



“十二五”职业教育国家规划教材修订版

“互联网+”新形态教材

电力电子技术

(第3版)

DIANLI DIANZI
JISHU

(DISANBAN)

主编 龚素文 李图平



 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

“十二五”职业教育国家规划教材修订版
“互联网+”新形态教材

电力电子技术（第3版）

主 编 龚素文 李图平
副主编 黄问贵 周红雨 张怡典
主 审 倪志莲

内 容 简 介

本书力求反映电力电子技术器件、电路、应用方面的新技术，注重实用电路及其应用的介绍。全书共7章，分别是整流电路、有源逆变电路、直流斩波电路、交流调压电路、无源逆变电路、变频电路、电力电子技术应用。在文字叙述和配备图例方面力求通俗易懂，深入浅出。每章附有复习思考题。

本书可作为高等职业院校相关专业的教学用书，也可供从事电力电子技术的工程技术人员参考。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

电力电子技术 / 龚素文, 李图平主编. —3版. —北京: 北京理工大学出版社, 2021.2 (2021.3月重印)

ISBN 978-7-5682-7646-7

I. ①电… II. ①龚… ②李… III. ①电力电子技术 IV. ①TM1

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第211305号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村大街5号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(总编室)

(010)82562903(教材售后服务热线)

(010)68948351(其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 唐山富达印务有限公司

开 本 / 787毫米×1092毫米 1/16

印 张 / 14.75

字 数 / 349千字

印 次 / 2021年2月第3版 2021年3月第2次印刷

定 价 / 42.00元

责任编辑 / 朱 婧

文案编辑 / 朱 婧

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 李志强

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

前言

电力电子技术是自动化专业及相关机电类专业一门重要的专业基础课。本书以能力培养为目标，力求反映电力电子技术器件、电路、应用方面的新技术，注重实用电路及其应用的介绍。

本书内容依据电力电子的基本功能，分别由整流、逆变、直流斩波、交流调压、变频几部分构成。编写时将电力电子器件（功率二极管、晶闸管、GTR、GTO、功率 MOSFET、IGBT 等）和应用实例（调光灯、直流电动机调速、电风扇无级调速器等）分别融入各章节中，并本着从简单到复杂的原则，层层深入。同时各部分抛弃较深的理论分析和复杂的数学推导，以应用为主，全面阐述各种电力电子器件的工作原理、参数、驱动与保护；电力电子应用电路的工作原理、计算方法和应用范围；应用典型装置的组成、工作原理和实际应用等。

内容在文字叙述和配备图例方面力求通俗易懂，深入浅出。每章末附有复习思考题，供读者学习后进行自测。

本书可作为高等职业院校相关专业的教学用书，也可供从事电力电子技术的工程技术人员参考。

全书由龚素文、李图平主编及统稿，并编写了绪论、第 4 章、第 7 章；黄问贵编写了第 5 章和第 6 章，并对本书中的实训课题进行设计和实际安装验证；第 1 章由张怡典编写；第 2 章和第 3 章由周红雨编写。教材二维码资源由龚素文、黄问贵共同完成。

倪志莲任主审，并提出了许多宝贵意见和建议，在此表示衷心的感谢。

由于水平所限，书中难免存在疏漏、不妥之处，恳请广大读者批评指正。

目 录

绪论	(1)
第1章 整流电路	(7)
1.1 功率二极管	(7)
1.1.1 功率二极管的结构	(7)
1.1.2 功率二极管的特性与参数	(7)
1.1.3 功率二极管的类型与使用	(10)
1.2 晶闸管	(10)
1.2.1 晶闸管的结构	(11)
1.2.2 晶闸管的工作原理	(11)
1.2.3 晶闸管的伏安特性	(12)
1.2.4 晶闸管的简单测试	(13)
1.2.5 晶闸管的主要参数	(13)
1.2.6 晶闸管的型号	(17)
1.3 单相可控整流电路	(18)
1.3.1 单相半波可控整流电路	(18)
1.3.2 单相桥式全控整流电路	(24)
1.3.3 单相桥式半控可控整流电路	(30)
1.4 晶闸管简单触发电路	(32)
1.4.1 对触发电路的要求	(32)
1.4.2 单结晶体管触发电路	(33)
1.5 三相可控整流电路	(37)
1.5.1 三相半波整流电路	(37)
1.5.2 三相桥式全控整流电路	(41)
1.5.3 三相桥式半控整流电路	(44)
1.6 可控整流电路的换相压降	(46)
1.6.1 换相期间的输出电压	(46)
1.6.2 可控整流电路的外特性	(48)
1.7 晶闸管的保护	(48)
1.7.1 过电压保护	(48)
1.7.2 过电流保护	(51)
1.7.3 电压与电流上升率的限制	(52)
1.8 晶闸管相控触发电路	(53)
1.8.1 正弦波同步触发电路	(53)
1.8.2 同步信号为锯齿波的触发电路	(54)
1.8.3 集成触发器	(55)
1.8.4 数字触发电路	(57)

