



国际电气工程先进技术译丛

CRC Press  
Taylor & Francis Group

# 线性神经网络控制的 电力变流器 与交流电气传动

Power Converters and AC Electrical Drives with  
Linear Neural Networks

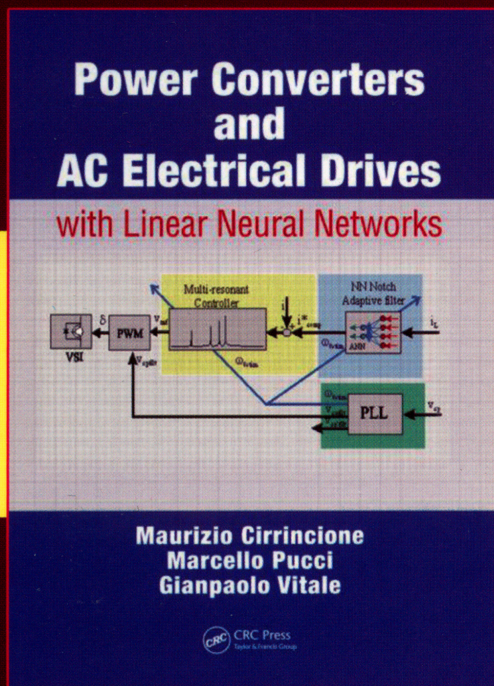
[法] 毛里齐奥·奇林乔内(Maurizio Cirrincione)

[意] 玛切洛·普齐(Marcello Pucci)

[意] 詹尼保罗·维达莱(Gianpaolo Vitale)

著

周永旺 程汉湘 张淼 张祺 译



系统探讨人工智能与电力电子的发展融合

相关领域的权威专家所著

系统阐述神经网络在电力电子技术领域应用

机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

## 关于本书

作为同类书中首先系统阐述神经网络在电力电子技术领域应用的著作，本书还特别说明了无速度传感器交流传动控制。本书介绍了基于空间向量识别的经典理论，讨论了电气传动和电力电子的控制，并对其进行探讨改进，使其可以在线性神经网络中应用。

## 本书特色

本书用人工神经网络(ANN)将电力电子技术和电气传动结合起来。本书分4个部分：

第1部分阐述了电压源逆变器及其控制；

第2部分主要介绍了以感应永磁同步电气传动为主的交流电气传动控制；

第3部分验证了线性神经网络的理论依据，尤其是EXIN神经网络；

第4部分强调了在电气传动和电能质量中，从基于神经网络的参数估计和无位置传感器控制到有源电力滤波器与可再生能源分布式的发电系统中的应用，其仿真和实验结果可用于验证该理论。



国际电气工程先进技术译丛

# 线性神经网络控制的电力 变流器与交流电气传动

[法] 毛里齐奥·奇林乔内 (Maurizio Cirrincione)

[意] 玛切洛·普齐 (Marcello Pucci)

[意] 詹尼保罗·维达莱 (Gianpaolo Vitale)

周永旺 程汉湘 张森 张祺

著

译



机械工业出版社

本书是一本系统阐述神经网络控制理论在电力电子技术领域应用的专业书籍，详细介绍了无速度传感器交流传动控制系统以及相关的理论，而这些理论是建立在空间矢量识别的经典控制理论之上。本书广泛收集并总结了基于电力电子器件的电气传动控制中的代表性结构和控制原理，在此基础之上，进一步讨论了对现有系统的改进思路和完善的方向，使线性神经网络控制理论的应用与电气传动控制有机地结合起来，同时还能应用本书所介绍的人工神经网络（ANN）理论来实现对电力电子器件的实时控制。本书涉及电力电子技术、神经网络控制、电气传动、电机学以及电力系统分析等内容，涵盖了电气工程学科中的几个主要领域，是系统掌握电力电子技术中智能控制的优秀参考图书。全书共分为4个部分：第1部分阐述了电压源型逆变器及其控制，主要是帮助读者回顾有关的基础；第2部分介绍了以感应永磁同步电气传动为主的交流电气传动控制，此部分同样是为后续的实际控制对象做一个前期铺垫；第3部分则引出了线性神经网络控制理论的基本概念，以及它在电气传动控制中应用的可能性，同时还验证了线性神经网络控制理论能够实现电气传动控制的理论依据，尤其是EXIN神经网络；本书的第4部分是对实际应用的描述，详细分析了电气传动中的电能质量问题，讨论了神经网络理论在电气传动中的参数辨识、无速度传感器的控制、电力有源滤波器以及在分布式可再生能源发电系统中的应用，其中所涉及的仿真和实验结果也证明了应用神经网络理论实施控制的正确性。

