

高等学校试用教材

电力电子 自关断器件及电路

西安交通大学 黄俊 秦祖荫 编

机械工业出版社

TN342

H81

250650

高等学校试用教材

电力电子自关断器件及电路

西安交通大学 黄 俊 秦祖荫 编



机械工业出版社

本书主要包括电力电子自关断器件：电力晶体管、可关断晶闸管和电力场效应晶体管及其应用电路。全书共分6章。第一章为电力晶体管(GTR)，第二章为电力晶体管电路，第三章为门极可控制关断晶体管(GTO)，第四章为GTO的应用，第五章为MOSFET电力场效应管，第六章为电力场效应管的应用。全书论述清楚，层次分明，适合教学。

本书可作为高校电气自动化专业教材，也可供有关工程技术人员参考。

电力电子自关断器件及电路

西安交通大学 黄俊 秦祖南 编

*

责任编辑：李卫东 版式设计：王颖

封面设计：郭景云 责任校对：熊大荣

责任印制：王国光

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16·印张 8 5/4·字数 209 千字

1991年10月北京第一版·1991年10月北京第一次印刷

印数 0,001—3,200·定价：2.75 元

*

ISBN 7-111-02848-1/TP·144 (课)

前 言

本书是根据工业电气自动化专业教学指导委员会1987年和1988年两次全体会议的决定编写的。主要介绍全控型电力半导体自关断器件及其应用电路。近年来,由于电力电子技术突飞猛进的发展,专业基础课《半导体变流技术》的内容已难以满足发展的需要,而本书所述实质上便是半导体变流技术的继续,是工业电气自动化专业必须掌握的知识。本书除可作为高等院校工业电气自动化专业教材外,也可供其他有关专业师生及工程技术人员参考。

本书由西安交通大学电气工程系黄俊教授和秦祖荫副教授编写。概述、第一章和第二章由黄俊教授编写,第三、四、五、六章由秦祖荫副教授编写。

本书由工业电气自动化专业教学指导委员会组织评选、审查通过,由陕西机械学院万伯任教授主审,在审阅中提出了许多宝贵的意见,在此谨致衷心的感谢。

在编写本书的过程中,对书后所列参考文献作了少量借鉴。在本书出版之际,对参考文献的作者及提供资料的有关单位,如西安电力电子技术研究所,在此一并表示感谢。

由于学识有限,缺点和错误之处在所难免,欢迎指正。

编者

1990.4

目 录

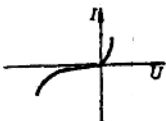
概述	1	§ 3-17 间接驱动开通和关断的电路	93
第一章 电力晶体管 (GTR)	6	§ 3-18 直接驱动开通和关断的电路	100
§ 1-1 电力电子学的基本概念	6	习题及思考题	102
§ 1-2 电力晶体管器件及其特性	11	第四章 可关断晶闸管的应用	103
习题及思考题	25	§ 4-1 GTO 逆变器	103
第二章 电力晶体管电路	28	§ 4-2 GTO 功率控制器	105
§ 2-1 晶体管开关调节器	29	§ 4-3 GTO 整流器	107
§ 2-2 晶体管逆变器	35	习题及思考题	110
§ 2-3 脉宽调制 (PWM) 型晶体管 逆变器	39	第五章 电力场效应管 (MOSFET)	111
习题及思考题	54	§ 5-1 MOSFET 的基本工作原理	111
第三章 可关断晶闸管 (GTO)	58	§ 5-2 电力场效应管的实际结构	113
§ 3-1 GTO 的结构	58	§ 5-3 多元集成结构对器件性能的改善	114
§ 3-2 GTO 元的开通机理	59	§ 5-4 电力场效应管的开关特性	114
§ 3-3 GTO 的开通过程	60	§ 5-5 MOSFET 的温度稳定性	116
§ 3-4 多元集成结构对 GTO 开通的影响	60	§ 5-6 P 沟道 MOSFET	116
§ 3-5 GTO 的关断	62	§ 5-7 MOSFET 的主要参数	116
§ 3-6 GTO 的开关损耗	65	§ 5-8 电力场效应管的使用和保护	119
§ 3-7 GTO 的主要参数	66	§ 5-9 电力场效应管的安全工作区	121
§ 3-8 GTO 的吸收电路	63	§ 5-10 电力场效应管的栅极驱动特性	121
§ 3-9 无阻尼型吸收电路参数计算	71	§ 5-11 电力场效应管的栅极驱动电路	124
§ 3-10 阻尼型吸收电路参数计算	74	习题及思考题	126
§ 3-11 逆变器中的改进型吸收电路	78	第六章 电力场效应管的应用	127
§ 3-12 吸收电路的安装工艺	80	§ 6-1 电力场效应管开关稳压电源	127
§ 3-13 GTO 的无吸收电路工作探索	81	§ 6-2 电力场效应管脉冲功率放大器	130
§ 3-14 GTO 的门极驱动特性	82	§ 6-3 电力场效应管逆变器	131
§ 3-15 GTO 的门极驱动电路概述	85	§ 6-4 电力场效应管高频感应加热电源	131
§ 3-16 直接驱动开通、间接驱动关断电路	86	§ 6-5 电力场效应管高频自激振荡电源	132
		参考文献	133

