

普通高等教育“九五”国家级重点教材

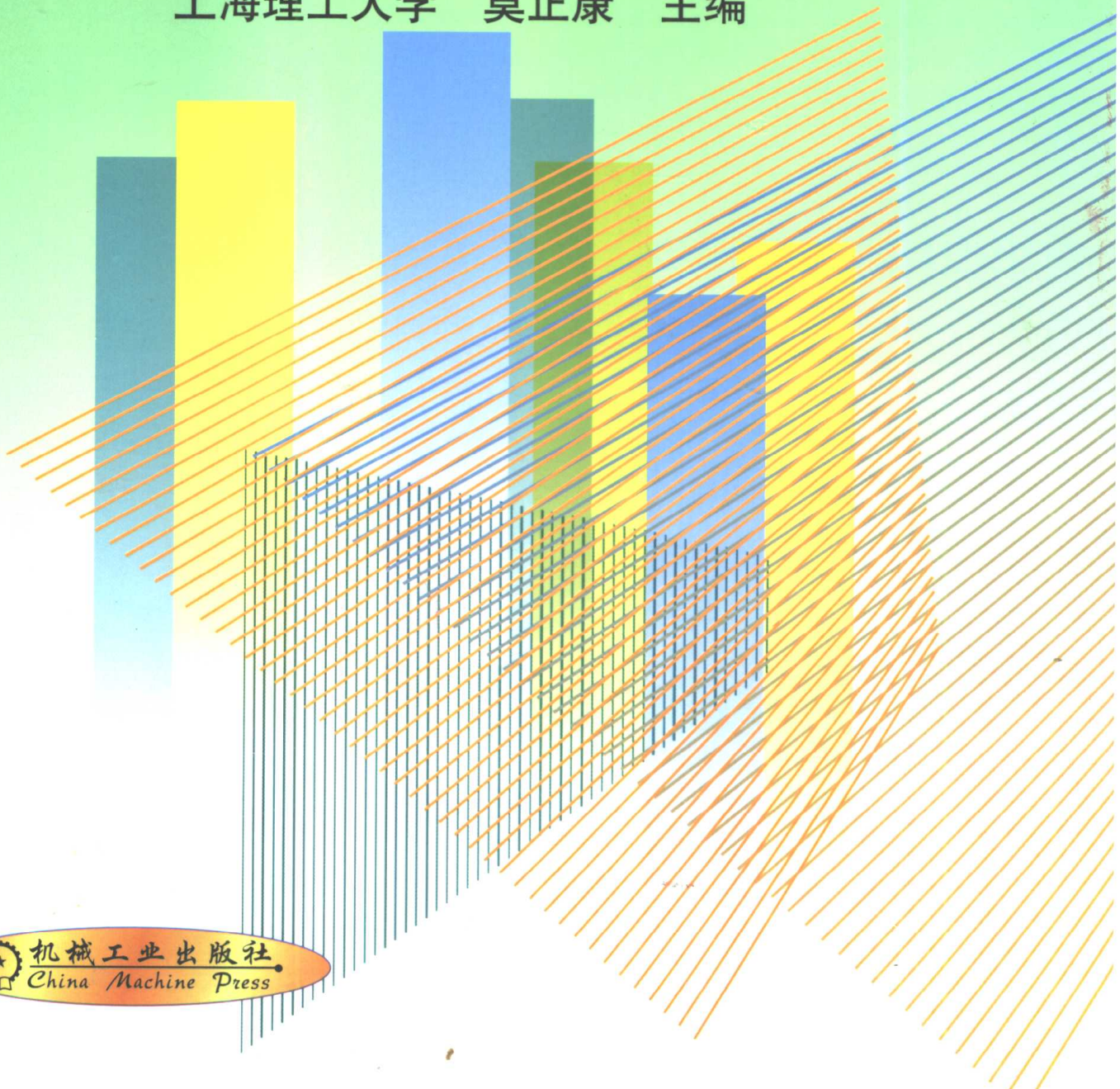


普通高等工科教育机电类规划教材

电力电子技术

第3版

上海理工大学 莫正康 主编



普通高等教育“九五”国家级重点教材
普通高等工科教育机电类规划教材

电力电子技术

第 3 版

主 编 莫正康
副主编 钱新宇
参 编 王 楠 陈子颖
主 审 张明毫



机械工业出版社

本书主要内容为常用电力电子器件的工作原理与使用特性，以及这些器件组成的实用电路的工作原理与用途，并附有典型的应用实例，突出电力电子器件的应用技术。本书为“九五”国家级重点教材，可供普通高等工科教育电气工程类专业师生使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力电子应用技术/莫正康主编. —3版. —北京: 机械工业出版社, 2000. 5
普通高等教育“九五”国家级重点教材 普通高等工科教育机电类规划教材
ISBN 7-111-07618-4

I. 电... II. 莫... III. 电子器件—高等教育—教材
IV. TN103

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 08027 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: 贡克勤 版式设计: 冉晓华 责任校对: 刘志文
封面设计: 方 芬 责任印制: 何全君
三河市宏达印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行
2000 年 5 月第 3 版·第 1 次印刷
787mm×1092mm¹/₁₆·14.5 印张·346 千字
345 401—353 400 册
定价: 19.00 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、68326677-2527

前 言

本书是在1992年编写的“半导体变流技术”教材（该教材获1996年机械工业部优秀教材二等奖，1999年机械工业部科技进步二等奖）的基础上，根据近几年电力电子技术的发展状况，内容作较大更新而重新编写的，书名改为《电力电子应用技术》。本书作为教育部批准立项的“九五”国家级重点教材，获得教育部、机械工业部、机械工业出版社资助。

本书主要内容有：常用电力电子器件（功率二极管、晶闸管、可关断晶闸管、大功率晶体管、功率场效应晶体管、绝缘栅双极晶体管）的工作原理与使用特性，上述器件组成的相控整流电路、有源逆变电路、交流调压、直流斩波电路以及逆变和变频电路的工作原理与用途，并附有典型的电力电子应用实例。

