

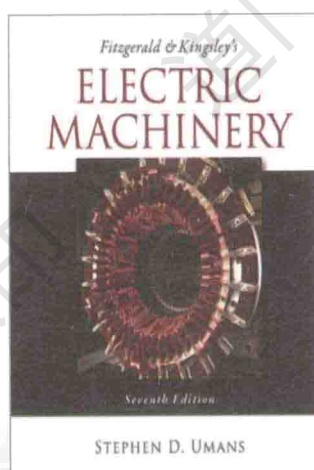
电气工程、自动化专业规划教材

Mc
Graw
Hill
Education

Fitzgerald & Kingsley's

电机学 (第七版)

Electric Machinery, Seventh Edition



[美] Stephen D. Umans 著
刘新正 苏少平 高琳 译



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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



欢迎登录 **免费** 获取优质教学资源
<http://www.hxedu.com.cn>

Fitzgerald & Kingsley's

电机学 (第七版)

Electric Machinery, Seventh Edition

本书是电机学领域的经典教材，正文内容包括磁路和磁性材料、变压器、机电能量转换原理、旋转电机概述、同步电机、多相感应电机、直流电机、变磁阻电机和步进电动机、单相电动机和两相电动机、转速和转矩控制等，附录内容包括三相电路，交流分布绕组电势、磁场和电感，dq0变换，实际电机性能和运行的工程问题，常数、SI单位转换系数表等。全书在强调基本原理的同时，介绍了稀土永磁材料、永磁交流电机、变磁阻电机、步进电动机等新内容，更新与扩充了关于感应电机的内容，修订了全书中的习题与示例，引入了MATLAB，添加了便于读者学习的指导意见，同时在配套网站上提供了本书的习题解答。

本书可作为高等院校工科电气工程及其自动化专业或其他相关专业学生的教材或教学参考书，也可作为工程技术人员的参考用书。

Mc
Graw
Hill
Education

www.mheducation.com

Mc
Graw
Hill
Education

ISBN 978-7-121-24344-8



9 787121 243448 >

定价：79.00元



策划编辑：谭海平

责任编辑：谭海平

封面设计：一克米工作室

电气工程、自动化专业规划教材

电机学

(第七版)

Fitzgerald & Kingsley's Electric Machinery
Seventh Edition

[美] Stephen D. Umans 著

刘新正 苏少平 高琳 译

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是电机学领域的经典教材,正文内容包括磁路和磁性材料、变压器、机电能量转换原理、旋转电机概述、同步电机、多相感应电机、直流电机、变磁阻电机和步进电动机、单相电动机和两相电动机、转速和转矩控制等,附录内容包括三相电路、交流分布绕组电势、磁场和电感、 $dq0$ 变换,实际电机性能和运行的工程问题,常数、SI单位转换系数表等。全书在强调基本原理的同时,介绍了稀土永磁材料、永磁交流电机、变磁阻电机、步进电动机等新内容,更新与扩充了关于感应电机的内容,修订了全书中的习题与示例,引入了MATLAB,添加了便于读者学习的指导意见,同时在配套网站上提供了本书的习题解答。

本书可作为高等院校工科电气工程及其自动化专业或其他相关专业学生的教材或教学参考书,也可作为工程技术人员的参考用书。

Stephen D. Umans; Fitzgerald & Kingsley's Electric Machinery, Seventh Edition
9780073380469

Copyright © 2013 by McGraw-Hill Education.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including without limitation photocopying, recording, taping, or any data-base, information or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

This authorized Chinese translation edition is jointly published by McGraw-Hill Education and Publishing House of Electronics Industry. This edition is authorized for sale in the People's Republic of China only, excluding Hong Kong, Macao SAR and Taiwan.

Copyright © 2014 by McGraw-Hill Education and Publishing House of Electronics Industry.

版权所有。未经出版人事先书面许可,对本出版物的任何部分不得以任何方式或途径复制或传播,包括但不限于复印、录制、录音,或通过任何数据库、信息或可检索的系统。本授权中文简体翻译版由麦格劳-希尔(亚洲)教育出版公司和电子工业出版社合作出版。此版本经授权仅限在中国大陆销售。

版权© 2014 由麦格劳-希尔(亚洲)教育出版公司与电子工业出版社所有。本书封面贴有 McGraw-Hill Education 公司防伪标签,无标签者不得销售。

版权贸易合同登记号 图字:01-2013-5741

图书在版编目(CIP)数据

电机学:第7版/(美)乌曼(Umans, S.)著;刘新正,苏少平,高琳译. —北京:电子工业出版社,2014.10
书名原文:Fitzgerald & Kingsley's Electric Machinery, Seventh Edition
电气工程、自动化专业规划教材
ISBN 978-7-121-24344-8

I. ①电… II. ①乌… ②刘… ③苏… ④高… 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(2014)第 213894 号

策划编辑:谭海平

责任编辑:谭海平 特约编辑:王 崧

印 刷:涿州京南印刷厂

装 订:涿州京南印刷厂

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:787×1 092 1/16 印张:32.75 字数:838 千字