若要全面和正确理解本书的精髓，需要读者具备电气设备和电力电子技术以及一些控制系统、信号处理、线性代数、数值分析的基本知识。本书适用于高年级本科生和研究生、学者、执业工程师和研究人工神经网络应用的相关人员学习、参考，同时读者也可通过书中各章最后所提供的相关参考资料来进一步理解书中所述内容。

# 译者序

快速发展的电力电子技术，已融入现代电气控制的各种开关环节中，使其成为智能开关、软开关的可靠执行者。作为电力电子技术应用最为集中的电气传动控制系统，各种现代先进的控制理论在其中得到了充分的体现，并能实现各种复杂的控制功能。这主要得益于电力电子器件大容量、高精度的开关特性。电气传动中先进控制理论的应用和效果的实现，必须要由能满足控制要求的开关器件来实现，而电力电子器件是能体现或胜任这一开关需求的理想器件。从理论上讲，随着开关材料和制造工艺的进步，电力电子技术可以将任何先进控制理论的应用发挥至极限。正是基于这一重要特征，世界上才会有众多的科学工作者和工程师在电气传动控制中应用各种智能控制策略，使电气传动的性能不断得到优化。

作为体现省级精品课程系列的扩充内容，同时也作为本学科质量工程工作的一部分，学科组经过广泛的资料收集和筛选，最终选择了由 Maurizio Cirrincione、Marcello Pucci 和 Gianpaolo Vitale 三位作者合著的《线性神经网络控制的电力变流器与交流电气传动》一书，用于电气工程类深层次教学和今后开展的主要研究方向的参考用书，使电力电子技术的应用融入智能控制的具体实践之中，以解决《电力电子技术》课程后续控制对象不够成熟的建模问题。本书的全部译者均为广东省《电力电子技术》精品课程的主要骨干，并长期工作在电力电子技术课程教学和科研工作的第一线。其中，周永旺老师负责第2、3章翻译工作，程汉湘老师负责原书序、原书前言及第1章的翻译工作，张淼老师负责第4~7章的翻译工作，张祺老师负责第8~11章的翻译工作。在本书的翻译过程中，还得到了余音和彭杰锋两位研究生在资料整理和图形加工方面的大力协助。

本书是一本系统阐述神经网络在电力电子技术领域应用的专业书籍，详细介绍了无速度传感器交流传动控制系统以及相关的理论，而这些理论建立在空间矢量识别的经典控制理论之上。本书广泛收集并总结了基于电力电子器件的电气传动控制中的代表性结构和控制原理，在此基础

之上，进一步讨论了对现有系统的改进思路和完善的方向，使线性神经网络的应用与电气传动控制有机地结合起来，同时还能应用本书所介绍的人工神经网络（ANN）理论实现对电力电子器件的实时控制。本书的编排由一般到集中、由简到难，逐渐深入，涉及电力电子技术、神经网络控制、电气传动、电机学以及电力系统分析等内容，涵盖了电气工程学科中的几个主要领域，是系统性掌握电力电子技术中智能控制的优秀图书。全书共分为4个部分：第1部分阐述了电压源型逆变器及其控制，主要是帮助读者回顾有关的基础；第2部分介绍了以感应永磁同步电气传动为主的交流电气传动控制，此部分同样是为后续的实际控制对象做一个前期铺垫；第3部分则引出了线性神经网络的基本概念，以及它在电气传动控制中应用的可能性，同时还验证了线性神经网络理论能够实现电气传动控制的理论依据，尤其是EXIN神经网络；本书的第4部分是对实际应用的描述，详细分析了电气传动中的电能质量问题，讨论了神经网络理论在电气传动中的参数辨识、无速度传感器的控制、电力有源滤波器以及在分布式可再生能源发电系统中的应用，其中所涉及的仿真和实验结果也证明了应用神经网络理论实施控制的正确性。

