



国际电气工程先进技术译丛

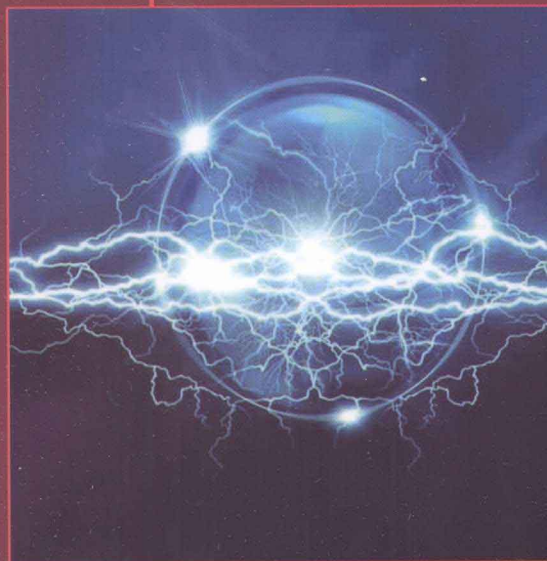
WILEY

电机传动系统控制

Control of Electric Machine Drive Systems

(韩) Seung-Ki Sul 编著

张永昌 李正熙 等译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际电气工程先进技术译丛

电机传动系统控制

(韩) Seung-Ki Sul 编著

张永昌 李正熙 等译



机械工业出版社

基于作者的大量工业经验以及与工业界的广泛合作,本书包括了大量的经过测试、实现和验证过的方法,而这些方法又是电机控制领域工程师在日常工作中经常遇到的。本书首先介绍了电气传动系统的特性和相关技术的发展趋势,以及电机的基本结构和运行原理,然后介绍了电机的稳态特性与控制以及应用参考坐标系理论来对电机的物理变量进行变换,这些为后续内容提供了合适的基础。本书的核心部分回顾了电机与电力电子变换器的几种控制算法,解释了什么是主动阻尼以及如何以反馈的方式来调节电流、转速和位置。作者还介绍了提升电机控制性能的技巧、检测交流电源相位的算法以及控制功率变换器直流母线电压的算法。

本书的实用性和与实际的紧密关联性,使本书无论对电机驱动研发领域的专家和工程师、工业传动设计者还是高年级本科生和研究生,都是一本很有价值的参考书。

Copyright©2011 by the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.

All Rights Reserved. This translation published under license.

Authorized translation from the English language edition, Control of Electric Machine Drive Systems, ISBN 978-0-470-59079-9, Seung-Ki Sul, 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.

本书原版由 Wiley 公司出版,并授权翻译出版。

版权所有,侵权必究。

本书中文简体翻译出版授权机械工业出版社独家出版,并限定在中国大陆地区销售。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。

本书封面贴有 Wiley 公司的防伪标签,无标签者不得销售。

本书版权登记号:图字 01-2012-3192 号。

图书在版编目(CIP)数据

电机传动系统控制/(韩)薛承基编著;张永昌等译.
—北京:机械工业出版社,2013.9
(国际电气工程先进技术译丛)
书名原文:Control of electric machine drive systems
ISBN 978-7-111-43313-2

I. ①电… II. ①薛…②张… III. ①电机-电力传动
IV. ①TM921

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 158431 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:张俊红 责任编辑:赵玲丽
版式设计:霍永明 责任校对:胡艳萍
责任印制:张楠
北京京丰印刷厂印刷
2013 年 10 月第 1 版·第 1 次印刷
169mm×239mm·20.25 印张·417 千字
0 001—3 000 册
标准书号:ISBN 978-7-111-43313-2
定价:89.00 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 务 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

由电机控制领域的世界级权威 Seung-Ki Sul 教授撰写的《Control Theory of Electric Machinery (电机控制理论)》曾经作为大学教材和工业参考书在韩国以韩语出版, 获得了广泛关注和好评。经过两年的修改和扩充后, 该书进一步于 2011 年 1 月由 Wiley-IEEE 出版社出版, 并更名为《Control of Electric Machine Drive System (电机传动系统控制)》, 也就是本书翻译的蓝本。

