

新版

21世纪

高职高专系列教材

# 电力电子技术

◎周渊深 宋永英 等编著

提供电子教案的增值服务

 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



21 世纪高职高专系列教材

# 电力电子技术

周渊深 宋永英 等编著



机械工业出版社

本书从电力电子技术应用的实际出发,系统地介绍了常用的不可控型、半控型和全控型电力电子器件的知识。并根据高等职业教育的特点,重点介绍了晶闸管整流、有源逆变和变频、交直流调压等电力电子电路。为强化高等职业教育的实践技能培养,本书新增了基于 MATLAB 的图形化仿真实验技术内容,安排了如器件测试、整流器的计算和调试、实验技能等实训知识。全书内容深入浅出,简明扼要,实用性较强。

本书既可作为高职高专电类专业的教材,也可供从事电力电子技术工作的工程技术人员参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

电力电子技术/周渊深等编著. —北京:机械工业出版社, 2005.8

(21世纪高职高专系列教材)

ISBN 7-111-16595-0

I. 电… II. 周… III. ①电器元件—高等学校: 技术学校—教材②电子元件—高等学校: 技术学校—教材 IV. ①TM503②TN6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 051564 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 胡毓坚

责任编辑: 李利健 版式设计: 张世琴

责任校对: 姚培新 责任印制: 洪汉军

北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2005年8月第1版·第1次印刷

787mm×1092mm  $1/16$ ·15印张·368千字

0 001—5 000册

定价: 22.00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) 68326294

封面无防伪标均为盗版

## 21 世纪高职高专电子技术专业系列教材 编委会成员名单

主任 曹建林

副主任 张中洲 张福强 祖 炬 董维佳  
俞 宁 蒋蒙安 吕何新 伍湘彬  
任德齐 华永平 吴元凯

委 员 (按姓氏笔画排序)

马 彪 邓 红 王树忠 王新新 尹立贤  
白直灿 包中婷 冯满顺 华天京 吉雪峰  
刘美玲 刘 涛 孙吉云 孙津平 朱晓红  
李菊芳 邢树忠 陈子聪 杨元挺 张立群  
张锡平 苟爱梅 姚建永 曹 毅 崔金辉  
黄永定 章大钧 彭文敏 曾日波 谭克清

秘书长 胡毓坚

副秘书长 戴红霞

## 出版说明

根据《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》中提出的高等职业院校必须把培养学生动手能力、实践能力和可持续发展能力放在突出的地位,促进学生技能的培养,以及教材内容要紧密结合生产实际,并注意及时跟踪先进技术的发展等指导精神,机械工业出版社组织全国40余所院校的骨干教师,对在2001年出版的“面向21世纪高职高专系列教材”进行了修订。

在几年的教学实践中,本系列教材获得了较高的评价。因此,在修订过程中,各编委会保持了第1版教材“定位准确、注重能力、内容创新、结构合理和叙述通俗”的编写特色。同时,针对教育部提出的高等职业教育的学制将由三年逐步过渡为两年,以及强调以能力培养为主的精神,制定出了本次教材修订的原则:跟上我国信息产业飞速发展的节拍,适应信息行业相关岗位群对第一线技术应用型操作人员能力的要求,针对两年制兼顾三年制,理论以“必须、够用”为原则,增加实训的比重,并且制作了内容丰富而且实用的电子教案,实现了教材的立体化。

针对课程的不同性质,修订过程中采取了不同的处理办法。核心基础课的教材在保持扎实的理论基础的同时,增加实训和习题;实践性较强的课程强调理论与实训紧密结合;涉及实用技术的课程则在教材中引入了最新的知识、技术、工艺和方法。此外,在修订过程中,还进行了将几门课程整合在一起的尝试。所有这些都充分地体现了修订版教材求真务实、循序渐进和勇于创新的精神。在修订现有教材的同时,为了顺应高职高专教学改革的不断深入,以及新技术新工艺的不断涌现和发展,机械工业出版社及教材编委会在对高职高专院校的专业设置和课程设置进行了深入的研究后,还准备出版一批适应社会发展的急需教材。

信息技术以前所未有的速度飞快地向前发展,信息技术已经成为经济发展的关键手段,作为与之相关的教材要抓住发展的机遇,找准自身的定位,形成鲜明的特色,夯实人才培养的基础。为此,担任本系列教材修订任务的教师,将努力把最新的教学实践经验融于教材的编写之中,并以可贵的探索精神推进本系列教材的更新。由于高职高专教育正在不断的发展中,加之我们的水平和经验有限,在教材的编审中难免出现问题和错误,恳请使用这套教材的师生提出宝贵的意见和建议,以利我们今后不断改进,为我国的高职高专教育事业作出积极的贡献。