本书的作者都是相关领域的著名专家，翻译人员也是长期从事这些领域研究的学者。若要全面和正确理解本书的精髓，需求读者具备电气设备和电力电子技术以及一些控制系统、信号处理、线性代数、数值分析的基本知识。本书适用于高年级本科生和研究生、学者、执业工程师和研究人工神经网络应用的相关人员学习、参考，同时读者也可通过书中各章最后所提供的相关参考文献来进一步理解书中所述内容。本书能够与读者见面，得到了关心和鼓励本书翻译工作的朋友和同事们的鼎力支持，他们对本书的有关细节也曾提出过建设性的意见，谨在此对他们的友好帮助表示诚挚的感激，同时也对机械工业出版社所提供的机会表示由衷的谢意。

译者

# 原 书 序

能得到本书作者的邀请写这篇序言，我感到非常荣幸和喜悦。我衷心希望这本关于电力电子和电机驱动最先进技术的书籍可以得到来自研发人员、执业工程师、大学教授，甚至由研究生所组成的专业电力电子团队的广泛接受和认可。我衷心祝贺作者完成了一本这么优秀的图书。

电力电子和电机驱动技术是一个复杂而且跨多学科领域的技术。在经历了动态演化的几十年里，研发人员发明创造了许多电力半导体设备、变流器、脉宽调制（Pulse Width Modulation, PWM）技术、电机、电机驱动、先进控制和仿真技术。最近几年，电力电子的前沿领域随着人工智能（Artificial Intelligence, AI）技术的发展变得更加深远，如专家系统、模糊逻辑系统、神经网络和遗传算法（或进化计算）。电力电子现在在电气工程上已经发展成为一门主要的学科。在21世纪初，其巨大影响不仅在全球工业化和通用能源系统上显而易见，在能源保存、可再生能源、大量的能量存储和电动/混合动力汽车上也产生了巨大影响。在工业上电力电子的广泛应用已经在工业工程领域产生了前所未有的变革。电力电子技术在新时代的作用将会与计算机、通信和信息技术一样重要。

我已经用了几年的时间投身在电力电子和电机驱动，尤其是专家系统、模糊逻辑、神经网络的人工智能应用的最新发展中。关于这些领域我也在我的书里面写了几章。能够看到人工智能在这些领域和在工业应用的成长和发展，我真的感到非常兴奋。在所有人工智能技术中，神经网络在电力电子和电机驱动的复杂系统识别、控制和估计上已经浮现出了最重要的地位。期待它们未来在工业上有更广泛的应用。

这是一本精品书，也是第一本系统地探索人工智能应用在电力电子上的书。本书的作者是 Maurizio Cirrincione、Marcello Pucci 和 Gianpaolo Vitale。本书尤其强调神经网络在交流驱动无速度传感器控制上的应用，包括在有源电力滤波上的应用。

本书在内容上大致可以归纳成4个部分，共有11章。第1章是绪论部分，介绍了空间矢量理论和瞬时功率理论。简单阐述了空间矢量理论的概念在现代电力电子和驱动上的重要性。第1部分（第2章和第3章）

详细地介绍了馈电源变流器及其控制（开环和闭环控制）以及处理 PWM 的算法，也介绍了基于电压定向控制（Voltage Oriented Control, VOC）和功率定向控制（Power Oriented Control, POC）的方法。此外，也讨论了并联和串联有源滤波的功率质量控制。第 2 部分（第 4~7 章）处理了感应永磁同步电动机驱动器。它包括对交流电动机、标量、矢量（或磁场定向）和感应同步电动机的直接转矩控制的动态模型描述。在第 6 章中的感应电动机驱动器的无速度传感器控制是特别重要的。第 3 部分（第 8 章）和第 4 部分（第 9~11 章）构成了本书的核心，描述了线性神经网络的理论，尤其是 EXIN 家族（由作者之一共同开发）和它们的应用，从基于神经参数估计和无速度传感器控制（它包括 MRAS 观测器、全阶 Luenberger 自适应观测器和降阶观测器）到基于可再生能源和有源电力滤波的神经分布式发电系统。每一章还包括了广泛的参考文献，包括在这一领域的主要的教科书。也提供了大量的仿真和实验结果来证明这些理论。就我所知道的，本书的第 4 部分是独特的，是在其他同类书里面所没有的。

