

  
WILEY

 **IEEE**  
IEEE PRESS

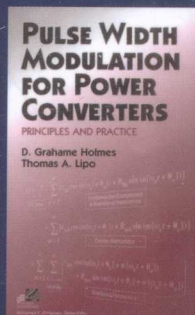


国际先进工业技术译丛

# 电力电子变换器 PWM技术原理与实践

## Pulse Width Modulation for Power Converters: Principles and Practice

【澳大利亚】D. Grahame Holmes 著  
【美】Thomas A. Lipo  
周克亮 译



 **人民邮电出版社**  
POSTS & TELECOM PRESS



国际先进工业技术译丛

# 电力电子变换器 PWM技术原理与实践

**Pulse Width Modulation  
for Power Converters:  
Principles and Practice**

【澳大利亚】D. Grahame Holmes 著  
【美】Thomas A. Lipo  
周克亮 译

人民邮电出版社  
北京

## 图书在版编目 (C I P) 数据

电力电子变换器PWM技术原理与实践 / (澳) 霍姆斯  
(Holmes, D. G.), (美) 利波 (Lipo, T. A.) 著; 周克亮  
译. — 北京: 人民邮电出版社, 2010. 2  
(国际先进工业技术译丛)  
ISBN 978-7-115-21902-2

I. ①电… II. ①霍… ②利… ③周… III. ①变换器  
—脉宽调制 IV. ①TN624

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第221543号

## 版 权 声 明

D. Grahame Holmes, Thomas A. Lipo  
Pulse Width Modulation for Power Converters: Principles and Practice  
Copyright © 2003 by John Wiley & Sons, Inc.  
All rights reserved. This translation published under license.  
Authorized translation from the English language edition published by Wiley Publishing, Inc..  
本书中文简体字版由 Wiley Publishing 公司授权人民邮电出版社出版, 专有版权属于人民邮电出版社。

北京市版权局著作权合同登记号 图字: 01-2009-6930 号

国际先进工业技术译丛

## 电力电子变换器 PWM 技术原理与实践

- 
- ◆ 著 [澳大利亚] D. Grahame Holmes  
[美] Thomas A. Lipo
  - 译 周克亮
  - 责任编辑 姚予疆
  - 执行编辑 赵礼菁
  - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街14号  
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn  
网址 <http://www.ptpress.com.cn>  
北京艺辉印刷有限公司印刷
  - ◆ 开本: 787×1092 1/16  
印张: 29  
字数: 702千字 2010年2月第1版  
印数: 1-3000册 2010年2月北京第1次印刷

著作权合同登记号 图字: 01-2009-6930 号

ISBN 978-7-115-21902-2

定价: 95.00 元

读者服务热线: (010)67129264 印装质量热线: (010)67129223  
反盗版热线: (010)67171154

---

# 内 容 提 要

本书主要介绍了各种不同的电力电子变换器脉宽调制 (PWM) 技术, 并提供了详细的分析和设计手段, 形成了系统、全面的 PWM 技术理论体系。本书重点内容包括统一的基于加权总谐波畸变 (WTHD) 指标的 PWM 分析技术 (含 WTHD 用于电机谐波损耗的计算)、基本的 PWM 技术 (不同载波的 PWM、异步与同步 PWM、边带调制、单相及三相的连续调制和不连续调制)、空间矢量 PWM 技术、多电平变换器的各种 PWM 技术等。本书系统性强, 理论分析透彻并紧密结合实际, 可为研究人员以及工程应用人员分析和优化 PWM 方法提供参考。

本书适合电气传动、自动化、电机控制及电力电子技术领域的研究人员和技术人员阅读, 也可作为高等院校相关专业的教师、研究生及高年级本科生的专业参考书。

# 丛书前言

改革开放 30 年来，我国工业得到了飞速发展，在短短 30 年的时间内完成了发达国家上百年的工业化发展历程，建立了相对完整的工业体系。我国已成为全球制造业基地，中国模式备受世人瞩目。在信息技术快速发展以及对节能减排和环境保护日益重视的今天，为了促进我国工业由大变强的发展，我们必须走新型工业化道路，解决工业化过程中面临的一些突出问题，比如如何进一步增强自主创新能力，如何完善对工业行业的管理，如何在一些核心技术和关键技术上有更大的突破，如何促进高新技术与传统产业的结合，等等。