机械工业出版社

## 前 言

电力电子技术是利用电力电子器件组成各种电力电子电路,对电力进行变换和处理的技术,是电工领域中最活跃的技术之一,许多现代高新技术均与电力电子技术有关。电力电子技术及其产业的进一步发展必将给现代生产和生活带来深远的影响。近年来,随着电力电子器件制造技术的进步,各种电力电子器件、电路层出不穷,电力电子技术在国民经济的许多部门得到广泛运用,电力电子设备的数量和品种急剧增长,生产第一线迫切需要大量的具有一定理论基础和技能的人员对其进行操作和维护。为了适应 21 世纪科技和经济发展对电力电子技术应用型人才的需求,我们编写了本教材。

本教材面向工程现场,培养高职高专电类专业的人才,使他们具有一定的电力电子装置的现场安装、调试、维护及故障处理能力;具有一定的电力电子装置的设计基础;掌握电力电子装置的仿真技术;具有继续学习交直流调速等课程的基础。本教材围绕高等职业教育的培养目标,详细介绍了生产中应用广泛的重要技术。教材减少了理论和数学推导的内容,增加了直观的图形、波形和实训内容,有利于学生掌握与生产技术有关的必要的基本技能和动手能力。本书既可作为高职高专电类专业的教材,也可供从事电力电子技术工作的工程技术人员参考。本课程建议授课学时为 48~56 学时,实验 8~10 学时。

除“绪论”外,本教材包括:第 1 章介绍功率二极管、晶闸管等不可控型和半控型电力电子器件;晶闸管单相整流电路和晶闸管简易触发电路。第 2 章介绍三相整流电路和与其配套的锯齿波触发电路、集成触发电路;重点介绍典型整流电路的组成、工作原理、工作波形和基本的参数计算,并对整流电路及工程调试方法作了详细的介绍。第 3 章介绍了常用的全控型电力电子器件,主要介绍器件的工作原理、特性、参数,驱动与缓冲电路等内容。第 4 章介绍了交直流调压电路,内容有以晶闸管为基础的交流调压和以全控型器件为基础的直流斩波电路。第 5 章介绍了有源逆变和变频,包括以晶闸管为主的有源逆变和无源逆变电路和以全控型器件为基础的 SPWM 逆变器等。第 6 章重点介绍了基于 MATLAB 软件的、图形化的电力电子仿真技术,这是作者教学、科研工作的总结,对学生更好地掌握电力电子技术和提高设计应用能力具有重要的作用。通过 MATLAB 仿真,可以解决教学实验设备短缺的困难,对提高教学效果起到事半功倍的作用。

全书由江苏淮海工学院周渊深、宋永英等编著。其中第 2 章和各章的实训内容由宋永英实验师编写,周渊深教授担任了其余章节的编写工作,朱希荣老师参加了本书的校稿工作,周玉琴同志绘制了全书插图。

本书的顺利出版,得到淮海工学院领导和机械工业出版社的大力支持和帮助,在此表示感谢。

对于书中存在的错误和不妥之处,请读者原谅,并提出宝贵意见。

为了配合本书的教学,机械工业出版社为读者提供了电子教案,读者可在机械工业出版社网站 [www.cmpbook.com](http://www.cmpbook.com) 上下载。

# 目 录

出版说明	
前言	
绪论	1
第 1 章 功率二极管、晶闸管及单相整流电路	7
1.1 功率二极管	7
1.1.1 功率二极管的结构和工作原理	7
1.1.2 功率二极管的伏安特性	7
1.1.3 功率二极管的主要参数	7
1.1.4 功率二极管的其他类型	8
1.2 晶闸管	9
1.2.1 晶闸管的结构	9
1.2.2 晶闸管的工作原理	10
1.2.3 晶闸管的特性	11
1.2.4 晶闸管的主要参数	12
1.3 晶闸管的其他派生元件	15
1.3.1 快速晶闸管(FST)	15
1.3.2 双向晶闸管(TRIAC)	15
1.3.3 逆导晶闸管(RCT)	16
1.3.4 光控晶闸管(LATT)	17
1.4 晶闸管单相可控整流电路	18
1.4.1 可控整流电路的分类和主要研究内容	18
1.4.2 单相可控整流电路	19
1.5 晶闸管的门极驱动及简易触发电路	33
1.5.1 晶闸管的门极驱动	33
1.5.2 晶闸管的简易移相触发电路	34
1.6 实训	38
1.6.1 功率二极管的型号和选择原则	38
1.6.2 晶闸管的型号、选择原则和简单测试	39
1.6.3 双向晶闸管的型号、选择原则和简单测试	42
1.6.4 单晶体管的简单测试	43
1.6.5 单晶体管触发电路和单相半波可控整流电路实训	43
1.7 思考题与习题	45
第 2 章 晶闸管三相整流电路、触发电路与工程计算	47
2.1 三相半波可控整流电路	47
2.1.1 三相半波可控整流电路(电阻性负载)	47
2.1.2 三相半波可控整流电路(阻感性负载)	50
2.1.3 三相半波共阳极可控整流电路	51
2.2 三相全控桥式整流电路	52
2.2.1 三相全控桥式整流电路(电阻性负载)	52
2.2.2 三相全控桥式整流电路(阻感性负载)	55
2.3 变压器漏抗对整流电路的影响	57
2.4 晶闸管触发电路	59
2.4.1 晶闸管对触发电路的要求	59
2.4.2 同步信号为锯齿波的触发电路	59
2.4.3 集成触发电路	63
2.4.4 触发电路的定相	68
2.5 整流器的工程计算及调试	69
2.5.1 整流器工程计算的基本内容	70
2.5.2 整流器的电参数计算	72
2.5.3 整流器的保护	80
2.6 实训	88

