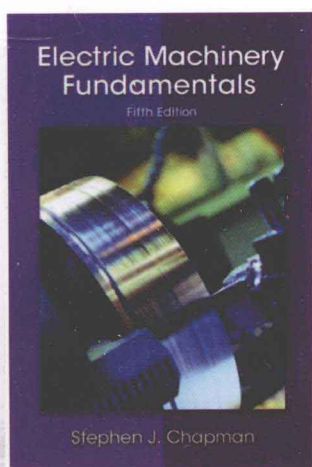


电气工程、自动化专业规划教材

Mc  
Graw  
Hill

# 电机学(第五版)

Electric Machinery Fundamentals  
Fifth Edition



【美】 Stephen J. Chapman 著  
刘新正 苏少平 高琳 丁文 译



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

电气工程、自动化专业规划教材

# 电机学(第五版)

Electric Machinery Fundamentals, Fifth Edition

[美] Stephen J. Chapman 著

刘新正 苏少平 高琳 丁文译

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书是关于电机学的经典教材。全书内容涉及电机原理、变压器、交流电机、同步发电机、同步电动机、感应电动机、直流电机、直流电动机和发电机、单相及特种电动机等，附录内容包括三相电路、线圈节距及分布绕组、同步电机的凸极理论、常数及转换系数表。全书叙述清晰，图文并茂，例题、习题丰富，并结合MATLAB进行了大量的仿真分析。

本书可作为电气工程、自动化专业学生的教材，也可供从事该领域工作的工程技术人员学习参考。

Stephen J. Chapman, *Electric Machinery Fundamentals, Fifth Edition.*

ISBN: 978-0-07-352954-7, Copyright © 2012 by The McGraw-Hill Companies, Inc.

Original language published by The McGraw-Hill Companies, Inc. All rights reserved. No part of this publication may be reproduced or distributed in any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

Simplified chinese edition published by McGraw-Hill Education (Asia) Co. and Publishing House of Electronics Industry. Copyright © 2012.

本书中文简体字翻译版由美国麦格劳-希尔教育出版(亚洲)公司授予电子工业出版社。未经出版者预先书面许可，不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

本书封面贴有 McGraw-Hill 公司激光防伪标签，无标签者不得销售。

版权贸易合同登记号 图字：01-2011-4338

### 图书在版编目(CIP)数据

电机学：第5版/（美）查普曼（Chapman, S. J.）著；刘新正等译. —北京：电子工业出版社，2012.6

书名原文：Electric Machinery Fundamentals, Fifth Edition

电气工程、自动化专业规划教材

ISBN 978-7-121-17114-7

I. ①电… II. ①查… ②刘… III. ①电机学—高等学校—教材 IV. ①TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2012）第 101953 号

策划编辑：谭海平

责任编辑：谭海平 特约编辑：王 崧

印 刷：

装 订：三河市鑫金马印装有限公司

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本：787×1092 1/16 印张：27 字数：777.6 千字

印 次：2012 年 6 月第 1 次印刷

定 价：69.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线：(010)88258888。

# 译者序

由 Stephen J. Chapman 所著的《电机学》自首次出版以来已再版四次，是一本广受好评的电机工程领域的经典教材。我们受电子工业出版社委托翻译新近出版的本教材第五版，希望给广大读者呈现一本具有鲜明特色的电机学经典之作。

本教材的作者 Stephen J. Chapman 在电气工程领域的教学和科研经历广泛，多年的教学工作以及在工程领域的任职背景，使作者在这本教材的多次再版中不断融入电机学科的新进展，并结合新的工程应用背景和发展前景对教材内容进行删减和更新，与时俱进，具有鲜明的时代特色。

