



普通高等教育电气工程与自动化(应用型)“十二五”规划教材

Power Electronics

电力电子技术

第2版

◎ 主 编 周克宁

◎ 副主编 王子辉 黄家善



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育电气工程与自动化（应用型）“十二五”规划教材

电力电子技术

第2版

主 编 周克宁
副主编 王子辉 黄家善
参 编 李叶紫 刘以建 赵葵银



机械工业出版社

本书是一本面向自动化、电气工程及其自动化专业的电力电子技术教材,是为适应高校应用型人才培养的专业教学需要,在第1版的基础上修订而成的。全书分为七章,第一章为绪论,介绍电力电子技术的基本概念和应用领域;第二章对常用电力电子器件的结构、工作原理及性能作了较详细的阐述;第三~六章讲述了属于电力电子技术基础的四大类变换电路的工作原理、参数计算等;第七章介绍现代电力电子技术和新应用。全书在阐明电力电子技术基本理论的前提下,偏重于应用的介绍。在第二~六章的后面部分都列举并分析了几个具体的应用实例,以帮助读者理解和较全面地掌握电力电子技术的理论及应用知识。本书还附有 MATLAB 仿真习题,读者可借助习题中仿真电路模型的建立方法对电力电子技术作深入研究。

本书可作为高等院校应用型本科电气类及自动化类专业学生的教材,也可供从事电力电子技术专业的工程技术人员作为自学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电力电子技术/周克宁主编. —2版. —北京:机械工业出版社,2015.2
普通高等教育电气工程与自动化(应用型)“十二五”规划教材
ISBN 978-7-111-48825-5

I. ①电… II. ①周… III. ①电力电子技术-高等学校-教材 IV. ①TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 290189 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:王雅新 责任编辑:王雅新 王 康 版式设计:霍永明

责任校对:薛 娜 封面设计:张 静 责任印制:李 洋

三河市国英印务有限公司印刷

2015 年 2 月第 2 版第 1 次印刷

184mm×260mm·11.5 印张·273 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-48825-5

定价:25.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线:010-88379833

读者购书热线:010-88379649

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

金书网:www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

普通高等教育电气工程与自动化（应用型）“十二五”规划教材

编审委员会委员名单

主任委员：刘国荣

副主任委员：

张德江 梁景凯 张 元 袁德成 焦 斌

吕 进 胡国文 刘启中 汤天浩 黄家善

钱 平 王保家

委 员（按姓氏笔画排序）：

丁元明 马修水 王再英 王 军 叶树江

孙晓云 朱一纶 张立臣 李先允 李秀娟

李海富 杨 宁 陈志新 周渊深 尚丽萍

罗文广 罗印升 罗 兵 范立南 娄国焕

赵巧娥 项新建 徐建英 郭 伟 高 亮

韩成浩 蔡子亮 樊立萍 穆向阳

前 言

21 世纪我国高等教育开始进入大众化阶段,越来越多的人有机会接受高等教育。而培养更多的工程应用型本科人才是大众化高等教育的主要目标之一。近几年来应用型本科院校的教材建设却发展滞后。机械工业出版社在 2004 年组织出版了一套适合于大众化教育、应用型人才培养的自动化专业(包括电气工程及其自动化专业部分)本科教材。本书第 1 版的编写就是为了适应这一要求而展开的。同时,为了适应高校“卓越工程师教育培养计划”的实施和应用型人才培养的专业教学需要,本书在第 1 版的基础上进行了修订。

本书由三大内容板块组成。电力电子器件是第一大板块,在第二章专门论述晶闸管(Thyristor)、功率晶体管 GTR、电力场效应晶体管(MOSFET)、绝缘栅双极型晶体管(IGBT)等目前常用的电力电子器件。第三~六章围绕着四大类电能变换技术介绍 AC-DC 整流电路、DC-DC 直流斩波电路、DC-AC 逆变电路及 AC-AC 交流-交流变换电路,这是本教材的第二大板块。第三大板块结合现代电力电子技术列举了多个应用实例,对学习、理解电力电子技术课程内容以及电力电子技术的应用具有很大帮助作用。

电力电子技术类的教材、专著已有多种,本教材的特点是论述深入浅出、举例强调应用,除了必要的理论论述外,用比较大的篇幅来介绍如何应用电力电子技术。在介绍四大类变换技术的每章后面都有一两个结合本章理论内容的实际应用例子。尤其在本次修订中,在每章应用部分增加了多种芯片型号特点的介绍,给读者选型和查找带来方便。特别是在最后一章详细地介绍了软开关技术原理、变频器、LED 照明产品的分析和应用方法。本教材的另一个特点是在习题部分提供了四大类变换电路的 MATLAB 仿真电路模型。MATLAB 是目前十分流行的仿真应用程序,学会模型的建立和仿真方法,有利于利用计算机观察电路的仿真运行状况,加深对理论分析结果的理解和知识的吸收。有兴趣的读者还可以借助于这些模型,进一步地对复杂电路做仿真研究。

本书由周克宁主编,并负责全书统稿;王子辉,黄家善任副主编。前言、第一、四章由周克宁编写,第二章由刘以建编写,第三章由李叶紫编写,第五章由黄家善编写,第六章由赵葵银编写,第七章由王子辉和周克宁编写。

