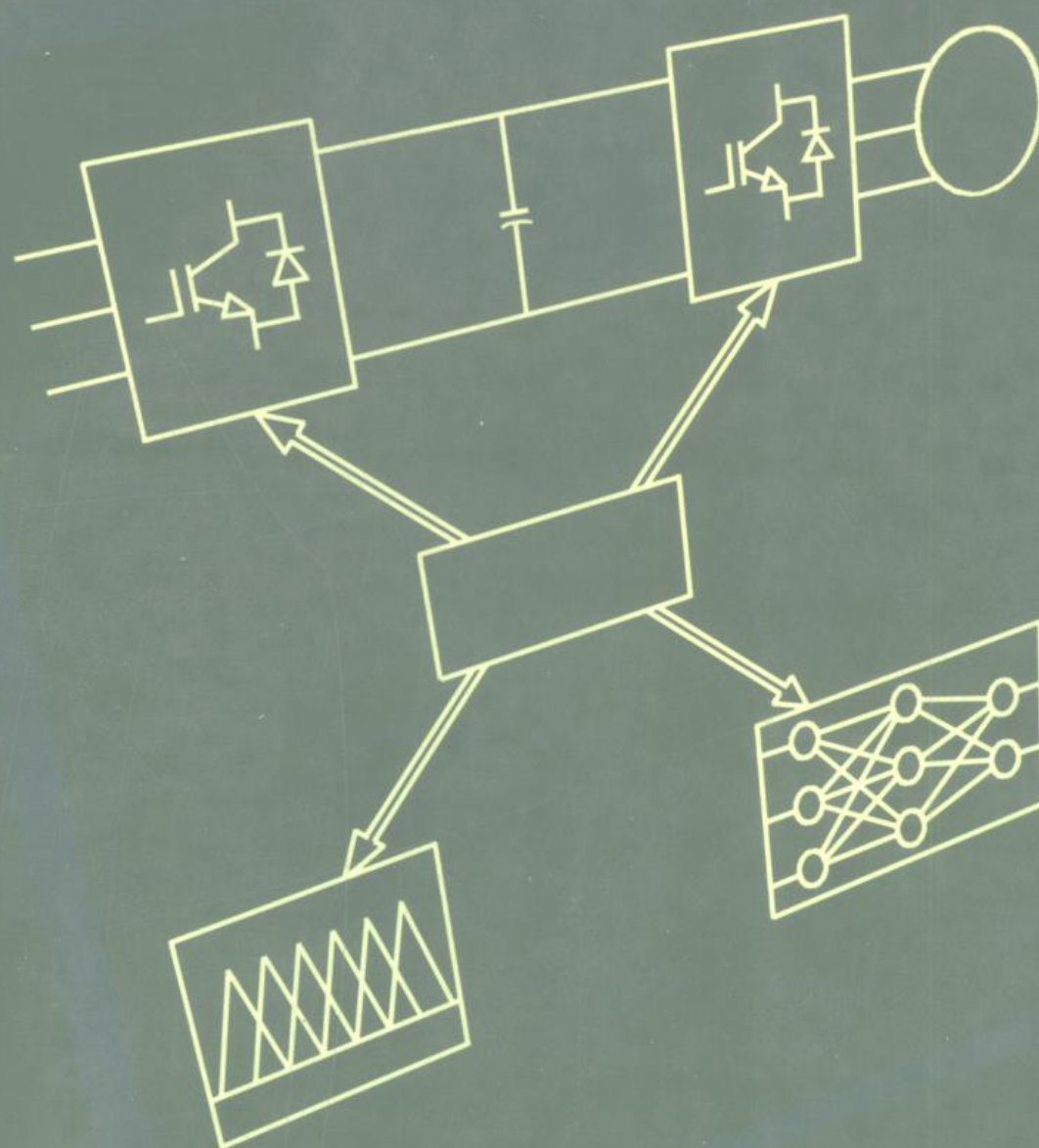


〔美〕B. K. 博斯 主编

姜建国 等译



电力电子学与变频传动 技术和应用

Power Electronics and Variable Frequency Drives
Technology and Applications

CUMTP

中国矿业大学出版社

T101
B85

电力电子学与变频传动

技术和应用

Power Electronics and Variable Frequency Drives
Technology and Applications

〔美〕B. K. 博斯 主编

姜建国 等译

中国矿业大学出版社

©1997 IEEE. All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage and retrieval system, without permission in writing from the Publisher.

