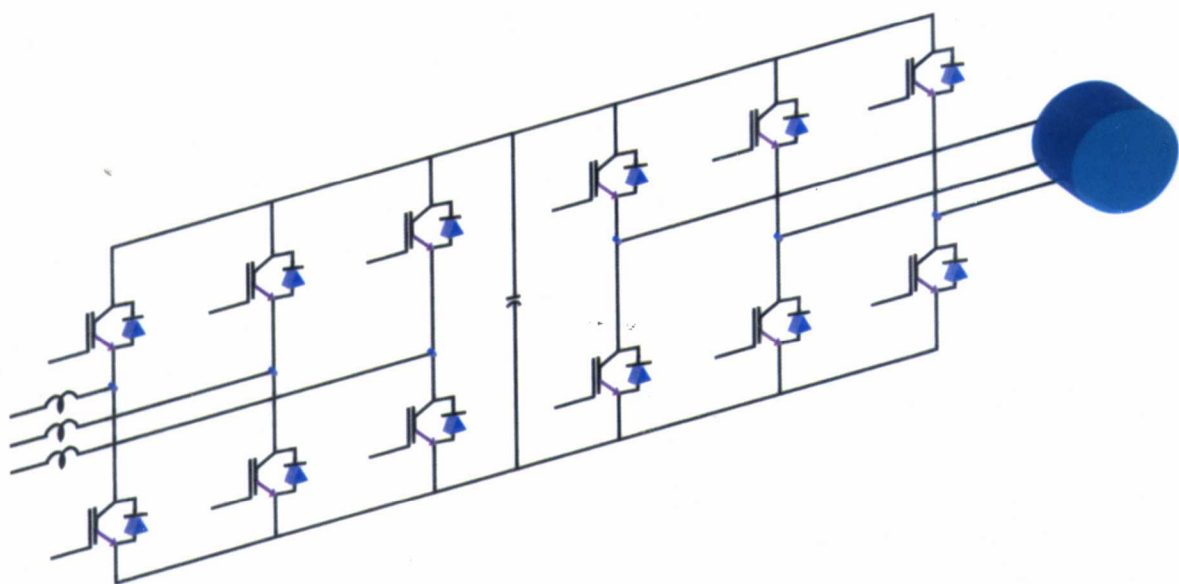


国外电气工程名著译丛

现代电力电子学与交流传动

Modern Power Electronics and AC Drives

(美) Bimal K. Bose 著
王聪 赵金 于庆广 程红 译



国外电气工程名著译丛

现代电力电子学与交流传动

Modern Power Electronics and AC Drives

(美) Bimal K. Bose 著

王 聪 赵 金 译
于庆广 程 红



机械工业出版社

本书详细介绍了电力半导体器件、交流电动机、相控变流器、交交变频器、电压源型逆变器、异步电动机转差功率的回馈控制、异步电动机传动的控制与状态估计、同步电动机传动的控制与状态估计、专家系统原理与应用、模糊逻辑原理与应用和神经网络原理与应用等内容,涵盖了现代电力电子学与交流传动技术的整个体系。

本书深入浅出、通俗易懂,非常适合用作电气工程类专业本科生与研究生的教材,也可以作为电气工程师的参考书。

Authorized translation from the English language edition, entitled MODERN POWER ELECTRONICS AND AC DRIVES, 1st Edition, ISBN: 0130167436 by BOSE, BIMAL K., published by Pearson Education, Inc, publishing as Prentice Hall PTR, Copyright© 2002 Prentice Hall PTR.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronics or mechanical, including photo copying, recording or by any information storage retrieval system, without permission from Pearson Education, Inc.

CHINESE SIMPLIFIED language edition published by CHINA MACHINE PRESS, Copyright© 2005.

