

电力电子学

赵惠昌 编著
杜汉卿 审

兵器工业出版社

电力电子学

赵惠昌 编著

杜汉卿 审

兵器工业出版社

(京)新登字 049 号

内 容 简 介

本书详细介绍了电力晶体管(包括电力二极管、双极型功率晶体管、电力场效应管、功率绝缘栅晶体管),晶闸管和特殊晶闸管(包括双向晶闸管、可关断晶闸管、MOS控制的晶闸管以及快速晶闸管、逆导晶闸管、光控晶闸管、反向阻断四端晶闸管)等各种现代电力电子器件。在此基础上,着重分析了各种电力电子变换电路,包括 AC/DC、DC/AC、AC/AC、DC/DC 和常用触发电路及保护电路、主电路元件的选择、计算。

本书可作为大学电气技术专业用教材,也可供有关专业师生及工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电力电子学/赵惠昌编著. —北京:兵器工业出版社,1994.8

ISBN 7-80038-822-0

I. 电… I. 赵… III. 电子学-电力系统-高等学校-教材 N. ①TM71②TN01

中国版本图书馆 CIP 数据核字(94)第 09320 号

*

兵器工业出版社 出版发行
(北京市海淀区车道沟 10 号)

各地新华书店经销
北京市蓝华印刷厂

*

开本:787×1092 1/16 印张:10.8 字数:268.3 千字

1994 年 8 月第一版 1994 年 8 月第一次印刷

印数:1500 定价:12.90 元

前 言

《电力电子学》一书是根据编者几年来的教学经验和教学讲稿整理而成的一本教学用书。

本书主要从器件和电路两个方面对电力电子学内容进行阐述。考虑到电力电子器件是电力电子学发展的基础,随着科学技术的进步、工艺水平的不断提高,新的器件将会层出不穷,而新器件的产生又将推动电力电子学内容向更高层次发展。因此,本书将电力电子器件专门列为一篇内容分四章集中作了较详尽的介绍。除人们已熟习的晶闸管器件外,尚有 GTO、MCT 和 MOSFET、IGBT 等现代电力电子器件。这些器件随着我国改革开放事业的不断发展,已经或正在为我国电力电子领域的革新、改造、发展作出贡献。

在本书的第二篇电力电子变换电路中,考虑到不论何种变换电路归根到底可归结为 AC/DC、AC/AC、DC/AC、DC/DC 这四种变换电路及它们之间的有机组合。因此在内容编排上,以上述四种基本变换电路为主要内容,分四章对每一种变换电路都作了较详细的介绍。除此而外,本书还介绍了触发电路和对一般电力电子电路和器件的选择、计算和保护方法。

本书主要作为高等工科院校电气技术专业及相关专业的教学用书,适用于 60 学时左右。另加 10~20 学时的实验。

本书在编写过程中,得到南京理工大学 450 教研室和抗干扰研究室领导和同事的大力支持和帮助,特别是杜汉卿教授的精心指点和帮助,并提出许多宝贵意见,在此表示衷心的感谢。同时也感谢南京化工学院李跃华讲师为本书的编写和出版提供了许多有价值的参考资料,付出了大量的劳动。

本书在编写过程中,参考了兄弟院、校、所的大量有关书籍和资料,在此表示感谢。

由于本人能力有限,编写中难免出错。书中不妥和错误之处,敬请读者批评指正。

目 录

概述	(1)
----	-----

第一篇 电力电子器件

第一章 电力晶体管	(6)
§ 1-1 电力二极管	(6)
§ 1-2 双极型功率晶体管	(8)
§ 1-3 电力场效应管(MOSFET)	(16)
§ 1-4 功率绝缘栅晶体管(IGBT)	(20)
习题一	(21)
第二章 晶闸管	(22)
§ 2-1 晶闸管及其工作原理	(22)
§ 2-2 晶闸管的特性	(25)
§ 2-3 晶闸管的主要参数	(28)
习题二	(34)
第三章 特殊晶闸管	(36)
§ 3-1 双向晶闸管	(36)
§ 3-2 可关断晶闸管(GTO)	(37)
§ 3-3 MOS控制的晶闸管(MCT)	(43)
§ 3-4 其它晶闸管	(44)
习题三	(46)

第二篇 电力电子变换电路

第四章 整流电路	(47)
§ 4-1 电阻性负载的整流电路	(47)
§ 4-2 电感性负载的整流电路	(62)
§ 4-3 反电动势负载的整流电路	(75)
§ 4-4 电力晶体管整流电路	(76)
§ 4-5 整流变压器漏抗对整流电路的影响	(78)
§ 4-6 整流电压的谐波分析	(81)
§ 4-7 可控整流电路供电的直流电动机机械特性	(86)
习题四	(89)