概 述

电力电子学包括电力电子器件、电力电子电路和电力电子装置及其控制系统，核心是变流器。本书在《半导体变流技术》基础上着重阐述自关断器件及其电路，以此获得高性能的变流器。众所周知，50年代末出现的晶闸管，由于不能自关断，属半控型。晶闸管为设置电力电子学科立下汗马功劳，可算作第一代电力电子器件，至今仍广泛用于各种变流器中。

随着交流技术的发展，由于能源危机给节约电能造成的强大压力，交流电动机变频调速技术蓬勃发展起来，日益迫切需要可控制关断的即自关断的电力电子器件—全控式器件，因此相继出现了电力晶体管(GTR)、可关断晶闸管(GTO)、电力场效应晶体管(MOSFET)等，这可称为第二代电力电子器件。目前我国生产和研制的电力半导体器件的名称、特性、型号及用途示于表0-1中。与之相适应，变流器的主要特点及用途，涉及单台设备容量示于表0-2中，从中可见一般的水平。

表0-1 电力半导体器件的名称、特性、型号及用途

类别	名 称	IEC 名称	特 征	型号	用 途	伏 安 特 性
整 流 管 类	整流管 (SR)	Semiconductor rectifier diode	正向导通反向 阻断	ZP	各种直流电源、整 流器	
	快速整流管 (D) (SR)	Fast recovery rectifier diode	反向恢复时间 短	ZK	高频电源、斩波器、 逆变器	
	肖特基势垒二极管 (SBD)	Schottky barr- ier diode	正向电压低		计算机电源、仪表 电源、高频开关电源	
晶 体 管 类	电力晶体管 (BTR) (GTR)	Power transis- tor	基极电流关断		中小功率逆变器电 源和电动机控制	
	结型场效应晶体管 (FET)(SIT)	Field transis- tor state induct- ion transistor	电压关断		高频开关电源、超 高频功率放大器、超 声波发生器、电子继 电器	
	电力MOS场效应晶 体管(电力MOSFET)	Power MOSFET	电压关断			
晶 闸 管 类	普通晶闸管 (Th)(SCR)	Reverse bloc- king triode thy- ristor	反向阻断，正 向门极信号开通	KP	整流器、逆变器、 变频器	
	快速晶闸管 (FST)	Fast switching thyristor	关断时间短、 开通速度快	KK	中频电源、超声波 电源	
	双向晶闸管 (Triac)	Bidirectional triode thyristor	双方向均可由 门极信号开通	KS	电子开关、调光器、 调压器	

(续)

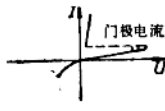
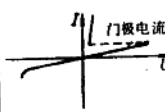
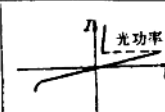
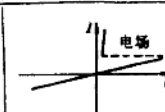
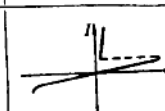
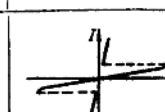
类别	名称	IEC名称	特征	型号	用途	伏安特性
晶 闸 管	逆导晶闸管 (RCT)	Reverse conducting triode thyristor	正向门极信号开通, 反向导电	KN	逆变器、斩波器	
	非对称晶闸管 ASCR	Asymmetry thyristor	正向门极信号开通, 反向只承受低电压		逆变器、斩波器	
	可关断晶闸管 (GTO)	Turn-off (triode) thyristor	门极正信号开通, 负信号关断	KG	逆变器、斩波器、直流开关、汽车点火系统	
	光控晶闸管 (LATT)	Light activated triode thyristor	光信号触发开通	KL	高压直流输电、无功补偿高压开关	
	场控晶闸管 (FCT) (SITH)	Field controlled thyristor	电场控制开通与关断		高频振荡器、交直流电源	
	肖克莱二极管 (PnPa开关)	Reverse blocking diode thyristor	正向转折开通		雷达测制器、激光脉冲器	
类	硅对称开关 (SSS)	Bidirectional diode thyristor	双方向转折开通		调光器、控温器	

表0-2 变流器的主要特点及用途

用途类别	主要用途	性能特点	单台设备容量
电 化 学	铝镁等有色金属电解, 食盐、水等化工电解, 石墨化电炉加热	容量大、负载平稳、有较高的效率和功率因数	直流 36~1000 V 800~75000 A
直流牵引	矿山牵引、城市无轨电车、地下铁道等变电站	负载变化大, 一般采用整流管整流设备	直流 275~1650 V 100~2250 A
	干线电力机车	大功率单相整流	直流 2000~6000 kW

(续)