本书中文简体字版由 Prentice Hall PTR 授权机械工业出版社独家出版。

版权所有 侵权必究。

本书版权登记号: 图字 01 - 2003 - 5891 号

图书在版编目(CIP)数据

现代电力电子学与交流传动/(美)博斯(Bose, B. K.)著;
王聪等译. —北京:机械工业出版社, 2005.3

(国外电气工程名著译丛)

书名原文: Modern Power Electronics and AC Drives

ISBN 7 - 111 - 16097 - 5

I. 现… II. ①博…②王… III. ①电力电子学
②交流电动机传动 IV. ①TM1②TM921.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 007614 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 牛新国 版式设计: 冉晓华 责任校对: 程俊巧
刘星宁

封面设计: 陈沛 责任印制: 洪汉军

北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2005 年 5 月第 1 版·第 1 次印刷

1000mm × 1400mm B5 · 18.125 印张 · 706 千字

0 001—4 000 册

定价: 47.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话(010)68326294
封面无防伪标均为盗版

译者序

电力电子与电力传动控制技术的进步通常被认为是人类社会的第二次电子革命，它在世界范围的工业文明发展中所起的关键性、重要性作用正在得到人们越来越多的重视。在 21 世纪，它也必将得到越来越广泛的应用。

《Modern Power Electronics and AC Drives》一书，是 2002 年在美国出版的电力电子技术领域的最新著作。作者 Bimal K. Bose 是 IEEE 的 life fellow、美国 Tennessee 大学电力电子学科“康德拉杰出讲座”教授（这一职位只有少数成就突出的学者才能竞聘获得）。他从事电力电子技术领域的科学研究已有 40 多年，曾 7 次获得 IEEE 奖项，拥有 20 多项美国专利。他曾经担任 IEEE 工业电子学会的电力电子分会技术委员会主席、IEEE 工业电子学报副主编、诺克斯韦尔首席科学家，在国际电力电子领域享有很高的声誉。

B. K. Bose 教授多年来为电力电子学与交流传动技术的教学与技术普及做出了巨大的贡献，主编或撰写了多本相关专著，特别是 1986 年出版的《Power Electronics and AC Drives》一书已经被世界上的多所大学用作教学参考书。同样这本书在中国也被翻译出版，并对中国在这一领域的进步与发展起到了巨大的推动作用。B. K. Bose 教授本人也认为这是他最重要的著作。

这次出版的这本专著是 B. K. Bose 教授在 Tennessee 大学为高年级学生和研究生开设的几门授课讲义的基础上撰写的。本书继承了 1986 年教材的风格与结构，并在其基础上做了大量的有意义的内容更新与知识扩展。B. K. Bose 教授试图把所有该领域的研究热点和发展前沿都包括在这本书中。特别是，作者还结合了他本人近年来的科研成果，新增加了“专家系统”、“模糊逻辑”和“神经网络在电力电子技术领域中的应用”这 3 章内容。

译者曾有幸与本书作者 B. K. Bose 教授在美国 Tennessee 大学的电力电子中心一起工作。B. K. Bose 教授渊博的专业知识、严谨的治学态度，以及一丝不苟的求实精神给译者留下了深刻的印象。

本书详细介绍了电力半导体器件、交流电动机、相控变流器、交交变频器、电压源型逆变器、电流源型逆变器、异步电动机转差功率的回馈控制、异步电动机传动的控制与状态估计、同步电动机传动的控制与状态估计、专家系统原理与应用、模糊逻辑原理与应用和神经网络原理与应用等内容，涵盖了现代电力电子学与交流传动技术的整个体系。本书深入浅出、通俗易懂，非常适合用作电气工程类专业本科生与研究生的教材，也可以作为电气工程师的参考书。

IV

本书的翻译分工如下：绪论与第2章、第5章由中国矿业大学的王聪教授翻译；第1章、第4章、第6章、第7章由清华大学的于庆广副教授翻译；第3章由中国矿业大学的程红副教授翻译；第8章~第12章由华中科技大学的赵金副教授翻译。中国矿业大学的王聪教授对全书译稿在技术内容上进行了审核。

在本书出版之际，译者愿向大力支持本译著出版的机械工业出版社以及为本书编审付出大量心血的责任编辑表示衷心的感谢。

由于本书涉及了一个非常宽阔的研究领域，而译者的学识有限，书中肯定有值得讨论之处，敬请广大读者批评指正。

中国矿业大学（北京） 王聪
2004年8月于北京

序 言

带着骄傲、兴奋和诸多的期望，我把本书呈现给本领域全世界的同行。众所周知，电力电子和电力传动是一门复杂的、多学科交叉的专业。它在过去的30年中有了惊人的发展。近年来，人工智能（AI）技术正在继续扩展这门技术的发展前沿。毫无疑问，电力电子将在21世纪的工业、商业、民用、空间应用、公用事业和军事应用中起主导作用，这些应用将主要集中在能源节省和解决环境污染问题。

