子器件的特性和主要的电力电子基本电路的基本性能和它们的优缺点; 第三, 要理论联系实际, 在实践中培养分析问题和解决问题的能力。

《电力电子技术基础》已作为浙江大学应用电子技术专业的主干课程的教材使用了三届。教学实践显示, 教材的内容和难易适合本科教育。学完本课程后, 学生可以掌握电力电子电路的基本分析方法和电力电子学的基本理论, 了解主要电力电子器件的特性和主要的电力电子基本电路的基本性能。

本教材覆盖了电力电子学的主要内容。在本教材的第一章中, 我们深入浅出地介绍了各种常用的电力电子器件, 包括快恢复二极管、晶闸管、GTR、功率 MOSFET 和 IGBT。第二章介绍了可控整流电路、有源逆变电路和负载换流逆变电路, 将负载换流逆变电路和有源逆变电路安排在同一章有助于对有源逆变电路及负载换流逆变电路的深入理解。第三章介绍了交流变换电路。第四章介绍了 BUCK 电路、BOOST 电路、BUCK-BOOST 电路、CUK 电路、正激式变换电路和反激式变换电路。第五章介绍了逆变电路和逆变电路输出谐波控制。第六章介绍了缓冲、驱动和保护电路及散热技术。

在编写本教材的过程中, 刘茜、谢小高、李国志、陆冰、付玥、周根富、周子颖以及浙江大学应用电子技术专业的部分同学做了大量的文字和图形处理工作, 在此深表谢意。

在这里我们要衷心感谢马皓副教授, 他认真细致地校阅了全文, 并提出了许多宝贵的意见。

由于编者水平有限, 本教材中难免还有一些缺点和错误。编者殷切地期望读者批评指正, 也殷切地期望电力电子技术方面的专家学者对本教材的改进提一些有益的建议。

编者

2002 年 5 月于杭州

目 录

前言		
绪论	1	
一、电力电子器件	1	
二、电力电子电路	2	
三、电力电子电路的辅助电路	2	
四、电力电子技术的典型应用	3	
五、电力电子学的相关技术	3	
第一章 常用电力半导体器件		
第一节 功率二极管	4	
一、快速恢复二极管的开通特性	4	
二、快速恢复二极管的关断特性	5	
第二节 晶闸管	6	
一、双晶体管理论	6	
二、静态伏安特性	7	
三、开关特性	8	
第三节 双极型功率晶体管		
(GTR)	9	
一、晶体管的工作原理及输出特性	9	
二、晶体管开关的工作状态	11	
三、二次击穿和安全工作区	12	
四、晶体管的主要参数	15	
第四节 功率场效应晶体管		
(MOSFET)	15	
一、VDMOS工作原理及静态输出特性	16	
二、VDMOS管的电容	17	
三、VDMOS管的栅电荷曲线	18	
四、VDMOS管的参数及安全工作区	19	
第五节 绝缘门极双极型晶体管		
(IGBT)	20	
一、IGBT的基本结构	20	
二、IGBT的工作原理	20	
三、IGBT的工作特性	21	
四、擎住效应与安全工作区	22	
第六节 GTR、IGBT 和 MOSFET		
的比较	23	
一、结构的比较	23	
二、特性的比较	24	
习题	26	
第二章 晶闸管可控整流和逆变电路		
第一节 概述	27	
一、整流电路的分类	27	
二、可控整流电路的基本分析步骤	27	
三、整流电路的基本分析方法	29	
第二节 理想条件下三相桥式整流		
电路性能分析	33	
一、理想条件	33	
二、控制角 $\alpha = 0$ 时的工作情况分析	33	
三、控制角 $\alpha > 0$ 时的工作情况分析	36	
第三节 负载性质对整流电路性能的		
影响	38	
一、纯阻性负载 ($L_d = 0$) 时的工作		
情况	38	
二、感性负载 ($0 < L_d < \infty$) 时的工作		
情况	39	
第四节 换流过程及其对整流电路		
性能的影响	42	
一、换流过程分析	42	
二、换流过程对整流电路性能的影响	44	
第五节 有源逆变电路	48	
一、电源间能量流传的条件	48	
二、三相桥式整流电路构成的有源逆变		
电路	49	
三、整流电路的功率和功率因数	51	
四、逆变状态的颠覆现象	56	
第六节 负载换流单相逆变电路	57	
一、负载自然频率特性	57	
二、并联补偿负载电路的自然频率特性	58	
三、理想条件下并联逆变电路分析	60	
四、并联逆变电路的分析方法	63	
五、并联逆变电路的换流过程	66	

习题 69

第三章 交流变换电路

第一节 概述 72

第二节 单相交流调压电路分析 73

一、理想条件 73

二、理想条件下单相交流调压电路主电路
电量计算 73

三、纯阻负载下输出电流的谐波含量 74

四、感性负载下单相电路分析 74

第三节 理想条件下三相交流调压
电路分析 77

一、理想条件 77

二、理想条件下三相调压电路分析 77

三、感性负载条件下的三相调压电路
分析 88

习题 88

第四章 DC—DC 变换电路

第一节 概述 90

第二节 降压式斩波电路 (BUCK
电路) 91第三节 升压式变换电路 (BOOST
电路) 93第四节 升降压式变换电路 (BUCK
—BOOST 电路) 95