2.6.1	整流电路工程计算练习	88	3.5.3	功率模块与功率集成电路	121
2.6.2	晶闸管整流器运行调试	92	3.5.4	静电感应晶体管(SIT)	121
2.6.3	锯齿波同步移相触发电路 调试实训	96	3.5.5	静电感应晶闸管(SITH)	122
2.7	思考题与习题	97	3.6	思考题与习题	123
<b>第3章</b>	<b>全控型电力电子器件</b>	<b>99</b>	<b>第4章</b>	<b>交流调压与直流斩波</b>	<b>124</b>
3.1	门极可关断晶闸管(GTO)	99	4.1	交流调压的概念和交流 调压电路	124
3.1.1	GTO的结构和工作原理	99	4.1.1	单相交流调压电路	124
3.1.2	GTO的特性和主要参数	100	4.1.2	三相交流调压电路	127
3.1.3	GTO的驱动信号和驱动电路	101	4.1.3	晶闸管交流调功器和 交流开关	132
3.1.4	GTO的缓冲电路	102	4.2	晶闸管交流调压应用电路	133
3.2	电力晶体管(GTR)	103	4.2.1	晶闸管交流调压器 应用电路	133
3.2.1	GTR的结构与工作原理	103	4.2.2	晶闸管交流调功器 应用电路	134
3.2.2	GTR的特性和主要参数	103	4.2.3	晶闸管交流开关应用电路	135
3.2.3	GTR的二次击穿与安全 工作区	105	4.2.4	晶闸管交流调压应用实例	137
3.2.4	GTR的驱动信号和驱动电路	106	4.3	基本直流变换	138
3.2.5	GTR的缓冲电路	106	4.3.1	降压式直流斩波电路 (Buck Chopper)	138
3.2.6	GTR的保护电路	107	4.3.2	升压式直流斩波电路 (Boost Chopper)	139
3.3	功率场效应晶体管 (P-MOSFET)	108	4.3.3	升降压式直流斩波电路 (Boost-Buck Chopper)	140
3.3.1	P-MOSFET的结构和工作原理	108	4.3.4	Cuk 直流斩波电路	141
3.3.2	P-MOSFET的特性和参数	109	4.3.5	全桥式直流-直流 斩波电路	142
3.3.3	P-MOSFET对驱动信号的要求和 驱动电路	111	4.3.6	软开关的基本概念	143
3.3.4	P-MOSFET的缓冲电路和 保护电路	112	4.4	实训——三相交流调压 电路实训	145
3.4	绝缘栅双极型 晶体管(IGBT)	113	4.5	思考题与习题	146
3.4.1	IGBT的结构和工作原理	113	<b>第5章</b>	<b>有源逆变与变频电路</b>	<b>148</b>
3.4.2	IGBT的特性和参数	114	5.1	逆变的概念	148
3.4.3	IGBT的擎住效应与 安全工作区	116	5.2	有源逆变电路	148
3.4.4	IGBT对驱动信号的要求和 驱动电路	117	5.2.1	单相双半波有源逆变电路	148
3.4.5	IGBT的驱动保护电路	118	5.2.2	逆变失败与最小逆变角的 限制	150
3.5	其他新型电力电子器件	119	5.2.3	有源逆变的应用——两组晶闸管反 并联时电动机的可逆运行	152
3.5.1	MOS控制晶闸管(MCT)	119			
3.5.2	集成门极换流晶闸管(IGCT)	120			