本书由浙江大学电气工程学院赵荣祥教授主审。赵荣祥教授在审阅时提出了许多有益的修改意见。在此表示衷心地感谢。

上海大学陈伯时教授、上海交通大学陈敏逊教授、上海海运学院汤天浩教授、湖南科技大学吴新开教授、扬州大学夏扬副教授在讨论本书的编写大纲过程中提出了宝贵的意见和建议,在此表示衷心地感谢。

在编写过程中参编学校自动化专业或电气工程及其自动化专业高年级的同学参与了部分文字、图表输入及处理工作,编者对此表示感谢。

由于作者学识有限,书中难免会有一些缺点和错误,恳切希望广大读者批评指正。

编 者

目 录

前言	
第一章 绪论	1
第二章 电力电子器件	7
第一节 概述	7
第二节 电力二极管	9
第三节 电力晶体管	12
第四节 晶闸管	16
第五节 电力 MOS 场效应晶体管	23
第六节 绝缘栅双极晶体管	27
第七节 其他电力电子器件	30
第八节 电力电子器件的保护	32
小结	36
习题与思考题	36
第三章 交流-直流变换电路 (AC-DC Converter)	37
第一节 概述	37
第二节 单相可控整流电路	38
第三节 三相可控整流电路	51
第四节 有源逆变电路	59
第五节 整流电路的性能指标及应用技术	63
小结	72
习题与思考题	73
第四章 直流-直流变换电路 (DC-DC Converter)	76
第一节 概述	76
第二节 Buck 降压电路	78
第三节 Boost 升压电路	83
第四节 Buck-Boost 升压-降压电路	85
第五节 Cuk 升压-降压电路	87
第六节 晶闸管斩波电路	90
第七节 直流变换电路的应用技术	93
小结	94
习题与思考题	95
第五章 直流-交流逆变电路 (DC-AC Inverter)	97
第一节 概述	97
第二节 电压型逆变电路	100
第三节 电流型逆变电路	106
第四节 脉宽调制型 (PWM) 逆变电路	112
第五节 逆变电路的应用技术	118
小结	123
习题与思考题	124
第六章 交流-交流变换电路 (AC-AC Converter)	126
第一节 概述	126
第二节 交流调压电路	126
第三节 交流调功电路	132
第四节 交-交变频电路	133
第五节 交流变换电路的应用技术	137
小结	141
习题与思考题	142
第七章 现代电力电子技术及其应用	143
第一节 概述	143
第二节 软开关技术	145
第三节 电力电子技术在变频器中的 应用	159
第四节 电力电子技术在 LED 照明驱动 电源中的应用	168
参考文献	175

第一章 绪 论

一、电力电子技术的基本概念

作为现代信息技术的杰出商品——计算机已深入到千家万户，但是许多人并不知道，计算机里就应用了电力电子技术。要使计算机工作，必须要有一个能让各类集成电路工作的电源系统，否则，计算机就无法运行。担任此重任的部件，就是开关电源。开关电源运用了电力电子技术，它将民用 220V 交流电，通过具有特定功能的电力电子电路，产生几组稳定的直流电压，向集成电路芯片及其他部件供电。从这个例子可以推测，电力电子技术与电能的变换有关。电力电子技术就是使用电力电子器件对电能进行变换和控制的技术。当然，上述的例子仅是说明电力电子技术在计算机中的具体应用。实际上，电力电子技术在工业、军事以及其他民用产品中都有着广泛的应用。

电力电子器件实际上也是半导体器件，所以也称电力半导体器件。电力电子器件和其他类别的半导体晶体管的差别，主要体现在工作机理不同、功率等级较大及开关特性有差异几个方面。但要注意的是，由于电力电子器件在电路中常常扮演一种电子开关器件的角色，所以它只工作在两种状态，即饱和和截止状态，类似于数字电路中的器件工作状态。当然，其工作时承受的电流比较大，电压比较高。在很多情况下，由于器件开通（饱和或接近饱和）及关断（截止）频率很高，因此，电力电子器件开关性能的好坏至关重要。这在本教材有关章节中会进行讲解。

电力电子技术对电能进行变换和控制的任务是：变换电能的形态和控制电能的流动，向用户提供适合其负载的最佳电压和电流，以达到节约能源或满足工艺要求的目的。

图 1-1 所示为电能形式变换的四大类型示意图。它们分别是将交流电能变换成直流电能、交流电能变换成另一频率或电压的交流电能、直流电能变换成另一规格的直流电能及直流电能变换成交流电能。一个具体的电力电子装置或产品可能仅用到一种类型，也有可能是几种类型的结合。

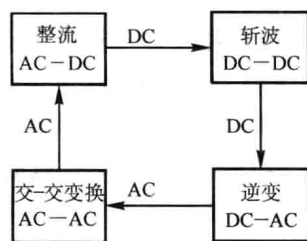


图 1-1 电能形式变换的四大类型示意图

二、电力电子技术的发展概况

电力电子技术的发展是和电力电子器件发展紧密相关的。器件的发展是电力电子技术在当代得到广泛应用的重要因素。

20 世纪 40 年代末，美国贝尔实验室发明了晶体管，使电子技术掀起了一场革命。随后，晶体管在许多应用领域开始逐步取代体积大、功耗多的电子管。最初用于电力领域的半导体器件是整流二极管。但由于整流二极管是不可控元件，很难解决生产实际中控制电能的问题，故应用受到很大限制。