阅读本书，需要读者了解电力电子和电机驱动的基本知识，包括线性代数的一些知识。同时也需要神经网络方面的背景知识，但不要求必须有。

本书适合怎样的读者呢？依我看，本书主要适合于研究生（作为一学期的课程）和研究者。第 1 和 2 部分的一部分也可以作为本科课程的教学内容。这本书的应用精选部分也可能对执业工程师有用。

最后，我希望本书能够取得成功，同时也希望它能够迅速被专业团队欣然接受和认可。

**Dr. Bimal K. Bose**

**IEEE Life Fellow**

电力电子学科“康德拉杰出讲座”教授

电气工程与计算机科学系

田纳西大学

诺克斯维尔，田纳西州

# 原 书 前 言

电力电子和电气传动是跨学科的，主要包括以下专业知识领域：电机学、电路理论、控制理论、信号处理系统、电子学、电磁场、数值分析、固态物理学和发电厂。

这些学科最近的一个发展趋势是人工智能（AI）工具的应用，如专家系统（Expert System, ES）、人工神经网络（Artificial Neural Network, ANN）、模糊逻辑系统（Fuzzy Logic System, FLS）、遗传算法（Genetic Algorithms, GA），甚至多智能体系统（Multi-Agent System, MAS）。这些工具被证实可以提升这些系统在现实世界中的表现，工业应用得益于如自学习、自组织和自适应的技术。

在电力电子与电力传动应用中，人工神经网络能用于对非线性函数的近似模拟，也能用于控制和识别如多层感知器（Multilayer Perception, MLP）或径向基函数（Radical Basis Function, RBF）。最近另一种被应用的神经元是线性神经元，并得到了意外的好结果。

另外，空间矢量法补充和完善了线性神经网络的理论，从而在理论和实践上提升了电力电子和电力传动的经典方法。本书目标：在空间矢量法的基础上，系统地展现对电力电子驱动和电力变流器进行识别和控制的经典理论，以及线性神经网络对该理论的补充与改进。

本书可以分为4个部分：

第1部分具体分析电压源型逆变器（Voltage Source Inverter, VSI）及其控制；

第2部分讨论交流电力驱动控制，特别是感应永磁同步电动机的驱动；

第3部分介绍关于线性神经网络的理论；

第4部分具体分析线性神经网络在电力传动和电能质量方面的应用。

## 概论

第1章介绍适量空间法和瞬时功率的理论。该章是理解本书其余章节的基础。

第2章描述电压源型逆变器（VSI）的开环和闭环控制。描述开环

技术的同时，解释了不同类型的 PWM 控制策略；描述闭环技术的同时，解释了 VSI 的电流和功率控制，同时也介绍了电压定向控制（VOC）和直接功率控制（Direct Power Control, DPC）。

第 3 章解释了电能质量的基础；研究了并联有源滤波器（Parallel Active Filter, PAF）和串联有源滤波器（Series Active Filter, SAF）的运行方式和控制策略。也介绍了无源谐波滤波器。

第 4 章讨论了感应电动机（Induction Machine, IM）静态和动态的空间矢量模型。介绍了包括饱和效应的感应电动机的动态模型。最后，描述了包括受转子槽和定子槽影响的感应电动机的空间矢量动态模型。

第 5 章，首先描述了外加电压电流驱动的感应电动机的标量控制策略。然后引出了磁场定向控制（Field Oriented Control, FOC）策略，和转子、定子与及磁化磁链定向的参数。也介绍了相关的磁通模型。最后，介绍了直接转矩控制（Direct Torque Control, DTC）策略，特别是经典的开关表（Switching Table, ST）DTC、空间矢量调制（Space Vector Modulation, SVM）DTC 和电磁兼容性。所谓的直接自控制（Direct Self - Control, DSC）也有所介绍。