第五节 库克电路 (CUK 电路) 96

第六节 正向激励 DC—DC 变换
电路 99第七节 反向激励 DC—DC 变换
电路 100

第八节 DC—DC 变换电路的比较 102

习题 103

第五章 自换流逆变电路

第一节 概述 104

第二节 基本电压型逆变电路的工作
情况分析 106

一、理想条件 106

二、单相桥式逆变电路的工作情况
分析 106

三、三相桥式逆变电路工作情况分析 108

第三节 电压型逆变电路输出电压的
控制 114

一、相控式单相电压型逆变电路 114

二、采用矩形波调制的单相逆变电路 117

第四节 电压型逆变电路输出电压谐
波的控制 118一、单相桥式逆变电路的谐波抑制控制
方法 118二、桥式正弦波调制 (SPWM) 逆变
电路 120

三、自适应电流控制的 PWM 方法 122

四、三相电压源型 PWM 逆变电路 123

习题 127

**第六章 功率半导体器件的散热、
保护、驱动和缓冲电路**

第一节 功率半导体器件的热设计 128

一、半导体器件最高允许结温与结温
减额 128

二、功率器件散热器的选用与设计 129

三、电子设备的强迫散热 131

第二节 缓冲电路 133

一、缓冲电路的作用 133

二、分析有极性缓冲电路的基本假定 134

三、有极性开通缓冲电路 134

四、有极性关断缓冲电路 135

第三节 驱动电路 137

一、驱动电路的一般要求 137

二、晶闸管的驱动电路 137

三、GTR 的驱动电路 139

四、功率 MOSFET 的驱动电路 143

五、IGBT 的驱动电路 146

第四节 保护 149

一、过电压保护 150

二、过电流保护 151

三、过热保护 152

参考文献 153

绪 论

电力电子学是 Power Electronics 的中文译名，在工程应用中称为电力电子技术。电力电子学是应用于电力技术领域中的电子学：它以利用大功率电子器件对能量进行控制和变换为主要内容；它是一门与电子、控制和电力紧密相关的边缘学科。如图 0-1 所示，电力电子学在能量的产生和能量的使用之间建立了一种联系，在这种联系下，能量的产生、输送和使用都有很高的效率，而且各种不同的负载都能得到其所期望的最佳能量供应形式和得到最佳的控制。

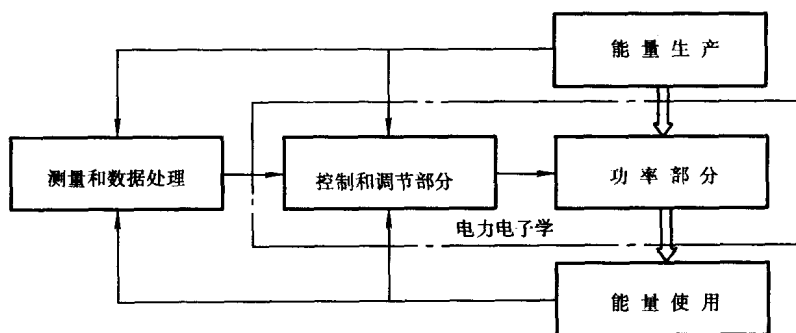


图 0-1 电力电子学与能量产生、能量使用的关系

电力电子学的主要内容是利用大功率电子器件对能量进行控制和变换，而其主要特征是控制和变换的高效率。为了保证变换的高效率，电力电子学中的大功率电子器件总是工作在开关状态。众所周知，用功率放大电路能够将直流电能转变为质量高、控制性能好的交流电能；用调整管直流稳压电路能够将一种电压的直流电能转变为另一种电压的直流电能，但是，用这些方法实现的能量的控制和变换，效率都较低（大功率电子器件不是工作在开关状态），所以，这些变换属于模拟电子学而不属于电力电子学的范畴。

电力电子学包含以下几个部分：

一、电力电子器件

从 20 世纪 50 年代开始，电力电子器件发展非常迅速，迄今为止，已经发展了很多不同原理、不同特性的电力电子器件。这些器件可根据其开关控制特性分为以下三类：

(1) 不控型器件 指无控制极的二端器件，如功率二极管。由于无控制极，器件不具有可控开关性能。

(2) 半控型器件 指有控制极的三端器件，这类器件控制极只能控制器件开通而不能控制器件关断，所以称其为半控型器件。晶闸管及其大部分派生器件属这一类。

(3) 全控型器件 指有控制极的三端器件，这类器件控制极既能控制器件开通又能控制器件关断，所以称其为全控型器件。可关断晶闸管、功率晶体管、功率场效应晶体管和绝缘门极双极型晶体管都属于这一类器件。

二、电力电子电路

所有的电力电子电路的基本单元都可以按照电能变换功能分成如下四类：

(1) 整流电路 由交流电能到直流电能的变换称为整流（或称 AC/DC 变换），能实现这一功能的电路称整流电路。

(2) 逆变电路 由直流电能到交流电能的变换称为逆变（或称 DC/AC 变换），能实现这一功能的电路称逆变电路。

(3) 直流变换电路 能将直流电能（电压或电流）幅值和极性加以改变的电路称为直流变换电路（或称 DC/DC 变换电路）。

(4) 交流变换电路 能将交流电能的电压、电流或频率加以改变的电路称为交流变换电路（或称 AC/AC 变换电路）。

图 0-2 是这四类基本电路的示意图。

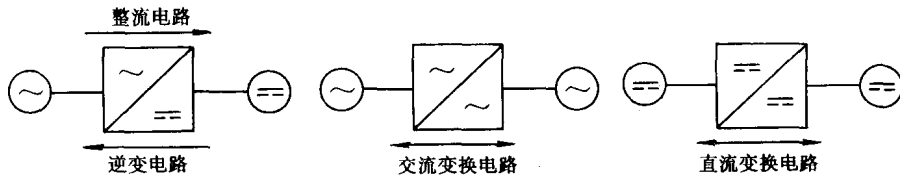


图 0-2 电力电子基本电路的类型

在很多的场合，一种电力电子的基本电路不能很好地完成某种电能变换的功能，而需要用几种基本电路组成组合变换电路来完成这些功能。图 0-3 示出了几种将交流市电变换为可控的直流电的实现方案，其中，图 b、c、d 是组合变换电路的范例。