我在学术领域和工业应用领域从事电力电子研究（从这项技术诞生起开始），已经超过40年了。我一直以积极进取的精神跟随着这门技术的发展。过去，我已经出版了许多本关于电力电子学的书（撰写或编辑）。在这些书中，《Power Electronics and AC Drives》（Prentice Hall—1986）是最重要的一本。世界上的许多大学把它作为一本高级的教材来使用。这本新书可以看作是对前书的意义重大的更新和扩展，在书中我试图把所有我所知道的关于电力电子与交流传动方面的知识放进去。它包括了所有相关的内容，即电力半导体器件、电动机、各种类型的变流器、异步电动机和同步电动机传动中的系统控制和参数估计，以及人工智能技术（专家系统、模糊逻辑和神经网络）。实际上，我一直在试图把电力电子与电动机传动的最新技术都放在本书中。这本书的内容主要是基于我的一门本科高年级课程和三门研究生课程的授课讲义。在过去的14年中，我在Tennessee大学编写了这些讲义并按这些讲义进行授课。如果与前书相比，本书能在更多的大学作为教材，那我将会感到更大的满足。那些已经使用我以前的书作为教材的大学现在可以毫无问题地使用这本新书。

本书内容概括如下：第1章讲述了各种类型的电力半导体器件，包括近年来出现的IGCT，但重点介绍的是IGBT。第2章从变频传动角度，详细讨论了异步和同步电动机理论，包括动态 $d-q$ 电动机模型。引入了空间复矢量的概念，但在本章中涉及此概念并不太多，以作者的观点，这部分内容可能使很多学生难以理解。为使本章内容完整，对开关磁阻电动机也进行了讨论。第3章和第4章分别讨论了传统相控半导体晶闸管变流器和交交变频器。为了内容的完整性，第4章还讨论了高频变流器。第5章讲述了电压源型变流器和脉宽调制技术，并重点强调空间矢量脉宽调制技术。本章内容还包括了近年来一些热点研究方向，例如，软开关、功率因数补偿、多电平变流器、静态无功补偿器和有源滤波器。第6章讲述了电流源型变流器，包括PWM变流器。第7章讲述了由绕线转子异步电动

VI

机构成的转差功率恢复型传动系统，主要包括 Kramer 和 Scherbius 传动。第 8 章讲述了笼型异步电动机传动的系统控制和参数估计，其中包括无速度传感器控制和起动自整定的讨论。异步电动机传动是本书的主题。第 9 章讲述了同步电动机传动的系统控制和参数估计，其中包括无传感器控制和对开关磁阻电动机传动系统的简单描述。第 10 章给出了专家系统及其应用的简要描述。以作者的观点，专家系统还有许多潜力，但是在实践上一直被电力电子学术界所忽视。第 11 章讲述了模糊逻辑及其应用。最后，第 12 章给出了神经网络技术及其应用的介绍。以作者的观点，将来神经网络技术在电力电子领域会有相当大的影响。作者还为本书各个章节准备了一套习题，读者可以来函索要 (bbose@utk.edu)。

没有我的同事和学生们的帮助，本书是不可能完成的。首先，我要对我的研究生 Burak Ozpineci，在本书文稿准备中所做的大量工作表示特别的感谢。其次还要感谢我的学生 Joao Pinto，对文稿的修改提供了很大的帮助。本书中第 11 章和第 12 章的两个演示程序就是他编写的。作者还要感谢韩国 Pukyong 国立大学的 In-Dong Kim 博士（他从前是我实验室的客座教授），他所提供的 Corel Flow 软件帮助我们完成了大部分图形的绘制。非常感谢加拿大皇后大学的 Paresh Sen 教授不断的鼓励。同时，还要感谢波兰华沙科技大学的 Marian Kazmierkowsky 博士，Colorado 矿业学校的 Marcelo Simoes 教授和 Minnesota 大学的 Ned Mohan 博士。

最后，感谢 Prentice Hall PTR 的责任编辑 Wil Mara 所作的大量的卓有成效的工作。在本书完成之际，我要感谢 Aurelia Scharnhorst 对本书的排版制作，以及 Corinne Ovadia 熟练地绘制了上百幅新图。