第 6 章包含了感应电动机驱动对无速度传感器的控制，特别涉及基于模型的和基于各向异性的技术。介绍了以下基于模型的估计器和观测器：开环加速估计器、模型参考适应系统（Model Reference Adaption System, MRAS）、全阶龙伯格（Luenberger）适应观测器（Full Order Luenberger Adaptive Observer, FOLO）、全阶滑模观测器、降阶适应观测器（Reduced Order Adaptive Observer, ROO）和广义的卡尔曼滤波器。关于各向异性的技术，介绍了以下的思想方法：载波相关技术、脉动载波技术和高频激励技术。

第 7 章介绍了永磁同步电动机（Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM）空间矢量模型，以及外加电压和电流的磁场定向控制。介绍了最大电磁转矩出力或驱动效率不同的控制策略。同样介绍了 PMSM 的 DTC。最后，介绍了基于各向异性性和基于模型的无速度传感器技术。

第 8 章解释了线性神经网络理论，特别是 EXIN 神经家族。从自适应线性神经元（Adaptive Linear Neuron, ADALINE）开始，介绍了更多近代的线性神经网络：TLS EXIN 神经元、Ge - TLS EXIN 神经元、MCA EXIN 神经元和 MCA EXIN + 神经元。

第9章首先介绍了经典磁通模型的感应电动机驱动对于参数变化的敏感性分析。然后介绍了一些用最小二乘法 (Least Squares, LS) 的感应电动机在线参数估计技术, 包括强迫和非强迫估计。最后, 介绍了感应电动机的中枢起动。

第10章介绍了神经适应滤波器对于分布式发电 (Distributed Generation, DG) 和有源滤波器的应用。介绍了自适应线性神经元关于工频谐波负载电流补偿器设计的设计标准, 包括整个系统的稳定性问题。展现了中间步骤的实验证明与经典步骤的对比。

第11章讲述的是把以LS为基础的技术应用于IM的速度估计的内容。特别地, 以下面的一些神经观测器作为例子讨论: MCA EXIN + MRAS 观测器和 TLS EXIN 全阶 Luenberger 适应观测器。

本书的编排方法: 每个章节开始会有一个理论背景描述, 接着会有一系列实验仿真结果来验证理论分析。笔者认为大量实验结果有助于读者更加理解本书的理论部分。

### 怎么使用本书

本书可以应用在很多方面, 这取决于读者的知识背景。建议电力电子和电机驱动课程的本科生学习第1、2、4、5、7章, 学时为一个学期。硕士生和博士生应该把第3章和第6章也学完。研究方向涵盖人工神经网络和电力电子驱动的学者会在第9~11章里发现很多感兴趣的内容。理论学者在本书的第8章会看到一个对线性神经网络的知识点的全面论述。

图1表示的是阅读此书的一些章节指导。第1章讲述的是学习全书的基本方法, 我们应该从这里开始。学习电力电子技术的读者可以阅读第2、3、10章。学习无速度传感器的读者需要阅读的章节包括第4~6章和第11章 (电动机学的内容), 或者第2、5、6、11章 (电力变流器的内容)。学习永磁同步电动机驱动器的读者需学习第2章和第7章 (或者直接学习第7章)。学习即时识别技术的读者可以参看第4章和第9章。最后, 学习人工神经网络的读者学习第8~11章。

说明:

电力电子技术: 第2章—第3章—第10章

IM 驱动器 (电动机): 第4章—第5章—第6章—第11章

IM 驱动器 (电力变流器): 第2章—第5章—第6章—第11章



# 目 录

译者序	技术	34
原书序	2.2.5 优化的开环 PWM	36
原书前言	2.2.6 开环 PWM 技术的实验验证	37
<b>第 1 章 基本概念回顾：空间矢量分析</b>	2.3 电压源型逆变器的闭环控制	44
1.1 简介	2.3.1 闭环控制方式的分类	44
1.2 空间矢量的定义	2.3.2 从六脉冲整流器到有源整流器	53
1.3 3→2 和 2→3 转换	2.3.3 VSI 的电流控制	57
1.3.1 非功率不变形式 1	2.3.4 VSI 的功率控制	64
1.3.2 功率不变形式	符号列表	81
1.3.3 非功率不变形式 2	参考文献	82
1.4 坐标变换	延伸阅读	85
1.5 瞬时有功和无功功率	<b>第 3 章 电能质量</b>	86
参考文献	3.1 非线性负载	86
	3.1.1 谐波源的电流源类型（谐波电流源）	86
	3.1.2 谐波源的电压源类型（谐波电压源）	86
	3.2 配电网谐波的传播	88
	3.3 无源滤波器	91
	3.4 有源电力滤波器	93
	3.4.1 有源电力滤波器简介	93
	3.4.2 并联和串联滤波器的基本操作问题	95
	3.4.3 并联型有源滤波器	95
	3.4.4 串联型有源滤波器	104
	3.4.5 PAF 和 SAF 的比较	108
	3.4.6 混合型有源滤波器	109
	符号列表	116
	参考文献	117
<b>第 1 部分 电力变流器</b>		
<b>第 2 章 电压源型逆变器的脉宽调制</b>		14
2.1 电压源型逆变器的基本原理		14
2.1.1 电流谐波		16
2.1.2 谐波频谱		17
2.1.3 最大调制指数		18
2.1.4 转矩谐波		18
2.1.5 开关频率和开关损耗		18
2.1.6 共模电压 (CMV)		19
2.2 开环 PWM		20
2.2.1 载波 PWM		21
2.2.2 无载波 PWM		32
2.2.3 超调制		33
2.2.4 共模输出最小化的 SV - PWM		

## 第 2 部分 电气传动

## 第 4 章 感应电动机的动态和静态

模型	120
4.1 简介	120
4.2 电动机空间矢量的定义	120
4.3 感应电动机的相电压方程	124
4.4 定子坐标系下的空间矢量方程	125
4.5 转子坐标系下的空间矢量方程	126
4.6 广义坐标系下的空间矢量方程	126
4.6.1 交互磁耦合电路	128
4.6.2 转子磁链坐标系下的空间矢量方程	129
4.6.3 定子磁链坐标系下的空间矢量方程	132
4.6.4 励磁磁链坐标系下的空间矢量方程	134
4.7 磁饱和条件下感应电动机的动态数学模型	135
4.8 感应电动机的稳态空间矢量模型	138
4.9 感应电动机空间矢量模型的实验验证	142
4.10 考虑槽影响的感应电动机模型	146
4.10.1 含定子和转子槽影响的感应电动机空间矢量模型	148
4.10.2 含转子槽影响的感应电动机空间矢量状态模型	150
4.10.3 含转子槽影响的感应电动机空间状态模型	152
4.10.4 含定子和转子槽影响的感应电动机空间状态模型	153
4.10.5 考虑定子和转子槽影响的空间矢量模型的实验验证	155

符号列表	163
参考文献	164

## 第 5 章 感应电动机驱动控制技术

5.1 感应电动机控制技术简介	166
5.2 感应电动机的标量控制	167
5.2.1 电压激励的标量控制	167
5.2.2 电流激励的标量控制	174
5.3 感应电动机的磁场定向控制	175
5.3.1 磁场定向矢量控制的原理	175
5.3.2 转子磁通定向控制	176
5.3.3 转子磁链的获取	178
5.3.4 定子磁通定向控制	191
5.3.5 磁化磁通定向控制	197
5.4 感应电动机的直接转矩控制	202
5.4.1 感应电动机中电磁转矩的产生	202
5.4.2 定子磁链空间矢量与逆变器配置的关系	203
5.4.3 电压空间矢量和控制方案的选择标准	204
5.4.4 定子磁通与电磁转矩的估计	206
5.4.5 DTC 方案	209
5.4.6 DTC EMC	211
5.4.7 经典 DTC 和 DTC EMC 实验结果	214
5.4.8 DTC - SVM	217
5.4.9 DTC - SVM 驱动的实验结果	219
5.4.10 直接自动控制	219
5.4.11 FOC 和 DTC 的比较	223
符号列表	224
参考文献	225

## 第 6 章 感应电动机驱动的无速度

## 传感器控制技术 ..... 227

6.1 无速度传感器控制技术简介 ..... 227

6.2 基于模型的无速度传感器  
控制技术 ..... 2276.3 基于各向异性的无速度传感  
器控制技术 ..... 2286.4 基于模型的无速度传感器  
控制技术 ..... 229