三、电力电子电路的辅助电路

电力电子电路必须在一些辅助电路的支持下才能正常工作。这些辅助电路包括：控制电路、驱动电路、缓冲电路和保护电路。

(1) 控制电路 控制电路的功能是根据输入和输出的要求产生主电路所有大功率电子器件的通断信号。

(2) 驱动电路 驱动电路的功能是根据控制电路给出的通断信号，提供大功率电子器件足够的驱动功率，以确保大功率电子器件的迅速可靠开通和关断。

(3) 缓冲电路 缓冲电路的功能是在大功率电子器件开通和关断的过程中减缓其电流或电压的上升速度，以降低其开关应力和开关损耗。

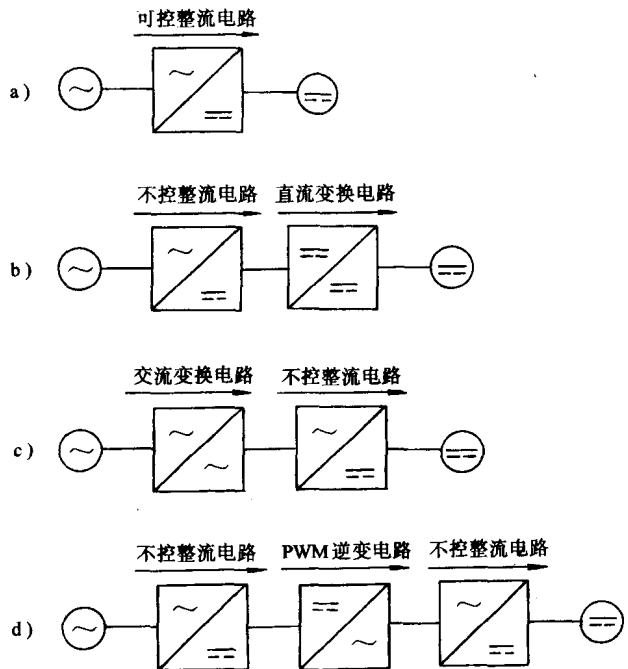


图 0-3 几种将交流市电交换为可控的直流电的实现方案

(4) 保护电路 保护电路的功能是在电力电子电路的电源或负载出现异常时, 保护电力电子设备免于损坏。

四、电力电子技术的典型应用

经过几十年的发展, 电力电子技术已经渗透到了许多应用领域中。大到电力系统, 小到家用电器, 上到航空航天, 下到勘探钻井, 各行各业都有许多电力电子技术的应用范例。这里仅列举一些典型应用。

1. 整流电路的典型应用

- 1) 高压直流输电。
- 2) 直流电动机拖动。
- 3) 电解电镀电源。
- 4) 整流焊机。

2. 逆变电路的典型应用

- 1) 不间断电源。
- 2) 交流电机变频调速。
- 3) 感应加热。
- 4) 电子镇流器。

3. 交流变换电路的典型应用

- 1) 电热控制电源。
- 2) 交流电动机调压调速。

4. 直流变换电路的典型应用

- 1) 蓄电池充电电源。
- 2) 计算机开关电源。

五、电力电子学的相关技术

除了以上介绍的电力电子学的核心内容外, 它还有一些重要的相关技术。这些技术包括散热技术、电磁兼容技术和仿真技术。

(1) 散热技术 大功率电子器件不是理想的开关, 它在工作时会产生损耗。虽然电力电子装置的效率很高, 但往往功率较大, 所以损耗常常不小。为了使这些损耗产生的热量有效地散发出去, 必须用散热技术对电力电子装置进行热设计。热设计的合理与否影响到电力电子装置的可靠性、体积和重量。

(2) 电磁兼容技术 在电力电子技术中, 功率电子器件工作于开关状态, 电路中的电压和电流变化速率极快, 这些快速的变化导致很强的电磁干扰。电磁干扰会影响控制电路、驱动电路和周围其他电子设备的正常工作。为了减小电磁干扰的危害, 在研究和设计电力电子装置时, 要采取电磁兼容技术, 减小电磁干扰, 并增加抗干扰的能力。

(3) 仿真技术 仿真技术是一种通过对电力电子电路建立模型, 对模型进行分析, 在计算机中进行参数和控制的优化, 以研究和开发实际电路的方法。仿真技术可以减少电力电子电路的设计费用和设计时间。

第一章 常用电力半导体器件

第一节 功率二极管

功率二极管具有 P-N 或 P-I-N 结构，是通过扩散工艺制作的。功率二极管和普通二极管一样，具有单向导电性。图 1-1a 和图 1-1b 分别是二极管的图形符号和其稳态伏安特性。当功率二极管正偏时，功率二极管导通，通态压降 1V 左右。当功率二极管反偏时，在达到击穿电压前，仅有很小的反向漏电流流过。在达到击穿电压后，反向电流急剧增加。正常工作时，反偏电压不能超过击穿电压。

在大多数应用场合，功率二极管的通态压降和反向漏电流与功率二极管的工作电压和工作电流相比很小，因此在分析时常常忽略通态压降和反向漏电流。忽略通态压降和反向漏电流后的二极管的理想稳态伏安特性如图 1-1c 所示。二极管的理想稳态伏安特性不适用于变换器的损耗分析和变换器的实际设计。

