

本书仅提供部分阅读，如需完整版，请联系QQ: 2011705918

提供各种IT类, 其它类书籍pdf下载，如有需要，请QQ:2011705918

注：链接至淘宝，整理那么多资料也不容易，请多多见谅！非诚勿扰！

[点击购买完整版](#)



国际电气工程先进技术译丛

CRC Press
Taylor & Francis Group

永磁无刷电机 及其驱动技术

Permanent Magnet Synchronous and
Brushless DC Motor Drives

(美) R. Krishnan 著

柴凤 等译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际电气工程先进技术译丛

传播国际最新技术成果 搭建电气工程技术平台

- 《永磁无刷电机及其驱动技术》
- 《先进电气驱动的分析、建模与控制》
- 《智能电网可再生能源系统设计》
- 《风力发电工程指南》
- 《用于制造固体氧化物燃料电池的钙钛矿型氧化物》
- 《太阳能物理》
- 《光伏与风力发电系统并网变换器》
- 《磁悬浮轴承——理论、设计及旋转机械应用》
- 《可再生能源系统——100%可再生能源解决方案的选择与模型》
- 《机电系统中的传感器与驱动器——设计与应用》
- 《碳捕获与封存》
- 《LED照明应用技术》
- 《零排放动力循环》
- 《柔性交流输电系统在电网中的建模与仿真》
- 《风电并网：联网与系统运行》
- 《可再生能源的转换、传输和储存》
- 《海底电力电缆——设计、安装、修复和环境影响》
- 《光伏技术与工程手册》
- 《风力发电的模拟与控制》
- 《风电场并网稳定性技术》
- 《智能电网中的电力电子技术》
- 《电接触理论、应用与技术》
- 《电磁屏蔽原理与应用》
- 《高效可再生分布式发电系统》
- 《电网保护》
- 《分布式发电——感应和永磁发电机》
- 《电力系统谐波》
- 《风能与太阳能发电系统——设计、分析与运行》（原书第2版）
- 《瞬时功率理论及其在电力调节中的应用》
- 《风力机控制系统原理、建模及增益调度设计》
- 《高压输配电设备实用手册》
- 《电力变流器电路》
- 《电力系统中的电磁兼容》
- 《超高压交流输电工程》（原书第3版）
- 《高压直流输电与柔性交流输电控制装置——静止换流器在电力系统中的应用》
- 《电磁兼容原理与应用》（原书第2版）
- 《电力电子技术手册》
- 《基于晶闸管的柔性交流输电控制装置》
- 《电力电容器》
- 《电力系统谐波——基本原理、分析方法和滤波器设计附习题解答》
- 《配电可靠性与电能质量》
- 《现代电动汽车、混合动力电动汽车和燃料电池车——基本原理、理论和设计》（原书第2版）



国际电气工程先进技术译丛

永磁无刷电机及其驱动技术

(美) R. Krishnan 著

柴 凤 裴宇龙 于艳君
陈 磊 程丹松 倪荣刚 包敬超 译

机械工业出版社

本书共分14章,全面阐述了现代永磁交流电机系统的设计及驱动控制思想。本书从永磁材料的基本特性讲起,详细介绍了永磁交流电机的常规结构和近年来兴起的特殊结构及其设计分析方法;对正弦波永磁同步电机和方波无刷直流电机的驱动控制策略都进行了详尽描述,总结了功率器件的开关特性和损耗,整流器及逆变器的拓扑;并且从控制器的成本和可靠性的角度给予了具体设计指导。

本书构思继承了国外高水平著作的一贯特色,内容由浅入深,理论翔实,分析透彻,并且引用大量高水平参考文献,能够最大程度地反映近20年国际上永磁交流电机的发展和最新成果。

本书适宜于从事电机及其控制、电力电子技术和机电一体化的工程技术人员阅读,也可作为大专院校相关教师、研究生和高年级本科学生的参考书。

Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives/by R. Krishnan /ISBN: 978-0-8247-5384-9

Authorized translation from English language edition published by CRC Press, part of Taylor & Francis Group LLC; All rights reserved.

China machine Press is authorized to publish and distribute exclusively the Chinese (Simplified Characters) language edition. No part of the publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

本书中文简体翻译版授权由机械工业出版社独家出版,未经出版者书面许可,不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

本书版权登记号:图字01-2010-3604号。

图书在版编目(CIP)数据

永磁无刷电机及其驱动技术/(美)克里斯南(Krishnan, R.)著;柴凤等译. —北京:机械工业出版社,2012.11

(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文:Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives
ISBN 978-7-111-40054-7

I. ①永… II. ①克…②柴… III. ①永磁电动机-无刷电机-电力传动 IV. ①TM345

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第243031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:刘星宁 责任编辑:刘星宁

版式设计:霍永明 责任校对:申春香

封面设计:马精明 责任印制:杨曦

北京中兴印刷有限公司印刷

2013年1月第1版第1次印刷

169mm×239mm·31.25印张·642千字

0 001—3 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-40054-7

定价:118.00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

社服中心:(010)88361066

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203

封面无防伪标均为盗版

译者序

由于稀土钕铁硼永磁材料的问世,使得永磁电机成为高功率密度和高效率电机的代表。永磁电机结构简单,控制灵活,转子形式多样易于实现最优化设计,因此在过去的20年,围绕永磁电机的本体设计,控制算法的研究、开发和应用一直是业界和高校师生关注的热点。在21世纪迈入的第二个10年里,永磁电机已经不可避免地在许多高精度应用场合取代了传统交流感应电机。唯一的制约因素就是其略高的电机和控制器制造成本。近年来,人们也在考虑如何采用新的电能变换器拓扑结构来降低驱动器的成本。已有的关于永磁交流电机传动方面的书籍主要集中在介绍电机本体设计方法,同时涵盖一些与之相匹配的基本控制变流装置。因此,出版一本专门阐述永磁交流电机,并着重讨论其控制器及低成本变流装置拓扑结构的图书就显得十分必要。

本书作者 R. Krishnan 是美国弗吉尼亚州弗吉尼亚理工大学的电气与计算机工程系的教授,同时他也担任快速传输系统研究中心(CRTS)主任,该中心是全世界直线和旋转电机驱动领域的专业研究中心。

R. Krishnan 教授在电机和工业电子应用领域具有非常高的知名度。他的论文多次获得过 IEEE 工业应用协会的最佳论文,他的专著《电机驱动》(Electric Motor Drives)一书,在多个国家出版发行,销量非常大,成为电机驱动领域科研工作者的必备书籍。本书延续了他著作的一贯特色,内容由浅入深,理论翔实,分析透彻,并且引用大量高水平参考文献,能够最大程度地反映近20年国际上永磁交流电机的发展和最新成果,非常值得深入研究和体会。