第五章 逆变电路	(92)
§ 5-1 有源逆变电路产生逆变的条件	(92)
§ 5-2 晶闸管有源逆变电路	(93)
§ 5-3 逆变失败的原因和可采取的对策	(98)
§ 5-4 逆变工作状态时电机的机械特性	(100)
§ 5-5 有源逆变的应用	(102)
习题五	(105)
第六章 晶闸管的触发电路	(107)
§ 6-1 对触发电路的基本要求	(107)
§ 6-2 实用触发电路举例	(108)
§ 6-3 触发电路同步电源电压的选择	(122)
§ 6-4 防止晶闸管误触发的措施	(124)
习题六	(124)
第七章 交流调压器与交-交变频器	(126)
§ 7-1 单相相控调压	(126)
§ 7-2 三相交流调压	(131)
§ 7-3 通断控制和脉宽控制调压器	(134)
§ 7-4 单相交交变频电路	(137)
习题七	(141)
第八章 直流斩波器	(142)
§ 8-1 晶闸管斩波器	(142)
§ 8-2 可关断晶闸管斩波器	(145)
§ 8-3 功率晶体管斩波器	(146)
§ 8-4 复合斩波电路	(151)
习题八	(153)
第九章 保护电路及主电路元件的选择、计算	(155)
§ 9-1 晶闸管的过电压保护	(155)
§ 9-2 晶闸管的过电流保护与电压、电流上升率限制	(161)
§ 9-3 整流变压器额定参数的计算	(163)
§ 9-4 平波电抗器的计算	(165)
习题九	(167)
参考文献	(168)

概 述

一、电力电子学(Power Electronics)的性质

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变换和控制为主要内容,是一门与电气工程三大领域——电力、电子和控制紧密相关的边缘学科。

二、电力电子学的内容

1. 电力半导体器件

以开关方式运行的电力半导体器件是现代电力电子学的核心。从晶闸管(Thyristor)问世迄今电力半导体器件已经历了几代发展过程。

第一代电力电子器件

晶闸管作为第一代电力电子器件从50年代问世之时起,在电力电子学的历史上以绝对优势整整统治了20年。晶闸管具有反应快、重量轻、体积小、能耗低、可靠性高、使用期长、易维修等特点,已成为现代交流技术发展的基础。由于晶闸管不能自关断,属于半控型器件。

第二代电力电子器件

随着交流电动机变频调速技术的发展,半控型器件已不能满足需要,迫切需要可控制关断的即自关断的电力电子器件——全控型器件。因此在晶闸管基础上相继出现了一些派生器件,如:电力晶体管GTR(Power transistor)、可关断晶闸管GTO(Turn-off thyristor/triode)、电力场效应晶体管MOSFET(Power MOSFET)等,形成第二代电力电子器件。

第三代电力电子器件

前二代电力电子器件中各种器件都有其本身的特点,例如:GTR使用中需配备驱动电路;GTO除需驱动电路外,还包括关断回路、吸收回路和保护回路的设计;MOSFET开关损耗低,但通态损耗高。近年来,又出现了兼有几种器件优点的复合器件,如:绝缘门极双极晶体管IGBT(Insulated-gate Bipolar transistor)。它实际上是用MOSFET驱动双极型晶体管,兼有MOSFET的高输入阻抗和GTR的低导通压降两者的优点。又如:MOS控制晶闸管MCT(Mos-Controlled Thyristor),它是用MOSFET驱动GTO,具有MOS开通、关断门极特性的大功率高频晶闸管类器件。这种复合型电力电子器件构成了所谓第三代电力电子器件。

第四代电力电子器件

随着工艺水平的提高,能做到将许多零散拼装的器件组合在一起大规模生产,器件模块化的发展最终导致第四代电力电子器件——功率集成电路PIC(Power Integrated Circuit)的诞生。在PIC中,不仅是主电路的器件,而且把驱动电路以及具有过压过流保护、电流检测、甚至温度自动控制等作用的电路都集成在一起,形成一个整体。

2. 电力电子电路

在电力半导体器件迅速发展的同时,伴随着电力电子电路的不断更新换代,以晶闸管器

迫使换流线路控制电流的通断取代机械式换向器，接着又以全控型开关器件来取代线路复杂、体积较大、功能指标较低的强迫换流线路。这是技术发展的规律。对千变万化的各种电力电子电路，如果从实现电能变换功能的角度出发，可归结为以下四种：