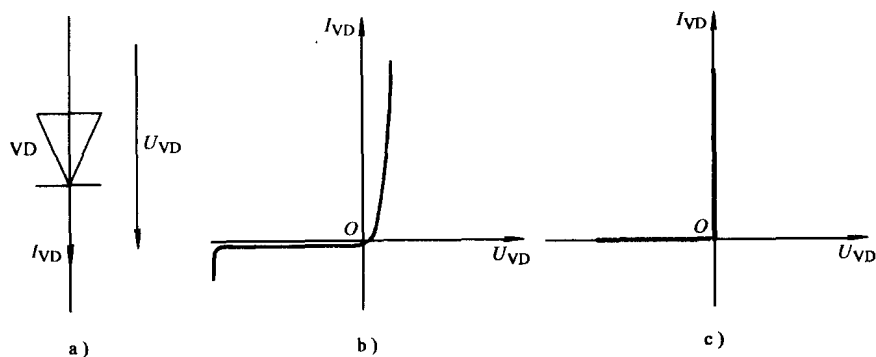


图 1-1 二极管的线路符号及其稳态伏安特性
a) 二极管的线路符号 b) 稳态伏安特性 c) 理想稳态伏安特性

功率二极管可用于使交流功率整流为直流功率的整流器中，也常常用于具有回馈或续流功能的逆变器中。

按功率二极管的关断特性，功率二极管可分为普通功率二极管和快速恢复功率二极管。普通功率二极管主要用于工频整流器中，快速恢复功率二极管主要用于高频逆变器、高频整流器和缓冲电路中。

一、快速恢复二极管的开通特性

二极管的开通有一个过程，开通初期出现较高的瞬态压降，经过一定时间后才能处于稳定状态，并具有很小的管压降。这就是说，二极管开通初期呈现出明显的电感效应，不能立即响应正向电流的变化。图 1-2 中给出了二极管开通特性的曲线。图 1-2a 所示为管压降随时间变化的曲线，其中 U_{VDM} 为正向峰值电压， t_{tr} 为正向恢复时间。图 1-2b 所示为二极管开通

电流的波形, 电流上升率用 di_{VD}/dt 表示。由图可知, 在正向恢复时间内, 正在开通的二极管具有比稳态大得多的峰值电压 U_{VDM} 。实验表明, 当正向电流上升率超过 $50A/\mu s$ 时, 在某些高压二极管中可以测得几十伏的电压值。一般高反压的快速恢复二极管中具有较高的瞬态压降。

开通时二极管呈现的电感效应, 除了器件内部机理的原因以外, 还与引线长度、器件封装采用的材料等因素有关。电感效应对电流的变化率最敏感, 因此, 开通时二极管电流的上升率 di_{VD}/dt 越大, 峰值电压 U_{VDM} 就越高, 正向恢复时间也就越长。

二极管开通特性的正向恢复时间的概念在低频整流电路中是不重要的, 但在高频电路中的快速应用时, 这一概念应予以注意。

二、快速恢复二极管的关断特性

正向导通的二极管突然加一反向电压时, 反向阻断能力的恢复需要经过一段时间。在未恢复阻断能力之前, 二极管相当于短路状态, 这是一个很重要的特性。全部恢复过程如图 1-3 所示。图中 I_{RM} 为最大反向恢复电流, Q_{rr} 为反向恢复电荷, t_{rr} 为反向恢复时间。这三个参数在电路设计中是最重要的参数。下面讨论反向恢复过程。

由图 1-3 可知, 从时间 $t = t_f$ 开始, 在外电路的反向电压作用下, 原来导通的二极管的正向电流从 I_F 以 di_f/dt 的速率减小。这个电流变化率由反向电压和二极管回路中的电感决定, 即有

$$di_f/dt = -E/L \quad (1-1)$$

当 $t = t_0$ 时, 二极管中的电流等于零。在这之前二极管处于正向偏置, 电流为正向电流。在 t_0 时刻后, 正向压降稍有下降, 但仍为正偏置, 电流开始反向。

在 $t = t_1$ 的时刻, 电荷 Q_1 已被抽走, 反向电流已达最大值 I_{RM} , 二极管开始恢复阻断能力。

在 $t > t_1$ 之后, 反向恢复电流迅速下降, 其下降速率 di_{rr}/dt 较高, 在线路电感中产生较高的电动势。这个电动势与电源电压一同加在二极管上, 所以二极管承受很高的反向电压 U_{RM} 。

在 $t = t_2$ 之后, di_{rr}/dt 逐渐减小为零, 二极管承受电源电压 E 。这时电荷 Q_2 也被抽完, 二极管处于承受静态反向电压阶段。

以上即为二极管反向恢复的全过程。

影响反向恢复过程长短的主要因素是反向恢复电荷, 即在反向恢复过程中抽走的总电荷量 Q_{rr} 。 Q_{rr} 可由下式求出:

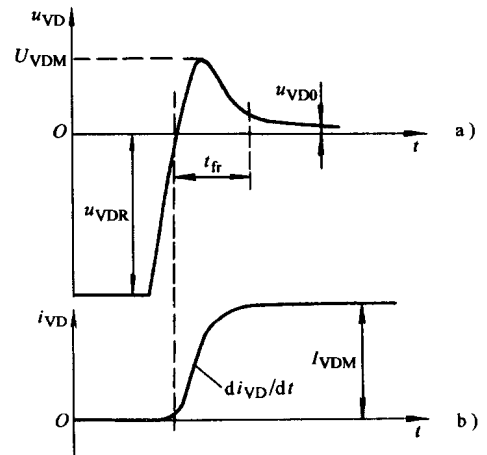


图 1-2 二极管开通特性

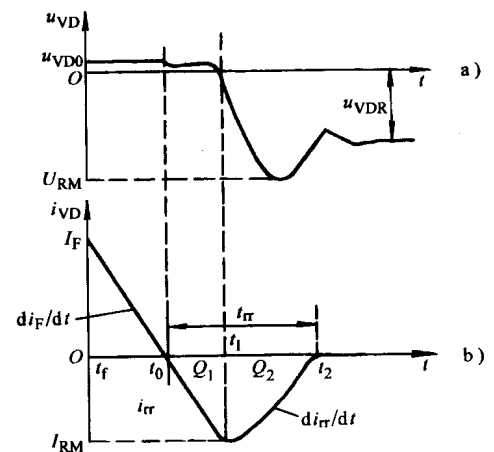


图 1-3 二极管的反向恢复过程 (软恢复)

$$Q_{\pi} = Q_1 + Q_2 = \int_{t_0}^{t_2} i_{\pi} dt \quad (1-2)$$

Q_{π} 是一个很重要的参数。若 Q_{π} 小, 则反向恢复时间 t_{π} 短。这是快速恢复二极管与普通整流二极管的根本区别之处。

反向恢复电荷 Q_{π} 与二极管正向电流 di_F/dt 以及结温有关。正向电流和电流变化率增加, Q_{π} 增加。因为结温增加之后, 载流子寿命增加, 所以 Q_{π} 也增加。