5.3 无源逆变(变频)电路 .....	153	仿真 .....	197
5.3.1 变频概述及变频器的种类 .....	153	6.2 典型电力电子器件的仿真模型及 仿真实例 .....	200
5.3.2 交-交变频电路 .....	155	6.2.1 晶闸管的仿真模型及 仿真实例 .....	200
5.3.3 交-直-交变频电路 .....	159	6.2.2 GTO 的仿真模型及仿真实例 .....	203
5.4 正弦波脉宽调制(SPWM) 变频器 .....	171	6.2.3 IGBT 的仿真模型及仿真实例 .....	207
5.5 实训——三相桥式全控整流及 有源逆变电路实训 .....	181	6.2.4 MOSFET 的仿真模型及 仿真实例 .....	209
5.6 思考题与习题 .....	182	6.3 电力电子变流器中典型环节的 仿真模型 .....	212
<b>第 6 章 电力电子的 MATLAB 仿真</b> .....	184	6.3.1 同步 6 脉冲触发器的仿真模型 .....	212
6.1 MATLAB/Simulink/Power System 工具箱及应用简介 .....	184	6.3.2 PWM 发生器的仿真模型 .....	213
6.1.1 Simulink 工具箱简介 .....	184	6.3.3 通用变流器桥的仿真模型 .....	216
6.1.2 Power System 工具箱简介 .....	186	6.4 典型电力电子变流装置的 应用仿真 .....	217
6.1.3 Simulink/Power System 的 模型窗口 .....	189	6.4.1 晶闸管三相桥式整流器及 应用仿真 .....	217
6.1.4 Simulink/Power System 模块的基本操作 .....	192	6.4.2 晶闸管交流调压器及 应用仿真 .....	218
6.1.5 Simulink/Power System 系统 模型的操作 .....	195	6.4.3 晶闸管有源逆变器的仿真 .....	221
6.1.6 Simulink/Power System 子系统 的建立 .....	196	6.4.4 IGBT 构成的直流-直流变换器的 应用仿真 .....	226
6.1.7 Simulink/Power System 系统的		<b>参考文献</b> .....	230

# 绪 论

## 本章要点

- 电力电子器件分类及发展阶段
- 电力电子变换器的主电路和电能变换类型
- 电力电子变换器的控制方式
- 电力电子变流技术的发展与应用
- 本课程的学习要求

电力电子技术是建立在电子学、电力学和控制学三个学科基础上的一门边缘学科，它横跨“电子”、“电力”和“控制”三个领域，主要研究各种电力电子器件，以及由这些电力电子器件所构成的各种电路或变流装置，以完成对电能的变换和控制。它运用弱电（电子技术）控制强电（电力技术），是强弱电相结合的新学科。

电力电子技术研究的内容包括三个方面：电力电子器件、变流电路和控制电路。但作为一门课程，电力电子技术所讨论的内容包含器件与系统两大部分，在电力电子技术工程应用中，只需了解如何合理地选择和使用电力电子器件来构成各种变流装置。因此，本书内容侧重于器件的基本原理、特性和参数选择，以及由它们组成的变流器的主电路结构、控制及保护措施。

### 0.1 电力电子器件

电力电子变流技术的发展立足于电力半导体器件的发展。用作电能变换与控制的大功率半导体器件与用作信息处理的器件不同，一方面它必须有承受高电压、大电流的能力，另一方面是以开关模式为运行特征，因此通常被称为电力电子开关器件。电力电子器件有许多种类和不同的分类方式，按照其开通、关断的控制方式，一般可分为三大类。

#### (1) 不可控型

这类器件一般为二端器件，一端是阳极，另一端是阴极。其开关操作仅取决于施加在器件阳、阴极间的电压。正向导通，负向关断，流过其中的电流是单方向的。由于其开通和关断不能按需要控制，故这类器件称为不可控型器件，常见的有大功率二极管、快速恢复二极管及肖特基二极管等。

#### (2) 半控型

这类器件是三端器件，除阳极和阴极外，还增加了一个控制门极。半控型器件也具有单向导电性，但开通不仅需在其阳、阴极间施加正向电压，而且还必须在门极和阴极间输入正向控制电压，因此开通可以被控制。然而这类器件一旦开通，就不能再通过门极控制关断，只能从外部改变加在阳、阴极间的电压极性或强制阳极电流变成零才能使其关断，所以把它们称为半控型器件。这类器件主要有晶闸管及其派生器件（如双向晶闸管、逆导晶闸管）等。

#### (3) 全控型

这类器件也是带有控制端的三端器件，但控制端不仅可控制其开通，还能控制其关断，故称全控型。由于无需外部电路提供关断条件，仅靠器件自身控制即可关断，所以这类器件常被称为自关断器件。这类器件种类多，工作原理也不尽相同，是电力电子器件发展的主导方向。属于这一类的代表器件有电力晶体管（GTR）、门极可关断晶闸管（GTO）、功率场效应晶体管（Power MOSFET）和绝缘栅双极型晶体管（IGBT）等。

另外，按电力电子器件的驱动性质可以将器件分为电压型和电流型器件。电流型器件必须有足够大的驱动电流才能使器件导通，因而一般情况下需要较大的驱动功率，这类器件有普通晶闸管（TH）、电力晶体管（GTR）、门极可关断晶闸管（GTO）等；电压型器件的导通只需要有足够的电压和很小的驱动电流即可，因而电压型器件所需的驱动功率很小，这类器件有绝缘栅双极型晶体管（IGBT）、功率场效应晶体管（Power MOSFET）、场控晶闸管（MCT）等。