为配合我国工业领域设备改造，推动我国工业领域与国际间、行业内的交流与发展，加速工业生产及制造技术的进步和设备更新换代的步伐，我们精选了国外有关现代工业技术的部分图书，翻译出版了“国际先进工业技术译丛”。本丛书内容主要涉及新型能源开发与利用、绿色设计与制造、资源节约和环境保护、能效管理等方面。这些图书的原著均由英美等国的知名出版集团出版，汇集了多个国家著名专家学者在工业技术领域的重要研究成果，集中反映了当前工业领域的先进理念、方法和技术，对于解决我国当前工业发展过程中的一些关键问题和突出问题具有较大的参考价值。

现代工业技术呈现开放性、智能化、信息化与网络化的特点，融合了自动化技术、信息技术、现代控制技术、网络技术、先进制造技术、环境保护技术及现代管理理论和方法等诸多学科的先进技术，需要各学科的专家及工程技术人员通力合作，从而实现多学科专业知识与系统的集成，形成现代工业发展的手段和模式。因此，“国际先进工业技术译丛”在选编时，以促进信息化和工业化融合、技术创新和节能减排为原则，紧密结合我国国情，力求突出实用性和先进性，希望有助于解决我国工业技术应用中的一些实际问题，促进我国工业技术及管理模式的变革，提高我国工业企业的技术创新能力。

“国际先进工业技术译丛”的翻译和审定工作主要由国内相关领域的知名专家学者和专业人士承担，力求准确真实地反映原著内容并便于国内读者理解和接受。本丛书致力于“传播国际先进工业生产管理理念，推广工业领域重大技术创新成果”，以便使我国工业领域内的相关人员能够对现代工业方面的知识和技术有更深入和全面的了解，并在我国现代化工业的建设中加以应用。今后我们将继续加强对国际上工业技术领域优秀图书的翻译和出版工作，欢迎专家学者以及广大读者提出宝贵意见和建议。

---

# 译者的话

经过 30 多年的发展，特别是随着大功率高频全控器件的广泛应用，脉宽调制（PWM）技术已经成为了电力电子变换系统实现电压、电流、频率转换最主要的开关技术。伴随着以微电子为基础的 digital 控制技术的迅猛发展以及新型的电力电子变换电路拓扑的不断涌现，如何对层出不穷的脉宽调制算法进行比较和优化，有时让人们莫衷一是。译者在 10 多年前开始接触和研究脉宽调制技术，在此过程中常常苦于没有一本系统、全面和深入的指南性著作来帮助自己理清思路而陷入大量文献的纷繁讨论之中。2003 年 WILEY 出版社和 IEEE 出版社联合出版了由澳大利亚莫纳什大学的 D. Grahame Holmes 教授和在国际电机和电力电子界享有盛誉的美国威斯康星大学麦迪逊分校的 Thomas A. Lipo 教授合著的《电力电子变换器 PWM 技术原理与实践》(*Pulse Width Modulation for Power Converters: Principles and Practice*) 一书，这是国际上第一本关于脉宽调制技术的研究专著，也是迄今为止译者所见到的对脉宽调制技术阐述得最为系统和透彻的一本著作。这里将本书翻译出来，希望能对国内同行有所裨益。

本书有几个显著的特点：(1) 提供了统一的脉宽调制分析与设计方法，并依据该方法对各种调制方法进行分析比较，前后照应；(2) 理论阐述深入浅出，从最基本的电路原理和拓扑出发对调制原理做出分析和阐释，对重要的概念反复提示，公式推导和分析细致入微，有助于读者全面掌握有关的技术要领；(3) 集脉宽调制技术之大成，参考文献完备，示例丰富，理论结合实际，可操作性很强，很多工程方案的制定和实现可轻易地从本书中找到答案。因此本书既可以作为学习和研究电力电子变换器脉宽调制技术的指导书，也可以作为解决相关工程实际问题的参考手册。

本书的翻译得到了国家自然科学基金（项目批准号：50977013）的资助，在翻译过程中，研究生卢闻州、傅晓帆、朱文杰、杨云虎、朱力、苏秀娥、王立娜、邹志翔、邱志鹏、杨永恒等做了大量的工作，在此深表谢意。

