

高等学校教学用书

电力电子电路

林渭勋等 编著

浙江大学出版社

内 容 提 要

本书系高等院校“应用电子技术”专业教材，介绍各种由晶闸管组成的电力电子电路的工作原理，为分析电力电子装置提供理论和技术基础。全书由三个单元组成：第一单元介绍电路运行条件对晶闸管性能的影响（第一章）；第二单元为基本电力电子电路性能分析，包括可控整流电路（第二章）、交流变换电路（第三章）、负载换流式逆变电路（第四章）、自换流式逆变电路（第五章）和直流变换电路（第六章）；最后一个单元介绍组合电力电子电路的基本构成方式（第七章）。

本书可作为高等院校“应用电子技术”专业“电力电子电路”一课教材，也可供其他有关专业师生以及从事变流技术工作的工程技术人员等参考。

电力电子电路

林渭勋 等编著

责任编辑 陈子晓

• • • •

浙江大学出版社出版

浙江大学印刷厂印刷

浙江省新华书店发行

开本787×1092 1/16 印张 23 字数 502千字

1986年9月第一版 1986年9月第一次印刷

统一书号：15337.021 定价3.70元

印 数：0—4000

前 言

根据培养目标,应用电子技术专业的本科学生必须掌握电力电子技术的有关基础理论和方法,为此在教学计划中设置了电力电子器件、电力电子电路和电力电子装置及系统等有关课程。

电力电子电路是采用电力电子器件(目前以晶闸管为代表)组成的电子电路,具有对大功率电能进行变换和控制的功能,是电力电子技术的重要组成部分。

本书根据应用电子技术专业所设电力电子电路的课程教学大纲编写,主要介绍各类基本电力电子电路的工作原理和分析计算方法,为学生学习后续课程(电力电子电路设计、电力电子装置及系统)和继续深造提供理论和技术基础。

全书由三个单元组成:第一单元(即第一章)讨论大功率电子电路的运行条件对晶闸管各项性能参数的影响;第二单元讨论各类基本电力电子电路的工作原理和参数计算,包括可控整流电路(第二章)、交流调压电路(第三章)、负载换流式逆变电路(第四章)、自换流式逆变电路(第五章)和直流斩波电路(第六章);第三单元通过第七章介绍各种电力电子电路的运行故障及其保护措施。每章后的附录是为学有余力的学生扩大或深化所学知识,做到因材施教。

为了培养学生的自学能力,使他们能检索与本课有关的各种文献,特撰写一篇文献检索作为附录放在第一章后面。

本书初稿经浙江大学汪栖生教授审阅,其中第三和第四章由杨思俊同志编写,第七章由张仲超同志编写,其余内容由林渭勋同志编写并负责统稿。本书编写时曾参阅国内各兄弟单位和个人撰写的教材、专著和文献,在此谨致衷心谢意。由于作者水平所限,书中内容有不当之处,请读者批评指正。

编者 1984年12月於杭州

本书使用的物理量符号说明

<p>B—磁通密度</p> <p>C—电容量</p> <p>d—直径</p> <p>f—频率</p> <p>f_0—谐振频率</p> <p>I_A—阳极电流</p> <p>I_b—基极电流</p> <p>I_c—集电极电流</p> <p>I_K—阴极电流</p> <p>I_e—发射极电流</p> <p>I_{c_s}—饱和集流</p> <p>I_{b_s}—饱和基流</p> <p>I_{g1}—门极电流</p> <p>I_{g10}—门极触发电流</p> <p>i_T—晶闸管阳极电流</p> <p>$I_{T_{av}}$—额定通态平均电流</p> <p>I_{T_m}—浪涌电流</p> <p>I_e—电流有效值</p> <p>J—电流密度、PN结</p> <p>t_p—脉冲前沿时间</p> <p>U_{DRM}—正向重复峰值电压</p> <p>U_{TN}—动态压降</p> <p>X—电抗值</p> <p>α—控制角</p> <p>γ—叠流角</p> <p>ω—角频率</p> <p>Δ—渗透深度</p> <p>θ—导通角</p> <p>$\frac{du}{dt}$—电压上升率</p>	<p>K—电压放大倍数、常数</p> <p>L—电感量</p> <p>L_K—换流电感</p> <p>L_{ll}—负载等效电感</p> <p>L_o—负载电感</p> <p>N—变压器变比</p> <p>P—有功功率</p> <p>Q—无功功率、品质因数</p> <p>R—电阻、稳态热阻</p> <p>$r(t)$—瞬态热阻</p> <p>S—表观功率、面积</p> <p>T—周期、时间常数、温度</p> <p>T_j—结温</p> <p>t_{g1}—开通时间</p> <p>t_d—延迟时间</p> <p>t_r—上升时间</p> <p>t_v—叠流时间</p> <p>t_s—扩展时间</p> <p>T_{jm}—额定结温</p> <p>t_q—关断时间</p> <p>U_{RRM}—反向重复峰值电压</p> <p>U_{T0}—稳态导通压降</p> <p>Z—阻抗值</p> <p>β—反压角、共射电流放大倍数</p> <p>ϕ—磁通量、功率因数角</p> <p>δ—引前角、衰减系数</p> <p>η—效率</p> <p>$\frac{di}{dt}$—电流上升率</p>
---	--