本书在编写中紧紧围绕电力电子器件的工程应用，力求将较深的理论与复杂的数学分析归纳和简化，将定量分析转化为定性说明并将其工程实用化，将器件、电路与应用有机结合。编写时力求在保证必需的基础理论与常规技术的同时，充分考虑教材的先进性，以满足21世纪经济技术发展的需要。在编写内容上力求精选内容，叙述尽量深入浅出，每章后附有启发思路的思考题和习题，书后还附有实验指导，以期符合教学要求，做到“学生易学、教师好教”。文中打“*”的为选学内容。

本书可用作高等院校“工业电气自动化”、“电气技术”等相关专业的教学用书，为培养生产第一线高级应用型人才服务，也可供从事电力电子技术的工程技术人员参考。

本书由上海理工大学电气工程学院莫正康任主编，钱新宇任副主编，王楠、陈子颖为协编，编写分工为：莫正康编写绪论、一、二、三章及第八章第一、三节，钱新宇编写五、六、七章及实验，王楠编写四章，八章二节由上海复华公司陈子颖编写。本书由上海理工大学张明毫研究员任主审，北京机械工业学院栗书贤教授、上海理工大学杨正堂副教授审阅了书稿，并提出许多宝贵意见。本书得到成都电焊机研究所纪根强高工、张家港市电源设备厂郭建中厂长、杭州临安新达通信设备厂童健儿厂长、上海电机技术高等专科学校申鸿光副教授等同行专家的热忱帮助，谨此表示深切感谢。

由于编者水平和资料收集所限，疏漏与错误在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

2000年2月

本书主要符号说明

电压符号

u	电压瞬时值	U_{TM}	晶闸管承受的最大正反向电压
u_1	整流变压器一次电压瞬时值	U_c	直流控制电压
u_2	整流变压器二次电压瞬时值	U_b	直流偏置电压
u_d	整流输出电压瞬时值	U_P	单结晶体管峰点电压
u_g	晶闸管门极触发电压波形	U_V	单结晶体管谷点电压
u_L	电感两端电压瞬时值	U_e	晶体管、单结晶体管发射极电压
u_s	同步电压、合成电压瞬时值	U_{bb}	单结晶体管 b_1 与 b_2 之间的电压
u_o	输出电压瞬时值	U_n	整流输出电压 n 次谐波分量有效值
u_i	输入电压瞬时值	U_R	电阻上电压有效值
u_T	晶闸管两端电压瞬时值	U_{nM}	整流输出电压 n 次谐波分量最大值
u_D	二极管两端电压瞬时值	ΔU_d	变压器漏感引起的换相压降平均值
U_d	整流输出电压平均值	ΔU	晶闸管导通管压降
U_{d0}	$\alpha = 0^\circ$ 时整流输出电压平均值	U_{dt}	变压器的短路电压比
U	电压有效值、整流输出电压有效值	E	电动机反电动势、直流电源
U_2 或 $U_{2\phi}$	变压器二次相电压有效值	U_{B0}	晶闸管正向转折电压
U_{2l}	变压器二次线电压有效值	U_{R0}	晶闸管反向击穿电压
U_{Tn}	晶闸管额定电压	U_{DSM}	晶闸管正向阻断不重复峰值电压
$U_{T(AV)}$	晶闸管通态平均电压	U_{DRM}	晶闸管正向阻断重复峰值电压
U_G 或 u_g	晶闸管门极触发脉冲、MOS管、IGBT管栅极触发电压	U_{RSM}	晶闸管反向阻断不重复峰值电压
		U_{RRM}	晶闸管反向阻断重复峰值电压

电流符号

i	电流瞬时值	I_d	整流电路的直流输出平均电流
i_1	变压器一次电流瞬时值	I_V	单结晶体管的谷点电流
i_2	变压器二次电流瞬时值	I_H	晶闸管的维持电流
i_d	整流电流瞬时值	I_L	晶闸管的擎住电流
i_T	流过晶闸管电流的瞬时值	I_{dK}	负载电流连续的临界平均电流
i_D	流过二极管电流的瞬时值	I_e	单结晶体管发射极电流
i_r	可逆电路环流瞬时值	I_{GT}	晶闸管门极触发电流
i_{11}	变压器一次电流基波分量瞬时值	I_C	晶体管、IGBT管集电极电流
i_{d-}	整流输出电流交流分量瞬时值	I_G	MOS管、IGBT管栅极电流
I	电流有效值、整流输出电流有效值	I_{dT}	流过晶闸管的平均电流

I_T	流过晶闸管的电流有效值	I_n	额定电流
I_{Tm}	流过晶闸管的电流最大有效值	I_P	单结晶体管的峰值电流
I_{dD}	流过二极管的平均电流	I_{GD}	晶闸管门极不触发电流
I_D	流过二极管的电流有效值、MOS管漏极电流	I_{11}	变压器一次侧基波电流有效值
I_1	变压器一次电流有效值	I_{2D}	变压器二次电流直流分量值
I_2	变压器二次电流有效值	I_{TSM}	晶闸管允许的浪涌电流
I_{Tn}	晶闸管的额定有效值电流	I_{RS}	晶闸管反向不重复平均电流
$I_{T(AV)}$	晶闸管的通态平均电流, 即额定电流	I_S	MOS管源极电流
		I_E	晶体管、IGBT管发射极电流