20 世纪 50 年代末, 美国通用电气公司研制了第一个晶闸管 (SCR, 后称 Thyristor), 标志着电力电子技术时代的开始。晶闸管是一种导通时刻可控的半导体二极管。正是由于这个重要特性, 使得电能变换与控制能比较容易地实现。从此之后, 门极可关断晶闸管 (GTO)、双向晶闸管 (TRAIC)、电力双极型晶体管 (BJT)、电力场效应晶体管 (Power MOSFET)、绝缘栅双极晶体管 (IGBT) 等新型晶闸管和全控器件相继出现, 并在容量、工作频率等性能指标上得到不断的提高。从 20 世纪 90 年代至今, 陆续涌现出各种新型器件。有的是传统器件的改良品, 比如 MOS 控制晶闸管 (MCT)、集成门极换流晶闸管 (IGCT), 它们在晶闸管的基础上也综合了 MOSFET、GTO 的优点。其中比较引人注目的是一种将控制、保护、驱动电路的功能与功率器件集成在一起的功率模块器件 (PIC)。由于其集成度高, 使得电力电子装置的体积大为缩小, 最重要的是这种器件的综合性能好, 因而成为电力电子技术的发展方向。

推动电力电子技术发展的因素, 除了电力电子器件及其他相关器件外, 还有电路理论的发展。例如, 20 世纪 80 年代, 软开关电路理论的研究十分热门。电路理论着重研究优良的电路结构、器件性能的最佳利用以及解决某些特定问题的电路拓扑。许多学者都致力于研究电路问题, 并取得了丰硕的成果。在本书第七章中将介绍一些基于新电路理论应用的实例。

三、电力电子技术的应用

应用电力电子技术构成的装置, 按其功能可分为以下四种类型, 它们对应了四大类电能变换技术:

- (1) 可控整流器 把交流电压变换成固定或可调的直流电压。
- (2) 逆变器 把直流电压变换成频率固定或可调的交流电压。
- (3) 交流调压器及变频器 把固定或变化的交流电压变换成可调或固定的交流电压。
- (4) 斩波器 把固定或变化的直流电压变换成可调或恒定的直流电压。

这些装置都是单独地应用了相关的变换技术, 它们可以直接用于某些特定场合。但也有不少其他装置综合运用了多种技术, 比如变频器可能就结合了整流、斩波及逆变技术。可以说, 电力电子装置及产品五花八门、品种繁多, 被广泛应用于各个领域。其主要应用领域包括以下几个方面。

1. 工矿企业

电力电子技术在工业中的应用主要是过程控制与工厂自动化。在过程控制中, 需要对泵类和压缩机类负载进行调速, 以得到更好的运行特性, 满足控制的需要。自动化工厂中的机器人由伺服电动机驱动 (速度和位置均可控制), 而伺服电动机往往采用电力电子装置驱动才能满足需要。另外, 电镀行业要用到可控整流器作为电镀槽的供电电源。电化学工业中的电解铝、电解食盐水等也需要大容量的整流电源。炼钢厂里轧钢机的调速装置运用了电力电子技术中的变频技术。工矿企业中还涉及电气工艺的应用, 如电焊接、感应加热等都应用了电力电子技术。

2. 家用电器

运用电力电子技术的家用电器越来越多。洗衣机、电冰箱、空调等都采用了变频技术来控制电动机。电力电子技术还与信息电子技术结合, 使这些家用电器具有智能和节能的作用。如果离开了电力电子技术, 这些家用电器的智能化、低电耗是无法实现的。另外, 电视

机、微波炉甚至电风扇也都应用了电力电子技术。照明电器在家庭中大量使用,现在家庭中大量使用的“节能灯”、“应急灯”、“电池充电器”都采用了电力电子技术。

3. 交通及运输

电力机车、地铁及城市有轨或无轨电车几乎都运用电力电子技术进行调速及控制,斩波器在这一方面得到大量应用。在中国上海,世界上首次投入商业运作的磁悬浮列车运行系统涉及供配电、驱动控制等,毫无疑问,电力电子技术在其中占有重要地位。还有像在工厂、车站短途运载货物的叉车、电梯等,也用到斩波器和变频器进行调速等控制。电动自行车和电动汽车也都要用到电力电子技术。

4. 电力系统

电力电子技术在电力系统中有许多独特的应用,例如高压直流输电(HVDC),在输电线路的送端将工频交流变为直流,在受端再将直流变回工频交流。电力电子技术和装置已开始逐渐在电力系统中起重要的作用,使得利用已有的电力网输送更大容量以及功率潮流灵活可控成为可能。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。电网功率因数补偿和谐波抑制是保证电网质量的重要手段。晶闸管投切电抗器(TCR)、晶闸管投切电容器(TSC)都是重要的无功补偿装置。近年来出现的静止无功发生器(SVG)、有源电力滤波器(APF)等具有更为优越的补偿性能。此外,电力电子装置还可用于防止电网瞬时停电、瞬时电压跌落、闪变等。这些装置和补偿装置的应用可进行电能质量控制,改善电网质量。

5. 航空航天和军事

航天飞行器的各种电子仪器和一些航天生活器具都需要电源。在飞行时,为了最大限度地利用飞行器上有限的能源,就需要采用电力电子技术。即使用太阳能电池为飞行器提供能源,充分转换及节省能源也是非常重要的。军事上一些武器装备也需要用到轻便、节电的电源装置,自然也就要用到电力电子技术。

