



国际电气工程先进技术译丛

WILEY

交流传动系统高性能控制 及MATLAB/Simulink建模

**High Performance Control of AC Drives with
MATLAB/Simulink Models**

海瑟姆·阿布鲁 (Haitham Abu-Rub)

[英]

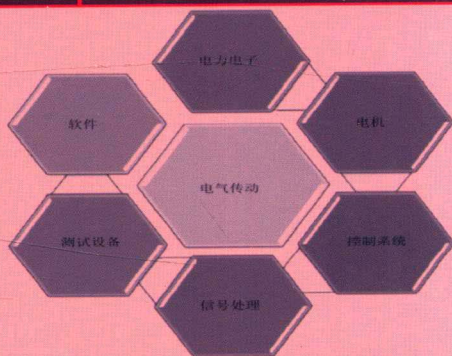
阿蒂夫·伊克巴尔 (Atif Iqbal) 等著

雅罗斯瓦夫·古辛斯基 (Jaroslaw Guzinski)

袁登科 等译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



技术译丛

交流传动系统高性能控制及 MATLAB/Simulink 建模

海瑟姆·阿布鲁 (Haitham Abu - Rub)

[英]

阿蒂夫·伊克巴尔 (Atif Iqbal)

等著

雅罗斯瓦夫·古辛斯基 (Jaroslaw Guzinski)

袁登科 等译



机械工业出版社

Copyright © 2012 John Wiley & Sons Ltd

All Rights Reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled *High Performance Control of AC Drives with MATLAB/Simulink Models*, ISBN 9780470978290, by Haitham Abu - Rub, Atif Iqbal and Jaroslaw Guzinski, Published by John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

本书中文简体字版由 Wiley 授权机械工业出版社出版, 未经出版者书面允许, 本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。

版权所有, 翻印必究。

北京市版权局著作权合同登记 图字: 01 - 2012 - 4420 号。

图书在版编目 (CIP) 数据

交流传动系统高性能控制及 MATLAB/Simulink 建模/ (英) 海瑟姆·阿布鲁 (Haitham Abu - Rub) 等著; 袁登科等译. —北京: 机械工业出版社, 2018. 8

(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文: High Performance Control of AC Drives with Matlab/Simulink Models

ISBN 978-7-111-60656-7

I. ①交… II. ①海…②袁… III. ①交流传动系统 IV. ①TM921. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 186514 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: 林春泉 责任编辑: 林春泉

责任校对: 王 延 封面设计: 马精明

责任印制: 常天培

北京铭成印刷有限公司印刷

2019 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 28 印张 · 537 千字

0 001—3 000 册

标准书号: ISBN 978 - 7 - 111 - 60656 - 7

定价: 140.00 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

服务咨询热线: 010 - 88361066

机工官网: www.cmpbook.com

读者购书热线: 010 - 68326294

机工官博: weibo.com/cmp1952

010 - 88379203

金书网: www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网: www.cmpedu.com

采用合理的控制策略,按照负载特性对交流电气传动系统进行调速,会显著提高其电能利用效率。高性能传动使电机具有快速、准确的动态响应,且提供良好的稳态性能。

本书首先给出了交流电机的基本模型(包括异步电机、永磁同步电机、双馈异步电机),详细阐述了电压型逆变器的脉宽调制技术,然后针对交流电机的高性能控制进行了深入的分析(磁场定向控制、直接转矩控制、非线性控制等),并对五相异步电机的传动系统、交流电机的无传感器控制技术进行了探讨,最后针对逆变器输出侧带有 LC 滤波器的交流传动系统中存在的几个典型问题(滤波器设计、共模电压抑制、矢量控制技术中变量观测与电机控制的改进等)的分析非常有价值。