责任编辑 王景华 李士峰

021610

图书在版编目(CIP)数据

电力电子学与变频传动 技术和应用/(美)博斯 (Bose, B. K.)主编;姜建国等译. —徐州:中国矿业大学出版社, 1999. 9

ISBN 7-81070-053-7

I. 电… II. ①博… ②姜… III. ①电力电子学-文集 ②电力传动-文集 N. TN01

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 40442 号

中国矿业大学出版社出版发行

(江苏徐州 邮政编码 221008)

出版人 解京选

中国矿业大学印刷厂印刷 新华书店经销

开本 787×1092 1/16 印张 31.75 字数 760 千字

1999 年 9 月第 1 版 1999 年 9 月第 1 次印刷

印数 1~2000 册 定价 88.90 元

译者序

随着电力电子器件的发展,电力电子技术在电机传动领域得到了广泛应用。现代电力传动是电力电子与电机及其控制相结合的产物,其内容涉及电机、电力电子技术、控制理论、现代检测技术等学科,是一项综合性、交叉性学科研究领域。现代电力传动已有 30 多年的历史,随着新的电力电子器件不断涌现,电力电子装置的形式不断更新,用于电能变换的电力电子装置容量也在不断增大。现在的电力电子和电力传动已用于各个领域,小到一般的家用电器,大到上千千瓦(甚至上万千瓦)的电动机传动或电能变换。凡是电能的产生、输送、变换与控制以及新能源的应用等,都与电力电子和电力传动密切相关,它已成为国民经济发展的重要组成部分。变频传动是当前电力传动学科研究的热门课题。在我国,交流变频调速系统已得到广泛应用。交-交变频器-交流电动机调速系统已用于轧机主传动、矿井提升、大型风机等领域;变频调速技术已用于电气牵引、水泵、风机调速系统,都显示出良好的经济效益。本书集当前国际电力电子与变频传动方面的最新技术和动态,侧重于当前国际电力电子与变频传动学科研究领域带有方向性的热门课题和关键技术——如脉宽调制技术、高性能交流伺服系统、大功率工业传动、电力电子与电力传动控制的辨识和仿真技术、交流传动的全数字控制、无传感器控制和智能控制等。翻译本书的目的,就是将国际上该领域的最新研究成果介绍给我国从事电力电子与电力传动的科技工作者,以及从事电气工程领域教学和科研工作的高校师生,以推动该技术领域的进一步研究和发展。

本书是现代电力电子与电力传动方面的专著,是一本不可多得的教学参考书。它是作者多年从事教学、科研工作的最新研究成果。本书的主编是美国田纳西(Tennessee)大学博斯教授。他是美国诺克斯维尔(Knoxville)电力电子应用中心的首席科学家,长期从事电力电子与电力传动方面的教学和科研工作,在电力变换器、微机控制、交流传动方面造诣很深。博斯教授在国际上享有很高声誉,曾多次获得 IEEE 的大奖和出版奖。

正如博斯教授在本书原序中所说:“电力电子学与变频传动是电工学科中一个发展很快的多学科交叉的领域。实际上,要撰写出一本包括全部内容的著作,由一位专家是难以完成的。”本书的作者都是国际上从事电力电子与电力传动的知名专家和教授,有美国北卡罗来纳州立大学的 Baliga 教授,加拿大多伦多大学的 Slemon 教授,德国 Wuppertal 大学的 Holtz 教授,美国 Wisconsin 大学的 Lorenz 教授、Lipo 教授,瑞士联邦工学院的 Stemmler 教授,日本东京大学的堀余一教授等,他们都在各自的研究领域做出过突出贡献。他们的杰出著作无疑会给从事电力电子和电力传动方面研究的广大科技工作者以有益的启迪和帮助。

博斯教授对我国怀有十分友好的感情,曾多次来我国讲学和访问。为了加强和促进我校省重点学科——“电力电子与电力传动学科”建设,1996 年我们邀请了博斯教授来校讲学并聘为我校荣誉教授。在这次访问中,博斯教授把这部专著赠送给我校,并欣然同意译成中文在中国正式出版。经与 IEEE 出版社进行版权协商,中国矿业大学出版社取得了中文译本的