其它符号

$\cos\varphi$	功率因数	L_b	平衡电抗器电感值
$\cos\phi$	基波分量电压电流相位差的余弦	m	相数、一周期的脉波(波头)数
α	晶闸管的控制角、晶体管共基电流放大系数	P_d	整流输出的直流功率
β	晶闸管的逆变角、晶体管共发电流放大系数	P_D	直流电动机的反电动势功率
θ_T	晶闸管的导通角	P_R	电阻上消耗的功率
θ_D	整流管的导通角	S	视在功率、变压器容量
γ	换相重叠角	R_T 或 r_T	从二次侧计算变压器的线圈电阻
δ	晶闸管关断时间所对应的电角度	R_d	直流负载电阻
η	单结晶体管的分压比、效率	R_L	负载电阻
ω	角频率	R_i	整流装置等效内阻
t	时间	R_D	直流电动机电枢电阻
s	脉动系数	R_Σ	回路总电阻
t_q	晶闸管的关断时间	K_f	波形系数
t_{gt}	晶闸管的开通时间	f	频率
L_d	直流平波电抗器	T	周期、电磁转矩
X	电抗器的电抗值	Φ	磁通、相
X_T	从二次侧计算变压器的漏抗	φ	阻抗角
τ	脉冲宽度	t_{rr}	反向恢复时间
M	调制比(幅值比)	t_{fr}	正向恢复时间
N	载波比(频率比)	t_{on}	器件开通时间
X_b	平衡电抗器的电抗值	t_{off}	器件关断时间
		A、B、C	三相电源或变流器输出端

目 录

前 言	
本书主要符号说明	
绪 论	1
第一章 功率二极管、晶闸管及单相相控整流电路	4
第一节 功率二极管 (Power Diode)	4
第二节 晶闸管 (Thyristor)	8
第三节 单相相控整流电路 (Single-Phase Controlled Rectification Circuit)	16
第四节 晶闸管简单触发电路 (Trigger Circuit)	32
思考题与习题	36
第二章 三相相控整流电路 (Three-Phase Controlled Rectification Circuit)	40
第一节 三相半波相控整流电路	40
第二节 三相桥式相控整流电路	44
第三节 整流电路的换相压降、外特性和直流电动机的机械特性	50
第四节 晶闸管的保护 (Protection) 与容量扩展	54
第五节 晶闸管相控触发电路	60
第六节 触发脉冲与主电路电压的同步——脉冲变压器与防误触发措施	71
思考题与习题	76
第三章 晶闸管有源逆变 (Active Reverse) 电路	79
第一节 有源逆变的工作原理	79
第二节 晶闸管直流可逆拖动 (Reversible Drive) 的工作原理	83
第三节 绕线转子异步电动机串级调速与高压直流输电	87
第四节 晶闸管装置的功率因数、谐波与对电网的影响	90
思考题与习题	94
第四章 全控型电力电子器件	95
第一节 电力晶体管 (GTR)	95
第二节 可关断晶闸管 (GTO)	103
第三节 功率场效应晶体管 (Power MOSFET)	107
第四节 绝缘栅双极晶体管 (IGBT)	114
第五节 电力电子器件的缓冲电路	123
第六节 其它新型电力电子器件	127
思考题与习题	133
第五章 直流斩波电路 (Chopper)	134
第一节 直流斩波的工作原理	134
第二节 直流斩波器基本电路	135
第三节 普通晶闸管组成的直流斩波电路	139
第四节 全控型器件组成的斩波电路应用实例	142
第五节 多相多重斩波电路	143
第六节 间接直流交流电路	145
小 结	148
思考题与习题	149
第六章 交流调压电路	151
第一节 双向晶闸管 (Bidirectional Thyristor)	151
第二节 晶闸管交流开关	153
第三节 单相和三相交流调压电路	156
第四节 交流斩波调压电路	163
小 结	165
思考题与习题	165
第七章 变频电路	167
第一节 变频电路的基本概念	167
第二节 谐振型逆变电路	170
第三节 三相逆变器	173
第四节 脉宽调制 (Pulse Width Modulation) 技术	184
第五节 交流变频调速原理	187
* 第六节 电力电子电路的计算机分析与	

仿真	189	实 验	213
小 结	194	实验一 锯齿波同步触发电路的研究 ...	213
思考题与习题	194	实验二 三相全控桥式整流电路的	
第八章 典型电力电子装置介绍	196	研究	214
第一节 应用 IGBT 器件的开关稳压		实验三 IGBT 斩波电路的研究	218
电源	196	附 录 实验装置介绍	220
第二节 不间断电源 (UPS)	201	参考文献	222
第三节 晶闸管中频电源	210		

绪 论

一、“电力电子技术”概述

以电力为对象的电子技术称为电力电子技术，它是一门利用各种电力电子器件，对电能进行电压、电流、频率和波形等方面的控制和变换的学科。

电力电子技术包括电力电子器件、电路和控制三个部分，是横跨电力、电子和控制三大电气工程技术之间的交叉学科，是目前最活跃、发展最快的一门新兴学科。半导体电子技术发展至今已形成两大技术领域，即以集成电路为核心的微电子技术和以功率半导体器件（亦称电力电子器件）为核心的电力电子技术，前者主要用于信息处理，向小功率发展，后者主要用于对电力的处理，向大功率多功能发展。

由于电力电子器件具有体积小、重量轻、容量大、损耗小、寿命长、维护方便、控制性能好以及可采用集成电路制造工艺等优点，用它组成的装置具有可靠性高、节能、性能好等优点。近半个世纪来，各种电力电子新器件不断涌现，应用范围已从传统的工业、交通、电力等部门，扩大到信息通信、家用电器以至宇宙开发等领域。实际上，电力电子技术的发展已不局限于高电压大电流的工业范畴，当你开车、乘电梯、使用计算机、打开空调、用微波炉、使用冰箱、用手携电话、看电视听音乐时，你都在与电力电子技术打交道，电力电子技术已发展为一种无所不在的技术。

电力电子器件的发展可分为两个阶段：

(1) 传统电力电子器件 主要是功率整流管与晶闸管（曾称可控硅），属于不控与半控器件。自1957年生产第一只晶闸管以来，现已由普通晶闸管衍生出快速晶闸管、逆导晶闸管、双向晶闸管、不对称晶闸管等品种，器件的电压、电流等技术参数均有很大提高，单只普通晶闸管的容量已达8000V、6000A。此类器件通过门极只能控制开通而不能控制关断，另外它立足于分立元件结构，工作频率难以提高，因而大大限制了其应用范围。但是晶闸管器件价格相对低廉，在大电流、高电压的发展空间依然较大，目前以晶闸管为核心的设备仍然在许多场合使用，晶闸管及其相关知识目前仍是初学者的基础。