版 次:2014 年 10 月第 1 版(原著第 7 版)

印 次:2014 年 10 月第 1 次印刷

定 价:79.00 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 zlt@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

不知不觉间,距离我们翻译本书第六版已过去了10年。我们欣喜地看到本书英文第七版的出版,也很荣幸再次有机会将其翻译为中文版呈现给读者。

第七版依然延续了以前各版突出原理、淡化细节、例题及习题丰富的编写风格,最显著的变化是删除了第六版中关于电力电子学知识的第10章。如果与第六版仔细对照,读者还会发现,其余章节的编排顺序和主题内容虽然未做改动,但对具体问题的阐述以及对例题和习题做了较多修改,特别是补充了一些分析电机动态过程及闭环控制系统的内容。

正如作者所指出的,本书重点关注的是电机运行的基本原理和特性,由于电机运行所基于的电、磁作用机理不变,对电机运行的描述就不会有太大变化。如何适当地引入新的分析工具,既不加重学生的负担,又能使学生加深对电机原理、特性和应用的理解,是目前电机学教材编写和教学实践需要认真考虑的问题。除了翻译本教材,译者近年还翻译或阅读过美国高校的多本电机学教材,其中大都引入了应用MATLAB软件分析电机及其系统的内容。受制于课时安排,国内目前鲜有在电机学教材和课程教学中对此类工具的应用,建议教师或者学生自己不妨做一些尝试。

本书的译者均为西安交通大学电气工程学院教师。其中第1章、第2章、第10章和附录由刘新正翻译,并负责全书其他各章的校译和统稿;第3章、第4章、第5章、第8章和第9章由苏少平翻译;第6章、第7章由高琳翻译。

外文教材的翻译是一个艰难的再创作过程,我们在翻译过程中一直努力追求的目标是,一方面做到忠实于原文本意及描述特色,另一方面又兼顾国内读者的阅读习惯,做到中文流畅。本版翻译中修改了第六版中的部分论述方式,并改正了一些译文瑕疵,但错误和不妥之处仍在所难免,敬请读者指正。

前言

自 Fitzgerald 和 Kingsley 教授于 1952 年首次出版第一版以来,本书的一贯宗旨是,始终将重点放在对电机特性内部物理本质,以及应用解析方法来描述电机性能的分析这两个方面。自第一版出版发行以来,情况有了很多变化,例如低损耗电工钢、稀土永磁材料的开发,制造技术的改进,以及电力电子控制和驱动系统的出现等。

然而,主宰电机特性的基本原理保持不变。本书长久以来的声誉,在很大程度上就源于其侧重于这些基础原理。每次新版编写所面临的挑战都是,既要适当地使一些处理方法“现代化”,又要保持这一基本中心思想不变。在以前版本的现代化中,已经放入了对稀土永磁材料的介绍,引入了永磁交流电机、变磁阻(开关磁阻)电机和步进电动机,以及对磁场定向控制策略的讨论等。

第六版的重要改进是,引入 MATLAB 在例题和练习题以及章末习题中的应用。MATLAB 在很多大学得到了广泛使用,并有学生版本。虽然本书的读者不需要具备高深的数学知识,但书中的数学运算可能会使读者稍感棘手和枯燥,在交流电机的分析中尤其如此,因为分析中有大量涉及复数的代数运算。像 MATLAB 等这一类分析工具,可以将学生从冗长乏味的计算中解放出来,而这种计算本身对加深理解所学内容几无帮助。

考虑这样一个问题:在第一版出版发行的那些年代,学生可以使用的主要计算工具是计算尺。由于涉及求解带有复变量的方程,当仅利用计算尺计算感应电机在单个负载点的性能时,就是一项艰巨的任务,可能相当耗时,且存在很大计算出错的概率。

时间很快就到了 2013 年。求解相同问题的 MATLAB 程序,可以很容易地在几分钟内完成编写和调试,然后基本上即刻得到答案。只需要稍加修改,同样的程序就可用于计算、描绘和观察电机在其整个运行范围的性能,以及研究参数变化的影响等。这一任务如果用计算尺(或者甚至用计算器)来做,就需要对很多运行点的重复计算,而每一个运行点的计算都会像第一次计算那样耗时。

应该强调,虽然在本书中选择使用 MATLAB,但还有许多同等功能的数值分析计算程序可供选择,用起来同样有效。关键的一点是,这类程序的使用,能极大地减轻学生的计算负担,进而显著增强其关注于原理来思考问题的能力。

注意,即使没有明确建议,书中的大多数章末习题也都可以用 MATLAB 或同类软件来处理。因而,对那些能轻松自如地使用此类工具的学生,应鼓励他们去使用,以使他们从烦琐的手算折磨中解脱出来。在求解课后习题时,当然仍应该要求学生以书面形式来说明他们是如何解答的,因为正是解答的过程才是理解所学内容的关键。然而,问题完全公式化后,从摆弄数字本身一般就不再能学到什么东西。首要的是,要从求解的过程和对结果的审查中体现出做例题和章末习题的价值。