版权。经过近一年的努力,这本反映电力电子与电力传动学科当前最新成果和动态的专著终于和广大中国读者见面了。

参加本书翻译工作的,均系中国矿业大学和相关高校从事本专业领域教学和科研的专家。译著的分工如下:第1、2、3、6、7、8、9章内容,分别由中国矿业大学张同庄博士、陈昊博士、王聪副教授、黄章教授、伍小杰博士、姜建国教授、王义门教授负责;第4章由东南大学赵家璧教授负责;第10、11章由西安矿业学院杨仲平教授、马宪民副教授负责;第5章由上海大学曹云龙博士负责。中国矿业大学谢桂林教授负责译文的前言、致谢和导论部分,并对全部译稿在技术内容上做了详细而严格的审校,保证了译文的准确性。在此,谨向参与翻译和审校并为之付出辛劳的各位专家表示衷心感谢。

借此机会,愿向大力支持本译著出版的中国矿业大学出版社领导以及本书责任编辑王景华编审表示感谢。

由于时间仓促,译文中可能存在某些错误和不妥之处,敬请广大读者批评指正。

中国矿业大学 姜建国

1999年7月于江苏徐州

中文版序言

当我得知我的新作《电力电子学与变频传动的技术和应用》一书即将译成中文出版时,我是多么地激动。我确信,这是我的第三本译成中文出版的著作。在此,我谨向中国矿业大学的谢桂林博士和姜建国博士表示由衷的感谢,是他们在这么短的时间内完成了如此庞大的翻译工作,把我的书介绍给了中国读者。这本书如果对于中国的大学生、教育工作者、科研人员以及工程技术人员有所帮助的话,那么,作为作者和翻译者,我们的努力就取得了成功。

正如我们所了解的那样,当我们迎着 21 世纪的曙光前进之时,电力电子学与变频传动技术变得越发重要了。我很乐意提请诸位注意,在我开始从事我的专业时的 1958 年,当时晶闸管刚刚诞生,这正是现代电力电子时代的开始。我亲眼看到这项技术从萌芽到成长为枝繁叶茂大树的 40 年的发展历程,它在世界范围的工业文明发展中所起的关键作用可能仅次于计算机。我们期待电力电子技术在未来的工业自动化、能源领域、交通运输以及公用事业等方面的应用有巨大的发展。而事实上,它也将扩展到工业、商业、民用和军事系统的各个方面。从另一个侧面,即提高用电效率从而有助于环境污染控制这个具有广阔发展前景的领域来看,电力电子技术的重要性也正在日益显露出来。

作为一项复杂的多科性的技术领域,电力电子学正在迅速扩展其应用的范围。对今天从事电力电子技术应用研究的工程师来说,他们必须深入了解电力半导体器件、功率变换器、电机、电力传动以及先进的控制、仿真技术和数字信号处理等技术。新兴的人工智能技术,诸如专家系统、模糊逻辑和神经网络也正在踏进电力电子学的前沿,随着相关技术和工艺的进步,电力电子工程师们将面临更加严峻的挑战。

近些年来我所看到的中国的大学和工业界在电力电子学方面的发展,给我留下了深刻的印象。过去我曾有机会三次访问中国。通过我的多次讲座,指导、会议报告以及重点发言等都在事实上推动着这个发展。我相信,我的这本书也必将起着这个作用。如果以目前的速度持续发展的话,无疑,中国一定会在电力电子技术领域取得世界领先的地位。最后,我的这本书如若能为中国读者广泛接受的话,我将会感到无此的幸福。

B. K. 博斯

1999 年 6 月 10 日

序 言

现在我很自豪地把这本书献给全世界的电力电子界的朋友们。这本书与我以往的几本书不同,它不是一本论文集,而是一本统一构思的完整著作。众所周知,电力电子学与变频传动是电工学科中一个发展很快的多学科交叉的领域。实际上,要撰写一本包括全部内容的著作,由一位专家是难以完成的。为此,本人遴选了该领域中的几位主要专家,邀请他们各自撰写一章他们熟悉的那方面内容。实际上,本书各章内容是在美国电工电子学会 1994 年 8 月出版的汇刊专辑的基础上改写和补充而成的。

