

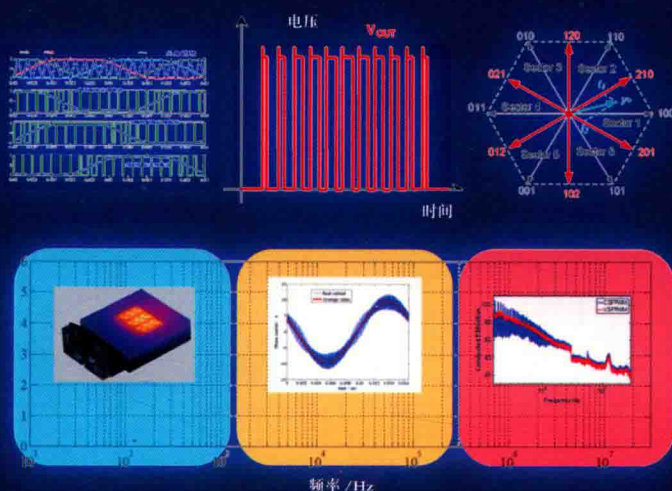


电气工程新技术丛书

电力电子变换器的 先进脉宽调制技术

Advanced Pulse-Width-Modulation Technologies
for Power Electronics Converters

蒋 栋 著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



电气工程新技术丛书

电力电子变换器的先进 脉宽调制技术

**Advanced Pulse-Width-Modulation Technologies
for Power Electronics Converters**

蒋栋 著

机械工业出版社

本书综合介绍了电力电子变换器的先进脉宽调制 (PWM) 技术的原理和应用。脉宽调制技术是电力电子变换器的核心技术, 利用它可实现控制系统对变换器的控制输出。传统的脉宽调制技术主要关注对参考波形的合成逼近效果, 而忽视了损耗、电流纹波和电磁干扰等影响, 并且没有有效利用脉冲的自由度。基于模型预测的先进脉宽调制策略是本书的核心内容, 通过建立 PWM 影响的预测模型, 有效地利用脉冲的自由度实现控制和性能的优化。本书针对先进脉宽调制, 研究了从简单到复杂的拓扑结构下的应用方法, 并且针对共模电压抑制的问题专门进行了研究和介绍。最后, 对先进脉宽调制的软硬件实现方法也进行了简述。

本书可以供电气工程专业的教师、研究生以及高年级本科生使用, 也可以供从事电力电子变流技术研发的工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力电子变换器的先进脉宽调制技术/蒋栋著. —北京: 机械工业出版社, 2018. 3

(电气工程新技术丛书)

ISBN 978-7-111-59104-7

I. ① 电… II. ① 蒋… III. ① 变换器-脉宽调制 IV. ① TN624

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 022134 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: 汤 枫 责任编辑: 汤 枫

责任印制: 常天培 责任校对: 张艳霞

唐山三艺印务有限公司印刷

2018 年 3 月第 1 版 · 第 1 次印刷

184mm×260mm · 12.75 印张 2 插页 · 300 千字

0001-2500 册

标准书号: ISBN 978-7-111-59104-7

定价: 49.00 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) 88361066

机工官网: www.cmpbook.com

读者购书热线: (010) 68326294

机工官博: weibo.com/cmp1952

(010) 88379203

金书网: www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网: www.cmpedu.com

出版说明

近年来，电气工程领域的研究有了长足的发展，为促进电气工程学科的发展和人才培养，现机械工业出版社会同全国在电气工程领域具有雄厚师资和技术力量的高等院校及科研机构，组成阵容强大的编委会，组织长期从事科研和教学的学者编写这套学术水平高、学科内容新、具备一定规模的电气工程新技术丛书，并将陆续出版。

这套丛书力求做到：学术水平高、学科内容新，能够反映国内外电气工程研究领域的最新成果和进展，具有科学性、准确性、权威性、前沿性和先进性；选题覆盖面广、深度适中，不仅体现电气工程领域的最新进展，而且注重理论联系实际。

这套丛书的选题是开放式的。随着电气工程学科日新月异的发展，我们将不断更新和补充选题，使这套丛书及时反映电气工程领域的新发展和新技术。我们也欢迎在电气工程领域中有丰富科研经验的教师及科技人员积极参与这项工作。

由于电气工程领域发展迅速，而且涉及面非常宽，所以这套丛书的选题和编审中如有缺点和不足之处，诚请各位老师和专家提出宝贵意见，以利于今后不断改进。

《电气工程新技术丛书》编委会

主 编：严陆光（中国科学院电工研究所）

副主编：李华德（北京科技大学）

编 委（按姓名拼音排序）：

薄志谦（许继集团有限公司）

董朝阳（南方电网科学研究院）

干永革（中冶赛迪电气技术有限公司）

何怡刚（合肥工业大学）

金建勋（天津大学）

李欣然（湖南大学）

阮新波（南京航空航天大学）

孙秋野（东北大学）

唐跃进（华中科技大学）

王志新（上海交通大学）

肖登明（上海交通大学）

熊小伏（重庆大学）

张 波（华南理工大学）

张承慧（山东大学）

张晓星（武汉大学）

程 明（东南大学）

范 瑜（北京交通大学）

戈宝军（哈尔滨理工大学）

江道灼（浙江大学）

李 鹏（华北电力大学）

马小亮（天津电气科学研究院）

舒 彬（北京电力经济技术研究院）

汤 涌（中国电力科学研究院）

王建华（西安交通大学）

伍小杰（中国矿业大学）

肖立业（中国科学院电工研究所）

袁 越（河海大学）

张潮海（国网电力科学研究院）

张道农（华北电力设计院有限公司）

赵争鸣（清华大学）

前 言

脉宽调制 (PWM) 技术是电力电子变换器中的核心技术, 是电力电子系统的控制器对功率单元最重要的输出。用流行的说法, 电力电子系统在 PWM 信号发出之前的控制都是“比特世界”的控制, 直到 PWM 信号发出, 控制理论才与真实的系统实现了接口。或者说, PWM 是控制系统中的执行环节, 大部分控制对象的控制都是通过 PWM 实现的。