6. 通信

通信系统中要使用符合通信电气标准的电源和蓄电池充电器。新型的通信用一次电源,是将市电直接整流,然后经过高频开关功率交换,再经过整流、滤波,最后得到48V的直流电源。在这里大量应用了功率MOSFET管,开关工作频率广泛采用100kHz。与传统的一次电源相比,其体积、重量大大减小,效率显著提高。国内已先后推出48V/20A、48V/30A、48V/50A、48V/100A、48V/200A等系列产品,以满足不同容量的需求。

从上述例子可以看出,电力电子技术的应用已经渗透到国家经济建设和国民生活的各个领域。这些例子也说明:在工业、通信及人民生活等各个方面,所用到的电能很多并不是直接取自于市电,而是要通过电力电子装置将市电转换成符合用电设备所要求的电能形式,而这种需求促进了电力电子技术的发展。事实上,一些发达国家50%以上的电能都通过电力电子装置对负载供电,我国也有接近30%的电能通过电力电子装置转换。可以预见,现代工业和人民生活对电力电子技术的依赖性将越来越大,这也正是电力电子技术的研究经久不衰及快速发展的根本原因。

四、学习本课程所要注意的问题

本教材共有七章,第一章为绪论,概括地介绍电力电子技术的发展历史、应用领域和学

习中应注意的问题。绪论的最后汇集了本课程所涉及的预备知识要点。第二章介绍电力电子器件 (也称为功率电子器件), 它是电力电子技术应用的基础, 读者应掌握各类电力电子器件的基本概念, 尤其是各种器件的特点和开关特性。因为设计电力电子装置及产品, 合理地选用器件非常重要, 不了解器件的特点, 就设计不出性能良好的装置和产品。第三章着重介绍由晶闸管构成的可控整流电路、有源逆变及其他相关知识。在工业应用中, 有多种大功率的可控整流装置。学习这一章, 应掌握整流装置输出电压及功率可控的基本原理、输出电量与输入电量的关系, 了解设计和应用整流装置时应注意的问题。第四章阐述了直流斩波电路, 也就是直流-直流变换电路的基本原理和计算方法。直流-直流变换电路既用于直流电源供电的大功率驱动装置, 如电力机车等, 也用于小功率的便携式仪器设备及计算机中。这一章的原理分析用到了电路原理中电感、电容的特性和其他电路理论, 学习这一章前, 读者应对这些知识有所了解。第五章阐述逆变电路, 即直流-交流变换电路的电路结构和工作原理。应急电源、不间断电源 (UPS)、电子镇流器和许多电动机驱动电路都采用了逆变电路。逆变电路能输出频率范围较宽的交变电压或电流, 控制的方式也很多, 性能指标各有千秋。学习这一章时要在掌握基本变换电路工作原理的基础上, 注意了解各种控制方式的特点和适用场合。第六章介绍交流-交流电能变换技术, 这一章涉及交流调功、交流调压及交-交变频等知识。其中交流调功和调压电路在工业上及家用电器中用途很广。如果读者对第二章晶闸管整流电路的内容掌握得比较好, 掌握这一章的知识就比较容易。第七章对当今电力电子新技术及其应用作了一些介绍。这些新技术一般都是为了解决特定问题而产生的。对这些新技术的了解有助于全面理解现代电力电子装置或产品的电路原理, 对今后从事研发、维护及经营电力电子产品都有益处。

除了第一、二、七章, 其他四章内容实际上都是围绕前面所讲到的四大类电能变换技术展开的。这四大类技术加上器件技术是电力电子技术的主线。读者在学习的整个过程中, 要抓住这条主线, 弄清楚四类变换技术到底要解决什么问题、应用于什么场合。这对于全面了解和掌握电力电子技术有很大帮助。同时也要知道, 实际使用中的电力电子装置及产品可能是几种变换技术的综合运用, 还会包含电力电子新技术、微处理器技术、电磁技术和控制技术。四大变换技术代表的仅是一个装置电能的输入及输出部分, 真正要实现对电能变换的控制, 还需要微电子技术, 也就是所谓的弱电技术。从这个意义上讲, 电力电子装置是强电与弱电技术相结合的产物, 这对从事电力电子技术的工作者也提出了较高的要求。学习本课程, 应该对这些情况有清楚的认识, 不了解这一点, 就会犯以偏概全的错误。

电力电子技术是一门理论性和实践性都比较强的课程。本教材在讲述理论问题时力求深入浅出、通俗易懂。同时在每章最后列举几个实际应用的电路, 并对其工作原理加以讲解, 以帮助读者较全面地掌握电力电子技术的应用知识。

五、预备知识要点

电力电子技术与三门基础课程, 即电路原理、模拟电子技术、数字电子技术的知识有紧密关系。在阐述各类变换电路工作原理、推导数量关系、介绍控制方式和进行特点小结时, 几乎都要直接或间接地引用三门课程中的概念和原理。

(1) 基尔霍夫电压定理 $\sum_{m=1}^n u_m = 0$ 在分析电力电子电路时, u 指的是开关器件各极间

的电压或者电感、电阻等元件两端的电压以及电路中其他任意两节点之间的电压。在进行定量分析时,要注意 u 的方向是如何设置的,它代表何种电压属性。

(2) 基尔霍夫电流定理 $\sum_{m=1}^n i_m = 0$ 在分析电力电子电路时, i 指的是通过开关器件某两个极或者电感、电阻等元件的电流。同理,要注意 i 的方向是如何设置的,它代表何种电流属性。