作为现代工业的动力, 电机及驱动系统一直是工业界和学术界关心和研究的课题。从早期的直流调速到现在的交流调速, 从早期的开环恒压频比控制到现在的高性能矢量控制以及无传感器控制, 电机传动系统经历了巨大而深刻的变化。本书深入剖析了在工业中广泛应用的直流电机、异步电机和永磁同步电机的控制系统设计, 包括数学建模、坐标系变换、调节器设计、矢量控制和无位置/速度传感器设计, 最后还介绍了一些工业实际问题如死区补偿、电压测量和控制延迟的解决方案, 以及电机参数辨识等内容。可以说, 本书较全面地涵盖了电机驱动系统设计的内容。

当前我国正处于经济快速发展的时期, 对电机及驱动系统的应用需求十分迫切。希望本书的翻译能够对促进我国电机传动领域的发展有所帮助。

本书的翻译得到了国家自然科学基金项目(项目编号 51207003)的资助。北方工业大学北京市变频技术工程研究中心的同事樊生文、张虎、朴政国、胡长斌、王占扩、王鹏、王泽庭、陈智刚等参与了部分翻译与整理工作, 在中心学习的研究生杨海涛、魏香龙、谢伟、曲昌琦、章勤、李洋、郑凯元、杜军、卢敬伟、孔令奇、李源、肖捷强、丁茂起、王立朋、杨达维、高素雨、彭玉宾、刘鹏、薛昊、张洪寅、吕冠达、刘东、蔡斌峰、安悦珩、张腾、陈诚、张宇、孙安博、田文丹、东子召等参与了部分翻译与校对工作, 在此深表谢意。

由于水平有限, 书中难免有不当甚至错误之处, 还请广大读者批评指正。

张永昌
2013 年夏末

原 书 前 言

8 年前，我的那本《Control Theory of Electric Machinery (电机控制理论)》在韩国出版。在过去的 8 年间，这本书在韩国的销量已经超过了 2500 多本，其中一些作为部分韩国大学里的研究生课程教材，但是大多数是用来作为工业界的参考书。在出版了这本书以后，我收到了许多关于把这本书翻译成英文的鼓励和请求。但是我紧张的课程使我不得不再推迟这些翻译工作。然而 4 年前，一些留学生和访问学者加入到了我的研究生课程中，他们需要一些学习资料，因此我把它翻译成了英文。辛勤工作了两年后，英文版的手稿得以出版。在翻译的过程中，书中的内容有所校正和更新。我希望对于这个领域中的学生和工程师们，本书能成为他们手中一本很好的参考书。

现代技术，也就是今天所谓的信息技术，是以能源的稳定供应为前提的，尤其是最为广泛使用的电能。现代社会中的一些人认为只要我们需要，电能就可以源源不断地产出。然而，由于清洁的水和空气正在变得稀有，能供给我们的电能已经成为一种非常有限的资源。随着现代社会的发展，需要越来越多的电能。但是批量生产、输送和电能的低污染利用已经成为了一个非常困难的问题。电能要经历从生产，输送到最终使用等一系列环节。机械能的产生需要一些像石油、天然气、原子能和氢能等原始能源通过机电能量转换装置得到。更精确地说，各种能源变换为机械能后，再通过一个发电机将其转化为电能，电能的电压和频率根据适当的目的是来进行控制。在发达国家，超过 60% 的电能再次转化为机械能供以后使用。因此，在电能的整个生产和消费过程中，工程上最为关键的领域是电压、电流、频率的有效控制和电机的恰当控制。在过去的 30 年里，我的学术兴趣是电机控制并且一直投身于该领域的研究与开发。本书用于和我的同行们共同分享这些经历。

