



普通高等教育 电气工程 系列规划教材  
自动化

Power electronic technologies and  
component applications

# 电力电子技术 与 器件应用

© 王丁 朱学东 沈永良 方圆 编著



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育  $\frac{\text{电气工程}}{\text{自动化}}$  系列规划教材

# 电力电子技术与器件应用

王 丁 朱学东 沈永良 方 圆 编著  
李久胜 主审



机械工业出版社

本书以电力电子技术的实际应用技术为主线,讲解电力电子技术的基本理论与主要应用技术。其特点是:将有关技术内容重新进行了整合和编排,侧重介绍使用全控型器件构成的现代电力电子技术内容,重点说明常用的集成电路芯片的应用原理,提供完整的动手操作案例。

具体内容包括:电力电子系统构成,主要技术指标、特点及其分析方法,从理论和实际的角度对电力电子器件进行分析和应用指导;基本斩波电路、DC-DC 模块、开关电源和功率因数调节电路;方波逆变电路、正弦波脉宽调制逆变电路、空间矢量脉宽调制逆变电路和典型应用电路;先进的同步整流技术和 PWM 整流技术;全控器件的交流调压和矩阵变频器。

本书具有内容先进、重点突出和叙述简明的特点,其内容便于在实际工作中应用。本书可供本科自动化、电气工程和机电一体化等相关专业学生使用,也可供高职高专院校学生使用;适合参加电源技术相关的电子设计竞赛和电子制作的学生参考;还可作为广大工程技术人员快速掌握现代电力电子技术的读本。

## 图书在版编目(CIP)数据

电力电子技术与器件应用/王丁等编著. —北京:机械工业出版社, 2015.9

普通高等教育电气工程自动化系列规划教材

ISBN 978-7-111-51036-9

I. ①电… II. ①王… III. ①电力电子技术—高等学校—教材②电力系统—电子器件—高等学校—教材 IV. ①TM1②TN303

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 176193 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:于苏华 责任编辑:于苏华

版式设计:赵颖喆 责任校对:张征

封面设计:张静 责任印制:乔宇

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

2015 年 10 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 14 印张 · 345 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-51036-9

定价:32.00 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

网络服务

服务咨询热线:010-88379833 机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-88379649 机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

封面防伪标均为盗版

金书网:www.golden-book.com

# 前 言

电力电子技术 (Power Electronic Technology), 是一种涉及电力 (电能) 处理的电子技术。电能就在我们周围, 是广泛提供的、也正被广泛使用的能源, 所以电力电子技术是最重要和应用最广泛的技术之一。就电力电子技术所具有的处理电能的对象属性来看, 它是一种有历史渊源的电气技术, 从电能发明之后就开始存在了。但是, 从所使用的技术手段来看, 还是有了很大的变化, 从先前的基于电磁作用构成的有触点的继电器开关进化到基于半导体技术的无触点的电子开关。

“电力电子技术”是电类专业的重要核心课程。电力电子技术与电类主要应用技术, 如电动机控制、新能源的转换和电源技术, 有着直接的关联。因此, 如何在理论中结合应用, 如何在教学中说明技术, 是一个不能忽视和回避的问题。从电力电子技术的应用形态来看, 电力电子电路是一种在控制信号作用下进行电能转换的电路, 因此, 有关的实际电路技能是在电力电子技术学习中必须要加以考虑和培养的。电力电子电路所用的电力电子器件都是工作在开关状态的, 表现为明显的非线性, 其理论分析不是那么简单和优美, 也要求我们在教学中注意讲解这些分析方法并应用这些方法。电力电子电路的一个主要的特点就是其可控性, 是一种工作状态可控的电子电路, 这种可控的实施依赖于电力电子电路所带负载的情况, 也依赖于电力电子电路所处通道或环路的性能, 要求在理解和使用电力电子技术中掌握必要的控制思想。

以提高电力电子技术的实用性为目标, 本书编写的特点如下:

1) 电力电子电路是由电力电子器件和其电连接所构成的。为此, 本书以例题的形式讲解了分立器件和快速发展的集成器件 (电路) 的常用典型型号。这样, 可以更加全面、具体和更加接近实际应用情况, 既有助于理论的消理解, 又便于使用所学的技术。

2) 以实际应用情况为准绳, 去除无用或陈旧的内容, 如传统的晶闸管技术。

3) 电力电子技术是一门应用性的技术, 实际实验是很重要的。在计算机普及、元器件便宜和课外电子制作增多的情况下, 学生可以进行一些课外学习实践。因此, 本书在每一章之后都给出了动手操作的问题。

电力电子技术是与模拟电子技术和数字电子技术相对应的电子技术, 属于我们通常对电气部件所称谓的硬件技术。这样, 它就要与其他电气技术一起使用, 要有给它提供电能的电源, 要带必要的负载, 要接受电子信号的控制, 形成确定的电路应用关系与特点。在第1章中, 为了说明电力电子技术的应用关系, 首先给出一个应用实例, 再通过这个实例, 对电力电子技术的应用相关要素和基本指标加以说明, 以达到对电力电子技术的基本应用形态有所了解的目的。在该章的最后, 概括介绍了现代电力电子技术在设计和使用中的主要特点。电力电子技术中的主体是电力电子电路, 电路中的核心部件就是电力电子开关。因此, 开关的工作情况是需要使用者了解和掌握的最基本的内容。从

使用的角度看待电力电子开关,涉及开关的基本原理、使用特点和相关应用电路。尤为重要的是开关过程和开关特性,它决定着电力电子器件的开关频率和功耗等工作性能。第2章首先对各种开关的形态,用于分析的理想情况或实际的应用情况做了必要的介绍和描述,有助于透彻理解和认识电力电子开关的状态和性质;然后对实际的电力电子开关——电力电子器件,从使用的角度做了必要的介绍和分析,并介绍了常用的具体电力电子器件;最后对典型电力电子器件的应用问题,如何驱动和保护等问题进行了讲解。在实际中经常需要可控的直流电能,即可控的直流电压和直流电流,达到这个要求最简单的方法是对输入的直流电能用电力电子开关进行控制。在第3章中,首先介绍了基本的直流斩波电路,也叫斩波器,以这些基本斩波电路为基础,可以制作集成的直流变直流的模块(DC/DC模块);本章后面还对斩波电路、变压器和整流电路构成的开关稳压电源做了详细的介绍。第4章首先介绍了方波逆变器的拓扑结构、波形特点和应用实例,然后重点讲解了正弦脉宽调制(SPWM)的主要技术,最后讲解了最主要的空间矢量脉冲宽度调制(SVPWM),并简单介绍了逆变器的使用情况。整流技术是电力电子技术中最基础的技术,它和模拟电子技术中的二极管整流不同之处在于,它是一种可控整流技术。在第5章中,首先讲解了同步整流(SR)技术,接着讲解了PWM整流技术。交流-交流变流电路是把一种形式的交流变成另一种形式的交流电路。这一类的电能变换技术主要有两种,较为传统的交流调压技术和近年来刚刚开始应用的矩阵变换器调频技术,这些内容在第6章进行了介绍。在大学生电子设计竞赛中,有一类和电力电子技术相关的题目,构思巧妙,还可以制作,对于理论联系实际、锻炼动手能力有很大的促进作用。所以在附录A中收录了一些相关的大学生电子设计竞赛题,在附录B中给出了书中所介绍的元器件的具体参数,便于实际使用。