本教材的总体框架和各章节的基本内容与目前国内电气工程学科所采用的电机学教材类似，但是在内容呈现和讲述方式上有其独到之处。例如，教材在第 1 章就基于一个直线直流电机模型，分析实际电机的启动过程以及作为电动机和发电机运行的工作状态，使读者初步了解电机的工作原理和分析方法，简明易懂，非常有助于对后续旋转电机的理解；在讲述交、直流旋转电机的工作原理时，都是从单个线圈构成的简单电机模型入手，完整地分析电机内部的感应电动势和电磁转矩等，然后再将这些基本概念扩展到实际电机。这种讲述方式可以使读者更好地认识和关注电机的本质，而不是在初学时就陷入实际电机庞杂的结构和具体细节中。教材中对由单个线圈构成的交、直流电机模型分析内容的如此编排，看似重复和烦琐，实则体现了作者的良苦用心和独具匠心，因为作者正是考虑了不同课程安排对内容的取舍；在三相变压器部分，分析了用两台变压器实现三相变换的特殊联结方式，这些内容国内教材中很少提及。

本教材论述语言生动流畅，讲解深入浅出，叙述时多采用问答形式，使读者与作者间产生互动，增强了本教材的可读性。作者还善于用实例来描述电机的一些重要概念和特性，例如在讲述直流电机的“飞车”概念时，采用叙述故事的方式来描述直流电动机运行过程中励磁回路突然开路对电机造成的影响，使读者仿佛身临其境，充分认识到避免“飞车”的重要性。对于电机中的非线性问题，除了介绍传统的图解分析或定性分析以外，教材还引入具有强大工程计算功能的 MATLAB 软件进行定量分析计算，充分展现了教材的时代特征。教材中配有相关的例题和习题，并在教材的配套网站上提供有相关数据，以方便广大读者学习。

本教材的译者均为西安交通大学电气工程学院教师，从事电机工程学科的教学和科研工作。其中，第 1 章、第 2 章、第 6 章以及附录由刘新正翻译，并负责全书其他各章的校译和统稿；第 3 章、第 4 章和第 5 章由苏少平翻译，并校译第 1、2、6 章及附录；第 7 章和第 8 章由高琳翻译；第 9 章由丁文翻译。

翻译中力求忠实、准确地反映原著内容，保持原著语言特色，但如果完全尊重原文的论述和专业词汇，会使译文与国内同类中文教材的表述有差别。因此，翻译时给其中的一些专业术语增加了或者直接采用了国内名称。例如，本教材直流电机的磁中性线，如果按照原文翻译就是磁中性面，显然不符合国内惯例。翻译中错误与不妥之处，敬请广大读者指正，并欢迎反馈意见到 liuxz@mail.xjtu.edu.cn。

# 前 言

自从本书第一版出版以来的这些年间，更大功率和更加完善的电机固态驱动装置的研发有了迅猛的进展。本书的第一版中曾经论述到，直流电机在需要调速的应用场合是首选方法。这一表述现今已不再准确。当今，速度控制应用场合最常选用的是带有电动机固态驱动器的感应电动机系统。直流电机已主要限定在已有可用直流电源的特殊应用场合，例如汽车电气系统等。

本书的第三版已对内容做了大幅度的重新组织，以便反映出这些变化。有关交流电动机和发电机的内容现在涵盖在第3章到第6章，先于有关直流电机的内容出现。此外，与早前版本相比，缩减了有关直流电机的篇幅。本版仍延续了这一相同的基本架构。

另外，第五版中删除了以前的第3章中关于固态电子学的内容。来自于本书使用者的反馈意见表明，这些内容对意欲快速了解者来说太过详细，但对固态电子学课程来说又不够详尽。由于很少有教师采用这些材料，所以已将其从这一版中删除了，但作为补充材料添加到了本书的网站上。继续使用该章中材料的教师或学生，可以免费下载。

在每章的开头增加了学习目标，以促进学生学习。

第1章是关于电机基本概念的介绍，并将这些概念应用到一个直线直流电机，这可能是最简单电机的例子。第2章涵盖了变压器的内容，其不是旋转电机，但享有很多类似的分析方法。