用途类别		主要用途	性能特点	单台设备容量
直流传动	不可逆	造纸、印染等轻工业传动	负载较平稳,有一定的稳速要求	直流 0.5~500kW
	可逆	可逆轧机、连轧机、卷扬机、龙门刨等	负载急剧变化,要求频繁反向和快速制动,一般用双变流器供电	直流 5~5000kW
交流传动	串级调速	风机、水泵、卷扬机、起重机、球磨机及传送带等调速	用电网换相逆变器将电动机转差功率反馈到电网,能无级调速、效率较高。当调速比要求降低时,装置容量随之减小	交流 100~8000kW
	变频调速	可逆与不可逆调速装置、快速及超高速调速系统、同步调速、高精度调速及稳速系统	由自换相或强迫换相逆变器或周波变换器供电	交流 0.5~1500kW
电机励磁		同步电动机的直流励磁	能自动投励、强励及调节功率因数	直流 50~600V 200~600A
		大型发电机、小型水力和柴油发电机的直流励磁	强励时短期过载倍数较高,大型发电机励磁装置的可靠性要好	直流 1000V、1800A 100~200MW发电机励磁
电镀及电加工		电镀电源	电压低、电流大、有防腐要求	直流 6~24V 50~5000A
		电解加工电源	有稳压稳流要求	直流 12~24V 500~10000A
电磁合闸		电动操作机构电源、电磁吊车的电磁铁吸盘供电	短时冲击性负载	直流 110V、220V 100~300A
充电	主充电	蓄电池充电	负载为反电动势性质,较平稳	直流 18~360V 15~300A
	浮充电		对输出直流电压的纹波有限制	直流 36~330V 15~400A
	快速充电	铲车、电瓶车、火车的蓄电池充电	充电时间小于1h,能逆变	直流 220V, 2000A
	充放电	电厂、电站的蓄电池充电	能主充、稳压浮充、稳压放电	直流 165~360V 30~70A
中频感应加热		金属熔炼、热处理、热加工、焊接等加热电源	能自动调整频率适应负载变化的要求	交流 400~8000Hz 25~2000kW
交流不间断电源		通讯、计算机、照明交流备用电源	反应快,能无间断地投入运行	交流 1~1000kW
稳定电源		稳压、稳流、稳频电源	在干扰情况下能稳定输出	直流 500kV·A, 稳定度 10 ⁻⁴ ~10 ⁻⁶

(续)

用途类别	主要用途	性能特点	单台设备容量
电子开关	无触点开关	交流电动机频繁操作、功率因数补偿电容器组的自动切换、电焊机、电炉等控制开关	能适应每分钟数十次开关的要求, 过载能力较高, 用通断比调节负载功率
	直流斩波器	矿山、地铁的直流机车, 以蓄电池为动力的电动车辆调速	无级调速(调压)、加速平稳、效率和功率因数高
高压静电除尘	静电除尘、原油脱水、静电喷漆	电压高、电流小、限制短路电流	交流 380 V 100~600 A 直流 110~1650 V 40~400 kW
直流输电	远距离超高压输电变电站	两体工作电压高、必需器件串联	直流 40~80 kV 100~1000 mA
无功补偿	电弧炉、轧机、电力系统	电压高、可连续调节、响应快	直流 100~1000 kV 10~1000 MW
			交流 13.8 kV 以上 40 Mvar

新型全控型开关器件的迅速发展, 提高了变频器的功能指标。快速晶闸管的出现, 为交流变频调速提供了物质基础, 而新型全控型开关器件的不断推出和完善, 则出现了新一代的变频器, 为提高交流调速的性能和功能指标、缩小体积、降低造价、提高竞争能力提供了有利的条件。

以晶闸管强迫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。当前新型全控型开关器件的发展方兴未艾, 在日本, 这类器件组成的变频器已覆盖了整个的大、中、小容量范围, 在西欧、美国也是日新月异。

采用全控型开关器件的变频器, 与半控型的相比, 体积可缩小30%以上, 相应地降低了换流损耗, 提高了装置效率。同时由于开关频率的提高, 变流器可采用脉宽调制(PWM)型的控制, 既降低谐波损耗及转矩脉动, 又提高了快速性, 还改善了功率因数。目前, 国外中、小容量的变频装置已大部分采用由新型器件构成的 PWM 控制。

总的说来, 由于电流、电压定额和开关时间的不同, 根据技术经济指标的分析, 每种器件各有其应用范围, 图0-1表示了由各种器件构成的PWM变频装置容量与开关频率的相对关系。随着各种器件制造技术的改进, 它们的定额正不断提高, 开关时间正逐步缩短, 因而全控型器件的应用范围日益扩大。70年代几乎是晶闸管一统天下的时代, 到80年代, 据日本统计, GTR 主要占领其中小功率范围, 中大功率范围则以 GTO 为主, 普通晶闸管只在较大容量装置中使用。这种三分天下的形势是在最近十几年中逐步形成的。

新型器件的发展情况各国不太一样, 也有不同看法。例如 GTO 器件, 日本发展最快,

西欧次之。由于其比较娇嫩, 触发功率大, $\frac{du}{dt}$ 较低, 在开通瞬间或是外部短路引起较大浪

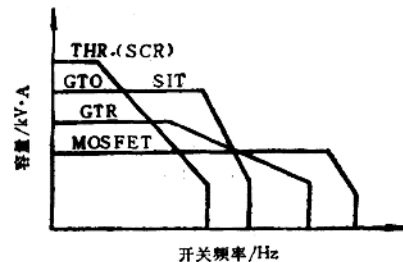


图0-1 不同器件变频装置容量与开关频率关系

涌电流时,可能会关断而损坏器件,因此各国对此贬褒不一,但目前其占领中、大功率领域这一事实是不容置疑的,现在也没有新的器件来与之抗衡。

各种器件有它的优点,也有它的缺点。例如:双极型达林顿晶体管是很好的开关器件,但它的二次击穿现象曾经困扰着人们很长一段时间。现在已经可以根据不同的器件特性设计出合适的保护电路和驱动电路,从而大大提高其工作可靠性。但问题终究比较复杂,不是所有用户都能很快掌握的。GTO和GTR不同于晶闸管,因此在使用中不能根据老的概念而沿用老的办法,其关键问题还有驱动回路。对GTO而言,还包括关断回路、吸收回路和保护回路的设计,而掌握这些方法的前提是要充分了解器件的特性。这方面,我国尚存在很大差距。