1.9 触发脉冲与主电路电压的同步	(59)
1.9.1 触发电路同步电源电压的选择	(59)
1.9.2 防止误触发的措施	(60)
实训 1.1 简单晶闸管调光灯的安装、调试及故障分析处理	(60)
实训 1.2 单结晶体管触发电路和单相半波可控整流电路实训	(62)
实训 1.3 单相桥式半控带电动机整流电路实训	(64)
实训 1.4 晶闸管调光电路的安装、调试及故障分析处理	(66)
习题和思考题	(67)
第 2 章 有源逆变电路	(71)
2.1 有源逆变电路的工作原理	(71)
2.1.1 直流发电机-电动机系统电能的流转	(71)
2.1.2 有源逆变电路的工作原理	(72)
2.1.3 产生逆变的条件	(73)
2.2 三相有源逆变电路	(74)
2.2.1 三相半波有源逆变电路	(74)
2.2.2 三相全控桥有源逆变电路	(76)
2.2.3 逆变失败与最小逆变角的限制	(76)
2.3 有源逆变电路的应用	(78)
2.3.1 由晶闸管桥路供电、用接触器控制直流电动机的正反转	(78)
2.3.2 采用两组变流桥的可逆电路	(78)
2.3.3 交流电动机的串级调速	(80)
2.3.4 高压直流输电	(82)
实训 2.1 三相桥式全控整流及有源逆变电路实训	(83)
实训 2.2 晶闸管直流调速系统实训	(85)
习题和思考题	(87)
第 3 章 直流斩波电路	(89)
3.1 全控型电力电子器件	(89)
3.1.1 可关断晶闸管	(89)
3.1.2 电力晶体管	(93)
3.1.3 功率场效应管	(96)
3.1.4 绝缘栅双极晶体管	(99)
3.1.5 智能型器件 IPM	(105)
3.2 直流斩波工作原理	(105)
3.3 基本直流斩波电路	(106)
3.3.1 降压斩波电路	(106)
3.3.2 升压斩波电路	(107)
3.3.3 升、降压斩波电路	(108)
3.4 其他直流斩波电路	(109)
3.4.1 双象限斩波电路	(109)
3.4.2 四象限斩波电路	(110)

3.4.3	多相多重斩波电路	(111)
3.5	直流斩波电路应用	(111)
实训 3.1	直流斩波电路研究	(113)
实训 3.2	直流电源极性变换器安装、调试及故障分析处理	(115)
	习题和思考题	(118)
第 4 章	交流调压电路	(119)
4.1	双向晶闸管	(119)
4.1.1	双向晶闸管的结构和特征	(119)
4.1.2	双向晶闸管的触发电路	(122)
4.1.3	双向晶闸管简易测试	(125)
4.2	交流调压电路	(127)
4.2.1	单相交流调压电路	(128)
4.2.2	三相交流调压电路	(131)
4.2.3	交流斩波调压	(133)
4.3	交流电力电子开关	(134)
4.4	交流调压电路应用	(139)
4.4.1	三相自动控温电热炉	(139)
4.4.2	异步电动机的软启动	(140)
4.4.3	交流电动机的调压调速	(140)
实训 4.1	单相交流调压电路	(141)
实训 4.2	TM3 型电风扇无级调速器安装、调试及故障分析处理	(143)
	习题和思考题	(145)
第 5 章	无源逆变电路	(146)
5.1	无源逆变电路的工作原理	(146)
5.1.1	无源逆变基本工作原理	(146)
5.1.2	换流方式分类	(147)
5.1.3	逆变电路的其他分类方式	(149)
5.2	电压型逆变电路	(149)
5.2.1	电压型单相桥式逆变器	(149)
5.2.2	电压型三相桥式逆变器	(152)
5.2.3	电压型逆变电路的特点	(154)
5.3	电流型逆变电路	(155)
5.3.1	电流型单相桥式逆变器	(155)
5.3.2	电流型三相桥式逆变器	(158)
5.3.3	电流型逆变器的特点	(159)
5.4	多重逆变器和多电平逆变器	(159)
5.4.1	多重逆变器	(159)
5.4.2	多电平逆变器	(160)
5.5	脉宽调制型逆变器	(162)
5.5.1	PWM 控制的基本原理	(162)