从第2章以后，教师可以选择先讲授直流电机，或者先讲授交流电机。第3章到第6章涵盖了交流电机的内容，第7章和第8章涵盖了直流电机的内容。各章编排完全独立，以便教师可以按照最适合其需要的次序讲授。例如，重点在于交流电机的一学期课程，可以选择第1章至第6章，剩余时间用在直流电机上。重点在于直流电机的一学期课程，可以选择第1章、第2章、第7章和第8章，其他剩余时间用在交流电机上。第9章为单相和特种电动机，包括通用电动机、步进电动机、无刷直流电动机和罩极电动机。

修订并修正了习题和各章的结尾部分，在上一版的基础上，有超过70%的习题为新的或者修改过的。

最近几年，在讲授电气工程和电气技术学生所采用的方法上有了很大的变化。像MATLAB这类卓越的分析工具已广泛应用于大学工程类课程的教学。这些工具使非常繁杂的计算变得简单易行，也使得学生可以交互式地探索问题的特征。

本教材不讲授MATLAB<sup>①</sup>，认为学生通过以前的学习已经熟悉了其使用方法。同时，本书也不依赖于学生是否有MATLAB软件。如果有MATLAB可以使用，则可以充实学习经历。但如果没有MATLAB可用，则只需要跳过涉及MATLAB的例题，本教材其余部分的安排仍然是合理的。

在过去的25年，如果没有许多人的帮助，要完成这本书简直是不可能的。我非常欣喜地看到，

---

① MATLAB是MathWorks公司的注册商标。The MathWorks, Inc., 3 Apple Hill Drive, Natick, MA 01760-2098 USA, E-mail: info@mathworks.com; www.mathworks.com.

过去了这么些年，这本书仍然颇受欢迎，很大程度上是由于审阅者提供的极好反馈意见。就本版来说，我要特别感谢：

Ashoka K.S. Bhat, *University of Victoria*

William Butuk, *Lakehead University*

Shaahin Filizadeh, *University of Manitoba*

Jesús Fraile-Ardanuy, *Universidad Politécnica de Madrid*

Riadh Habash, *University of Ottawa*

Floyd Henderson, *Michigan Technological University*

Rajesh Kavasseri, *North Dakota State University*

Ali Keyhani, *The Ohio State University*

Andrew Knight, *University of Alberta*

Xiaomin Kou, *University of Wisconsin–Platteville*

Ahmad Nafisi, *California Polytechnic State University, San Luis Obispo*

Subhasis Nandi, *University of Victoria*

M. Hashem Nehrir, *Montana State University–Bozeman*

Ali Shaban, *California Polytechnic State University, San Luis Obispo*

Kuang Sheng, *Rutgers University*

Barna Szabados, *McMaster University*

Tristan J. Tayag, *Texas Christian University*

Rajiv K. Varma, *The University of Western Ontario*

***Stephen J. Chapman, Melbourne, Victoria, Australia***

# 作者简介

## **Stephen J. Chapman**

1975年获路易斯安那州立大学电气工程学士学位，1979年获佛罗里达中央大学电气工程硕士学位，曾就读于莱斯大学继续更高层次的研究生阶段学习。

从1975年到1980年，以高级职员身份就职于美国海军，在位于佛罗里达州奥兰多的美国海军核动力学院讲授电气工程。从1980年到1982年，受雇于休斯敦大学，在技术学院运作电力系统项目。

从1982年到1988年，以及从1991年到1995年，以技术雇员的身份就职于麻省理工学院的林肯实验室，分别工作在位于马萨诸塞州列克星敦的主体实验室和位于马绍尔群岛共和国夸贾林环礁的现场站点。其时，从事雷达信号处理系统的研究工作，并最终成为夸贾林环礁现场站点四个大的军用探测雷达站（TRADEX、ALTAIR、ALCOR和MMW）的领导。