理想的电能变换控制就是希望任意的信号波形都能够被直接放大为大功率波形, 模拟电子技术里的线性放大器就能实现这个目的。但是在中大功率的应用中, 连续的参考波形是无法直接转换为大功率 (电压或者电流) 波形的。PWM 的核心原理就是通过伏秒平衡 (或者叫作“等面积”准则), 实现脉冲对连续参考波形的等效。所谓“脉宽调制”指的就是调节脉冲宽度, 实现对不同参考波形的等效。

然而, 在电力电子这个仅有半个世纪历史的新兴学科中, PWM 又是一门“古老”的分支。PWM 技术起源于通信工程中的调制原理, 随着 20 世纪中后期电力电子器件的应用, PWM 技术在功率变换领域得到应用和发展。到以 IGBT 和 MOSFET 为代表的全控型高速开关器件广泛应用的世纪之交, PWM 已经是一门很成熟的理论了。以空间矢量合成和载波比较为两大分支的 PWM 技术已经写进了教科书。尤其是 2003 年 Holmes 和 Lipo 两位教授的专著《Pulse Width Modulation for Power Converters: Principle and Practice》一书的出版, 作者系统介绍了用完备的数学工具分析各类电能变换中的 PWM 原理和应用。可以说, 大家都认为 PWM 的主要问题都已经被解决了。

笔者正是在那个时期开始学习电力电子和电力传动这门学科的, 也有幸在刚刚学习 PWM 的时候, 就读到了 Holmes 和 Lipo 教授刚刚出版的专著。但是随着深入的学习, 尤其是在美国攻读博士学位时期参与一些科研项目时, 渐渐发现过去 PWM 技术的一些局限性, 才开始探索突破这些局限的方法。

过去实现 PWM 的时候主要采用一个开环的过程: 输入参考波形 (参考矢量) 给 PWM 模块, 根据参考波形 (参考矢量) 直接发出对应的脉冲。这个过程中, PWM 对于系统的附带影响是不被考虑的。但是 PWM 实现过程中会给系统带来明显的副作用: 开关损耗会随着 PWM 累积; PWM 带来电流纹波和畸变; PWM 给系统注入的高频激励会带来电磁干扰 (EMI) 的问题等。因为缺乏对这些影响的理解, 开环控制下的 PWM 并没有实现对它们的最优化控制。

而在实现 PWM 的合成过程中, 使用了很多“潜规则”, 比如: 脉冲是对称分布的, 各相脉冲中间是对齐的, 开关频率/周期是固定的。在保证脉冲与参考波形伏秒平衡的情况下, 这些潜规则的应用并不是必需的。应用这些潜规则是因为过去主要关注 PWM 的基本性能, 即对参考波形的逼近效果, 而忽略了关注 PWM 带来的副作用的影响。随着对电能变换的品质要求越来越高, 人们也越来越多地开始关注损耗、纹波和 EMI, 如何突破这些“潜规则”, 利用脉冲的新自由度来优化系统性能成了一个重要的课题。但是要用好这

些自由度来改善系统性能，首先必须理解 PWM 对系统这些性能的影响模型，能够通过预测的方法实时地利用 PWM 的自由度，最终实现“闭环” PWM，最优地利用 PWM 在每个开关周期的自由度。在 PWM 的几个影响中，纹波是与 PWM 同步的，是最适合预测和实时控制的。基于这个思路，笔者和笔者的同事们经过一系列的工作，建立起了电力电子变换器的纹波预测模型，以及基于此的模型预测 PWM 的理论架构，并推广到不同的拓扑和应用。

模型预测 PWM，或者是本书中所称的“先进” PWM 中的核心方法，本质上是利用了 PWM 对其影响的预测模型，实时地利用脉冲自由度来改善系统性能的脉宽调制方法。它的本质还是脉宽调制技术，是通过脉冲序列来逼近/合成参考波形。但是因为预测模型的帮助，它可以有效地利用 PWM 的自由度来优化性能，本质上是一个“闭环”的 PWM 方法。

包括 Holmes 和 Lipo 教授的专著在内，很多研究 PWM 的方法都是从频域出发，即研究脉冲序列的频域响应来评估 PWM 的性能。但是频域方法的主要缺点是无法实时地预测和进行控制。模型预测 PWM 技术是从时域的预测方法入手来实时改善性能。时域的预测方法是模型预测 PWM 的核心思路。

斗胆起“先进 PWM”这个名称，并不代表笔者认为之前的 PWM 技术“落后”。正是在前人工作基础上，笔者才能够和同行们一起逐渐找到利用 PWM 自由度的方法。最开始建立“先进 PWM”的工作都是基于最常用的三相两电平变换器。而随着变换器拓扑结构的复杂化，可以利用的自由度更多了，“先进 PWM”的空间也更大了。将这些工作整合起来，就成为这本书的主体。