本书常用单位

V—伏特	Hz—赫兹
kV—千伏	kHz—千赫
A—安培	rad—弧度
mA—毫安	rad/s—弧度/秒
W—瓦特	m—米
kW—千瓦	cm—厘米
Var—乏	mm—毫米
kVar—千乏	kg—千克
Ω —欧姆	$^{\circ}\text{C}$ —度(摄氏)
k Ω —千欧	ml—毫升
C—库伦	min—分
μC —微库	s—秒
H—亨利	ms—毫秒
mH—毫亨	μs —微秒
μH —微亨	h—小时
F—法拉	A/ μs —安培/微秒
μF —微法	V/ μs —伏特/微秒
pF—微微法	kcal—千卡

绪 论

一、什么是电力电子学？

电力电子学由英文Power Electronics一词译出，Power 可含功率、动力和电力等意思，因而过去曾有功率电子学和动力电子学的称呼，但以现译名较为贴切。

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（包括电能和太阳能等）进行变换和控制为主要内容；是一门横跨电子、电力和自动控制的边缘学科。这一定义的第一段强调电力电子学是应用电子学的一门分支，表明现代应用电子学除包含信息电子学外尚包括另外的分支；第二段强调电力电子学的主要内容是工业电能（也包含太阳能等自然能）的变换和控制，因而属于强电范围；最后一段则强调它是一门边缘学科，与上述三门学科紧密相关。

电子器件（包含离子器件和半导体器件等）在电力装置采用自动控制技术之后不久便作为重要的技术工具被使用，不过当初由于其容量等级很小，因而仅限于在控制电路中进行信息的处理（如实现信号的产生、放大和变换等功能）。随着气体闸流管和汞弧整流器等大功率离子器件的出现，电子器件在电力装置中的作用开始由信息的变换过渡到电能的变换，因而有了各种静止式变流器，它们可取代原用的旋转式变流器（如发电机）；与此同时，也发展了静止变流的理论，对由离子器件组成的各种静止变流器的性能作了较为完整的分析，这些分析为尔后的半导体变流技术奠定了理论基础。

静止变流器较之旋转变流器具有噪音低、效率高、无磨损等优点；但由离子器件组成的变流器较之由半导体器件组成的变流器却存在寿命短、惯性大和体积大等缺点。

晶闸管（晶体闸流管的简称，过去曾称作可控硅）是一种大功率半导体电子器件。由于它比离子器件具有寿命长、开关快和体积小的优点，因而不仅在各个领域取代了原用的离子器件，而且把静止变流器的应用范围进一步扩大到整个电力领域，出现了在更大功率等级和更高频率范围内取代旋转式变流器的局面。在世界范围内，可以说，以晶闸管组成的静止变流器已经成为现代电力变流器的代表形式。

作为一门学科，应该有明确的内容，就目前而言，电力电子学包含以下几个组成部分：

（a）电力电子器件

理论电子学是研究电子在各种介质中运动规律的科学；应用电子学则是利用这些运动规律来制成各种电子器件，并使之应用于各种技术领域的科学；而电力电子学是应用电子学在电力技术领域中的分支，因此它的重要内容之一是对电力电子器件的研究。技术发展史充分说明这一点：新器件的出现对整个学科的发展会带来更为深刻的影响。例如正是由于晶闸管的出现促成了电力电子学的发展。