从1988年到1991年，先生为休斯敦地壳开发公司的研究工程师，从事地震信号处理研究。同时受雇于休斯敦大学，继续兼职从事教学工作。

目前是位于墨尔本的澳大利亚BAE系统的系统建模和运行分析管理者，是电气电子工程师学会（以及其多个分会）的高级会员，也是澳大利亚工程师协会的会员。

# 目 录

第 1 章 电机原理入门	1
1.1 电机、变压器与日常生活	1
1.2 单位和符号的注释	2
1.3 旋转运动、牛顿定律及功率关系	2
1.3.1 角位置 $\theta$	2
1.3.2 角速度 $\omega$	2
1.3.3 角加速度 $\alpha$	3
1.3.4 转矩 $\tau$	3
1.3.5 牛顿旋转定律	4
1.3.6 功 $W$	4
1.3.7 功率 $P$	5
1.4 磁场	5
1.4.1 磁场的产生	6
1.4.2 磁路	7
1.4.3 铁磁材料的磁特性	12
1.4.4 铁心中的能耗	15
1.5 法拉第定律——时变磁场的感应电动势	17
1.6 导线上电磁力的产生	19
1.7 磁场中运动导体上的感应电动势	20
1.8 直线直流电机——一个简单例子	21
1.8.1 直线直流电机的起动	21
1.8.2 直线直流电机用做电动机	23
1.8.3 直线直流电机用做发电机	24
1.8.4 直线电机起动问题	25
1.9 单相交流电路中的有功功率、无功功率和视在功率	28
1.9.1 功率计算式的变形	30
1.9.2 复功率	30
1.9.3 阻抗角、电流相位角和功率之间的关系	31
1.9.4 功率三角形	31
1.10 小结	32
思考题	33
习题	33
参考文献	39



<b>第 2 章 变压器</b> .....	40
2.1 变压器在现代生活中的重要性 .....	40
2.2 变压器的类型及结构 .....	41
2.3 理想变压器 .....	42
2.3.1 理想变压器中的功率 .....	43
2.3.2 变压器的阻抗变换 .....	44
2.3.3 含有理想变压器电路的分析 .....	44
2.4 实际单相变压器的运行理论 .....	47
2.4.1 变压器的电压比 .....	47
2.4.2 实际变压器中的磁化电流 .....	49
2.4.3 变压器中的电流比和标记惯例 .....	51
2.5 变压器的等效电路 .....	52
2.5.1 实际变压器的精确等效电路 .....	52
2.5.2 变压器的近似等效电路 .....	53
2.5.3 变压器模型中各参数值的确定 .....	54
2.6 标幺值度量体系 .....	57
2.7 变压器的电压调整率和效率 .....	61
2.7.1 变压器相量图 .....	61
2.7.2 变压器效率 .....	62
2.8 变压器抽头和电压调整 .....	66
2.9 自耦变压器 .....	67
2.9.1 自耦变压器中的电压和电流关系 .....	68
2.9.2 自耦变压器的视在功率定额优势 .....	69
2.9.3 自耦变压器的内部阻抗 .....	71
2.10 三相变压器 .....	71
2.10.1 三相变压器的联结组 .....	71
2.10.2 三相变压器的标幺值体系 .....	75
2.11 用两台变压器实现三相变换 .....	77
2.11.1 开口 $\Delta$ (或 V-V) 联结 .....	78
2.11.2 开口 Y-开口 $\Delta$ 联结 .....	80
2.11.3 斯科特-T 联结 .....	81
2.11.4 三相 T 联结 .....	81
2.12 变压器额定值及相关问题 .....	83
2.12.1 变压器的额定电压和频率 .....	83
2.12.2 变压器的额定视在功率 .....	86
2.12.3 涌流问题 .....	87
2.12.4 变压器铭牌 .....	87
2.13 测量用变压器 .....	88
2.14 小结 .....	89
思考题 .....	89
习题 .....	90