本书共分为三部分,第一部分讲述电机的基本原理、逆变器及其控制(第1、2章);第二部分和第三部分分别阐述永磁同步电机(第3~8章)和无刷直流电机驱动(第9~14章)。

本书的主要翻译工作由哈尔滨工业大学柴凤教授统稿,柴凤教授、博士生倪荣刚和包敬超负责本书的第一部分翻译工作,裴宇龙博士和于艳君博士负责本书的第二部分翻译工作,陈磊博士和程丹松博士负责本书的第三部分翻译工作。顾磊同学协助整理文稿。

译者所在的科研小组从事永磁电机研究多年,对国内外永磁电机的研究进展非常关注,也一直有将国外的研究成果引入国内的愿望。感谢机械工业出版社给了译者一次翻译国外高水平著作的机会,使我们能在进行该项翻译工作的同时,对永磁交流电机驱动和控制技术有了更加深刻的认知。也希望我们的工作能给国内的科技

IV 永磁无刷电机及其驱动技术

工作者带来方便，共同发展我国的高性能电机设计和控制技术。

由于译者学识和能力有限，书中翻译内容难免会出现不能准确反映作者思想之处，敬请有关专家和读者给予批评指正。

译者

2012年9月20日

前 言

已有的关于永磁 (PM) 交流电机传动方面的书籍主要集中在介绍电机本体设计方法, 同时涵盖一些与之相匹配的基本控制变流装置。在过去 20 年间, 对于控制算法的研究、开发及其应用的文献在杂志和各类会议中逐渐涌现。如今, 由这些杂志和会议论文集提供的资料足以整合成书, 以饕业界及高校读者。多年来, 作为电力电子技术在这些驱动系统中的应用, 三相桥式逆变器已成经典。但对其的理解和控制仍发生了巨大变化。成本最小化已成为当今批量化生产所关注的主要问题, 这就迫使人们重新考虑子系统的成本。由于控制器成本已根据其用途标准化, 显然如何降低变流装置和电机的成本就成了问题的关键。最近, 人们还考虑如何采用新的电能变换器拓扑结构来降低驱动系统的成本。这样, 能够出版一本专门阐述永磁交流电机, 并着重探讨其控制及低成本变流装置拓扑结构的图书就显得十分必要。以此为出发点, 本书已构思多年。书中内容曾广泛用于弗吉尼亚理工大学的博士生教学, 并得到丹麦奥尔堡大学、美国及其他国家的业界读者的肯定。

本书分为三部分, 第一部分讲述电机的基本原理、电力设备、逆变器及其控制 (第 1~2 章); 第二部分和第三部分分别阐述永磁同步电机 (第 3~8 章) 和无刷直流电机驱动 (第 9~14 章)。

要了解永磁交流电机的驱动, 必须从这类电机的基础知识开始进行。第 1 章主要介绍了永磁材料的特性及其工作点, 介绍了永磁同步电机转子结构, 永磁同步电机与无刷直流电机的区别, 绕组, 齿部、轭部磁通密度分布, 电机相关尺寸的表达式, 输出转矩、功率与永磁体及定子励磁的关系, 电感等相关的基本知识, 而后介绍了铁心损耗的计算与测量方法以便建立电机的模型及控制策略。由于正弦波永磁同步电机无论在运行原理、控制及功能上都比方波永磁同步电机更接近其他的交流电机, 因此以介绍正弦波永磁同步电机为主。同时既向读者介绍了永磁体位于转子上不同磁路结构的传统永磁电机, 又介绍了新结构的永磁电机, 如永磁体位于定子上的特殊结构电机以及 Halbach 阵列布置的电机等。

第 2 章简要介绍了功率器件和它们的开关特性与损耗, 整流器及逆变器。逆变器主要介绍了其模型、开关方案及其优缺点。同时介绍了四象限运行常用的学术用语及其在永磁交流电机中的应用。

第 3 章系统地介绍了转子 dq 轴坐标系和空间矢量变换下的永磁同步电机的动态模型。本章忽略了一些基本的推导过程, 认为读者对基本的电路定理和简单的坐标投影关系有所了解。本章数学模型的建立和分析通过 MATLAB 软件进行。永磁同步电机的动态模型在随后的研究中还会用到。

永磁同步电机最基本的控制方式是矢量控制,这需要对电机的转矩和磁通进行解耦。诸多种需要实现的控制特性,如功率角、功率因数、恒磁链、最大单位电流转矩、功率和磁通的相位角、恒功率损耗以及最大效率都需要通过矢量控制器得以实现,因此相应地出现了多种控制策略。所有的这些控制策略以及它们的特点在第4章中都进行了详细阐述。

弱磁控制是永磁同步电机控制中扩大转速范围的重要方法。第5章中详细介绍了许多弱磁控制的方法。重点介绍了六拍逆变器在弱磁状态下的运行,并且与其他基于参数和非参数模型的控制器中的弱磁控制方法进行了比较。

比较并讨论了参数相同的表面式和内置式永磁电机在弱磁控制和恒功率区域运行时的特性。

为了实现转矩控制,驱动电路中设置有不变的内置电流环,因此在控制器的设计中,电流控制器的设计是极为必要的。电流控制器的设计可以从传递函数中推导得到,传递函数可以用框图还原法获得。这种方法建立起了自励直流电机和永磁同步电机驱动之间的相似性,使读者更易理解。速度控制由外部的速度反馈环实现。速度控制器的设计方法可以通过对称最优法得到。第6章通过一个例子具体讲述了控制器的设计过程。

几乎所有的控制策略都依赖于电机参数的给定,电机中的定子电阻和转子磁链的敏感性都受到温度的影响,而 q 轴电感则受到饱和度的影响,第7章分析了这些因素对永磁同步电机驱动性能造成的影响,并给出了消除这些影响的方法。

转子位置信息在永磁同步电机的控制中十分重要。从控制器的成本和可靠性的角度来看,无位置传感器控制方法的研究是很有意义的。第8章介绍了一些无位置传感器的控制方法。

第9~14章讲述永磁无刷直流电机驱动的相关内容。第9章详尽阐述了驱动系统的模型及仿真,并介绍了一种广泛应用的控制策略。

第10章研究了换相转矩脉动及其计算的重要问题。利用傅里叶级数分析了转矩产生的机理,利用该机理介绍了电机的弱磁方法。

半波逆变器拓扑结构是低成本、高性能、大容量设备的首要选择,第11章分析了4种用于永磁无刷直流电机驱动系统的半波逆变器拓扑结构。

利用与永磁同步电机驱动系统相似的分析方法,第12章详细分析了电流和转速控制器的设计方法。第13章探讨了永磁无刷直流电机的无电流传感器及无位置传感器控制的各种方法。第14章概述了驱动系统中转矩平滑、参数敏感性等相关问题。