(3) 傅里叶级数 任何一种满足狄里赫利条件的周期性函数都可分解为傅里叶级数

$$f(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos k\omega t + b_k \sin k\omega t)$$

在电力电子电路中,电压和电流往往会以非正弦周期函数的形式出现。为了得到需要的定量结果,要对电压或电流进行傅里叶级数分解。对电压或电流来讲,傅里叶级数的 a_0 项就是直流分量,而 ω 是周期函数的角频率。如果能把一个非正弦周期性变化的电压源(或电流源)看成是一个直流电压源(或电流源)与多个不同频率的正弦交流电压源(或电流源)串联(或并联)而形成的电源,那么对一些问题的理解就容易了。

(4) 电感的物理特性 $L di/dt = u$ u 指的是电感两端的电压, i 指的是流过电感的电流。从公式中可以看出,不管在哪段时间内,只要 i 不随时间变化,那么这段时间内的电感两端电压必然为零。

伏-秒平衡规律 $1/T \int_0^T u dt = 0$ 。因为理想电感在电路的稳定状态时,其两端的直流压降必然为零。积分式正是对其电压求平均值,也就是求直流分量,所以该式应等于零。

电感储能公式 $w = 1/2 Li^2$ 。电感任何时刻的储能大小与电感量及此刻的电感电流的二次方成正比。

(5) 电容的物理特性 $C du/dt = i$ 电容与电感的物理公式具有对偶关系, i 指的是流过电容的电流, u 指的是电容两端的电压。从公式中可看出,不管在哪段时间内,只要 u 不随时间变化,那么这段时间内的电容电流必然为零。

安-秒平衡规律 $1/T \int_0^T i dt = 0$ 。因为理想电容在电路的稳定状态时,其电流的直流部分必然为零。积分式是对其电流求平均值,也就是求直流分量,所以该式也应等于零。所谓的电容隔直作用就是这个含义。

电容储能公式 $w = 1/2 Cu^2$ 。电容任何时刻的储能大小与电容量及此刻的电容电压的二次方成正比。

(6) 对一个频率为 ω 的正弦交流电源或信号激励下的电路 电路中的电感呈现的电抗为 ωL , 电容呈现的电抗为 $1/(\omega C)$ 。因此,电感对高频激励信号具有高阻抗,而电容却呈现低阻抗。这个概念十分重要,对分析电感、电容的端电压和通过的电流,以及它们在电路中对其他电量的影响很有帮助。当激励电源或信号是非正弦周期函数时,根据第(3)点,电容和电感对不同频率的激励电源或信号将具有不同的电抗。具体计算时,要用 $k\omega$ 代替 ω 。

(7) 单相及三相交流电特征 单相交流电公式为

$$u = U_m \sin \omega t$$

三相交流电的公式为

$$u_a = U_m \sin \omega t$$

$$u_b = U_m \sin (\omega t - \pi/3)$$

$$u_c = U_m \sin (\omega t - 2\pi/3)$$

上述式子是以电压量为例, 电流量的形式与之相同, 只要用电流 i 替换 u 即可。要注意的是 U_m 是峰值, 是有效值的 $\sqrt{2}$ 倍。另一个问题是, 交流电并不要求一定是纯正弦交流电。但对三相交流电而言, 不管是否是纯正弦交流电, 其三个相电压 (或电流) 之间的峰值、相位、频率关系仍然要符合上面公式的关系。

(8) 单相交流电的有功功率 $P = UI \cos \varphi$ 、无功功率 $Q = UI \sin \varphi$ 、视在功率 $S = UI$ 及功率因数 $\cos \varphi = P/S$ 。三相交流电的相应值是单相的三倍。不过在电力电子技术中, 由于交流电压量或电流量几乎都不是纯正弦波, 所以相应的定义有所不同, 应予以留意。

(9) 晶体管、场效应晶体管等半导体器件可作为一种电路开关来使用, 但当作为这个功能使用时, 稳定时必须工作于导通 (饱和) 或截止状态, 不能处于放大状态。本书中介绍的电力电子器件是大功率的半导体器件, 稳定时也工作于开关状态。理想开关状态的特征, 在有关章节会加以叙述。

(10) 限于篇幅, 模拟电子技术中关于运算放大器、数字电子电路中关于逻辑电平和逻辑集成电路的基本知识不再列出。但要清楚的是, 在电力电子装置和产品中, 起驱动电力电子器件、保护、自动调节等作用的电路, 往往是由分立器件和集成芯片组成的, 它们属于模拟和数字电子技术范畴。

第二章 电力电子器件

电力电子器件是电力电子电路中的核心器件，电能变换的功率是通过电力电子器件传递的。本章将简要概述电力电子器件的概念、发展概况和分类等问题，重点介绍几种常用电力电子器件的工作原理、基本特性、主要参数、驱动电路等问题。

第一节 概 述

一、电力电子器件的概念和特征

电力电子器件是电力电子电路的核心部件，直接用于主电路，用于对电能的变换和控制。广义上讲，电力电子器件应该分为电真空器件和半导体器件两类。目前电力电子技术中使用的器件绝大多数都是半导体器件。因此，人们通常所说的电力电子器件都是指电力半导体器件。目前使用的电力半导体器件大多是用单晶硅制成的。