5.5.2	PWM 逆变器及其优点	(164)
5.5.3	SPWM 控制电路	(168)
5.6	无源逆变电路的应用	(171)
5.6.1	工业感应加热	(171)
5.6.2	电磁炉	(175)
实训	单相正弦波脉宽调制 (SPWM) 逆变电路 (H 桥型)	(176)
	习题和思考题	(178)
第 6 章	变频电路	(179)
6.1	变频电路的基本概念	(179)
6.2	交-交变频电路	(179)
6.2.1	单相交-交变频电路	(179)
6.2.2	三相交-交变频电路	(181)
6.3	交-直-交变频电路	(182)
6.4	软开关技术	(184)
6.4.1	软开关的基本概念	(184)
6.4.2	软开关电路的分类	(187)
6.4.3	软开关技术的实现	(188)
6.5	变频电路在交流调速系统中的应用	(190)
6.5.1	变频调速中的变频器	(191)
6.5.2	SPWM 交流电动机变频调速	(194)
实训 6.1	变频器的认识与拆装	(195)
实训 6.2	三相异步电动机开环变频调速系统实训	(200)
实训 6.3	变频器的控制模式	(203)
实训 6.4	变频器常用参数的功能验证	(204)
	习题和思考题	(207)
第 7 章	电力电子技术应用	(208)
7.1	混合动力电动汽车	(208)
7.1.1	混合动力电动汽车发展现状	(208)
7.1.2	丰田的 Prius 系列的混合动力系统	(208)
7.1.3	电气系统结构及各部分电力电子装置	(209)
7.1.4	混合动力电动汽车对电力电子技术的要求	(211)
7.2	半导体照明技术	(212)
7.3	太阳能光伏发电系统	(215)
7.3.1	光伏发电	(215)
7.3.2	太阳能光伏发电系统	(215)
7.4	风力发电系统	(218)
7.4.1	风能	(218)
7.4.2	风力发电系统	(218)
实训	HK-008C 型开关电源安装、调试及故障分析处理	(223)
	参考文献	(226)



1. 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 3 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。正是依据这一特征，我国电力电子学会设计了如图 0-1 所示的会标。

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。

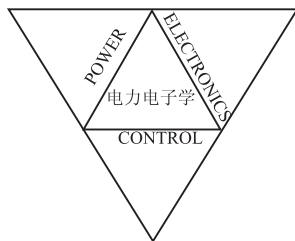


图 0-1 电力电子学会会标

2. 电能变换的基本类型

电力电子电路的根本任务是实现电能变换和控制。电能变换的基本形式有 4 种：AC/DC 变换、DC/AC 变换、DC/DC 变换、AC/AC 变换，在某些变流装置中，可能同时包含两种以上变换。

(1) AC/DC 变换。将交流电能转换为固定或可调的直流电能的电路即为 AC/DC 变换，也叫整流电路。由电力二极管可组成不可控整流电路；用晶闸管或其他全控型器件可组成可控整流电路。以往使用最方便的整流电路为晶闸管相控整流电路，其特点是控制简单、运行可靠、适宜大功率应用。存在的问题有网侧功率因数低、谐波严重。由全控型器件组成的 PWM 整流电路因具有高功率因数等优点，近年来得到发展与推广，应用前景十分广阔。

(2) DC/AC 变换。将直流电能转换为频率固定或可调的交流电能的电路，常称为逆变电路。逆变电路不但能使直流变成可调的交流，而且可输出连续可调的工作频率。完成逆变的电力电子装置称为逆变器。将逆变器的交流侧接到交流电网上，把直流电逆变成同频率的交流电返送到电网中去，称为有源逆变。它主要用于直流电机的可逆调速、绕线转子异步电动机的串级调速、高压直流输电和太阳能发电等方面。将逆变器的交流侧直接接到负载上，把直流电逆变成某一频率或可调频率的交流电供给负载，则称为无源逆变。主要在感应加热、不间断电源（UPS）等方面应用十分广泛，是构成电力电子技术的重要内容。

(3) DC/DC 变换。将一种直流电能转换成另一种固定电压或可调电压的直流电的电路即为 DC/DC 变换，也称为斩波电路。斩波电路大都采用 PWM 控制技术。它广泛应用于计算机电源、各类仪器仪表、直流电机调速及金属焊接等。