70年代后期开发出来的电力场效应管(MOSFET)近年来发展很快,很重要的原因就是它基本上没有二次击穿现象、容易保护、极易并联。此外,它属于电压控制,输入阻抗极大。然而,它的导通压降较大,限制了其电压、电流定额的提高。

新型开关器件花样繁多,所以现在各国正设法扬长避短,构思新的复合器件。为了在GTR和MOSFET之间取其长、避其短,出现了绝缘门极晶体管IGT(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的低导通压降两方面的优点,已能做到1000V/50A或600V/100A。不过,GTR相对低的开关速度和二次击穿现象仍然存在,要解决这些问题,需要用另外一些结构方案。与此相仿,还有用MOSFET驱动GTO的MCT(Mos-Controlled Thyristor),其容量可以做得更大一些。近年来,这一类复合型电力电子器件犹如雨后春笋相继出现,构成了所谓第三代电力电子器件。在器件复合化发展的同时,还值得一提的是器件的模块化,把许多零散拼装的器件组合在一起大规模生产,构成变流器的双臂、半桥、乃至全桥,不仅降低了装置的尺寸和成本,而且大大方便了用户。

在模块化和复合化思路的基础上,很自然的发展便是功率集成电路PIC(Power Integrated Circuit)。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。属于上述的一种产品,取名叫《Smart》功率装置。这可以算作第四代电力电子器件了。如果把分立元件发展到小信号集成电路看成是一次电子革命的话,那末,PIC的诞生便可称为第二次电子革命。它将为拖动控制系统的机电一体化开辟广阔的前景。PIC的主要技术障碍是高低压电路之间的绝缘问题以及温升和散热的有效处理问题。

从上述发展过程中可以明显地看出,电力电子器件的发展是整个拖动控制系统乃至过程控制系统发展的先锋,在这短短的10余年内,变化很大。目前我国对电力电子技术给予很大的重视,这将使我国的微电子和电力电子生产技术更好地结合,为我国尽快地跨入高水平的电力电子产品创造了很好的条件。我国电力电子事业的大踏步前进将是指日可待的。

第一章 电力晶体管(GTR)

电力电子器件主要作开关运行,因此涉及换流等一些共性的问题,电力晶体管当然也不例外,现就电力电子学的基本概念作一介绍。

§ 1-1 电力电子学的基本概念

一、开关运行

当电力半导体器件用于大功率场合时,它常作开关运行。极少数属例外,用作线性放大器以及串联和并联的晶体管功率调节器。当半导体器件用作开关时,它能控制大功率的负载,然而半导体器件上的损耗却很小。例如一个理想开关,接通时管压降为零,切断时漏电流为零,开关时间也为零,而且不管接通电流与切断电压为多少,开关上的损耗总是零,因而无开关损耗。实际上,由于器件受功耗的限制,接通的管压降也限制了接通电流,故所有电力半导体器件都有切断受压的额定值限制,尤其当用作高频开关时,由于器件一定的开关时间能产生较大的瞬时功耗,所以必须考虑额定值。

图 1-1 所示为简单的晶体管电路,当晶体管切断时,其集-发极间的电压假定为 U_E ,实际上其值比电源电压稍低,这是由于漏电流压降的缘故。当晶体管接通时,设其集电极电流为 I ,假定在开关阶段,集-发极间电压 $u(t)$ 与集电极电流 $i(t)$ 呈线性变化着,虽然实际情况并非绝对如此,然而这个假定是合理的,它能明确地表示重要的开关特性。

在开关阶段,其瞬时功耗可表示如下:

$$P_T = u(t)i(t) = \left[\frac{U_E(T_{on} - t)}{T_{on}} \right] \left[I \frac{t}{T_{on}} \right] \\ = \frac{U_E I}{(T_{on})^2} (T_{on} - t) t \quad (1-1)$$

在 $u(t)$ 与 $i(t)$ 表示式中,开关阶段之初,当 $t = 0$,饱和压降与集电极漏电流都忽略为零。

开关阶段的平均功耗是很重要的,它决定在给定时内容许最大的开关频率次数,在 T_{on} 开关期间的平均功耗为

$$P_{T,av} = \frac{1}{T_{on}} \int_0^{T_{on}} u(t)i(t) dt \quad (1-2)$$

将式(1-2)与式(1-1)联立后求解,得

$$P_{T,av} = \frac{U_E I}{(T_{on})^3} \int_0^{T_{on}} (T_{on} - t) t dt = \frac{U_E I}{(T_{on})^3} \left[\frac{T_{on}^3}{2} - \frac{T_{on}^3}{3} \right] = \frac{U_E I}{6} \quad (1-3)$$