现阶段主要的电力电子器件是晶闸管及其派生器件。随着技术的发展，这类器件正沿着功率化、快速化、组合化和廉价化等方面发展。可以预计新的派生器件还会不断的出现。必须指出，除了晶闸管之外，还有着其他的电力电子器件如双极型大功率晶体管和大

功率场效应晶体管等，就控制性能和频带宽度等方面都比普通晶闸管优越。因而尽管它们目前的功率等级还较低，但从发展的眼光看则是很有潜力的器件。

不管上述哪一类器件其作用还仅限于电能的变换，而从自然能到工业电能的变换目前还得借助于其他方式。但是随着技术的进步，今后电子器件还将被应用于实现各种能量的转换，例如高效大功率半导体光电器件就将实现太阳能到电能的转换。

(2) 电力电子电路

器件和电路是相辅相成的关系，新器件的出现促使电路达到新的水平，而新电路的出现反过来又对器件提出新的要求。

随着技术的进展，电力电子电路也不断发展：从最初的整流电路到逆变电路和斩波电路等，使电能的变换更加完善。但就目前而言，则应该重视各种逆变电路和斩波电路的研究，因为正是这些电路使电力电子学获得更为重要的地位。例如由于电能的短缺，节能问题成为当今世界上的重要课题，低耗高效成为衡量电力技术优化的主要目标，而这方面逆变电路和斩波电路都能发挥良好的作用，例如由于晶闸管中频电源的取代原用中频发电机组，使感应加热电源的效率提高到90%以上；在电力传动方面，交流变频调速方案和直流脉冲调速方案的采用都使交流传动和直流传动具有更好的性能和更高的效率等等。

(3) 电力电子装置及系统

根据生产的要求，对各种电力电子电路进行适当的组合以实现电能的变换，便构成电力电子装置；按照装置所服务的负载实际特点采用相应的控制手段便构成电力电子自控系统。这类自控系统在国内已应用于冶金、机械、矿山、交通、石油、化工、水电和国防等部门，内容涉及直流传动、交流传动、感应加热、充电电镀、直流输电、无功补偿等方面。不管应用于哪一方面，电力电子装置及系统都存在以下几个共同问题：

- (a) 电网干扰；
- (b) 系统保护及故障诊断；
- (c) 波形改善；
- (d) 效率和功率因数的提高；
- (e) 新的控制方式和控制工具的采用；
- (f) 冷却技术的提高；
- (g) 可靠性。

电力电子学是一门新兴的边缘学科，随着电子和控制技术的迅速发展，这门学科正日益发挥其重要的作用。

二、电力电子电路的分类

如上述，任何实用的电力电子装置都是由一些基本电路按照一定的要求组合而成的。这些要求反映了生产和科研的各种需要，而为了满足这些需要，人们创造出各式各样的基本电路。为了便于初学者的学习，对这些电路进行恰当的分类是非常必要的。由于电力电子电路发展较为迅速，国内外已有的一些分类都各有长短也并不一致。

一种分类方法的优劣是以对被分对象所采用的概括程度的合理性来衡量的。例如按照电路元件的工作状态来划分，所有的电子电路可分为开关电路和非开关电路，具有开关状

态的电子器件必然是利用其特性的非线性，因此包含晶闸管的全部电力电子电路都可视为非线性电路，因而也就没有分类可言，也即非线性和开关状态这些特征虽则是本质的，但其概括程度过高，因而按此分类是不妥当的。

例如按照电路在生产中的用途划分，所有的电力电子电路可分为直流电源、交流电源、直流开关和交流开关等，但同是一种直流电源可以用可控整流电路来实现；也可以用不控整流加直流斩波电路来实现；还可以用交流调压加不控整流电路来实现，而这些电路的性质又各不相同。因此，直流和交流、电源和开关虽然比较实际但并没有反映电路的性质，因而此种分类方法亦不理想。

在分析电力电子电路时，不可避免地要牵涉到以下几个方面的问题：

(1) 电能的转换方式 现有的电能转换方式可概括为以下四种：

(a) $AC \rightarrow DC$ ：指把交流电能转换为直流电能的过程，凡能实现上述转换的电路统称为整流电路；

(b) $DC \rightarrow AC$ ：指把直流电能转换为交流电能的过程，凡能实现这一过程的电路统称为逆变电路；

(c) $AC \rightarrow AC$ ：指将交流电能的任一参数（幅值、频率和相位）加以转换的过程，凡能实现这类转换的电路统称为交流变换电路。例如对交流频率进行转换的电路则为频率变换电路，简称变频电路；