本书为电气工程专业的工程技术人员编写。本书的内容也应用于弗吉尼亚理工大学电子与通信工程系一学期电机驱动领域的高级课程教学。

致 谢

在此，我非常感谢下列组织机构允许我在本书中引用它们出版的如下资料。

(1) 普伦蒂斯·霍尔 (Prentice Hall) 出版社，上鞍河 (Upper Saddle River) 出版社，新泽西 (New Jersey) 出版社，允许使用它们出版的图书：

R. Krishnan, 《电机驱动》，2001 年。尤其是书中第 9 章的材料分布在本书的许多章节，被引用。

(2) IEEE 允许使用我作为作者或合作者共同撰写的下列论文：

1) R. Krishnan, Control and operation of PM synchronous motor drives in the field – weakening region, *IEEE IES, IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, pp. 745 – 750, 1993.

2) R. Krishnan and P. Vijayraghavan, Parameter compensation of Permanent magnet synchronous machines through airgap power feedback, *IEEE IES, IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, pp. 411 – 416, 1995.

3) R. Krishnan, S. Lee, and R. Monajemy, Modeling, dynamic simulation and analysis of a C – dump brushless dc motor drive, *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Conference Proceedings (Cat. No. 96 CH35871)*, pp. 745 – 750, 1996.

4) R. Krishnan, Novel single – switch – per – phase converter topology for four – quadrant PM brushless dc motor drive, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 33 (5), pp. 1154 – 1161, 1997.

5) R. Krishnan and S. Lee, PM brushless dc motor drive with a new power – converter topology, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 33 (4), pp. 973 – 982, 1997.

6) R. Krishnan and P. Vijayraghavan, New power converter topology for PM brushless dc motor drives, *IEEE IE, IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, pp. 709 – 714, 1998.

7) R. Krishnan and P. Vijayraghavan, Fast estimation and compensation of rotor flux linkage in permanent magnet synchronous machines, *IEEE IES International Symposium on Industrial Electronics*, vol. 2, pp. 661 – 666, 1999.

8) B. S. Lee and R. Krishnan, A variable voltage converter topology for permanent – magnet brushless dc motor drives using buck – boost front – end power stage, *Proceedings*

of the *IEEE International Symposium on Industrial Electronics* (Cat. No. 99 TH8465), pp. 689 – 694, 1999.

9) R. Monajemy and R. Krishnan, Performance comparison for six – step voltage and constant back EMF control strategies for PMSM, *Conference Record, IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, vol. 1, pp. 165 – 172, 1999.

10) R. Monajemy and R. Krishnan, Control and dynamics of constant – power – loss – based operation of permanent – magnet synchronous motor drive system, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 48 (4), pp. 839 – 844, 2001.

11) K. Sitapati and R. Krishnan, Performance comparisons of radial and axial field, permanent – magnet, brushless machines, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 37 (5), pp. 1219 – 1226, 2001.

作者简介

克里斯南·拉姆 (R. Krishnan) 是《电机驱动》(Electric Motor Drives) 一书的作者。这本书在 2001 年 2 月由普伦蒂斯·霍尔 (Prentice Hall) 出版社出版发行; 此书的中文译本和印度地区版本在 2002 年分别由中国台湾培生教育 (Pearson Education) 出版社和印度普伦蒂斯·霍尔出版社出版发行, 该书的国际版本在 2001 年由普伦蒂斯·霍尔出版社出版发行。他也是《开关磁阻电机驱动》(Switched Reluctance Motor Drives) (CRC 出版社, 2001 年 6 月, 第 1 版; 2003 年, 第 2 版) 一书的作者以及《电力电子控制》(Control in Power Electronics) (科学出版社, 2002 年 8 月) 一书的合编者和合著者。

Krishnan 被授予 7 项美国专利, 并且好多项仍在向美国、欧洲以及其他国家申请当中。他的发明登上过各大媒体的重要版面, 包括广播、电视以及像华尔街日报这样的报纸媒体。至今为止, 他做过 18 家美国公司的企业顾问。他也曾为工业界和学术界讲授过许多关于矢量控制的感应电机, 永磁同步电机和无刷直流电机, 开关磁阻电机, 以及直线电机等电机的驱动系统的课程。

Krishnan 曾获得过 IEEE 工业应用协会工业驱动委员会的最佳论文奖 (共 5 篇获奖论文) 和电机委员会的最佳论文奖 (共 1 篇获奖论文)。此外, 他的论文获得过 IEEE 工业应用汇刊一等奖以及 2007 年 IEEE 工业电子杂志最佳论文奖。由他合著的图书——《电力电子控制》(Control in Power Electronics), 获得过 2003 年波兰政府教育和体育部最佳图书奖。在 2003 年, 由于在工业电子学领域杰出的技术贡献, 他被授予 IEEE 工业电子协会尤金·米特尔曼 (Eugene Mittelmann) 博士成就奖。

Krishnan 是 IEEE 会士、IEEE 工业电子协会的杰出讲师。他被推选为 IEEE 工业电子协会管理委员会的高级会员, 在 2002 ~ 2005 年期间担任审稿委员会副主席。他担任了在弗吉尼亚州罗诺克市召开的 2003 年 IEEE 工业电子学会议的大会主席, 以及在印度孟买召开的 2006 年 IEEE 工业技术会议的共同大会主席 (共 3 个)。他也在很多 IEEE 会议上做过大会主题演讲。

Krishnan 和他的学生们的发明为 3 个电机驱动公司的成立奠定了技术基石。他在 2002 年成立了帕纳菲斯技术有限责任公司 (Panaphase Technologies, LLC), 这家公司在 2007 年被合并收购, 随即他在 2008 年成立了拉姆股份有限公司 (Ramu Inc.), 专注于为家用电器、空调器、手持工具、风力发电以及汽车等应用场合做大容量电机调速驱动系统。他也是跨动力有限责任公司 (TransNetics, LLC) 的共

同创始人之一，这家公司专注于做直线电机驱动的知识产权业务。

Krishnan 是弗吉尼亚理工大学的电气与计算机工程系的教授，该学校坐落于美国弗吉尼亚州布莱克斯堡市。同时，他也担任快速传输系统研究中心（CRTS）的主任，该中心是全世界直线和旋转电机驱动领域的专业研究中心。