(4) AC/AC 变换。将固定大小和频率的交流电能转化为大小和频率可调的交流电能的电路，即为 AC/AC 变换或交流变换电路。交流变换电路可分为交流调压电路和变频电路。交流调压电路在维持电能频率不变的情况下改变输出电压幅值。它广泛应用于电炉温度控制、灯光调节、异步电动机的软启动和调速等场合。变频电路是将电网固定大小和频率的交流电变换成不同大小和频率的交流电。其中的交-交变频电路主要用于大功率低速

交流电动机调速系统；交-直-交变频电路是由不控整流结合无源逆变构成，主要用于交流电机变频调速等方面。

在实际使用时可将一种或几种功能电路进行组合，上述4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，精练到使电能稳定、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20世纪90年代的统计资料表明，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。

3. 电力电子技术的发展

(1) 电力电子器件的发展。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、打电话、看电视听音乐时，都在与电力电子技术打交道，电力电子技术已发展成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、不对称晶闸管等多种，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8 000 V、6 000 A。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。20世纪80年代以来，将微电子技术 with 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）、功率场效应管（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与MOS门极晶闸管，两者均为场控复合器件，工作频率可达20 kHz。目前IGBT器件已取代GTR，而MCT将可能取代晶闸管与GTO，功率MOSFET在低压高频变流领域仍有发展潜力。

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。电力电子器件的发展方向主要表现在以下6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，以满足高压大电流的需要。

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×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在一个芯片上，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，发展成为功率集成电路 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。

(2) 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。20 世纪 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，使交流装置的功率因数提高、谐波减少、动态响应加快。特别是以微处理器实现的数字控制替代了模拟控制，并应用于静止旋转坐标变换的矢量控制，使电力电子技术日臻完善。

4. 电力电子技术的应用

电力电子技术广泛应用于工业、交通、IT、通信、国防以及民用电器、新能源发电等领域。它的应用领域几乎涉及国民经济的各个工业部门。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、不间断电源 (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。全球 600 亿美元的电力电子产品市场已经形成，支撑着 5 700 亿美元的电器电子产品。电能系统的电子化，将在电能系统发电和用电两端，电能 100% 是通过电力电子变换器处理过。

(1) 交 - 直流电源。计算机高效绿色电源；电解、电镀等应用领域中的低电压大电流可控直流电源；各类高性能的不间断供电电源；各类恒频、恒压通用逆变电源。广泛应用于航天、航空、船舶、车辆、军事装备等特殊应用领域中作为独立的交流通用电源；各类低压直流开关电源。广泛应用于通信、计算机等领域，给电子设备、仪器的电子电路供电；蓄电池充电电源；中频或高频感应加热电源；大功率脉冲电源、激光电源；燃料电池或太阳能光 - 电能转换系统输出的恒压直流或恒频、恒压交流电源；抽水储能发电站、超导磁体储能、磁悬浮运载工具等高压特大容量的电力电子变换电源。

(2) 电气传动与控制。电动机调速是电力电子在电动机控制中的重要应用。直流电动机变速传动控制是利用整流器或斩波器获得可变的直流电源，对直流电动机电枢或励磁绕组供电，实现控制电动机转速和转矩，达到直流电动机的变速传动控制。交流电动机变速传动控制则是利用逆变器或交 - 交直流变频器对交流电动机供电，通过改变逆变器或交 - 直流变频器的频率、电压和电流，实现经济、有效地控制交流电动机的转速和转矩，来达到交流电动机的变速传动。

电力电子技术的迅猛发展促使电动机控制技术有了突破性的提高，不仅能给电机提供良好的调速性能，还能大大节约能源。以下 4 种类型的电动机传动与电力电子技术密切相关。

① 工艺调速传动。这类传动要求机器按一定的工艺要求实施运动控制，以保证最终

产品的质量、产量和劳动生产率。

② 节能调速传动。在各行各业中, 风机、水泵等用交流电动机来拖动的负载, 其用电量占我国工业用电量的 50% 以上。如果我国所拥有的风机、水泵全面采用变频调速后, 就可节约电能 30% 以上, 每年节电达到数百亿千瓦时。

③ 牵引调速传动。如电动汽车及各种电瓶车、地铁及机车牵引; 各类起重机及矿井提升机、电梯、船舶推进系统等, 既可提高运输效率、显著节能, 又可减少污染、保护环境。

