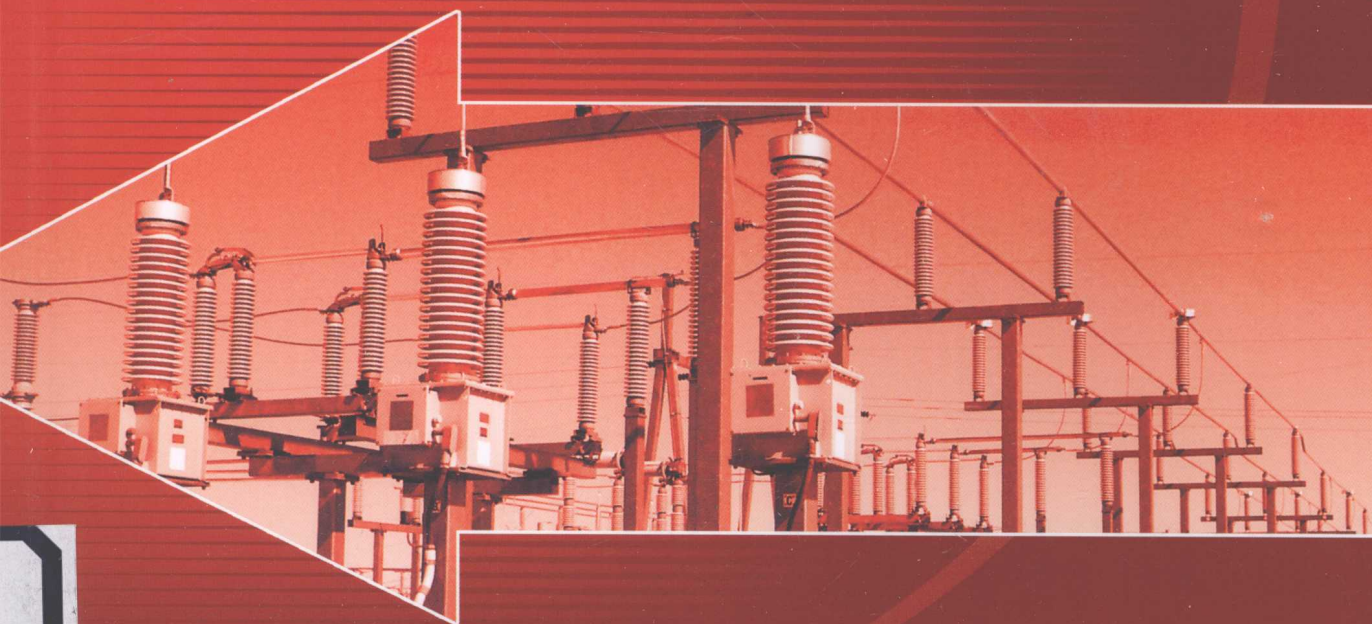


变电站 直流设备使用与维护 培训教材

阀控密封铅酸蓄电池

徐海明 周艾兵 编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

变电站 直流设备使用与维护 培训教材

阀控密封铅酸蓄电池

徐海明 周艾兵 编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书是以国家及电力行业颁布的变电站直流电源系统专业技术规程和标准为依据,结合变电站阀控式密封铅酸蓄电池直流设备的使用与维护的实际情况而编写的。全书共分十章,主要介绍变电站直流系统普遍使用的高频开关模块型充电装置、阀控式密封铅酸蓄电池及原电力部组织联合设计的 GZDW(微机型)直流电源成套装置的技术基础、工作原理、技术特性、使用与维护。对变电站直流设备的系统配置与技术要求、直流电源系统的设备选择、直流设备的检修、直流设备的运行与维护、直流系统事故的预防等作了介绍,并对变电站直流设备的更新、改造方法技巧及直流设备安装检修作业指导书作了详细介绍。

本书是从事变电站直流设备检修、运行、安装调试的一线生产人员的岗位技能培训教材,可供从事电力生产的管理人员、生产技术人员参考使用,也可供高等院校相关专业师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

变电站直流设备使用与维护培训教材:阀控密封铅酸蓄电池/
徐海明,周艾兵编著. —北京:中国电力出版社,2009

ISBN 978-7-5083-9421-3

I. 变… II. ①徐…②周… III. ①变电所—阀控式铅酸蓄电池—使用—技术培训—教材②变电所—阀控式铅酸蓄电池—维护—技术培训—教材 IV. TM912.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 167786 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 http://www.ccpp.com.cn)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2010 年 1 月第 1 版 2010 年 1 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 19.75 印张 480 千字

印数 0001—3000 册 定价 40.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言

20世纪90年代发展起来的变电站阀控式密封铅酸蓄电池直流系统，由于该直流系统的蓄电池具有性能稳定、运行可靠、维护工作量小、使用寿命长的特点，充电装置具有微机调节和控制的全自动功能，绝缘监察、直流母线调压等辅助设施均采用了微机自动控制的装置，因此，在短短数年的时间就几乎取代了所有变电站的传统直流设备，其发展速度令人惊叹。

当前直流系统新设备的技术优势使变电站的直流系统运行更加可靠，然而新型直流设备的检修、运行则要求使用者的技术水平更高、更精。目前，在变电站阀控式密封铅酸蓄电池直流系统的安装检修、使用与维护工作中，还存在着诸多需要重视的问题。其一，新产品、新设备、新技术在变电站直流系统得到了广泛应用，但相关工作人员的业务培训工作没有跟上技术发展的步伐，部分工作人员对阀控式密封铅酸蓄电池直流设备运行与维护的技术要求掌握不够精细，对直流系统电源设备的原理及维护方法技术要求不熟悉，导致了直流系统电源设备故障运行，因此降低了变电站直流系统电源的可靠性，直接影响着电力系统的安全运行；其二，对阀控式密封铅酸蓄电池使用性能不够了解，对阀控式密封铅酸蓄电池使用维护不当，造成了蓄电池组达不到使用年限而使其寿命提前终止；其三，直流系统电源设备的管理者和使用者对直流设备运行维护存在着认识上的误区，认为充电设备是全自动的，阀控式密封铅酸蓄电池是免维护的，所以对直流系统设备维护不到位，管理不到位，导致直流设备在运行中存在的缺陷没有及时发现，使变电站独立的直流电源可靠性降低，给电力系统的安全运行留下了隐患。因此，开展生产岗位技术培训，是当前极其迫切的工作。