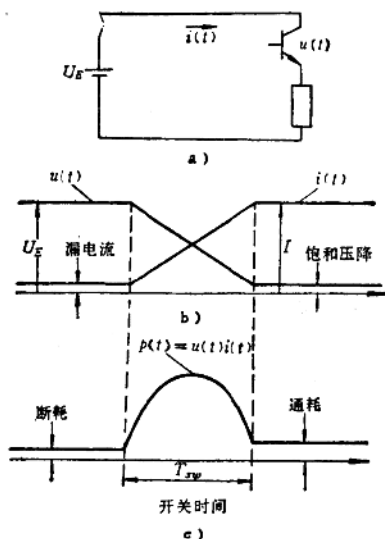


图1-1 晶体管开关

总的功耗应是通态、断态与开关时期功耗之和。例如, 半导体开关周期为 T , 线性的开关时间为 T_{on} , 其通态与断态时间各为 T_{on} 与 T_{off} , 则器件总的平均功耗约 P_T

$$P_T \approx \frac{2(U_E I / 6) T_{on} + U_{ce(sat)} \cdot I \cdot T_{on} + U_E I_{leak} \cdot T_{off}}{T} \quad (1-4)$$

式中, $U_{ce(sat)}$ 及 I_{leak} 分别为饱和压降和漏电流。如果假设其值很小, 则开关损耗成为主流。实际上, $U_{ce(sat)}$ 不能认为足够小, 通态损耗不能忽略。

二、换流

多相整流电路的半导体器件(例如晶闸管)在运行时, 其能量在器件上按相序单方向地传递。换流总是在几个器件间循环进行着, 其特征为:

1) 一个器件的正向电流应从满载减小至零。

2) 器件上的正向电压要等电流减至零后延时加上, 其延时应持续到它恢复阻断的能力以后。

3) 负载电流由相数决定的通道轮流导通构成, 对大多数电力电子装置, 其换流过程应做到合理。

当采用晶体管或可关断晶闸管作为开关器件时, 其换流过程比采用晶闸管时要简单得多。理想的晶体管, 只要去掉它基极的驱动信号或给以负电压, 其集电极电流即停止流动。因此只要符合上述条件, 晶体管就能立即恢复阻断。至于可关断晶闸管, 只需在门极加上适当的负电流, 在约 $10\mu s$ 后即可使它关断。然而, 当在感性负载时, 用晶体管或可关断晶闸管在开关过程中需具有交换能量的电回路是十分重要的。

三、器件的重要特性

当器件用在大功率变流装置中时, 其最重要的特性是通态电压降、通态电流维持的能力、阻断电压、开关速度、恢复阻断的速度、功耗限制以及功率增益。至于特殊的电力半导体器件, 还需具有附加的特性参数。在给定应用的场合, 器件的数量由装置的电流、电压以及功耗定额等来决定。器件的通态压降大, 装置的功耗就大, 它是通态电流维持限制能力的基本因素。如果开关速度较低, 运行在高频时必须考虑其平均功耗, 开关速度同样受恢复阻断能力速度的限制。最后, 开关装置的功率增益受驱动的需要、装置体积的大小、费用以及电力电子成套控制装置等因素来决定。

四、电抗器与电容器的稳态情况

当分析电力电子电路时, 有两个重要的稳态原理是很有用的, 其一是在一周期内, 电抗器两端的平均电压在稳态情况下为零。

电抗器 L 两端的电压是 $u_L(t)$, 流过的电流是 $i_L(t)$ 。因

$$i_L(t) = \frac{1}{L} \int u_L(t) dt$$

或者

$$i_L(t_0 + T) - i_L(t_0) = \frac{1}{L} \int_{t_0}^{t_0 + T} u_L dt$$

按定义, 稳态情况下 $i_L(t_0 + T)$ 必等于 $i_L(t_0)$, 因此

$$\frac{1}{L} \int_{t_0}^{t_0 + T} u_L(t) dt = 0 \quad (1-5)$$

两端各乘常数 L/T , 左端即表示在一周期 T 内的平均电压为零。

第二个重要的稳态原理是：在一周期中，流过电容器的平均电流为零。可同样证明如下：

$$\text{因} \quad u_c(t) = \frac{1}{C} \int i_c(t) dt$$

$$\text{或} \quad u_c(t_0 + T) - u_c(t_0) = \frac{1}{C} \int_{t_0}^{t_0+T} i_c(t) dt$$

稳态时 $u_c(t_0 + T)$ 必须等于 $u_c(t_0)$ ，因此

$$\frac{1}{C} \int_{t_0}^{t_0+T} i_c(t) dt = 0 \quad (1-6)$$

两端各乘常数 C/T ，左端即表示在一周期中流过电容器的平均电流为零。

例1-1：开关电路示于图1-2， $U_E = 200\text{ V}$ ， $R = 10\ \Omega$ ，开关周期性地通断，通 $10\ \mu\text{s}$ ，断 $40\ \mu\text{s}$ ， L 的电感量极大致使开关通、断时 $i_L = 0$ ，求稳态时流过 R 与 L 的电流