即便一些小的研究成果也不是一个人取得的，我把本书归功于其他人的共同努力。首先，我需要提到的是我在首尔国立大学读硕士和博士时的指导老师——Min-ho Park 教授，是他打开了我通往电力电子和电机控制领域的大门。其次，是我最为尊敬的教授，同时也是我的岳父，Jongsoo Won。他教授了我电机的相关课程，我也从他那里得到了很多该领域内的非常好的日常参考书。最后，我要感谢 Thomas Lipo 教授，是他接收我作为麦迪逊市威斯康星大学的一名访问学者。在威斯康星大学的两年里，我对电机控制的理解和学习以非常快的速度在提升。我也非常感激在威斯康星大学的同志和同事们，以及首尔大学的一些教授和学生们，还有我访问过的一些学校。正是由于与这些人的交流探讨，才会有今天这本书。通过交谈和讨论，我现在能够更加深刻地理解电机控制中的一些问题和解决方案。还有，要是

没有我以前硕士生和博士生的辛勤工作，也就不会有这本书。他们宝贵的时间和付出都凝结在了这本书中，本书也总结和整理了我们在过去 20 年中的科研成果。值得一提的是，很多博士和硕士论文就是这本书的基础。第 1、4、5、6 和 7 章中的习题和附录 A 来源于我和工业界大量合作的研究成果，为此我要感谢这些公司和人员。

本书将以下面的顺序展开：第 1 章论述了电气传动系统的特点和相关技术的发展趋势，并且第 1 章解释了一些贯穿全书的电机基础知识，也有对典型电机驱动负载特性的描述。在许多章节末尾的问题中，有一些我设计和测试过的电机系统实例。在解决这些问题的同时，也可以了解一些实际工业中的知识。

在第 2 章中，探讨了电机的基本结构和运行原理，包括把电能转化为机械能的电动机和把机械能转化为电能的发电机。通过引入了一些电机的稳态等效电路来理解电机的稳态特性和稳态控制。也就是说，这里讨论的是一些从电动机角度来观看的电机控制特性。另外，也将对基于功率半导体器件的功率变换器进行电路等效模型的建模。在第 3 章中，介绍了使用参考坐标理论进行交流电机中物理变量的变换。通过把时变微分方程变为时不变微分方程，使得交流电机的理解和分析变得容易。三相系统中 a、b、c 三相的电压、电流和磁通等电量可以转换为 $d-q-n$ 正交坐标下的变量，这里坐标轴之间的磁耦合为零。这样一来，在三相平衡运行时，三相系统可以仅通过 $d-q$ 坐标下的参数容易地表达出来。彼此相互正交的 $d-q$ 轴参数可以通过一个复数容易地表示出来，并且复数的实部代表 d 轴参数，虚部代表 q 轴参数。从 a、b、c 三相到直角坐标下的变换可以通过复矢量代数来实现。本书中将会用到复矢量的概念。第 4 章中将论述电机和功率变换器的一些控制算法，因此本章是本书的精华。首先，将介绍有源阻尼的概念，它是一种状态反馈控制。接下来将描述在反馈方式中如何调节电流环、速度环和位置环。为了去调节这些物理量，会介绍用于变量测量的传感器，如电流传感器、位置/速度传感器。如果变量是不可测量的，那么为了调节电机的速度就会涉及状态观测器的相关知识。此外，还会介绍一些提高电机控制性能的技巧。最后，会介绍检测交流电源相角的算法和控制功率变换器直流电压的算法。本章最后的大多数问题是来源于工业合作，解答这些问题会极大地提高对本章内容的理解和掌握。

第 5 章讲述矢量控制的概念。基本上电机在励磁的情况下，可以把电流（转矩）转换为转矩（电流）。在一些高精度的运动控制系统中，加速度、速度、位置都需要根据它们的参考值来进行瞬时调节，而瞬时的转矩控制是先决条件。一台电机的瞬时转矩是磁链矢量和线矢量（电流）的矢量积。因此，为了实时地控制转矩，应该实时地控制磁链和电流矢量。相应地，不仅仅是磁链和电流的幅值，两个矢量之间的角度也应该被实时地控制。这也是“矢量控制”名字的来源。本章将介绍几种不同类型电机的瞬时转矩控制的原理。在第 6 章中，将介绍应用于实际工业上的交流电机无速度/位置传感器驱动系统的控制算法。基于反电动势的无传感