在本书编写过程中,参考和引用了许多技术文献,一一列入参考文献,如有疏漏,敬请谅解。

本书由黑龙江大学王丁、八一农垦大学朱学东、黑龙江大学沈永良和哈尔滨电视大学方圆编著,王丁制定编写大纲和统稿。第3章第2节、小结、习题与思考题、动手操作问题及附录A由沈永良编著,第6章第1~5节由朱学东编著,第2章第2节、目录、参考文献和附录B由方圆编著,其余部分均由王丁编著。

本书由浙江工业大学李久胜教授主审,并提出了许多宝贵意见和建议。他精湛的专业技术和严谨的审稿作风使我们获益颇多,在此表示衷心的感谢。

感谢黑龙江大学邓自立先生在本书的编写中给出的指教和对作者工作的持续关注;感谢黑龙江大学的黑龙江省控制理论和控制工程重点学科对有关工作提供的条件;感谢黑龙江大学教改项目的支持;感谢黑龙江大学周士超、郑庆伟、张振涛、郑金祥、刘化伟、林政树、邓学超、王一飞、孙祖祥、孙妍、孙丹丹、陈震、詹勇、李颖、邝静婷、宁馨、程国光、何璐、李通和赵荣健在本书编写过程中所做的工作。

由于编者水平有限,书中不妥之处在所难免,希望广大读者批评指正。

编著者

# 目 录

前言	
第1章 绪论	1
1.1 电力电子系统的构成	1
1.1.1 电能变换需求	1
1.1.2 应用实例——降压斩波电路	2
1.1.3 PWM波形的产生原理	4
1.1.4 电力电子系统的构成与主要指标	6
1.2 现代电力电子技术的特点	10
1.2.1 电力电子集成电路的形态	10
1.2.2 广泛使用自动控制技术进行电量稳定控制	12
1.2.3 在开关控制信号产生和电量自动控制中采用微处理器技术	23
1.3 主要分析方法	23
1.3.1 波形分析法	23
1.3.2 物理实验法	24
1.3.3 数学模型分析法	24
1.3.4 MATLAB数字仿真方法	25
本章小结	26
习题与思考题	27
动手操作问题	27
第2章 电力电子开关原理与使用	29
2.1 独立电力电子器件开关过程分析与各种开关形态	29
2.1.1 理想开关与开关损耗	29
2.1.2 电力电子开关的实际开关特性	31
2.1.3 具体开关类型分类	33
2.2 实际电力电子器件	35
2.2.1 电力晶体管	35
2.2.2 电力场效应晶体管	37
2.2.3 绝缘栅双极型晶体管	40
2.3 电力电子器件的驱动	42
2.3.1 电力电子器件驱动电路概述	42
2.3.2 GTR的驱动电路	42
2.3.3 MOSFET和IGBT的驱动电路	43
2.4 电力电子器件的保护	49
2.4.1 故障的种类	49
2.4.2 器件的保护	51
本章小结	55
习题与思考题	56
动手操作问题	57
第3章 基于斩波原理的可控直流电路、集成模块与装置	58
3.1 直流斩波电路与应用模块	58
3.1.1 升压斩波电路	58
3.1.2 升降压斩波电路	65
3.1.3 半桥式可逆斩波电路	65
3.1.4 桥式斩波电路	66
3.2 DC-DC变换模块	72
3.2.1 技术情况	72
3.2.2 模块电源的选择与应用	73
3.2.3 模块电源应用注意事项	74
3.3 开关电源	75
3.3.1 开关电源的基本工作原理	75
3.3.2 隔离式高频变换电路	78
3.4 有源功率因数校正器	86
3.4.1 有源电力滤波器和有源功率因数校正器	86
3.4.2 有源功率因数校正技术的应用	89
3.5 DC-DC变换器反馈控制器设计	91
3.5.1 DC-DC变换器的建模	92
3.5.2 控制器设计	93
本章小结	97
习题与思考题	98
动手操作问题	98
第4章 直流-交流变换器——逆变技术	100
4.1 逆变类型与方波脉冲宽度调制(PWM)	100
4.1.1 电压源型和电流源型逆变电路	100
4.1.2 电压源型单相全桥式方波逆变器	100
4.1.3 三相桥式方波逆变电路	105