此外,在进行第六版修订的时候,与能量转换相关的主题又被重新引入许多工科课程计划中。根据涉及这些教学计划的教师的反馈意见,纳入了涵盖电力电子学基本原理的一章,重点是在电机领域的应用。当然并未打算用电力电子学一章来替代有关电力电子学的成熟课程,现在很多工科教学计划中都有这样的课程。先期阅览了本次第七版的教师提出,不再需要放入电力电子学一章,因此已将其从第七版中剔出并移到了第七版的网站中。

本次修订侧重于支撑电机特性的基本物理原理,这是本书自第一版以来所一直强调的,因此无须改变。再者,纵览第六版及其前面的版本发现,除了删除关于电力电子学的一章,也没有必要修改其他主题所涵盖的范围。另一方面,删除电力电子学一章也为其他主题留下了扩充的空间。因此,本次修订的重要特征是:

- 本书呈现的所有内容都已经做了仔细的审查、修订和/或必要的扩充,使其更加透彻。其中一例是第5章中对永磁交流电机分析处理的扩充。类似地,第7章关于直流电机内容的呈现也已做了重新组织,使其更加明晰。
- 本版中增加了15个新例题,使得书中的例题总数达到了111个。此外,修改了前一版中的一些例题。
- 本版总共371个章末习题中,有96个是新习题。其余的几乎所有习题,虽然保留了前一版的形式,但在内容上或数值上也做了更改,因而以前的解答不再能用。
- 在第七版的例题、练习题和章末习题中,相当多地扩展了MATLAB的使用。
- 这一版的新变化之一是,在每章章末放入了该章出现的变量符号和其定义的列表。
- 第七版介绍了一些关于电机动态过程的简单例子,也包含了几个MATLAB/Simulink例题和习题。
- 更新了前一版中的绝大多数图片。

就像过去版本中的情况一样,对于一门单纯介绍性的课程来说,第七版中很可能包含了太多的内容。但书中的内容已经做了精心组织,使得教师可以挑选适合于他们所希望包括的主题内容。最初的两章介绍磁路的基本概念、磁性材料及变压器,第3章介绍机电能量转换的基本概念,然后第4章给出对各种类型(旋转)电机的总览和介绍。有些教师会在介绍性的课程中,选择省略掉第3章的所有内容或大部分内容,这样做是可行的,而且不会对本书其余内容的呈现产生太大影响。

接下来的五章对各种类型的(旋转)电机做了更深入的讨论:同步电机在第5章讨论,感应电机在第6章讨论,直流电机在第7章讨论,变磁阻电机在第8章讨论,单相/两相电机在第9章讨论。由于各章几乎是独立的(第9章的内容除外,它基于第6章中对多相感应电机的讨论),所以这些章的次序可以改变,而且/或者教师可以选择侧重于一种或两种类型的电机,而不必覆盖所有这五章的内容。

最后,教师可能希望从第10章有关控制的内容中挑选专题,而不是包括所有内容。关于转速控制的内容,是对较早前有关各种类型电机的章节中所出现内容的相对直接扩展。有关磁场定向控制的内容理解起来稍显复杂,它建立在附录C中dq0变换的基础之上,因此,在介绍性的课程中省略掉这部分内容,将其推迟到以后更高级的课程中,以便有充足的时间去学习,当然是合情合理的。

我要特别感谢南卡罗来纳大学(University of South Carolina)的 Charles Brice 教授和

塞达维尔大学(Cedarville University)的 Gerald Brown 教授,他们细心审查了书稿的各个章节,捕捉到了许多打字和数字错误。我也想要感谢很多其他审阅者,他们在本次修订的策划过程中提供了很多反馈意见。

Mukhtar Ahmad—*Aligarh Muslim University*

Said Ahmed-Zaid—*Boise State University*

Steven Barrett—*University of Wyoming*

Tapas Kumar Bhattacharya—*Indian Institute of Technology Kharagpur*

Kalpana Chaudhary—*Indian Institute of Technology, Banaras Hindu University, Varanasi*

Nagamani Chilakapati—*National Institute of Technology Tiruchirapalli*

S. Arul Daniel—*National Institute of Technology Tiruchirapalli*

Jora M. Gonda—*National Institute of Technology Surathkal*

N. Ammasai Gounden—*National Institute of Technology Tiruchirapalli*

Alan Harris—*University of North Florida*

R. K. Jarial—*National Institute of Technology Hamirpur*

Urmila Kar—*National Institute of Technical Teachers' Training and Research, Kolkata*