构思这本书，是 2012 年年初我博士毕业后，在美国联合技术公司工作时，在我租住的康涅狄格州曼彻斯特一间小阁楼里开始的。不过在企业的工作使我的学术理想冬眠了几年，在联合技术公司工作三年半，一直都没有提笔。感谢国家和湖北省的海外人才计划，让我在 2015 年有机会从工业界回到学术界。重新开始学术生活几个月，就接到了机械工业出版社的约书信，重新唤醒了我写这本书的想法，于是从头开始撰写这本书。因为在美国学习工作八年，这方面的工作没有留下任何中文积累，这本书真的是一个字一个字敲出来的。而写这本书也是一个再创新的过程，书中很多章节，实际上在开始写的时候还没有做出来，甚至没开始做。在写这本书的两年多时间里，很多新的成果才被做出来，也使这本书的内容比刚刚规划的时候更丰富了些。

这本书能完成，要感谢很多人。首先是我的博士生导师王飞（Fred Wang）教授，是他在弗吉尼亚理工大学和田纳西大学的指导让我进入了先进 PWM 这个领域。本书的核心内容，可以追溯到 2010 年秋天我刚刚转学到田纳西大学的时候和他的那几次讨论。另外要感谢我在美国联合技术公司的老板，Vladimir Blasko 博士，他是本书中提到的载波比较 PWM 与空间矢量 PWM 统一理论的创立者之一，和他工作的三年半让我受益匪浅。我也要感谢我的硕士生导师赵争鸣教授等清华老师对我的培养。回国任教后，华中科技大学的很多老师也给予我很多帮助，特别要感谢的是曲荣海教授的帮助和支持。模型预测 PWM 的最初概念也是在和我的博士同学，现在美国通用电气公司全球研究中心（纽约州）的王汝锡博士讨论

中得到灵感的，在这里一并致谢。

最后要感谢我的学生们，他们不仅参与了这本书的绘图和校对等具体工作，而且有很多同学的研究成果直接贡献给了本书的很多章节。他们是沈泽微、陈嘉楠、李桥、韩寻、张野驰、王翰祥、方志浩、邹天杰、俞学初等。

另外，感谢北方工业大学的张永昌教授百忙之中帮助审阅了全书。

这是我学术生涯出版的第一本书，疏漏在所难免，欢迎广大读者和专家学者批评指正。

编 者

目 录

出版说明

《电气工程新技术丛书》编委会

前言

第 1 章 电力电子变换器与脉宽调制技术

基础 1

1.1 电力电子器件和电力电子变
换器 1

1.2 脉宽调制技术简介 5

1.3 电力电子技术的发展与挑战 8

1.4 小结 10

参考文献 10

第 2 章 脉宽调制技术的原理 11

2.1 空间矢量 PWM 11

2.2 载波比较 PWM 15

2.3 空间矢量 PWM 与载波比较
PWM 的关系 21

2.4 PWM 中的一些非理想因素 25

2.5 PWM 的数学分析方法 29

2.6 小结 32

参考文献 32

第 3 章 脉宽调制对系统的影响 34

3.1 脉宽调制技术对系统影响
综述 34

3.2 PWM 与开关损耗 35

3.3 PWM 与电纹波 36

3.4 PWM 与电磁干扰 38

3.5 改进范例：随机 PWM 39

3.6 小结 41

参考文献 42

第 4 章 电力电子变换器的电流纹波

预测模型 43

4.1 单相逆变器的电流纹波预测
模型 43

4.2 三相电压型变换器电流纹波

预测：戴维南等效电路 46

4.3 通用多相变换器电流纹波

预测方法 53

4.4 考虑电路不对称的电流纹波

预测 59

4.5 直流母线电流预测 60

4.6 非理想条件对预测的影响及
应对 68

4.7 小结 72

参考文献 73

第 5 章 模型预测 PWM 技术 75

5.1 模型预测 PWM 75

5.2 变开关频率 PWM 的架构 77

5.3 基于电流纹波峰值的变开关
频率 PWM (VSFPWM1) 78

5.4 基于电流纹波有效值的变开关
频率 PWM (VSFPWM2) 83

5.5 基于其他优化目标的变开关
频率 PWM 85

5.6 脉冲分布的控制：移相
PWM 93

5.7 小结 98

参考文献 98

第 6 章 复杂拓扑结构的先进

PWM 100

6.1 复杂拓扑结构变换器及其
PWM 简介 100

6.2 并联逆变器和载波移相
PWM 109

6.3 多电平变换器的变开关频率
PWM 116

6.4 电流型变换器的 PWM

策略.....	122	PWM	150
6.5 小结.....	127	7.4.6 并联零共模 PWM 的算法	
参考文献	128	改进——环流抑制	157
第7章 改进共模噪声的 PWM		7.4.7 并联零共模 PWM 的死区补	
技术	130	偿方法.....	165
7.1 共模噪声问题简介.....	130	7.5 小结.....	173
7.2 改进 PWM 策略对共模电压的		参考文献	174
抑制.....	133	第8章 先进 PWM 的软硬件实现	178
7.3 共模回路分析和共模电流抑制		8.1 仿真中先进 PWM 的实现	178
方法.....	136	8.2 DSP 中 PWM 的发生原理	181
7.4 复杂拓扑结构与 PWM 消除共模		8.3 改进 PWM 的实现	185
电压的方法.....	140	8.3.1 改进的 PWM——变开关	
7.4.1 多电平变换器：零共模		频率 PWM	186
PWM	140	8.3.2 改进的 PWM——载波移	
7.4.2 多电平变换器零共模 PWM		相 PWM	187
的不足.....	143	8.3.3 改进的 PWM——单开关周期	
7.4.3 多电平变换器：零共模 PWM+		内前后半周期不同比较值的	
变开关频率	145	实现	189
7.4.4 并联变换器：载波移相 ...	148	8.4 小结.....	191
7.4.5 并联变换器：零共模		参考文献	192