(d) $DC \rightarrow DC$ ：指将直流电能的任一参数（幅度和极性）加以转换的过程，实现这一过程的电路统称为直流变换电路，或称直流斩波电路。

(2) 变换参量

一种电能形式的转换均可以包含一个或多个参量的变换，例如在 $AC \rightarrow AC$ 变换中，可以将固定的交流电压转变成可变的交流电压；也可以是将一种频率的交流电能转换为另一种频率的交流电能，前者称为交流电压变换（或称交流调压），后者称为频率变换（简称变频）。

(3) 换流方式

所谓换流是指包含变流元件的两个支路间电流的转移。由于变流元件均工作于开关状态，为了实现上述电流转移就意味着：开通原来处于阻断状态的元件和关断原来已处导通的元件。在用普通晶闸管组成的电路中，后者则包含强制导通晶闸管中电流下降并在其过零后施加一定时间的反向电压使元件恢复阻断能力，当反压期 $t_{\beta} > t_q$ （元件关断时间）时，元件便可靠关断。由此可见，为了实现上述的换流过程需要一定的条件。

对普通晶闸管而言，不管其参加前述那一种电能变换，换流过程总是不可避免的。但上述换流过程所需要的条件却不是每种电路的电源或负载都能具备的。例如在 $AC \rightarrow DC$ 变换中，电路具有交流电源，可以利用其交变性质来强制电流过零并在负半波提供反压使之关断以实现电流转移。相反在 $DC \rightarrow AC$ 或 $DC \rightarrow DC$ 变换中，电路只具有直流电源，上述换流条件便不完全具备或完全不具备。为了创造换流条件便必须采取相应的技术措施，这就是电力电子电路中的换流技术，就目前而言，它是变流技术的重要组成部分。

目前已经有了各种类型的换流电路，但就换流电压的来源进行分类，所有换流电路可归纳为以下三种类型：

(a) 电源换流：当电路工作于交流电源时可以采用这种方式；

(b) 负载换流：当电路工作于直流电源而负载为容性的逆变器，可以利用负载电压来强制电流的转移并关断退出导通的元件；

(c) 辅助换流：当电路工作于直流电源和非容性负载时，上述的换流条件便完全不具备，为此必须在电路中设置独立的换流电路来强制电流的转移并关断退出导通的元件。这种方式也称为自换流。

(4) 控制方式：

上述几方面的分类均侧重于电能的转换，也即侧重于主电路的范围。电力电子电路不仅要实现电能的转换还要实现电能的控制，因此除了主电路之外，还必须有相应的控制电路和控制方式。

随着技术的进步，已经发展了内容众多的控制电路和控制方式。如果从给定信号的变化对晶闸管门极电流的影响方式这一角度出发，所有控制方式可以归纳为以下几类：

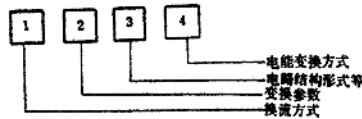
(a) 相控方式：即给定信号的变化将表现为门极电流相位的变化，具有交流电源的变流电路可以采用这种方式；

(b) 频控方式：即给定信号的变化将表现为门极电流重复频率的变化，变频电路可采用这种方式；

(c) 斩控方式：即给定信号的变化将表现为变流元件导通比的变化，直流和交流斩波器可以采用这种方式；

(d) 组合方式：是上述基本控制方式的组合，如PWM控制方式便是频控和斩控的组合方式。

在上述四方面的问题中，电能转换方式是最主要的，因为其他几方面的问题是在这一基础上产生的，因此采用电能转换方式作为主要特征，其他方面作为辅助特征来对基本电力电子电路进行分类是比较恰当的。本书采用这种分类，并将各种电路采用如下格式命名。