符 号 表

A	状态转移矩阵
a_c	电枢导体截面积, m^2
A_c	每极磁通截面积, m^2
A_g	气隙截面积, m^2
A_m	永磁体截面积, m
A_{sl}	定子线电流密度, Amp - conductor/m
B_1	摩擦系数, $N \cdot m / (rad/s)$
B_d	最大磁能密度的永磁体最佳工作点磁通密度, T
	直轴磁通密度, T
B_g	气隙磁通密度, T
B_i	内禀磁通密度, T
B_l	负载常数, $N \cdot m / (rad/s)$
B_m	永磁体工作点磁通密度, T
B_{ml}	磁通密度基波幅值, T
B_{mr}	磁通密度基波有效值, T
B_n	摩擦系数标么值, p. u.
B_0	无外部励磁永磁体励磁磁通密度, T
B_p	永磁体接近退磁曲线拐点处最大磁通密度, T
	铁心损耗部分中定子铁心冲片磁通密度幅值, T
B_{pk}	气隙磁通密度最大值, T
B_r	剩余磁通密度, T
B_{rr}	磁体回复线的剩磁, T
B_t	总摩擦系数, $N \cdot m / (rad/s)$
B_{tm}	齿磁通密度最大值, T
B_y	轭磁通密度, T
B_{ym}	轭(护铁)磁通密度最大值, T
b_y	定子轭部厚度, m
C_f	滤波电容, F
C_o	C - dump 电容的值, F
D	定子内孔直径或内径, m
d	占空比
d^r, d^r	转子坐标系下直轴和交轴
e	瞬时感应电动势, V

	在第 8 章中也表示平均电压相量, V
E	感应电动势有效值, V
	也表示 C - dump 电容两端电压, V
e_{as}	a 相瞬时感应电动势, V
E_{as}	a 相感应电动势有效值, V
e_{bs}	b 相瞬时感应电动势, V
e_{cs}	c 相瞬时感应电动势, V
e_{hd}, e_{hq}	直轴和交轴感应电动势非基波谐波分量, V
E_m	永磁体能量密度最大值, J/m ³
E_m	弱磁区感应电动势最大值, V
e_n	瞬时感应电动势标么值, p. u.
E_n	感应电动势有效值标么值, p. u.
E_p	感应电动势幅值, V
E_p	永磁无刷直流电机中定子相电压幅值, V
F, F^*	校正无功功率及其给定, VAR
F	电机中产生的力, N
F_{as}, F_{bs}, F_{cs}	a、b、c 相瞬时磁动势, AT
$f_{as}(\theta_r)$	以转子位置为变量的 a 相瞬时感应电动势函数
$f_{bs}(\theta_r)$	以转子位置为变量的 b 相瞬时感应电动势函数
f_c	控制频率或 PWM 载波频率, Hz
$f_{cs}(\theta_r)$	以转子位置为变量的 c 相瞬时感应电动势函数
F_d	电机中产生的单位面积的力, 压强, N/m ²
	也表示绕组每极直轴磁动势, AT
F_e	外部磁势源, AT
F_m	主极磁动势, AT
f_n	自然频率, Hz
f_s	供电电源频率或定子输入频率, Hz
F_s	定子每极合成磁动势幅值, AT
F_{sp}	安全工作定子每极磁动势幅值 (不使永磁体退磁), AT
f_{sn}	定子频率标么值, p. u.
f_r	旋转频率, Hz
g_d	气隙有效长度, m
g_d, g_q	直轴气隙有效长度和交轴气隙有效长度, m
h	半波整流电路拓扑中换相时平均占空比
H	惯性常数标么值, p. u.
H	磁场强度, A/m
H_c	电流互感器的增益, V/A
H_c	磁体的矫顽力或正常磁通密度下的矫顽力, A/m

H_{ch}	最大安全磁场强度, 不使磁体退磁, A/m
H_{ci}	永磁体的内禀矫顽力 (当内禀磁通密度为零时), A/m
H_{cl}	不使低级永磁体永久退磁的最大磁场强度, A/m
H_{cr}	对应于低级永磁体剩磁的虚拟矫顽力, A/m
H_{cs}	对应于低级永磁体回复线的剩磁的虚拟矫顽力, A/m
H_e	外部磁场强度, A/m
H_g	气隙磁场强度, A/m
H_m	主极磁场强度, A/m
H_o	没有外部励磁或空载时的主极磁场强度, A/m
H_p	不使永磁体退磁的磁场强度最大值, A/m
H_ω	速度滤波器的增益, V/(rad/s)
i_α, i_β	$\alpha\beta$ 坐标系下的电流, A
i_{abc}	三相电流矢量, A
i_{as}	定子 a 相瞬时电流, A
i_{asn}	定子 a 相瞬时电流标么值, p. u.
I_{avn}	电枢平均电流标么值, p. u.
I_b	两相系统中的电流基值或电流基值, A
I_{b3}	三相系统中电流基值, A
i_{bs}, i_{cs}	定子 b 相和 c 相瞬时电流, A
I_{cn}	n 次谐波电容电流, A
I_d	转子坐标系下流入动生电动势的稳态直轴电流, A
I_{dc}	稳态直流母线电流或逆变器输入电流, A
i_{ds}, i_{qs}	定子坐标系下定子直轴和交轴电流, A
i_{dsi}, i_{qsi}	定子坐标系下由注入的高频电压信号引起的定子直轴和交轴电流, A
i_{dsi}^s, i_{qsi}^s	定子坐标系下由注入的高频电压信号引起的定子直轴和交轴电流, A
i_{dsi}^r, i_{qsi}^r	转子坐标系下由注入的高频电压信号引起的定子直轴和交轴电流, A
I_f	稳态励磁电流或定子电流相量的励磁分量, A
i_f	瞬时励磁电流或瞬时定子电流相量的励磁分量, A
i_{hk}	谐波电流矢量, A
i_{ip}, i_{in}	由注入信号产生的正序电流和负序电流分量, A
I_{me}	每相等效磁体电流有效值, A
I_{mep}	每相等效磁体电流幅值, A
I_n	n 次谐波电流, A
i_o	定子零序电流, A
I_p	永磁无刷直流电机中定子相电流幅值, A
I_{ph}	基波相电流, A
I_{ps}	永磁同步电机中定子相电流幅值, A
I_q	转子坐标系下流入动生电动势的稳态交轴电流, A