本书以国家及电力行业颁布的专业技术规程和标准为依据，重点讲述变电站直流系统普遍使用的高频开关模块型充电装置、阀控式密封铅酸蓄电池及原电力部组织联合设计的GZDW（微机型）直流电源成套装置的技术基础、工作原理、技术特性、使用与维护。对变电站直流设备的系统配置与技术要求、直流电源系统的设备选择、直流设备的检修、直流设备的运行与维护、直流系统事故的预防等作了介绍，并对变电站直流设备的更新、改造方法技巧及直流设备安装检修作业指导书作了详细介绍。由于本书的阅读对象为变电站直流设备检修、运行、安装调试的一线生产人员，所以编写的重点是变电站阀控式密封铅酸蓄电池直流设备的工作原理和技术特性、现场直流设备的使用与维护。在讲述工作原理和技术特性时，尽量做到深入浅出，在讲述直流设备的使用与维护时，着重实际操作技能，内容力求简明、通俗、易于理解与掌握。

科学在发展，技术在进步。尽管本书的编著者在编写过程中，力求编入新技术、新设备在变电站直流系统方面应用的资料和工作经验，但在电力技术飞速发展的今天，有可能在本书出版之时，又有新的设备、新的技术得到应用，从而使书中的部分内容落后于新技术的发展。但编著者的本意是希望本书能给我国从事变电站直流设备的使用与维护的工作人员们带来

一定的技术帮助和参考价值。由于作者水平有限，书中的错误和不足之处在所难免，希望广大读者予以批评指正。

本书共分十章，徐海明编写了第一～九章，并对全书进行了校核。周艾兵参与了第十章的编写。在编写过程中，作者参阅了大量的国内外有关变电站直流系统使用与维护方面的论文、专著和资料，在此对这些论文、专著和资料的作者和编者表示谢意。

作者联系方式：xhdlxhm@sina.com。

编者

目 录

前言

第一章	高频开关模块型充电装置技术基础	1
	第一节 直流开关稳压电源分类、原理和构成	1
	第二节 直流开关稳压电源主控元件原理和应用	2
	第三节 高频 PWM-DC/DC 变换器	12
	第四节 高频开关模块型充电装置主要名词术语	19
第二章	阀控式密封铅酸蓄电池基础知识	23
	第一节 铅酸蓄电池发展历史	23
	第二节 化学电池	24
	第三节 固定型铅酸蓄电池	27
	第四节 阀控式密封铅酸蓄电池密封原理	29
	第五节 阀控式密封铅酸蓄电池主要名词术语	30
	第六节 阀控式密封铅酸蓄电池技术指标	34
第三章	变电站直流设备系统配置与技术要求	37
	第一节 变电站直流设备系统配置标准	37
	第二节 变电站直流电源系统技术要求	42
	第三节 变电站阀控式密封铅酸蓄电池直流系统特点	48
	第四节 直流控制电源基本要求	49
	第五节 阀控式密封铅酸蓄电池直流系统基本接线	50
	第六节 变电站直流电源系统主要名词术语	54
第四章	阀控式密封铅酸蓄电池	57
	第一节 阀控式密封铅酸蓄电池结构、特性与使用	57
	第二节 阀控式密封铅酸蓄电池安装	65
	第三节 阀控式密封铅酸蓄电池常见故障及预防措施	70
	第四节 阀控式密封铅酸蓄电池故障预测	78
	第五节 阀控式密封铅酸蓄电池主要技术指标要求及检验方法	83

第五章	高频开关模块型充电装置	89
	第一节 高频开关模块型充电装置技术标准	89
	第二节 高频开关模块型充电装置	92
	第三节 GZDW 微机控制高频开关控制电源直流系统装置	94
第六章	阀控式密封铅酸蓄电池直流系统设备的选择与使用	130
	第一节 阀控式密封铅酸蓄电池的选择	130
	第二节 直流回路熔断器、直流断路器及载流导体选择	139
	第三节 直流系统馈电网络接线	152
	第四节 无人值班变电站直流系统	154
	第五节 微机型直流系统绝缘监察装置	156
	第六节 阀控式密封铅酸蓄电池直流电源系统调压装置	158
第七章	阀控式密封铅酸蓄电池直流设备检修	162
	第一节 变电站直流设备检修基本要求	162
	第二节 直流设备检修工作的实施	163
	第三节 变电站 BZ-1 型直流屏单母线单电源改造为 双母线双电源直流系统	175
	第四节 直流设备更换	185
	第五节 检修报告编写及验收投运	202
第八章	阀控式密封铅酸蓄电池直流设备运行与维护	207
	第一节 变电站阀控式密封铅酸蓄电池直流系统运行现状分析	207
	第二节 阀控式密封铅酸蓄电池直流设备交接验收	212
	第三节 阀控式密封铅酸蓄电池直流系统管理与维护	219
	第四节 变电站直流设备技术管理和备品备件管理	231
第九章	变电站直流系统事故预防及直流电源系统评价	233
	第一节 预防直流系统事故的技术管理及技术措施	233
	第二节 预防直流系统事故的运行维护管理	233
	第三节 变电站直流系统“反措”要求	234
	第四节 变电站直流系统技术监督告警制度	237
	第五节 直流系统事故和故障处理预案	238
	第六节 阀控式密封铅酸蓄电池直流电源系统评价	241