4.2 单相电压型全桥式逆变器的正弦脉冲宽度调制 (SPWM) 控制 .....	108	5.3.3 三相电压型 PWM 整流电路 .....	160
4.2.1 SPWM 原理 .....	108	5.4 电流型 PWM 整流电路 .....	161
4.2.2 SPWM 的单极性控制与双极性控制 .....	110	5.4.1 单相电流型 PWM 整流器拓扑结构 .....	162
4.3 三相电压型 PWM 逆变器 .....	113	5.4.2 三相电流型 PWM 整流器拓扑结构 .....	162
4.3.1 三相电压型 SPWM 逆变器 .....	114	5.5 PWM 整流电路的控制 .....	162
4.3.2 其他三相电压型逆变器的 PWM 控制方式 .....	118	5.5.1 直流电压控制 .....	163
4.4 电流型逆变器 .....	120	5.5.2 交流电流控制 .....	163
4.4.1 单相电流型 PWM 逆变器电路 .....	120	5.6 带有源前端的能量回馈变频器 .....	168
4.4.2 三相电流型 PWM 逆变器电路 .....	121	5.6.1 工作原理 .....	168
4.4.3 电流型 PWM 逆变器的控制策略 .....	121	5.6.2 PWM 整流电路的更多控制策略 .....	170
4.5 空间矢量 PWM .....	122	5.6.3 双 PWM 变流电路的整体控制策略 .....	170
4.5.1 空间矢量脉冲宽度调制 (SVPWM) 的工作原理 .....	122	本章小结 .....	173
4.5.2 SVPWM 算法的实现 .....	125	习题与思考题 .....	174
4.6 用于变频器的逆变器制动与制动电阻 .....	131	动手操作问题 .....	175
4.6.1 用于变频器的逆变器制动 .....	131	<b>第 6 章 交流-交流电能变换的主要技术</b> .....	176
4.6.2 逆变器制动电阻选择方法 .....	132	6.1 双向开关构成 .....	176
4.7 基于智能功率模块 (IPM) 的桥式电路技术 .....	135	6.2 斩控式交流调压电路 .....	179
4.7.1 IPM 模块 .....	135	6.2.1 单相斩控式交流调压电路 .....	179
4.7.2 与光耦合器的连接 .....	138	6.2.2 三相斩控式交流调压电路 .....	180
本章小结 .....	144	6.3 交-交矩阵变换器 .....	182
习题与思考题 .....	145	6.3.1 矩阵变换器的拓扑结构 .....	182
动手操作问题 .....	145	6.3.2 矩阵变换器的开关传递函数 .....	184
<b>第 5 章 基于 PWM 方法的可控整流技术</b> .....	147	6.4 矩阵变换器的控制策略 .....	185
5.1 同步整流 .....	147	6.4.1 直接函数法 .....	186
5.1.1 应用同步整流技术的原因 .....	147	6.4.2 空间矢量调制法 .....	186
5.1.2 同步整流的基本原理 .....	147	6.4.3 双电压控制法 .....	187
5.2 同步整流电路的分类 .....	148	6.4.4 电流滞环跟踪控制法 .....	187
5.2.1 自驱动同步整流电路 .....	148	6.5 矩阵变换器的换流方法 .....	188
5.2.2 控制驱动同步整流电路 .....	149	6.5.1 四步换流策略 .....	189
5.3 电压型 PWM 整流电路 .....	155	6.5.2 两步换流策略 .....	190
5.3.1 单相电压型 PWM 整流电路拓扑结构和工作原理 .....	156	6.5.3 智能换流策略 .....	193
5.3.2 单相电压型 PWM 整流电路的运行方式 .....	159	本章小结 .....	193
		习题与思考题 .....	194
		动手操作问题 .....	194
		<b>附录</b> .....	195
		附录 A 部分大学生电子设计竞赛题 .....	195
		附录 B 部分电力电子元器件参数 .....	205
		<b>参考文献</b> .....	217

# 第1章 绪 论

电力电子技术是一种涉及电力（电能）处理的电子技术。让电动机运转，就要对其施加电能；而要其停下时，就要把电能切断。对电灯的控制也是同样的情况。但是，从所使用的技术手段来看，还是有了很大的变化。从先前的基于电磁作用构成的有触点继电器开关进化到了基于半导体技术的无触点电子开关。当前的技术特点是以不断发展的电子技术为基础，其技术手段具有鲜明的先进性和易用性。

在本章中，为了说明电力电子技术的应用关系，首先给出一个应用实例，再通过这个实例对电力电子技术的应用相关要素和基本指标加以说明，以达到对电力电子技术的基本应用形态有所了解的目的。

分析电路是掌握电路的必要前提。电路工作时各节点和连线有一定的电信号，因此可以通过主要节点的电信号波形来理解和分析电路原理，也可以通过实测波形与标准波形的比较来判断电路是否处于正常状态，这就是电路的波形分析方法。按照对电路的分析和理解，搭建实际电路，进行波形测量和电路调试，这就是实验法。值得注意的是，电力电子技术的应用目标就是通过实验搭建实际电路。借助现代的电子技术和信息处理技术，可以用数字仿真方法来模拟和研究电力电子电路。但是，为了精确和全面地研究电力电子电路，需要对其进行数学建模工作。本章介绍了主要电力电子电路的主要分析方法，并在后续章节中进一步扩展，从而能够在相关的技术工作中得以应用。

电力电子技术的本质和根本特点就是一种实用形态的电子技术，也就是一种具体的电子电路。随着电力电子技术的不断发展，当前的电力电子技术呈现出一些新的特点。从器件上，它的集成度越来越高；从结构上，更多的采用闭环控制；从控制信号来看，主要使用专用的微处理器来产生。在本章的最后，概括介绍了现代电力电子技术在设计和使用中的主要特点。

## 1.1 电力电子系统的构成

在当今的人类生活中，电能是一种必不可少的物质。随着对电能需求的变化，人类也需要不断地进行电能变换。能够进行电能变换的系统就是电力电子系统。在应用中，电力电子系统有一定的通用结构。本节中，首先通过一个应用实例来说明电力电子系统的基本情况，进而得出电力电子系统的一般构成。

### 1.1.1 电能变换需求

发电厂中，像火电厂、水电站和核电站，使用的能源是不同的，比如火电厂使用煤作为能源，水电站的能源是水力，核能是核电站的能量来源。但是，这些发电厂的发电机制是相同的，都是通过能量转换装置把原有的能量转换为机械能而使发电机组旋转。由于发电机组的三个感应发电绕组是在圆周上均布的（相差 $120^\circ$ ），所以一般都发出三相交流电，也就是



三路周期变化的、相互之间相位差为  $120^\circ$  的和每路都是按正弦规律变化的交变电。这些电能经过输电线路和配电线路，输送到用电负荷区域。这样，在用电负荷区域，用户可以直接得到三相的交流电和单相的交流电。不同的用电设备有不同的电能需求，有的可以直接使用电网提供的交流电，有的需要对电网提供的交流电进行处理和变换。除了直接使用三相交流电的三相异步电动机和直接使用其中一相交流电的常规照明灯之外，很多用电设备都需要进行电能变换。表 1-1 给出了三种常用的用电设备所涉及的电能转换情况。家用单相异步电动机是一种广泛应用于家庭场合的小功率电动机，需要使用两路相位正交（相差  $90^\circ$ ）的交流电，这就要求从家庭中有的单相正弦交流电中变换得到。在工业生产中，旋转设备多使用三相异步电动机。如果要对三相异步电动机进行调速控制，一种比较好的方法就是改变给其提供电能的供电频率。在许多涉及到电气的工作场合，会使用一个能提供稳定的直流电的开关电源，这类开关电源是把正弦交流电变为直流电。

表 1-1 典型用电设备的电能类型

设备类型	对应应用	所需电能	电能转换方法举例	说明
家用单相异步电动机	空调、冰箱	两相交流电	原来：单相交流电经电容移相 现在：直流电产生两路对称交流电	两相对称交流电可以使异步电动机旋转
三相异步电动机	机床、生产线	三相交流电	改变供电频率	改变供电频率就可以改变三相异步电动机转速
开关直流电源	LED 灯、直流电动机	直流或可变直流	把交流变成直流（相位整流或 PWM 整流）	