$I_{\text{qc}}, I_{\text{dc}}$	定子中铁心损耗电流交轴和直轴分量, A
i_{qdo}	定子坐标系下交直轴电流矢量, A
i_{qdo}^r	转子坐标系下交直轴电流矢量, A
i_{qds}	定子坐标系下定子交直轴电流矢量, A
i_{qds}^r	转子坐标系下定子交直轴电流矢量, A
$I_{\text{qs}}, I_{\text{ds}}$	定子坐标系下稳态定子交轴和直轴电流, A
$I_{\text{qs}}^r, I_{\text{ds}}^r$	转子坐标系下稳态定子交轴和直轴电流, A
I_{s}	源电流, A
I_{sm}	最大安全定子电流, 不使磁体退磁, A 也表示在六步电压控制策略下基波定子电流相量, A
I_{sp}	定子相电流正弦波幅值, A
I_{sy}	同步电机相电流有效值, A
i_{T}	定子电流相量产生转矩分量, A
i_{f}^*	励磁电流给定, A
i_{T}	定子电流相量的转矩产生分量, A
i_{T}^*	定子电流相量转矩产生分量的给定, A
i_{s}^r	转子坐标系下定子电流相量, A
$i_{\text{sip}}^{\text{s}}, i_{\text{sin}}^{\text{s}}$	由注入信号引起的正序电流相量和负序电流相量, A
$i_{\text{as}}^*, i_{\text{bs}}^*, i_{\text{cs}}^*$	a、b、c 相电流给定, A
i_{xsn}^r	转子坐标系下电流, 下标 x 表示是交轴或者直轴, s 表示是定子, n 表示是标么值。没有 n 表示变量是以国际单位制为单位, A
J	总转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$
J_{c}	电枢导体中电流密度, A/m^2
J_{l}	负载转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$
J_{m}	电机转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$
k	漏磁系数
K_{b}	感应电动势常数, $\text{V}/(\text{rad}/\text{s})$
K_{c}	电流控制器的增益, V/A
k_{d}	基波绕组分布因数
k_{dn}	n 次谐波绕组分布因数
k_{e}	涡流损耗常数
k_{h}	磁滞损耗常数
K_{i}	电流环传递函数增益
K_{is}	速度控制器积分增益
k_{m}	永磁无刷直流电机中, 每相互感和自感的比值
k_{p}	基波绕组节距因数
k_{pn}	n 次谐波绕组节距因数
K_{i}	功率反馈控制中, PI 控制器的积分增益

K_p	功率反馈控制中, PI 控制器的比例增益
K_{ps}	速度控制器比例增益
K_r	逆变器增益, V/V
K_s	速度控制器增益
k_s	槽齿宽比
k_{sk}	斜槽因数
K_t	转矩常数, N · m/A
K_{vf}	定子相电压和频率比值, V/Hz
k_ω	基波绕组因数
K_ω	速度反馈滤波器增益, V/(rad/s)
$k_{\omega n}$	n 次谐波绕组因数
L	堆叠厚度, m
L, M	永磁无刷电机中, 定子自感和互感, H
L_a	永磁无刷电机中, 表示 $(L - M)$, H
L_{aa}	a 相绕组自感, H
L_{ab}	a 相和 b 相之间的互感, H
L_{ac}	a 相和 c 相之间的互感, H
L_b	电感基值, H
L_f	滤波电感, H
L_{ma}	每相励磁电感, H
l_c	定子绕组导体平均长度, m
l_g	气隙长度, m
l_m	永磁体长度, m
L_o	在 C-dump 拓扑中, 能量恢复斩波器中电感的值, H 也表示电机中零序电感, H
L_q, L_d	转子坐标系下定子交直轴自感, H
L_{dq}	交轴在直轴中的互感, H
L_{qd}	直轴在交轴中的互感, H
L_{ql}, L_{dl}	转子坐标系下定子交直轴漏电感, H
L_{qn}, L_{dn}	转子坐标系下定子交直轴自感标么值, p. u.
L_{qq}, L_{dd}	定子坐标系下定子绕组交轴自感和定子绕组直轴自感, H
L_s	电源输入电感, H
L_{xy}	绕组交直轴间互感, 下标 x 和 y 表示 d 轴或者 q 轴, H
m	调节比例, 也表示槽数和极数的比值
N_l	半波整流控制时, 每相匝数
N_{co}	每机械周期定位周期数
N_{ph}	每相有效匝数
n_r	转子转速, r/min

n_s	定子磁场转速或同步转速, r/min
N_{ep}	每极槽数 (在第 2 章里也表示以 r/min 为单位的转速)
o	以 o 为结尾的变量表示是其稳态工作点的值
p	微分算子, d/dt
P	极数
P_1	半波整流时的电磁功率, W
P_{1n}	主要的谐波铜损, W
P_a	电磁功率, W
P_{an}	电磁功率标么值, p. u.
P_{av}	平均输入功率, W
P_b	功率基值, W
P_c	电枢铜损, W
P_{cl}	半波整流时电机的铜损, W
P_{co}	铁心损耗, W
P_{cd}	铁心损耗密度 ($P_{\text{ed}} + P_{\text{hd}}$), W/单位质量
P_{ed}	涡流损耗密度, W/单位质量
P_{et}	磁通密度梯形波分布时的齿部涡流损耗, W
P_{ets}	磁通密度正弦波分布时的齿部涡流损耗, W
P_{ey}	磁通密度梯形波分布时的轭部涡流损耗, W
P_{eys}	磁通密度梯形波分布时的轭部涡流损耗, W
P_{eyn}	P_{ey} 和 P_{eys} 的比值
P_{hd}	磁滞损耗密度, W/单位质量
P_{hs}	定子磁滞损耗, W
P_i	输入功率, W
P_p	极对数
P_i	瞬时输入功率, W
P_l	总功率损耗, W
P_{lm}	功率损耗最大值, W
P_m	输出机械功率, W
P_o	输出功率, W
P_{on}	输出功率标么值, p. u.
P_{sc}	三相电机定子铜损, W 也表示晶体管导通损耗, W
P_{scn}	三相电机定子铜损标么值, p. u.
P_{sw}	器件的开关损耗, W
P_{VA}	视在功率, VA
P_a^*	电磁功率参考值, W
q	每极每相槽数