6.4.1 开环积分 ..... 229

6.4.2 逆变器的非线性 ..... 234

6.4.3 电动机参数不匹配 ..... 235

6.4.4 估计器和观测器 ..... 238

6.4.5 开环速度估计器 ..... 239

6.4.6 模型参考自适应系统 ..... 242

6.4.7 全阶 Luenberger 自适应  
观测器 ..... 246

6.4.8 全阶滑模观测器 ..... 252

6.4.9 降阶自适应观测器 ..... 253

6.4.10 扩展卡尔曼滤波器 ..... 257

6.5 各向异性的无速度传感器  
技术 ..... 258

6.5.1 旋转载波技术 ..... 258

6.5.2 基于有限元的旋转载波下感  
应电动机凸极的分析 ..... 262

6.5.3 脉动载波技术 ..... 268

6.5.4 高频激励技术 ..... 269

6.6 驱动感应电动机无速度传感器  
技术的总结 ..... 274

参考文献 ..... 275

## 第 7 章 永磁同步电动机驱动 ..... 278

7.1 简介 ..... 278

7.1.1 直流无刷电动机 ..... 278

7.1.2 交流无刷电动机 ..... 279

7.1.3 永磁体 ..... 280

7.2 永磁同步电动机的空间矢量

模型 ..... 282

7.3 永磁同步电动机驱动器的  
控制策略 ..... 2877.3.1 永磁同步电动机驱动器的磁  
场定向控制 ..... 287

7.3.2 转矩控制的驱动器 ..... 289

7.3.3 转速控制的驱动器 ..... 295

7.3.4 直接转矩控制 ..... 297

7.4 永磁同步电动机驱动器的无速度  
传感器控制技术 ..... 3027.4.1 基于各向异性的无速度  
传感器技术 ..... 3027.4.2 基于模型的无速度  
传感器技术 ..... 315

参考文献 ..... 325

第 3 部分 基于神经网络  
的正交回归第 8 章 基于神经网络的正交  
回归 ..... 3288.1 ADALINE 和最小二乘问题  
简介 ..... 328

8.2 线性回归的方法 ..... 329

8.2.1 OLS 问题 ..... 329

8.2.2 DLS 问题 ..... 329

8.2.3 TLS 问题 ..... 329

8.3 最小主元分析和 MCA EXIN  
神经元 ..... 330

8.3.1 一些 MCA 的应用 ..... 330

8.3.2 神经网络方法 ..... 330

8.4 MCA EXIN 神经元 ..... 331

8.4.1 初始过渡过程的收敛性 ..... 331

8.4.2 MCA 神经元的动态特性 ..... 332

8.4.3 动态稳定性和学习率 ..... 334

8.4.4 数值计算的考虑 ..... 335

8.4.5 加速技术 ..... 337

8.4.6 仿真 ..... 337

8.4.7	MCA 神经元的总结和展望 .....	342
8.5	TLS EXIN 神经元 .....	342
8.5.1	稳定性分析 (几何方法) .....	344
8.5.2	收敛域 .....	345
8.5.3	非泛型 TLS 问题 .....	348
8.6	线性最小二乘问题的泛化 .....	351
8.7	GeMCA EXIN 神经元 .....	352
8.7.1	GeMCA EXIN 误差函数临界点的定性分析 .....	353
8.7.2	GeTLS 误差函数的分析 (几何方法) .....	354
8.7.3	临界图: 中心轨迹 .....	354
8.8	GeTLS EXIN 神经元 .....	356
8.8.1	GeTLS 的收敛域 .....	357
8.8.2	规划 .....	357
8.8.3	加速后的 MCA EXIN 神经元 (MCA EXIN +) .....	359
参考文献	.....	361