第1章 电力电子变换器与脉宽调制技术基础

过去数十年,微电子技术和电力电子技术都得到了快速的发展。微电子技术将现代社会带入了信息时代,而与之相对应的电力电子技术对人类文明的影响则仍然有相当大的潜力。通过电力半导体器件的开关实现电能的可控转换是电力电子技术的本质,而实现电能变换的主要渠道就是脉宽调制(PWM)技术。本章作为全书的第一章,将介绍电力电子技术的背景以及PWM技术的发展历程和电力电子技术的机遇与挑战。

1.1 电力电子器件和电力电子变换器

人类有效地利用电能可以追溯到19世纪。在19世纪后半叶法拉第等人发现电磁感应现象,并由麦克斯韦等人总结分析得到电磁场理论,从而奠定了近代电磁学和电工技术的基础。自此之后的百年时间,人类基于电磁场理论发展出了两大工业分支:以电机和输配电为代表的电力工业与以电话和无线电为代表的电信产业。这两大分支在20世纪上半叶极大地改变了人类社会的面貌。

自20世纪中叶以来,半导体技术得到了飞速的发展,将过去一百年间连续的、线性的电工理论推广到离散的、非线性的领域。在此基础上电力工业和电信产业两大工业分支也发生了深刻的变化。在电信产业领域,大量的电子元器件开始得到应用,继而产生了电子计算机、集成电路和人工智能等高新技术。毫不夸张地说,现代社会被半导体技术推到了“零和一”的时代。半导体技术在电信领域的巨大推动力,是由于半导体电子器件强大的信息处理能力。而对于电力工业,处理的对象是能量而非信息,因此半导体技术在电力工业的影响要滞后于电信领域若干年。但是最近几十年电力工业在半导体技术的推动下也发生了深刻的变化,这就是电力电子技术的发展。

电力工业过去几十年的发展依赖于电机和变压器等设备,实现电能与机械能或者电能与电能的转换,这样的转换是连续的、线性的。半导体器件开始在电能变换中的应用始于功率二极管器件的使用。功率二极管的基本物理原理与基于PN结的普通二极管是一致的,能够正向导通电流,反向阻断电流。功率二极管可以用于将交流转换为直流的整流变换,但是只应用功率二极管的电路是不控型的电路,只能实现简单的功能。1957年,美国通用电气(GE)公司发明了晶闸管(Thyristor),第一次改变了传统电能变换的特性。晶闸管是一种固态开关器件,基于半导体硅材料,在物理结构上是P-N-P-N的四层结构。它可以实现较小的导通电阻和较大的阻断电阻,并且可以通过门极控制导通。因此晶闸管可以用于可控型的整流电路,实现交流-直流变换,故晶闸管俗称为可控硅(SCR)。在此之后,晶闸管陆续被应用于直流-交流变换(逆变)、交流-交流变换(变频、调压)以及直流-直流变换(斩波)等领域。由于晶闸管的门极可控性,它可以更加灵活地应用于电能变换,并实现主动的控制。正是这个时候开始,电力电子技术这一学科开始出现,并得到了发展。

晶闸管作为第一代电力电子开关器件，在数十年内主导了电力电子技术。但是它有一个明显的问题：门极可以通过外部控制信号触发开通，但是无法通过门极的外部信号触发关断。晶闸管要通过主电路加反向电压使电流下降为零才能关断。因此，晶闸管是一个半控的主动开关器件。为了有效地关断晶闸管，需要外接辅助换相电路，这也是早期的电力电子变换技术的一个主要研究内容。为了解决这个问题，电力半导体研究人员在普通晶闸管结构上进行了改进，发展出了门极关断晶闸管（GTO）。它不仅可以通过门极触发电流导通，还可以通过门极触发电流关断，真正实现了开关全控。GTO 器件是一种具备主动开关能力的高压大电流电力电子器件，在 20 世纪后期广泛地应用在轨道牵引和工业变频上。

GTO 器件的主要问题是门极驱动通过电流触发开关，门极驱动较为困难，开关速度受到限制。在 GTO 结构的基础上，最近二十年通过集成门极驱动，发展出了发射极关断晶闸管（ETO）和集成门极换流可关断晶闸管（IGCT）等器件。它们的核心还是晶闸管结构，但是其门极以低电感模式集成了驱动电路，对用户来说，驱动更加简单方便，开关速度也能显著提高。近些年来 IGCT 开始应用在各种高压大容量的电能变换场合，显示出了优越的性能。

以上的器件（普通晶闸管，GTO，IGCT，ETO）核心都是基于 P-N-P-N 的晶闸管结构，与晶闸管同时期出现的另一种电力半导体器件是晶体管。晶体管主要包括双极结型晶体管（BJT）和场效应晶体管（FET）两种。双极结型晶体管是由两个 PN 结结合在一起形成的 PNP 型或者 NPN 型半导体器件，通过外部输入基极电流改变其导电特性来控制外电路电流。场效应晶体管是通过外部施加控制电压产生电场，利用电场效应改变导电特性，从而控制外电路电流。目前应用最广泛的场效应晶体管是金属氧化物半导体场效应晶体管（MOSFET）。另外，由于工艺的原因，新型的宽禁带电力电子器件中，结型场效应晶体管（JFET）也是主流器件之一。

用于电力变换的 BJT 器件是一种全控型功率器件，通过基极电流控制开关，耐压与通流能力强。但是其主要问题是驱动需要功率大，开关速度不够快。功率 MOSFET 器件也是一种全控型功率器件，通过栅极电压控制开关，开关所需功率小，开关速度快，但是 MOSFET 的缺点是通态压降大，难以制作成高压大电流器件。结合两种器件的特点，20 世纪 80 年代发展起来的绝缘栅双极型晶体管（IGBT）成为新一代的全控型电压驱动的电力电子器件。IGBT 等效于一个 MOSFET 驱动门极的双极型晶体管器件，兼具 MOSFET 的开关速度快和 BJT 高压大电流的优点。最近几十年，IGBT 广泛应用于各类电能变换，包括电机控制器、可再生能源转换、并网变换器以及电力系统中。