M. Rizwan Khan—*Aligarh Muslim University*

Jonathan Kimball—*Missouri University of Science and Technology*

Dave Krispinsky—*Rochester Institute of Technology*

Prabhat Kumar—*Aligarh Muslim University*

Praveen Kumar—*Indian Institute of Technology Guwahati*

N. Kumaresan—*National Institute of Technology Tiruchirapalli*

Eng Gee Lim—*Xi'an Jiaotong-Liverpool University*

Timothy Little—*Dalhousie University*

S. N. Mahendra—*Indian Institute of Technology, Banaras Hindu University, Varanasi*

Yongkui Man—*Northeastern University, China*

David McDonald—*Lake Superior State University*

Shafique S. Mirza—*New Jersey Institute of Technology*

Medhat M. Morcos—*Kansas State University*

G. Narayanan—*Indian Institute of Science, Bangalore*

Adel Nasiri—*University of Wisconsin-Milwaukee*

Sudarshan R. Nelatury—*Penn State*

Sanjoy K. Parida—*Indian Institute of Technology Patna*

Amit N. Patel—*Nirma University*

Peter W. Sauer—*University of Illinois at Urbana-Champaign*

Hesham Shaalan—*US Merchant Marine Academy*

Karma Sonam Sherpa-Sikkim—*Manipal Institute of Technology*

Ajay Srivastava—*G. B. Pant University of Agriculture & Technology*

Murry Stocking—*Ferris State University*

A. Subramanian——*V. R. S College of Engineering and Technology*

Wayne Weaver——*Michigan Technological University*

Jin Zhong——*University of Hong Kong*

有兴趣的读者可以访问本书的网站 www.mhhe.com/umans7e。第六版中的电力电子学一章已粘贴在了此网站上。在教师版上,为教师粘贴了可下载版本的解答手册、书中插图的 PowerPoint 幻灯片以及 PowerPoint 形式的讲授大纲。为学生和教师提供了书中用到的各个例题的 MATLAB 和 Simulink 文件的副本。

在这一版本的修订期间,我的母亲 Nettie Umans 去世了,我一直盼望着和她分享这一版本,她应该很激动地看到了第七版的出版。我深深怀念她!

Stephen D. Umans

Belmont, MA

2013

教学支持说明

McGraw-Hill Education, 麦格劳-希尔教育出版公司, 美国著名图书出版与教育服务机构, 以出版经典、高质量的理工科、经济管理、计算机、生命科学以及人文社科类高校教材享誉全球, 更以丰富的网络化、数字化教学辅助资源深受高校教师的欢迎。

为了更好地服务于中国教育发展, 提升教学质量, 2003 年麦格劳-希尔教师服务中心在北京成立。在您确认将本书作为指定教材后, 请您填好以下表格并经系主任签字盖章后寄回, 麦格劳-希尔教师服务中心将免费向您提供相应教学课件或网络化课程管理资源。如果您需要订购或参阅本书的英文原版, 我们也会竭诚为您服务。

证 明

兹证明 _____ 大学 _____ 系/院 _____ 专业
_____ 学年(学期)开设的 _____ 课程, 共 _____ 学时, 现采用电子工业出版社
出版的英文原版/简体中文版 _____ (书名/作者) _____ 作为主要教材。任课教
师为 _____, 学生 _____ 个班共 _____ 人。

任课教师需要与本书配套的教师指导手册和习题解答。

电 话: _____

传 真: _____

E-mail: _____

联 系 地 址: _____

邮 编: _____

建议和要求:

系/院主任: _____ (签字)

(系/院办公室章)

_____ 年 _____ 月 _____ 日

请与我们联系

Publishing House of Electronics Industry

电子工业出版社: www.phei.com.cn

www.hxedu.com.cn

联系电话: 010-88254555

传 真: 010-88254560

E-mail: Te_service@phei.com.cn

麦格劳-希尔教育出版公司教师服务中心

北京市海淀区 清华科技园 创业大厦 907 室

北京 100084

传真: 8610-62790292

教师服务热线: 800-810-1936

教师服务信箱: instructor_cn@mcgraw-hill.com

网址: <http://www.mcgraw-hill.com.cn>

目录

第 1 章 磁路和磁性材料	1
1.1 磁路概述	1
1.2 磁链、电感和能量	8
1.3 磁性材料的特性	14
1.4 交流励磁	16
1.5 永磁体	21
1.6 永磁材料的应用	25
1.7 小结	32
1.8 第 1 章变量符号表	33
1.9 习题	34
第 2 章 变压器	44
2.1 变压器概述	44
2.2 空载运行	46
2.3 二次侧电流的影响和理想变压器	48
2.4 变压器电抗及等效电路	51
2.5 变压器的工程分析	55
2.6 自耦变压器和多绕组变压器	61
2.6.1 自耦变压器	61
2.6.2 多绕组变压器	63
2.7 三相变压器	64
2.8 电压互感器和电流互感器	67
2.9 标幺值体系	71
2.10 小结	77
2.11 第 2 章变量符号表	78
2.12 习题	80
第 3 章 机电能量转换原理	87
3.1 磁场系统中的力和转矩	87
3.2 能量平衡和能量法	89
3.3 单边励磁磁场系统中的能量	91
3.4 由储能确定磁场力和转矩	94
3.5 由磁共能确定电磁力和转矩	99