### 1.1.2 应用实例——降压斩波电路

本小节介绍一个电力电子电路实例。

直流降压斩波电路可以说是最为简单的电力电子电路，如图 1-1 所示。它的功能是用一个电力电子开关对输入的直流进行通断控制，使输出的直流电压平均值比输入直流电压低。它的主要电路部分由开关管 VT、二极管 VD 和电感  $L$  组成。这里的开关管 VT 采用的是绝缘栅双极晶体管（Insulated-Gate Bipolar Transistor, IGBT），通常为称为 IGBT 管，本教材也使用这种叫法。IGBT 管是一种基于晶体管和场效应管工艺合成的半导体器件，在共发射极情况下，输入回路的电特性与场效应管类似，而输出特性与晶体管相似。开关管 VT 与前级的直流电源  $E$  串联，并被控制信号  $u_g$  按照脉冲宽度调制（Pulse Width Modulation, PWM）方式进行开关控制，所以不与电源  $E$  相连的另一端就得到间断的电流  $i_d$  和电压  $u_d$ 。这个电能的平均值  $u_d$  是小于电源  $E$  的，就是具有降压功能。开关管 VT 对电能的通或断的开关控制作用，形象地看成是对电能的“斩断”，看作是有斩波的特点。这样，这种电路被叫作直流降压斩波电路。电感  $L$  起储能和滤波作

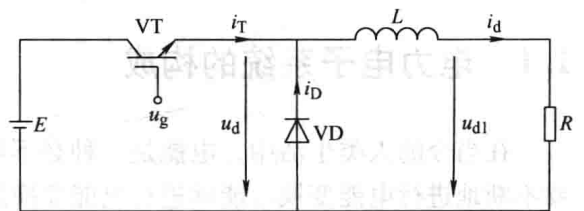


图 1-1 降压斩波电路

用, 二极管 VD 起续流作用 (二极管的续流作用是指: 当  $u_d > 0$  时, 二极管 VD 截止, 电源  $E$  给电感线圈  $L$  充电; 当  $u_d = 0$  时, 二极管 VD 导通, 电感线圈  $L$  经二极管 VD 放电。如果在  $u_d = 0$  时, 电感线圈  $L$  不经二极管 VD 放电, 则电感线圈  $L$  的电压会因电流变化率大而产生过电压)。所带的负载为电阻负载  $R$ 。

IGBT 管是电压控制器件。如果在 IGBT 管的栅极施加图 1-2 的电压驱动信号  $u_g$ , IGBT 管在  $t=0$  时导通, 导通时  $u_d = E$ ;  $t=t_{\text{off}}$  时 IGBT 关断,  $u_d = 0$ , 关断时电感  $L$  经二极管 VD 续流。图 1-2 还给出了输出电流  $i_d$ 、斩波器输出电压  $u_d$  的波形。输出的平均电压为

$$U_d = \frac{T_{\text{on}}}{T_{\text{on}} + T_{\text{off}}} E = \frac{T_{\text{on}}}{T} E = \alpha E \quad (1-1)$$

式中:  $T$  为开关周期;  $\alpha$  为占空比, 或称导通比, 改变  $\alpha$  可以调节直流输出平均电压的大小。因为  $\alpha \leq 1$ ,  $U_d \leq E$ , 故该电路是降压斩波电路。

进一步分析电流  $i_d$  的情况。在 IGBT 管导通区间有电流  $i_d$  经  $E_+ \rightarrow \text{IGBT} \rightarrow L \rightarrow R \rightarrow E_-$ , 而二极管 VD 截止, 可列电路电压方程为:

$$E = L \frac{di_d}{dt} + Ri_d \quad (1-2)$$

设  $i_d$  初始值为  $I_{10}$ ,  $\tau = \frac{R}{L}$ , 得

$$i_d = i_T = I_{10} e^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{E}{R} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (1-3)$$

该区间  $i_d$  从 0 或  $I_{10}$  上升, 电感储能。当  $t=t_{\text{off}}$  时  $i_d$  达到  $I_{20}$ , 同时 IGBT 关断。在 IGBT 关断期间, 电感  $L$  经电阻  $R$  和二极管 VD 续流, 这时的回路电压方程为

$$0 = L \frac{di_d}{dt} + Ri_d \quad (1-4)$$

设  $i_d$  初始值为  $I_{20}$ , 解方程可得

$$i_d = i_D = I_{20} e^{-\frac{t-t_{\text{on}}}{\tau}} \quad (1-5)$$

当每个导通周期有  $I_{10} = I_{30}$ ,  $I_{20} = I_{40}$  时, 电路进入稳定状态。在占空比  $\alpha$  较大时, 较小的电感  $L$  就可以使电流连续, 且电流连续时, 脉动很小, 可以认为电流  $i_d$  不变。在占空比  $\alpha$  较小时, 电感储能不足, 仍会出现电流断续, 如图 1-3 所示。如果在负载  $R$  上并联电容, 则相当于增加了电容滤波。在电容很大时, 负载侧电压可视为恒值, 但实际电容都是有限制的, 负载侧电压仍会有脉动。

对于上述电路有几点说明: ①这是一个单开关的直流电路, 只能控制一路电能的大小变化, 所以也被称为单象限斩波电路。②这是一个不完整的电力电子电路, 最少还应该包括驱动电路和

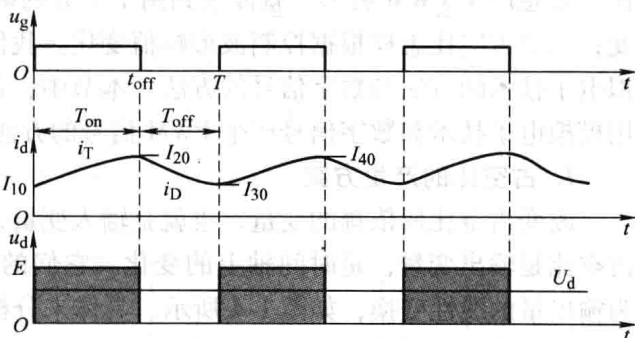


图 1-2 降压斩波电路波形分析图

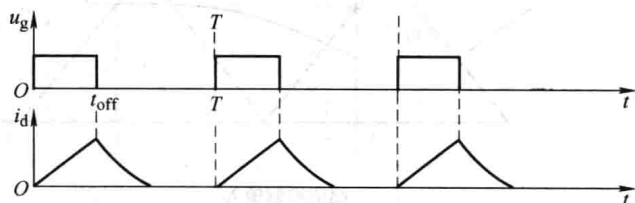


图 1-3 降压斩波电路电流断续时的波形

PWM 控制电路；PWM 控制电路把控制信号转换为控制电力电子开关的 PWM 信号，再经驱动电路处理后加到开关管的栅极上。③负载侧电压有脉动的情况下，可以对输出电压进行闭环稳压控制，这就需要对输出电压进行测量并反馈，再与给定电压比较，用两者之差经处理后对开关进行斩波控制。这种闭环控制是必须的结构，切莫忽视。