④ 精密调速和特种调速。数控机床的主轴传动和伺服传动是现代机床的不可分割部分, 雷达火炮的同步联动等军事应用都要求电动机有足够的调速范围 (如 1: 10 000 以上) 和控制精度。

(3) 电力系统。在电力系统中, 电压是衡量电能质量的一个重要指标。随着电力电子技术的发展, 电力电子设备已开始进入电力系统并为解决电能质量控制提供了技术手段。

① 新型直流输电技术。新一代的直流输电是指进一步改善性能、大幅度简化设备、减少换流站占地、降低造价的技术。直流输电性能创新的典型例子是轻型直流输电系统 (Light HVDC), 它采用 GTO、IGBT 等可关断的器件组成换流器。省去了换流变压器, 整个换流站可以搬迁, 可以使中等容量的直流输电在较短的输送距离内也能与交流输电竞争。

② 电力电子补偿控制器。利用现代电力电子技术, 在电力系统中引入大功率半导体高频开关型电力电子补偿控制器, 可以对电力系统的谐波、无功功率、潮流、电压瞬变、节电电压的大小和相位以及电力系统的瞬时功率平衡等进行快速、有效地调节和控制。

将开关型电力电子变换器电流源、电压源, 适当地接入电力系统就可构成谐波电流补偿器、谐波电压补偿器、无功功率补偿器、电网节电电压控制器、电能存取控制器、瞬变电压抑制器。电力补偿器、调节器和控制器可以改变电网等效负载的感抗、容抗和电阻; 可以补偿谐波电流和谐波电压, 抑制和补偿瞬态电压变化; 可以调控电网负载的基波电压的大小和相位; 可以改变输电线路的有功功率和无功功率, 并对电力系统的功率平衡进行快速、灵活、有效地调节和控制。

引入了大功率半导体开关型电力变换器、补偿器、控制器以后, 原有电力系统的结构将发生重大变化。发电、输配电和电力应用都将获得更好的技术经济效益、更高的安全可靠、更灵活有效的控制特性和更优良的供电质量。随着现代电力电子技术的不断发展和电子技术在电力系统领域中的广泛应用, 传统的电力系统将成为一个运行更安全可靠、经济, 控制更灵活的柔性电力系统, 传统的电力技术将发生革命性的变革。

电力电子技术应用的新型领域及未来的发展方向表现在以下几个方面。

① 环境保护。现代社会对环境造成了严重的污染, 温室气体的排放引起了国际社会的普遍关注。一个人的身体一天排出的二氧化碳约为 1 kg, 实际上, 现代社会大量的能源消耗是温室气体排放的主要原因, 这使得全球人均对环境排放的二氧化碳量是人身体排放二氧化碳量的 10 倍。而发达国家的长期工业化过程又是造成温室气体问题的重要因素。例如, 美国人均排放二氧化碳量是人身体排放二氧化碳量的 56 倍; 日本人均排放二氧化碳量是人身体排放二氧化碳量的 25 倍。改革开放以来, 我国的能源消费量急剧上升, 二氧化碳排放量也有较大增加。国际能源署 (IEA) 发布报告称, 受能源需求激增和极端天气等因素影响, 2018 年全球二氧化碳排放量创历史新高, 达到 330 亿吨。根据研究机构推算, 2018 年中国二氧化碳排放总量达 100 亿吨, 同比增长 2.3%。

1997 年在日本京都召开的“联合国气候变化框架公约”会议上，通过了著名的《京都议定书 COP3》，即温室气体排放限制议定书。通过国际社会的努力，2005 年京都议定书正式生效。京都议定书将对中国经济和世界经济的发展产生深远的影响。扩大再生能源的应用比例和大力采用节能技术是实现京都议定书目标的十分关键和有效的措施。日本、欧洲、澳大利亚都在积极推广再生能源和节能技术，减少温室气体排放。2015 年在巴黎气候变化大会上通过的气候变化协定《巴黎协定》，为 2020 年后全球应对气候变化行动作出安排。主要目标是将本世纪全球平均气温上升幅度控制在 2 摄氏度以内，并将全球气温上升控制在工业化时期水平之上 1.5 摄氏度以内。日本提出在 2020 年 - 2030 年间，将燃料电池系统的价格降至目前的约 1/10；到 2020 年将太阳能发电量提高到目前的 10 倍，2030 年时提高到 40 倍。这些新能源发电都需要电力电子技术，这将形成电力电子技术的巨大市场。