3.6	多励磁磁场系统	104
3.7	含永磁体系统中的力和转矩	109
3.8	动态方程	115
3.9	分析方法	119
3.9.1	粗动问题	119
3.9.2	线性化	121
3.10	小结	123
3.11	第3章变量符号表	124
3.12	习题	125
第4章	旋转电机概述	137
4.1	基本概念	137
4.2	交流和直流电机概述	138
4.2.1	交流电机	138
4.2.2	直流电机	143
4.3	分布绕组的磁势	144
4.3.1	交流电机	145
4.3.2	直流电机	149
4.4	旋转电机中的磁场	152
4.4.1	具有均匀气隙的电机	152
4.4.2	具有不均匀气隙的电机	154
4.5	交流电机中的旋转磁势波	155
4.5.1	单相绕组的磁势波	155
4.5.2	多相绕组的磁势波	157
4.5.3	多相绕组磁势的图示法分析	159
4.6	感应电势	160
4.6.1	交流电机	160
4.6.2	直流电机	164
4.7	隐极电机的转矩	165
4.7.1	耦合电路的观点	165
4.7.2	磁场观点	170
4.8	直线电机	174
4.9	磁饱和	176
4.10	漏磁通	178
4.11	小结	179
4.12	第4章变量符号表	181
4.13	习题	182
第5章	同步电机	189
5.1	多相同步电机概述	189
5.2	同步电机的电感和等效电路	191
5.2.1	转子自感	192
5.2.2	定、转子之间的互感	192

5.2.3	定子电感和同步电感	192
5.2.4	等效电路	194
5.3	开路特性和短路特性	197
5.3.1	开路饱和特性和空载旋转损耗	197
5.3.2	短路特性和负载损耗	199
5.4	稳态功角特性	204
5.5	稳态运行特性	211
5.6	凸极效应以及直轴和交轴理论简介	220
5.6.1	磁通和磁势波	220
5.6.2	凸极电机的相量图	221
5.7	凸极电机的功角特性	224
5.8	永磁交流电机	229
5.9	小结	237
5.10	第 5 章变量符号表	238
5.11	习题	240
第 6 章	多相感应电机	248
6.1	多相感应电机概述	248
6.2	多相感应电机中的电流和磁通	251
6.3	感应电机的等效电路	253
6.4	等效电路分析	255
6.5	应用戴维南定理计算转矩和功率	259
6.6	利用空载试验和堵转试验确定参数	267
6.6.1	空载试验	267
6.6.2	转子堵转试验	269
6.7	转子电阻的影响:绕线式和双笼型转子	276
6.7.1	绕线式转子电动机	276
6.7.2	深槽和双笼型转子	278
6.7.3	电动机应用方面的问题	279
6.8	小结	281
6.9	第 6 章变量符号表	282
6.10	习题	283
第 7 章	直流电机	293
7.1	概述	293
7.2	换向器的作用	298
7.3	分析基础:电路方面	300
7.4	电枢磁势的影响	303
7.5	分析基础:磁路方面	305
7.5.1	忽略电枢反应	305
7.5.2	考虑电枢反应的影响	311
7.6	直流电机稳态运行分析	312

7.6.1	发电机分析	312
7.6.2	电动机分析	316
7.7	永磁直流电机	318
7.8	换向和换向极	321
7.9	补偿绕组	323
7.10	串励通用电动机	325
7.11	小结	326
7.12	第 7 章变量符号表	326
7.13	习题	328
第 8 章	变磁阻电机和步进电动机	336
8.1	VRM 分析基础	336
8.2	实际 VRM 的结构	342
8.3	产生转矩的电流波形	346
8.4	非线性分析	356
8.5	步进电动机	361
8.6	小结	367
8.7	第 8 章变量符号表	368
8.8	习题	369
第 9 章	单相和两相电动机	373
9.1	单相感应电动机定性分析	373
9.2	单相感应及单相同步电动机的起动和运行性能	375
9.2.1	裂相电动机	375
9.2.2	电容型电动机	376
9.2.3	罩极感应电动机	378
9.2.4	自起动同步磁阻电动机	378
9.2.5	磁滞电动机	380
9.3	单相感应电动机的旋转磁场理论	381
9.4	两相感应电动机	386
9.4.1	对称两相电机的不对称运行及对称分量法	386
9.4.2	一般情况: 不对称两相感应电机	392
9.5	小结	400
9.6	第 9 章变量符号表	401
9.7	习题	402
第 10 章	转速及转矩控制	406
10.1	直流电动机的控制	406
10.1.1	转速控制	406
10.1.2	转矩控制	417
10.2	同步电动机的控制	420
10.2.1	转速控制	420