### 1.1.3 PWM 波形的产生原理

在图 1-1 中，没有给出产生 PWM 波形的的方法，这是电力电子技术中最关键的技术，以下分析和讲解这个问题。

现在采用的 PWM 波形的特点是周期不变和占空比可调，占空比与控制波形幅值成正比。要想产生 PWM 波形，就涉及到两个参数的确定问题：一是如何确定周期和保持周期不变；二是占空比怎样根据控制波形幅值变化。我们知道，产生电子信号的方法也有两种：模拟电子技术的方法和数字信号的方法。本节中，首先介绍占空比的控制原理，再分别讨论使用模拟电子技术和数字信号产生 PWM 信号的方法。

#### 1. 占空比的产生方案

改变占空比所依赖的变量，也就是输入变量，或者称为控制信号，都是幅值的变化。而占空比是输出变量，是时间轴上的变化。它们的关系是以控制量  $u_c$  为输入量、以占空比  $\alpha$  为输出量的线性变换，如图 1-4 所示。具体来分析，这是一个从纵轴的幅值到横轴的时间变化的一个变换，可参见图 1-5。图 1-5 中， $u_k$  到  $u_{k+1}$  的幅值变化变换为占空比  $\alpha_k$ 。这种变换的实现并不复杂，如前所述，它们之间是一个线性变换，可以直接使用线性变换进行转换。又考虑到占空比是一个周期性的变化，所以完整的变换应该是一个周期性的线性变换，我们一般都采用三角波，通常称为载波，如图 1-5 中虚线表示的周期性三角波。控制信号被称为调制波。可见变换的特点是：在两个三角波之间的幅值部分对应一个高电平，也就是控制信号大于三角波的部分，对应 PWM 波形的高电平，而控制信号小于三角波的部分对应 PWM 波形的低电平。所以，两个三角波之间的控制信号的幅值越高，对应的 PWM 波形的高电平越宽，低电平越窄。这符合我们对变换的要求。值得注意的是，一段幅值对应一个占空比，所以是有一定的误差的。也就是，把一段连续信号变成了一个周期的脉冲信号，就它们的平均值来说，经常是不相等的。因此，就周期性的多个转换的情况，转换规则是一样

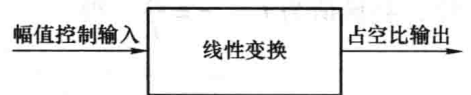


图 1-4 占空比变换框图

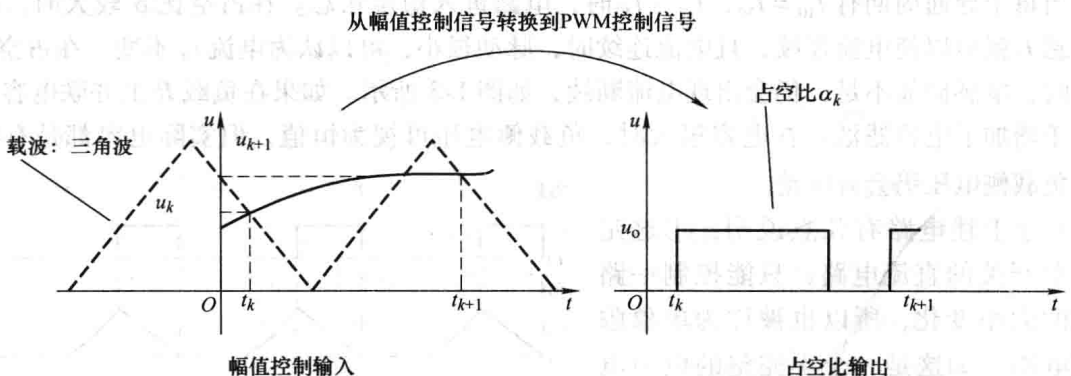


图 1-5 占空比变换示意图

的，但是误差却是不同的。另外，由于一段连续信号变为一个 PWM 信号，它们的作用效果就从连续作用变为断续作用。

### 2. 用模拟电子技术的方法产生 PWM 信号

模拟电子技术以放大和比较的方法连续地处理连续的信号，所以可以产生控制波和三角波，加以比较后，就能得到输出的 PWM 波形。根据图 1-6 所示的比较原理，可以用比较器产生 PWM 信号，但需要在输入端和输出端进行适当的信号处理。

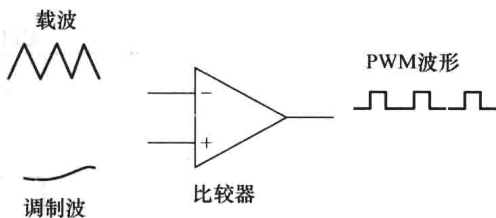


图 1-6 用模拟电子技术的方法产生 PWM 信号的原理

### 3. 用纯软件的方法产生 PWM 信号

可以使用纯软件的方法产生 PWM 信号，如图 1-7 所示。图中外方框表示微处理器，其中用有向线段连接的矩形框是微处理器的软件程序的一部分，可以是一个子程序或是一个专门的任务，完成所标示的内容。关键的技术是，根据控制信号的幅值和载波信号的参数计算出开关点时间，再按开关点时间控制微处理器输出 I/O 的高电平输出和低电平输出，产生 PWM 信号。这种方法所使用的硬件资源少，但是要占用较多的 CPU 资源，所以 PWM 信号的周期较大，工作频率受限。