深深感谢那些杰出的科学家和工程师们，本书就是基于他们所做出的学术贡献。最后，为过去 3 年中在准备本书时，付出巨大耐心，做出巨大牺牲的妻子表示感谢。

Bimal K. Bose
Tennessee 大学

主要符号表

本文所用的主要符号列表如下:

$d^{\circ} - q^{\circ}$	同步旋转参考坐标系 (或旋转坐标系) 直轴和交轴	θ_e	同步旋转坐标系旋转角 ($\omega_e t$)
$d^s - q^s$	静止参考坐标系直轴和交轴 (也称为 $\alpha - \beta$ 轴)	θ_r	转子旋转角
f	频率 (Hz)	θ_{sl}	转差角
I_d	直流电流 (A)	μ	重叠角
I_f	电动机励磁电流 (A)	τ	时间常数 (s)
I_L	负载电流有效值	L_c	换相电感 (H)
I_m	励磁电流有效值	L_d	直流环节滤波电感
I_P	有功电流有效值	L_m	励磁电感
I_Q	无功电流有效值	L_r	转子电感
I_r	转子电流有效值 (相对定子)	L_s	定子电感
I_s	定子电流有效值	L_{lr}	转子漏感
I_{dr}^s	d^s 轴转子电流	L_{ls}	定子漏感
I_{ds}^s	d^s 轴定子电流	L_{dm}	d° 轴励磁电感
I_{qr}^s	q° 轴转子电流	L_{qm}	q° 轴励磁电感
I_{qs}^s	q° 轴定子电流	N	匝比 (初级比次级)
J	转动惯量 ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	N_e	同步转速 (r/min)
X_r	转子电抗 (Ω)	N_r	转子转速
X_s	同步电抗	P	极数 (有功功率也用此符号)
X_{ds}	d° 轴同步电抗	P_g	气隙功率 (W)
X_{lr}	转子漏抗	P_m	输出机械功率
X_{ls}	定子漏抗	Q	无功功率
X_{qs}	q° 轴同步电抗	R_r	转子电阻 (Ω)
α	触发延迟角	R_s	定子电阻
β	触发超前角	s	转差率 (pu)
γ	关断角	T	周期 (s) [温度 ($^{\circ}\text{C}$) 也用此符号]
δ	同步电动机转矩或功率角	T_e	输出转矩 ($\text{N} \cdot \text{m}$)
θ	热阻抗 (Ω) (转矩角或角也用此符号)	T_L	负载转矩
		t_{off}	关断时间 (s)
		V_d	直流电压

V_i	逆变器直流电压	Ψ_m	气隙磁链
V_f	感应电动势	Ψ_r	转子磁链
V_m	相电压峰值 (V)	Ψ_s	定子磁链
V_g	气隙电压有效值	Ψ_{dr}^s	d^s 轴转子磁链
V_R	整流器直流电压	Ψ_{ds}^s	d^s 轴定子磁链
V_s	电源电压瞬时值	Ψ_{qr}	d^e 轴转子磁链
V_d	直流电压瞬时值	Ψ_{qs}	q^e 轴定子磁链
V_f	励磁电压瞬时值	ω_e (或 ω)	定子角频率或供电角频率 (r/s)
V_{dr}^s	d^s 轴转子电压	ω_m	转子机械角速度
V_{ds}^s	d^s 轴定子电压	ω_r	转子电角速度
V_{qr}	q^e 轴转子电压	ω_{sl}	转差频率
V_{qs}	q^e 轴定子电压	X	正弦相量的峰值或正弦空间矢量的幅值 (参数估值也用此符号) (X 表示任意变量)
φ	位移功率因数角		
Ψ_a	电枢反应磁链 (Wb)		
Ψ_f	励磁磁链		

目 录

译者序

序言

第 1 章 电力半导体器件	1
1.1 引言	1
1.2 二极管	1
1.3 晶闸管	3
1.3.1 伏安特性	4
1.3.2 开关特性	4
1.3.3 功率损耗和热阻抗	5
1.3.4 电流额定值	6
1.4 双向晶闸管	7
1.5 门极关断 (GTO) 晶闸管	9
1.5.1 开关特性	9
1.5.2 回馈式缓冲器	11
1.6 双极型晶体管 (BPT 或 BJT)	12
1.7 电力 MOSFET	13
1.7.1 $V-I$ 特性	13
1.7.2 安全工作区 (SOA)	14
1.8 静电感应晶体管 (SIT)	16
1.9 绝缘栅双极型晶体管 (IGBT)	16
1.10 MOS 控制晶闸管 (MCT)	19
1.11 集成门极换向晶闸管 (IGCT)	20
1.12 大能量带隙材料在电力半导体器件中的应用	20
1.13 功率集成电路 (PIC)	21
1.14 小结	22
参考文献	22
第 2 章 交流电动机传动	24
2.1 引言	24