电力电子器件区别于用于信息处理的普通半导体器件，它具有下列几个特征：

1) 处理的电功率大，也就是电力电子器件能够承受高电压和通过大电流。功率容量是电力电子器件重要的性能指标。

2) 电力电子器件一般工作在开关状态：导通时（通态）阻抗很小，接近于短路，管压降接近于零，而电流由外电路决定；阻断时（断态）阻抗很大，接近于断路，电流几乎为零，而管子两端电压由外电路决定。电力电子电路中，电力电子器件往往被看成是理想开关，称为电力电子开关。电力电子器件的开关特性和参数是电力电子器件特性很重要的方面。

3) 实际应用中，电力电子器件往往需要由信息电子电路来控制，这就是所谓的弱电对强电的控制。在主电路和控制电路之间，需要中间电路根据控制电路的信号控制电力电子器件的开通和关断，该电路就是电力电子器件的驱动电路。

4) 电力电子器件毕竟不是理想开关，处理的电功率越大，自身损耗也就越大，而损耗会导致器件发热。为保证器件的散热良好，不致因温度过高而损坏，不仅在器件封装上讲究散热设计，在其工作时一般都要安装散热器。

电力电子器件的损耗包括通态损耗、断态损耗、开关损耗和驱动损耗，如图 2-1 所示。通态损耗和断态损耗是由于器件导通时的管压降和关断时的漏电流不为零所致的，开关损耗是由于器件在开关过程中伴随电压电流的变化而产生的。通常，通态损耗是器件损耗的主要原因，但当器件的开关频率较高时，开关损耗会随之增大而可能成为器件功率损耗的主要因素。在第七章给出了开关损耗的计算，并介绍了降低开关损耗的方法。

二、电力电子器件的分类

按照能够被控制电路信号所控制的程度，电力电子器件分为以下三类：

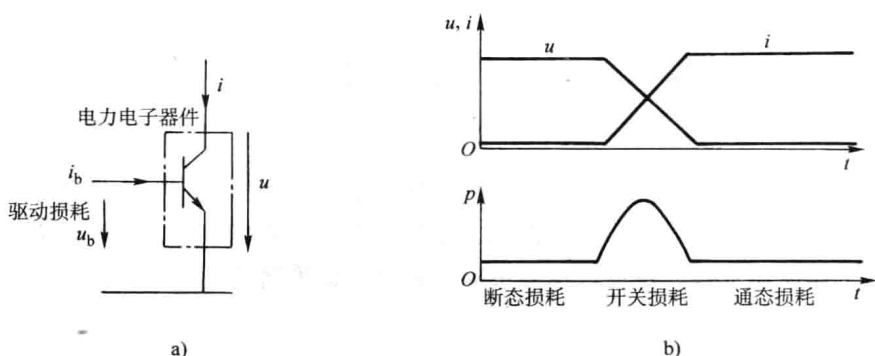


图 2-1 电力电子器件的损耗

a) 电子开关示意图 b) 电压、电流及耗散功率波形

(1) 半控型器件——通过控制信号可以控制其导通而不能控制其关断的器件。主要有晶闸管 (Thyristor) 及其大部分派生器件。这类器件可以通过主电路使其承受反向电压或使其电流下降为零而关断。

(2) 全控型器件——通过控制信号既可控制其导通又可控制其关断, 又称自关断器件。这类器件很多, 主要有电力晶体管 (GTR)、电力场效应晶体管 (Power MOSFET, 简称电力 MOSFET)、门极可关断晶闸管 (Gate-Turn-Off Thyristor, GTO)、绝缘栅双极型晶体管 (Insulated-Gate Bipolar Transistor, IGBT) 等。

(3) 不可控器件——不能用控制信号来控制其通断的器件。这类器件不需要驱动电路, 主要有电力二极管 (Power Diode)。电力二极管与普通二极管的导电特性一样, 在电路中承受正向电压时导通、承受反向电压时关断。

按照驱动电路加在器件控制端和公共端之间信号的性质, 分为以下两类:

(1) 电流驱动型器件——通过从控制端注入或者抽出电流来实现导通或关断控制的器件。属于这类器件的有晶闸管、电力晶体管 GTR、GTO 等。

(2) 电压驱动型器件——仅通过在控制端和公共端之间施加一定的电压信号就可实现导通或者关断控制的器件。电压驱动型器件实际上是通过加在控制端上的电压, 在器件的两个主电路端子之间产生可控的电场来改变流过器件的电流大小和通断状态, 所以又称为场控器件或场效应器件。这类器件有电力场效应晶体管及其派生和组合器件, 如 IGBT、MCT 等。

按照器件内部电子和空穴两种载流子参与导电的情况, 分为以下三类:

(1) 双极型器件——指在器件内部电子和空穴两种载流子都参与导电的半导体器件。这类器件具有通态压降低、阻断电压高、电流容量大的特点, 常见的有 GTR、GTO、SITH、IGCT 等。

(2) 单极型器件——指在器件内部只有一种载流子 (即多数载流子) 参与导电的半导体器件。这种器件具有输入阻抗高、响应速度快的特点, 典型器件有 MOSFET 和 SIT 两种。