10.2.2	转矩控制	424
10.3	感应电动机的控制	441
10.3.1	转速控制	441
10.3.2	转矩控制	447
10.4	变磁阻电动机的控制	455
10.5	小结	458
10.6	第10章变量符号表	458
10.7	参考文献	460
10.8	习题	461
附录 A	三相电路	471
A.1	三相电压的产生	471
A.2	三相电压、电流和功率	473
A.3	Y和 Δ 接法电路	476
A.4	对称三相电路分析及单线图	480
A.5	附录A变量符号表	481
附录 B	交流分布绕组的电势、磁场和电感	483
B.1	感应电势	483
B.1.1	短距分布绕组	483
B.1.2	宽度系数和节距系数	485
B.2	电枢磁势波	487
B.2.1	整距集中绕组	487
B.2.2	短距分布绕组	488
B.3	分布绕组的气隙电感	489
B.4	附录B变量符号表	491
附录 C	dq0变换	493
C.1	向直轴和交轴变量的变换	493
C.2	以dq0变量表示的同步电机基本关系	494
C.3	以dq0变量表示的感应电机基本关系	497
C.4	附录C变量符号表	500
附录 D	实际电机性能和运行的工程问题	502
D.1	损耗	502
D.2	定额和发热	504
D.3	电机的冷却方式	506
D.4	励磁	507
D.4.1	交流电机的功率因数	507
D.4.2	汽轮发电机励磁系统	508
D.5	电机的效率	509
附录 E	常数和SI单位转换系数表	511

第1章 磁路和磁性材料

本书的目的是学习用于电能和机械能相互转换的装置。重点放在旋转电磁机械,因为大多数机电能量转换借此来实现。但是,所得到的方法普遍适用于各种其他装置,包括直线电机、执行机构和传感器。

虽然变压器不是机电能量转换装置,但它是整个能量转换过程中的一个重要组成部分,因而在第2章进行讨论。正像本书中所讨论的大多数机电能量转换装置一样,磁耦合的绕组是变压器工作的核心所在。因此,针对变压器分析所得到的方法,奠定了后续讨论旋转电机的基础。

事实上,所有变压器和电机均采用铁磁材料来定形和导向磁场,而磁场对能量传递和转换起着媒介的作用。永磁材料在电机中也得到了广泛应用。如果没有这些材料,大多数为人们所熟悉的机电能量转换装置就不可能付诸实践。具备分析和描述含有此类材料的系统的能力,是设计和理解机电能量转换装置的基础。

本章将导出一些磁场分析的基本方法,并简要介绍实用磁性材料的性能。在第2章,将这些结论用于变压器的分析,在以后各章中将用于旋转电机的分析。

本书假设读者已经具备磁场和电场理论的基本知识,这些知识点在工科学生的基础物理学课程中可以找到。某些读者可能学过基于麦克斯韦方程的电磁场理论课程,但深入理解麦克斯韦方程并不是掌握本书内容的先决条件。磁路分析方法提供了对精确的场理论解的代数近似,被广泛用于机电能量转换装置的研究,并构成了此处所介绍的大多数分析的基础。

1.1 磁路概述

在大多数实际工程领域中,磁场的完整而详细的解,涉及求解麦克斯韦方程,且需要一系列描述材料特性的限定关系。虽然实践中常常难以得到精确解,但各种简化假设却使得可以得到有用的工程解^①。

我们首先假设,对本书中讨论的系统,涉及的频率及尺寸使得麦克斯韦方程中的位移电流项可以忽略。此项计及时变电场在空间产生的磁场,与电磁辐射有关。忽略该项得到相应的麦克斯韦方程的磁准静态形式,此麦克斯韦方程使磁场与产生磁场的电流相关联。

$$\oint_C \mathbf{H} d\mathbf{l} = \int_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{a} \quad (1.1)$$

^① 基于有限元法的计算机数值解法构成了许多商品化程序的基础,并已成为分析和设计不可或缺的工具。正如在本书中可看到的,这些方法一般最好用来改进基于解析法的初步分析。因为这样的数值解法对理解电机原理和基本特性并无帮助,所以本书中将不做讨论。

$$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{a} = 0 \quad (1.2)$$

式 1.1 通常称为安培定律,其表述为:磁场强度 $\mathbf{H}$ 的切线分量沿闭合回线 C 的线积分,等于通过与该回路关联的任何表面 S 的总电流。从式 1.1 可见, $\mathbf{H}$ 的源即为电流密度 $\mathbf{J}$ 。式 1.2 通常称为磁场的高斯定律,其表述为:磁通密度 $\mathbf{B}$ 是守恒的,即没有净磁通进入或离开一个闭合面(这等于是说,不存在磁场的单极源)。从这些式子可见,磁场量可以由源电流的瞬时值唯一确定,因而磁场随时间的变化直接跟随源电流的时间变化。

第二个简化假设涉及磁路的概念。在复杂几何结构中,极难得到磁场强度 $\mathbf{H}$ 和磁通密度 $\mathbf{B}$ 的通解。然而,在很多实际应用中,包括很多类型电机的分析中,三维场问题常常可以简化为本质上所谓的一维路的等效,获得满足工程精确度的解。

磁路由其中大部分为高磁导率磁性材料的结构组成^①。高磁导率材料的存在,趋向于使磁通被限制在由此结构所确定的路径中,与电流被限制在电路的导体中极为相像。本节展现磁路这一概念的应用,读者将会看到,磁路概念对本书中的许多情况相当适用^②。

图 1.1 所示为一个简单磁路的例子。假设铁心由磁性材料构成,其磁导率 μ 远远大于周围空气的磁导率($\mu \gg \mu_0$),而 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ 是自由空间的磁导率。铁心具有均匀横截面,并由带有 i 安培电流的 N 匝绕组励磁。该绕组在铁心中产生磁场,如图 1.1 中所示。