(2) 现代电力电子器件 80年代以来，将微电子技术与电力电子技术相结合，研制出新一代高频、全控型器件称为现代电力电子器件。主要有功率晶体管（GTR），可关断晶闸管（GTO）、功率场控晶体管（MOSFET）、绝缘栅双极晶体管（IGBT）、MOS门极晶闸管（MCT）等。最有发展前途的是绝缘栅双极晶体管（IGBT）与MOS门极晶闸管（MCT），两者均为场控复合器件，工作频率可达20kHz。目前IGBT器件已取代GTR，而MCT将可能会取代晶闸管与GTO，功率MOS在低压高频变流领域仍有发展潜力。

二、电力电子技术的主要功能与应用

电力电子电路是以电力电子器件为核心，通过对不同电路的各种控制来实现对电能的转换和控制，它的基本功能有以下四种：

1) 整流与可控整流电路亦称交流、直流（AC/DC）变换电路，把交流电变换为固定或可调直流。

2) 逆变电路亦称直流、交流 (DC/AC) 变换电路, 把直流电变换成频率固定或频率可调的交流电。如把直流电能逆变成 50Hz 的交流返送交流电网称为有源逆变, 把直流电能逆变为固定频率或频率可调的交流供给用电器则称为无源逆变。

3) 直流斩波电路亦称 DC/DC 变换电路, 其功能是把固定直流变换成可调或固定直流。

4) 交流调压与周波变换亦称 AC/AC 变换电路, 把恒定交流变换为可变交流称为交流调压, 把固定频率的交流变为频率可变的交流称为变频电路。

在实际使用时可将一种或几种功能电路进行组合, 上述四种电路的变换功能统称为变流, 因此电力电子技术通常也称为变流技术。也可形象通俗地讲, 变流技术是将电网的交流电, 所谓的“粗电”, 通过电力电子电路进行处理变换, 精炼到使电能稳定、波形、频率、数值、抗干扰性能等方面符合各种用电设备需要的“精电”过程。据先进国家 90 年代的统计资料, 超过 60% 以上的电能是经过电力电子技术处理变换后才使用的。

电力电子技术在生产与生活中的具体应用主要有: 直流可调电源、电镀、电解、加热、照明控制与节能照明、不停电电源 (UPS) 与开关电源、充电、电磁合闸、电机励磁、电焊接、电网无功与谐波补偿、高压直流输电、光电池与燃料电池变换、固态断路器、感应加热、电机直流调速与变频交流调速、电力牵引 (地铁机车、矿山机车、城市电车、电瓶车、电动汽车)、汽车电气、计算机及通信电源, 以及各类家电与便携式电器等。

三、电力电子技术的发展

(一) 电力电子器件的发展

器件是电力电子技术的基础, 也是电力电子技术发展的动力, 电力电子技术的每一次飞跃都是以新器件的出现为契机的。电力电子器件的发展方向主要在以下六个方面:

(1) 大容量化。应用微电子工艺, 使单个器件的电压、电流容量进一步提高, 以满足高压大电流需要。

(2) 高频化。采用新材料、新工艺, 在一定的开关损耗下尽量提高器件的开关速度, 使装置运行在更高频率。频率提高不仅可提高系统的性能、改善波形, 而且大大减少装置的体积与重量, 因此高频器件的技术性能指标用容量 \times 工作频率来衡量。

(3) 易驱动。由电流驱动发展为电压驱动, 大力发展 MOS 结构的复合器件如 IGBT、MCT。由于控制驱动功率小, 因此可研制专用集成驱动模块, 甚至把驱动与器件制作于一个芯片, 以便更适合中小功率控制。

(4) 降低导通压降。研制出比肖特基二极管正向压降还低的器件以提高变流效率、节省电能, 特别适用于便携式低压电器。

(5) 模块化。采用制造新工艺如塑封化、表面贴装化和桥式化, 将几个器件封装在一起以缩小体积与减少连线。如几个 IGBT 器件与续流管以及保护、检测器件、驱动等组成桥式模块, 称智能器件, 缩写为 IPM (Intelligent Power Module)。

(6) 功率集成化。充分应用集成电路工艺, 将驱动、保护、检测、控制、自诊断等功能与电力电子器件集成于一块芯片, 发展为功率集成电路 PIC (Power Integrated Circuit), 实现集成电路功率化、功率器件集成化, 使功率与信息集成在一起, 成为机电一体化的接口, 并逐步向智能化 (Smart PIC) 方向发展。

(二) 变流电路与控制的发展

传统电力电子技术以整流为主导, 以移相触发 (相控)、PID 模拟控制方式为主。80 年

代高频全控器件的出现，使逆变、斩波电路的应用日益广泛。由于逆变、斩波电路中都需要直流电源，因此整流电路仍占重要地位。在逆变、斩波电路中，以斩控形式的脉宽调制(PWM)技术大量应用，使变流装置的功率因数提高、谐波减少、动态响应快。特别是以微处理器实现的数字控制替代了模拟控制，并应用了静止旋转坐标变换的矢量控制，使电力电子技术日臻完善。

电力电子技术在 21 世纪的主要研究方向之一是实现电力电子装置的所谓“无公害即绿色化”，其含义是：装置 $\cos\phi = 1$ 、输入电流正弦无谐波，电压、电流过零切换，以实现开关损耗降为零且避免装置对电网与负载的电磁辐射和射频干扰。

四、课程性质与学习方法

电力电子技术是一门专业基础性质很强且与生产实际应用紧密联系的课程，在高等学校电气工程类专业中被确定为主干课程。

学习本课程时，要着重物理概念与基本分析方法的学习，理论要结合实际，尽量做到器件、电路、应用三者结合。在学习方法上要特别注意电路的波形与相位分析，抓住电力电子器件在电路中导通与截止的变化过程，从波形分析中进一步理解电路的工作情况，同时要注意培养读图与分析能力，掌握器件计算、测量、调整以及故障分析等方面的实践能力。