本书所用电路名称格式

图0-1

说明：为了简化名称，对于各种换流方式、变换参量和电路结构均用英文字母代表，而电能转换方式则用中文，表示其突出地位。

电能转换式

AC→DC	DC→AC	AC→AC	DC→DC
整流电路	逆变电路	交流变换电路	直流变换电路

换流方式

电 源 换 流	负 载 换 流	辅助换流(自换流)
L	R	S

变换参数

电 压	频 率	电压和频率
U	F	K

电路结构形式和工作范围等(对于不同电路可以有更多的文字代号,不限于表中所列)。

电 压 型	电 流 型	单 象 限	双 象 限	四 象 限
V	I	A	B	C

[例]SF—I逆变电路——电流型辅助换流式DC→AC频率变换;
 SU—A直流斩波电路——单象限辅助换流式DC→DC电压变换。

三、本课程的教学目的和要求

电力电子电路是应用电子技术专业的技术基础课,主要研究各种由晶闸管组成的基本电力电子电路的工作原理,着重于电能的变换和控制的分析,为后续课提供理论和技术基础。

电力电子电路的基本要求是:

1.掌握典型的基本电力电子电路(包括主电路及其触发电路)的工作原理和参数计算;

2.掌握一般电力电子电路的基本分析步骤和分析方法;

3.对基本电力电子电路有初步的实验能力;

4.了解与本课程有关的各种技术文献,具有初步的检索能力。

本课程与其他有关课程的教学分工是:

(1)电力电子器件——利用已掌握的器件原理和特性,分析运行条件对器件性能的影响;

(2)电力电子装置——讨论由各种基本电力电子电路组成的装置及系统。

目 录

绪 论	(I - V)
第一章 运行条件对晶闸管性能的影响	(1)
第一节 概 述	(1)
第二节 运行条件对元件阻断能力的影响	(3)
第三节 运行条件对元件开通性能的影响	(8)
第四节 运行条件对元件关断速度的影响	(15)
第五节 运行条件对元件载流能力的影响	(22)
习 题	(32)
参考资料	(33)
附 录 文献检索	(34)
[A1—1]检索工具刊物	(34)
[A1—2]国内期刊	(36)
[A1—3]国外期刊	(37)
[A1—4]会议文献	(39)
[A1—5]评述文献	(40)
第二章 可控整流电路及有源逆变电路	(41)
第一节 概 述	(41)
第二节 理想条件下三相桥式整流电路性能分析	(47)
第三节 负载性质对整流电路性能的影响	(53)
第四节 换流过程对整流电路性能的影响	(62)
第五节 有源逆变电路	(69)
第六节 主电路参数选择	(80)
第七节 触发电路	(85)
第八节 反并联整流电路	(97)
习 题	(104)
参考资料	(107)
附 录	(107)
[A2—1]畸变功率	(107)
[A2—2]斩控式整流电路	(108)
第三章 交流变换电路	(112)
第一节 概 述	(112)
第二节 单相交流调压电路分析	(113)
第三节 理想条件下三相交流调压电路分析	(117)
第四节 电压型直接频率变换电路分析	(128)
习 题	(136)
参考资料	(137)
附 录	(138)
[A3—1]双向晶闸管	(138)

[A3—2]相控式单相调压器触发电路	(141)
[A3—3]斩控式单相调压电路	(142)
[A3—4]感性负载下单相调压电路的过程分析	(145)
第四章 负载换流式逆变电路	(146)
第一节 概述	(146)
第二节 负载自然频率特性	(147)
第三节 理想条件下并联逆变电路分析	(155)
第四节 并联逆变电路的分析方法	(159)
第五节 并联逆变电路的换流过程	(166)
第六节 逆变主电路参数选择	(171)
第七节 并联逆变触发电路	(175)
第八节 频率自动跟踪(自动调频)	(183)
第九节 串联逆变电路	(188)
习 题	(196)
参考资料	(197)
第五章 自换流式逆变电路	(198)
第一节 概述	(198)
第二节 理想条件下电压型逆变电路的工作情况分析	(203)
第三节 电压型逆变电路换流过程分析	(216)
第四节 电压型逆变电路输出电压的控制	(231)
第五节 触发电路	(239)
第六节 理想条件下电流型逆变电路的工作情况分析	(245)
第七节 电流型逆变电路的换流过程分析	(251)
习 题	(262)
参考资料	(264)
附 录	(264)
[A5—1] 电感储能式换流电路	(264)
[A5—2] 辅管反并联单电容式换流电路	(268)
[A5—3] 具有辅管的电容式换流电路	(271)
第六章 直流斩波电路	(276)
第一节 概述	(276)
第二节 理想条件下SU—A型直流斩波电路分析	(277)
第三节 SU—A型斩波电路换流过程分析	(281)
第四节 SU—A型斩波电路的触发电路	(299)
第五节 理想条件下SU—B型直流斩波电路分析	(300)
第六节 SU—B型斩波电路换流过程分析	(303)
第七节 理想条件下SU—C型直流斩波电路分析	(308)
习 题	(310)
参考资料	(312)
附录	(313)
[A6—1] 电流换流式SU—A型斩波电路分析	(313)
[A6—2] 电压换流式SU—A型斩波电路分析	(319)