② 电动汽车。根据美国国家电力科学研究院的报告，纯电动汽车与汽油汽车的一次能源利用率之比为 1:0.6。因此，发展电动汽车不仅可以提高能源的利用率，同时还可减少温室气体和有害气体的排放。电动汽车的关键技术是电池技术和电力电子技术。铅酸电池价格低，但能量密度低，体积大，一次充电的持续里程低，可充电次数少。目前国际上正在开展新型电池如锂电池、镍氢电池等的研发工作。将汽油驱动和电动驱动相结合的混合动力汽车已在日本问世，如丰田 Prius 和本田 Insight，据称可减少油耗 50%，将排放量减至 1/10。混合动力汽车的产业化前景已引起美国汽车行业的注意，美国正在探讨混合动力汽车的开发，以免失去混合动力汽车的市场。近年来，燃料电池汽车已成为理想环保交通工具的远景目标，燃料电池的开发也成为国内外的热点。高能量密度燃料电池的低成本化，高可靠性是主要的突破目标。日本将大力发展低排放汽车，包括纯电动汽车、混合型汽车、燃料电池汽车、天然气或液化气汽车等。低排放车的保有量，已从 2000 年的 37,168 辆增长至 2018 年末的 6,659,599 辆；其中，纯电动汽车保有量，从 2000 年的 772 辆上升至 2017 年的 75,294 辆。

我国自 2001 年起设立了“十五”国家 863 计划电动汽车重大专项。建立燃料电池汽车产品技术平台，实现混合动力汽车的批量生产，推动纯电动汽车在特定区域的商业化动作，为我国在 5 ~ 10 年内实现电动汽车的产业化奠定技术基础。电动汽车产业将带动电机驱动逆变器，能量管理双向 DC/DC 变换器，辅助电源，充电器等电力电子产品的需求。中国新能源汽车产业经过近 20 年的发展，产销规模突破 100 万辆、跃居全球第一。2018 年全球新能源乘用车共销售 200.1 万辆，其中中国市场占 105.3 万辆，超过其余国家总和。

③ IT 产业。由于 IT 技术的应用，办公设备的电力消耗剧增，汽车，家电的电能消耗也将显著增加，而工业用电变化不大。因此，在开发为 IT 设备供电的高效率电源前景良好。

Intel、Compaq 先后提出了下一代 PC 机分布式供电方案（DPS）。Intel、Compaq 方案的基本结构相同，均由 PFC、DC/DC、分散式安排的 DC/DC 模块组成。这种结构提高了供电的质量和效率，克服了目前 PC 电源对电网的谐波和电磁兼容问题，同时也适应 VLSI 芯片的低电压大电流的需要。根据集成电路制造技术的发展趋势，在未来 5 年中芯片集成的晶体管数目将更多，而供电直流电压将降到 0.5 ~ 0.8 V，功耗为 80 ~ 140 W，电流峰值达 150 A， $di/dt = 1\ 000\ \text{A}/\mu\text{s}$ ，这将对供电电源提出严峻的挑战。

随着智能手机的普及，4G 乃至 5G 技术的推出，手机的功能急速增加，如播放器、

PDA、照相等,电能消耗也增加,手机电能的管理控制芯片的研究开发也有良好的前景。

5. 本课程的性质、要求和学习方法

(1) 本课程性质和任务。在各种电气控制设备中,能够实现弱电控制强电的是电力电子装置。如果说,计算机是现代化生产设备的大脑,电动机和各种电磁执行元件是手足,那么电力电子装置就是支配手足动作的肌肉和神经。电力电子技术作为电气类的专业基础课,一种应用技术课程,综合性强、应用涉及面广、与工程实践联系密切。

本课程的目的和任务是使学生通过学习后,获得电力电子技术必要的基本理论、基本分析方法以及基本技能的培养和训练。为学习后续课程以及从事与电气类专业有关的技术工作和科学研究打下一定的基础。

(2) 本课程的基本要求。

① 了解电力电子技术的应用范围及发展动向。

② 熟悉功率二极管、晶闸管、功率晶体管、IGBT等电力电子器件的结构、工作原理、开关特性和电气参数,能正确选择和使用各种功率开关器件。了解各种开关器件的控制和保护,以及各种电路的特点、性能指标和使用场合。

③ 熟练掌握单相和三相整流电路的基本原理、波形分析和各种负载类型对电路工作的影响,并能进行简单设计计算。熟练掌握DC/AC逆变电路、DC/DC直流斩波器变换电路、AC/AC交流变换电路的工作原理、波形分析和参数计算。