反向恢复损耗与二极管的反向恢复电荷密切相关。为了减小损耗, 应该选用 Q_{π} 小的二极管。 Q_{π} 小, 反向恢复时间 $t_{\pi} = t_2 - t_0$ 也小。 t_{π} 是快速恢复二极管的一个动态参数, 在使用中应注意选择。

反向恢复电流的下降速度 di_{π}/dt 也是一个重要的参数。如图 1-4 所示, 若 di_{π}/dt 过大, 由于线路存在电感 L , 则会使反向峰值电压 U_{RM} 过高, 有时出现强烈振荡, 致使二极管损坏。可用软特性和硬特性的概念来表示 di_{π}/dt 对反向特性的影响。特性的软硬度用“软因子”来衡量。软因子 S_r 的定义为

$$S_r = \frac{t_2 - t_1}{t_1 - t_0} \quad (1-3)$$

式中, t_2 是电流 i_{π} 回到 $0.1I_{RM}$ 处的时间。

目前有 PN 型和 PIN 型两种结构的快速恢复整流二极管。在同等容量下 PIN 型结构具有开通压降低、反向快速恢复性能好的优点。不足之处是 PIN 型二极管具有硬恢复特性, 而 PN 型结构则具有软的恢复特性。实际使用时可根据应用条件而进行选择。

肖特基 (SCHOTTKY) 功率二极管由金属半导体结构成, 是一种多数载流子器件。它们具有低导通电压和最短开关时间的特性, 但也有反向漏电流大和阻断电压低的局限性。肖特基功率二极管适合于高频低压应用, 例如在开关电源中的应用。

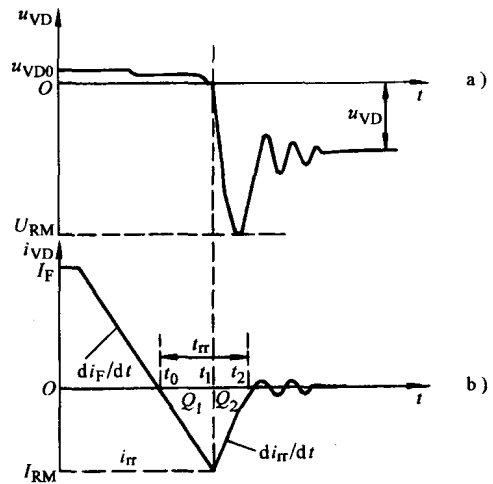


图 1-4 二极管的反向恢复过程 (硬恢复)

第二节 晶 闸 管

晶闸管通常也被称为可控硅整流管 (Silicon Controlled Rectifier, SCR), 是工业大功率电力变换与控制的主要工作部件。图 1-5a 是晶闸管的图形符号。图 1-5b 所示为晶闸管的结构简图。晶闸管具有一个三端 PNP 结构, 是由扩散工艺制作的, 如果器件被加上正向电压, 则中间一个结就变为反向偏置, 从而耗尽区就主要扩展到 N_1 区内。 N_1 层是轻微掺杂的, 并有很大的宽度来承受高电压。当器件加上反向电压时, N_1 层将承受大部分电压。

一、双晶体管理论

晶闸管工作的原理通常都用图 1-5c 所示经典的双晶体管模型来解释。如果将器件斜着切开, 一个晶闸管就可以用正反馈下的 PNP 和 NPN 晶体管来表示。如果门极电流 I_G 被注入

VT₂ 晶体管的基极，它的集电极电流 I_{C2} 就成为晶体管 VT₁ 的基极电流，放大了集电极电流 I_{C1}，从而使原来的门极电流 I_G 得到增加。最后，VT₁ 和 VT₂ 完全饱和。在关断条件下，可以写出下列方程：

$$I_{C1} = \alpha_1 I_A + I_{CB01} \quad (1-4)$$

$$I_{C2} = \alpha_2 I_K + I_{CB02} \quad (1-5)$$

$$I_K = I_A + I_G \quad (1-6)$$

其中 α_1 和 α_2 各为晶体管 VT₁ 和 VT₂ 的共基极电流增益，而 I_{CB01} 和 I_{CB02} 为共基极漏电流。合并式 (1-4) ~ 式 (1-6)，得

$$I_A = (\alpha_2 I_G + I_{CB01} + I_{CB02}) / [1 - (\alpha_1 + \alpha_2)] \quad (1-7)$$

硅晶体管都有一个共同的性质，即在小的发射极电流下 α 是很小的，而随着射极电流的增长， α 迅速增大。在通常的关断条件下 I_G = 0，并且 $\alpha_1 + \alpha_2$ 很小，因而漏电流只比单个漏电流的总和稍大一些。如果由于某种机制能够增大组合晶体管的射极电流以使 $\alpha_1 + \alpha_2$ 趋近于 1，那么 I_A 就趋近无穷大，从而使器件激发进入饱和。实际上，随着器件的导通，外部负载就决定阳极电流。有几种机制可以使晶闸管激发进入导通，这些机制将在后面作出解释。

二、静态伏安特性

晶闸管的静态伏安特性示于图 1-6a 中。如果门极电流为零，且阳极电压上升速度很小，在最大转折电压（正向击穿电压）以下，晶闸管处于正向阻断状态。正常工作时，正向电压不能超过正向击穿电压。随着门极电流强度的增大，正向转折电压减小，最后在 I_G 处，器件相当于一个没有正向阻断电压的二极管。