Q, Q_i	无功功率, VAR
Q_f	滤波后的无功功率, VAR
Q_n, Q_{fn}	无功功率标么值和滤波后的无功功率标么值, p. u.
r	定子内径, m
R_l	半波整流时定子每相电阻, Ω
R_a	永磁无刷直流电机中每相电阻的两倍, Ω
R_c	铁心损耗电阻, Ω
R_d, R_q	定子绕组直轴和交轴电阻, Ω
R_s	定子每相电阻, Ω
R_{sn}	定子每相电阻标么值, p. u.
s	拉普拉斯运算符
S	定子槽数
S_a, S_b, S_c	逆变器 a、b、c 相器件开关状态
T	载波周期, s 也表示定子每相绕组有效匝数
t	时间, s
t_d	逆变器死区时间, s
t_l	齿磁通密度从零上升到最大值所需时间, s
t_y	轭磁通密度从零上升到最大值所需时间, s
T_1, T_2	电机电气时间常数, s
T_{abc}	转子坐标系下从 abc 变量到 dqo 变量的变换矩阵
T_{av}	平均转矩, $N \cdot m$
T_b	转矩基值, $N \cdot m$
T_c	电流控制器的时间常数, s
T_{co}	以傅里叶级数表示的一周期内的齿槽转矩, $N \cdot m$
T_e	电磁转矩, $N \cdot m$
T_{ec}	解析计算的齿槽转矩, $N \cdot m$
T_{el}	基波电磁转矩, $N \cdot m$
T_{e6}	6 次谐波电磁转矩, $N \cdot m$
T_{e6n}	6 次谐波电磁转矩标么值, p. u.
T_{ec}	消除转速误差所需转矩给定, $N \cdot m$
T_{ef}	电压和电流限制所产生的最大电磁转矩, $N \cdot m$
T_{em}	永磁同步电机中 m 次谐波转矩, $N \cdot m$
T_{emn}	永磁同步电机中 m 次谐波转矩标么值, p. u.
T_{en}	电磁转矩标么值, p. u.
T_{er}	额定电磁转矩, $N \cdot m$
T_{er}	磁阻转矩, $N \cdot m$
T_{es}	永磁转矩, $N \cdot m$

T_i	电流控制环的时间延迟, s
T_l	负载转矩, $N \cdot m$
T_{ln}	负载转矩标么值, p. u.
T_s	机械时间常数, s
T_{max}	最大转矩限制, $N \cdot m$
T_n	齿槽转矩 n 次谐波幅值, $N \cdot m$
t_{on}	器件在一个开关周期的导通时间, s
t_{off}	器件在一个开关周期的关断时间, s
T_p	一个周期的齿槽转矩的幅值, $N \cdot m$
T_{ph}	每相有效匝数
T_r	变换器时间延迟, s
$[T^*]$	从转子坐标系到静止坐标系的交直流变量变换
T_s	速度控制器的时间常数, s
t_s	器件总的开关周期, s
T_ω	速度滤波器的时间常数, s
T_{abc}^s	静止坐标系下从 abc 变量到 dqo 变量的变换矩阵
T_e^*	转矩给定, $N \cdot m$
T_{en}^*	转矩给定标么值, p. u.
u	输入矢量
V	输入线电压有效值, V
v_α, v_β	$\alpha\beta$ 坐标系下的电压, V
v_{as}, v_{bs}, v_{cs}	永磁无刷直流电机中 a、b、c 相的输入电压, V
v_{ab}	a 相和 b 相间瞬时线电压, V
V_{ab}, V_{bc}, V_{ca}	a 相和 b 相间, b 相和 c 相间, c 相和 a 相间线电压有效值, V
v_{ab}, v_{bc}, v_{ca}	a 相和 b 相间, b 相和 c 相间, c 相和 a 相间瞬时线电压, V
v_{abc}	abc 三相电压矢量, V
v_{abi}	逆变器 a 相和 b 相间瞬时输入线电压, V
v_{am}, v_{bm}, v_{cm}	逆变器 a 相、b 相、c 相桥臂中点和直流侧电源中点间的瞬时电压, V
v_{an}	理想逆变器 a 相桥臂中点的输入电压, V
v'_{an}	死区时间引入后逆变器 a 相桥臂中点的输入电压, V
v_{anc}	死区时间补偿后逆变器 a 相桥臂中点的输入电压, V
v_{ao}, v_{bo}, v_{co}	逆变器 a 相、b 相、c 相桥臂中点电压, V
V_{as}	定子每相输入电压有效值, 也表示 a 相电压有效值, V
V_{asn}	定子 a 相电压有效值的标么值, p. u.
V_b	电压基值, V
V_{b3}	三相系统中的电压基值, V
v_c	控制电压, V
V_c	电容两端电压, V

V_{cn}	晶体管导通电压标么值, p. u.
V_{cm}	最大控制电压, V
V_d	二极管反向承受电压峰值, V
V_{dc}	稳态直流母线电压, V
v_{dc}	瞬时直流母线电压, V
v_{ds}, v_{qs}	定子坐标系下定子直轴电压和交轴电压, V
v_{dsi}, v_{qsi}	转子坐标系下注入的直轴电压和交轴电压, V
V_g	气隙体积, m^3
v_{gl}, v_{g^4}	逆变器 a 相门极控制电压, V
v'_{gl}, v'_{g^4}	死区时间引入后逆变器 a 相门极控制电压, V
v'_{glc}, v'_{g^4c}	死区时间补偿后逆变器 a 相门极控制电压, V
v_{hk}	谐波电压矢量, V
V_i	逆变器输入电压, V
V_m	输入电压幅值, V
	磁体体积, m^3
v_{mn}	直流侧电源中点和三相负载中性点间的电压, V
v_o	定子零序电压, V
V_{on}	晶体管导通压降, V
V_{ph}	逆变器输出相电压有效值的最大值, V
v_{qds}^r	转子坐标系下定子电压矢量, V
v_r	变换器瞬时输入相电压, V
v_{re}	整流器瞬时输出电压, V
v_s	每相电源瞬时电压, V
v_{si}^a	在各向异性或估算的转子坐标系下注入的电压矢量, V
v_{si}^s	变换到定子坐标系下的注入电压矢量, V
v_{si}^r	变换到转子坐标系下的注入电压矢量, V
V_s	平均电源电压, V
V_t	定子齿部体积, m^3
V_{ts}	电力开关电压最大值, m^3
V_y	定子轭部体积, m^3
V_{vs}	传感器输出电压, V
v_a^*	相电压给定幅值, V
v_s^r	转子坐标系下的定子电压矢量, V
v_{sn}^r	转子坐标系下的定子电压矢量标么值, p. u.
v_{xsn}^r	转子坐标系下电压, 下标 x 表示是交轴或者直轴, s 表示是定子, n 表示是标么值。没有 n 表示变量是以国际单位制为单位, V
v_{zs}	零序电压, V
W_c	磁共能, J