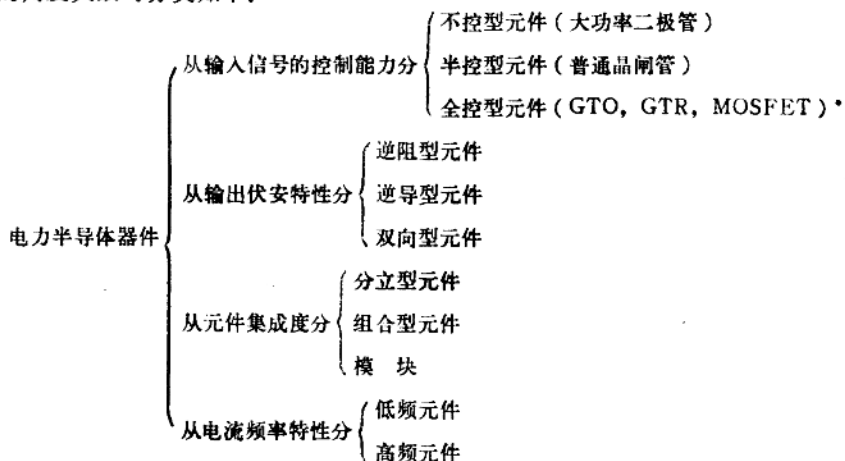
[A6-3]	单相斩波电路输入滤波器的参数选择	(323)
[A6-4]	多相多重斩波电路	(325)
第七章	保护	(328)
第一节	概述	(328)
第二节	电力电子电路的过电流保护	(328)
第三节	电力电子电路的过电压保护	(336)
第四节	晶闸管正向电压上升率 du/dt 的抑制	(349)
	习题	(351)
	参考资料	(351)
	附录	(352)
[A7-1]	晶闸管分流法抑制过电流	(352)
[A7-2]	整流式阻容吸收电路	(352)

第一章 电路运行条件对晶闸管性能的影响

第一节 概 述

一、电力半导体器件的分类

由于生产的需要和半导体技术的发展，迄今为止已发展了多种电力半导体器件，按照不同的角度大致可分类如下：



电力半导体器件均具有导通和阻断两种工作状态，因而在电力电子电路中被用作大功率开关。一个处于正向阻断状态的普通晶闸管，加入足够大的门极电流 i_g ，便可使它由断态转为通态，但撤除 i_g 却不能使已处通态的元件重新恢复为断态。门极电流 i_g 只能控制元件的导通，而不能控制其关断，故把这类普通晶闸管泛称为半控型元件。一个处于正向截止的双极型晶体管，加入足够大的正向基流 i_b ，便可使它由断态转为饱和导通，撤去基流时，已处通态的元件便立即恢复其断态，也即基极电流 i_b 既能控制元件的导通也能控制其关断，故把这类器件（除了双极型大功率晶体管外，尚有门极关断晶闸管、大功率场效应晶体管等）泛称为全控型元件。

与半控型元件相比较，全控型元件具有控制灵活、电路简单和频带较宽的优点，但目前所能达到的功率等级尚低，技术也不很成熟，因此对大功率变流装置还必须采用半控型元件。本书将着重分析由半控型元件组成的电力电子电路，本章所指的晶闸管也属于半控型元件的普通晶闸管（为简单计，以后无特殊标明时均指这类晶闸管）。