我们确实为我们有幸成为电力电子行业中的一员而感到无比自豪。我亲眼看着这个学术领域像一棵大树那样一寸一寸地成长起来,从晶闸管发展到大功率晶体管,到直流感应,到微处理器,到高级的变换器,到交流传动,到无速度传感器控制,到辨识,到智能控制等等。在我有生之年,我幸运地看到现代电力电子技术从生根到成长为枝繁叶茂树木的全过程,并得到广泛的承认。在 21 世纪,我们将会看到电力电子学对于工业自动化、交通运输、城市供电、节能、环境污染控制等方面发展所产生的巨大推动作用。从工业电子学诞生之日算起,电力电子学的发展已有近 100 年历史。要是它再早 100 年诞生或许就好了,那样我们会感受到它的成熟和广泛应用。

现在让我做一全面的历史回顾。众所周知,世界工业文明大约起源于 200 多年前的 1785 年,那年瓦特发明了蒸汽机,这是工业革命的开始,人力逐渐被机械动力所代替。19 世纪末,内燃机的发明给了这个发展趋势以更大的推动。也就是在这个时期(1888 年),尼·特斯拉发明了工业用感应电动机。直流电机和同步电机也分别在其前后研制出来。随着电机的出现和电力的应用,新的电气化时代开始了。后来,在 1948 年,晶体管的发明(发明人是 Bardeen, Brattain 和 Shockley)标志现代电子时代的开始。接着,半导体电力电子器件、电子计算机、机器人、通讯等现代技术相继问世。半导体电力电子常被视为第二次电子革命,它的重要意义就在于电力电子学把机械时代、电气时代和电子时代开创的技术融合在一起。它确实是一门学科交叉的技术。

当我们即将跨入 21 世纪工业革命,人类社会正处在光辉顶峰并收获着现代科学技术的各种成果之际,我们必须看到,在魅力和丰硕果实的背后,还存在人们遭受苦难的阴暗面。具有讽刺意味的是,地球上 55 亿人口中有 85% 以上的人仍忍受着贫穷、饥饿和病痛的折磨。在少数人生活富裕而绝大多数人受苦的情况下,怎能说这个世界是个幸福、健康的乐园呢?地球母亲的资源看来还是丰富的,特别是在拥有现代科技的今天更是如此,足以为所有的人提供良好的生存条件。我呼吁所有电力电子界的同行们,勇敢地前去以无私、仁慈、同情、怜悯和爱心来回报社会。这个社会为我们的成功而付出的太多太多。让我们在全世界电力电子是一家的旗帜下去完成这个神圣的使命吧。

下面让我介绍一下本书的概貌。本书可以说是关于电力电子学与变频传动领域发展现

状的最新评述。在这个多学科交叉领域中,包括有电力半导体器件、电机、变换器电路、脉宽调制技术、交流电机传动、仿真技术、估值与辨识、微处理器和人工智能技术等方面。我们的目标是使本书成为本学科领域工程技术人员必备的技术指南。本书的读者对象应当是已具备电力电子学与变频传动方面的基础知识的人。

本书的导论是由本人撰写的,它勾画了整个技术的轮廓。在一定意义上,它起着关联后续各章内容的作用。我们准备讨论任何基础性的内容,实际上,限于本书的写作目的,在各章中也不可能讨论那些基础性的东西。

第1章,“变频传动电力半导体器件”是由 Baliga 教授撰写的。本章对电力电子器件做了综述,这些器件有 MOSFET、IGBT、MOS 控制的晶闸管(MCT)、功率整流管以及智能化功率控制芯片等,特别着重介绍了传动应用方面的内容。文中特别突出地介绍了 MOS 控制型器件,这是由于近年来它在传动应用中具有重要作用。对于由传统的硬开关技术实现的变换器的损耗进行了分析,并对使用不同器件构成的桥臂的损耗进行了对比。如果采用软开关技术,特别是使用 MCT 这类的器件,损耗将会降低。目前的器件都是由清一色的硅材料制造的,新一代碳化硅材料表明,损耗可望有大幅度的降低。