① 交流/直流(AC/DC)变换电路：由交流电能到直流电能的变换称为整流(Rectifier)，凡能实现这一变换的电路泛称为整流电路。

② 直流/交流(DC/AC)变换电路：由直流电能到交流电能的变换称为逆变(Reverse)，凡能实现这一变换的电路泛称为逆变电路。

③ 交流/交流(AC/AC)变换电路：能将一种交流电压(或电流)和频率加以改变的电路。前者称为交流调压器；后者称为变频器。

④ 直流/直流(DC/DC)变换电路：能将一种直流电压(或电流)幅度和极性加以改变的电路，称为直流斩波器。

凡仅具有一种电的变换功能的电路称为基本变换电路；出于技术或经济的原因，当使用多个基本电路以完成一种电的变换功能时，称为组合变换电路。

3. 控制方式

按照电力电子器件开关状态与控制信号的关系，通常将控制方式分为：

① 相控方式：指控制信号幅度的变化表现为变流器件控制脉冲相位的变化，是工作于交流电源的变流器常用的控制方式。

② 频控方式：指控制信号幅度的变化表现为变流器件控制脉冲频率的变化，是工作于直流电源的逆变器常用的控制方式。

③ 斩控方式：指控制信号幅度的变化表现为变流器件导通比的变化，是直流变换电路常用的控制方式。

实际的电力电子装置中使用的控制方式往往是上述三种方式的有机结合。

值得一提的是，微型计算机技术的发展，已使电力电子装置的微机控制方式得以实现。微机简化了控制硬件，提高了可靠性，消除了漂移和电机干扰问题，很容易实现具有灵活的软件控制算法的通用型控制硬件。另外，微机控制还有可作复杂控制，进行判断、监控、诊断和易于与各种数控电路相兼容的特点。

4. 电力电子装置

按照生产的要求和负载的特点，选用合适的电路和控制方式以组成实用的电力电子装置。

三、电力电子学的应用

随着电力半导体技术和计算机技术的进步，电力电子学的应用取得了极大的发展，并已渗透到各个领域。表 0-1 概括出它的主要应用领域。其中左端第一列这一领域包括用于电子、计算机、仪器和航天领域的各种开关调节型交直流电源和不间断电源(UPS)。为了满足小型开关电源需要结构紧凑、经济实用的要求，这一领域里出现了谐振变换技术(频率为数兆赫)。大部分电力电子装置通

表 0-1 电力电子系统的应用领域

交直流可调电源	电化学生产	加热和照明控制	电焊接	电网无功和谐波补偿	高压直流系统	光电池和燃料电池的变换	变速恒频系统	固态断路器	感应加热	电机传动
---------	-------	---------	-----	-----------	--------	-------------	--------	-------	------	------

常用在电化学中,诸如金属电解精炼、电镀、阳极氧化和生成化学气体等。采用相控法的电加热和电照明技术应用已久,近年来出现的高频荧光灯镇流器在节能和调光应用方面很有前途。在电子焊接领域,使用晶闸管交流开关进行快速而精确的电力控制。在电力系统,采用固态有源滤波器滤除谐波和进行无功补偿;高压直流(HVDC)输电非同频供网系统在两端使用晶闸管变流器。光电池和燃料电池产生直流电,随后通过固态逆变器把直流电转换成交流电;在飞机电源中,400Hz恒频电源是通过变速恒频(VSCF)系统变换发自引擎发电机的变频交流电而得到的。固态直流和交流断路器,已用于中低容量的电力系统。在金属加热、焊接和热处理的场合,常采用固态逆变器的感应加热方法。电机传动是电力电子学最大的应用领域,在这一领域中,小功率应用场合有用于计算机和仪器外围设备的电机传动;中功率应用场合包括机床传动和机器人传动,涉及造纸厂、纺织厂、泵类和风机类;大功率应用场合有气体管道压缩机、锅炉送风/引风机和馈水泵、船舶推进以及水泥厂,传动电机功率达数兆瓦。

四、电力电子学的发展现状与趋势

电力电子学的历史始于本世纪初汞弧整流器发明之时。电力电子学真正的革命是始于1956年贝尔实验室发明晶闸管和1958年通用电气公司推出产品时。电力电子学的发展可分为四个阶段:

(a). 60年代以前:汞弧整流器和闸流管、电子阀、硒整流器以及机械斩波器和接触式变流器。

(b). 60年代~70年代末:硅二极管和晶闸管以及较小的功率晶体管。

(c). 70年代中期~80年代末:大功率双极晶体管、MOSFET、IGBT、GTO和其它可关断器件。

(d). 80年代中期~90年代:以智能电力半导体器件(smart power)为代表的功率集成电路(PIC)。

(一)发展现状

1. 电力半导体器件

自1980年起,研制和生产出了更多的可关断电力半导体器件,这大大地完善了现代电力电子学。表0-2示出了1990年电力半导体开关器件可达到的最大容量。采用这些器件,可制造出各种功率等级需要的自换相变流器。这些器件可通过门极可控电流来开通和关断。

表0-2 可关断功率器件的最大容量

器件	U (V)	I (A)	T_{off} (μs)	P_{max} (kVA)	频率范围 (kHz)
双极晶体管	1200	300	15~25	180	.5~5
	550	480	5~10	130	.5~5
SIRET	1000	80	1~3	40	2~20
IGBT	1000	200	1~4	100	2~20
MOSFET	1000	28	.3~.5	14	5~100
SIT	1400	25	.1~.3	18	30~300
GTO	4500	3000	10~25	3300	.2~1
SITh	2000	600	2~4	300	1~10