30多年来，随着半导体制造技术和变流技术的发展，一代一代的电力电子器件相继问世，使它的应用领域迅速扩大。表 0-1 分类列出了主要的电力电子器件。

表 0-1 主要的电力电子器件

电力电子器件	不可控型器件	功率二极管	普通整流二极管
			快恢复二极管
			肖特基整流二极管
			肖克莱二极管
			硅对称开关
	半控型器件 (非自关断)	晶闸管	普通晶闸管 (TH)
			快速晶闸管 (FST)
			双向晶闸管 (TRIAC)
			逆导晶闸管 (RCT)
			光控晶闸管 (LATT)
	全控型器件 (自关断)	晶体管	电力晶体管 (GTR)
			功率场效应晶体管 (Power MOSFET)
			绝缘栅双极型晶体管 (IGBT)
			静电感应晶体管 (SIT)
		晶闸管	门极可关断晶闸管 (GTO)
			场控晶闸管 (MCT)
			静电感应晶闸管 (SITH)

电力半导体器件 30 多年来的发展，可分为以下四个阶段：

第一阶段是以整流管、晶闸管为代表的发展阶段，这一阶段的半导体器件在低频、大功率变流领域中的应用占有优势，很快便完全取代了汞弧整流器。

第二阶段是以 GTO、GTR 等全控器件为代表的发展阶段，这一阶段的半导体器件虽仍使用电流型控制模式，但其应用使得变流器的高频化得以实现。

第三阶段是以功率 MOSFET、IGBT 等电压型全控器件为代表的发展阶段，此时的半导体

器件可直接用 IC (集成控制器) 进行驱动, 高频特性更好, 可以说器件制造技术已进入了和微电子技术相结合的初级阶段。

第四阶段是以 PIC、HVIC 等功率集成电路为代表的发展阶段, 目前正处在发展初期。这一阶段, 电力电子技术与微电子技术的结合更紧密了, 所使用的半导体器件是将全控型电力电子器件与驱动电路、控制电路、传感电路、保护电路、逻辑电路等集成在一起的高度智能化的功率集成电路, 它实现了器件与电路的集成, 强电与弱电、功率流与信息流的集成, 成为机和电之间的智能化接口、机电一体化的基础单元。预计 PIC 的发展将会使电力电子技术实现第二次革命, 进入全新的智能化时代。所有这一切都为高频变换技术的开发, 为变流器实现高频化、小型化、轻量化和节能、节材、提高效率与可靠性奠定了基础。

## 0.2 电力电子变流技术

### (1) 电力电子功率变换的基本类型

应用电力电子技术构成的变流装置, 按其功能可分为: AC/DC 变换、DC/AC 变换、AC/AC 变换和 DC/DC 变换。在某些变换装置中, 可能同时包含两种以上功能。

AC/DC 变换——把交流电压变换成固定或可调的直流电压, 即为 AC/DC 变换。如可控整流器。传统的 AC/DC 变换是利用晶闸管和相控技术, 依靠电网电压换流实现的。至今工业中应用的大多数仍是这类整流装置, 其电路结构早在闸流管时代已基本确定。相控晶闸管具有对称的阻断特性和较低的响应速度, 这类整流的特点是控制简单、运行可靠, 适宜大功率应用。相控整流器存在的问题是它所产生的低次谐波, 会对电网产生严重影响。

DC/AC 变换——把直流电变换成频率固定或可调的交流电, 即为 DC/AC 变换, 其变换装置通常称为逆变器。按电源性质可分为电压型和电流型; 按控制方式可分为六拍 (六阶梯) 方波逆变器、PWM 逆变器和谐振直流环节 (软性开关) 逆变器; 按换流性质可分为依靠电网换流的有源逆变和由自关断元件构成的无源逆变。逆变装置主要用于机车牵引、电动汽车和其他交流电动机调速、不间断电源 (UPS) 和感应加热。

AC/AC 变换——把频率、电压固定或变化的交流电变换成频率、电压可调或固定的交流电, 即为 AC/AC 变换, 其变换装置通常称为交-交变频器、交流调压器。传统的交-交变频采用晶闸管相控技术, 交-交变频器的新发展是基于 PWM 变换理论的矩阵式变换器。

DC/DC 变换——把固定的直流电压变换成可调或恒定的直流电压, 即为 DC/DC 变换。按变换电压体制可分为降压式、升压式和升降压式; 按线路拓扑可分为单端、双端及桥式电路。DC/DC 变换器广泛应用于计算机电源、各类仪器仪表、直流电动机调速及金属焊接等。

谐振型开关技术是 DC/DC 变换的新发展, 可减小变换器体积、重量, 并提高可靠性。这种变换器有效地解决了开关损耗问题。其中性能优良的是谐振直流环节变换器, 其变换原理是 DC/DC 变换的主要发展方向。

### (2) 电力电子变流器主电路

以电力电子器件为核心, 通过不同的电路结构和控制方式实现对电能的转换和控制的电路, 就是变流电路。

变流电路主要研究由不同电力电子器件所构成的各种典型功率变换电路的工作原理、主电路拓扑结构、分析方法、设计计算的基本手段、主电路开关元件的选择方法。换流过程是主电路研究的另一主要内容。电力电子变换器工作时, 各开关器件轮流导通向负载传递电源能量, 因此流向负载的电能一定要从一个或一组元件向另一个或另一组元件转移, 这个过程