变电站高频开关电源直流设备（阀控式密封铅酸蓄电池）安装

检验作业指导书	258
第一节 高频开关电源直流设备（阀控式密封铅酸蓄电池）	
安装作业指导书	258
第二节 高频开关电源直流设备（阀控式密封铅酸蓄电池）	
全部检验作业指导书	269
附录 A 高频开关电源直流设备主要技术参数	282
附录 B ××变电站高频开关电源直流设备新投安装试验报告	283
附录 C ××变电站高频开关电源直流设备全部校验试验报告	295
附录 D 现场工作安全技术措施	305
参考文献	306

第一章 高频开关模块型充电装置 技术基础

第一节 直流开关稳压电源分类、原理和构成

一、直流开关稳压电源分类

直流开关稳压电源按照不同的分类方式，可以分成多种类型。若按照输出是否与调整元件（开关元件）等构成的其他部分隔离，可以分成为非隔离型和隔离型两种类型；按照开关元件的激励方式，可以分成为自激励和他激励两种类型；按照输出电压的方式，可以分成为脉宽—调制（PWM）式、频率调制式和脉宽—频率混合调制式三种类型；按照电源的输入，可分为 AC/DC 和 DC/DC 两种类型；按照开关元件的连接形式，可分成串联型和并联型两种类型。直流开关稳压电源还可按其他方式分成不同类型。

二、直流开关稳压电源工作原理

直流开关稳压电源是调整元件工作在开关状态的一类电源。由于它们具有体积小、质量轻和效率高等优点，因而发展非常迅速，应用范围日益扩大。

图 1-1 是直流开关稳压电源工作原理。在图 1-1 (a) 的电路中，直流开关稳压电源由开关元件、控制电路和滤波电路三部分组成，开关元件串联接在电源的输入和负载之间，构成串联型的电源电路。实际的开关元件常常是功率晶体管或 MOS 场效应管。它在控制电路的控制之下，或者饱和导通，或者截止。开关导通时， $U_D = U_m$ （输入电压为 U_m ）。通过滤波器加在负载电阻上。开关截止时， $U_D = 0$ 。开关交替通断，则在滤波器的输入端产生矩形脉冲波。此矩形脉冲波再经滤波电路滤波，即可在负载两端产生平滑的直流电压 U_o 。很明显，直流电压 U_o 的大小与一个周期中开关管接通的时间 T_{on} 成正比。 T_{on} 越长， U_o 越大。因为开关管截止时，从扼流圈流过的电流不能立即降到零，故增设了一只续流二极管，为此电流提供一条返回通路。

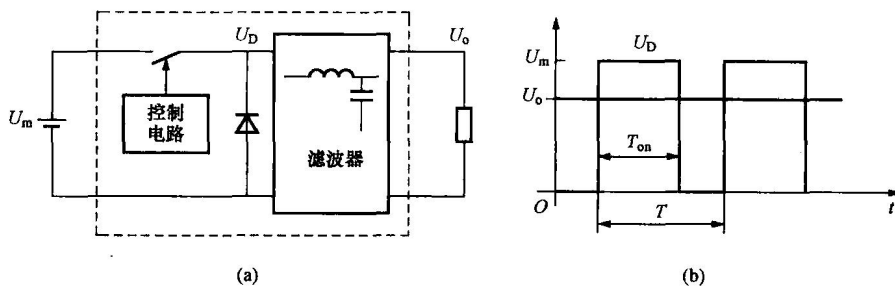


图 1-1 直流开关稳压电源工作原理

(a) 框图；(b) 波形图

三、直流开关稳压电源的基本构成

直流开关稳压电源的典型电路结构如图 1-2 所示。一台完整的直流开关稳压电源的基

本电路通常由整流滤波、DC/DC 变换器、开关占空比控制器及电路等模块构成。主电路由交流整流滤波、DC/DC 变换（高频变换）器等元器件组成，其作用是将其转换为符合要求的直流电。开关占空比控制电路目前一般采用 PWM 脉宽调制电路，包括输出采样、信号放大、控制调节、基准比较等单元，其作用是对输出电压进行检测和取样，并与基准定值进行比较，从而控制高频开关功率管的开关时间比例，达到调节输出电压的目的。在图 1-2 中， R_1 、 R_2 是直流开关稳压电源的取样比较电路的取样分压电阻。直流输出通过分压电阻获取的取样值与基准比较值 U_{REF} 进行比较后，反馈至开关占空比控制电路，开关占空比控制电路根据反馈量来自动地调节开关管的导通和截止的比例，即可控制直流电压的输出值，来达到稳压限流的目的。

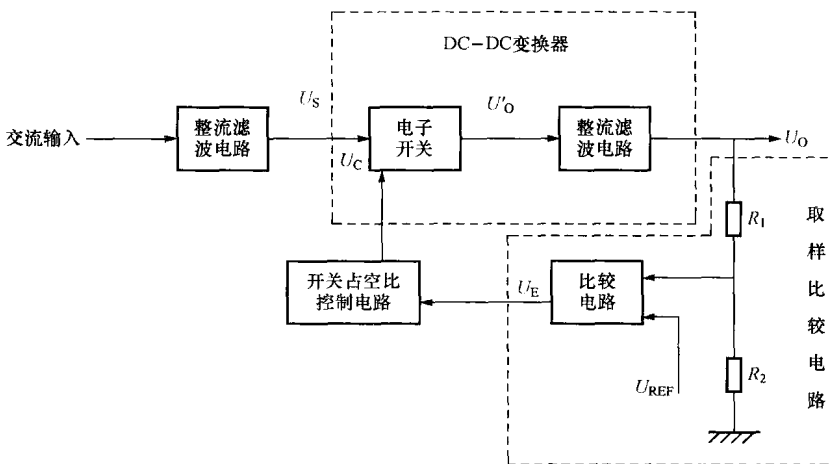


图 1-2 直流开关稳压电源的典型电路结构

第二节 直流开关稳压电源主控元件原理和应用

一、功率晶体管 GTR 原理和特性

功率晶体管 GTR 一般是指达林顿 NPN 晶体管，是 20 世纪 70 年代发展起来的全控型自关断电力电子器件。

1. 功率晶体管的结构

达林顿 NPN 功率晶体管就是将几只单个晶体管在元件内部做成射极跟随器，晶体管模块是指将几级达林顿晶体管集成在一起，对外构成一定电路形式的一个组合单元，目前功率晶体管模块的电流/电压已达 1000A/1200V。功率晶体管内部结构和图形符号如图 1-3 所示，功率晶体管模块结构原理如图 1-4 所示。