SIRET—环发射极晶体管(Simens Ring Emitter Transister),西门子公司研制;

SIT—静电感应晶体管(Static Induction Transistor);

SITh—静电感应晶闸管(Static Induction Thyristor)。

2. 电路和拓扑

变流器的基本电路拓扑数十年来已为人们所熟知。对于电网换相电路特别如此。在自换相变流器中,由于可关断半导体器件的采用,由电容、电感和辅助晶闸管组成的大多数换相电路已被省略。为此,自换相变流器的标准电路也已确立,在带有直流环节的逆变器(无论是电压型的还是电流型的)间存在一基本的对偶性。

谐振和准谐振开关(ZCS)的发展正处于全盛时期,但标准电路尚未确立,所以这一领域仍有许多开发潜力。

3. 脉宽调制(PWM)和谐振技术

DC/DC 变流器(斩波器)采用的 PWM 技术数十年来已规格化。脉冲频率范围从 1kHz 到 1MHz 以上。同时,较低功率范围内异步和同步电机的速度控制,采用了标准的 PWM 变流器,开关频率在 1kHz~20kHz 之间。UPS 装置也采用了 PWM 逆变器。对采用异步电机的大型工业传动和电气列车,制造出了兆瓦级 PWM 逆变器,其脉冲频率仅约为几百赫。

目前,谐振开关在最低功率范围广泛的用途是作电源组。采用这种开关方式(零电压开关或零电流开关),元件的开关损耗减小。随着频率的增加,容性和感性储能元件减至最少。

4. 控制技术

继功率级新型半导体元件之后,微电子学也对控制器、实际值的记录及数据的处理和传送作出强烈的响应。虽然由于成本上的缘故,控制器部分仍常常采用模拟器件,但越来越多地从模拟控制器向数字控制器转移,即使电流环路大部分也是模拟的。这是因为数字式实时控制器需要一些信号处理器和交换器,费用极大。为了便于实现且操作方便,目前的趋势是采用微处理器的自调系统,信号处理器的规格是 16 位或 32 位。

(二)发展趋势

器件和电路存在相辅相成的关系,但是器件的发展却对整个领域产生更为深远的影响,因此电力电子技术的发展首先是电力电子器件的发展。90 年代电力电子器件发展的主要目标是高性能化,即大容量、高频率、易驱动、低损耗。许多新的工艺,如平面工艺、LSI 工艺、多层金属化、厚膜技术高能注入等将应用于电力电子器件的开发与生产中。将有可能出现新的改进型的、光触发的、MOS 控制的功率器件。

随着电力电子器件的发展,90 年代电力电子技术的发展趋势如表 0-3 所示。由表 0-3 可见,80 年代出现的将电力器件与控制逻辑组合在同一芯片上的“智能功率”集成电路 PIC,在 90 年代后将有很大的发展。PWM 技术的应用范围将拓宽,特别是在 UPS 中的应用将更趋于成熟。

表 0-3 电力电子技术的发展趋势

①	集成的功率和控制电路
②	PWM 技术在更高频率下的应用
③	先进的节能型变流电路
④	CAA、CAD 和 CAT 技术的应用
⑤	数字信号处理器(DPS)技术的应用
⑥	高温超导体的影响

随着能源紧张问题的进一步加剧,开发先进的节能型变流电路是势在必行。借助于计算机的 CAA、CAD 和 CAT 技术,使变流电路的分析和设计的准确性和调试的安全性都大大提高,经济效益明显。采用类似微机的数字信号处理器时代已经开始,数字信号处理器的功能正在不断完善,其速度之快,致使人们可以预料未来的电力电子系统的控制将以它为中心。高温超导技术目前虽然处于未成熟阶段,但它对电力电子学领域的影响现在就可以想象到,电力系统的非峰值电能储存将极大地受益于这项技术。

第一篇 电力电子器件

第一章 电力晶体管

§ 1-1 电力二极管

电力二极管在电力电子电路中主要用作整流、续流和隔离等,其结构与普通小信号二极管相似。由一个PN结和两端引线以及封装组成。电流在10A以上的二极管均属于电力二极管。

一、二极管的特性

理论上,二极管的PN结特性为: $I = I_s(e^{u/U_T} - 1)$ 。其中 I_s 为反向饱和电流(A); u 为外加电压(V); U_T 为温度电压当量(V),常温下(27°C)为26mV; I 为流过PN结电流。