与此同时，电力电子器件的材料也在过去 20 年间得到了新的发展。取代传统硅材料的新型宽禁带半导体材料，包括碳化硅（SiC）、氮化镓（GaN）以及金刚石材料开始应用在电力半导体器件上。宽禁带半导体材料具备更高的导带-价带能级差，宽禁带电力电子器件在导通电阻、耐压能力、开关速度和耐高温能力上优于传统的硅器件。21 世纪以来，世界主流半导体厂商都投入了对 SiC 电力电子器件的研发和生产，且专业研发 SiC 电力电子器件的初创企业，如美国的 CREE 和 United Silicon Carbide 公司等取得了一定的成功。1200V 级别的 SiC 器件在 2015 年前后已经广泛出现在市场上。器件材料的革新对电力电子技术也起到了有力的推动作用。

本书的核心思路是在全控型快速开关下的电力电子器件基础上，研究电力电子变换器的

一个核心技术：脉宽调制策略。电力电子器件是研究的物理基础，由于电力电子器件本身的特性，脉宽调制策略才有了研究的内容。本书主要采用 IGBT 和功率二极管电力电子器件作为研究对象。实际上，对于其他全控型的电力电子器件，本书讲述的内容同样能够适用。

由电力电子器件与其他辅助元器件以及无源器件与负载搭建出的电力电子变换器就可以实现电能的可控转换。

按照电力电子器件的承压和通流能力，将电力电子变换器中的开关组合成两种方式，如图 1-1 所示。图 1-1a 所示是一个主动开关和二二极管的反并联结构，在这种结构中，正向（A-B）电流可以通过控制开关门极导通，反向（B-A）电流可以通过二极管导通。在门极关闭的情况下，这种开关可以承受正向（A-B）的电压，但是无法承受反向（B-A）的电压。因此在电压-电流平面上，这种开关的有效区域如图 1-2a 中的阴影部分所示。图 1-1b 所示是电压双向开关，是主动开关和二二极管的串联。在这种开关中，正向（A-B）的电压可以通过关断开关管承受，反向（B-A）的电压可以通过二极管承受，因此它是一种双向承受电压的开关。但是因为二极管串联在开关中，它只能正向（A-B）导通电流，因此它的有效区域如图 1-2b 中的阴影部分所示。

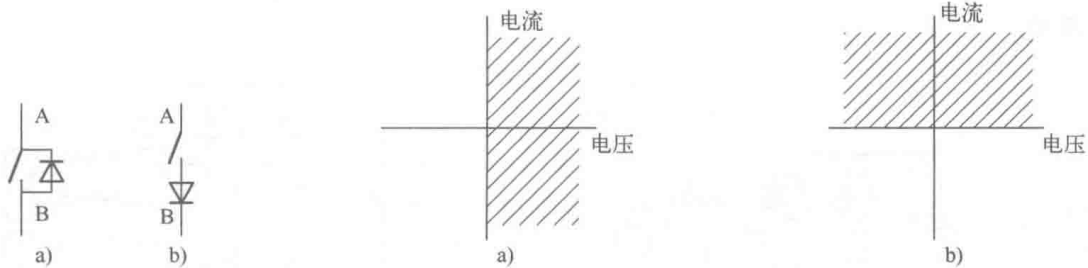


图 1-1 电力电子变换器中的两种典型开关
a) 电流双向开关 b) 电压双向开关

图 1-2 两种典型开关下的电压-电流平面
a) 电流双向开关 b) 电压双向开关

除了开关，在电力电子变换器中另一个重要的元件是无源元件。在经典电路理论中，无源元件主要包括电阻、电感和电容三种。电阻是最简单的无源元件，满足电压-电流瞬时线性关系。电容和电感则是在电压-电流关系中存在微分和积分关系的。图 1-3 所示是这两种无源元件的符号。在电感中，能量存储在磁场中，电感的电流变化率与电感两端的电压成正比，电感的电流是不可突变的量，可以作为系统中的一个状态变量。电容的能量存储在电场中，电容电压的变化率与流入电容的电流成正比，电容的电压是不可突变的量，也可以作为系统中的一个状态变量。

用这两种开关模式和无源元件，可以搭建对应的电力电子变换器。以最简单的直流-直流变换器为例，两种典型的拓扑结构如图 1-4 所示。图 1-4a 所示是降压（Buck）变换器，其中负载电压是电容上的状态变量。开关 S 的连续开关改变电感上的电压降，电感电流在稳定值附近有连续的纹波。由于开关 S 的导通关断，使负载电压通过开关的占空比得到降压。图 1-4b 所示是升压（Boost）变换器，负载电压也是电容上的状态变量。开关 S 的连续开关改变电感上的电压降，使电感电流处于给负载充电和续流两种状态。负载电压通过开关 S 的占空比从电源电压得到升压。

图 1-4 所示的直流-直流变换器是最基本的拓扑结构，主要的电力电子变换器的拓扑结构都可以由最基本的结构得到。由于直流-直流变换器中的控制变量是直流量，不需要电压或