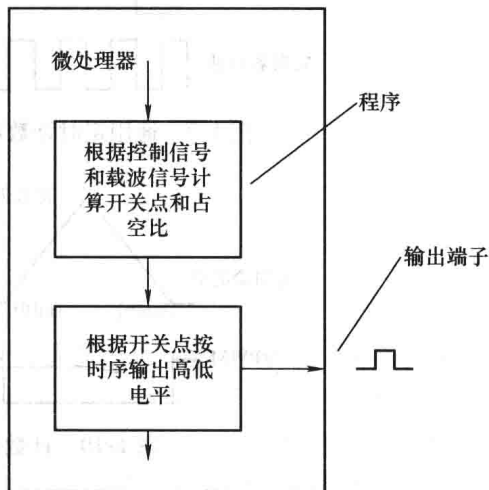


图 1-7 用软件产生 PWM 信号

### 4. 用软件和集成部件相结合的方法产生 PWM 信号

如果把信号产生的任务由硬件来完成，就会提高工作频率，所产生的波形性能就会更好。目前，最为有效的产生 PWM 波形的的方法是：用集成部件——比较器和计数器担当产生 PWM 信号的任务，用软件来计算所需要的计数值和比较值，并对计数器和比较器进行设置，其结构关系如图 1-8 所示。在图 1-8 中，按照事先的编程设计，计数值已根据所需要的载波值确定了，每隔一定时间，软件就根据控制信号的数值来计算所需要的比较值，再对硬件计数器和比较器进行设置。图 1-9 给出了用计数器产生三角波的例子。在图中给出的时钟脉冲的条件下，由定时器控制寄存器中使能位 TxCON[6] 为 1 的情况下，连续加计数形成三角波的前边，连续减计数形成三角波的后边，一个计数周期对应一个三角波的周期。这里，周期为 6 个时钟周期，加计数值为 3，减计数值也为 3。利用计数器的比较机制，再把控制信号幅值用比较器的值连续表示，并设置到计数器上，就会得到符合要求的 PWM 信号，如图 1-10 所示。图中，在每个计数器加减计数所形成的计数三角波形的上升边和下降边上，都会有和比较器设定值相等的点，即比较匹配点。在上升边上，比较匹配点会产生 PWM 波

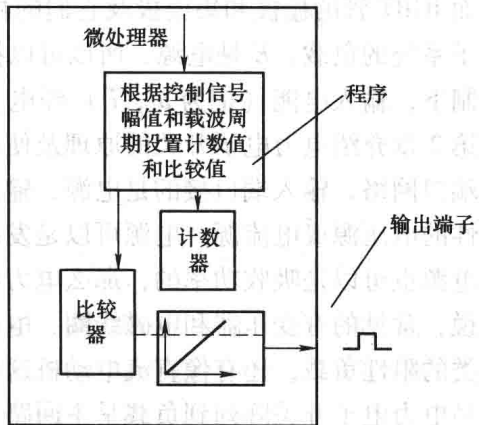


图 1-8 用软件和数字部件相结合的方法产生 PWM 信号

形的低电平，而下降边的比较匹配点会产生 PWM 波形的高电平。这样 PWM 信号的高电平对应两个三角波之间的两个比较匹配点的距离。

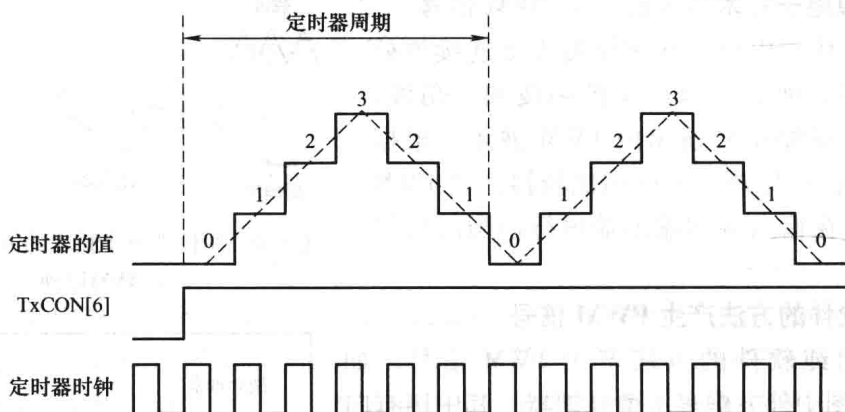


图 1-9 通用定时计数器的连续增/减计数模式产生三角波的原理

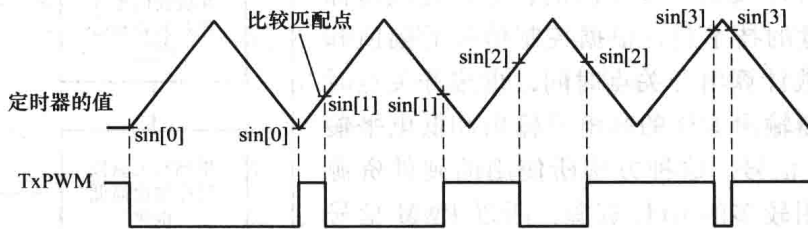


图 1-10 计数器和比较器产生 PWM 信号示意图

### 1.1.4 电力电子系统的构成与主要指标

#### 1. 电力电子系统构成

上述降压斩波电路把幅值较高的直流电能，变为幅值较低的直流电能。其主体电路可以概括为两部分，由电力电子开关构成的主回路和由信号转换电路和驱动电路构成的控制电路。IGBT 管的发射极和集电极、二极管和电感线圈及它们之间的连接线路构成了主回路；而 IGBT 管的栅极和集电极及它们的相关的连接则属于控制回路的一部分。电阻  $R$  是这个电子系统的负载， $E$  是电源，所以可以把图 1-1 概括为图 1-11，其功能为在控制信号  $u_c$  的控制下，输入电能（记为  $u_i, i_i$ ）经电力电子开关阵列变换为输出电能（记为  $u_o, i_o$ ）。将在第 2 章介绍电力电子开关的原理及使用。根据电路原理可知，电力电子主回路系统是一个两端口网络，输入端口接的是电源，输出端口接的是负载。电源可以是直流的，也可以是周期性的电压源或电流源。电源可以是发出功率的，那么电力电子系统是负载，消耗这些功率；电源也可以是吸收功率的，那么电力电子系统就给电源回馈功率。对电力电子系统的负载来说，常见的有变压器和电磁线圈、电磁阀这样的设备，也就是感性负载；也有像白炽灯这一类的阻性负载，还有像直流电动机这样的包含感性电源的反电动势负载。从回路来看，电源经电力电子开关阵列到负载是主回路，主回路的反馈与给定所形成的控制信号经信号转换单元和驱动电路形成控制回路，参见图 1-12。