叫做换流或换相。换流过程总是在一个开关被开通的同时关断原来导通着的开关。电力电子电路有四种换流方式：

电源换流——由电源电压极性改变向导通元件提供反向封锁电压使其关断。这种换流方式只适用于交流电源供电，以不控或半控开关器件组成的变流电路，如整流器等。

负载换流——由负载电压或电流极性改变向导通元件施加反向封锁电压使其关断。它用于直流供电、负载可振荡的直流-交流变换电路。

强迫换流——由外部电路向导通元件强行提供反向封锁电压或从导通元件控制极施加关断信号迫使其关断。这种方式常见于晶闸管直流-直流变换电路和所有斩控式变换电路。

无换相方式——负载电流因方向改变过零使原来导通元件自行关断。这种方式见于晶闸管交流电压控制器。

### 0.3 电力电子变流技术控制方式

控制电路的主要功能是为变换器中的功率器件提供门极（控制极）驱动信号。在控制电路中还应包括各种保护电路、电位隔离及驱动功率扩大，从而实现所需的能量控制与形式变换。电力电子电路控制方式一般都按器件开关信号与控制信号间的关系分类。

相控式——器件开通信号相位即导通时刻的相位，受控于控制信号幅度的变化。晶闸管相控整流和交流调压电路均采用这种方式，通过改变导通相位角以改变输出电压的大小。

频控式——用控制电压的幅值变化来改变器件开关信号的频率，以实现器件开关工作频率的控制。这种控制方式多用于直流-交流变换电路中。

斩控式——器件以远高于输入、输出电压工作频率的开关频率运行，利用控制电压（即调制电压）的幅值来改变一个开关周期中器件导通占空比，如 PWM，从而实现电能的变换与控制。自关断器件问世并投入使用前，这种控制方式仅用于直流电压控制器。现在采用自关断器件，通过这种控制方式可完成各种形式的电能变换与控制，并获得比移相控制、频率控制更好的整体性。

### 0.4 电力电子变流技术的发展

变流技术的发展已经历了以下三个阶段。

第一阶段是电子管、离子管（闸流管、汞弧整流器、高压汞弧阀）的发展与应用阶段，此时的变流技术属于整流变换，只是变流技术的一小部分。

第二阶段是硅整流管、晶闸管的发展与应用阶段，主要指晶闸管的应用阶段。随着器件制造水平的不断提高，变流装置保护措施的不断完善，使得硅整流管、晶闸管在变流装置中的应用技术日趋成熟。这一时期，随着整流管特别是晶闸管制造水平的不断提高，半导体变流技术所涉及的应用领域不断扩展。例如，快速晶闸管的开发大大促进了中频感应加热、熔炼、淬火电源（1~8kHz）的发展；为国防建设和高科技研究服务的晶闸管低频电源、400Hz 中频电源、高精度稳压电源与稳流电源相继开发出来。

第三阶段是全控型电力半导体器件的发展与应用阶段，是半导体电力变流器向高频化发展的阶段，也是变流装置的控制方式由移相控制（Phase Shift Control）向时间比率控制（Time Ratio Control，缩写为 TRC）发展的阶段。

TRC 控制方式一般有三种方式：即脉冲宽度调制（Pulse Width Modulation，缩写为 PWM）、脉冲频率调制（Pulse Frequency Modulation，缩写为 PFM）和混合调制（PWM + PFM）。PWM 方式因为调制频率固定，即调制周期  $T$  恒定（或基本不变），通过改变控制脉冲的占空

比  $D$  进行变换电路的调节，从而使滤波电路的设计比较简单，所以常用的 TRC 是 PWM 方式。

第三阶段的发展是随着全控型器件的发展而逐渐展开的。首先，GTO、GTR 等双极型全控器件的应用，使逆变、变频、斩波变换电路的结构大为简化，变换的频率可以提高到 20kHz 左右，为电气设备的高频化、小型化、高效、节能奠定了基础。但是 GTO、GTR 是电流型控制器件，控制电路功率大，且变换频率也不能很高。随着变换频率的不断提高，PWM 电路的缺点便逐渐暴露出来了。由于 PWM 电路属于硬开关电路，变换过程中电压和电流的快速变化会产生严重的电磁干扰，使电气电子设备的电磁兼容问题变得突出；另一方面，器件开通与关断损耗的问题逐渐棘手，严重制约了变换频率的进一步提高。于是建立在谐振、准谐振原理之上的软开关电路，即所谓的零电压开关 (ZVS) 与零电流开关 (ZCS) 电路问世。它是利用谐振进行换相的一种新型变流电路，实现了器件在零电压下的导通和零电流下的关断，从而大大降低了器件的开关损耗，这样，TRC 技术加软开关技术使得变换频率进一步得到提高。之后，功率 MOSFET、IGBT 等电压型控制的混合型全控器件的应用真正实现了高频化，使变换频率达到 100 ~ 500kHz，甚至更高，为电气电子设备更加高频化、小型化、高效、节能创造了条件。时至今日，晶闸管应用领域的绝大部分已经或即将被功率集成器件所取代，只是在大功率、特大功率的电化、电冶电源以及与电力系统有关的高压直流输电 (HVDC)、静止式动态无功功率补偿装置 (SVC)、串联可控电容补偿装置 (SCC) 等应用领域，晶闸管暂时还不能被取代。