由于译者水平有限，书中翻译错误和疏漏之处在所难免，恳请广大读者批评斧正。译者联系方式：ekzhou@seu.edu.cn。

周克亮  
于东南大学六朝松下

---

## 译者简介

周克亮，东南大学电气工程学院教授、博士生导师，东南大学风力发电研究中心副主任，IEEE 高级会员。周克亮教授曾先后在国内外著名学府、跨国公司学习工作，主持并参加过国家及省部级科研项目以及多项尖端课题的研究与开发，如卫星电源、水下车辆电力推进装置、智能测绘仪器等，是 *IEEE Transactions* 等多家国际学术期刊以及《电机工程学报》等期刊的评审专家，近年来发表论文近 60 篇（其中 19 篇被 SCI 检索），发明专利 4 项。主要研究方向有电力电子与电力传动、新能源发电技术以及控制理论与应用等。

---

# 作者简介

D. Grahame Holmes, 澳大利亚莫纳什大学电气与计算机系统工程系教授, 电力电子研究室主任, IEEE 高级会员, IEEE 电力电子分会执行委员。Holmes 教授曾受邀担任 *IEEE Transactions* 等多家国际学术期刊的审稿人, 发表了 100 多篇国际会议和学术期刊论文。主要研究方向有调制技术、电力传动、谐振式变换器以及多电平变换器等, 在脉宽调制理论方面贡献良多、造诣深厚。

Thomas A. Lipo, 美国威斯康星大学麦迪逊分校电气与计算机系教授, 现任威斯康星电力电子研究中心主任和威斯康星电机与电力电子协会联合主席, 美国国家工程院院士, 英国皇家工程院院士, IEEE Fellow。Lipo 教授曾任 IEEE 工业应用分会主席、多个 IEEE 分会执行委员、*IEEE Transactions on Power Electronics* 杂志创刊主编以及多个重要的国际会议大会主席等重要职务, 是国际电机与电力电子界享有盛誉的学术权威。Lipo 教授指导了近百名研究生毕业, 发表论著 500 多篇(本), 其中期刊论文 200 多篇, 有几十篇获得 *IEEE Transactions* 等的最佳论文奖, 获授权美国专利 40 余项。



---

# 致 谢

在完成本书写作的工作中，作者从他们指导的博士论文中受益良多。特别感谢 Daniel Zmood（第7章）、Ahmet Hava（第8章）和 Brendan McGrath（第11章）所做的重要工作。此外，本书的出版也离不开很多其他研究生的工作，这些工作既有在技术问题上的贡献，也有对书稿文字的详细校对工作。同时，第二作者（Lipo）对 David Grainger 基金会和剑桥大学圣约翰学院分别在资金和设备上所提供的帮助表示感谢。最后，作者对他们贤惠可爱的妻子 Sophie Holmes 和 Chris Lipo 致以衷心的感谢，感谢她们在过去的5年中对此书的写作所给予的帮助和支持。

---

# 前 言

本书所开展的工作为研究人员开发适用于各种硬开关变换器的固定开关频率脉宽调制 (PWM) 技术提供了一种通用方法。书中工作表明, 单相半桥逆变器的调制和频谱形成了变换器调制的基本构成要素, 通过它可以很容易地认识单相、三相或多相, 两电平、三电平或多电平, 以及电压源型或电流源型变换器的频谱成分。作为性能指标, 谐波畸变的概念被用于对所有常见的调制算法进行比较。需要特别指出的是, 本书所采用的性能指标还包括总谐波畸变率 (THD)、加权总谐波畸变率 (WTHD) 以及专为评价电动机铜耗设计的谐波畸变准则。

最小谐波畸变的概念是本书所开展的比较工作的潜在基础。由它可对 PWM 基本工作方式做出区分:

- ① 有效开关脉冲宽度的确定;
- ② 有效开关脉冲在一个开关周期内的放置;
- ③ 跨越多个开关周期的有效开关脉冲序列。

这种通用方法的好处是, 一旦确定了 PWM 的共同线索, 就很容易为任何一种变换器拓扑结构选择一种 PWM 策略, 剩下的工作仅仅是在尽可能最佳的性能与成本、实现难度以及次要的考虑因素之间进行折中。另外, 无需复杂的分析就可对一个特定变换器拓扑结构和调制策略的性能做出预测, 于是可就任何特定应用场合的 PWM 算法的实现做出合情合理的折中。书中所有的理论推导都已经通过了仿真或实验的验证。本书的最后部分论述了具体实现逆变器所要考虑的实际问题。

读者可能会注意到本书没有就闭环调制的问题进行讨论。最初作者本打算将这些内容包含在本书中, 但是很快发现这需要添加大量的章节来论述, 于是准备另写一本书专门就该题目进行讨论。