以下进一步分析和讲解更加具体和常见的电力电子结构。我们知道，现在常用的电力电

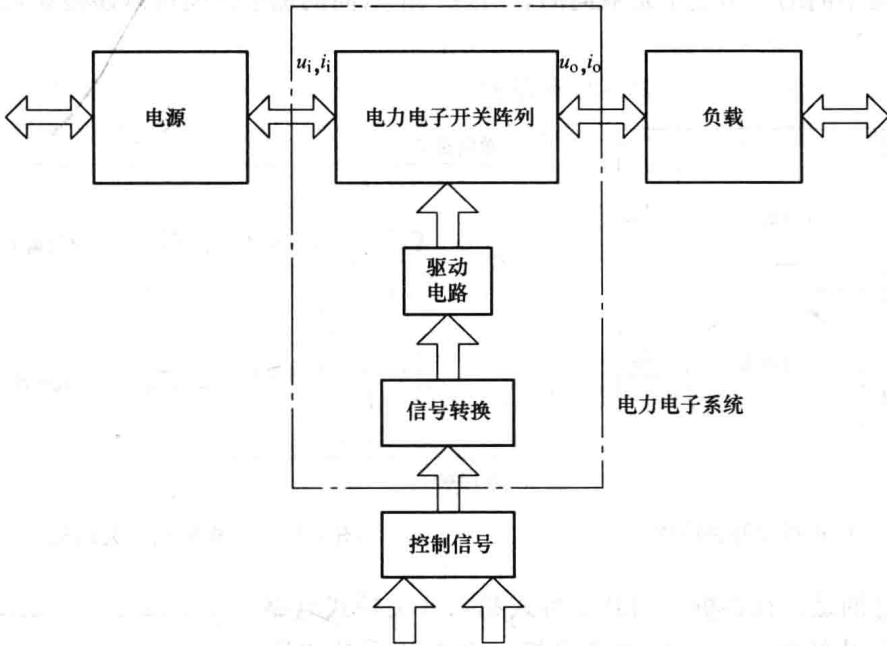


图 1-11 电力电子系统构成示意图

子开关都是单向的。为了给负载提供双极性电能，或者负载能提供双极性电能，就需要在一个节点上有双向的可控电能通路，因而形成半桥拓扑结构，如图 1-13 所示。在这种半桥拓扑结构中，两个电力电子开关串联，处于上部的开关称为高侧（high side）开关，处于低侧的开关称为低侧（low side）开关。这两个开关形成三个连接端子，其中两个端子是单向的，而另一个是双向的。

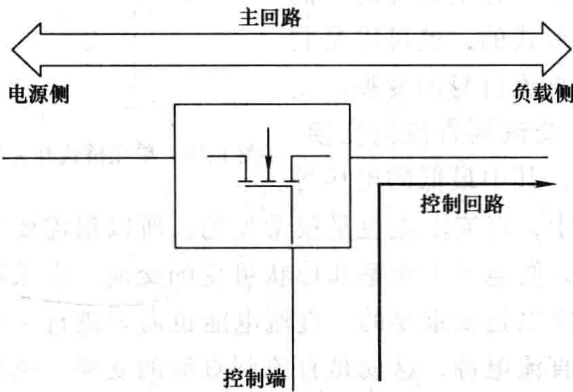


图 1-12 主回路与控制回路示意图

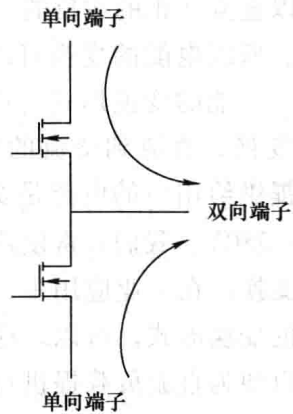


图 1-13 半桥式开关结构

两个半桥电路沿高侧开关和低侧开关的连接方向并联，就形成了单相（四开关）桥式电路，如图 1-14 所示。四开关桥式电路有四个端子，其中两个端子是单向的，而另两个是双向的。所以两个双向的端子之间可以连接有双向电能流过的负载。

按照上面的桥式电路的组成原理，三个半桥电路沿高侧开关和低侧开关的连接方向并联，就形成了三相（六开关）桥式电路，如图 1-15 所示。六开关桥式电路有五个端子，其

中两个端子是单向的，另三个是双向的。所以三个双向的端子之间可以连接双向电能流过的负载。

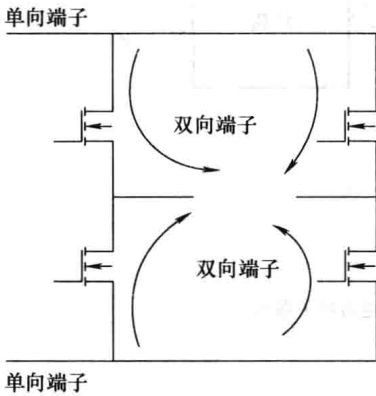


图 1-14 单相桥式开关结构

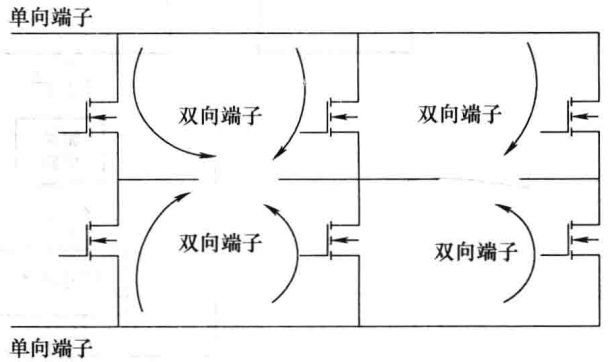


图 1-15 三相桥式开关结构

值得注意的是，在半桥、四开关桥式和六开关桥式电路中，经常要在其低侧开关的接地端串接一个电流采样电阻  $R_s$ ，如图 1-16 所示。流经  $R_s$  的电流在这个电阻上产生电压，利用这个电压可以进行过电流保护，也可以进行闭环电流控制，这对主回路的稳定是十分必要的，在使用这类电路时需多加留心。但是，这种检测电流的方法不是唯一的，也可以通过互感器等器件取得电流采样值。

### 2. 电能变换的形式与主要技术指标

电能以直流（正的或负的）或交流（有正有负的）的形式存在，所以电能的变换可以是同形式的，也可以是它们之间的。电能的变换形式有四种：直流自身的变换，交流自身的变换，直流到交流的变换，交流到直流的变换。电力系统提供给用户的电能是交流的，其中最低的电压等级是 220V/380V。我们日常使用电能中，直流电能也是很常见的，所以很需要交流到直流的电能变换。在工业应用中，为了方便地产生频率和形状可变的交流，常采用从直流变为交流的变换形式，所以，这种变换也是很重要的。直流电能也需要进行一些幅值上的变化，以便为直流负载提供可调的直流电源，这就是直流到直流的变换。虽然在得到交流电的过程中，由于技术的原因主要采用先把交流变成直流，然后再把直流逆变为交流的方法，但是能够从交流电能直接变换为所需要的交流电能，从理论上来说是最为理想的。

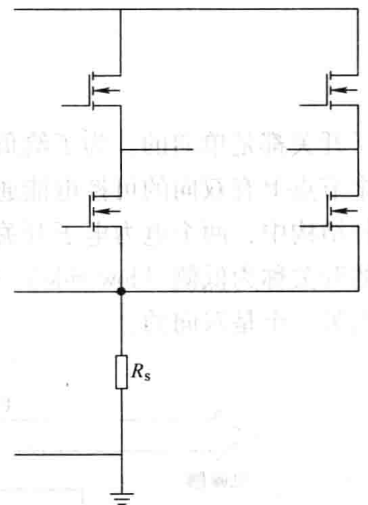


图 1-16 单相桥式开关的电流取样

交流电能的主要指标是功率因数。电力电子系统是其前级电源的负载，输入电能经过系统后不仅幅值会有所变化，因其本身的感性的存在也会使其输入相位发生变化。这种情况对电能的传输是有很大的影响的：如果电力电子系统不是纯电阻，不是显现纯阻性的话，那就是包含电抗性的存在（一般都以感性的方式存在），这样，电力电子系统内部就有了无功功