2. 功率晶体管工作原理

功率晶体管与小信号晶体管一样都有电压和电流放大的重要功能，基本原理类似，都是电流控制双极型器件。对于共射极电路，基极注入一定的基极电流 I_B ，器件进入“开通”的饱和状态，集电极电流 I_C 产生，集电极和发射极之间的压降 U_{CES} 就很低；基极电流 I_B 消失或注入一定的反向电流，器件立刻进入“关断”的截止状态，集电极电流 I_C 为零，集电极和发射极之间能承受较高的电压 U_{CEO} 。功率晶体管的电流放大倍数 β 是在一定条件下测定

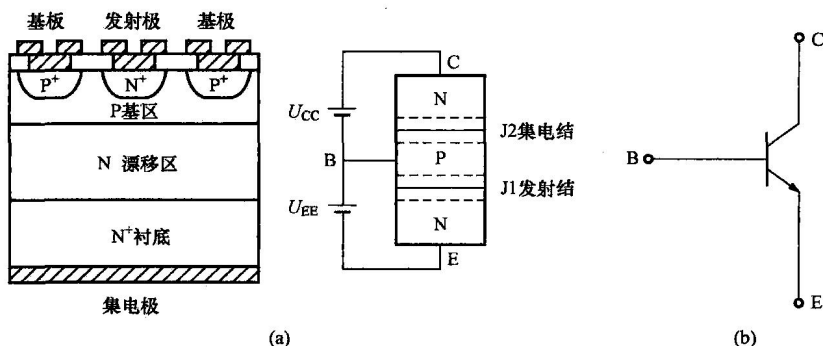


图 1-3 功率晶体管内部结构和图形符号

(a) 功率晶体管内部结构；(b) 图形符号

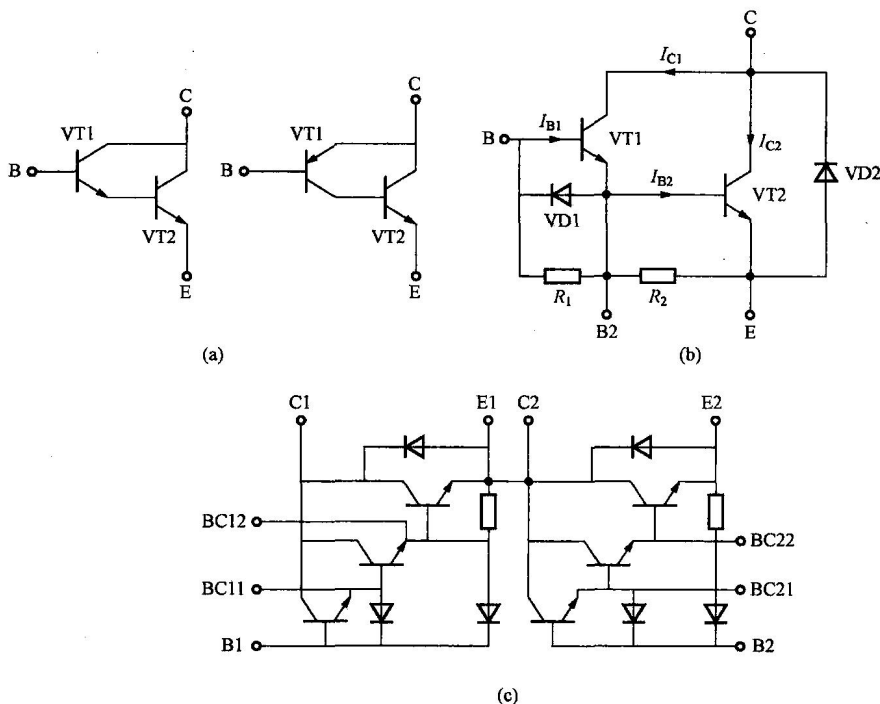


图 1-4 功率晶体管模块结构原理

(a) 达林顿管；(b) 功率晶体管模块；(c) 功率晶体管模块结构

的，使用条件不同，电流放大倍数 β 就不同。一般来说，集电极电流 I_C 小，电流放大系数 β 就大；集电极电流 I_C 大，电流放大倍数 β 就小。对于单只功率晶体管而言，晶体管集电极 I_C 达到元件额定电流一半以上时，电流放大倍数 β 明显下降，一般 β 下降 8~10。

因此，功率晶体管在一定要求的基极脉冲电流 I_B 的作用下，就能够在开通过程、导通状态、关断过程、截止状态四种不同阶段中转换，完成功率晶体管开关的动作。

3. 功率晶体管的特性与参数

(1) 功率晶体管输出 I_C-U_{CE} 。功率晶体管共射极电路输出特性 I_C-U_{CE} 如图 1-5 所示，由截止区、线性区、准饱和区、深饱和区组成，分别对应不同的基极驱动电流 I_B 。

饱和压降 U_{CES} 是在一定的基极驱动电流 I_B ，功率晶体管处于饱和状态下，集电极和发

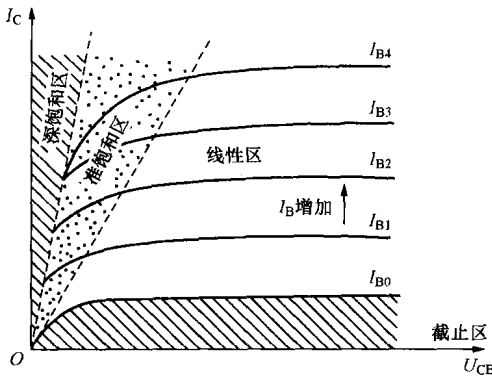


图 1-5 功率晶体管输出特性

射极之间的电压。饱和度越深，饱和压降 U_{CES} 越小，导通损耗越小，但是导致关断过程中退出饱和的时间延长。

一般来说，应用于开关状态的功率晶体管在导通状态集电极电流 I_C 大，饱和压降 U_{CES} 低，导通损耗 $P_{ON} = I_C U_{CES}$ 小；截止状态集电极电流就是漏电流， I_{CEO} 小，集电极和发射极之间的电压 U_{CE} 高，截止损耗 $P_{OFF} = I_{CEO} U_{CE}$ 小；加上开通过程和关断过程的开关损耗小；因此开关状态的功率晶体管总损耗比应用在线性区功率晶体管损耗 $P = I_C U_{CE}$ 小。