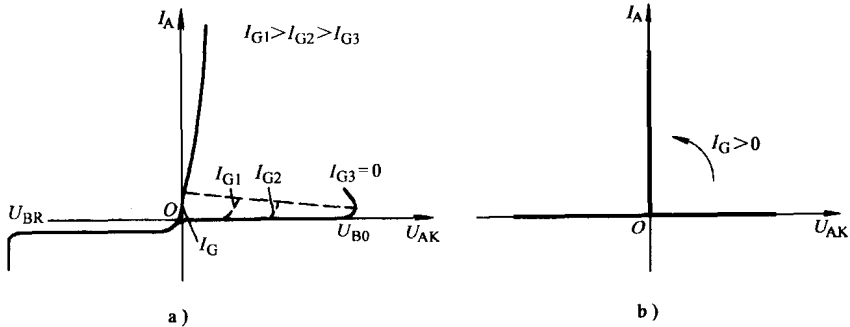


图 1-6 晶闸管的稳态伏安特性
a) 稳态伏安特性 b) 理想稳态伏安特性

如果晶闸管阳极电压 U_{AK} 为正值，且注入足够的门极电流，组合晶体管的射极电流由于正常的晶体管效应而增大，从而使器件进入饱和导通，这称为晶闸管的触发导通。一旦器件导通，门极电流就不再具有任何控制作用（除了门极关断晶闸管）。在导通期间，如果要求器件又返回到正向阻断状态，则必须令门极电流为零，且将阳极电流降低到一个称为维持电流的临界极限值以下，或加上一个反向电压并保持一段时间（约几十到几百微秒）。

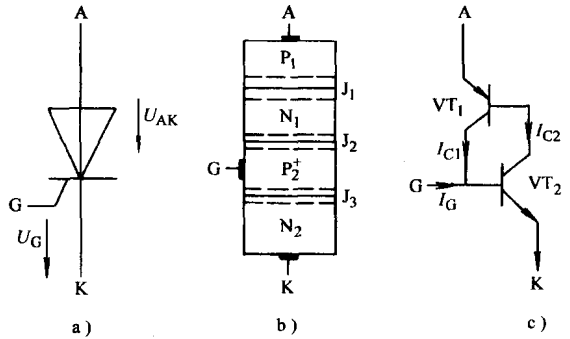


图 1-5 晶闸管的图形符号及其等效电路
a) 晶闸管的图形符号 b) 晶闸管的结构简图
c) 晶闸管的等效电路

在晶闸管正向阻断期间，即使门极电流为零，如果正向阳极阻断电压逐渐增加到较高值，则中间结上的少数载流子漏电流，即组合晶体管集电结电流，因雪崩效应而增大。由于正反馈作用，故漏电流会放大，这最终也导致开关动作。也就是说，即使 $I_G = 0$ ，如果正向电压加在器件上，电压超过一个临界极限值，器件就进入开通。这也叫做硬开通。硬开通常常引起晶闸管损坏。

在晶闸管正向阻断期间，即使门极电流为零，如果阳极电压上升速度过快，中间结的耗尽层电容 C 引起的位移电流 $i = Cdu/dt$ 将诱发组合晶体管的射极电流，并也将最终导致晶闸管导通。由于阳极电压上升速度过快引起的晶闸管导通称 du/dt 误导通。 du/dt 误导通将引起电路工作失常。

当加反向电压时，器件两端的 PN 结成为反向偏置，而 $U-I$ 曲线基本上类似于二极管整流管。正常工作时，反偏电压不能超过击穿电压。

三、开关特性

晶闸管应用可以分为低速的工频相控应用类型，或快速开关的高频逆变器应用类型。在后一类型中，需要非常严格地考虑开关特性。图 1-7 示出了晶闸管的开关特性。

在正向阻断条件下，如果施加门极电流，在阳极电流开始建立之前会有一段有限的延迟时间 t_d ，这个延迟时间通常是几分之一微秒，并且由晶闸管动作之前的载流子过渡延迟所决定。接着，器件导通而电流在上升时间 t_r 内以斜率 di/dt 上升直至满值 I_{VT} 。导通的物理机制是十分复杂的，

但可作如下的简单解释：起初，导通发生在门极-阴极周围，然后，导通面积以有限的速度扩展到整个截面，如果 I_A 上升速度比扩散速度快，则电流密度增大，最后会造成器件的局部过热而烧毁。在导通期间，如前面所提到的那样，中间 N_1 和 P_2 区保持少数载流子的深度饱和状态，而门极失去其控制作用。

要恢复正向电压阻断能力，就要清除这些少数载流子，以使中间结承受反向电压。在导通条件下，只要从外部电路暂时施加反向电压，就能使晶闸管关断或换流。当加上反向电压时，首先正向电压变为零，而后以漏感所决定的换流 di/dt 斜率建立起反向电流。在关断过程开始时，两端结是保持正向偏置的，由于两端结少数载流子的消失，从而造成了反向恢复电流的流动。在最大恢复电流 I_{RM} 时，两端结开始阻断，导致恢复电流的衰减，因漏感效应，恢复电流的迅速减小，将在器件上引起一个过电压 U_{RRM} 。在零电流时，中间结继续保持正向偏置，而少数载流子与邻区内的空穴允许通过复合过程而消失。最后，中间结恢复其电压阻断能力，并能成功地重新施加正向电压。需要限制重新施加的 du/dt 使得 du/dt 与贮存的少数载流子漏电流的共同作用不致造成器件的误开通。正向电流过零点与重新施加电压的起