器控制算法被广泛地研究,并且其中一些已经商业化。这一章会讨论它们的优缺点。因为反电动势的幅值随着速度的减小而减小,因此基于反电动势无传感器控制方法的性能在低速情况下将明显下降。在零速度或者零频率情况下,为了保持转矩的可控性,交流电机不能运行在无传感器控制情况下。为了从根本上避开这个问题,在本章中,将介绍利用交流电机凸极特性的无传感器控制算法。通过给交流电机加一些激励信号,根据转子磁通位置就可以测量出电感的变化。根据电感的变换就可以估计转子磁链的位置或者转子位置本身。对于永磁同步电机,配备有这种加脉动高频电压信号算法的通用变频器已经市场化。第7章针对前面几章中的控制算法在具体实现时的实际问题进行讨论并给出可能的解决方案。首先,会探讨和死区时间相关的问题。为了减少死区效应的影响,会介绍一些解决这些问题的对策。由于需要准确的电流测量结果,因此将会研究电流传感器的偏置、刻度误差和测量系统的延时问题。另外,还将介绍如何减小影响电机传动系统控制性能的不利因素。最后由于控制算法采用的是数字信号处理,这可能会有一些来自采样电路、保持器、算法执行时间和功率变换器的PWM方面的延时。这些延时可能会限制电机传动系统的控制性能。在这一章中会讨论处理这些来自数字信号处理过程中延时问题的一些措施。在附录A中,介绍了一些辨识电机参数的方法。为了把本书介绍的控制算法用于电机控制,应该对电机的参数进行辨识,这样可以方便调节器的增益设置,控制器限幅值、参考值和反馈值等等。这些电机参数可以通过电机厂家的性能测试数据和设计数据来进行计算和估计,但是这些数据在实际现场应用中又不容易得到。附录A介绍的大多数方法都不需要任何特殊测量仪器,而是只依赖于电机传动系统的控制器本身。在附录B中,简要地描述了在 $d-q-n$ 坐标系下对三相交流电机建模的矩阵代数。对于计算机仿真和电机的实时控制编程而言,矩阵代数可能比第2章提及的复矢量概念更容易理解。

要做到对本书的全面理解,需要有大学物理和现代线性控制理论等基础知识。电路理论和基本的控制理论也是需要的,另外电力电子和电机学的理论知识也十分必要。本书适合作为研究生课程教材或者是相关领域工程师的参考书籍。作为一本研究生教材,第1~5章适合作为一学期的内容。更为准确地说,第1、3和4章要详细地解释。在理解了第3和4章后,就更容易进行第5章的学习。第6章是一个好的小结,同时也是理解交流电机无传感器控制的起始点。第7章和附录A对于那些实现控制算法的学生和工程师们是很有帮助的。作为工业领域的一本参考书,除了本书的基本理论外,第1、4、5、6和7章中的习题和附录A中的算法都是很有帮助的。本书中的大多数习题都曾作为作者在首尔大学执教20年中的期中/期末考试和课后作业中的习题。我十分感激那些上这门课并且为解答这些习题付出努力的学生们。还有,一些习题的内容和背景来自于在很多公司里完成的各种研究。这些问题都是非常实际的。为了理解本书的内容,我强烈建议做一些实际电机和功率逆变器的实验。如果无条件实现,那么至少要根据实际情况去做计算机仿真。

对于我的两个女儿，Yoojin 和 Hyojin，本书也有她们的功劳，因为她们理解忙碌的父亲。另外，是我母亲的关心和照料才有今天的我。最后，我要把最特别的感谢和爱给予我的妻子 Miyun，她总是在我的身边陪伴着我，我所取得的成就中至少有一半应该属于她。

Seunj-Ki Sul
于韩国首尔

读者需求调查表

个人信息

姓名:		出生年月:		学历:	
联系电话:		手机:		E-mail	
工作单位:				职务:	
通讯地址:				邮编:	

1. 您感兴趣的科技类图书有哪些?