二极管正向偏置时 $u > 0$,正向电流 I 随端电压指数上升。

$$I \approx I_s e^{u/U_T} \quad (1-1)$$

反偏时 $u < 0$,近似为

$$I \approx -I_s \quad (1-2)$$

为反向漏电流。

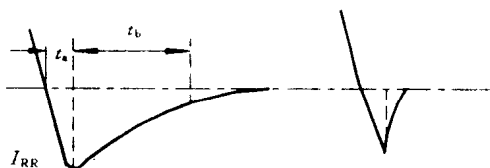
实际电力二极管的PN结特性有所不同。电力二极管流过很大电流,引线、焊接电阻压降不可忽略,同时为能承受高电压,半导体材料掺杂浓度低,造成正向压降大。反向漏电流除PN结体内漏电流外,尚有PN结表面漏电流。前者与温度有关,随温度升高而升高,而后者与温度无关,主要由工艺决定,随外加电压增加而缓慢增加,直至反向雪崩击穿。因此电力二极管特性偏离理论PN结特性。

二、二极管开关特性

由晶体管知识知,二极管存在结电容 $C_j = C_B + C_D$,势垒电容 C_B 大小与PN结截面积成正比,电力二极管的截面积比普通二极管大,所以具有更大的势垒电容。扩散电容 C_D 的大小与通过PN结的正向电流有关。

当二极管加正向电压时,正向电流对结电容充电。若外加电压反向,正向电流下降到零,并不能立即截止。因为结电容存在一定电荷需要一定的恢复时间,此时二极管仍处于导通状态直至全部电荷被复合,二极管恢复阻断状态,如图1-1所示。通常定义二极管正向电流下降到零

时起,到反向电流下降到反向峰值电流 $I_{RR}10\%$ 时止的时间间隔,称为二极管反向恢复时间 t_{rr} 。如图 1-1(b) 所示,反向恢复时间



(a) 普通整流管 (b) 电力开关管

图 1-1 二极管反向恢复特性

$$t_{rr} = t_a + t_b \quad (1-3)$$

其中 t_a 是势垒电容放电时间; t_b 是扩散电容放电时间。

反向峰值电流 I_{RR} 可用反向电流上升率 di/dt 表示

$$I_{RR} = t_a di/dt \quad (1-4)$$

结电容储存的电荷是恢复特性与时间轴所包围的面积,近似为

$$Q_{RR} \approx I_{RR}t_a/2 + I_{RR}t_b/2$$

即

$$I_{RR} \approx 2Q_{RR}/t_{rr} \quad (1-5)$$

∴

$$t_{rr}t_a = 2Q_{RR}/(di/dt)$$

若忽略 t_b ($t_a \gg t_b$), 则 $t_{rr} = t_a$ 可得

$$t_{rr} \approx \sqrt{\frac{2Q_{RR}}{di/dt}} \quad (1-6)$$

$$I_{RR} = \sqrt{2Q_{RR} \frac{di}{dt}} \quad (1-7)$$

由此可见,反向恢复时间和反向峰值电流取决于存储电荷 Q_{RR} 和反向电流上升率。其中存储电荷由正向电流决定。

当二极管原先反偏置,若突然加正向电压时,由于二极管在 PN 结正偏前必须将先前充入的势垒电容电荷先放掉,正向电压上升到死区电压以上,PN 结才有正向电流流过,这也需要一定时间,称为正向恢复时间。但是若正向电流上升太快,特别是大电流器件,由于结面太大不均匀,可能只有小块面积达到正偏,导致局部电流集中而损坏。

正反向恢复时间都将限制二极管的开关速度。在工频整流电路中,对二极管开关速度要求不高,因而影响不大。在高频变换器中就必须采用恢复时间短的二极管。

三、二极管性能参数

① 最高允许结温 T_{JM} 结温是指整个 PN 结平均温度,最高允许结温是指 PN 结不损坏能承受的最高平均温度。结温通常允许在 $-40 \sim 125^\circ\text{C}$ 范围内。电力二极管工作在大电流和高反压状态下,PN 结要消耗大量的功率。因此,应预先采取有效散热措施。

② 额定正向平均电流 I_F (额定电流) 在规定的环境温度 $+40^\circ\text{C}$ 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。

由二极管定额方法可以看出,正向电流是按发热条件定额的,因此选用二极管时应按有效值相等条件选取二极管定额。对应额定正向平均电流的有效值定额为 $1.57I_F$ 。

③ 反向重复峰值电压 U_{RRM} 它是二极管工作时所能施加的反向最高峰值电压。通常是反向雪崩击穿电压 U_B 的 $2/3$ 。使用时一般按电路中二极管可能承受的最高峰值电压的两倍选