(2) 功率晶体管的开关特性。功率晶体管的开关特性反映功率晶体管在开通过程、导通状态、关断过程、截止状态四种阶段中动作的快慢特点和时间参数。如图 1-6 所示功率晶体管的开关特性，由延迟时间 t_d 、上升时间 t_r 、存储时间 t_s 、下降时间 t_f 组成，其中导通时间 t_{on} 由延迟时间 t_d 、上升时间 t_r 组成，关断时间 t_{off} 由存储时间 t_s 、下降时间 t_f 组成。为了加快功率晶体管的开关过程，必须优化基极驱动电流脉冲。

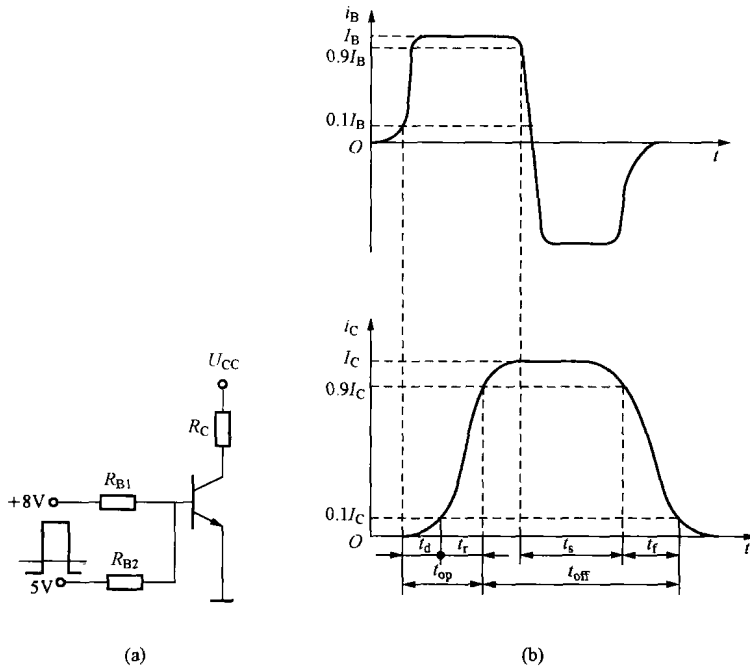


图 1-6 功率晶体管开关特性

(a) 驱动电路；(b) 开关特性

(3) 功率晶体管最大额定值。功率晶体管最大额定值表示功率晶体管极限参数，主要有集电极允许流过的最大电流 I_{CM} ，集电极最大允许耗散功率 P_{CM} ，最大允许结温 T_{JM} ，晶体管击穿电压 U_{CEO} 、 U_{CBO} 、 U_{EBO} 。 U_{CEO} 是基极开路、集电极—发射极间的击穿电压； U_{CBO} 是发射极开路、集电极—基极间的击穿电压； U_{EBO} 是集电极开路、发射极—基极间的击穿电压。一般来讲，晶体管在应用中任何时候都不允许超过极限参数。

4. 功率晶体管的安全工作区

一般来说,功率晶体管制造商提供给用户正向偏置安全工作区 FBSOA 是电路设计时的参考资料,为了使晶体管工作在最佳状态,GTR 不仅应工作在安全区内,而且还需根据使用条件和本身抗二次击穿能力留有必要的裕量。

(1) 功率晶体管的安全工作区。功率晶体管的正向偏置安全工作区 FBSOA 是直流参数 I_{CM} 、 P_{CM} 、 U_{CEO} , 以及二次击穿耐量有关的 P_{SB} 所组成的区域,如图 1-7 所示。当功率晶体管工作时,脉冲宽度越窄,安全区越大,集电极电流可为连续工作时最大电流 I_{CM} 的 1.5~3 倍。反向偏置安全工作区如图 1-8 所示。

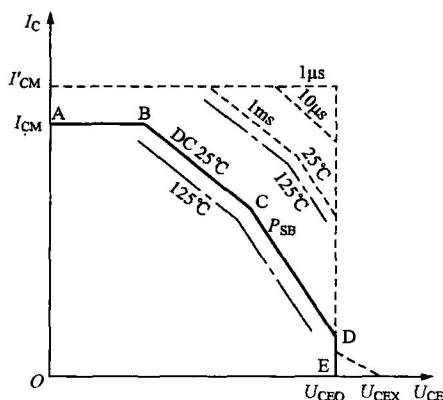


图 1-7 正向偏置安全工作区

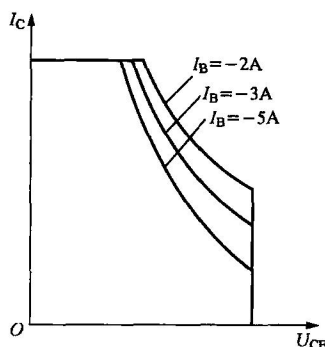


图 1-8 反向偏置安全工作区

(2) 功率晶体管的二次击穿现象。功率晶体管的二次击穿现象是晶体管应用的特殊现象,有别于晶体管的一次击穿。晶体的最高集电极-发射极电压额定值 U_{CE0M} 称为一次击穿电压。当发生一次击穿时,反向电流急剧增加,如果不限制电流的快速增长,就会导致破坏性的二次击穿现象,在某电压电流点产生向低阻抗区高速移动的负阻现象,一般在纳秒至微秒的数量级之内,导致器件内电流集中和局部过热点,轻者晶体管耐压降低、特性变差,重者集电极-发射极熔通,晶体管永久性损坏。