# 术 语

## 通用变量用法惯例

变 量 格 式	含 义	变 量 格 式	含 义
$F$	大写: 交流量的峰值或直流量的平均值	$f^\dagger$	剑号: 共轭空间矢量
$f$	小写: 瞬时值	$\mathbf{f}$	小写加粗: 列向量
$\langle f \rangle$	尖括号: 低频平均值	$\mathbf{F}$	大写加粗: 矩阵
$\mathbf{f}$	黑斜体: 空间矢量 (复数变量)	$\mathbf{f}^T$	向量的转置: 行向量

## 特殊变量的用法定义

变 量	含 义	变 量	含 义
a, b, c	三相逆变器相桥臂的标识符	$f_q^s, f_d^s, f_0$	在 d-q-0 静止参考坐标系中的通用变量
$a$	复数矢量 $e^{j2\pi/3}$	$f_{qs}^s, f_{ds}^s, f_{0s}$	在 d-q-0 静止参考坐标系中相对于负载中性点 (星形连接) 的通用变量
$\gamma$	3 次谐波分量的幅值 $M_3/M$	$f(x, y)$	单元变量
$A_{mn}, B_{mn}$	傅里叶展开的系数	$HDF$	谐波畸变因数
$C_{mn}$	复数傅里叶系数 $C_{mn} = A_{mn} + jB_{mn}$	$i_a, i_b, i_c$	三相线电流
$D_k, k = 1, 2, \dots$	逆变器开关的二极管部分	$I_{dc}$	直流环节电流
$e_{az}$	相对于直流侧中点的电动机电动势 (EMF)	$I_h$	全体谐波电流的有效值 (RMS)
$f_a, f_b, f_c$	在 a-b-c 参考坐标系中的通用变量	$i_{h,k}$	第 $k$ 个时间间隔上的瞬时谐波电流
$f_{as}, f_{bs}, f_{cs}$	在 a-b-c 参考坐标系中相对于负载中性点 (星形连接) 的通用变量	$\Delta i_a$	a 相电流的纹波成分
$f_c$	载波的频率	$j$	$\sqrt{-1}$
$f_o$	基波分量的频率	$J_n(x)$	变量 $x$ 的 $n$ 阶贝塞尔函数
$f_s$	静止空间矢量 $f_{qs}^s - jf_{ds}^s$	$L$	多电平逆变器的电平数
$f_{qd0}$	向量 $[f_{qs}^s, f_{ds}^s, f_{0s}^s]^T$	$L_1'$	感应电动机的戴维南等效定子漏感

续表

变 量	含 义	变 量	含 义
$L_\sigma$	电动机的一相有效电感	$U$	不平衡因数
$m_k, k=1, 2, \dots$ 或 a, b, c	逆变器开关函数	$v_{as}, v_{bs}, v_{cs}$	相对于负载中性点的相电压
$m, n$	谐波次数变量	$v_{ab}, v_{bc}, v_{ca}$	三相逆变器的线—线电压
$M$	调制比 (调制深度)	$v_{az}, v_{bz}, v_{cz}$	相对于直流侧中点的相电压
$M_3$	3 次谐波的调制比	$v_{qs}^s, v_{ds}^s, v_{0s}^s$	静止参考坐标系(d-q-0)电压
$n$	逆变器的负直流母线	$v_{sn}$	负载中性点与负直流母线之间的电压
$n$	谐波分量的次数	$V_1$	基波电压分量的峰值
$p$	逆变器的正直流母线	$V_{bus}$	直流环节电压
$p$	$p = d/dt$ , 对时间的微分算子	$V_{dc}$	直流环节电压的一半
$p$	第 $p$ 个载波时间间隔	$V_m$	空间矢量的幅值或相电压的幅值
$p$	脉冲比率	$V_{mp}, V_{mn}$	正序和负序相电压的幅值
$p$	脉冲数	$V_o^*$	目标输出空间矢量
$p_{h,cu}$	谐波铜耗	$V_p$	输入线—线电压的峰值
$q$	电荷	$V_{rms}$	电压有效值
$q$	$m + n(\omega_o/\omega_c)$	$WTHD$	加权总谐波畸变
$R$	旋转变换矩阵	$WTHD2$	转子铜条损耗的加权 THD
$r_1$	感应电动机的戴维南等效定子电阻	$WTHD1$	定子损耗的加权 THD
$R_e$	等效负载电阻	$WTHD0$	归一化到基波频率的加权 THD
RMS	均方根 (有效值)	$W_x$	脉冲宽度
$SV_x, x=1, \dots, 7$	对应于三相逆变器状态的电压空间矢量	$x(t)$	对应调制角频率 $\omega_c t = 2\pi f_c t$ 的时间变量
$SC_x, x=1, \dots, 7$	对应于三相逆变器状态的电流空间矢量	$x_r, x_f$	相桥臂开关的上升和下降时刻
$S_k, k=1, 2, \dots$	逆变器开关	$y(t)$	对应基波角频率 $\omega_o t = 2\pi f_o t$ 的时间变量
$T_c$	载波周期	$y'$	用于规则采样的变量： $y - \frac{\omega_o}{\omega_c}(x - 2\pi p)$
$T$	变换矩阵	$z$	直流母线的中点 (虚拟的)
$THD$	总谐波畸变率	$Z(p)$	负载阻抗
$T_o$	基波周期	$\alpha$	相移延迟
$T_i$	逆变器第 $i$ 个开关的开关时间	$\alpha$	集肤深度
$\Delta T$	载波周期: $1/f_c$	$\alpha_1$	调制函数的幅值
$u$	电动势 (EMF) 的单位值： $e_{az}/V_{dc}$	$\alpha_1, \alpha_1, \dots, \alpha_{2N}$	用于谐波消除的开关角度