本书实用性强,并配以大量的 MATLAB/Simulink 仿真模型,对读者验证算法、掌握交流电气传动系统控制技术与控制技巧大有裨益。

本书非常适合电机、电力电子、自动化控制专业高年级本科生、研究生以及工作在一线的科技人员使用。学习本书的前期知识是电机、电力电子和自动控制。

译者序

本书是关于交流电气传动的一本专著，可作为高年级本科生、研究生和科技工作人员的教材或参考书。作者首先介绍了高性能传动系统的特点和要求，并对交流电机的数学模型和仿真模型进行介绍，为读者理解本书内容奠定了理论基础。然后，对 DC-AC 功率变换器的 PWM 控制技术作了详细、深入的分析。随后，作者对交流电机几类最常见的高性能控制（磁场定向控制、直接转矩控制、非线性控制）进行了详细阐述，并对五相异步电机的传动系统、交流电机的无传感器控制作了深入的分析。最后，针对逆变器输出侧带有滤波器的传动系统，作者选择了共模电压与电流、滤波器选型、带有滤波器传动系统的变量观测问题及电机控制问题、预测电流控制等内容进行了大量的分析。

与电气传动系统控制方面的书籍相比，本书特点鲜明。首先，内容更为全面，所选主题与实际应用关联性强，从而使读者可以获得很多实用的技术。其次，本书配以大量的 MATLAB/Simulink 仿真模型，从而极大地方便了读者通过仿真加深对传动系统高性能控制的理解。在每章正文的后面，作者都设计了一些练习题和问题，促使读者进行更深入的思考与研究。在每章的最后，作者列出了大量的参考文献，为读者了解和学习业内技术动态提供了方便。在翻译过程中，译者对原书中个别符号和语句进行了适当的修改。

参加本书翻译工作的还有武松林、蒋飞、麻涛、王伊健、陈文龙、陈天峰、丛朝阳、王焜、杨云霄等人。本书的出版得到了机械工业出版社林春泉编审等的大力支持。在此向所有对本书翻译出版提供帮助的热心人表示真诚的感谢。由于译者水平有限，难免个别地方出现翻译不当的情况，欢迎广大读者批评指正。

袁登科
2018 年 6 月

原 书 序

本书讲述了交流电机传动系统先进控制策略的概念，提供了基于 MATLAB/Simulink 的完整仿真模型。电机消耗了全球范围内的大部分电能。因此，针对这些电机设计高效率的运行方案将会有广阔的节能前景。其中方法之一就是设计高能效的电机，另一种方法是电机的合理控制。很多场合中的电机都没有调速。然而，根据负载需求对电机进行调速，将会显著提高效率，因此调速控制对实现电机的高效率工作是极其重要的。所以，工业与家用场合中电机的速度控制对限制温室气体的排放是至关重要的，并且这是一种环境友好的解决方法。在书面文献中，通过调节速度控制电机的运行状态被称为“变速传动”或“调速传动”。

本书讨论了实现变速交流传动的先进技术，书中描述了电力电子变换器与交流电机的基本建模流程，书中给出的数学模型用来建立 MATLAB/Simulink 中的仿真模型。电压源逆变器（VSI）的脉冲宽度调制（PWM）技术及其仿真在同一章节中描述。书中讨论的交流电机是应用最为广泛的笼型异步电机、永磁同步电机及双馈异步电机。本书阐述了电气传动的先进控制技术，如磁场定向控制（FOC）、直接转矩控制（DTC）、反馈线性控制、无传感器运行，以及多相（多于三相）传动系统的进展。书中有单独的一章专门分析了五相电机传动系统。有的传动系统会在逆变器输出侧加装 LC 滤波器，它对电机传动控制的影响将在另一章进行详述。

这些控制技术统称为高性能控制，因为它们可以使电机提供快速且准确的动态响应，同时也提供了良好的稳态性能。因此，本书描述了交流电机最重要的、工业中应用广泛的先进控制技术。本书包含了这些不同的主题。

特别地，本书提供了基于 MATLAB/Simulink 的大量详细的仿真模型。MATLAB/Simulink 是本科生和研究生所学课程中一个很重要的内容，同时也在工业中广泛应用。因此，仿真模型为学生、一线工程师、研究人员提供了便捷工具去验证算法、技巧和模型。熟悉书中的仿真模型之后，学生和一线工程师就能够开发并验证他们自己的算法与各种技巧。