参考文献	95
<b>第3章 交流电机基础</b>	<b>96</b>
3.1 均匀磁场中的单个线圈	96
3.1.1 单个旋转线圈中的感应电动势	96
3.1.2 载流线圈的电磁转矩	98
3.2 旋转磁场	100
3.2.1 旋转磁场推断的证明	103
3.2.2 电频率与旋转磁场转速之间的关系	104
3.2.3 旋转磁场方向的改变	105
3.3 交流电机中磁动势和磁场的分布	107
3.4 交流电机中的感应电动势	109
3.4.1 二极定子上单个线圈的感应电动势	109
3.4.2 三相线圈组中的感应电动势	111
3.4.3 三相定子电势的有效值	111
3.5 交流电机中的电磁转矩	112
3.6 交流电机中的绕组绝缘	114
3.7 交流电机功率流程和损耗	115
3.7.1 交流电机中的损耗	115
3.7.2 功率流程图	116
3.8 电压调整率和转速调整率	117
3.9 小结	117
思考题	118
习题	118
参考文献	119
<b>第4章 同步发电机</b>	<b>120</b>
4.1 同步发电机的结构	120
4.2 同步发电机的转速	123
4.3 同步发电机的感应电动势	124
4.4 同步发电机的等效电路	124
4.5 同步发电机的相量图	128
4.6 同步发电机的功率和转矩	128
4.7 同步发电机的参数测量	130
4.8 同步发电机单机运行	134
4.8.1 负载变化对同步发电机单机运行的影响	134
4.8.2 例题解析	135
4.9 交流发电机的并联运行	141
4.9.1 投入并联的条件	142
4.9.2 同步发电机并联的一般操作过程	143
4.9.3 同步发电机的频率-有功功率特性和电压-无功功率特性	144
4.9.4 发电机并联在大电网上运行	146

4.9.5 容量相近的同步发电机并联运行分析	148
4.10 同步发电机暂态过程	152
4.10.1 同步发电机的暂态稳定性	153
4.10.2 同步发电机的突然短路	153
4.11 同步发电机的额定值	156
4.11.1 电压、转速和频率额定值	156
4.11.2 视在功率和功率因数额定值	157
4.11.3 同步发电机的能力曲线	158
4.11.4 短时运行和利用率	161
4.12 小结	162
思考题	162
习题	163
参考文献	168
<b>第5章 同步电动机</b>	<b>169</b>
5.1 电动机运行的基本原理	169
5.1.1 同步电动机的等效电路	169
5.1.2 从磁场的观点看同步电动机	170
5.2 同步电动机的稳态运行	171
5.2.1 同步电动机的转矩-转速特性曲线	172
5.2.2 负载变化对同步电动机的影响	172
5.2.3 励磁电流变化对同步电动机的影响	175
5.2.4 同步电动机与功率因数补偿	178
5.2.5 同步电容器或同步补偿机	180
5.3 同步电动机的起动	181
5.3.1 通过降低供电频率起动电动机	182
5.3.2 用外部原动机起动同步电动机	182
5.3.3 用阻尼绕组起动同步电动机	183
5.3.4 阻尼绕组对电动机稳定性的影响	185
5.4 同步发电机和同步电动机比较	185
5.5 同步电动机的额定值	186
5.6 小结	186
思考题	187
习题	187
参考文献	192
<b>第6章 感应电动机</b>	<b>193</b>
6.1 感应电动机结构	193
6.2 感应电动机中的基本概念	195
6.2.1 感应电动机中电磁转矩的产生	195
6.2.2 转子转差率概念	196
6.2.3 转子的电频率	197