本课程涉及高等数学、电工基础、电子技术、电机拖动等知识，学习时需要复习相关课程并综合运用所学知识。

第一章 功率二极管、晶闸管及单相相控整流电路

第一节 功率二极管 (Power Diode)

完全纯净的半导体晶体在常温下可以激发出少量自由电子 (Power Diode) 和相应数量的空穴, 这两种不同极性的带电粒子统称为载流子, 空穴的出现是半导体区别于导体的一个显著特点。

在纯净半导体内掺入微量杂质如五价元素后, 在晶体中出现多余电子使自由电子数远大于空穴数, 此类材料称 N 型半导体, 同样在半导体中掺入三价元素后, 晶体中出现多余空穴称为 P 型半导体。N 型半导体中的电子与 P 型中的空穴称为多数载流子简称多子, 另一类称为少数载流子简称少子, 这种有不同极性载流子参与导电的器件统称为双极型器件。根据掺入杂质的多少可控制多子的浓度, 但不管掺入多少杂质, 半导体中正负电荷总量均相等且保持电中性。

现将一种半导体基片 (N 型或 P 型) 通过扩散或合金工艺, 在其上形成相反导电类型, 这两部分即形成 PN 结。PN 结在交界面处空穴与电子浓度的差异, 使载流子从高浓度向低浓度扩散。图 1-1a 即为 PN 结形成原理, P 区的空穴扩散到 N 区, N 区中的电子扩散到 P 区, 在交界面出现空间电荷区, 形成由 N 区指向 P 区的内电场。内电场阻止多子继续扩散同时又帮助少子向各自对方漂移, 在一定温度下, 扩散与漂移达到动态平衡, 空间电荷达到稳定值。

PN 结是半导体器件的核心, 掌握 PN 结的性质是分析器件的基础。PN 结的主要特性是单向导电性, 当 PN 结外加正向电压 (P 正 N 负) 时, 外电压产生的外电场削弱内电场, 使扩散大于漂移, 空间电荷减少, PN 结变窄, 使正向电流不断流过, 称为正向导通, 此时 PN 结表现为低阻, 其电压降只有 1V 左右。PN 结加上反向电压 (P 负 N 正) 时, 外电压加强内电场, 从而强烈阻止 PN 结两边的多子扩散, 使 PN 结变宽, 仅有少子通过漂移形成极小的反向漏电流, PN 结表现为高阻称为反向阻断, 这就是 PN 结的单向导电特性。由 PN 结组成的二极管是结构最简单、应用最广的电子器件, 是许多其它器件的基本组成部分。

功率二极管是允许电流较大电压较高的二极管, 为了缩小体积和减少连线, 除单管结构外已有模块结构, 即把几个管子集成为一个器件。由于

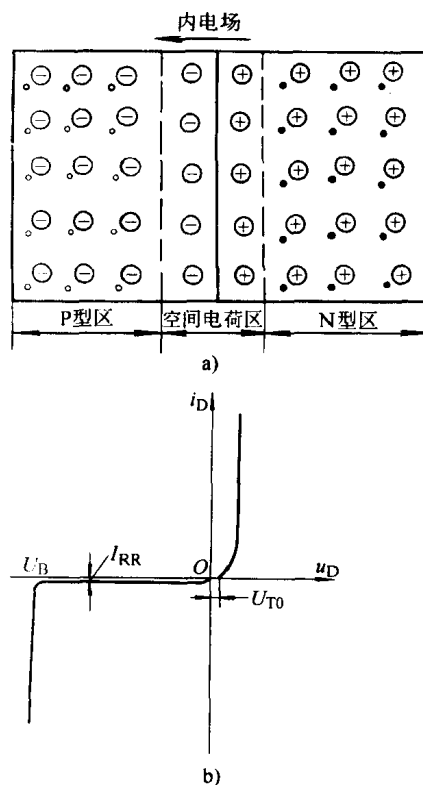


图 1-1 PN 结的形成与功率二极管正反向伏安特性

流过电流较大，故其引线及焊接电阻的影响较明显。为了提高反向耐压必须降低掺杂浓度，导致正向压降增大。任何电子器件耐压的提高都是牺牲其它性能指标来达到的。

功率二极管本身消耗功率，发热多，使用时必须十分重视管子的散热，应安装传热良好的散热器。目前功率电子器件常用的散热器冷却方式有自冷、风冷、液冷和沸腾冷（热管）四种，功率二极管的正常运行，在很大程度上取决于散热器的合理选配以及器件与散热器之间的装配质量。

功率二极管的伏安特性如图 1-1b 所示，当外加正向电压大于 U_{T0} （门槛电压）即克服 PN 结内电场后管子才开始导通，正向导通后其压降基本不随电流变化。反向工作时，当反向电压增大到 U_B （击穿电压），使 PN 结内电场达到雪崩击穿强度时，反向漏电流 I_{RR} 剧增，导致二极管击穿损坏。

用于工频整流的功率二极管亦称整流管，国产型号为 ZP，主要参数说明如下：

(1) 额定正向平均电流 I_F （额定电流）指管子长期运行在规定散热条件下，允许流过正弦半波时的最大平均电流，将此电流值配规定系列的电流等级即为管子的额定电流。 I_F 受发热限制，因此在使用中按有效值相等来选取管子电流定额。对应额定电流 I_F ，其有效值为 $1.57I_F$ 。