## 第 4 部分 应用精选

第 9 章	电动机的最小二乘法和神经网络辨识 .....	366
9.1	感应电动机的参数估计 .....	366
9.2	磁通模型对参数变化的敏感度 .....	367
9.2.1	电流磁通模型的敏感度 .....	367
9.2.2	电压磁通模型的敏感度 .....	373
9.3	磁通模型失准对控制性能影响的实验分析 .....	378
9.4	电动机参数变化的在线跟踪方法 .....	379
9.5	使用普通最小二乘法的感应电动机参数的在线估计 .....	380
9.5.1	在普通参考坐标系下的空间矢量电压方程 .....	380
9.5.2	磁化曲线估计 .....	384

9.5.3	普通最小二乘法辨识 .....	385
9.5.4	RLS 算法 .....	385
9.5.5	信号处理系统 .....	388
9.5.6	应用实验的测试装置说明 .....	391
9.5.7	仿真与实验结果 .....	392
9.6	在饱和与非饱和条件下的有约束条件的最小化感应电动机参数估计方法 .....	395
9.6.1	有约束条件的最小化第一方法 .....	396
9.6.2	有约束条件的最小化第二方法 .....	401
9.7	使用总体最小二乘法的感应电动机的参数估计 .....	412
9.8	在 FOC 和 DTC IM 驱动器中应用基于 RLS 的参数估计方法对磁通模型进行适应 .....	421
9.9	静止状态 IM 参数的估计 .....	425
符号列表	.....	429
参考文献	.....	430

第 10 章	带 APF 能力的神经网络增强型单相 DG 系统 .....	437
10.1	简介 .....	437
10.2	基本工作原理 .....	438
10.3	ADALINE 设计规则 .....	439
10.3.1	陷波器运行 .....	441
10.3.2	带通运行 .....	442
10.3.3	MATLAB® - Simulink® 中的实现 .....	444
10.3.4	与传统数字滤波器的比较 .....	444
10.3.5	NN 带通滤波器与 PLL: 理论上的比较 .....	445
10.4	电流参考值的生成 .....	447
10.5	多谐振电流控制器 .....	447
10.6	稳定性问题 .....	449

10.7 试验台 .....	453	测器 .....	480
10.8 实验结果 .....	454	11.3.3 改进的欧拉神经网络自 适应模型 .....	491
10.8.1 APF 接入 .....	454	11.3.4 MCA EXIN + MRAS 观 测器 .....	496
10.8.2 功率参考值接入 .....	457	11.4 TLS EXIN 全阶 Luenberger 自适应观测器 .....	498
10.8.3 负载波动 .....	459	11.4.1 IM 的状态空间模型 .....	499
10.8.4 NN 滤波器与锁相环的 对比 .....	461	11.4.2 自适应转速观测器 .....	499
10.8.5 NN 滤波器与 $p-q$ 理论的 对比 .....	462	11.4.3 基于 TLS 的转速估计 .....	499
10.8.6 与国际标准的对比 .....	463	11.4.4 TLS EXIN 全阶自适应观测器 的稳定性 .....	502
10.9 APF 接入步骤 .....	465	11.4.5 TLS EXIN 全阶 Luenberger 自适应观测器的实验 结果 .....	505
参考文献 .....	466	11.4.6 实验对比测试 .....	515
<b>第 11 章 交流驱动器的神经网络无 位置传感器控制 .....</b>	<b>468</b>	11.5 MCA EXIN + 降阶观测器 .....	518
11.1 基于 NN 的无位置传感器 控制 .....	468	11.5.1 降阶观测器方程 .....	518
11.2 基于 BPN 的 MRAS 转速观 测器 .....	469	11.5.2 基于 MCA EXIN + 的转速 估计 .....	519
11.2.1 BPN MRAS 观测器的 在线训练 .....	471	11.5.3 观测器增益矩阵的选择 建议 .....	520
11.2.2 BPN MRAS 观测器的 实现 .....	472	11.5.4 计算的复杂度 .....	521
11.2.3 BPN MRAS 观测器的 实验结果 .....	472	11.5.5 MCA EXIN + 降阶自适应观 测器的实验结果 .....	522
11.3 基于 LS 的 MRAS 转速观 测器 .....	474	附录 A 控制的实现方案 .....	526
11.3.1 OLS MRAS 观测器的 实验结果 .....	475	附录 B 测试装置说明 .....	531
11.3.2 TLS EXIN MRAS 观 测器 .....	480	符号列表 .....	534
		参考文献 .....	535