6.3	感应电动机的等效电路	198
6.3.1	感应电动机的变压器模型	198
6.3.2	转子电路模型	199
6.3.3	最终等效电路	201
6.4	感应电动机中的功率和转矩	201
6.4.1	损耗和功率流程图	202
6.4.2	感应电动机中的功率和转矩	203
6.4.3	感应电动机等效电路中转子铜耗与转化功率的分离	204
6.5	感应电动机转矩-转速特性	206
6.5.1	基于物理学观点的电磁转矩	206
6.5.2	感应电动机电磁转矩表达式的推导	208
6.5.3	感应电动机转矩-转速特性曲线的注解	211
6.5.4	感应电动机中的最大(牵出)转矩	212
6.6	感应电动机转矩-转速特性的改变	216
6.6.1	通过笼型转子设计控制电动机的特性	217
6.6.2	深槽和双笼转子设计	218
6.6.3	感应电动机设计类别	219
6.7	感应电动机设计趋势	223
6.8	感应电动机的起动	225
6.9	感应电动机的调速	228
6.9.1	感应电动机变极调速	229
6.9.2	改变供电频率调速	231
6.9.3	改变供电电压调速	233
6.9.4	改变转子电阻调速	233
6.10	感应电动机固态驱动器	233
6.10.1	频率(速度)调节	235
6.10.2	电压和频率模式的选择	235
6.10.3	独立调整加、减速斜坡	237
6.10.4	电动机保护	237
6.11	等效电路模型参数的确定	237
6.11.1	空载试验	237
6.11.2	测取定子电阻的直流试验	239
6.11.3	转子堵转试验	239
6.12	感应发电机	243
6.12.1	独立运行的感应发电机	243
6.12.2	感应发电机的应用	245
6.13	感应电动机额定值	246
6.14	小结	247
	思考题	248
	习题	249
	参考文献	253

<b>第 7 章 直流电机基础</b> .....	255
7.1 曲面磁极间的简单旋转回路.....	255
7.1.1 旋转回路中的感应电动势.....	256
7.1.2 旋转线圈回路输出的直流电势.....	258
7.1.3 旋转线圈回路中的电磁转矩.....	259
7.2 简单四线圈回路直流电机的换向.....	262
7.3 实际直流电机中的换向与电枢结构.....	264
7.3.1 转子线圈.....	264
7.3.2 与换向片的连接.....	266
7.3.3 叠绕组.....	266
7.3.4 波绕组.....	270
7.3.5 蛙绕组.....	271
7.4 实际电机中的换向问题.....	272
7.4.1 电枢反应.....	272
7.4.2 $Ldi/dt$ 电势.....	274
7.4.3 换向问题的解决方法.....	275
7.5 实际直流电机中的感应电动势和电磁转矩表达式.....	279
7.6 直流电机结构.....	282
7.6.1 磁极和机座结构.....	283
7.6.2 转子或电枢结构.....	284
7.6.3 换向器和电刷.....	284
7.6.4 绕组绝缘.....	285
7.7 直流电机的功率流程和损耗.....	286
7.7.1 直流电机的损耗.....	286
7.7.2 功率流程图.....	287
7.8 小结.....	287
思考题.....	288
习题.....	288
参考文献.....	291
<b>第 8 章 直流电动机和发电机</b> .....	292
8.1 直流电动机概述.....	292
8.2 直流电动机的等效电路.....	293
8.3 直流电机的磁化曲线.....	294
8.4 他励和并励直流电动机.....	295
8.4.1 并励直流电动机的端部特性.....	295
8.4.2 并励直流电动机的非线性分析.....	298
8.4.3 并励直流电动机的调速.....	301
8.4.4 励磁回路开路的影响.....	307
8.5 永磁直流电动机.....	308
8.6 串励直流电动机.....	310