解：开关接通时，二极管上电压为 U_E ，开关切断时 L 上的电流不能突变，经二极管续流，其电流衰减程度视 U_E 、 R 、 L 和 C 以及

开关周期 T 而定。占空比 d 按定义 $d \approx \frac{t_{on}}{T}$ ，电压 u_o 的平均值 U_o 为：

$$U_o = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u_o(t) dt = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} U_E dt = \frac{t_{on}}{T} U_E$$

$$\frac{U_o}{V} = \frac{10}{40+10} \times 200 = 40$$

稳态时，电感上的平均电压必为零，因此 U_o 的平均值即加在电阻上，因此 R 上的电流为：

$$I_R = \frac{U_R}{R} = \frac{U_o}{R}$$

$$\frac{I_R}{A} = \frac{40}{10} = 4$$

稳态时，电容器上流过的平均电流为零，因此 L 上的电流等于 R 上的电流。

$$\frac{I_L}{A} = 4$$

欲知电路中电流与电压随时间变化的函数关系式，需知 L 与 C 的数值。 i_L 和 u_R 不只是简单的时间指数函数，它应是在电路通断阶段求解二阶微分方程得出的解答。

例1-2：在图1-2电路中， $U_E = 200\text{ V}$ ， $R = 10\ \Omega$ ， $t_{on} = 10\ \mu\text{s}$ ， $d = 0.2$ ，设电容量 C 特大，致使 u_R 上的纹波可忽略， $L = 400\ \mu\text{H}$ ，试决定稳态时 i_o 、 i_L 和 i_C 的波形。

解：因 U_E 及 d 之值与上例相同，故 $U_o = 40\text{ V}$ ， $I_R = 4\text{ A}$ ，由于 C 很大， U_R 是个恒值（见图1-3a）。通过 L 电流之斜率由 $u = L \frac{di}{dt}$ 决定。

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{u_o - u_R}{L}$$

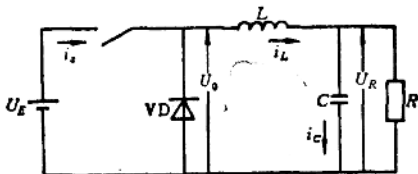


图1-2 例1-1电路

$$\frac{di_L}{dt} (\text{通态}) = \frac{U_E - U_R}{L} = \frac{200 - 40}{400} \text{ A}/\mu\text{s} = 0.4 \text{ A}/\mu\text{s}$$

$$\frac{di_L}{dt} (\text{断态}) = \frac{0 - 40}{400} \text{ A}/\mu\text{s} = -0.1 \text{ A}/\mu\text{s}$$

因这二个三角形的电流波形具有同样的高度, i_L 的平均值在通态段与断态段是相同的, 电感电流的平均值必须等于电阻电流平均值, 电容电流的平均值必需等于零。图1-3 b 示出了稳态电流波形。

有效且简捷地校验可这样进行, 从电源摄取的功率应等于电阻上消耗的功率。

$$P_s = U_E I_s$$

$$\frac{P_s}{W} = 200 \times \frac{4 \times 10}{10 + 40} = 160$$

$$P_R = \frac{U_R^2}{R}$$

$$\frac{P_R}{W} = \frac{40^2}{10} = 160$$

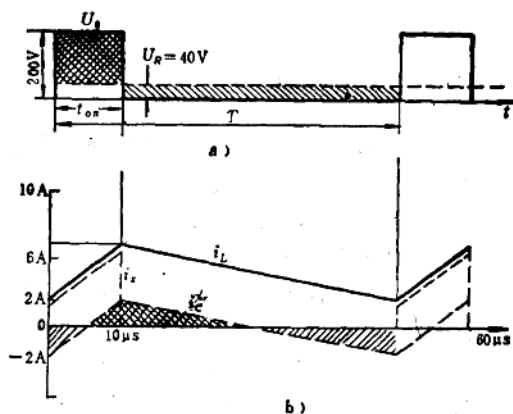


图1-3 例1-2的波形

a) 电压波形 (面积相等) b) 电流波形 (面积相等)

需要注意: 在上述情况下, 电阻 R 上的电压平均值和有效值是相同的, 均为 40 V。至于在通常情况下, R 上的电压含有纹波, 需要求出 R 上电压的有效值, 才能求出电阻上的功率。

五、谐波分析

绝大多数电力电子电路, 其电压和电流波形是非正弦型, 因而谐波分析在电力电子工程中显得十分有用。

周期性的波形可用傅氏级数表示。

$$\begin{aligned} f(\omega t) &= A_0 + a_1 \sin \omega t + a_2 \sin 2\omega t + a_3 \sin 3\omega t + \dots + b_1 \cos \omega t + b_2 \cos 2\omega t \\ &\quad + b_3 \cos 3\omega t + \dots \\ &= A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \sin n\omega t + b_n \cos n\omega t) \end{aligned} \quad (1-7)$$

式中, $\omega_1 = \frac{2\pi}{T}$ 是周期为 T 的基频角速度, n 为正整数, a_n 与 b_n 是正弦项与余弦项的幅值。

傅氏级数中, 其系数可由下式求出

$$A_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) d(\omega t) \quad \text{是常数项或直流分量}$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \sin n\omega t d(\omega t)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cos n\omega t d(\omega t)$$