(3) 复合型器件——由单极型器件和双极型器件集成混合而成的器件。该器件兼备了两者的优点, 主要有 IGBT、MCT、IEGT 等。

第二节 电力二极管

一、电力二极管的基本结构和工作原理

电力二极管 (Power Diode) 是一个面积较大的 PN 结构成的二端半导体器件。图 2-2 所示为电力二极管的外形、结构和电气图形符号。两个引线端为阴极 K 和阳极 A。

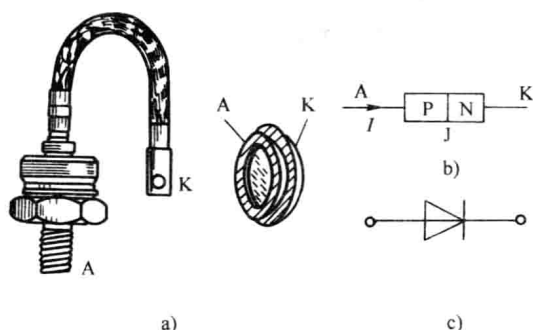


图 2-2 电力二极管的外形、结构和电气图形符号

a) 外形 b) 结构 c) 电气图形符号

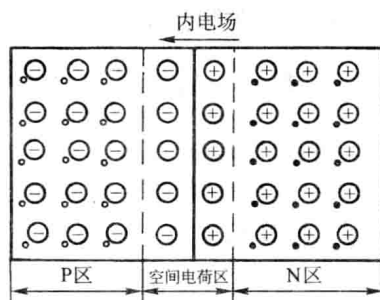


图 2-3 PN 结的形成

电力二极管的特性和 PN 结的特性是一样的。PN 结是由 N 型半导体和 P 型半导体结合后构成的，如图 2-3 所示。P 型半导体和 N 型半导体中电子和空穴浓度不同。P 型半导体中空穴浓度大于电子浓度，称为多数载流子，而 N 型半导体中电子浓度大于空穴浓度。

N 型半导体和 P 型半导体结合后，在它们的交界处出现了电子和空穴的浓度差别。载流子在不规则的运动中将由高浓度区向低浓度区扩散，即电子从 N 区向 P 区扩散，空穴从 P 区向 N 区扩散，称为扩散运动。扩散运动的结果是在界面两侧留下不能运动的带正负电荷的杂质离子，称为空间电荷。这些空间电荷建立的电场被称为内电场或自建电场。自建电场一方面阻止扩散运动，另一方面又吸引电子逆电场方向漂移回 N 区而空穴沿电场方向漂移回 P 区，称为漂移运动。扩散运动和漂移运动作用方向相反，当达到动态平衡时，形成稳定的空间电荷区，也就是 PN 结。在这个空间电荷区域内，载流子浓度比 P 区和 N 区的多数载流子浓度低得多，像被消耗尽了一样，因此被称为耗尽层。空间电荷区的内电场对载流子的扩散运动具有阻挡作用，又被称为阻挡层。另一方面，由于内电场的存在，N 区的电位高于 P 区电位。电子要从 N 区到 P 区必须越过这个被称为势垒的能量带，因此称空间电荷区为势垒区。

PN 结的主要特性是具有单向导电性，这一特性只有在存在外加电压时才表现出来。当 PN 结外加正向电压（正向偏置，即外加电压的正端接 P 区、负端接 N 区）时，外加电场与 PN 结内电场方向相反，增强了扩散运动，使空间电荷区减小。这时 P 区空穴不断涌入 N 区，而 N 区电子也会不断涌入 P 区，从而形成正向电流。正向偏置的 PN 结表现为一个很小的电阻，可以流过较大的正向电流，称为正向导通。

当 PN 结外加反向电压时（反向偏置），外加电场与 PN 结内电场方向相同，从而增强了漂移运动，使空间电荷区增大。PN 结阻挡作用增强，呈现高阻特性，在外加反向电压作用下流入 N 区的电流很小，称为反向截止。

PN 结具有一定的反向耐压能力, 当反向电压增加到一定值时, 反向电流将会急剧增大, 称为反向击穿, 这个外加反向电压称为反向击穿电压 U_{BR} 。PN 结反向击穿按照机理不同, 有雪崩击穿、齐纳击穿和热击穿三种形式。雪崩击穿和齐纳击穿是可恢复的, 只要反向电流限制在一定范围内, 当反向电压降低后, PN 结可恢复为原来的状态。若反向电流未被限制, 则会导致 PN 结温度升高直至过热而烧毁, 这就是热击穿。热击穿必须尽可能避免。

PN 结的空间电荷区就是一个平板电容器, 其电荷量在外加电压变化时发生相同的变化, 呈现电容效应, 称为结电容。结电容影响 PN 结的工作频率, 特别是在高速开关状态时结电容可能与电路的杂散电感共同引起高频振荡, 影响电路的正常工作。从另一个角度讲, 高频时结电容也呈现低阻抗特征, 会降低反向阻断作用, 这些情况在使用时应加以注意。

二、电力二极管的基本特性

1. 静态特性

电力二极管的静态特性主要是指伏安特性, 如图 2-4 所示。

当二极管承受的正向电压上升到一定值后, 正向电流才开始明显增加, 二极管导通, 这个电压称为门槛电压 U_{TO} 。二极管导通时的正向电流 I_F 由外部电路决定, 与 I_F 对应的电压 U_F 为正向压降。当二极管承受反向电压时, 只有微小的反向漏电流; 当反向电压超过反向击穿电压 U_{BR} 时, 引起雪崩击穿, 反向电流急剧增大。