8.6.1	串励直流电动机的电磁转矩	310
8.6.2	串励直流电动机的端部特性	310
8.6.3	串励直流电动机的调速	314
8.7	复励直流电动机	314
8.7.1	积复励直流电动机的转矩-转速特性	314
8.7.2	差复励直流电动机的转矩-转速特性	315
8.7.3	复励直流电动机的非线性分析	316
8.7.4	积复励直流电动机的调速	316
8.8	直流电动机起动器	317
8.8.1	直流电动机的起动问题	317
8.8.2	直流电动机起动电路	320
8.9	沃德-伦纳德系统和固态电子调速器	322
8.9.1	保护电路环节	325
8.9.2	起动/停机电路环节	326
8.9.3	大功率电子电路环节	326
8.9.4	低功率电子电路环节	326
8.10	直流电动机效率的计算	327
8.11	直流发电机概述	329
8.12	他励发电机	330
8.12.1	他励直流发电机的端部特性	330
8.12.2	端电压的调节	331
8.12.3	他励直流发电机的非线性分析	332
8.13	并励直流发电机	334
8.13.1	并励发电机的建压过程	334
8.13.2	并励直流发电机的端部特性	336
8.13.3	并励直流发电机的电压调节	336
8.13.4	并励直流发电机的分析	336
8.14	串励直流发电机	338
8.15	积复励直流发电机	339
8.15.1	积复励直流发电机的端部特性	339
8.15.2	复励直流发电机的电压调节	341
8.15.3	复励直流发电机的分析	341
8.16	差复励直流发电机	342
8.16.1	差复励直流发电机的端部特性	342
8.16.2	差复励直流发电机的电压调节	343
8.16.3	差复励直流发电机的图解分析	343
8.17	小结	344
	思考题	344
	习题	345
	参考文献	352

<b>第9章</b>	<b>单相及特种电动机</b>	<b>353</b>
------------	-----------------	------------

9.1 通用电动机 .....	353
9.1.1 通用电动机的应用 .....	354
9.1.2 通用电动机的调速 .....	354
9.2 单相感应电动机引论 .....	355
9.2.1 单相感应电动机的双旋转磁场理论 .....	356
9.2.2 单相感应电动机的交叉磁场理论 .....	358
9.3 单相感应电动机的起动 .....	360
9.3.1 绕组裂相 .....	360
9.3.2 电容起动电动机 .....	362
9.3.3 固定电容裂相和电容起动与电容运转电动机 .....	363
9.3.4 罩极电动机 .....	364
9.3.5 单相感应电动机的比较 .....	365
9.4 单相感应电动机的调速 .....	365
9.5 单相感应电动机的电路模型 .....	367
9.6 其他类型的电动机 .....	371
9.6.1 磁阻电动机 .....	372
9.6.2 磁滞电动机 .....	373
9.6.3 步进电动机 .....	374
9.6.4 无刷直流电动机 .....	377
9.7 小结 .....	379
思考题 .....	380
习题 .....	380
参考文献 .....	381
<b>附录 A 三相电路 .....</b>	<b>382</b>
<b>附录 B 线圈节距及分布绕组 .....</b>	<b>398</b>
<b>附录 C 同步电机的凸极理论 .....</b>	<b>411</b>
<b>附录 D 常数及转换系数表 .....</b>	<b>417</b>

# 第1章 电机原理入门

## 学习目标

- 学习旋转机械基础知识：角速度、角加速度、转矩和牛顿旋转定律。
- 学习怎样产生磁场。
- 理解磁路。
- 理解铁磁材料的特性。
- 理解铁磁材料中的磁滞现象。
- 理解法拉第定律。
- 理解怎样在导线上产生电磁力。
- 理解怎样在导线中产生感应电动势。
- 理解简单直线电机的运行。
- 能够处理有功功率、无功功率和视在功率。

## 1.1 电机、变压器与日常生活

电机是将机械能转换为电能或者将电能转换为机械能的装置。当这样的装置用于将机械能转换为电能时，称为发电机；当其将电能转换为机械能时，称为电动机。由于任何一种电机都可以沿任一方向转换功率，因而任何一种电机均可以既用做发电机又用做电动机。因为几乎所有实际电动机和发电机均通过磁场的作用将能量从一种形式转换为另一种形式，所以本书中只考虑利用磁场实现这种转换的电机。

变压器是与电机紧密关联的电气装置，其将一种电压等级的交流电转化为另一种电压等级的交流电。由于变压器以与发电机和电动机相同的原理工作，其实现电压等级的变换也依赖于磁场的作用，因此，通常将变压器与发电机和电动机放在一起学习。这三种电气装置在现今日常生活中随处可见。