其中, 如奇函数对称, $f(\omega t) = -f(-\omega t)$ 级数中只包括正弦项, 如偶函数对称, $f(\omega t) =$

$f(-\omega t)$ 级数中只包括余弦项, 如半波对称, $f(\omega t) = -f(\omega t + \pi)$ 级数中只包括奇谐波项。

六、电力半导体器件的电气额定值

电力半导体器件的特性与额定值主要与电气性能和热性能有关, 所有电力半导体器件的热性能和冷却设计都是类似的。由于制造厂都用假设的结描述半导体器件的发热, 故可用统一的散热算法。这种假设的结可看成各种损耗的根源, 这些损耗包括通态损耗、断态损耗、开通损耗与关断损耗等。

不仅所有半导体器件的功率损耗是类似的, 而且各种器件的最大额定值也有类似之处。

所谓器件的最大额定值是指最大容许极限电流、最大电压和最大功率损耗。这些最大额定值很重要。欲使器件寿命长、可靠性高, 就不能让器件任一项参数的实际值超过极限值。在不利的运行条件下, 某一时刻器件通常只有一项参数达到最大额定值。

额定值的大小主要取决于器件所用的材料、结构、设计、安装和使用方式。在器件的物理性质中, 电气特性和温度密切相关。因而由电气特性变化而制定的最大额定值实际上是由热特性的变化引起的。由于这些性质密切相关, 不能认为不同的额定值是独立的。另外, 额定值在很大程度上也依赖于器件外部的电路条件。

与热击穿相比, 器件特性间的依赖关系和外电路的影响都属次要的, 所以应该避免热击穿。具有双极结的所有器件都可能发生热击穿, 例如二极管、晶闸管、MOS场效应管的寄生二极管等, 它们的反向恢复电流要提高结温, 反向恢复电荷随温度而增加, 因而增加了结功率损耗, 进一步提高了结温。温度和恢复电荷这种循环增加将引起热击穿, 最终导致器件损坏。在双极型晶体管中也会发生类似的热击穿。这时, 集电极电流引起温度的增加, 温度增加又提高了双极型晶体管的导电能力, 于是电流更大, 进一步提高了器件的温度。假使外部电路条件允许, 就会发生热击穿, 导致器件最终损坏。

1. 电压额定值

当器件至少在一个结上有反向偏置电压时, 若泄漏电流急剧增加, 表明器件承受的电压已达到绝对电压的极限值。解释器件承受极限电压的最普通的理论就是雪崩理论。因为泄漏电流增加导致温度升高, 所选的重复绝对电压额定值不应引起热击穿。在通常的试验条件下应按环境温度 (25°C) 来规定电压的额定值。

2. 正向电流额定值

规定正向电流额定值通常要考虑如下因素:

- 1) 该电流使结温不超过额定值。
- 2) 该电流不会使内部引线和接触被蒸发。
- 3) 外部连接线, 控制电流的能力。

3. 温度额定值

最大容许结温 T_{jmax} 取决于所用材料的质量、结的类型、由于老化而引起可靠性降低和加速寿命终结等方面的全面权衡。结温越高, 损坏率越高。工作寿命 $L_t(h)$ 与结温 $T_j(K)$ 之间的近似关系为:

$$\lg L_t = A + B/T_j \quad (1-8)$$

式中, A 和 B 为与器件类型有关的常数。

4. 功率额定值

在电力半导体器件中,损耗的功率转化成热能而引起器件温度的上升。限制最大容许损耗 P_{dmax} 的主要参数是最大容许结温和器件的表面温度 T_s , 由于这些参数都与热阻 R_{θ} 相关, 它们之间自然也彼此相关:

$$P_{dmax} = (T_{jmax} - T_c) / R_{\theta j-c} \quad (1-9)$$

从结到表面的有效热阻 $R_{\theta j-c}$ 的物理意义是: 每单位功率损耗引起结温的上升。热阻是对从结向表面散热困难程度的度量。多数最大功率值是按表面温度为 25°C 时规定的, 当表面工作温度增至 T_{jmax} 时, 最大功率值线性地减至零。

§ 1-2 电力晶体管器件及其特性

作为电力半导体器件的电力晶体管, 是为功率放大和电力负载处理大容量功率而设计的。以往, 电力晶体管主要用于低频领域, 但随着电力晶体管在电流容量、耐压和频率等方面的不断发展和提高, 其应用领域也在不断地扩大。

电力晶体管与只有开关作用的晶闸管比较, 它具有线性放大和更高的开关速度。尤其是近年来, 大电流晶体管的电流容量已增大到数百安培, 达到可与晶闸管媲美的程度。这就使电力晶体管在低压领域得到比晶闸管更为广泛的应用。1977年, 美国通用电气公司在它本身技术水平的基础上, 预测在小容量领域内, 高压晶体管和高压 MOS 场效应管将代替晶闸管。因此, 电力晶体管是电力电子学领域不可缺少的器件, 也是电力半导体器件的重要组成部分。

电力晶体管的主要特点是在大的耗散功率或输出功率条件下工作, 因此, 除了要求电力晶体管在大电流下, 保证足够大的放大能力和承受较高的集电极电压外, 还要求饱和压降小、安全工作区宽、开关时间短等, 此外还要求它的热阻小、散热好。