率，这就要求前级的电源不仅要提供有功功率能量，还要提供无功电能能量，也就是供电系统要有更多的无功电能。因为供电系统的功率传送能力是由有功传送能力和无功传送能力共同决定的（但不是相加的关系），结果是减小了传输有功电能的能力。这种有功传送能力可以用功率因数来描述，输入功率因数  $PF$ （power factor）定义为：电源输入功率平均值  $P_{AC}$  与其视在功率  $S$  之比，即

$$PF = \frac{P_{AC}}{S} \quad (1-6)$$

其中

$$S = U_s I_s \quad (1-7)$$

式中， $U_s$  为前级电源加到电力电子系统的电压； $I_s$  为前级电源与电力电子系统之间的电流（通常叫做输入电流，但是电流的方向不一定总是输入的）。

若输入电压为无畸变正弦波，那么只有输入电流的基波分量  $I_{s1}$  影响平均输入功率，即

$$P_{AC} = U_s I_{s1} \cos\varphi_1 \quad (1-8)$$

式中， $\varphi_1$  为输入电压与输入电流基波分量之间的相位角，称为位移角。而  $\cos\varphi_1$  被定义为位移因数  $DF$ （displacement factor），即

$$DF = \cos\varphi_1 \quad (1-9)$$

于是输入功率因数  $PF$  定义为

$$PF = \frac{U_s I_{s1} \cos\varphi_1}{U_s I_s} = \frac{I_{s1}}{I_s} \cos\varphi_1 \quad (1-10)$$

式中， $I_{s1}/I_s$  定义为畸变因数。

在供电系统中，各个用电户都要尽量提高功率因数，也就是多使用有功电能，少使用无功电能。我国对大的用电户采用通过功率因数调节电费的收费方法，就是功率因数越低，每度电的收费越高。提高功率因数，是每个用电户和相关设备设计和生产人员的不断追求。

在上述的降压斩波电路中，其输出是直流电能。但是我们所看到的输出波形都是很不平直的。虽然极性是单一的，也就是直流的，但是包含很多交流成分，电能质量不太好。这个交流成分可以用纹波电压来描述。所谓纹波电压，是指输出电压中 50Hz 或 100Hz 的交流分量，通常用有效值或峰值表示。经过稳压环节，可以使整流滤波后的纹波电压大大降低。在纹波的分析与处理中，常用的指标是最大纹波电压和纹波系数。最大纹波电压定义为：在额定输出电压和负载电流下，输出电压的纹波（包括噪声）的绝对值的大小，通常以峰-峰值（peak to peak）或有效值表示。纹波系数  $Y$ （%）定义为：当输入侧电压从允许输入的最低值变化到规定的最大值时，输出电压的相对变化值占额定输出电压的百分比，一般不超过 0.1%。在额定负载电流下，输出纹波电压的有效值  $U_{rms}$  与输出直流电压  $U_o$  之比，即  $Y = U_{rms}/U_o \times 100\%$ 。这里需注意：噪声不同于纹波。纹波是出现在输出端子间的一种与输入频率和开关频率同步的成分，用峰-峰值表示，一般在输出电压的 0.5% 以下；噪声是出现在输出端子间的纹波以外的一种高频成分，也用峰-峰值表示，一般在输出电压的 1% 左右。纹波噪声是二者的合成，用峰-峰值表示，一般在输出电压的 2% 以下。



输出电压的稳定性是十分重要的性能。我们尤其关注在输入电压有变化时和负载变化时的输出电压的稳定性。因而使用了电压调整率（voltage regulation）和负载调整率（load regulation）的概念。电压调整率是当输入侧的电压从允许输入的最小值变化到规定的最大值时，输出电压的相对变化值占额定输出电压的百分比，一般不超过1%。负载调整率是电源负载的变化会引起电源输出的变化，负载增加，输出电压降低；反之负载减小，输出电压升高。

## 1.2 现代电力电子技术的特点

### 1.2.1 电力电子集成电路的形态

电力电子器件的最初形态一定是分立元器件（discrete devices）。用分立元器件制造电力电子产品设计周期长，劳动强度大，可靠性差，成本高，因此电力电子产品逐步向模块化、集成化方向发展，其目的是使尺寸紧凑，实现电力电子系统的小型化，缩短设计周期，减小互连导线的寄生参数等。

电力电子电路包括主回路、驱动和保护电路及 PWM 控制电路三部分，既可以把它们集成一起，也可以把这三部分分别集成化，或者把其中两部分做成集成电路。这样，就有六种电力电子集成电路，包括：主回路、驱动和保护电路及 PWM 控制电路三部分的全功能集成电路，主回路和驱动电路一体集成电路，主回路集成电路，驱动和保护电路集成电路，PWM 控制集成电路，驱动和 PWM 控制一体集成电路。下面就现在常用的集成电路类型进行介绍。

#### 1. 全功能集成电路

从功能上来说，包括三部分的集成电路是最理想的，如图 1-17 所示，方便使用，节省空间。但是，功率大的主回路部分会发热，开关过程也有干扰，容易对其他部分产生影响，这样的集成电路对工艺的要求也是很高的。所以，只在小功率的电力电子集成电路中使用。

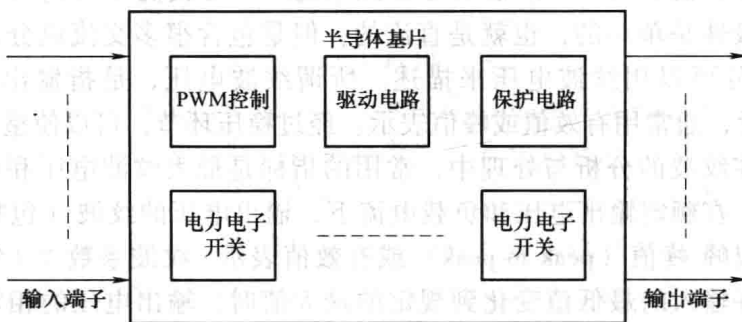


图 1-17 全功能集成电路示意图

#### 2. 主回路和驱动电路一体集成电路

##### (1) 单片集成式模块

随着半导体集成电路技术的进步和发展，有可能将功率器件和驱动控制保护等电路集成为一个硅片上，形成所谓单片集成（system on chip）模块，如图 1-18 所示。集成模块简单、