二、功率场效应晶体管 MOSFET 的原理和特性

功率场效应晶体管简称功率 MOSFET,是一种单极型的电压控制型器件,具有开关速度快、高频特性好、输入阻抗高、驱动功率小、热稳定性优良、无二次击穿现象、安全区宽和跨导线性度高等显著特点,得到了迅速的发展和应,目前功率 MOSFET 已达到 50A/1000V 耐量。

1. 功率场效应晶体管 MOSFET 基本结构和工作原理

功率场效应晶体管在电压控制下沟道区域半导体反型而形成可控的导电通道工作,控制电压越高,沟道越宽,导电电流越大。功率场效应晶体管根据沟道类型分为 P 沟道型和 N 型沟道型两类,电路符号如图 1-9 所示,是由源极 S、漏极 D、栅极 G 组成的三端双口器件。功率场效应晶体管根据结构形

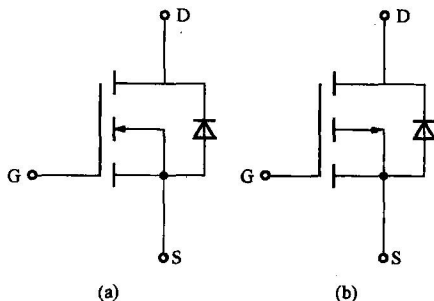


图 1-9 功率场效应晶体管电路符号

(a) N-MOSFET 电路符号;

(b) P-MOSFET 电路符号

式的不同分为 VVMOSFET、VDMOSFET、TMOS、HEXFET、SIPMOS、 π -MOS 等。为了提高电流容量均采用单元结构，成千上万个单元 MOSFET 成并联（多元集成）垂直导电结构。在图 1-10 中，VMOSFET 结构与 VDMOSFET 结构的结构形式不同，因而其 MOSFET 器件的导通沟道区域也不同。

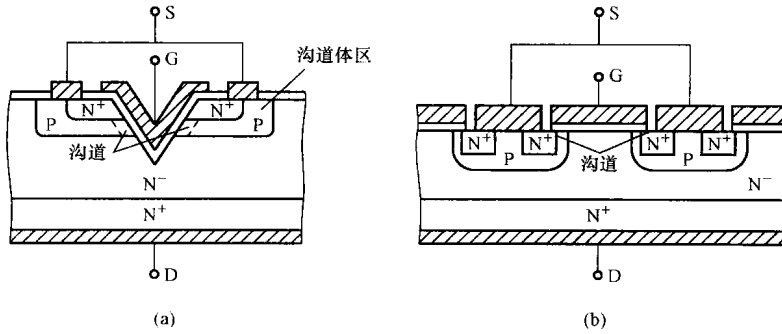


图 1-10 功率场效应晶体 MOSFET 基本结构
(a) VVMOSFET 结构；(b) VDMOSFET 结构

2. 功率场效应晶体管 MOSFET 特性和参数

功率场效应晶体管 MOSFET 属电压型场控器件，包括静态和动态特性与参数。

(1) 基本特性。

1) 输出特性 I_D-U_{DS} 。输出特性如图 1-11 所示，反映漏极电流 I_D 与漏源电压 U_{DS} 的关系，参变量为 U_{GS} 。

2) 转移特性 I_D-U_{GS} 。转移特性如图 1-12 所示，反映漏极电流 I_D 与栅源电压 U_{GS} 的关系，参变量为 U_{GS} 。

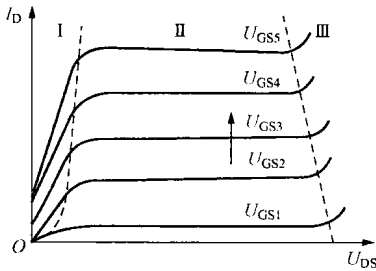


图 1-11 MOSFET 输出特性

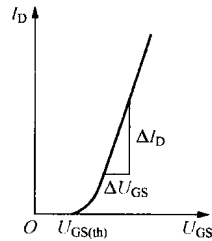


图 1-12 MOSFET 转移特性

3) 动态特性。动态特性即开关特性，如图 1-13 所示，描述反映 MOSFET 开关过程和开关时间参数，包括导通过程、导通、关断过程、截止四种状态。

(2) 主要参数。

1) 最大漏极电流 I_{DM} 。漏极电流 I_{DM} 表征功率 MOSFET 的电流容量，其测量条件为 $U_{GS}=10V$ ， U_{DS} 为某个适当值时的漏极电流。

2) 漏源击穿电压 U_{DSM} 。漏源击穿电压 U_{DSM} 表征功率 MOSFET 的耐压极限。定量分析规定为 $U_{GS}=0$ 时，漏源之间的反向泄漏电流达到某一规定值时的漏源电压。

3) 栅源击穿电压 U_{GSM} 。栅源击穿电压 U_{GSM} 表征功率 MOSFET 栅源间能承受的最

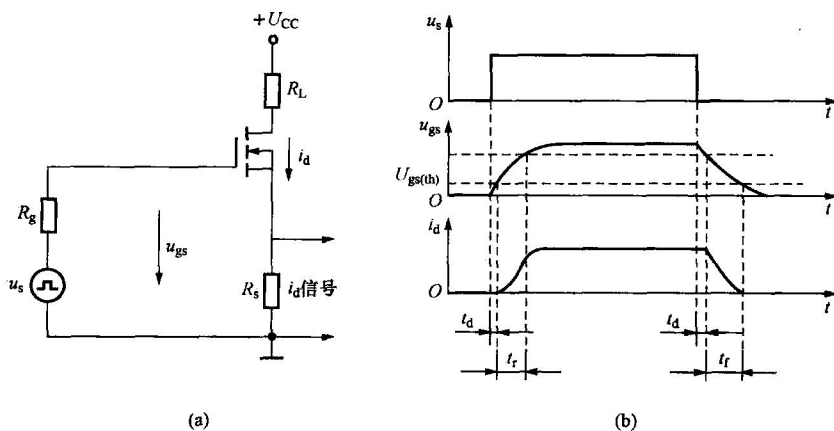


图 1-13 功率场效应晶体 MOSFET 开关特性

(a) 动态特性测试电路；(b) 开关特性

高电压，其值一般为±20V。

4) 阈值电压 $U_{GS(th)}$ 。阈值电压 $U_{GS(th)}$ 指功率 MOSFET 流过一定量的漏极电流时的最小栅源电压。当栅源电压等于阈值电压 $U_{GS(th)}$ 时，MOSFET 开始导通。