(2) 反向重复峰值电压 U_{RRM} （额定电压）指管子反向能重复施加的最高峰值电压，此值通常为击穿电压 U_B 的 $2/3$ 。

(3) 正向平均电压 U_F 在规定条件下，管子流过额定正弦半波电流时，管子两端的正向平均电压亦称管压降，此值比直流压降小。

(4) 反向漏电流 I_{RR} 对应于反向重复峰值电压时的漏电流。

ZP 系列参数列于表 1-1。由于工作于工频，故动态参数不标出。

表 1-1 部分功率二极管主要性能参数

型 号	额定正向平均 电流 I_F/A	反向重复峰值 电压 U_{RRM}/V	反向电流 I_R/mA	正向平均电压 U_F/V	反向恢复时间 t_{rr}	备 注
ZP1~4000	1~4000	50~5000	1~40	0.4~1		
ZK3~2000	3~2000	100~4000	1~40	0.4~1	<10 μ s	
10DF4	1	400		1.2	<100ns	
31DF2	3	200		0.98	<35ns	
30BF80	3	800		1.7	<100ns	
50WF40F	5.5	400		1.1	<40ns	
10CTF30	10	300		1.25	<45ns	
25JPF40	25	400		1.25	<60ns	
HFA90NH40	90	400		1.3	<140ns	模块结构
HFA180MD60D	180	600		1.5	<140ns	模块结构
HFA75MC40C	75	400		1.3	<100ns	模块结构
HFA280NJ60C	280	600		1.6	<140ns	模块结构

(续)

型 号	额定正向平均 电流 I_F/A	反向重复峰值 电压 U_{RRM}/V	反向电流 I_R/mA	正向平均电压 U_F/V	反向恢复时间 t_{rr}	备 注
MR876 快恢复功率二极管 (美国 MOTOROLA 公司)	50	600	$50\mu A$	1.4	$< 400ns$	
MUR10020CT 超快恢复功率二极管 (美国 MOTOROLA 公司)	50	200	$25\mu A$	1.1	$< 50ns$	
MBR30045CT 肖特基功率二极管 (美国 MOTOROLA 公司)	150 (单支)	45	0.8mA	0.78	≈ 0	

功率二极管在电力电子变流电路中起着不同的作用，在交直流变换中作为整流器件，在电感滤波及具有电感元件的电路中作为续流器件，在逆变电路中作为反向充电和能量传输，在各类变流器中作为隔离、箝位、保护和高频整流。随着高频全控型电力电子器件的大量应用，功率二极管的工作频率可高达几百 kHz，要求二极管能快速地在导通与阻断之间转换。用在高频场合的二极管称为快恢复二极管亦称开关二极管，对此类二极管的要求是：正向瞬态压降小、反向恢复时间短、反向恢复电荷少以及具有软恢复特性。

开关二极管可分四种工作状态：静态为正向导通和反向阻断，动态为开通过程和关断过程。二极管工作状态转换的特性称为开关特性，现将关断特性与开通特性分析如下：

(1) 关断特性 图 1-2a 为开关二极管转换电路，当 S 从“1”位置立即倒向“2”时，由于 PN 结内存在大量载流子需要排除和复合，所以反向阻断能力的恢复需要经过一段时间，在未恢复阻断之前二极管相当于短路状态。其关断过程如图 b 所示， t_f 时刻开关 S 倒向“2”，导通的二极管突加反压 U_R ，正向电流以 di_f/dt 的速率减小， t_0 时二极管电流降为零，电流变化率的大小为 $-U_R/L$ ， L 为电路电感。 t_1 时结内 Q_1 电荷已被抽走，反向电流达最大值 I_{RM} ，在此以前二极管仍为正偏， t_1 时刻后管子开始恢复反向阻断，反向恢复电流迅速减小，其 di_{rr}/dt 值较大，在电感 L 中产生较高电动势，此电动势与电源电压叠加，使二极管承受很高的反向电压 U_{RM} 。

t_2 时刻（反向电流降为 10% I_{RM} 时）后，反向恢

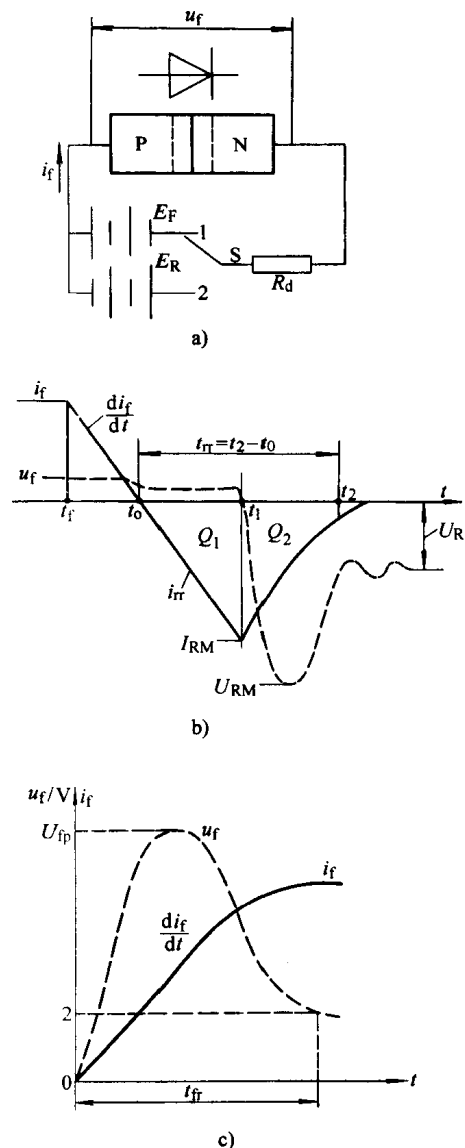


图 1-2 二极管转换电路与开关特性

a) 转换电路 b) 关断特性 (反向恢复)
c) 开通特性 (正向恢复)

复电流 i_{rr} 逐渐减小为零, 电荷 Q_2 也被抽空, 二极管承受静态反向电压 U_R , 关断结束。($t_2 - t_0$) 时间定义为反向恢复时间, 用 t_{rr} 表示, 是开关管的重要参数, 反向恢复时间很短的二极管称快恢复二极管 (FRD——Fast Recovery Diode)。

影响反向恢复过程长短的主要因素是反向恢复电荷的大小, 其值为

$$Q_R = Q_1 + Q_2 = \int_{t_0}^{t_2} i_{rr} dt$$

Q_R 小则 t_{rr} 短, 这是快恢复二极管与整流管的根本区别。 t_{rr} 与 Q_R 的大小随开关前的正向电流、反向电流上升率、结温的增加而增加。在反向恢复期间, 二极管消耗的能量由 Q_R 与电感 L 的贮能来决定。为了减小损耗应选择 Q_R 小的二极管。