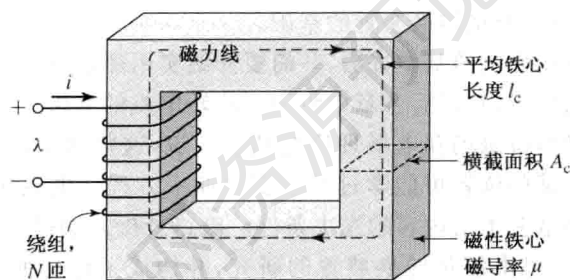


图 1.1 简单磁路。 λ 为绕组磁势,在 1.2 节中定义

因为磁性铁心的高磁导率,精确解将会表明,磁通几乎完全被限定在铁心,磁力线沿铁心所规定的路径而行。因为横截面积均匀,横截面上的磁通密度基本均匀。磁场可以用磁力线来形象化,而磁力线形成与绕组相匝链的闭合回线。

当应用于图 1.1 的磁路时,铁心中磁场的源为安培-匝数之积 Ni 。按磁路术语, Ni 为作用于磁路的磁动势(mmf) $\mathcal{F}$ 。虽然图 1.1 仅显示了单个绕组,而变压器及大多数旋转电机一般具有至少两个绕组,所以 Ni 必然要用所有绕组的安培-匝数的代数和来替换。

穿过表面 S 的净磁通 ϕ 是 $\mathbf{B}$ 的法线分量的面积分,因而

$$\phi = \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{a} \quad (1.3)$$

在 SI 单位制中, ϕ 的单位是韦伯(Wb)。

① 按照其最简单定义,磁导率可以认为是磁通密度 $\mathbf{B}$ 与磁场强度 $\mathbf{H}$ 的比值。

② 对磁路的更广泛的分析,参见 A. E. Fitzgerald, D. E. Higgenbotham 和 A. Grabel 的 *Basic Electrical Engineering* 第 5 版, McGraw-Hill, 1981, 第 13 章;以及麻省理工学院的 *Magnetic Circuits and Transformers*, MIT 出版社, 1965, 第 1 章到第 3 章。

式 1.2 表述为:进入或离开闭合面的净磁通(等于 $\mathbf{B}$ 在该闭合面上的面积分)为 0。这等于就是说,进入围绕某一空间的表面的磁通,必然从该表面的其他部分离开此空间,因为磁力线形成闭合回线。因为几乎没有磁通从图 1.1 的磁路各边“泄漏”出去,这表明通过铁心各横截面的净磁通相同。

对这一类磁路,通常假设铁心所有横截面上的磁通密度(及对应的磁场强度)均匀且相同。此时,式 1.3 简化为简单的标量式:

$$\phi_c = B_c A_c \quad (1.4)$$

式中: ϕ_c 为铁心中磁通; B_c 为铁心中磁通密度; A_c 为铁心的横截面积。

从式 1.1 知,作用在磁路上的磁势与该磁路中磁场强度间的关系为^①

$$\mathcal{F} = Ni = \oint \mathbf{H} d\mathbf{l} \quad (1.5)$$

铁心尺寸为使得任何磁力线的路径长度接近于平均铁心长度 l_c 。所以,式 1.5 的线积分变为只是 $\mathbf{H}$ 的大小与平均磁通路径长度 l_c 的标量积 $H_c l_c$ 。因而,按磁路方式,磁势和磁场强度的关系可以写为

$$\mathcal{F} = Ni = H_c l_c \quad (1.6)$$

式中, H_c 是铁心中 $\mathbf{H}$ 的平均值。

铁心中 H_c 的方向可以根据右手定则确定,可以用两种等效的方式来表述。(1)设想一个载流导体握在右手,拇指指向电流流动的方向,则四指指向该电流所产生的磁场的方向;(2)等效地,如果将图 1.1 中的线圈抓在右手(形象化来比喻),四指指向电流的方向,则拇指将指向磁场的方向。

磁场强度 $\mathbf{H}$ 与磁通密度 $\mathbf{B}$ 之间的关系为磁场所处材料的特性。通常假设为线性关系,因而

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (1.7)$$

式中, μ 为材料的磁导率。在 SI 单位制中, $\mathbf{H}$ 以安培每米为单位, $\mathbf{B}$ 以韦伯每平方米为单位,也称为特斯拉(T), μ 以韦伯每安培·匝·米或等同为亨每米为单位。在 SI 单位制中,自由空间的磁导率为 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ 。线性磁性材料的磁导率可以用其相对磁导率 μ_r 来表示,其值为相对于自由空间的磁导率,即 $\mu = \mu_r \mu_0$ 。对于变压器和旋转电机中用到的材料, μ_r 的典型值范围为 2000~80000。铁磁材料的特性在 1.3 节和 1.4 节描述。目前暂且假设 μ_r 为已知常数,虽然它实际上随磁通密度的大小略微有点变化。