本书对在本科生、研究生阶段的学生学习电气传动、电机控制等非常有帮助。需要了解的前期知识是电机、电力电子和控制等方向的一些基础课程。

在网站 www.wiley.com/go/aburub_control 中，教师可以找到一些教学材料和本书中列举问题的答案。本书对科研人员、一线工程师及专家有非常实用的参考价值。

原书致谢

我们愿借此机会向所有帮助我们完成这本书出版的人表示真诚的感谢！感谢我们的同事和卡塔尔大学、卡塔尔得克萨斯大学的学生，还有阿里格尔穆斯林大学、格但斯克理工大学和胡志明市工业大学的学生。在此我们特别感谢 Wesam Mansour 先生、S. K. Moin Ahmed 先生、Khalid Khan 博士和 M. Arif Khan 先生协助我们完成这项工作。我们非常感谢 Khalid Khan 博士，他将 C/C++ 代码的源文件转换成 MATLAB 代码，并准备了 MATLAB / Simulink 模型，给我们提供了非常有价值的帮助。作者对 Puneet Sharma 先生在开发过调制 PWM 仿真模型过程中给予的帮助表示感谢。此外，我们还要感谢 Shaikh Moinoddin 博士在本书第 3 章和第 7 章中提供的帮助，对 Marwa Qaraqe 女士和 Amy Hamar 夫人在本书语言方面提供的帮助，在此一并表示感谢。

感谢我们的家人对我们一如既往的支持、耐心和鼓励，否则我们很难完成此项工作。对 Wiley 的工作人员，特别是 Laura Bell、Liz Wingett 和后来的 Nicky Skinner 对我们的帮助与支持，在此我们致以真诚的感谢。

Haitham Abu – Rub

Atif Iqbal

Jaroslav Guzinski

作者简介

Haitham Abu - Rub 是卡塔尔得克萨斯大学的副教授。在 1995 年、2004 年，他分别在波兰的格但斯克理工大学和格但斯克大学获得博士学位。他原是格但斯克大学的助理教授，然后转到巴勒斯坦的比尔泽特大学，在那里的八年中他担任了助理教授和副教授的职位，在其中的四年，他任职电气工程系主任。他的主要研究领域是电机传动和电力电子。Haitham Abu - Rub 获得了国际上许多著名的奖学金，如美国富布莱特奖学金（得克萨斯大学）、德国亚历山大·冯·洪堡奖学金（伍珀塔尔大学）、德国德意志学术交流奖学金（波鸿大学）、英国皇家社会奖学金（南安普敦大学）。

他同时还是 IEEE（美国电气电子工程师学会）的高级会员，他在期刊、会议上发表了 130 多篇文章。他还担任两个期刊的副主编，并一直在其编辑委员会工作。

Atif Iqbal 分别于 1991 年、1996 年在印度阿里格尔穆斯林大学获得电气工程学学士学位和硕士学位，于 2006 年在英国利物浦约翰摩尔斯大学获得博士学位。自 1991 年以来，他一直在印度阿里格尔穆斯林大学担任讲师，并在那里晋升副教授。从 2009 年 4 月起，他在卡塔尔得克萨斯大学从事研究工作，后来在卡塔尔大学电气工程系担任教师并工作至今。在电力电子和电气传动领域，他已经发表了 150 多篇研究论文，其中包括 50 篇国际期刊论文。他完成过大型研发项目；在 1991 年的硕士工程考试中，获得了 AMU 颁发的 Maulana Tufail Ahmad 金奖；凭借博士论文的贡献获得了英国 EPSRC 颁发的奖学金。

Atif Iqbal 是 IEEE 的高级会员。他是 Journal of Computer Science、Informatics and Electrical Engineering 的副主编。此外，他还是 International Journal of Science Engineering and Technology 的编辑委员会成员，Journal of Electrical Engineering、International Journal of Power Electronics Converter (IJPEC)、International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS) 和 International Journal of Power Electronics and Energy (IJPÉE) 的编辑委员会成员。