反向恢复电流的下降速度过大则会使反向峰值电压 U_{RM} 过高, 有时会出现强烈振荡致使管子损坏。通常用软、硬恢复的概念来表示 di_{rr}/dt 对反向特性的影响, 特性的软硬度 (亦称柔度系数) S_r 定义为

$$S_r = (t_2 - t_1) / (t_1 - t_0)$$

S_r 大为软恢复, 此类管子的反向峰值电压 U_{RM} 值也小, 如 $S_r = 0.3$ 属硬恢复器件, $S_r = 0.8$ 属软恢复器件。

(2) 开通特性 当图 a 开关 S 从“2”突然倒向“1”时, 必须先将原先变厚的空间电荷释放, 当正向电压上升到门槛电压 U_{TO} 以上时, PN 结才会有正向电流流过, 二极管的开通特性如图 1-2c 所示, 在开通过程中, 二极管两端会出现几伏到几十伏的正向峰值电压 U_{fp} , 它比稳态的管压降大得多, 且需要经过开通时间 (正向恢复) t_{fr} 后才恢复正常, 因此限制了正向电流上升率和开关速度。通常正向恢复时间 t_{fr} 比反向恢复时间 t_{rr} 小。

二极管开通过程中呈现的电感现象 (电流滞后电压) 除内部结构原因外, 还与引线长度、器材封装采用磁性材料等因素有关, 因此开通时二极管电流上升率越大, 峰值电压 U_{fp} 就越高, 正向恢复时间 t_{fr} 也越长。另外结温升高时 U_{fp} 、 t_{fr} 值也会增大。

目前市场供应的开关二极管除上述 PN 结构外, 还有一种 PIN 二极管, 其构造是在 PN 结中夹一层本征半导体。在同样容量时, PIN 管具有开通电压低、反向恢复时间短以及耐压高的优点, 不足之处是 PIN 管具有硬恢复特性, 而 PN 结结构的管子具有软恢复特性, 可根据不同要求进行选择。还有一类称为肖特基二极管, 常用 SBD 表示, 它是通过金属与半导体接触构成的, 其反向恢复时间极小且与反向 di/dt 值无关, 正向压降小, 典型值为 0.55V, 但反向漏电流较大, 电压不易做高, 因此多用在便携式低压整流装置中。

90 年代末出现同步整流, 在高频整流时用 MOS 管代替肖特基二极管, 其优点是效率可提高到 90% 以上, 价格比肖特基管下降约 50%, 管子通态电阻比肖特基管减少 1/2~1/3, 工作频率可达 1MHz, 特别适合便携式低电压电源, 极有发展前途。几种不同类型的功率二极管参数列于表 1-1 中。

下面举例说明开关二极管的应用。

在逆变电焊电源、开关电源中都有高频整流, 现以 20kHz 的高频全波整流为例, 电路与整流波形如图 1-3 所示, 如采用反向恢复时间为 $5\mu s$ 的普通整流管会出现以下三种不正常情况: ①反向恢复时间的影响。由于是 20kHz 的高频整流, 周期为 $50\mu s$, 因此当电路在 t_1 时刻换相时, VD_2 管开始承受正向电压而导通, 但 VD_1 因存在反向恢复时间, 所以在 t_{rr}

时间内仍不能加上反压，致使在变压器二次侧 VD_1 、 VD_2 环路中，出现很大的反向恢复电流，如图 a 中虚线所示，输出整流电压近似降为零，使直流输出电压下降。②二极管正向恢复过程中会出现正向动态压降可能高达几伏甚至几十伏，导致二极管在开通过程中的电压损失，也使输出电压的下降。③由于换相时在变压器二次侧出现不经过负载的环流，相当于变压器短路，因此使高频整流管以及产生高频交流的全控器件过流，发热严重，必须降低容量使用。上述三种影响均随交流频率的增加和二极管正、反向恢复时间的延长而变得严重。

从以上分析可见，工作在高频状态的二极管，必须选用快恢复的开关二极管，频率很高时要选用反向恢复时间短的超快恢复二极管。

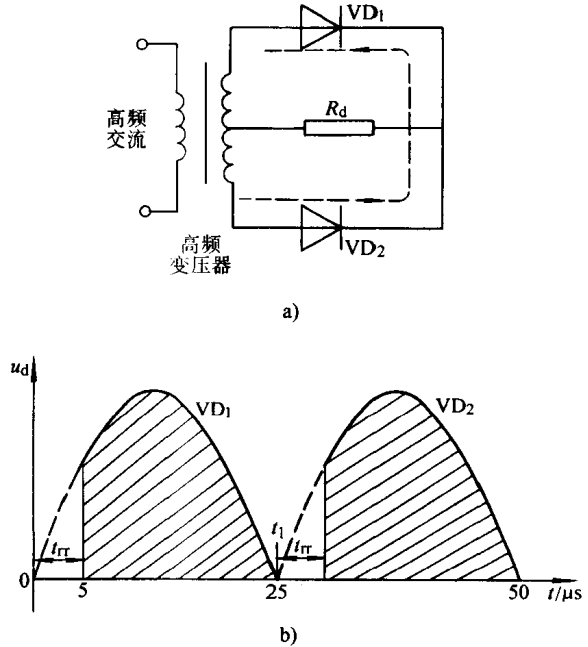


图 1-3 整流管的反向与正向恢复时间对高频整流的影响

第二节 晶闸管 (Thyristor)

晶闸管全称晶体闸流管，曾称可控硅 (Silicon Controlled Rectifier)，简称 SCR。1957 年问世后逐步形成新兴的电力电子学科。晶闸管在六七十年代获得迅速发展，除器件的性能与电压、电流容量不断提高外，还派生出快速晶闸管、可关断晶闸管、逆导晶闸管、光控晶闸管、双向晶闸管等，形成晶闸管系列。普通晶闸管应用最广，本书如不特别说明，所述晶闸管即为普通晶闸管。