④ 掌握脉宽调制技术的工作原理和控制特性,了解软开关技术的基本原理与控制方式。

⑤ 掌握基本变流装置的调试方法;掌握实用电力电子产品的制作、调试、故障分析及处理方法。

(3) 学习方法。学习本课程时,要注意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、应用三者相结合。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,同时还要注意培养读图与分析能力,掌握器件计算、测量、调整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、电机拖动等相关知识,学习时需要复习相关课程并综合运用所学知识。



整流电路

1.1 功率二极管

功率二极管（又称电力二极管）在 20 世纪 50 年代获得应用。因其结构简单、功能实用，一直沿用到现在。功率二极管在许多电力电子电路中都有着广泛的应用。功率二极管可以在交流 - 直流变换电路中作为整流元件，也可以在电感元件上根据电能需要适当释放的电路中作为续流元件，还可以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、钳位、保护和高频整流。应用时，应根据不同场合的不同要求，选择不同类型的功率二极管。功率二极管是不可控器件，该器件开通和关断不能按需要控制。下面介绍功率二极管的结构及参数。

1.1.1 功率二极管的结构

功率二极管的基本结构和原理与电子电路中的二极管一样，都是具有一个 PN 结的两端器件，所不同的是功率二极管的 PN 结面积较大。

功率二极管的外形、结构和电气符号如图 1-1 所示。从外部结构看，功率二极管可分成分管芯和散热器两部分。这是因为管子工作时要通过大电流，而 PN 结有一定的正向电阻，因此管芯会因损耗而发热。为了冷却管芯，必须装配散热器。一般 200 A 以下的功率二极管采用螺栓式，200 A 以上则采用平板式。

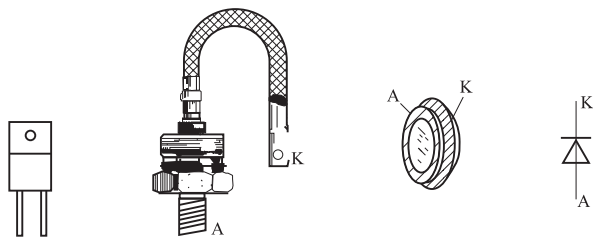


图 1-1 功率二极管的外形结构及电气符号

1.1.2 功率二极管的特性与参数

1. 功率二极管的伏安特性

功率二极管的伏安特性曲线如图 1-2 所示。当外加电压大于门槛电压 U_{T0} 时，正向电流开始迅速增加，二极管开始导通。正向导通时其管压降仅 1 V 左右，且不随电流的大小而变化。当功率二极管承受反向电压时，只有很小的反向漏电流 I_{RR} 流过，器件反向截止。但当反向电压增大到 U_B 时，PN 结内产生雪崩击穿，反向电流急剧增大，可导致二极管击穿损坏。

2. 功率二极管的开关特性

功率二极管工作状态转换时的特性称为开关特性。

(1) 关断特性。关断特性是指功率二极管由正向偏置的通态转换为反向偏置的断态的特性, 关断过程中电压、电流的波形如图 1-3 (a) 所示。当原来处于正向导通的功率二极管外加电压在 t_f 时刻突然从正向变为反向时, 正向电流 i_f 开始下降, 到 t_0 时刻二极管电流降为零, 此时 PN 结两侧存有大量的少子, 器件并没有恢复反向阻断能力, 直到 t_1 时刻 PN 结内储存的少子被抽尽时, 反向电流达到最大值 I_{RM} 。在

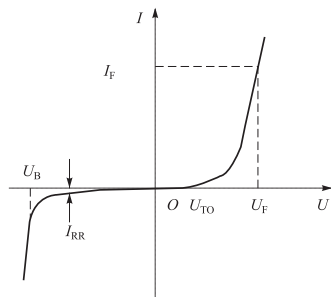


图 1-2 功率二极管伏安特性曲线

t_1 时刻后二极管开始恢复反向阻断, 反向恢复电流迅速减小。外电路中电感产生的高感应电动势使器件承受很高的反向电压 U_{RM} 。当电流降到基本为零的 t_2 时刻 (反向电流降为 10% I_{RM}), 二极管两端的反向电压才降到外加反向电压 U_R , 功率二极管完全恢复反向阻断能力。