Jaroslav Guzinski 分别于 1994 年、2000 年在波兰格但斯克理工大学电气工程系获得硕士学位和博士学位。2006 ~ 2009 年，他参与了由阿尔斯通交通部门协调的欧洲委员会项目——铁路动车的预测性维护和诊断。他获得过苏格拉底/伊拉斯姆斯计划奖学金，得到了波兰政府在不速度传感器控制和带有 LC 滤波器传动系统的诊断领域中的两项资助。在期刊和会议上，他撰写、联合撰写了 100 多

篇论文。他拥有带有 LC 滤波器的无速度传感器传动系统的专利解决方案。目前，他的研究兴趣包括电机的无传感器控制、数字信号处理器和电动车辆。

Truc Phamdinh 在新南威尔士大学以优等的成绩获得电气工程学士学位。随后在英国利物浦约翰摩尔斯大学，他成功完成了他的博士研究，课题为“考虑铁损的异步电动机直接转矩控制”。他目前是越南胡志明市工业大学电气与电子工程系的讲师，负责本科和研究生的电机先进控制课程。他的研究兴趣包括交流电机的高性能传动系统，例如磁场定向控制和直接转矩控制、无速度传感器控制以及用于风力发电的双馈异步发电机的控制。

Zbigniew Krzeminski 于 1983 年在波兰罗兹技术大学获得哲学博士学位，1991 年在波兰格利维采西里西亚技术大学获得科学博士学位。目前，他在波兰格但斯克理工大学担任教授，主要研究领域是电机的建模和仿真、电气传动系统控制和 DSP 系统。

目 录

译者序

原书序

原书致谢

作者简介

第 1 章 高性能传动系统	1
---------------------	---

1.1 概述	1
1.2 高性能传动系统的概述	5
1.3 工业应用中的电气传动挑战与要求	10
1.3.1 电能质量与 LC 谐振抑制	11
1.3.2 逆变器开关频率	11
1.3.3 电动机侧的挑战	12
1.3.4 高 dv/dt 与波反射	12
1.3.5 逆变器输出滤波器的使用	12
1.4 本书的组织结构	13
参考文献	15

第 2 章 交流电机的数学模型与仿真模型	18
----------------------------	----

2.1 概述	18
2.2 直流电动机	18
2.2.1 他励直流电动机的控制	18
2.2.2 串励直流电动机的控制	21
2.3 笼型异步电动机	22
2.3.1 空间矢量的描述	22
2.3.2 克拉克变换 (ABC 到 $\alpha\beta$)	23
2.3.3 派克变换 ($\alpha\beta$ 到 dq)	25
2.3.4 异步电动机标幺值模型	26
2.3.5 双馈异步发电机 (DFIG)	29
2.4 永磁同步电动机的数学模型	31
2.4.1 dq 旋转坐标系中的永磁同步电动机模型	32
2.4.2 仿真用电动机参数的举例	33
2.4.3 永磁同步电动机的标幺值模型	33