第2章,“传动装置中的电机”是由 Slemon 教授撰写的。首先对用于变频传动的各种电机做了综述,如感应电机、永磁同步电机、永磁梯形电机、永磁磁阻电机、开关磁阻电机、绕线励磁同步电机等。对于直流电机的特点以及传统的调速传动问题进行了讨论。对各种类型电机的应用领域也做了详尽的评述。本章综合提出了合理选择拖动形式的建议和详细评估各种拖动形式的设计指标,诸如初期投资、运行费用、动态性能、可维修性、坚固性、重量、环境可接受性等。

第3章,“用于传动的电力电子变换器”是由 van Wyk 教授撰写的。本章重点对传动用变换器发展做了历史展望,综合分析了可能的拓扑结构并描述了其功能特性。文章从开关函数的一般性结果开始,概括了各种拓扑结构形式,其中包括现代的带谐振中间环节的变换器。本文还涉及缓冲电路、电磁学、冷却、保护以及变换器组装等方面的内容。本章最后还附有一个内容全面的参考文献目录。

第4章,“电子功率变换的脉宽调制技术”是由 Holtz 教授撰写的。本章讲述的是现代脉宽调制技术。综述了空间矢量原理并讨论了 PWM 的性能指标,如谐波电流及其频谱分布、谐波转矩、开关损耗以及动态性能等。PWM 技术大致可划分为开环或前馈方式和闭环或反馈方式两种。在开环方式中讨论了次振荡、改进型次振荡、空间矢量调制、同步载波调制、指定谐波消除、最优次谐波等方法。在闭环方式中讨论了电流滞环控制、次振荡电流控制、空间电流矢量控制、预测电流控制、轨迹跟踪控制等方法。

第5章,“感应电动机驱动的运动控制”是由 Lorenz、Lipo 和 Novotny 教授撰写的。本章首先介绍了用于感应电动机驱动电压源逆变器和电流源逆变器。文中特别着重地介绍了伺服系统最新的矢量或磁场定向控制方法。综合评述了通常用于矢量控制的基波电流控制 PWM 法。本章还讨论了磁通和转矩的估值及其控制,介绍了现代的传动系统自调定和自校正技术。

第6章,“永磁交流电机的变频传动”是由 Jahns 撰写的。本章对于梯形磁场和正弦波磁场永磁电机控制做了全面介绍。对于电机的工作原理、变换器、控制以及取消位置传感器等问题,结合应用实例做了深入的综合分析。最后对今后的技术发展趋势做了探讨。

第7章,“大功率工业传动”是由 Stemmler 教授撰写的。本章综述了大功率传动的主要形式:交交变频器供电的同步电动机传动、带转差功率回收的绕线转子感应电动机传动、由电压源逆变器和电流源逆变器供电的感应电动机和同步电动机传动等。讨论了传动系统的电机和变换器的选型、设计、性能以及应用范围等问题。对每种类型传动的未来发展前景均做了评述。

第8章,“电力电子与运动控制系统的仿真”是由 Mohan、Robbins、Aga、Rastogi 和 Naik 撰写的。本章首先讨论了对电力电子设施进行仿真的必要性,综合介绍了传统的仿真工具和广泛使用的数字仿真程序软件,如 SPICE、EMTP 和 MATLAB/SIMULINK。特别使人感兴趣的是利用 SIMULINK、PSPICE 和 ATP(EMTP 的一个版本)对矢量控制的感应电动机传动系统进行的仿真。最后讨论了对电力半导体器件建模问题的展望。

第9章,“交流传动的估值、辨识和无速度传感器控制”是由小西孝平、松井雪部野和堀余一撰写的。本章讨论的是目前研究开发的热点课题。讨论了反馈控制信号的估值问题(相当于无传感器控制)和变频传动系统中交流电机(感应电动机和永磁同步电动机)的参数辨识问题,还包括有机械扰动转矩的估值和控制等问题。

第10章,“电力电子与传动控制中的微处理器和数字集成电路”是由 Le-Huy 撰写的。本章全面论述了数字控制原理、微控制器(即单片机)、高级微处理器和 ASIC(专用集成电路)等技术。综述了硬件设计、软件设计、实际系统的系统测定。文中给出了永磁同步电机驱动的电动汽车和用并行微处理器控制的感应电动机驱动系统的应用实例。最后讨论了未来的发展趋向。