二、可控变流元件的理想特性

可控变流元件在电力变流装置中起着大功率可控开关的作用，其理想特性为图 1-1 所

* GTO—门极关断晶闸管，GTR—双极型大功率晶体管，MOSFET—大功率场效应晶体管

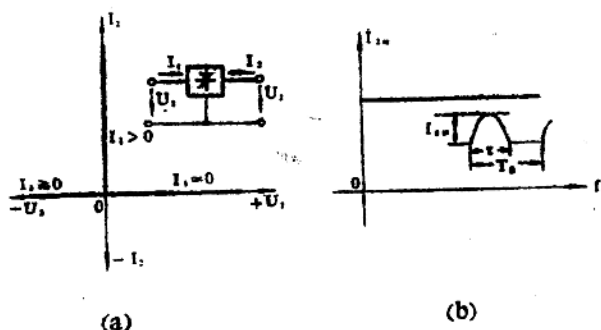


图1-1 (a)理想静态输出特性 (b)理想电流频率特性

示。由图可见：

(1) 可控变流元件可用一个三端网络等效，静态下的入端电流和电压分别用 I_1 和 U_1 表示，出端电流和电压则分别用 I_2 和 U_2 表示。图1-1(a)描述出端电压和电流间的关系，称为元件的静态输出特性，它表明元件具有两种工作状态：断态和通态。对于任何端压，处于断态的元件均无输出电流；对于任何输出电流，通态下的元件端压均为零，这就是说元件是无损耗的；

(2) 元件由断态转为通态的条件是同时满足 $U_2 > 0$ 和 $U_1 > 0$ ，否则元件将处于断态，这表明元件具有单向导电的性质；

(3) 由图1-1(b)可见，对于任一频率的入端电流，元件均具有相同的载流能力，即元件的电流放大倍数与工作频率无关，或者说元件的频带为无限宽。据此，元件工作状态的转换是瞬时完成的，即元件可视为无惯性。

上述特性对大功率变流装置来说是非常可贵的，任何实际变流元件性能的优劣，就看它在多大程度上接近这些理想特性。与历史上其他变流元件相比，晶闸管（为简单计，简称为元件，下同）具有更多的优点，因而不仅在原来的技术领域（如离子拖动等）取代了原用的离子器件，而且拓宽了静止变流技术的应用领域（为无源逆变等），推动了大功率变流技术的发展。

三、决定晶闸管实际效能的基本因素

如前述，本书将阐述由晶闸管组成的电力电子电路的工作原理，而正确地理解晶闸管的性能是合理使用元件和设计电路的基础。

一个晶闸管在装置中的实际效能取决于两方面的因素：制作工艺（参数设计、材料性质、工艺水平和散热能力等）和运行条件（电路特点、工作频率、环境温度和冷却条件等）。前一个因素属于元件的设计和制造的范围，后一个因素则与元件的选择和使用有关。

由于变流装置的运行条件千差万别，元件制造厂只能根据典型的标准条件进行测试，因此使用者必须了解元件实际运行条件与标准测试条件间的差别，以及这些差别对元件性

能产生何等影响。只有这样才能做到合理地选择和使用元件，使它们在实际装置中发挥最大效能。

作者假定读者已掌握有关电力电子器件的基本工作原理及其外部特性，据此本章将从使用者的角度出发着重分析电路运行条件对元件性能参数的影响。

元件的性能参数很多，例如有极限参数和特性参数、静态和动态参数、电和热的参数等，但扼要说来，是断态下的阻断能力和通态下的载流能力、开通过程的速度和电流上升率、关断过程的速度和电压上升率等。

必须指出，电路运行条件的变化给元件某一项性能参数所带来的影响可能是变优，也可能是变劣，对元件各项性能参数的影响也就有好有坏，这种情况与制作工艺对元件性能的影响是类似的。即元件各项性能参数受外界条件影响往往表现为相互制约，因此单独追求某一项参数的优化几乎是无意义的，比较有效的做法是诸性能参数间的协调和折衷。元件使用者在向生产厂家提出技术要求时务必注意这一点。

第二节 运行条件对元件阻断能力的影响

一、晶闸管的阻断能力及其测试条件

晶闸管的正反向阻断能力分别用断态重复峰值电压 U_{DRm} 和反向重复峰值电压 U_{RRm} 表示，它们与不重复峰值电压 U_{DSm} 和 U_{RSm} 的关系分别为：

$$U_{DRm} = 0.8U_{DSm}^* \quad (1-1)$$

$$U_{RRm} = 0.8U_{RSm} \quad (1-2)$$

晶闸管已达正向或反向电压极限值的标志是阳极电流分别达到断态重复峰值电流 I_{DRm} 和反向重复峰值电流 I_{RRm} ，这些电流因元件的电流容量而异，在部颁标准中均有明确规定。