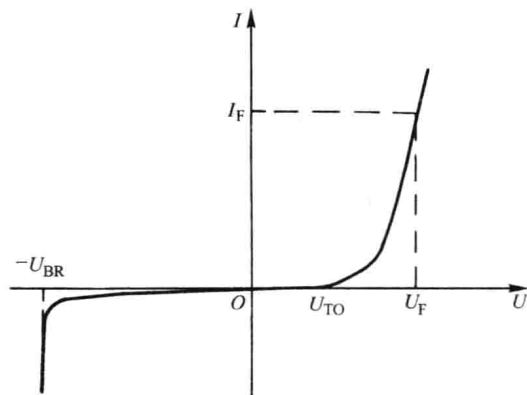


图 2-4 电力二极管的伏安特性

2. 动态特性

因为结电容的存在, PN 结在零偏置、正向偏置和反向偏置三种稳定状态之间转换时需要一个过渡过程。在过渡过程中, 电压、电流随时间变化的关系称为动态特性。

图 2-5a 所示为电力二极管由正向偏置转换为反向偏置的动态过程波形。由于 PN 结电容的存在, 在二极管加正向电压流过正向电流时, 结电容上充有一定电荷。此时, 如果外加电压突然反向, 二极管并不能立即截止。结电容需要一定的恢复时间 t_{rr} , 在这期间 PN 结通过较大的反向恢复电流, 并伴随明显的反向电压过冲, 这是因为 PN 结正向导通时 PN 结两侧基区存储的大量少子需要清除。这些多余的少子一方面通过复合消失掉, 另一方面被空间电荷区内的电场扫出去而形成较大的反向电流。

图 2-5b 给出了电力二极管由零偏置转换为正偏置时的动态过程波形。在这个过程中, PN 结的通态压降并不能立即达到其静态特性对应的稳态压降值, 而需要经过一个正向恢复时间 t_{fr} 。这是因为基区少子的存储也需要一定的时间才能达到稳态值。

三、电力二极管的主要参数

1. 额定正向平均电流 $I_{F(AV)}$

$I_{F(AV)}$ 指在指定壳温和散热条件下, 二极管允许通过的最大工频正弦半波电流的平均

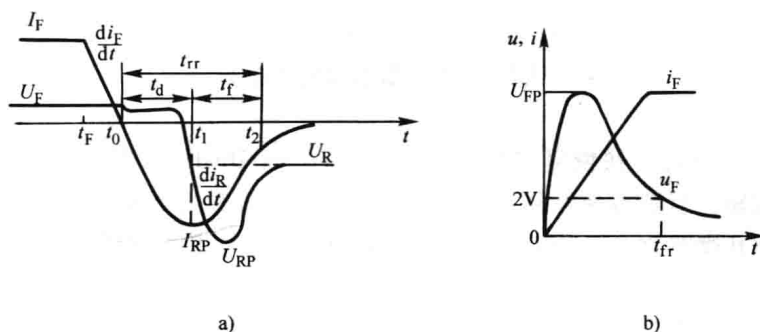


图 2-5 电力二极管的动态过程波形

a) 正向偏置转换为反向偏置 b) 零偏置转换为正偏置

值。在此电流下，二极管由正向电压引起的损耗造成的结温升高不会超过最高允许结温。由此可见正向平均电流也是按发热条件定义的。而决定发热的因素本来是电流的有效值。因此，应用中应按有效值相等条件选取二极管额定电流。

图 2-6 所示为工频正弦半波电流波形。

当电流的峰值为 I_m 时，正弦半波电流的平均值为

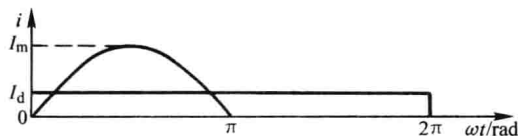


图 2-6 工频正弦半波电流波形

$$I_d = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} I_m \sin \omega t d(\omega t) = \frac{I_m}{\pi} \quad (2-1)$$

而正弦半波电流的有效值为

$$I = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} I_m^2 \sin^2 \omega t d(\omega t)} = \frac{I_m}{2} \quad (2-2)$$

正弦半波电路的有效值和平均值之比为 1.57。因此根据定义，正向平均电流为 $I_{F(AV)}$ 的二极管允许通过的电流有效值为 $1.57I_{F(AV)}$ 。

2. 反向重复峰值电压 U_{RRM}

电力二极管所能承受的反向最高峰值电压通常是反向雪崩击穿电压 U_B 的 $2/3$ 。使用时，通常按两倍的安全裕量选取此参数。

3. 最高允许结温 T_{JM}

结温是指整个 PN 结的平均温度，最高允许结温是指在 PN 结不致损坏的前提下所能承受的最高平均温度。 T_{JM} 通常在 $125 \sim 175^\circ\text{C}$ 范围内。

4. 反向恢复时间 t_{rr}

t_{rr} 是指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，该值越小越好。

四、电力二极管的主要类型

由于制造工艺和结构的差别，造成了二极管的正向压降、反向耐压，特别是反向恢复特