最后一章,第11章,“专家系统、模糊逻辑和神经网络在电力电子和传动系统中的应用”是由本人撰写的。基于人工智能技术的智能控制可能是电力电子学中的最活跃的领域,本章用简洁的语言讨论了专家系统、模糊逻辑和神经网络的原理,并附有若干应用实例,论述了各控制技术的设计方法。由于电力电子界对这部分内容较为生疏,故在本章末尾增加了一份详细的专业词汇表。我认为,神经模糊控制技术在不久的将来在电力电子领域将产生深刻而持久的影响。

B. K. 博斯

田纳西大学

致 谢

我谨向本书各章的作者表示衷心感谢。没有他们的热情响应、认真合作和按时交稿,本书是不可能完成的。如果本书被公认是一本好书,它将定期地由撰稿者进行修订,并齐心协力将最新的技术成果提供给读者。我对我的研究生们,特别是 Marcelo G. Simoes(现在巴西圣保罗大学任教)和 Sunil Chhaya(现在通用汽车公司任职)给予的帮助表示感谢。IEEE 出版社的 Savoula Amanatidis 为本书的出版给予了不同寻常的帮助,评审人员代表 IEEE 为审定全部手稿付出了艰苦的劳动。在此一并表示感谢。最后还要感谢我的家人给予的支持。

B. K. 博斯

田纳西大学

目 录

译者序	姜建国
中文版序言	B. K. 博斯
序 言	B. K. 博斯
致 谢	B. K. 博斯

电力电子学与传动导论	B. K. Bose 田纳西大学〔美〕 (1)
------------------	-------------------------

第 1 章 变频传动电力半导体器件	B. J. Baliga 北卡罗来纳州立大学〔美〕 (6)
-------------------------	-------------------------------

1.1 引言	6
1.2 基本变频调速系统	8
1.3 功率场效应管	10
1.4 绝缘门极双极型晶体管	11
1.5 功率整流管	14
1.6 MOS 门控晶闸管	17
1.7 新型半导体材料	21
1.8 器件比较	23
1.9 智能功率控制芯片	24
2.0 结论	25
参考文献	26

第 2 章 传动装置中的电机	G. R. Slemon 多伦多大学〔加〕 (28)
----------------------	----------------------------

2.1 引言	28
2.2 传动装置对电动机的要求	28
2.3 换向器电动机	29
2.3.1 转矩的产生	29
2.3.2 损耗与冷却	30
2.3.3 等值电路	30
2.3.4 恒功率运行	31
2.3.5 使用的局限性	31
2.4 感应电动机	31
2.4.1 转矩的产生	32
2.4.2 等值电路模型	32

2.4.3	极数	33
2.4.4	转矩表示式	34
2.4.5	损耗与效率	34
2.4.6	参数与尺寸的依赖关系	35
2.4.7	工业传动应用	35
2.4.8	恒功率运行	36
2.4.9	高性能传动的应用	36
2.4.10	传动设计中的若干问题	37
2.4.11	绕线转子电动机	37
2.5	永磁同步电动机	38
2.5.1	永磁材料	38
2.5.2	等值电路	39
2.5.3	运行特性	40
2.5.4	磁铁保护	41
2.5.5	损耗与效率	41
2.5.6	工业传动应用	42
2.5.7	恒功率应用	42
2.5.8	高性能传动的应用	43
2.6	开关永磁电动机或梯形永磁电动机	43
2.6.1	星形连接电动机	43
2.6.2	转矩的产生	44
2.6.3	损耗与效率	44
2.6.4	三角形连接电动机	45
2.6.5	设计特点	45
2.6.6	运行特性	45
2.7	同步磁阻电动机	46
2.7.1	等值电路	46
2.7.2	转矩	46
2.7.3	运行条件与功率因数	46
2.7.4	结构型式	47
2.7.5	损耗与效率	47
2.7.6	恒功率运行	47
2.8	永磁磁阻电动机	47
2.9	开关磁阻电动机	49
2.9.1	转矩关系	49
2.9.2	损耗与效率	50
2.9.3	设计与应用需考虑的问题	50
2.10	绕组励磁式同步电动机	51
2.11	直线电动机	51