2.4.4 $\alpha\beta$ (xy) 坐标系永磁同步电动机模型	34
2.5 练习题	36
参考文献	36
第3章 电力电子 DC-AC 变换器的脉宽调制技术	38
3.1 概述	38
3.2 电压型逆变器脉冲宽度调制技术的分类	38
3.3 PWM 控制的逆变器	39
3.3.1 单相半桥逆变器	39
3.3.2 单相全桥逆变器	44
3.4 三相 PWM 电压源逆变器	50
3.4.1 基于载波的 SPWM	54
3.4.2 基于载波的 3 次谐波注入 PWM	57
3.4.3 3 次谐波注入 PWM 的 MATLAB/Simulink 模型	60
3.4.4 加入偏移量的载波 PWM	61
3.4.5 空间矢量 PWM	61
3.4.6 不连续空间矢量 PWM	67
3.4.7 空间矢量 PWM 的 MATLAB/Simulink 模型	71
3.4.8 过调制区域的空间矢量 PWM	81
3.4.9 过调制区域 SVPWM 的 MATLAB/Simulink 建模	85
3.4.10 谐波分析	86
3.4.11 基于人工神经网络的 PWM	87
3.4.12 基于人工神经网络 SVPWM 的 MATLAB/Simulink 建模	89
3.5 载波 PWM 与 SVPWM 的关系	91
3.5.1 调制信号与空间矢量	92
3.5.2 线电压与空间矢量的关系	93
3.5.3 调制信号与空间扇区	93
3.6 多电平逆变器	94
3.6.1 二极管钳位多电平逆变器	95
3.6.2 飞跨电容多电平逆变器	99
3.6.3 H 桥级联多电平逆变器	103
3.7 阻抗源或 Z 源逆变器	107
3.7.1 电路分析	108
3.7.2 Z 源逆变器基于载波的简单升压 PWM 控制	110
3.7.3 Z 源逆变器基于载波的最大升压 PWM 控制	111
3.7.4 Z 源逆变器的 MATLAB/Simulink 模型	112
3.8 准阻抗源或准 Z 源逆变器	113
3.8.1 准 Z 源逆变器的 MATLAB/Simulink 模型	115

3.9	多相逆变器的死区影响	116
3.10	总结	119
3.11	练习题	120
	参考文献	121
第4章	交流电机的磁场定向控制	125
4.1	概述	125
4.2	异步电动机控制	125
4.2.1	异步电动机的恒 V/f 控制	126
4.2.2	异步电动机的矢量控制	129
4.2.3	直接与间接磁场定向控制	134
4.2.4	转子磁通与定子磁通的计算	134
4.2.5	自适应磁通观测器	135
4.2.6	定子磁通定向	136
4.2.7	弱磁控制	138
4.3	双馈异步发电机的矢量控制	139
4.3.1	简介	139
4.3.2	并网 DFIG 的矢量控制 ($\alpha\beta$ 模型)	140
4.3.3	变量的变换	141
4.3.4	仿真结果	144
4.4	永磁同步电机的控制	145
4.4.1	简介	145
4.4.2	dq 坐标系中 PMSM 的矢量控制	146
4.4.3	$\alpha\beta$ 坐标系中使用 PI 控制器的 PMSM 矢量控制	148
4.4.4	PMSM 的标量控制	152
4.5	练习题	153
4.6	补充作业	153
4.7	DFIG 作业	153
4.8	问题	154
	参考文献	154
第5章	交流电机的直接转矩控制	156
5.1	概述	156
5.2	DTC 的基本概念与工作原理	157
5.2.1	DTC 的基本概念	157
5.2.2	DTC 的工作原理	158
5.3	具有理想常参数电机模型的异步电动机 DTC	163
5.3.1	异步电动机的理想常参数模型	163