取二极管定额。

④反向恢复时间 t_{rr} 如前所述,它是从正向电流过零到反向电流下降到其峰值的 10% 时的时间间隔。与反向电流上升率、结温、以及开关前最大正向电流有关。

⑤浪涌电流 是指连续几个工频周波的过电流。一般是用额定正向平均电流的倍数和相应的浪涌时间(工频周波数)来规定浪涌电流。

在选择保护继电器时,继电器的过流跳闸特性应满足这一定额。

⑥平方电流秒定额 I^2t 它是衡量承载正向最大不重复电流能力。即电流浪涌不超过一个工频周期时

$$I^2t = \left[\frac{1 \text{ 个周期浪涌电流定额}}{2} \right]^2 \frac{1}{f} \quad (1-8)$$

其中 $f = 50\text{Hz}$; t 为浪涌时间。

根据这一定额选择适当容量的熔断器。熔断器的 I^2t 必须小于所保护的二极管的 I^2t 定额。上述定额是在环境温度 25°C 条件下规定的,当环境温度高于 25°C 时,这些定额随温度的增加而减额使用。

对于整流用二极管通常还有:

⑦反向漏电流 反向不重复峰值电压下的平均漏电流称为反向不重复平均电流 I_{RS} , 对应于反向重复峰值电压下的平均漏电流称为反向重复平均电流 I_{RR} 。

⑧正向平均电压 U_F 在规定的环境温度为 $+40^\circ\text{C}$ 和标准散热条件下,元件通以 50Hz 正弦半波额定正向平均电流时,元件阳、阴极之间电压的平均值。 U_F 愈小,元件发热与损耗也愈小,一般在 $0.45 \sim 1\text{V}$ 范围内。

§ 1-2 双极型功率晶体管

在电力开关电路中,广泛使用电力晶体管作为可控开关器件。导通时,晶体管流过很大电流但压降很小,相当于开关接通;截止时,晶体管可承受很高的电压而流过的漏电流却很小,相当于开关断开。由此可见电力晶体管具有通断控制功能,且有线性放大和更高的开关速度。而晶闸管(将在第二章中介绍)控制端只能控制其导通,不能控制其关断。因此电力晶体管在低压领域比晶闸管应用得更广泛。

通常电力晶体管分为三大类:双极型功率晶体管(BJT)、VMOS 场效应晶体管(MOSFET)和绝缘栅晶体管(IGBT)。本节首先讨论双极型功率晶体管,另外两种晶体管将分别在下两节介绍。

一、双极型功率晶体管(BJT)的稳态特性

双极型功率晶体管简称功率晶体管(这里指耗散功率或输出功率为 1W 以上的晶体管),对特大功率的晶体管又称为巨型晶体管 GTR(Grant Transistor)。它们都是由三层两个 PN 结构成的,三层半导体结构可以是 PNP,或 NPN。图 1-2 是按共发射极连接的 NPN 管,图中示出了基极的偏置条件以及双极型 NPN 晶体管的电路符号。其工作原理与小信号晶体管类同(内部载流子运动过程,请参阅有关电子线路书籍,这里不再讨论)。集电极电流 i_c 受控于基极电流 i_b ,它们之间的关系为

$$\beta = i_c / i_b \quad (1-9)$$

β 称为电流放大系数。

$$\text{集电极和发射极电流之间满足} \quad \alpha = i_c / i_e \quad (1-10)$$

$$\text{系数} \alpha \text{ 称为电流传输比。它与} \beta \text{ 的关系为} \quad \beta = \alpha / (1 - \alpha) \quad (1-11)$$

$$\text{晶体管作开关应用时,其直流增益}(h_{FE}) \text{ 为} \quad h_{FE} = I_C / I_B = \bar{\beta} \quad (1-12)$$

通常近似认为 $\bar{\beta} = \beta$ 。

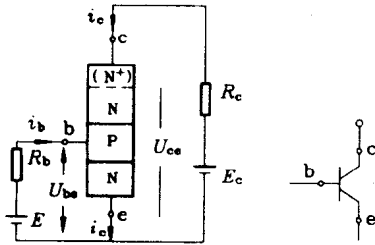


图 1-2 共发射极连接的 NPN 管及其电路符号

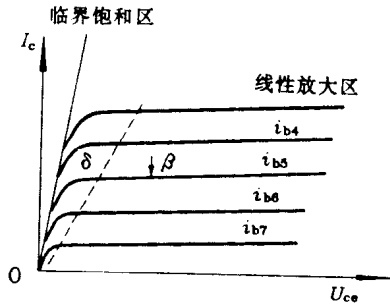


图 1-3 共发射极连接的 NPN 管输出特性

典型的双极型晶体管集电极输出特性示于如图 1-3。一般将其分为三个区域。

① 工作区(或称放大区) 其特点是发射结正偏,集电结反偏。

② 饱和区 其特点是发射结、集电结都正偏。对高压大功率电力晶体管,此区间又可进一步分为临界(或准)饱和区和深饱和区。

③ 截止区 其特点是发射结、集电结都反偏。

在作大功率开关管应用时,晶体管工作在截止和饱和导通两种状态。在理想情况下,晶体管饱和导通时可看成是短路,截止时可看成开路,且认为从一种工作状态转移到另一种工作状态的理想过渡时间是零,当然实际工作情况只能是接近这些条件。