2.12 结论	52
术语符号表	53
参考文献	53
第3章 用于传动的电力电子变换器 J. D. van Wyk 兰德非洲大学〔南非〕(56)	
3.1 引言.....	56
3.2 电力电子变换器的发展及其在传动领域的应用.....	56
3.2.1 关于实用电力电子变换器的系统综述	56
3.2.2 用于运动控制的电力电子变换器的发展历史	58
3.3 开关变换器的功能及其在变频传动中的应用.....	58
3.3.1 开关变换器的平均能量流的控制	59
3.3.2 电力电子变换器的拓扑和结构	63
3.3.3 开关变换器的基本制约关系	70
3.3.4 用于变频传动的变换器结构	71
3.4 幅值控制的电力电子变换器.....	73
3.4.1 直流-直流变换器	73
3.4.2 交流-直流变换器	74
3.5 用于变频传动的电力电子变换器.....	75
3.5.1 电流源逆变器传动装置所用交流-直流-交流变换器	76
3.5.2 电压源逆变器传动装置所用交流-直流-交流变换器	76
3.5.3 交流-直流-交流变换器对供电电源的影响	76
3.5.4 变换器的扩展类型	78
3.5.5 最小变换器拓扑	80
3.6 开关应用技术.....	82
3.6.1 电力电子开关的开通和关断	82
3.6.2 减少实用中的开关损耗	84
3.6.3 变换器的保护和散热	89
3.6.4 更深层的变换器应用技术	90
3.7 未来变换器的发展与电磁学的关系.....	90
3.7.1 开关变换器电磁学	91
3.7.2 电磁学与 EMI/EMC	91
3.8 结论.....	91
参考文献	93
第4章 电子功率变换的脉宽调制技术 J. Holtz 伍佩尔塔尔大学〔德〕(102)	
4.1 引言	102
4.2 直流-交流功率变换	102
4.2.1 功率放大原理.....	102
4.2.2 半导体开关.....	103

4.2.3	半桥拓扑	105
4.2.4	三相功率变换	106
4.3	空间矢量导论	107
4.3.1	定义	107
4.3.2	标么化	109
4.3.3	开关状态矢量	109
4.3.4	推广	109
4.4	性能指标	110
4.4.1	电流谐波	110
4.4.2	谐波频谱	110
4.4.3	空间矢量轨迹	111
4.4.4	最大调制度	111
4.4.5	谐波转矩	111
4.4.6	开关频率和开关损耗	112
4.4.7	极性一致原则	113
4.4.8	动态性能	113
4.5	开环系统	113
4.5.1	基于载波的 PWM	113
4.5.2	无载波 PWM	121
4.5.3	过调制	122
4.5.4	优化的开环 PWM	124
4.5.5	开关条件	127
4.6	闭环控制 PWM	132
4.6.1	非最优法	133
4.6.2	带实时最优的闭环 PWM	136
4.6.3	预优化脉冲模型的实时自适应	137
4.7	多电平变换器	143
4.7.1	12 阶梯工作	143
4.7.2	开关状态矢量	145
4.7.3	三电平脉宽调制	145
4.8	电流源逆变器	150
4.9	结论	151
	术语符号表	152
	参考文献	153

第 5 章 感应电动机驱动的运动控制 R. D. Lorenz, T. A. Lipo, D. W. Novotny 威斯康辛大学[美] (157)