☐自动化技术 ☐电工技术 ☐电力技术 ☐电子技术 ☐仪器仪表 ☐建筑电气
☐其他 () 以上各大类中您最关心的细分技术 (如 PLC) 是: ()

2. 您关注的图书类型有:

☐技术手册 ☐产品手册 ☐基础入门 ☐产品应用 ☐产品设计 ☐维修维护
☐技能培训 ☐技能技巧 ☐识图读图 ☐技术原理 ☐实操 ☐应用软件
☐其他 ()

3. 您最喜欢的图书叙述形式为:

☐问答型 ☐论述型 ☐实例型 ☐图文对照 ☐图表 ☐其他 ()

4. 您最喜欢的图书开本为:

☐口袋本 ☐32 开 ☐B5 ☐16 开 ☐图册 ☐其他 ()

5. 您常用的图书信息获得渠道为:

☐图书征订单 ☐图书目录 ☐书店查询 ☐书店广告 ☐网络书店 ☐专业网站
☐专业杂志 ☐专业报纸 ☐专业会议 ☐朋友介绍 ☐其他 ()

6. 您常用的购书途径为:

☐书店 ☐网络 ☐出版社 ☐单位集中采购 ☐其他 ()

7. 您认为图书的合理价位是 (元/册):

手册 () 图册 () 技术应用 () 技能培训 () 基础入门 ()
其他 ()

8. 您每年的购书费用为:

☐100 元以下 ☐101 ~ 200 元 ☐201 ~ 300 元 ☐300 元以上

9. 您是否有本专业的写作计划?

☐否 ☐是 (具体情况:)

非常感谢您对我们的支持,如果您还有什么问题欢迎和我们联系沟通!

地址:北京市西城区百万庄大街 22 号 机械工业出版社电工电子分社 邮编:100037

联系人:张俊红 联系电话:13520543780 传真:010-68326336

电子邮箱: buptzih@163.com (可来信索取本表电子版)

编著图书推荐表

姓名		出生年月		职称/职务		专业	
单位				E-mail			
通讯地址						邮政编码	
联系电话			研究方向及教学科目				
个人简历（毕业院校、专业、从事过的以及正在从事的项目、发表过的论文）							
您近期的写作计划有：							
您认为目前市场上最缺乏的图书及类型有：							

地址：北京市西城区百万庄大街 22 号 机械工业出版社，电工电子分社
 邮编：100037 网址：www.cmpbook.com
 联系人：张俊红 电话：13520543780/010-88379768 010-68326336（传真）
 E-mail：buptzih@163.com（可来信索取本表电子版）

目 录

译者序

原书前言

第 1 章 导论	1
1.1 引言	1
1.1.1 电机传动系统	3
1.1.2 电机传动系统的发展趋势	4
1.1.3 功率半导体器件的发展趋势	6
1.1.4 控制电子学的发展趋势	6
1.2 力学基础知识	7
1.2.1 基本定律	7
1.2.2 推力和转矩	7
1.2.3 旋转物体的转动惯量	8
1.2.4 刚体的运动方程	10
1.2.5 功率和能量	13
1.2.6 物理变量的连续性	13
1.3 典型机械负载的转矩速度曲线	14
1.3.1 风扇、水泵和鼓风机	14
1.3.2 位能型负载：起重机和升降机	15
1.3.3 牵引负载（电动汽车和电力机车）	16
1.3.4 张力控制负载	16
习题	18
参考文献	26
第 2 章 电机和功率变换器的基本结构和建模	28
2.1 直流电机的结构和建模	28
2.2 稳态运行分析	32
2.2.1 他励直流电机	32
2.2.2 串励直流电机	35
2.3 直流电机的瞬态分析	36
2.3.1 他励直流电机	37
2.4 驱动直流电机的电力电子电路	39
2.4.1 静态沃德—伦纳德系统	40