5) 通态电阻 R_{on} 。通态电阻 R_{on} 是指在确定的栅源电压 U_{GS} 下，MOSFET 处于恒流区时的直流电阻，决定 MOSFET 导通损耗。

6) 跨导 g_m 。 $g_m = \Delta I_D / \Delta U_{GS}$ 反映转移特性的斜率，表征功率 MOSFET 的放大性能。

7) 开关时间。它包括导通时间 t_{on} 和关断时间 t_{off} 。导通时间 t_{on} 包含导通延迟时间 t_d 和上升时间 t_r 。关断时间 t_{off} 包含关断延迟时间 t_d 和下降时间 t_f 。

8) 极间电容。功率 MOSFET 的极间电容是影响开关速度的主要因素，它们分别是栅极源极间电容 C_{GS} 、栅极漏极间电容 C_{GD} 、漏极源极间电容 C_{DS} 。

3. 功率场效应晶体管 MOSFET 应用特点

(1) 安全工作区。MOSFET 没有二次击穿现象，具有非常宽的安全工作区，如图 1-14 所示的由 MTM565 (550V, 4A) 的最大漏源电压、最大漏极电流、漏源通态电阻线和最大功耗限制线四条边界所包围的区域，分别对应直流 DC、脉宽 10ms、脉宽 1ms、脉宽 10μs，脉冲越窄，安全工作区越宽。

(2) 自动并联均流。MOSFET 通态电阻 R_{on} 有正温度系数特征，即漏源电流 I_D 有负温度系数特性，具有自动均匀温度分布的能力，MOSFET 可简单地直接并联，以增加其电流量。

(3) 静电破坏与防护。MOSFET 是电场控制器件，易于驱动，栅源击穿电压 U_{GSM} 低，极易使栅极 MOS 绝缘层击穿损坏。在运输过程中存放在防静电包装袋里，焊接时电烙铁必须断电，工作人员及工作台必须良好接地，电路设计时，必须串联栅极电阻、降低栅源电阻

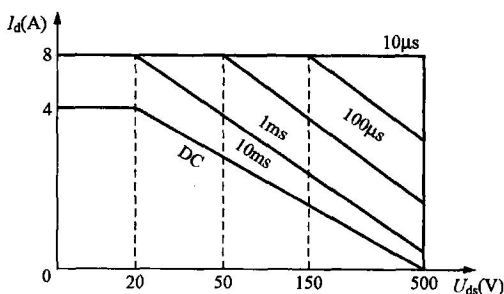


图 1-14 MOSFET 器件 (MTM565) 安全工作区

和过电压钳位保护，以防止栅极绝缘层击穿损坏器件。

三、绝缘栅双极晶体管 IGBT 的原理和特性

绝缘栅双极型晶体管 IGBT 是一种新型的复合型器件，综合了 MOSFET 和 GTR 的优点，具有 MOSFET 的栅极驱动特性和 GTR 的工作电压高、电流大、饱和压降低特性，是当代颇受欢迎的电力电子器件。绝缘栅双极晶体管 IGBT 已广泛应用于电动机变频调 VVVF 控制、程控交换机电源、计算机系统不停电电源 UPS、电力系统高频开关模块充电装置等。

1. 绝缘栅双极型晶体管 IGBT 基本结构和原理

绝缘栅双极型晶体管 IGBT 是在功率 MOSFET 与双极型晶体管 GTR 复合上发展起来，其基本结构如图 1-15 所示，它是由栅极 G、发射极 E、集电极 C 组成的三端双口电压控制器件，N 沟道 IGBT 简化等效电路及电路符号如图 1-16 所示。

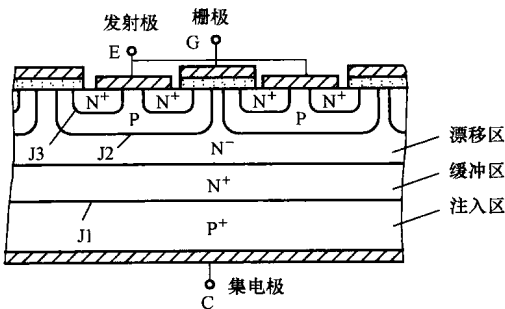


图 1-15 绝缘栅双极型晶体管 IGBT 基本结构

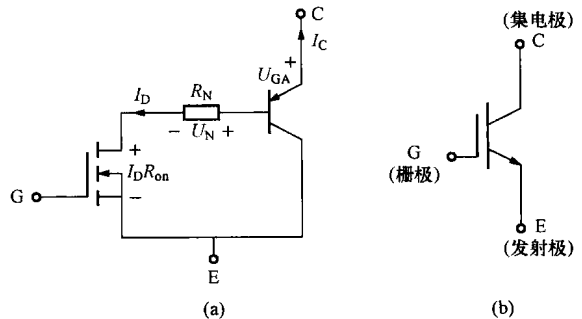


图 1-16 N 沟道 IGBT 简化等效电路及电路符号

(a) IGBT 简化等效电路；(b) IGBT 的电路符号

简单来说，IGBT 等效成一个由 MOSFET 驱动的厚基区 PNP 晶体管，图 1-16N 沟道 IGBT 简化等效电路中 R_N 为 PNP 管基区内的调制电阻，由 N 沟道 MOSFET 和 PNP 晶体管复合而成，开通和关断由栅极和发射极之间驱动电压 U_{GE} 决定。当栅极和发射极之间驱动电压 U_{GE} 为正且大于栅极开启电压 $U_{GE(th)}$ 时，MOSFET 内形成沟道并为 PNP 晶体管提供基极电流进而使 IGBT 导通。此时，从 P+ 区注入 N- 的空穴对（少数载流子）对 N- 区进行电导调制，减少 N- 区的电阻 R_N ，使高耐压的 IGBT 也具有很小的通态压降。当栅射极间不加信号或加反向电压时，MOSFET 内的沟道消失，PNP 晶体管的基极电流被切断，IGBT 即关断。