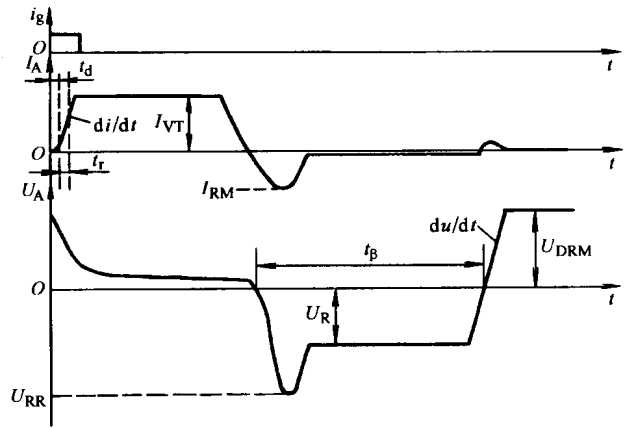


图 1-7 晶闸管的开关特性

点之间的时间间隔称为电路换流反压时间 t_{β} ，恢复晶闸管电压阻断能力所需的最小电路换流反压时间被定义为晶闸管关断时间 t_q 。关断时间 t_q 受到结温 T_j 及 I_{VT} 、 U_R 、 U_{DRM} 、重新施加 du/dt 、换流 di/dt 以及关断期间门极偏置的影响。在这些参数中，综合考虑是合理的。例如，某晶闸管具有 $t_q = 25\mu s$ ，在其说明书中指明， $T_j = +125^\circ C$ ， $I_T = 150A$ ， $U_R = 50V$ ，重新施加 $du/dt = 200V/\mu s$ ，换流 $di/dt = 5A/\mu s$ ，门极偏置是 $0V$ ，GK 之间并联 100Ω 电阻。当重新施加 $du/dt = 20V/\mu s$ 时，这个时间可以改善至 $20\mu s$ ，而如果反向电压被一个旁路二极管所钳位，它就可能恶化至 $40\mu s$ 。

第三节 双极型功率晶体管 (GTR)

双极型功率晶体管简称功率晶体管，是由三层半导体（组成两个 PN 结）构成的，图 1-8a、c 分别示出了 PNP 功率晶体管和 NPN 功率晶体管的结构；对应的图形符号如图 1-8 b、d 所示。现以 NPN 结构的晶体管为例，作进一步说明。 N^+P 构成发射结 (J_1)，PN 构成集电结 (J_2)； N^+ 为发射区，E 为发射极；N 为集电区，C 为集电极；P 为基区，B 为基极。

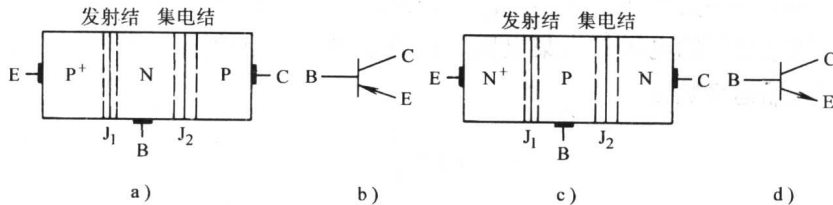


图 1-8 晶体管的结构及电路图中的符号

a) PNP 结构 b) PNP 符号 c) NPN 结构 d) NPN 符号

一、晶体管的工作原理及输出特性

(一) 晶体管 B-E 间不加电压（截止区）

如图 1-9 所示， $U_{CE} > 0$ （晶体管加正向电压），这时发射结为正偏置，集电结为反偏置，外加电压 U_{CE} 几乎全部在反偏置 PN 结 (J_2) 的空间电荷区上，反偏置 PN 结中流过反向漏电流 I_0 。但同只有一个 PN 结的情形不一样，这时通过 J_2 结的电流还包括从发射结注入到基区的电子被 J_2 结空间电荷区电场扫到集电区那部分形成的电子流。若令这时通过晶体管的电流为 I ，则这部分电子电流为 αI ，按电流连续性原理，则有

$$I = \alpha I + I_0$$

$$I = \frac{I_0}{1 - \alpha} \quad (1-8)$$

由下面分析可知， α 为晶体管共基极接法的电流放大倍数，且 α 总是小于 1。因此，实际流过晶体管的漏电流比 I_0 （单个集电结漏电流）大， α 越接近 1，实际的漏电流越大，这是两个 PN 结相互影响的结果。

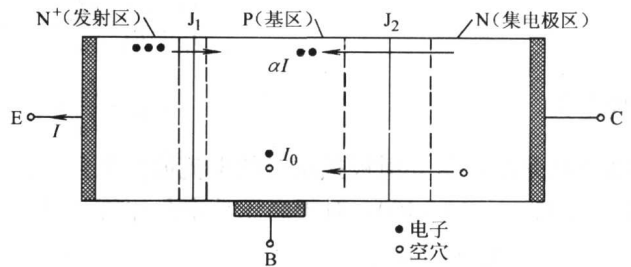


图 1-9 B-E 间不加电压时晶体管中电流的传输

(二) 晶体管 B-E 间加正向电压 (放大区)

如图 1-10 所示, 当 B-E 间加足够大的正向电压时, 则 J_1 结的 N^+ 侧有大量电子注入到基区, 而 P 侧也有空穴注入到 N^+ 区。注入到基区的电子除一部分复合掉外, 其中绝大部分被 J_2 结的空间电荷区的电场扫到集电区。从发射结看通过的电流由空穴电流 I_{PE} 和电子电流 I_{NE} 两部分组成, 即

$$I_E = I_{PE} + I_{NE} \quad (1-9)$$

而电子电流 I_{NE} 是流向集电区的, 对 I_C 电流有贡献。为了表征其贡献的大小, 引入发射率 γ , 并定义

$$\gamma = \frac{I_{NE}}{I_E} \quad (1-10)$$

注入基区的电子一边扩散, 一边复合, 达到集电结边界的电子已经减少了。但达到边界的电子都被空间电荷区的电场扫入集电区, 转成集电区的电流 I_C 。为表征通过基区电子减少的数量, 引入输运系数 α_T , 并定义

$$\alpha_T = \frac{I_C}{I_{NE}} \quad (1-11)$$

这样, 发射区的电流 I_E 能转成集电区的电流为

$$I_C = \gamma \alpha_T I_E \quad (1-12)$$

若定义晶体管共基极接法时电流放大系数为

$$\alpha = \gamma \alpha_T \quad (1-13)$$

则有

$$I_C = \alpha I_E \quad (1-14)$$

很显然, I_C 、 I_E 和 I_B 应遵守下列原则:

$$I_E = I_B + I_C$$

即

$$I_B = (1 - \alpha) I_E$$

那么

$$\frac{I_C}{I_B} = \frac{\alpha I_E}{(1 - \alpha) I_E} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \quad (1-15)$$