术语

续表

变 量	含 义	变 量	含 义
$\delta_{\text{advance}}$	对PWM采样延迟的预先补偿	$\phi_{\text{mp}}, \phi_{\text{mn}}$	正序及负序相电压的相角
$\theta_c$	载波波形的相角偏置	$\psi$	过调制角度
$\theta_0$	基波分量的相角偏置	$\omega_c$	载波角频率
$\theta_0(k)$	第 $k$ 个采样时刻基波分量的相角偏置	$\omega_0$	基波分量角频率
$\lambda$	漏磁链	$\omega_0/\omega_c$	基波与载波的频率比率 (载波比)

# 目 录

第 1 章 电力电子变换器导论	1
1.1 变换器的基本拓扑结构	2
1.1.1 开关的约束条件	2
1.1.2 双向斩波器	3
1.1.3 单相全桥 (H 桥) 逆变器	4
1.2 电压源型/电压刚性型逆变器	5
1.2.1 两相逆变器结构	5
1.2.2 三相逆变器结构	5
1.2.3 方波模式下的电压和电流波形	6
1.3 三相变换器开关函数表达法	9
1.4 输出电压控制	11
1.4.1 伏特/赫兹准则	11
1.4.2 单相逆变器的移相调制	11
1.4.3 二重桥逆变器的电压控制	13
1.5 电流源型/电流刚性型逆变器	14
1.6 空间矢量的概念	17
1.6.1 三相正弦波电源和负载的 d-q-0 分量	18
1.6.2 工作在方波模式下电压源型逆变器的 d-q-0 分量	20
1.6.3 同步旋转参考坐标系	24
1.7 三电平逆变器	26
1.8 多电平逆变器拓扑结构	29
1.8.1 二极管钳位式多电平逆变器	29
1.8.2 电容钳位式多电平逆变器	34
1.8.3 级联式电压源型多电平逆变器	36
1.8.4 混合式电压源型逆变器	38
1.9 小结	39
参考文献	39
第 2 章 谐波畸变	40
2.1 谐波电压畸变因数	40
2.2 谐波电流畸变因数	43
2.3 三相逆变器谐波畸变因数	45
2.4 性能指标的选择	47
2.5 三电平逆变器的加权总谐波畸变	49
2.6 感应电动机负载	51
2.6.1 矩形鼠笼条	51
2.6.2 非矩形转子条	54
2.6.3 每相等效电路	55
2.7 感应电动机负载的谐波畸变加权因数	57
2.7.1 转子电阻 (随频率变化) 的加权总谐波畸变	57
2.7.2 考虑转子漏感 (随频率变化) 影响的加权总谐波畸变	59
2.7.3 考虑定子铜耗的加权总谐波畸变	62