2.4.2 四象限斩波系统	40
2.5 旋转磁动势	41
2.6 同步电机稳态分析	45
2.7 直线电机	48
2.8 同步电机容量曲线	49
2.8.1 带有励磁绕组的圆形转子同步电机	49
2.8.2 永磁同步电机	50
2.9 同步电机的参数变化	51
2.9.1 定子电阻和励磁绕组电阻	51
2.9.2 同步电感	51
2.9.3 反电动势常数	53
2.10 异步电机稳态分析	54
2.10.1 异步电机稳态等效电路	56
2.10.2 恒定气隙磁通运行	59
2.11 异步电机发电运行	61
2.12 异步电机参数变化	62
2.12.1 转子电阻 R_r 的变化	62
2.12.2 转子漏感 L_{lr} 的变化	63
2.12.3 定子电阻 R_s 的变化	63
2.12.4 定子漏感 L_{ls} 的变化	64
2.12.5 励磁电感 L_m 的变化	64
2.12.6 铁损电阻 R_m 的变化	65
2.13 异步电机分类 (根据速度—转矩特性)	65
2.14 准瞬态分析	67
2.15 异步电机容量曲线	67
2.16 直流电机和交流电机的比较	69
2.16.1 笼型异步电机和他励直流电机的比较	69
2.16.2 永磁同步电机和他励直流电机的比较	71
2.17 基于稳态特性的异步电机调速控制	71
2.17.1 通过控制电压来对异步电机进行调速	71
2.17.2 基于恒定气隙磁通 (恒 V/F) 的异步电机调速控制	72
2.17.3 基于实际速度反馈的异步电机调速控制	72
2.17.4 基于定子电流幅值反馈的改进型恒定气隙磁通控制	74
2.18 功率变换器建模	74
2.18.1 三相二极管/晶闸管整流器	74
2.18.2 PWM 升压型整流器	76
2.18.3 二象限双向 DC—DC 变换器	78
2.18.4 四象限 DC—DC 变换器	78

2.18.5 三相 PWM 逆变器	80
2.18.6 矩阵式变换器	81
2.19 基于标幺值的参数转换	82
习题	83
参考文献	88
第3章 参考坐标系变换和三相交流电机的瞬态分析	89
3.1 复矢量	90
3.2 基于空间复矢量的异步电机 $d-q-n$ 建模	92
3.2.1 异步电机在 $d-q-n$ 坐标轴上的等效电路	92
3.2.2 异步电机的转矩	97
3.3 基于空间复矢量的同步电机 $d-q-n$ 建模	99
3.3.1 同步电机在 $d-q-n$ 坐标轴上的等效电路	99
3.3.2 同步电机的转矩	107
3.3.3 永磁同步电机的等效电路和转矩	110
3.3.4 同步磁阻电机	113
习题	114
参考文献	119
第4章 电机和功率变换器的调节器设计	120
4.1 有源阻尼	122
4.2 电流调节器	123
4.2.1 电流的测量	123
4.2.2 三相可控整流器的电流调节器	125
4.2.3 PWM 斩波驱动直流电机的电流调节器	130
4.2.4 抗饱和	132
4.2.5 交流电流调节器	134
4.3 转速调节器	139
4.3.1 电机转子的转速/位置测量	140
4.3.2 基于增量式编码器的速度估计	143
4.3.3 基于状态观测器的速度估计	147
4.3.4 PI/IP 速度调节器	155
4.3.5 基于加速度的改进转速控制	160
4.3.6 带抗饱和和功能的速度调节器	162
4.4 位置调节器	163
4.4.1 比例和比例积分 (P-PI) 调节器	163
4.4.2 速度和加速度前馈控制	164
4.5 交流电压相角的检测	165