图 1-3 两种典型的无源元件

a) 电感 b) 电容

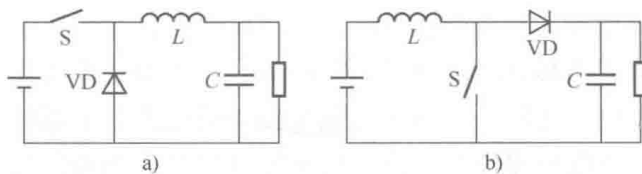


图 1-4 两种典型的直流-直流变换器拓扑

a) 降压 (Buck) 变换器 b) 升压 (Boost) 变换器

者电流的双向性，因此开关单元是简单的开关或者二极管。但是如果应用在包含交流量（电压或者电流）的电力电子变换器中，电压或者电流将在器件上呈双向性，那么就必须使用图 1-1 所示的电流双向或者电压双向开关。图 1-5 所示是最典型的单相直流-交流变换器（逆变器）与交流负载连接的拓扑结构。输入侧是电压源性质，因此也称为电压型逆变器。负载电感使负载呈现电流源特性，即交流的连续电流。由于此时流过器件的电流呈双向性质，因此需要采用图 1-1 的双向电流开关，即开关管与二极管反并联的结构。这样持续地通过调整占空比开关器件，就能实现输出的交流特性。这种拓扑推广到最常用的三相情况下，如图 1-6 所示。由三个桥臂组成电压型逆变器的主电路，每个桥臂包括两个电流双向开关。

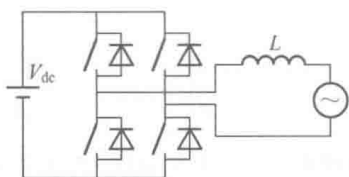


图 1-5 单相电压型逆变器拓扑结构

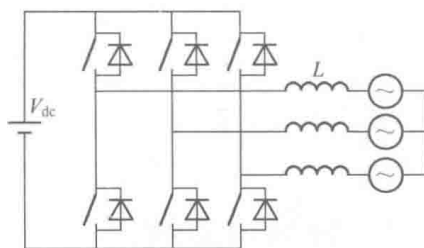


图 1-6 三相电压型逆变器拓扑结构

与电压型逆变器相对应的是电流型逆变器。逆变器中，直流输入是电流源特性的变换器，也就是电流型逆变器。图 1-7 所示是三相电流型逆变器的结构。直流输入侧通过电感改变为电流源特性，即直流侧是恒定电流输入。此时负载侧需要是电压源特性，因此负载侧通过电容连接到逆变器端口。由于直流输入单向的电流，而负载是交变的电压，因此开关器件属于如图 1-1b 所示电压双向型器件，即一个开关管与一个二极管的串联结构。在三相电流型逆变器中有三个桥臂，每个桥臂由两个电压双向型器件组成。

图 1-6 和图 1-7 所示都是最基本的三相逆变器结构。实际上，对于图 1-6 的电压型逆变器，当负载与电源反过来的时候，同样的拓扑结构可以用于交流-直流变换，即整流器。而对于图 1-7 的电流型逆变器，开关反向后能量由交流侧流向直流侧，成为电流型整流器。目前主要的三相电力电子拓扑结构，不论是整流还是逆变，主要采用图 1-6 和图 1-7 这两种拓扑结构。在三相实际应用中，电压型三相电力电子变换器（逆变器、整流器）是使用最广泛的拓扑结构，

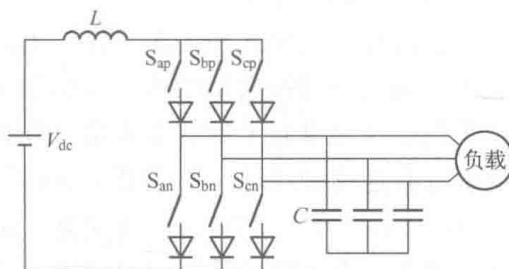


图 1-7 三相电流型逆变器结构

也是本书的主要研究对象。在部分应用中，电流型三相电力电子变换器也有一定的优势，因此，它将作为一部分补充内容在本书中介绍。

1.2 脉宽调制技术简介

在介绍了电力电子器件和电力电子变换器拓扑结构后，下一步需要了解的是电力电子变换器的控制技术。图 1-8 所示是一个典型的控制系统框图。控制目标：参考值与传感器送回的反馈值相减后得到误差，通过控制器产生参考执行量，此时必须通过执行器将参考执行量转换为物理执行量加载在控制对象上才能控制输出。没有执行器，控制系统只能是数学模型而不会存在实际控制能力。在电力电子变换器中，脉宽调制技术就是将参考执行量转换为物理执行量的执行器。

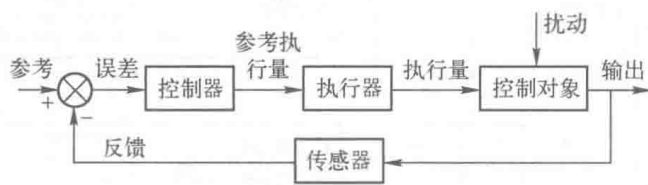


图 1-8 一个典型的控制系统框图

文献 [6] 和 [7] 给出了中大功率电力电子变换器系统的分层控制结构图，并作为 IEEE 的标准发布，如图 1-9 所示。在电力电子变换器系统中，控制分为五层：首先是系统级的控制，此级与顶层应用相关，时间尺度在 10 ms 以上，比如电动汽车的运行模式等；在系统级控制下的是应用控制，即为了满足系统级控制的需要而执行的控制，时间尺度在 1~10 ms 之间，比如电动汽车上为了满足车辆运行而执行的电机速度控制等；再下一层是电力电子变换器的控制，即为了满足应用控制而对电力电子变换器实施的控制，时间尺度在 10 μ s~1 ms 之间，比如电动汽车上电机驱动电路的电流控制等；再下一层就是开关控制，是通过选择开关组合模式等满足电力电子变换器的控制，以脉宽调制为代表，时间尺度在 1~10 μ s 之间；最下一层是硬件控制，即在开关控制之下，还有一个将数字开关逻辑转换为电力电子器件开关的过程，比如电力电子器件的门极驱动等，是全部控制的最底层，时间尺度在 1 μ s 以下。