截止时, $U_{be} \leq 0, U_{bc} < 0$, 发射结不注入电子,因而只有泄漏电流流过。从截止转入饱和状态时,晶体管要穿过线性工作区。随着基极电流 i_b 的增加,管压降 U_{ce} 逐渐下降,当集电结刚转为正偏时 ($U_{be} > 0, U_{bc} > 0$), 晶体管就进入临界饱和区状态。若基极电流进一步加大,则集电结正偏加大,晶体管的工作状态进入深饱和区。深饱和时比临界饱和多增加的这部分载流子积累,称为超量储存电荷。由于 $U_{ce} = U_{be} - U_{bc}$, 而 $U_{be} \approx U_{bc}$, 集电极到发射极的电压几乎为零,因而饱和时晶体管可通过很大的电流。

对高压大功率电力晶体管,温度的影响应特别引起重视。高温时,集电结反向饱和电流 I_{cbo} 随温度升高而迅速增加,引起晶体管穿透电流 I_{ceo} ($I_{ceo} = (1 + \beta)I_{cbo}$) 迅速增加,它将直接影响集电极电流 I_c , 使 I_c 随温度升高而增大,从而引起集电极耗散功率增大。这又使晶体管温度进一步上升, I_{cbo} 更加增大,有可能形成恶性循环,最后导致晶体管烧坏。

因此,为确保晶体管工作时的稳定性,通常规定晶体管的最高工作温度,或者规定允许的反向电流,使晶体管不致造成热不稳定或热损坏。

二、双极型功率晶体管的开关特性

PN 结正偏时有两个电容: 势垒电容和扩散电容,反偏时仅有势垒电容。在稳态时,结电容对晶体管特性没有影响;而在瞬态时,它影响晶体管的开关特性。

晶体管开关时,由于存在结电容,所以不是瞬时完成的。现以晶体管共发射极电路为例,说明开关的全过程。如图 1-4 所示,给晶体管基极一个电流脉冲,则集电极电流的波形将如图 1-5 所示。集电极电压波形很大程度上取决于负载电路,因而不能用它表示晶体管的开关特性。

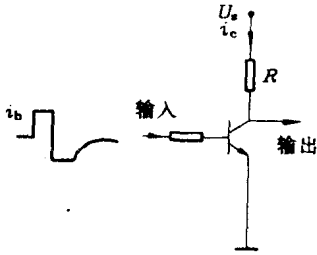


图 1-4 测晶体管开关时间电路

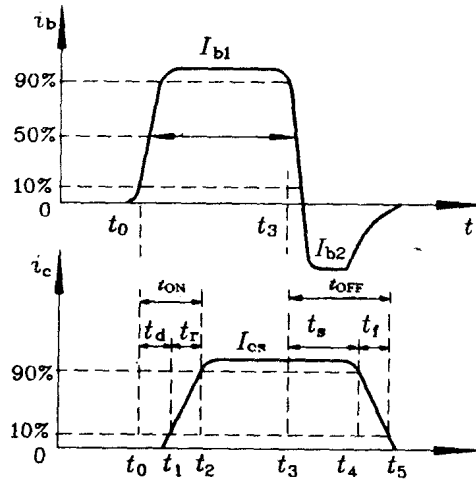


图 1-5 开关过程中 i_c, i_b 的切换时间

如在 t_0 时刻,给基极加上正脉冲信号,使它正偏,晶体管由截止状态转为饱和状态。在示波器上,可观察到 i_b, i_c 随时间变化的波形如图 1-5,其中 $I_{c\alpha}$ 是集电极的饱和电流。

可以看出,输出信号与输入信号之间的波形有差异,时间上也有延迟。从 t_0 时刻开始输入脉冲信号,此后的一段时间内, i_c 仍保持为截止状态时的小电流 ($10\% I_{c\alpha}$)。到 t_1 时才开始增加,从 t_0 到 t_1 这段时间称为延迟时间,用 t_d 表示。从 t_1 开始, i_c 不断增大,到 t_2 时, i_c 接近饱和值 $I_{c\alpha}$ (约 $90\% I_{c\alpha}$)。从 t_1 到 t_2 这段时间称为上升时间,用 t_r 表示。当 $t = t_3$ 时,输入的脉冲开始反极性,之后 i_b 要减之零而反向,但集电极电流并不立即减小,而是要经过一段时间,到 t_4 (约 $90\% I_{c\alpha}$) 才开始减小, t_3 到 t_4 这段时间称为储存时间,用 t_s 表示。从集电极电流开始减小到下降为截止状态时的电流 (约 $10\% I_{c\alpha}$) 所需的时间 ($t_4 \sim t_5$) 称为下降时间,用 t_f 表示。