4.5.1 同步参考坐标系下的相角检测	165
4.5.2 同步参考坐标系下基于正序电压的相角检测	168
4.6 电压调节器	169
4.6.1 PWM 升压型整流器直流环节的电压调节器	169
习题	172
参考文献	179
第5章 矢量控制	182
5.1 瞬时转矩控制	182
5.1.1 他励直流电机	182
5.1.2 面装式永磁同步电机	184
5.1.3 内嵌式永磁同步电机	185
5.2 异步电机的矢量控制	187
5.2.1 直接矢量控制	187
5.2.2 间接矢量控制	192
5.3 转子磁链估计器	193
5.3.1 基于异步电机定子电压方程的电压模型	193
5.3.2 基于异步电机转子电压方程的电流模型	194
5.3.3 混合转子磁链估计器	194
5.3.4 改进的混合磁链估计器	195
5.4 弱磁控制	196
5.4.1 交流电机的电压和电流约束	196
5.4.2 转子参考坐标系电流平面上的永磁交流电机工作区	197
5.4.3 永磁同步电机的弱磁控制	203
5.4.4 异步电机的弱磁控制	206
5.4.5 异步电机的磁链调节器	210
习题	211
参考文献	222
第6章 交流电机无位置/速度传感器控制	223
6.1 异步电机的无速度传感器控制	225
6.1.1 模型参考自适应系统	225
6.1.2 自适应速度观测器	229
6.2 面装式永磁同步电机的无速度传感器控制	234
6.3 内嵌式永磁同步电机的无速度传感器控制	237
6.4 通过注入高频信号的无速度传感器控制	239
6.4.1 凸极转子电机	241
6.4.2 无凸极转子的交流电机	242

习题	251
参考文献	254
第 7 章 实际问题	258
7.1 死区引起的输出电压畸变及其补偿方法	258
7.1.1 死区影响的补偿	259
7.1.2 零电流钳位 (ZCC)	259
7.1.3 半导体开关器件杂散电容引起的电压畸变	261
7.1.4 开关时刻的预测	263
7.2 相电流测量	266
7.2.1 电流测量系统中延时的建模	266
7.2.2 电流测量中的偏置和定标误差	267
7.3 电流环中的数字信号处理问题	272
7.3.1 数字延迟造成的电流调节误差的建模和补偿	273
7.3.2 电流采样误差	276
习题	279
参考文献	282
附录	283
附录 A 电机参数的测量和估计	283
A.1 参数估计	283
A.1.1 直流电机	283
A.1.2 异步电机参数的估计	285
A.2 基于驱动系统调节器的电机参数估计	288
A.2.1 反馈控制系统	288
A.2.2 直流电机的反电动势常数 K	289
A.2.3 三相交流电机的定子绕组电阻 R_s	289
A.2.4 异步电机参数	291
A.2.5 永磁同步电机	294
A.3 机械参数的估计	299
A.3.1 基于机械方程的估计	299
A.3.2 基于积分过程的估计	300
参考文献	303
附录 B 基于矩阵方程的 d - q 建模	303
B.1 参考坐标系和变换矩阵	303
B.2 基于变换矩阵的异步电机 d - q 建模	307
B.3 基于变换矩阵的同步电机 d - q 建模	310

第 1 章 导 论

1.1 引言

人类是从几百万年前生活在非洲的猿人进化而来，解决基本的食物需求、穿着和荫蔽是全人类最关心的问题。随着人们生活水平的提高，商品数量与日俱增。所有这些日用品都是通过加工自然资源或者回收现有资源获得的。在这些过程中，能源是必不可少的。人类文明的发展取决于能源的种类和形式。由于对畜力的利用，才得以形成农业文明。工业革命始于 18 世纪蒸汽机的发明。19 世纪内燃机的发明使得工业生产的效率大大提高。在 19 世纪电机被发明后，电机产生的机械能是人类有史以来最好的能源。除去交通领域，它是使用最广泛的机械能源。尽管电能从第一级到最后一级的总效率最多只有 40%，但它依然是最便于控制和转化为其他形式能源的能源。所以，以电机为基础的电动机械能是当今工业社会的基础。最近，即使在内燃机作为主要机械能统治了近 100 年的交通领域，将电机作为牵引的主要动力也被应用于电动汽车、混合动力汽车和电推进船舶中。按照这种趋势，到 21 世纪中叶之前，绝大多数的机械功率将从机电能量转换中获得。