2.8 谐波损耗的计算实例.....	63	4.6.1 不连续 PWM—单相桥臂 开关动作.....	132
2.9 PWM 逆变电源的加权总谐波 畸变标么化处理.....	65	4.6.2 两电平单相 PWM .....	137
2.10 小结.....	66	4.7 小结.....	140
参考文献.....	66	参考文献.....	140
<b>第 3 章 逆变器单相桥臂的调制.....</b>	<b>67</b>	<b>第 5 章 三相电压源型逆变器的 调制.....</b>	<b>141</b>
3.1 脉宽调制的基本概念.....	67	5.1 三相电压源型逆变器 (VSI) 拓扑结构.....	141
3.2 脉宽调制方案的评价.....	68	5.2 采用正弦参考信号的 三相调制.....	142
3.3 两电平脉宽调制波形的二重 傅里叶积分分析.....	69	5.3 三次谐波参考信号注入法.....	148
3.4 自然采样脉宽调制.....	73	5.3.1 注入信号幅值的优化.....	148
3.4.1 正弦波—锯齿波调制.....	73	5.3.2 三次谐波注入法的解析 表达式.....	151
3.4.2 正弦波—三角波调制.....	78	5.4 谐波损耗的解析计算.....	158
3.5 从占空比变化角度进行脉宽 调制分析.....	82	5.5 不连续调制策略.....	164
3.5.1 正弦波—锯齿波调制.....	82	5.6 三倍频载波比和次谐波.....	165
3.5.2 正弦波—三角波调制.....	84	5.6.1 三倍频载波比.....	165
3.6 规则采样脉宽调制.....	86	5.6.2 次谐波.....	166
3.6.1 锯齿形载波规则采样 脉宽调制.....	89	5.7 小结.....	168
3.6.2 对称规则采样脉宽调制.....	92	参考文献.....	169
3.6.3 不对称规则采样 脉宽调制.....	95	<b>第 6 章 零空间矢量放置调制策略.....</b>	<b>170</b>
3.7 “直接”调制.....	100	6.1 空间矢量调制.....	170
3.8 整数与非整数频率比.....	102	6.1.1 空间矢量调制原理.....	170
3.9 各种脉宽调制方法的回顾.....	102	6.1.2 空间矢量调制和规则 采样脉宽调制的比较.....	174
3.10 小结.....	104	6.2 空间矢量调制的各相桥臂 参考信号.....	175
参考文献.....	104	6.3 自然采样空间矢量调制.....	178
<b>第 4 章 单相电压源型逆变器的 调制.....</b>	<b>105</b>	6.4 空间矢量调制的解析式.....	180
4.1 单相逆变器拓扑结构.....	105	6.5 空间矢量调制的谐波损耗.....	190
4.2 单相逆变器的三电平调制.....	106	6.6 零空间矢量的放置.....	192
4.3 谐波损耗的解析计算.....	113	6.7 不连续调制.....	195
4.4 边带调制.....	119	6.7.1 120° 不连续调制.....	196
4.5 开关脉冲位置.....	122	6.7.2 60° 和 30° 不连续调制.....	197
4.5.1 连续调制.....	123	6.8 不连续 PWM 的各相桥臂	
4.5.2 不连续调制.....	124		
4.6 开关脉冲序列.....	132		