延迟时间与上升时间之和,称为开通时间 t_{on} ,表示晶体管由关断状态过渡到导通状态所需的时间。即

$$t_{on} = t_d + t_r \quad (1-13)$$

储存时间与下降时间之和,称为关断时间 t_{off} ,表示晶体管由导通状态过渡到关断状态时所需的时间。即

$$t_{off} = t_s + t_f \quad (1-14)$$

延迟时间主要与发射结电容的放电相对应,要缩短延迟时间,可用减少在延迟过程中所需的充电电荷量的方法,也可用增大正向基极电流及其上升率的方法。

电流的上升时间与基极区的有效宽度有关,要缩短上升时间,可用增加充电的速度的方法,也可用减少在上升过程中所需的充电电荷量和基区储存电荷的方法。

储存时间就是除去超量储存电荷所化费的时间。要缩短储存时间,一是尽量减少超量储存电荷的总量,要求 I_{b1} 不要太大,在保证稳定导通的条件下,尽量减小饱和深度。此外,需要在保

证击穿电压指标的前提下尽量减少集电区高阻层厚度,以减小储存电荷的空间。二是加快超量储存电荷的消失过程,可以通过增大抽取电流 I_{b2} 和减小集电区空穴寿命来实现。

由于 I_{b2} 的作用而截止发射结时,这种关断过程是最优的。为了减少下降时间,一方面靠减少发射结、集电结势垒电容和基区宽度,以减少在下降过程中所需要抽取的电荷总量,另一方面可以加大基区抽取电流 I_{b2} 。

电力晶体管作为开关管应用时,要力求避免器件在线性区工作,至少要迅速越过这一区域。这样可以减少器件的功率损耗。在饱和状态,管子的通态损耗很小,但这种状态并不利于迅速关闭至截止状态。通过减小和控制正向基极电流的大小,可使管子处于饱和状态的边缘,即临界饱和状态。在临界饱和状态,集电结处于进入线性区的边缘,一经施加反向基极电流,储存时间和下降时间都很短,器件可迅速进入截止状态。

在深饱和和工作状态时,通态电压降和正向电流增益都很小,但饱和时间太长,不利于器件快速关断。在临界饱和状态,可理解为该管集电极额外串接了集电极电路电阻,随饱和程度,该电阻阻值减小,当器件饱和后,该阻值减小到零。因而临界饱和的通态损耗比深饱和状态的通态损耗稍高些。

大功率晶体管的开关时间为几十纳秒至几微秒。大电流容量的晶体管的结面积较大,因而结电容也大,其开关时间就较长,应取上述时间范围的上限。但是与快速晶闸管的开关时间(通常为数十微秒)相比,它还是较短的。因此在需要开关速度快的应用领域,电力晶体管能发挥其快速功能。

三、双极型功率晶体管的参数

晶体管制造厂以参数和特性曲线向用户提供功率晶体的性能和限制,以便于设计者正确地使用晶体管。这些参数中的一类为性能参数,另一类为极限参数。使用时不能超过极限参数,否则将损坏晶体管。极限参数包括最高工作(反向)电压(BU_{cbo} 、 BU_{ebo} 、 BU_{ceo}),最大工作电流 I_{CM} ,最大耗散功率 P_{CM} ,最高结温 T_{JM} 和热阻 R_{th} 等。

1. 最高工作电压

晶体管有两个PN结,它的所有电压定额都与这两个PN结(bc结和be结)有关。如反向电压超过额定值,PN结可能被击穿。如果击穿后引起的损耗使结温未超过最大允许结温,一般不会损坏晶体管。如击穿电流过大,结温过高,使漏电流急剧增长的恶性循环,而导致晶体管烧毁。击穿电压与管子的掺杂浓度和管子外部电路有关。

① 发射极开路,集电极—基极之间的反向击穿电压 BU_{cbo} 。

如图 1-6(a) 所示为测量 BU_{cbo} 的电路及其特性。当加到集电结上的反向电压 U_{cb} 在一定范围时,流经集电结的电流就是反向饱和电流 I_{cbo} 。当电压 U_{cb} 增加到 I_{cbo} 开始上升时(P点)的电压,即认为是反向击穿电压 BU_{cbo} 。因为如继续增加 U_{cb} ,则 I_c 将从 P 点急剧增加到 B 点,有可能把管子击穿。这个共基极电路的耐压最大值是由 U_B 决定的,产品目录中给出的最大电压 BU_{cbo} ,仅表示达到一定值时的电压,并不是 U_B ,一般 $BU_{cbo} < U_B$ 。

反向击穿电压 BU_{cbo} 决定于集电结的雪崩击穿电压,它有比较高的数值。

② 基极开路,集电极—发射极之间最高允许电压 BU_{ceo} 。

如图 1-6(b) 所示为测量 BU_{ceo} 的电路及其特性。当电压 U_{ce} 增加到 I_{ceo} 开始上升时(M点)的电压,即认为是 BU_{ceo} ,电压 U_A 表示共射极雪崩击穿电压。