W_m	器件中存储的能量, J
W_s	定子槽宽, m
W_t	定子齿宽, m
X	状态变量矢量
$X(0)$	稳态初值矢量
$X(s)$	输入矢量的拉普拉斯变换
$y(s)$	输出变量的拉普拉斯变换
Δi	电流滞环控制器的滞环带, T
α	定子电压相量和转子直轴间夹角, rad
β	永磁体极弧的一半
δ	在一个变量前表示小信号的变化量
δ	同步电机中的转矩角 (气隙合成磁场与定子磁动势间的夹角), rad
δ^*	同步电机中的转矩角给定, rad
$\delta\theta$	转子位置误差, rad
$\delta\omega_n$	转子转速变化量, rad/s
ΔQ	无功功率变化量, VAR
ϕ	电机功率因数角, rad
ϕ_i	输入功率因数角, rad
ϕ_g	气隙磁通, Wb
ϕ_m	合成共磁通幅值或永磁体磁通, Wb
γ	槽距或槽距角, rad
ξ	线圈节距, rad
λ	磁链, V · s
λ_{aa}	相绕组的磁链, V · s
λ_{af}	永磁体产生电枢磁链, V · s
λ_{af}^*	室温时永磁体产生的电枢磁链, V · s
$\lambda_{afh d}, \lambda_{afh q}$	直轴和交轴谐波磁链, V · s
$\lambda_{af n}$	主磁链标么值, p. u.
$\lambda_{as}, \lambda_{bs}, \lambda_{cs}$	a、b、c 相各自磁链, V · s
λ_b	磁链基值, V · s
λ_m	气隙合成磁链, V · s
λ_m^*	气隙合成磁链给定, V · s
λ_{ma}	由于磁阻磁动势产生的磁链, V · s
λ_{mn}	气隙合成磁链标么值, p. u.
λ_o	定子零序磁链, V · s
λ_p	(永磁无刷直流电机中) 合成共磁链幅值, V · s
$\lambda_{qs}, \lambda_{ds}$	定子交轴和直轴磁链, V · s

$\lambda_{\text{qsi}}, \lambda_{\text{dsi}}$	由高频注入电流产生的定子交轴和直轴磁链, $\text{V} \cdot \text{s}$
$\lambda_{\text{s}}^{\text{r}}$	转子坐标系下的定子磁链相量, $\text{V} \cdot \text{s}$
$\lambda_{\text{sn}}^{\text{r}}$	转子坐标系下的定子磁链相量标么值, p. u.
θ	空间位置, rad
θ_{a}	永磁无刷直流电机中电流超前角, rad
θ_{ms}	主磁链和定子电流相量间夹角, rad
θ_{λ}	定子磁链相量和转子磁链相量间夹角, rad
θ_{r}	转子位置, rad
θ_{s}	定子电压相量和最近逆变器开关电压矢量间夹角, rad 也表示定子电流相量与给定间夹角, rad
θ_{s}^*	定子电流相角给定, rad
θ_{sk}	斜槽角, rad
θ_{re}	估算的转子位置, rad
\mathcal{R}	磁阻
$\mathcal{R}_{\text{d}}, \mathcal{R}_{\text{q}}$	直轴磁阻和交轴磁阻
ρ	凸极率, 交轴自感和直轴自感的比值 也用来表示绕组材料具体的电阻率
ρ_{i}	铁心冲片密度, kg/m^3
τ_{fw}	全波整流时定子电气时间常数, s
τ_{hw}	半波整流时定子电气时间常数, s
$\tau_{\text{d}}, \tau_{\text{q}}$	定子交轴和直轴时间常数, s
τ_{s}	表贴式永磁同步电机定子时间常数, s
ω_{l}	半波整流时转速, rad/s
ω_{a}	估算转子角频率或各向异性角频率, rad/s
ω_{b}	角频率基值, rad/s
ω_{c}	载波角频率, rad/s
	任意参考系下感应电机转速, rad/s
ω_{i}	定子绕组注入信号的角频率, rad/s
ω_{m}	转子机械转速, rad/s
ω_{rn}	转子转速标么值, p. u.
ω_{mr}	从速度滤波器输出的速度信号, V
ω_{r}	转子电角速度, rad/s
ω_{r}^*	转速给定, rad/s
ω_{rm}	转子估算模型转速, rad/s
ω_{rn}	定子转速标么值, p. u.
ω_{s}	电源角频率, rad/s

μ_0	空气磁导率
μ_c	永磁体磁导率系数
μ_{rm}	永磁体相对磁导率
μ_r, μ_{rec}	永磁体回复磁导率
$\mu_{re}(H_m)$	第 1 章中定义的永磁体外部磁导率

目 录

译者序	
前言	
致谢	
作者简介	
符号表	

第一部分 永磁材料、永磁电机、逆变器及其控制的基本知识

第 1 章 永磁材料与永磁电机	2
1.1 永磁材料	2
1.1.1 退磁曲线	3
1.1.2 工作点和气隙线	5
1.1.3 磁能积	7
1.1.4 永磁体存储的能量	8
1.1.5 永磁体体积	9
1.1.6 外加磁场的影响	9
1.1.6.1 解析法	10
1.1.6.2 图解法	12
1.2 永磁体的布置方式	16
1.3 永磁体的充磁方式	17
1.3.1 径向和平行充磁	17
1.3.2 Halbach 阵列	18
1.4 永磁交流电机	23
1.4.1 电机结构	23
1.4.2 永磁转子结构	25
1.4.2.1 表贴式永磁同步电机	25
1.4.2.2 表面嵌入式永磁同步电机	26
1.4.2.3 内置式永磁同步电机	26
1.4.2.4 异步起动永磁同步电机	28
1.4.3 混合励磁电机	29
1.4.3.1 磁通反向永磁同步电机	30
1.4.3.2 开关磁链电机	32
1.4.3.3 永磁开关磁阻电机或双凸极永磁电机	33

1.4.4 集中绕组永磁同步电机	35
1.4.5 永磁同步电机的分类	36
1.5 同步电机的基本理论	39
1.5.1 工作原理	39
1.5.2 单匝线圈的磁动势	39
1.5.3 正弦磁动势分布	40
1.5.3.1 同心绕组	40
1.5.3.2 分布绕组	41
1.5.4 感应电动势	42
1.5.4.1 绕组的分布因数	44
1.5.4.2 绕组的节距因数	45
1.5.4.3 绕组的斜槽因数	47
1.5.4.4 绕组因数	48
1.5.5 绕组形式	48
1.5.5.1 单层绕组	48
1.5.5.2 双层绕组	49
1.5.6 旋转磁场	50
1.5.6.1 正弦磁动势分布	51
1.5.6.2 方波磁动势分布	54
1.6 同步电机的基本关系	54
1.6.1 有效气隙	55
1.6.2 永磁体对感应电动势的作用	56
1.6.3 电磁功率和电磁转矩	57
1.6.4 电磁转矩的基本表达式	58
1.6.5 电机输出方程	59
1.6.6 永磁体的面电流等效	61
1.6.7 定子电流阈值	62
1.6.8 电感	63
1.6.8.1 每相自感	65
1.6.8.2 励磁电感	65
1.6.8.3 同步电感	66
1.6.8.4 直、交轴电感	66
1.6.9 定子励磁对气隙磁通密度的影响	67
1.7 铁心损耗	69
1.7.1 定子铁心损耗	69
1.7.2 涡流损耗	71
1.7.2.1 齿部涡流损耗	72
1.7.2.2 轭部涡流损耗	74