5.3.2 DTC 技术方案	165
5.3.3 DTC 的速度控制	167
5.3.4 DTC 转矩运行模式与速度运行模式的 MATLAB/Simulink 仿真	168
5.4 考虑铁耗的异步电动机 DTC	182
5.4.1 考虑铁耗的异步电动机模型	182
5.4.2 考虑铁耗影响的转矩控制与速度控制 MATLAB/Simulink 仿真	184
5.4.3 补偿铁耗的改进型 DTC 方案	195
5.5 考虑铁耗与磁饱和的异步电动机 DTC	199
5.5.1 考虑铁耗与磁饱和的异步电动机模型	199
5.5.2 考虑铁耗与磁饱和影响的转矩控制与速度控制 MATLAB/Simulink 仿真	201
5.6 具有恒定开关频率的改进型异步电动机的 DTC	214
5.7 正弦永磁同步电动机 (SPMSM) 的 DTC	215
5.7.1 简介	215
5.7.2 SPMSM 的数学模型	215
5.7.3 SPMSM 的 DTC 控制方案	217
5.7.4 SPMSM 的 DTC 的 MATLAB/Simulink 仿真	217
参考文献	233
第 6 章 采用非线性反馈的电机非线性控制	235
6.1 概述	235
6.2 采用非线性反馈的动态系统线性化处理	236
6.3 他励直流电动机的非线性控制	237
6.3.1 MATLAB/Simulink 非线性控制模型	238
6.3.2 非线性控制系统	239
6.3.3 速度控制器	240
6.3.4 变量 m 的控制器	240
6.3.5 励磁电流控制器	240
6.3.6 仿真结果	241
6.4 异步电动机的多标量模型 (MM)	241
6.4.1 多标量变量	242
6.4.2 电压控制的 VSI 供电异步电动机的非线性特性的线性化处理	242
6.4.3 系统控制设计	244
6.4.4 电流控制的 VSI 供电异步电动机的非线性特性的线性化处理	245
6.4.5 定子定向的非线性控制系统	248
6.4.6 基于转子磁链-定子磁链的模型	249
6.4.7 定子定向的多标量模型	250
6.4.8 异步电动机的多标量控制	251
6.4.9 异步电动机模型	252

XII 交流传动系统高性能控制及 MATLAB/Simulink 建模

6.4.10 状态变换	252
6.4.11 解耦的异步电动机模型	254
6.5 双馈异步电机的多标量模型	256
6.6 永磁同步电机的非线性控制	258
6.6.1 dq 电动机模型中永磁同步电机的非线性控制	260
6.6.2 $\alpha\beta$ 坐标系 PMSM 非线性矢量控制	261
6.6.3 $\alpha\beta(xy)$ 坐标系 PMSM 模型	261
6.6.4 坐标变换	262
6.6.5 控制系统	263
6.6.6 仿真结果	264
6.7 练习题	265
参考文献	266

第 7 章 五相异步电机的传动系统

7.1 概述	268
7.2 多相传动系统的优点与应用	269
7.3 五相异步电机传动系统的建模与仿真	269
7.3.1 五相异步电机的模型	270
7.3.2 五相两电平电压源逆变器模型	278
7.3.3 五相 VSI 的 PWM 技术	301
7.4 五相异步电机的间接转子磁场定向控制	314
7.4.1 五相异步电机 FOC 的 MATLAB/Simulink 模型	316
7.5 同步旋转坐标系电流控制的五相异步电机 FOC	319
7.6 模型预测控制 (MPC)	322
7.6.1 用于五相两电平 VSI 的 MPC	322
7.6.2 五相 VSI 的 MPC 的 MATLAB/Simulink 建模	324
7.6.3 使用 $\gamma = 0$ 的 11 个矢量	325
7.6.4 使用 $\gamma = 1$ 的 11 个矢量	325
7.7 总结	327
7.8 练习题	328
参考文献	329

第 8 章 交流电机无速度传感器的控制

8.1 概述	333
8.2 异步电机无传感器控制	333
8.2.1 使用开环模型与转差计算的速度观测	334
8.2.2 闭环观测器	334
8.2.3 MRAS (闭环) 速度观测器	341

8.2.4 使用功率测量	345
8.3 PMSM 的无传感器控制	346
8.3.1 PMSM 的控制系统	348
8.3.2 自适应反步观测器	348
8.3.3 PMSM 的模型参考自适应系统	350
8.3.4 仿真结果	351
8.4 五相异步电机传动系统的 MRAS 无传感器控制	354
8.4.1 基于 MRAS 的速度观测器	354
8.4.2 仿真结果	356
参考文献	358