电力电子技术是发展高新技术的基础，它拓宽了微电子技术、信息技术与传感器技术的应用领域，推动了新技术与高精技术的发展。随着科学技术的发展，它将发挥更为重要的作用。

### 0.5 电力电子变流技术的应用

电力电子技术是对电能的电压、电流、频率、波形和相位等基本参数进行功率处理和变换的现代工业电子技术。近年来，功率变流技术得到了迅猛发展，经过变流技术处理的电能在整个国民经济的耗电量中所占比例越来越大，成为其他工业技术发展的重要基础。电力电子技术应用非常广泛，下面概括举例说明。

1) 电源：不间断电源 (UPS)、电解电源、电镀电源、开关电源、微机及仪器仪表电源、航空电源、通信电源；交流电子稳压电源、脉冲功率电源；电力牵引及传动控制 (如电力机车、电传动内燃机车、矿井提升机、轧钢机传动) 用电源。

2) 电力系统应用：高压直流输电 (HVDC)。在输电线路的输送端将工频交流变为直流，在接受端再将直流变回工频交流。

3) 有源滤波器：由于电力电子装置的应用与普及，导致电网的谐波问题越来越严重。传统的无源滤波器由于其滤波性能较差，难以应付日益严重的电网“公害”。近年来，人们应用电力电子学技术找到了解决问题的途径，这就是有源滤波器。它主要是由电压源型或电流源型 PWM 变流器和一个基准器构成的谐波发生器。目的是产生大范围动态谐波和无功功率，重新“修补”电网波形。因此，有源滤波器不但可用来滤波，还可作为功率补偿器、电压稳定器及不对称负载的电压调节器。

4) 新能源利用：电力电子装置还用于太阳能发电及风力发电装置与电力系统的连接。

5) 节能：采用电力电子装置实现电动机调速，可以达到很高的效率。

6) 家用电器：种类繁多的家用电器，小至一台调光灯具、高频荧光灯具，大至通风取暖设备、微波炉及众多的电动机驱动设备，都离不开电力电子变流电路。各种 PWM 变流设备及专用功率集成电路将被广泛地用于现代化的家庭中，如家用的电冰箱及冰柜、暖气空调机、电子装置（个人电脑、其他家用电器）。

7) 电动汽车和电动自行车。

8) 照明：白炽灯发光效率低、热损耗大，现在广泛采用了荧光灯。但是，荧光灯要用扼流圈（电感）起辉，全部电流要流过扼流圈，无功电流大，不能达到有效节能。近年来，电子镇流器的出现，较好地解决了这个问题。电子镇流器是一个 AC-DC-AC 变换器。如用于 20~40W 的荧光灯，其体积要比相应功率的扼流圈小，可以减少无功电流和有功损耗，其节能效益很高。

总之，电力电子技术将渗透到航天、国防、工农业生产、交通、文教卫生、办公自动化乃至家庭的任何角落。伴随着器件与变流电路的进步，电力电子技术的应用领域也将会有新的突破。

## 0.6 本课程的任务与要求

电力电子变流技术是工业电气自动化专业的专业基础课。内容包括器件、电路、控制、应用几个方面，但应以电路为主。“器件”的内容主要包括常用器件的基本工作机理、特性、参数及它们的驱动和保护方法，目的是为了应用这些器件组成电路，故应注意掌握器件外部特性及极限额定参数的应用；“电路”主要研究由不同电力电子器件所构成的各种典型功率变换电路的工作原理、主电路拓扑结构、分析方法、设计计算的基本手段、主电路开关元件的选择方法；“控制”研究的是各种典型触发、驱动以及必要的辅助电路的工作原理和特点。

学习电力电子变流技术课程的基本要求是：

- 1) 熟悉和掌握常用电力电子器件的工作机理、特性和参数，能正确选择和使用它们。
- 2) 熟悉和掌握各种基本变换器的工作原理，特别是各种基本电路中的电磁过程，掌握其分析方法、工作波形分析和变换器电路的初步设计计算。
- 3) 了解各种开关元件的控制电路、缓冲电路和保护电路。
- 4) 了解各种变换器的特点、性能指标和使用场合。
- 5) 掌握基本实验方法、训练基本实验技能。

# 第 1 章 功率二极管、晶闸管及单相整流电路

## 本章要点

- 功率二极管、晶闸管的结构、工作原理、特性、参数
- 不同负载时，单相整流电路的电路结构、工作原理、波形分析和数量关系
- 用于单相整流电路的简易触发电路
- 电力电子器件的命名、选择原则和简单测试实训