从图 1-9 可以看出，电力电子变换器的控制分层自上而下，不同层的功能不同，时间尺度也不一样。本书的核心就是针对第四层即开关控制而展开的介绍和研究。开关控制的本质是通过控制开关组合和作用时间，将第三层传达的控制参考值以脉冲序列的方式实现，并传达到第五层的硬件控制上。以电压型电力电子变换器为例，为了控制其输出电流，控制器输出参考电压，这个参考电压是连续的模拟值，但是电压型电力电子变换器是无法输出连续电压的，必须用脉冲输出电压来实现等效，因此用脉冲电压组合来等效参考输出电压的过程就是第四层的开关控制。脉宽调制技术就是实现开关控制的最典型方法。

脉宽调制技术的英文叫 Pulse-Width-Modulation，简称 PWM。顾名思义，就是通过调制脉冲的宽度实现输出。PWM 最早出现于通信领域，是无线电调制的一种，后来被引入电力电子领域。

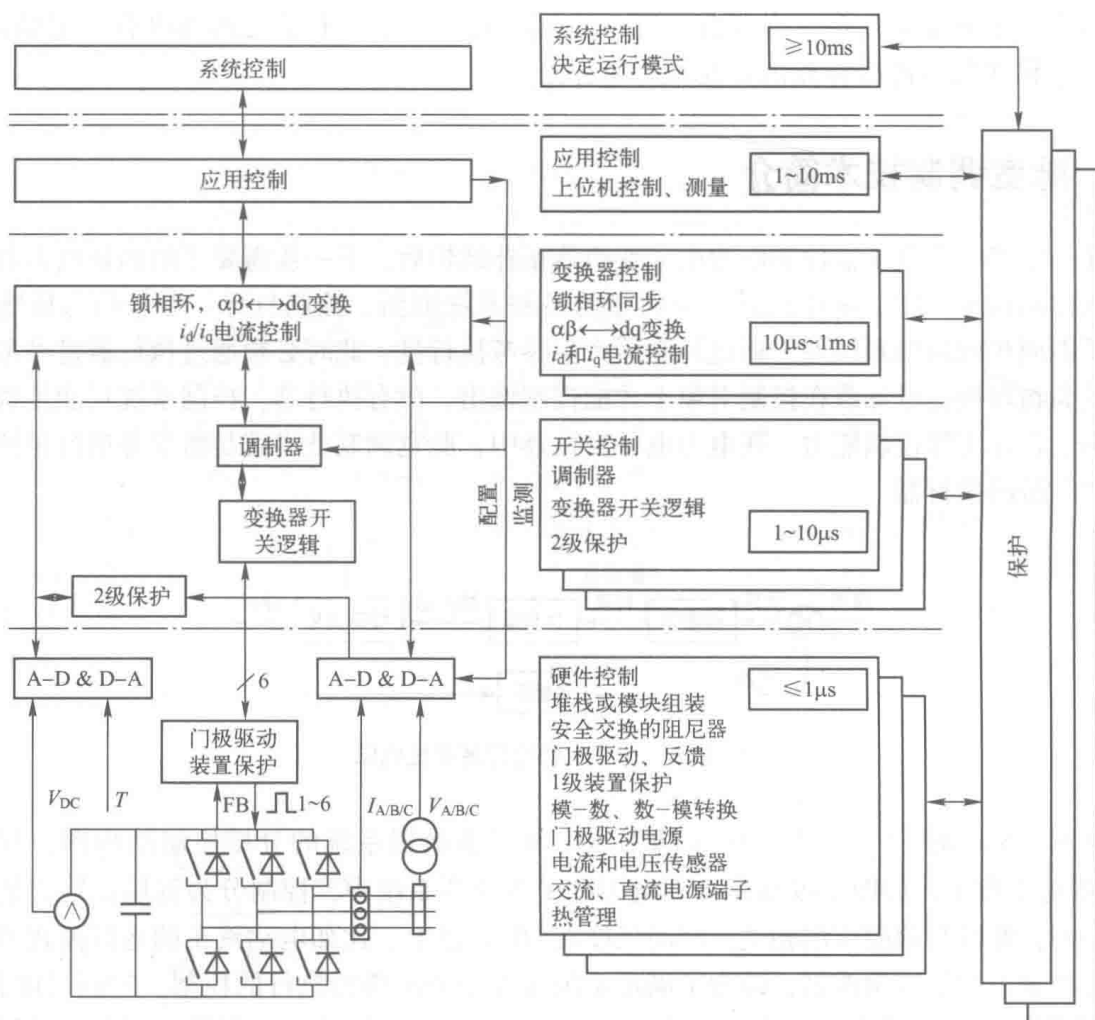


图 1-9 电力电子系统的分层控制图^[6,7]

图 1-10 用单桥臂展示了脉宽调制的基本原理。对于电压型电力电子变换器，直流母线电压为 V_{dc} ，以直流母线中点为参考，桥臂输出端电压 V_x 在正负直流母线电压的一半之间切换，通过参考电压 V_{ref} 与载波在每个开关周期 T_s 中的比较实现。当参考电压大于载波（三角波）时，上管导通，输出正电压；当参考电压小于或等于载波（三角波）时，下管导通，输出负电压。由于相似三角形的关系，桥臂输出负电压（ $-V_{dc}/2$ ）的时间 T_0 满足 $T_0/T_s = (V_{dc}/2 - V_{ref})/V_{dc}$ 。这样，通过计算一个开关周期 T_s 内脉冲电压 V_x 的平均值，得到式 (1-1) 表达的结果，即电力电子变换器桥臂输出端在一个开关周期内的平均电压等于参考电压。通过这个关系，就可以通过 PWM 的方式实现对参考电压的等效实现。