第9章 采用电压型逆变器和输出滤波器的异步电机传动

系统的几个问题	363
9.1 传动系统与滤波器的概述	363
9.2 三相-两相变换	365
9.3 电压和电流的共模分量	366
9.3.1 带有 PWM 逆变器与共模电压的异步电机传动系统的 MATLAB/Simulink 模型	367
9.4 异步电机共模电路	370
9.5 轴承电流的类型与减少方法	372
9.5.1 共模扼流圈	374
9.5.2 共模变压器	375
9.5.3 减少共模电压的 PWM 技术改进	376
9.6 逆变器输出滤波器	380
9.6.1 逆变器输出滤波器的结构选型	380
9.6.2 逆变器输出滤波器的设计	384
9.6.3 电机扼流圈	394
9.6.4 带有 PWM 逆变器与差模 LC 滤波器的异步电机传动系统的 MATLAB/Simulink 模型	396
9.7 带有滤波器的传动系统观测问题	398
9.7.1 介绍	398
9.7.2 带有干扰模型的速度观测器	400
9.7.3 基于电机定子模型的简单观测器	403
9.8 带有滤波器传动系统的电机控制问题	405
9.8.1 简介	405
9.8.2 磁场定向控制	407
9.8.3 非线性磁场定向控制	412
9.8.4 非线性多标量控制	414

9.9 带有输出滤波器传动系统的预测电流控制	417
9.9.1 控制系统	417
9.9.2 预测电流控制器	420
9.9.3 EMF 观测技术	422
9.10 练习题	427
9.11 问答	429
参考文献	430

第 1 章 高性能传动系统

1.1 概述

电气传动系统的功能是通过磁场将电能以可控的方式转换成机械能，或将机械能转换成电能。电气传动是一个多学科的研究领域，需要系统地掌握以下几门知识：电机、执行机构、电力电子变换器、传感器与测试设备、控制硬件与软件以及它们之间的相互关系（见图 1-1）。自从迈克尔法拉第在 1821 年提出了电机的主要工作原理^[1]，电气传动一直在持续发展。在 1888 年^[2]，尼古拉特斯拉申请了第一台感应电机专利（美国专利 381968）后，世界发生了巨大的变化。早期的研究围绕着减少重量/功率比和提高工作效率的电动机设计，研究人员的长期努力推动了体积更小、工业用高效

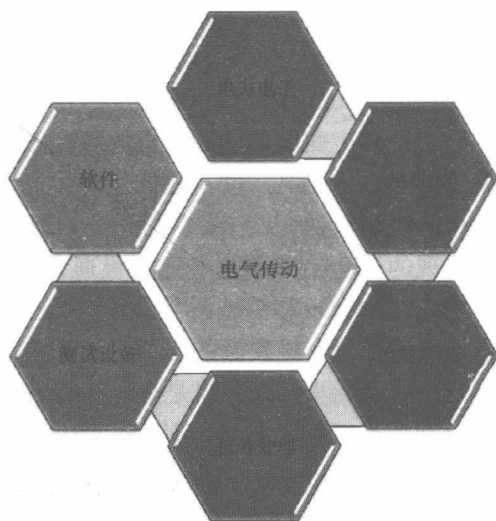


图 1-1 电气传动系统

电动机的发展。在市场中，几乎都是效率高达 95% ~ 96% 的电动机^[3]，用户对此不再有更多的抱怨。交流电动机通常分为三类：同步电动机、感应电动机（也称为异步电动机）、电子换向电动机。异步电动机有绕线转子和笼型转子异步电动机两种类型。同步电动机工作在由供电频率决定的同步速度下（ $N_s = 120f/P$ ），可细分为三种主要类型：转子励磁、永磁和同步磁阻。电子换向电动机的工作原理与直流电动机相同，但将机械换向器替换为逆变器换相。这里面主要有两类电动机：无刷直流电动机与开关磁阻电动机。在一些特殊的应用场合中，还出现了上述基本类型电动机的一些拓展，如步进电动机、磁滞电动机、永磁同步磁阻电动机、磁滞磁阻电动机、（交直流）通用电动机、爪极电动机、无摩擦有源轴承电动机和线性异步电动机等。有源磁轴承系统基于磁悬浮原理，因此无需润滑剂，如油脂或润滑油，在诸如人工心脏、血液泵等特殊场合以及石油