## 1.1 功率二极管

功率二极管 (Power Diode) 又称电力二极管, 属于不可控型器件, 它不能通过控制信号控制其导通和关断, 只能由电源主回路控制其通断。它常作为整流元件, 用于不可控整流电路, 或作为续流元件, 用于电感性负载的续流。由于功率二极管器件的结构和工作原理简单, 工作可靠, 因而被广泛应用在不需要调压的整流场合。功率二极管还有许多派生器件, 如快恢复二极管、肖特基整流二极管等。

### 1.1.1 功率二极管的结构和工作原理

普通功率二极管的内部是由一个面积较大的 PN 结和两端的电极及引线封装组成的。功率二极管的结构和图形符号如图 1-1a、b 所示。在 PN 结的 P 型端引出的电极称为阳极 A (Anode), 在 N 型端引出的电极称为阴极 K (Cathode)。

功率二极管主要有螺栓型和平板型两种, 如图 1-2 所示。一般而言, 200A 以下的器件多数采用螺栓型; 200A 以上的器件则多数采用平板型。

功率二极管和电子电路中的二极管工作原理一样, 当二极管处于正向电压作用时, PN 结导通, 正向管压降很小; 当二极管处于反向电压作用时, PN 结截止, 仅有极小的漏电流流过二极管。

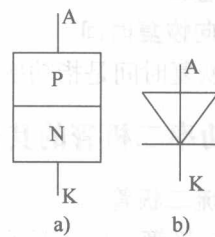


图 1-1 功率二极管的结构和图形符号

a) 功率二极管的结构 b) 功率二极管的图形符号

### 1.1.2 功率二极管的伏安特性

功率二极管的伏安特性是指功率二极管的两电极之间所加的电压与流过两电极间电流的关系特性。经实验测得的功率二极管伏安特性曲线如图 1-3 所示。

### 1.1.3 功率二极管的主要参数

#### 1. 额定正向平均电流 $I_{\text{AD}}$ (额定电流)



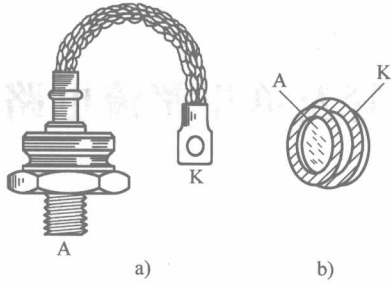


图 1-2 功率二极管的外形  
a) 螺栓型 b) 平板型

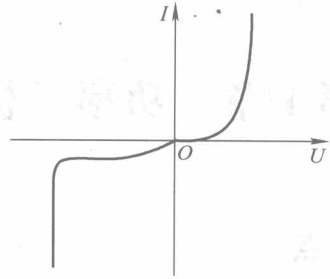


图 1-3 功率二极管的伏安特性曲线

功率二极管的正向平均电流  $I_{dD}$  是指在规定的环境温度和标准散热条件下，管子允许长期通过的最大工频半波电流的平均值。元件标称的额定电流就是这个电流。实际应用中，功率二极管所流过的最大有效值电流为  $I_D$ ，则其额定电流一般选择为：

$$I_{dD} \geq (1.5 \sim 2) \frac{I_D}{1.57}$$

式中的系数 1.5~2 是安全系数。

### 2. 正向压降 $U_D$ (管压降)

正向压降  $U_D$  是指在规定的温度下，流过某一稳定正向电流时所对应的正向压降。

### 3. 反向重复峰值电压 (额定电压)

反向重复峰值电压是功率二极管能重复施加的反向最高电压，通常是其雪崩击穿电压的 2/3。在选用功率二极管时，一般以其在电路中可能承受的反向峰值电压的两倍来选择反向重复峰值电压。

### 4. 反向恢复时间

反向恢复时间是指功率二极管从正向电流降至零起到恢复反向阻断能力为止的时间。

## 1.1.4 功率二极管的其他类型

### 1. 整流二极管

整流二极管多用于开关频率不高的场合，一般开关频率在 1kHz 以下。整流二极管的特点是电流定额和电压定额可以达到很高，一般为几千安和几千伏，但反向恢复时间较长。

### 2. 快恢复二极管

快恢复二极管的特点是恢复时间短，尤其是反向恢复时间短，一般在  $5\mu\text{s}$  以内，可用于要求很小反向恢复时间的电路中，如用于与可控开关配合的高频电路中。

### 3. 肖特基二极管

肖特基二极管是以金属和半导体接触形成的势垒为基础的二极管，其反向恢复时间比结型二极管的反向恢复时间更短，一般为 10~40ns。肖特基二极管在正向恢复过程中不会有明显的电压过冲击，在反向耐压较低的情况下正向压降也很小，明显低于快速恢复二极管，因此，其开关损耗和正向导通损耗都很小。肖特基二极管的不足是，当所承受的反向电压提高时，其正向电压有较大幅度提高。它适用于较低输出电压和要求较低正向管压降的变流器电路中。