U_{DRm} 和 U_{RRm} 的测试条件为

(a) 结温： $T_j = T_{jm}$ （额定结温，即工作结温的上限值）；

(b) 门极电路：断路，即 $i_g = 0$ ；

(c) 主电压：正弦半波， $f = 50\text{Hz}$ ， $\tau/T = 1/2$ ；

(d) 电压上升率： $\frac{du}{dt} < \left(\frac{du}{dt}\right)_m$ （断态电压上升率的临界值）；

(e) 阳极电流：分别为 I_{DRm} 和 I_{RRm} 。

二、主电压对元件阻断能力的影响

当元件处于正向阻断时，结 J_1 和 J_3 均处正向偏压（以下简称正偏），而结 J_2 处于反向偏压（以下简称反偏），外加电压全部加于 J_2 两侧。主电压 u_{ak} 越高， J_2 上的电场强度也越高，经过 J_2 的载流子在电场加速下所获得的能量也越大，当它与硅原子碰撞时便可能破坏共价键，使价电子激发而产生新的电子-空穴对，从而使载流子倍增。当 $\alpha_1 + \alpha_2 \geq 1$ 时，元

* 式(1-1)、(1-2)按现行标准，而拟订中的新标准为： $U_{DRm} = 0.9U_{DSm}$ ， $U_{RRm} = 0.9U_{RSm}$

件即丧失其阻断能力，并由断态转为通态，这种因主电压过高而引起的开通称为硬开通。

考虑到载流子倍增现象，元件电流放大系数应写成

$$\alpha^* = \alpha M \quad (1-3)$$

式中 α 为 $M=1$ 时的放大系数（即无倍增现象时）； M 为倍增因数，其数值随阻断电压而变，如图1-2所示。

$$\text{当 } u_{ak} = U_{BO} \text{ 时, } \alpha_1^* + \alpha_2^* = 1$$

$$\text{即 } M(\alpha_1 + \alpha_2) = 1 \quad (1-4)$$

$$M = \frac{1}{\alpha_1 + \alpha_2} \quad (1-5)$$

图1-3中 U_{BO} 为正向转折电压， U_{BR} 为反向击穿电压。

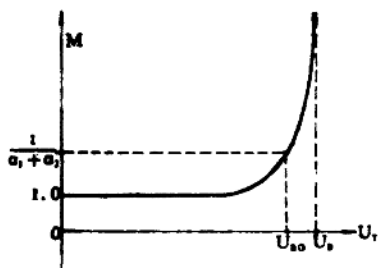


图1-2 倍增因数与阻断电压的关系

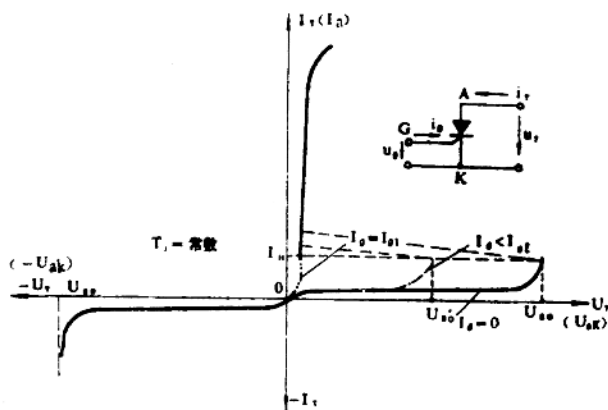


图1-3 晶闸管的静态输出特性

三、结温对元件阻断能力的影响

结温升高对元件许多参数均产生影响，总称为元件的高温特性。结温对正向阻断能力的影响是高温特性的一项内容。设元件其他运行条件为

$$i_a = 0; \quad \frac{du}{dt} < \left(\frac{du}{dt} \right)_m$$

正向转折电压 U_{BO} 随结温变化的曲线如图1-4所示，其中曲线1称为硬特性，曲线2称为软特性。这些特性的差异与导致元件硬开通的原因有关，而硬特性与载流子倍增现象有关。由图1-4可见，在常温下 U_{BO} 随 T_j 略有上升，这是由于击穿电压 U_B 随温度增加的缘故。但在高温下， U_{BO} 则随 T_j 的增加而急剧下降，其原因是 α 值在高温下明显增加，如图1-5所示，这将促使元件在小电流下丧失阻断能力。

另一类元件硬开通的成因与载流子倍增现象无关，而是由于 I_{CO} （等效反向饱和漏电流）随主电压 U_{ak} 而增加，使 α_1 和 α_2 相应增加， U_{BO} 便显著下降。此类元件具有软特性，如