现定义

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \quad (1-16)$$

则 β 就是晶体管共射极接法时的电流放大系数。 α 一定是小于 1 的, 且接近 1。当 $\alpha = 0.9 \sim 0.99$ 时, $\beta = 10 \sim 100$ 。对于高压功率晶体管 (单管), 一般 $\beta < 10$ 。

(三) 饱和状态

当晶体管电路接有负载 (电阻) 时, 晶体管能工作在饱和区。以共射极接法为例, 随着基极电流增加, 负载上电压增大, 而电源电压不变, 故集电结反偏电压必须下降。当负载上

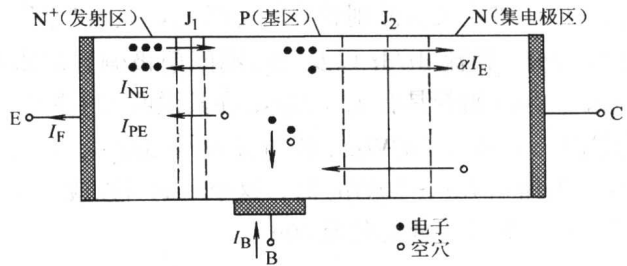


图 1-10 B-E 间加正向电压时的晶体管中的电流传输

电压增加到集电结反偏电压为零时，晶体管进入临界饱和状态；当基极电流进一步增加时，集电结变为正偏置，晶体管进入过饱和状态；基极电流再加大时，晶体管的饱和程度加深。

晶体管进入饱和时，集电极电流就不再明显增加了。这是因为此时基区少数浓度梯度不再增加了。所以晶体管进入饱和区的特点是两个 PN 结均为正偏置，饱和压降很小。

(四) 失控区

当 U_{CE} 超过一定值时， I_C 会急剧上升，出现非线性。这时晶体管进入失控区， U_{CE} 再进一步增加，晶体管就会雪崩击穿。如果基极开路，这时对应的电压就是反向击穿电压 U_{CEO} 。如果基极和发射极短路，则对应的电压就是 U_{CES} 。如果基极负偏，则对应的电压就是 U_{CEX} 。

二、晶体管开关的工作状态

晶体管可以工作在截止、有源放大及饱和和三种工作状态。在交流技术应用中，晶体管只作为开关使用，工作于截止和饱和两种状态。在状态转换过程中，晶体管快速地通过有源区，如图 1-11 所示。

当基极施以脉冲驱动信号时，晶体管将工作于开关状态，如图 1-12 所示。在 t_0 时刻加入正激励脉冲，晶体管经过延时和上升阶段才达到饱和区，并定义开通时间为

$$t_{on} = t_d + t_r \quad (1-17)$$

式中， t_d 为延迟时间 ($t_1 - t_0$)； t_r 为上升时间 ($t_2 - t_1$)。

当反向信号加到基极时，晶体管经过存储和下降阶段才返回截止区。并定义关断时间为

$$t_{off} = t_s + t_f \quad (1-18)$$

式中， t_s 为存储时间 ($t_4 - t_3$)； t_f 为下降时间 ($t_5 - t_4$)。

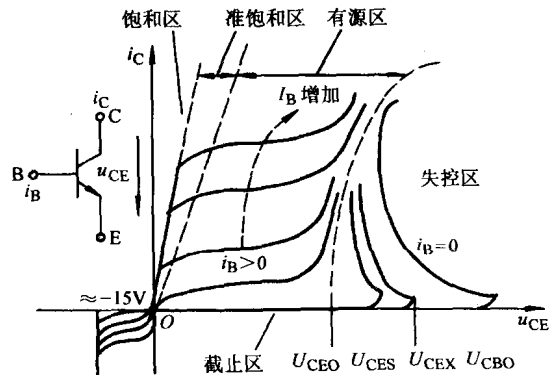


图 1-11 工作区划分示意图

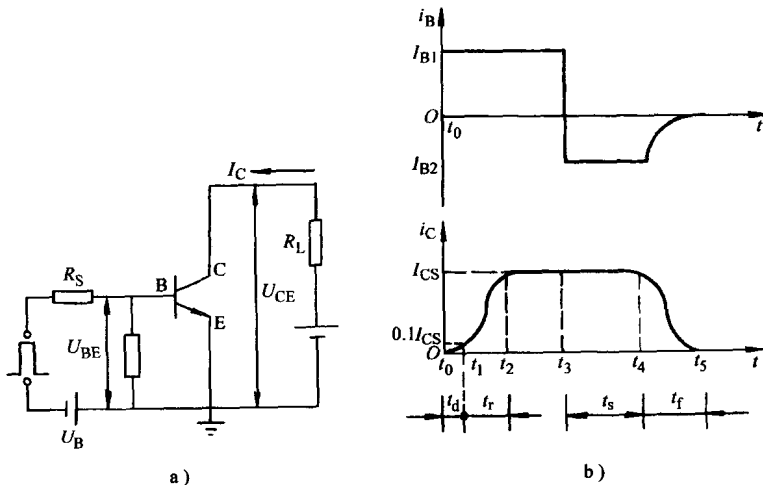


图 1-12 晶体管开关工作过程
a) 开关电路原理图 b) 工作波形