电机相比内燃机和汽轮机，有以下 9 个优点^[1]：

1) 从驱动电子表的电机到抽水蓄能的驱动电机，其功率范围可以从毫瓦级别到百万瓦级别。

2) 从几万转的高速离心分离机，到百万吨的矿山钢铁生产线，电机的运行转速和能提供的转矩范围非常宽。

3) 电机很容易适应各种外部环境，例如真空、水和极端环境。相比内燃机，电机的内部不存在排放问题，它的振动和噪声较小，并且对环境是友好的。

4) 电机的响应速度是内燃机和汽轮机的 10 倍以上。

5) 运行效率高，空载或待机模式下的损耗更小。

6) 可以容易地改变推力（转矩）和运动（旋转）的方向。

7) 可以容易地控制转矩的大小并且不受运动（旋转）方向的影响。

8) 电机可以被设计成各种形式，例如碟形、筒形、旋转形以及直线形。它可以被安置在任何需要的地方。

9) 电机由电驱动，其控制系统可以很容易地和现代信息处理设备相兼容。

随着电力电子、电磁技术、绝缘技术以及信息技术的发展,相比于内燃机和汽轮机,电机的上述优势已进一步得到强化。尤其是近几年稀土磁材料,例如钕铁硼等铁磁材料的发展,使得电机的推力(转矩)密度可以和液压系统相媲美。基于液压的运动控制系统将逐渐被电机所取代。随着电力电子技术的发展,可以很方便地使用信息处理系统直接控制电机驱动系统,而且驱动系统可以实现自动化而不需要额外的硬件。尽管电机有这些优点,由于它需要一直连接在电网上,电机在牵引系统中只是得到了有限的应用。最近为了减少污染,电动汽车正逐渐被人们所关注。作为能量储存装置,由于电池的性能有限,纯电动汽车的普及还需要一定的时间。在这样的情况下,从内燃机获得部分或者全部能量来驱动电机的混合动力汽车已经比较成熟并且已经进入实用阶段。

在1830年, Jacobi 发明了直流电机, Ferraris 和 Tesla 发明了异步电机,在过去的150年中,电机已经发展成为主要的机械能来源。在现代工业社会,60%的电能被用在电机上。这其中又有80%被用在异步电机上^[2]。基于旋转磁场的异步电机在早年间的发展情形如图1.1所示,图1.2所示是现代电机。

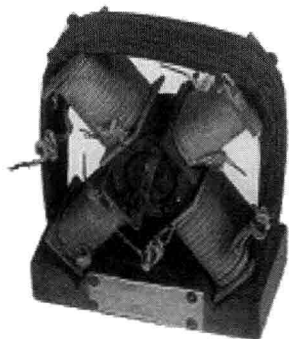


图 1.1 早年间的电机

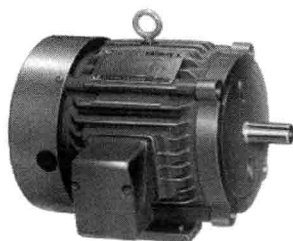


图 1.2 现代电机

由于绝缘和磁性材料的发展,电机的功率密度(输出功率与重量之比)和价格都有了很大的改善。1890年,一个5hp[⊖]的电机重达454kg,价格900美元;1957年,变成了60kg,110美元;1996年变成了22kg,50美元^[3]。

图1.3中,经过几年的发展,这种10hp、4级、完全封闭的异步电机存在多种外形尺寸^[4]。这种体积减小、质量减轻的趋势将继续下去,同时人们会持续改进电机的效率以节约电能和有利于环保。从发明到现在,异步电机已经有80年的历史,它可以在50Hz或者60Hz的公用电网下运行,转速几乎恒定不变。然而,在1960年晶闸管被发明后,可以在很宽的范围内改变输入电压的幅值和频率,电机本身也被设计成能适应这些变压变频(VVVF)的电源^[5]。

⊖ 1hp = 745.700W——译者注。