参考信号 .....	201	9.2 谐波消除 PWM .....	261
6.9 不连续 PWM 的解析式 .....	208	9.3 优化的性能指标 .....	274
6.10 谐波性能比较 .....	212	9.4 优化的 PWM .....	275
6.11 不连续 PWM 的谐波损耗 .....	214	9.5 最小损耗 PWM .....	281
6.12 单边沿空间矢量调制 .....	218	9.6 小结 .....	285
6.13 开关脉冲序列 .....	218	参考文献 .....	285
6.14 小结 .....	220		
参考文献 .....	220		
<b>第 7 章 电流源型逆变器的调制</b> .....	221	<b>第 10 章 多电平变换器的程控</b>	
7.1 作为状态机的三相调制器 .....	221	调制 .....	286
7.2 用于自然采样电流源型		10.1 几种多电平变换器 .....	286
逆变器的空间矢量调制器 .....	225	10.2 方块开关策略实现电压控制 .....	289
7.3 实验验证 .....	225	10.3 用于多电平逆变器的谐波	
7.4 小结 .....	228	消除法 .....	290
参考文献 .....	228	10.3.1 等电平情况下用于谐波	
		消除的开关角 .....	290
		10.3.2 电压应力和电流应力的	
		均衡 .....	293
		10.3.3 电平不等情况下用于	
		谐波消除的开关角 .....	294
		10.4 最小谐波畸变 .....	295
		10.5 小结 .....	297
		参考文献 .....	297
<b>第 8 章 逆变器的过调制</b> .....	229		
8.1 过调制区域 .....	229	<b>第 11 章 基于载波的多电平</b>	
8.2 逆变器单相桥臂的自然		逆变器脉宽调制 .....	298
采样过调制 .....	230	11.1 级联式单相 H 桥的	
8.3 逆变器单相桥臂的规则		脉宽调制 .....	298
采样过调制 .....	234	11.2 级联式 H 桥的过调制 .....	305
8.4 单相/三相逆变器的自然		11.3 二极管钳位式逆变器的几种	
采样过调制 .....	236	脉宽调制方法 .....	308
8.5 过调制时的 PWM 控制器增益 .....	238	11.4 三电平自然采样 PD	
8.5.1 正弦调制参考信号时的		脉宽调制 .....	309
增益 .....	238	11.4.1 三电平 PD 脉宽调制的等	
8.5.2 空间矢量调制参考信号		高线图 .....	309
时的增益 .....	241	11.4.2 二重傅里叶级数谐波	
8.5.3 60° 不连续调制参考		系数 .....	311
信号时的增益 .....	243	11.4.3 谐波系数的计算 .....	312
8.5.4 补偿调制 .....	244	11.4.4 三电平 PD 脉宽调制的	
8.6 采用空间矢量法的过调制 .....	246	频谱性能 .....	315
8.7 小结 .....	250		
参考文献 .....	251		
<b>第 9 章 程控调制策略</b> .....	252		
9.1 优化的空间矢量调制 .....	252		



11.5	三电平自然采样 APOD 或 POD 脉宽调制	316	13.2.1	电压源型逆变器的功率 变换级	368
11.6	三电平逆变器的过调制	318	13.2.2	门极驱动接口电路	370
11.7	二极管钳位式逆变器的 五电平 PWM	321	13.2.3	控制器电源	371
11.7.1	五电平自然 采样 PD PWM	321	13.2.4	I/O 调理电路	371
11.7.2	五电平自然采样 APOD PWM	323	13.2.5	PWM 控制器	371
11.7.3	五电平 POD PWM	326	13.3	PWM 过程的硬件实现	374
11.8	更多电平的逆变器的 PWM	327	13.3.1	模拟与数字实现	374
11.9	级联式逆变器的 等效 PD PWM	330	13.3.2	数字定时器的逻辑 结构	375
11.10	混合式多电平逆变器	333	13.4	PWM 的软件实现	378
11.11	混合式逆变器的 等效 PD PWM	338	13.4.1	后台软件	378
11.12	多电平逆变器的 3 次谐波 注入法	342	13.4.2	PWM 定时间隔的计算	379
11.13	可变调制比多电平逆变 器的运行	344	13.5	小结	381
11.14	小结	345		参考文献	381
	参考文献	346			
<b>第 12 章 多电平变换器的空间</b>					
	矢量脉宽调制	347	<b>第 14 章 调制技术的发展</b> 382		
12.1	优化的空间矢量序列	347	14.1	随机脉宽调制	382
12.2	选择开关状态的调制器	349	14.2	电压不平衡情况下的 PWM 整流器	385
12.3	分解法	349	14.3	共模信号消除	390
12.4	六边形坐标系统	351	14.4	四相桥臂逆变器调制	394
12.5	一个开关周期内的最优空间 矢量位置	355	14.5	最小脉冲宽度的影响	396
12.6	空间矢量脉宽调制和基于载波 脉宽调制的比较	356	14.6	脉宽调制死区补偿	399
12.7	多电平逆变器的不连续调制	358	14.7	小结	404
12.8	小结	362		参考文献	404
	参考文献	362			
<b>附录 1 双变量控制波形的傅里叶级数表达式</b> 405					
参考文献 408					
<b>附录 2 雅可比—安格尔和贝塞尔函数关系式</b> 409					
A2.1 雅可比—安格尔展开 409					
A2.2 贝塞尔函数的积分关系式 410					
参考文献 411					
<b>附录 3 三相及半周期对称关系式</b> 412					
参考文献 413					
<b>第 13 章 调制控制器的实现</b> 363					
13.1	电力电子变换系统概述	363			
13.2	PWM 变换器系统的要素	364			