1.7.3 齿部和轭部的磁通密度幅值	75
1.7.4 磁滞损耗	76
1.7.5 电机中铁心损耗的测量	77
1.8 电阻损耗	78
1.9 电机的初步设计	79
1.10 齿槽转矩	80
1.10.1 齿槽转矩成因及幅值	80
1.10.2 齿槽转矩的基本理论	81
1.10.3 分析和计算	83
1.10.4 影响齿槽转矩的因素	83
1.10.5 削弱方法	84
1.10.5.1 斜槽	84
1.10.5.2 改变永磁体宽度	86
1.10.5.3 改变槽宽	86
1.10.5.4 采用不同的极弧系数	86
1.10.5.5 齿顶开辅助槽	86
1.11 永磁同步电机基于磁通路径的分类	87
1.12 振动与噪声	93
参考文献	94
第2章 逆变器及其控制导论	105
2.1 功率器件	106
2.1.1 功率器件与开关电源	106
2.1.1.1 电力二极管	106
2.1.1.2 MOSFET	107
2.1.1.3 绝缘栅双极型晶体管	108
2.1.2 功率器件的开关	109
2.1.3 器件损耗	111
2.1.3.1 通态损耗	111
2.1.3.2 开关损耗	112
2.2 直流输入电源	114
2.3 直流到交流的功率变换	118
2.3.1 单相半波逆变器	119
2.3.2 单相全波逆变器	121
2.3.3 三相逆变器	123
2.4 有功功率	127
2.5 无功功率	127
2.6 逆变器控制的必要性	128
2.7 脉冲宽度调制技术	129

2.8 滞环电流控制	137
2.9 空间矢量调制技术	140
2.9.1 逆变器的开关状态	141
2.9.2 空间矢量调制的原理	142
2.9.3 空间矢量调制的实现	150
2.9.4 空间矢量调制的开关纹波	151
2.10 逆变器的开关延时	157
2.11 输入功率因数校正电路	167
2.11.1 单相功率因数校正电路	167
2.11.2 三相功率因数校正电路	168
2.12 四象限运行	170
2.13 变换器的要求	172
参考文献	173

第二部分 永磁同步电机及其控制

第3章 永磁同步电机的动态模型	182
3.1 两相永磁同步电机的实时模型	183
3.2 静止坐标系到转子参考坐标系的变换	187
3.3 三相坐标系到两相坐标系的变换	191
3.4 零序电感的推导	193
3.5 功率等效	194
3.6 电磁转矩	195
3.7 稳态转矩特性	196
3.8 磁链模型	202
3.9 等效电路	203
3.10 归一化模型	205
3.11 动态仿真	207
3.12 永磁同步电机的小信号方程	213
3.13 永磁同步电机的控制特性	214
3.14 时间响应的计算	216
3.15 空间相量模型	219
3.15.1 原理	219
3.15.2 模型的推导	220
参考文献	225
第4章 永磁同步电机的控制策略	227
4.1 矢量控制	227
4.2 矢量控制的推导	228
4.2.1 电磁转矩	229

4.2.2	定子参考坐标系下 d 轴与 q 轴电流	230
4.2.3	共磁链	230
4.2.4	转矩角在电机运行中的作用	231
4.2.5	关键的结论	231
4.3	驱动系统原理图	231
4.3.1	转矩控制型驱动系统	231
4.3.2	转矩控制型驱动系统的仿真及结果	234
4.3.3	速度控制型驱动系统	239
4.3.3.1	共磁链的控制原则	241
4.3.3.2	弱磁区域的转矩控制原则	241
4.3.4	速度控制型驱动系统的仿真及结果	242
4.4	控制策略	250
4.4.1	恒转矩角 ($\delta = 90^\circ$) 控制	251
4.4.2	单位功率因数控制	254
4.4.3	恒共磁链控制	256
4.4.4	气隙磁通与电流相量角控制	258
4.4.5	单位电流最优转矩控制	261
4.4.6	恒功率损耗控制	264
4.4.7	最大效率控制	268
	参考文献	270
第 5 章	弱磁控制	273
5.1	最大转速	274
5.2	弱磁算法	275
5.2.1	间接控制策略	276
5.2.2	恒转矩模式控制器	277
5.2.3	弱磁控制器	279
5.2.4	系统性能	279
5.3	直接弱磁	283
5.3.1	最大容许转矩限制	284
5.3.2	转速控制方案	285
5.3.3	实施策略	285
5.3.4	系统性能	287
5.4	参数敏感性	288
5.4.1	定子绕组电阻变化	288
5.4.2	转子磁链变化	289
5.4.3	q 轴电感变化	289
5.5	无模型 (参数不敏感) 弱磁方法	290
5.6	永磁同步电机的六步电压和恒反电动势控制策略	291

5.6.1 恒反电动势控制策略	292
5.6.1.1 基本原理	293
5.6.1.2 弱磁区域内的最大电流	293
5.6.1.3 运行边界	294
5.6.1.4 弱磁区域内的最大转速	294
5.6.2 六步电压控制策略	294
5.6.2.1 基本原理分析	295
5.6.2.2 SSV 模式下的稳态电流	296
5.6.2.3 SSV 控制策略的运行边界	296
5.6.2.4 比较	297
5.7 直接稳态评价	298
5.7.1 输入电压	299
5.7.2 状态空间形式的电机方程	301
5.7.3 边界匹配条件及方程解	302
5.7.4 MATLAB 程序	304
5.8 表面式与内置式永磁同步电机的弱磁控制	306
参考文献	311
第6章 电流和转速控制器的设计	314
6.1 电流控制器	314
6.1.1 基于转子参考坐标系的电流控制器	316
6.1.2 基于定子参考坐标系的电流控制器	316
6.1.3 最小拍电流控制器	318
6.1.3.1 最小拍控制器	318
6.1.3.2 最小拍预测控制器	320
6.1.3.3 改进的最小拍预测控制器	321
6.2 转速控制器	322
6.2.1 原理框图的推导	322
6.2.2 简化的电流环传递函数	324
6.2.3 转速控制器	325
参考文献	329
第7章 参数敏感性及补偿	332
7.1 引言	332
7.1.1 转矩与其参考值之比	332
7.1.2 共磁链与其参考值之比	333
7.2 基于电磁功率反馈控制的参数补偿	335
7.2.1 补偿算法	336
7.2.2 性能仿真	337
7.3 基于无功功率反馈控制的参数补偿	341