VIII

2.2 异步电动机	25
2.2.1 旋转磁场	25
2.2.2 转矩的产生	27
2.2.3 等效电路	28
2.2.4 转矩-转速曲线	32
2.2.5 电动机的 NEMA 分类	34
2.2.6 变压恒频运行	34
2.2.7 变频运行	35
2.2.8 恒电压/频率运行	36
2.2.9 传动运行区域	37
2.2.10 变定子电流运行	38
2.2.11 谐波的影响	40
2.2.11.1 谐波发热	40
2.2.11.2 电动机参数变化	43
2.2.11.3 转矩脉动	43
2.2.12 动态 $d-q$ 模型	45
2.2.12.1 坐标轴变换	46
2.2.12.2 同步旋转参考坐标系-动态模型 (Kron 方程)	50
2.2.12.3 静止坐标系-动态模型 (Stanley 方程)	53
2.2.12.4 动态模型的状态空间方程	56
2.3 同步电动机	59
2.3.1 绕线励磁电动机	59
2.3.1.1 等效电路	60
2.3.1.2 电磁转矩	62
2.3.1.3 凸极式电动机特性	63
2.3.1.4 动态 $d^{\circ}-q^{\circ}$ 电动机模型 (Park 模型)	65
2.3.2 同步磁阻电动机	68
2.3.3 永磁 (PM) 电动机	68
2.3.3.1 永磁材料	68
2.3.3.2 正弦波表面式永磁 (SPM) 电动机	70
2.3.3.3 正弦波嵌入式永磁 (IPM) 电动机	71
2.3.3.4 梯形波表面式永磁 (SPM) 电动机	73
2.4 可变磁阻电动机 (VRM)	74
2.5 小结	76
参考文献	76

第 3 章 二极管及相控变流器 77

3.1 引言	77
--------	----

3.2 二极管整流器	77
3.2.1 单相桥式电路——电阻、阻感负载	78
3.2.2 电源电感的影响	80
3.2.3 单相桥式电路——阻感、反电动势 (CEMF) 负载	81
3.2.4 单相桥式电路——阻容负载	81
3.2.5 畸变因数、位移功率因数和功率因数	83
3.2.6 畸变因数 (DF)	83
3.2.7 位移功率因数 (DPF)	83
3.2.8 功率因数 (PF)	84
3.2.9 三相全桥电路——阻感负载	84
3.2.10 三相全桥电路——阻容负载	86
3.3 晶闸管变流器	88
3.3.1 单相桥式电路——阻感、反电动势负载	88
3.3.2 不连续导电模式	91
3.3.3 三相变流器——阻感、反电动势负载	93
3.3.4 三相半波变流器	94
3.3.5 电源漏感 (L_c) 分析	97
3.3.6 三相桥式变流器	100
3.3.7 三相桥式变流器的不连续导电模式	103
3.3.8 三相双组桥变流器	106
3.3.9 6脉波中心抽头变流器	106
3.3.10 12脉波变流器	108
3.3.11 桥式变流器的并行控制和顺序控制	109
3.4 变流器控制	110
3.4.1 线性触发延迟角控制	110
3.4.2 余弦交点控制	111
3.4.3 锁相振荡器原理	112
3.5 电磁干扰 (EMI) 及电网供电质量问题	115
3.5.1 EMI 问题	116
3.5.2 电网谐波问题	116
3.6 小结	117
参考文献	118
第4章 交交变频器	119
4.1 引言	119
4.2 相控交交变频器	119
4.2.1 基本运行原理	119