功率二极管的反向恢复时间 $t_{rr} = t_2 - t_0$, t_{rr} 是开关管的重要参数。

(2) 开通特性。开通特性是指功率二极管由零偏置转换为正向偏置的通态特性。开通过程的电压、电流波形如图 1-3 (b) 所示。开通过程中二极管两端也会出现峰值电压 U_{fp} (几伏至几十伏)。经过一段时间才接近稳态值 (约 2 V)。上述时间被称为正向恢复时间 t_{fr} 。通常正向恢复时间 t_{fr} 比反向恢复时间 t_{rr} 短。

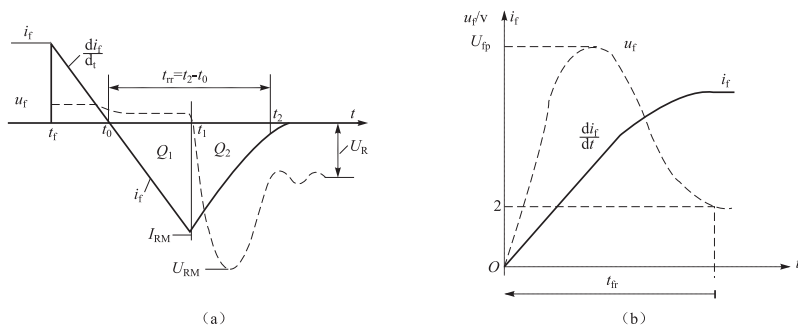


图 1-3 功率二极管的开关特性

(a) 关断特性; (b) 开通特性

3. 功率二极管的主要参数

(1) 正向平均电流 $I_{F(AV)}$ (额定电流)。指在规定的管壳温度和散热条件下, 二极管长期运行所允许通过的最大工频正弦半波电流平均值。在该电流下管子的正向压降造成管子有损耗, 结温升高不超过最高允许结温。该值是按电流的发热效应定义的, 因此, 在计算时按有效值相等条件来选取二极管的电流定额, 并留有 1.5 ~ 2 倍的裕量。计算的公式如下, 其中 I_F 为流过管子的额定电流有效值, 即

$$I_{F(AV)} = (1.5 \sim 2) \frac{I_F}{1.57} \quad (1-1)$$

(2) 反向重复峰值电压 U_{RRM} (额定电压)。指管子反向所能施加的最高峰值电压。通常是反向击穿电压的 2/3。计算时按二极管可能承受的最高反向峰值电压的 2 ~ 3 倍来选取二极管的定额, 即

$$U_{RRM} = (2 \sim 3)U_{RM} \quad (1-2)$$

取相应标准系列值。

(3) 正向通态压降 U_F 。指二极管在指定温度下，流过某一指定的稳态正向电流时对应的正向压降。有时参数表中也给出在指定温度下流过某一瞬态正向大电流时器件的最大瞬时正向压降。

(4) 反向恢复时间 t_{rr} 。从二极管正向电流过零到反向电流下降到其峰值 10% 时的时间间隔。它与反向电流上升率、结温、开关前的最大正向电流等因素有关。

(5) 最高允许结温 T_{Jm} 。指在 PN 结不损坏的前提下所能承受的最高温度。通常在 125 ~ 175 °C。

(6) 正向浪涌电流 I_{FSM} 。由电路异常情况引起的，并使结温超过额定结温的不重复性最大正向过载电流。

在选择管子时这些参数都要慎重考虑。

国产 ZP 系列的部分功率二极管参数见表 1-1。

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 ~ 4 000	1 ~ 4 000	50 ~ 5 000	1 ~ 40	0.4 ~ 1		
ZK3 ~ 2 000	3 ~ 2 000	100 ~ 4 000	1 ~ 40	0.4 ~ 1	< 10 μs	
10DF4	1	400		1.2	< 100 ns	
31DF2	3	200		0.98	< 35 ns	
30BF80	3	800		1.7	< 100 ns	
50WF40F	5.5	400		1.1	< 40 ns	
10CTF30	10	300		1.25	< 45 ns	
25JPF40	25	400		1.25	< 60 ns	
HFA90NH40	90	400		1.3	< 140 ns	模块结构
HFA180MD60D	180	600		1.5	< 140 ns	模块结构
HFA75MC40C	75	400		1.3	< 100 ns	模块结构
HFA280NJ60C	280	600		1.6	< 140 ns	模块结构
MR876 快恢复 功率二极管	50	600	50 μA	1.4	< 400 ns	
MUR10020CT 超快恢复功率 二极管	50	200	25 μA	1.1	< 50 ns	
MBR30045CT 肖特基功率 二极管	150 (单支)	45	0.8 mA	0.78	≈ 0	