5.1	引言	157
5.2	调速用逆变器	157

5.2.1	基本的六阶梯电压源逆变器	158
5.2.2	脉宽调制电压源逆变器	160
5.2.3	电流源逆变器传动	164
5.3	运动控制系统	168
5.3.1	古典的、工业标准的FO-IM 数字运动控制	168
5.3.2	状态变量,FO-IM 数字运动控制	170
5.3.3	零跟踪误差,状态变量,FO-IM 数字运动控制	171
5.3.4	关于FO-IM 运动控制的反馈传感器问题	171
5.3.5	关于FO-IM 运动控制的基于观测器的反馈问题	174
5.3.6	状态变量,FO-IM,带加速度反馈的数字运动控制	175
5.3.7	关于FO-IM 运动控制要求的小结	177
5.4	感应电动机磁场定向(FO)控制原理	177
5.4.1	直接磁场定向	179
5.4.2	间接(前馈)磁场定向	179
5.4.3	参数误差的影响	179
5.4.4	磁通水平的选择	180
5.5	FO-IM 运动控制的电流调节器	180
5.5.1	滞环和砰-砰电流调节器	182
5.5.2	斜坡比较式PI 电流控制,固定频率PWM	184
5.5.3	预测(最优)电流控制器	187
5.5.4	关于FO-IM 运动控制电流调节器的小结	189
5.6	用于FO-IM 运动控制的高性能磁通和转矩调节方法	190
5.6.1	磁通精度问题	190
5.6.2	零速下用于直接磁场定向的开环磁通观测器	190
5.6.3	间接磁场定向的开环磁通观测器	191
5.6.4	闭环磁通观测器和直接磁场定向——转子磁通	192
5.6.5	闭环磁通观测器和直接磁场定向——定子磁通	193
5.6.6	直接转子磁通定向、定子磁通调节和闭环磁通观测器	194
5.6.7	关于FO-IM 运动控制的高性能磁通和转矩调节方法的小结	196
5.7	FO-IM 的自调试和连续自校正	196
5.7.1	参数估计的统计方法	196
5.7.2	统计回归模型——恒速下感应电动机的估计	197
5.7.3	转子时间常数和电阻、电感参数的提取	199
5.7.4	统计回归模型——机械负载参数	199
5.7.5	统计估计的运行条件和输入激励的限制	200
5.7.6	关于FO-IM 统计方法的小结	201
5.7.7	FO-IM 参数估计的自适应控制方法	201
5.7.8	递推,最小二乘	201
5.7.9	MRAC 方法	201

5.7.10 无差拍自适应控制方法	202
5.8 结论	205
致谢	206
术语符号表	207
参考文献	208
第6章 永磁交流电动机的变频传动	T. M. Jahns GE 公司〔美国〕 (212)
6.1 引言	212
6.1.1 背景	213
6.1.2 运动控制的性能要求	213
6.2 PMAC 电动机的控制基础	214
6.2.1 正弦与梯形 PMAC 电动机的对比	214
6.2.2 变换器的构成	215
6.2.3 位置同步	218
6.2.4 机械传动组合	219
6.2.5 PMAC 传动的控制结构	219
6.3 梯形 PMAC 电动机的控制	221
6.3.1 电动机的控制特性	221
6.3.2 基本控制方法	222
6.3.3 转矩脉动	226
6.3.4 高速运行	228
6.4 正弦 PMAC 电动机的控制	229
6.4.1 电动机的特性	229
6.4.2 基本控制方法	231
6.4.3 转矩脉动	234
6.4.4 高速运行	235
6.5 现代控制技术	238
6.5.1 取消位置传感器	238
6.5.2 取消电流传感器和新型调节器	240
6.5.3 鲁棒控制	241
6.6 PMAC 传动装置的应用	241
6.6.1 电动机传动的比较	241
6.6.2 PMAC 传动装置的发展方向	242
6.6.3 未来应用的展望	245
6.7 结论	246
参考文献	247
第7章 大功率工业传动	H. Stemmler 联邦工程技术学院〔瑞士〕 (254)
7.1 引言	254

7.2	按速度和功率定额分类	255
7.3	大功率传动发展的简要回顾	255
7.4	大功率传动电动机	256
7.4.1	电动机类型	256
7.4.2	交流电动机的数学描述	257
7.5	大功率传动变换器	263
7.5.1	基本电路	263
7.5.2	变换器的构成	265
7.6	由外部换流的电流源变换器供电的同步电动机	266
7.6.1	基本原理	267
7.6.2	工作模式	267
7.6.3	系统的实现	270
7.6.4	应用	272
7.6.5	展望	273
7.7	电流源变换器供电的感应电动机	275
7.7.1	基本原理	275
7.7.2	工作模式	275
7.7.3	谐振问题	277
7.7.4	如何避开谐振	277
7.7.5	基本控制结构	278
7.7.6	应用——实际实现	279
7.7.7	展望	279
7.8	周波变换器供电的同步电动机	279
7.8.1	基本原理	279
7.8.2	工作模式	279
7.8.3	系统的实际实现	282
7.8.4	应用	282
7.8.5	展望	283
7.9	大型电压源逆变器传动	284
7.9.1	目前电压源逆变器的特点	284
7.9.2	二电平逆变器传动	285
7.9.3	优化目标	286
7.9.4	三电平逆变器传动	288
7.9.5	低电感设计	288
7.9.6	控制	291
7.9.7	展望	291
7.10	转差功率可控的传动	292
7.10.1	概述	292
7.10.2	次/超同步串级调速	293