家庭中的电动机使电冰箱、冷藏柜、吸尘器、搅拌器、空调、风扇等很多类似家用电器得以运转。在车间，电动机为几乎所有机床提供动力。当然，需要有发电机为所有这些电动机提供所使用的电力。

为什么电动机和发电机如此常用？答案非常简单。电能是一种清洁且高效的能源，易于远距离传输，且易于控制。电动机不需要像内燃发动机那样时常排气和加燃料，因而电动机非常适合用于不希望有由于燃烧引起污染的场所。而且，热能或机械能可以在远处转换成电能的形式，通过远距离传输到需要用电的地方，在家庭、办公室或者工厂中使用就可以很洁净。变压器有助于减小从电力生产地到电力使用地之间这种传输过程中的能量损失。



## 1.2 单位和符号的注释

电机和电力系统的设计和研究所属于电气工程最悠久的领域，其研究始于19世纪后期。当时，电气量单位就在国际标准化，这些单位已被全球工程师所普遍采用。伏（V）、安培（A）、欧姆（ $\Omega$ ）、瓦（W）及类似的单位，作为公制单位的一部分，一直用于描述电机中的电气量。

可是，在英语国家，机械量一直采用英制单位（英寸、英尺、磅等）来计量，电机研究中也遵循了这一惯例。因此，电机中的电气量和机械量多年间都是用不同的单位制来计量的。

1954年，基于公制单位的综合性单位制被用做国际标准。此单位制称为国际单位制（SI），并被世界上大多数国家所采用。美国实际上是唯一坚持不执行SI单位制的固执国家——即便英国和加拿大都已转为采用SI单位制。

随着时间的推移，SI单位制必将成为美国标准。而且，一些专业协会例如电气和电子工程师协会（IEEE）等，已在所有工作中标准化为公制单位。然而，许多人是在使用英制单位中成长的，这一单位制在日常使用中仍会维持很长时间。当今美国的工科学生和工程师必须熟悉这两种单位制，因为在他们的职业生涯中，这两种单位制都会用到。因此，本书中包含了采用SI和英制两种单位的习题和例题，例题中的重点是SI单位，但旧的单位制也没有完全被忽略。

本书中，矢量、电相量和其他复数量用黑体形式标记（例  $F$ ），而标量用斜体形式标记（如  $r$ ）。此外，采用特殊字型表示像磁动势等磁场量（如  $\mathcal{F}$ ）。

## 1.3 旋转运动、牛顿定律及功率关系

几乎所有的电机都围绕一个轴线旋转，该轴称为电机的转轴。由于电机的旋转性特征，就有必要对旋转运动有一些基本了解。本节简要复习适用于旋转电机的距离、速度、加速度、牛顿定律以及功率等概念。对旋转动力学概念的更详细讨论，参见参考文献2、4和5。

通常，需要三维矢量来完整描述空间物体的旋转。然而，由于电机一般绕固定转轴转动，所以其旋转就被限定在一维角度。相对于电机转轴的特定端，旋转方向可以描述为顺时针方向（CW）或者逆时针方向（CCW）。为分析方便起见，本书假定逆时针旋转的角度为正，而顺时针旋转的角度为负。对绕固定转轴的旋转，本节的所有概念均简化为标量。

旋转运动的各个重要概念定义于后，并与直线运动的相应概念相对应。

### 1.3.1 角位置 $\theta$

物体的角位置  $\theta$  是相对于某一任意参考点所测得的、其所旋转的角度。角位置通常用弧度或者度来计量。角位置与沿某一直线的线性距离概念相对应。

### 1.3.2 角速度 $\omega$

角速度或转速是角位置随时间变化的速率。如果旋转沿逆时针方向，则假定角速度为正。角速度是沿直线速度概念的旋转比拟。沿直线一维线速度定义为沿直线位移（ $r$ ）随时间变化的速率：