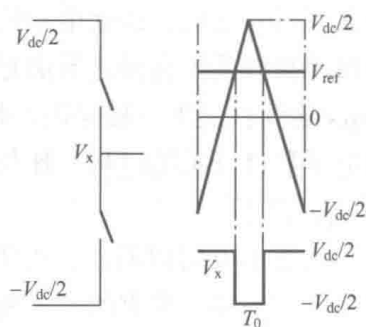


图 1-10 电压型电力电子变换器桥臂通过 PWM 实现参考电压逼近的方法

$$V_x = 1/T_s [(1-T_0)V_{dc}/2 + T_0(-V_{dc}/2)] = V_{ref} \quad (1-1)$$

对于固定的参考电压，这样的载波比较方法可以得到逼近。如果参考电压呈交流变化，那么占空比也会随着参考电压的变化而变化。图 1-11 所示是交流参考电压 v_a^{ref} 与幅值为 V_{car} 的载

波比较得到 PWM 输出的原理图。这样得到的脉冲序列 v_a 在每个开关周期内的平均值都等于连续参考电压对应位置的值。如果开关频率足够高，滤除高频分量得到的 v_a 就基本等效于 v_a^{ref} 。

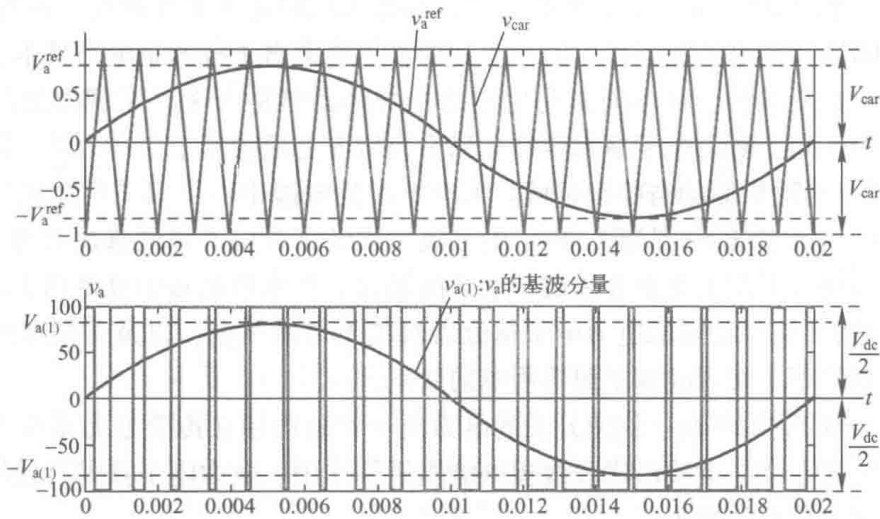


图 1-11 交流参考电压下的载波比较 PWM 原理

除了载波比较的方法逼近参考值，另一种实现 PWM 的等效原理的方法是空间矢量合成的方法。空间矢量 PWM 不是以某一个电压值为逼近对象，而是以若干相电压组成的参考电压矢量为合成目标。以三相电压型电力电子变换器为例，某相桥臂开关连接正母线标记为 1，连接负母线标记为 0，这样对于三相变换器一共有 $2^3=8$ 种组合方式，记为 8 个开关电压矢量。这 8 个电压矢量中有两个零矢量（000 和 111）不产生有效输出电压，另外 6 个开关矢量在空间上组成正六边形，每个标准矢量对应电压长度为 V_c ，将电压空间矢量平面分为 6 个扇区，如图 1-12 所示。参考电压矢量 V_{ref} 落在任何一个扇区内，都可以由所在扇区的相邻两个开关电压矢量来合成。在一个开关周期 T_s 内，两个矢量作用时间 t_1 和 t_2 可以根据相似三角形的关系得到，如式（1-2）所示。在整个开关周期内除去 t_1 和 t_2 的时间由零矢量时间 t_0 补充，从而实现整个开关周期内的伏秒平衡。对三相交流参考电压，在空间矢量平面上将保持旋转。每个开关周期进行矢量合成和时间分配，三相电力电子变换器就能通过 PWM 的方式输出参考电压。

$$\begin{cases} \frac{V_c t_1}{\sin\theta} = \frac{V_c t_2}{\sin\left(\frac{\pi}{3}-\theta\right)} = \frac{V_{\text{ref}} T_s}{\sin\left(\frac{2\pi}{3}\right)} \\ t_0 = T_s - t_1 - t_2 \end{cases} \quad (1-2)$$

对于电流型电力电子变换器，合成的参考值是电流（或者电流矢量），开关组合的效果也有所不同。对应的载波比较方法或者空间矢量方法也会有所不同。

有关三相电压型和电流型电力电子变换器的基本脉宽调制理论，本章只做如上简单介绍，详细内容会在第 2 章中展开分析。

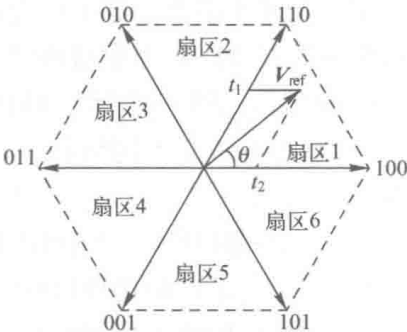


图 1-12 三相电压型电力电子变换器空间矢量 PWM