X

4.2.2 三相双组变流器用作交交变频器	120
4.2.3 交交变频器电路结构	123
4.2.3.1 三相半波交交变频器	123
4.2.3.2 三相桥式交交变频器	124
4.2.4 有环流模式和无环流模式的比较	126
4.2.4.1 有环流模式	126
4.2.4.2 无环流模式	129
4.2.5 负载和电网谐波	130
4.2.5.1 负载电压谐波	130
4.2.5.2 电网电流谐波	133
4.2.6 电网位移功率因数	135
4.2.7 交交变频器的控制	140
4.2.8 改善 <i>DPF</i> 的方法	141
4.2.8.1 方波运行	141
4.2.8.2 不对称触发延迟角控制	142
4.2.8.3 环流控制	144
4.3 矩阵式变流器	145
4.4 高频交交变频器	147
4.4.1 高频相控交交变频器	147
4.4.2 高频、整数脉冲交交变频器	147
4.4.2.1 正弦供电	147
4.4.2.2 准方波供电	148
4.5 小结	149
参考文献	149
第5章 电压源型变流器	151
5.1 引言	151
5.2 单相逆变器	152
5.2.1 半桥逆变器及变压器中心抽头式逆变器	152
5.2.2 全桥或H桥逆变器	152
5.3 三相桥式逆变器	156
5.3.1 方波或6脉波运行方式	156
5.3.2 电动与发电模式	160
5.3.3 输入纹波	161
5.3.4 器件的电压和电流额定值	161
5.3.5 移相电压控制	161
5.3.6 电压(幅值)和频率控制	163
5.4 多重化逆变器(多阶梯波逆变器)	164

5.4.1	12 阶梯波逆变器	164
5.4.2	移相控制的 18 阶梯波逆变器	166
5.5	脉冲宽度调制技术	167
5.5.1	正弦 PWM	168
5.5.2	特定谐波消除 PWM (SHEPWM)	174
5.5.3	最小纹波电流 PWM	178
5.5.4	空间矢量 PWM	178
5.5.5	瞬时电流控制正弦 PWM	186
5.5.6	滞环电流控制 PWM	187
5.5.7	Sigma-Delta 调制	189
5.6	三电平逆变器	190
5.7	硬开关的影响	194
5.8	谐振型逆变器	196
5.9	软开关逆变器	198
5.10	动力与再生制动	201
5.10.1	动力制动	201
5.10.2	再生制动	202
5.11	PWM 整流器	203
5.11.1	带有升压斩波器的二极管整流器	203
5.11.1.1	单相	203
5.11.1.2	三相	204
5.11.2	用于输入整流的 PWM 变流器	205
5.11.2.1	单相	205
5.11.2.2	三相	207
5.12	静止无功补偿器和有源滤波器	209
5.13	对基于 MATLAB/SIMULINK 仿真的介绍	212
5.14	小结	216
	参考文献	216
第 6 章	电流源型变流器	218
6.1	引言	218
6.2	6 脉波晶闸管逆变器的基本原理	219
6.2.1	模式 1: 负载换相整流器 ($0 \leq \alpha \leq \pi/2$)	222
6.2.2	模式 2: 负载换相逆变器 ($\pi/2 \leq \alpha \leq \pi$)	222
6.2.3	模式 3: 强迫换相逆变器 ($\pi \leq \alpha \leq 3\pi/2$)	222
6.2.4	模式 4: 强迫换相整流器 ($3\pi/4 \leq \alpha \leq 2\pi$)	222
6.3	负载换相逆变器	223

6.3.1 单相谐振逆变器	223
6.3.2 三相逆变器	226
6.3.2.1 滞后功率因数负载	226
6.3.2.2 过励同步电动机负载	227
6.3.2.3 同步电动机起动	228
6.4 强迫换相逆变器	229
6.5 谐波热效应和转矩脉动	231
6.6 多重化逆变器	232
6.7 带自换相装置的逆变器	234
6.7.1 6脉波逆变器	234
6.7.2 PWM 逆变器	237
6.7.2.1 梯形波 PWM	237
6.7.2.2 特定谐波消除 PWM (SHE PWM)	239
6.7.3 双边 PWM 变流器系统	240
6.7.4 PWM 整流器的应用	243
6.7.4.1 静止无功补偿器/有源滤波器	243
6.7.4.2 超导磁场储能 (SMES)	244
6.7.4.3 直流电动机调速	244
6.8 电流源型变流器和电压源型变流器的比较	244
6.9 小结	245
参考文献	246
第7章 异步电动机转差功率回馈型传动系统	247
7.1 引言	247
7.2 转子变阻器调速的双馈电动机	247
7.3 静止 Kramer 传动	248
7.3.1 矢量图	251
7.3.2 交流等效电路	253
7.3.3 转矩表达式	256
7.3.4 谐波	257
7.3.5 Kramer 传动的调速	258
7.3.6 功率因数的改善	258
7.4 静止 Scherbius 传动	260
7.4.1 运行模式	261
7.4.2 用于 VSCF 发电系统的改进 Scherbius 传动	262
7.5 小结	264
参考文献	264