2. 绝缘栅双极型晶体管 IGBT 特性和参数

IGBT 基本特性包括静态特性和动态特性，其中静态特性由输出特性和转移特性组成，动态特性描述 IGBT 器件开关过程。

(1) 基本特性。

1) 输出特性 I_C-U_{CE} 。输出特性如图 1-17 所示，反映集电极电流 I_C 与集电极—发射极之间电压 U_{CE} 的关系，参变量为栅极和发射极之间驱动电压 U_{GE} ，由饱和区、放大区、截止区组成。

2) 转移特性 I_C-U_{CE} 。转移特性如图 1-18 所示，反映集电极电流 I_C 与栅极—发射极之间驱动电压 U_{GE} 的关系。

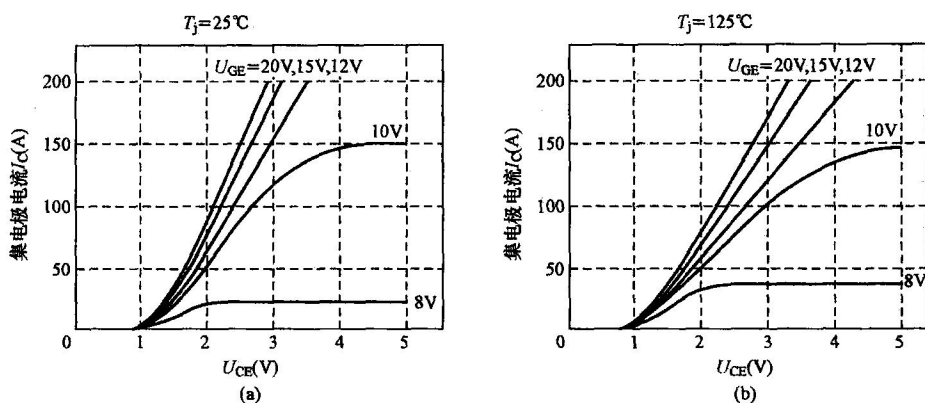


图 1-17 IGBT 输出特性

(a) $T_j=25^\circ\text{C}$ 时 IGBT 输出特性; (b) $T_j=125^\circ\text{C}$ 时 IGBT 输出特性

3) 动态特性。动态特性即开关特性,如图 1-19 所示,反映 IGBT 器件开关过程及开关时间参数,包括开通过程、导通、关断过程、截止四种状态,其中 U_{GE} 是栅射极驱动电压, U_{CE} 是集射极电压, I_C 是集电极电流, t_{on} 是导通时间, t_{off} 是关断时间。导通时间 t_{on} 包含导通延迟时间 t_d 和上升时间 t_r 。关断时间 t_{off} 包含关断延迟时间 t_d 和下降时间 t_f 。

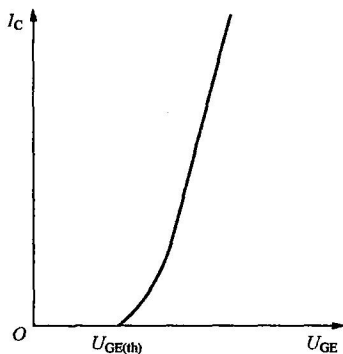


图 1-18 IGBT 转移特性

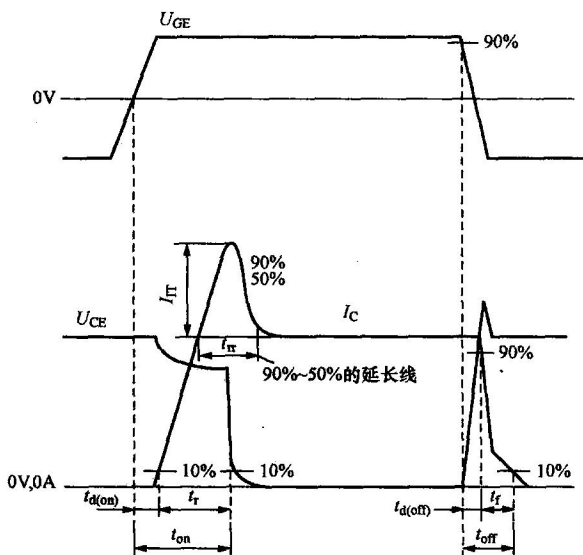


图 1-19 IGBT 器件开关特性

(2) 主要参数。

1) 最大集电极电流 I_{CM} 。表征 IGBT 的电流容量,分为直流条件下的 I_C 和 1ms 脉冲条件下的 I_{CP} 。

2) 集电极—发射极最高电压 U_{CES} 。表征 IGBT 集电极—发射极的耐压能力。目前 IGBT 耐压等级有 600、1000、1200、1400、1700、3300V。

3) 栅极—发射极击穿电压 U_{GEM} 。表征 IGBT 栅极—发射极之间能承受的最高电压,其值一般为 $\pm 20\text{V}$ 。

4) 栅极—发射极开启电压 $U_{GE(th)}$ 。指 IGBT 器件在一定的集电极—发射极电压 U_{CE} 下,流过一定的集电极电流 I_C 时的最小开栅电压。当栅源电压等于开启电压 $U_{GE(th)}$ 时,IGBT 开始导通。