因此, 对电力晶体管来说, 它有 4 个最重要的参数: 击穿电压、电流增益、耗散功率和开关速度。这 4 个参数相互制约, 限制了电力晶体管的设计。因此, 大电流、高电压、高速度和高电流增益、集成化和模块化是电力晶体管的发展方向。

一、电力晶体管的工作原理

在电力开关电路中, 广泛应用双极型硅晶体管。双极型硅晶体管有 PNP 和 NPN 两种结构。电流由两种载流子 (电子和空穴) 的运动形成, 通常称为双极型晶体管。由于高压、大功率电力晶体管常用 NPN 结构, 因此本节着重研究这种结构的器件。当然也有用互补型的 PNP 电力晶体管的。

图 1-4 是一个按共发射极连接的 NPN 晶体管, 图中示出其基极的偏置条件以及双极型 NPN 晶体管的电路符号。

双极型晶体管按共射极接法时, 其内部主要载流子的传输流动如图 1-5 所示。图中, 1 为越过正向偏置发射极注入的空穴; 2 为与电子

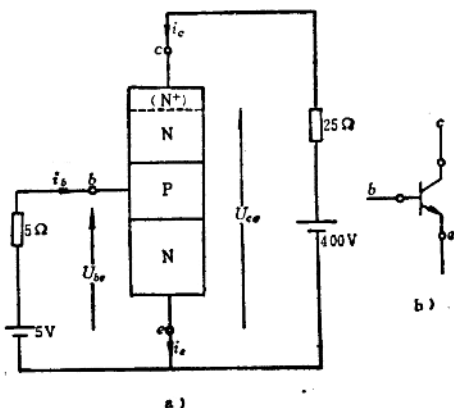


图 1-4 NPN 共发射极晶体管及其电路符号

a) 偏置条件 b) 电路符号

复合而注入的空穴；3为在基极中因复合而失去的电子；4是越过集电结的电子；5为因热骚动产生的载流子构成集电结反向饱和的电流。

集电极和发射极电流之间的关系为：

$$\frac{i_c}{i_e} = \alpha \quad (1-10)$$

系数 α 称为电流传输比，它是共基极接法时的电流放大系数。因为基极电流总是必要的，故 α 总是小于1。但是，若晶体管具有好的基极传输系数，注入效率很高，则 α 近似等于1。在图1-4所示的共射极接线中，基极电流 i_b 与集电极电流 i_c 之比很重要。由于基极电流为射极电流与集电极电流之差，故

$$\frac{i_b}{i_b} = \frac{i_e}{i_e - i_c} = \frac{i_c/i_e}{1 - i_c/i_e} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} = \beta \quad (1-11)$$

集电极电流和基极电流之比值定义为基极对集电极电流的放大系数。若 α 接近于1，则 β 很大，这意味着基极电流与集电极相比，其值很小。

晶体管作开关应用时，其直流增益(h_{FE})令人关注，其定义为：

$$h_{FE} = \frac{I_c}{I_b} = \bar{\beta} \quad (\text{直流}) \quad (1-12)$$

通常可以认为 $\bar{\beta} = \beta$

它是集电极电流的直流值与对应的基极电流的直流值之比。直流增益决定了需要限制饱和电压降达到理想值时基极驱动的电流值。在高频开关方式应用中，基极驱动电流不是一恒定的直流值，而是从一相当大的导通电流值切换到零或者负的关断电流值。接通的最短时间总大于器件的瞬态切换时间，故直流电流增益仍属重要的增益参数。在高频开关应用中，导态和断态时的基极驱动电流都是临界值，其最佳组合可使开关在切换过程中的功率损耗为最小。

在作大功率开关管应用时，晶体管工作在截止和导通两种状态。在理想情况下，晶体管导通时可以被看成是短路，截止时可看成开路（切断），而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为零，当然实际工作情况只能是接近这些条件。

电力晶体管作开关用的两种工作状态定义如下：

(1) 截止

$U_{be} \leq 0$, $U_{bc} < 0$ ，发射结不注入电子，因而只有泄漏电流流过。

(2) 饱和

$U_{be} > 0$, $U_{bc} > 0$ ，从截止转入饱和状态时，晶体管要穿过线性工作区。进入饱和时，在很高的反向偏置电压作用下，集电结转为正向偏置状态，两个PN结都为正向偏置是饱和的特征。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。晶体管刚进入饱和状态称为临界饱和。若 $i_b > i_c/\beta$ ，则为过饱和，由于饱和状态时两个PN结都处于正向偏置，其空间电荷区均较窄，基极最宽，因而增益也

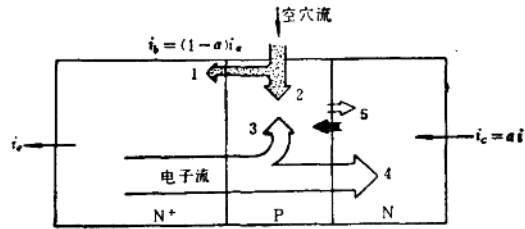


图1-5 NPN晶体管中空穴和电子的流动