一、晶闸管的结构与工作原理

晶闸管是一种功率四层半导体器件，有三个引出极，阳极 (A)、阴极 (K)、门极 (G)，常用的有螺栓式与平板式，外形与符号如图 1-4 所示。晶闸管是电力电子器件，工作时发热大，必须安装散热器。图 a 为小电流塑封式，电流稍大时也需紧固在散热板上，图 b、c 为螺栓式，使用时必须紧栓在散热器上，图 d 为平板式，使用时由两个彼此绝缘的散热器把其紧夹在中间。图 1-5 为晶闸

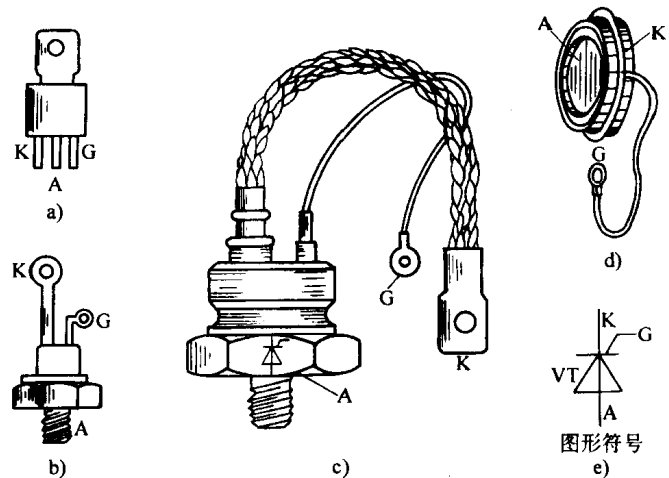


图 1-4 晶闸管的外形与符号

管散热器，图 a 适用于螺栓式，图 b、c 用于平板式。平板式两面散热效果好，电流在 200A 以上的管子都采用平板式结构。

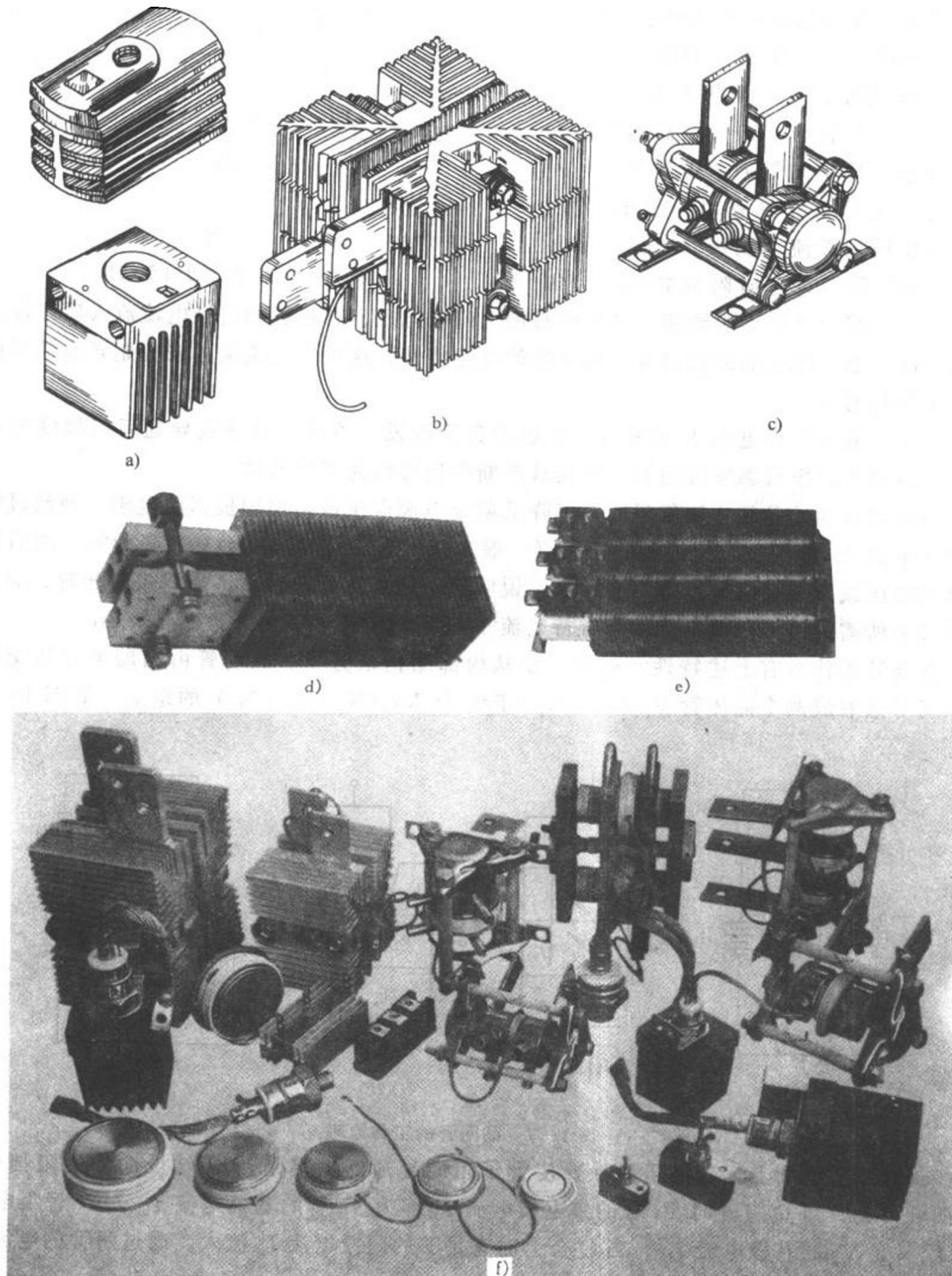


图 1-5 晶闸管的散热器及外形

a) 自冷 b) 风冷 c) 水冷 d) 平板式晶闸管热管散热 e) 三相整流热管/模块功率组件 f) 外形

晶闸管内部原理性结构如图 1-6 所示，管芯由四层半导体 ($P_1N_1P_2N_2$) 组成，形成三