第 8 章 异步电动机传动系统的控制与估计	266
8.1 引言	266
8.2 基于小信号模型的异步电动机控制	267
8.3 标量控制	271
8.3.1 电压源型逆变器的控制	271
8.3.1.1 开环电压/频率 (V/F) 控制	271
8.3.1.2 变频传动的节能效果	274
8.3.1.3 带转差率调节的速度控制	275
8.3.1.4 带有转矩和磁链控制的速度控制	276
8.3.1.5 电流控制的电压源型逆变器传动	278
8.3.1.6 并联电动机的牵引传动	278
8.3.2 电流源型逆变器的控制	280
8.3.2.1 独立的电流和频率控制	280
8.3.2.2 电流源型逆变器传动系统的速度和磁链控制	281
8.3.2.3 电流源型逆变器传动系统的电压/频率 (V/F) 控制	282
8.3.3 基于磁链规划的效率优化控制	282
8.4 矢量控制或磁场定向控制	285
8.4.1 与直流传动类比	285
8.4.2 等效电路和相量图	287
8.4.3 矢量控制原理	287
8.4.4 直接或反馈矢量控制	289
8.4.5 磁链矢量的估计	291
8.4.5.1 基于电压模型的方法	291
8.4.5.2 基于电流模型的方法	294
8.4.6 间接或前馈矢量控制	294
8.4.7 电网侧 PWM 整流器的矢量控制	303
8.4.8 定子磁链定向的矢量控制	305
8.4.9 电流源型逆变器传动系统的矢量控制	307
8.4.10 周波变流器传动系统的矢量控制	308
8.5 无传感器矢量控制	311
8.5.1 转速估算方法	311
8.5.1.1 转差频率计算法	312
8.5.1.2 基于状态方程的直接综合法	312
8.5.1.3 模型参考自适应系统 (MRAS)	313
8.5.1.4 转速自适应磁链观测器 (Luenberger 观测器) 法	315
8.5.1.5 扩展卡尔曼滤波器 (EKF) 法	318
8.5.1.6 齿谐波法	321

8.5.1.7 凸极转子注入辅助信号	321
8.5.2 无速度信号的直接矢量控制	321
8.5.2.1 可编程的级联低通滤波器 (PCLPF) 定子磁链估计	321
8.5.2.2 基于电流模型方程的电动机起动控制	325
8.6 直接转矩和磁链控制 (DTC)	327
8.6.1 基于定子和转子磁链的转矩表达式	328
8.6.2 DTC 的控制策略	328
8.7 自适应控制	331
8.7.1 自调节控制	332
8.7.2 模型参考自适应控制 (MRAC)	334
8.7.3 滑模控制	336
8.7.3.1 控制原理	336
8.7.3.2 矢量控制系统的滑模控制	340
8.8 传动系统的自整定	345
8.9 小结	349
参考文献	350
第 9 章 同步电动机传动系统的控制与估计	353
9.1 引言	353
9.2 正弦波 SPM 同步电动机传动	354
9.2.1 开环电压/频率控制	354
9.2.2 自控方式	357
9.2.3 绝对位置编码器	358
9.2.3.1 光学编码器	358
9.2.3.2 带解码器的模拟式旋转变压器	359
9.2.4 矢量控制	361
9.3 同步磁阻电动机传动	366
9.3.1 恒定 d^* 轴电流 (i_{da}) 控制	368
9.3.2 快速转矩响应控制	370
9.3.3 最大转矩/电流控制	371
9.3.4 最大功率因数控制	373
9.4 正弦波 IPM 电动机传动	374
9.4.1 最大转矩/电流的电流矢量控制	375
9.4.2 弱磁控制	377
9.4.3 定子磁链定向的矢量控制	378
9.4.3.1 反馈信号处理	384
9.4.3.2 方波 (SW) 模式下的弱磁控制	386