变压器绕组绕在像图 1.1 的闭合铁心上。然而,组合有运动部件的能量转换装置,其磁路中必然有气隙。含有气隙的磁路如图 1.2 所示。当气隙长度 g 比邻近的铁心面的尺寸小很多时,磁通 ϕ_c 将沿铁心和气隙所限定的路径流通,可以采用磁路分析方法。假如气隙长度变得非常大,可以观察到磁通从气隙的边缘“泄漏”,磁路分析方法将不再严格适用。

因而,倘若气隙长度 g 足够小,图 1.2 的结构可以按有两个串联部分的磁路来分析,两个串联部分通过相同的磁通 ϕ : 磁导率 μ 、横截面积 A_c 及平均长度 l_c 的磁性铁心和磁导率 μ_0 、横截面积 A_g 及长度 g 的气隙。铁心中,

^① 一般而言,磁路中任一段上的磁势降都可以用该磁路段上的 $\int \mathbf{H} d\mathbf{l}$ 来计算。

$$B_c = \frac{\phi}{A_c} \quad (1.8)$$

气隙中,

$$B_g = \frac{\phi}{A_g} \quad (1.9)$$

将式 1.5 用于这个磁路得到

$$\mathcal{F} = H_c l_c + H_g g \quad (1.10)$$

采用式 1.7 的线性 B - H 关系, 引出

$$\mathcal{F} = \frac{B_c}{\mu} l_c + \frac{B_g}{\mu_0} g \quad (1.11)$$

此处, $\mathcal{F} = Ni$ 为施加在磁路上的磁势。从式 1.10 看到, 磁势的一部分, $\mathcal{F}_c = H_c l_c$, 是产生铁心中的磁场所需要的, 而剩余部分, $\mathcal{F}_g = H_g g$, 在气隙中产生磁场。

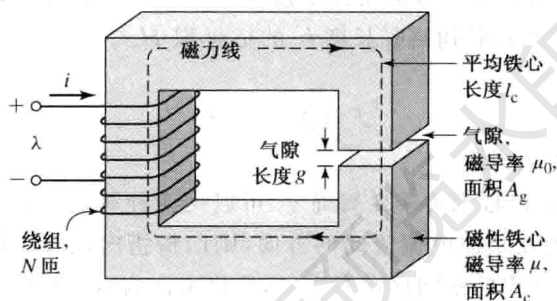


图 1.2 具有气隙的磁路

对实际磁性材料(如在 1.3 节和 1.4 节所讨论的), B_c 和 H_c 不是简单地用一个像式 1.7 描述的已知恒值磁导率 μ 来关联的。事实上, B_c 常常是 H_c 的非线性、多值函数。因而, 虽然式 1.10 继续成立, 但却不能直接得到如式 1.11 那样, 使磁势和磁通密度关联的简单表达式。必须用 B_c - H_c 的非线性关系特性, 或用图解法或用解析法取而代之。然而, 在大多数情况下, 引入材料的恒值磁导率也能得出满足工程精度要求的结果, 因而常常得以采用。

根据式 1.8 和式 1.9, 式 1.11 可以按照磁通 ϕ 重写为

$$\mathcal{F} = \phi \left(\frac{l_c}{\mu A_c} + \frac{g}{\mu_0 A_g} \right) \quad (1.12)$$

式中, 与磁通相乘的项分别称为铁心和气隙的磁阻($\mathcal{R}$):

$$\mathcal{R}_c = \frac{l_c}{\mu A_c} \quad (1.13)$$

$$\mathcal{R}_g = \frac{g}{\mu_0 A_g} \quad (1.14)$$

因而

$$\mathcal{F} = \phi (\mathcal{R}_c + \mathcal{R}_g) \quad (1.15)$$

最后, 式 1.15 可以倒过来求解磁通:

$$\phi = \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}_c + \mathcal{R}_g} \quad (1.16)$$

或者

$$\phi = \frac{\mathcal{F}}{\frac{l_c}{\mu A_c} + \frac{g}{\mu_0 A_g}} \quad (1.17)$$

一般而言,对总磁阻为 $\mathcal{R}_{\text{tot}}$ 的任何磁路,可以求出磁通为

$$\phi = \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}_{\text{tot}}} \quad (1.18)$$

与磁势相乘的项称为磁导 $\mathcal{P}$,它是磁阻的倒数。因而,例如,磁路的总磁导为

$$\mathcal{P}_{\text{tot}} = \frac{1}{\mathcal{R}_{\text{tot}}} \quad (1.19)$$

注意到式 1.15 及式 1.16 与电路中电流和电压间的关系类似,这种类比在图 1.3 中做了描绘。图 1.3(a)所示为一个电路,其中电压 V 驱使电流 I 流过电阻 R_1 和 R_2 。图 1.3(b)所示为图 1.2 中磁路的示意性等效表示。由此可见,磁势 $\mathcal{F}$ (类似于电路中的电压)驱使磁通 ϕ (类似于电路中的电流)通过铁心磁阻 $\mathcal{R}_c$ 和气隙磁阻 $\mathcal{R}_g$ 的组合。电路和磁路解之间的这种类比,常用于求取在相当复杂的磁路中磁通的简化解。

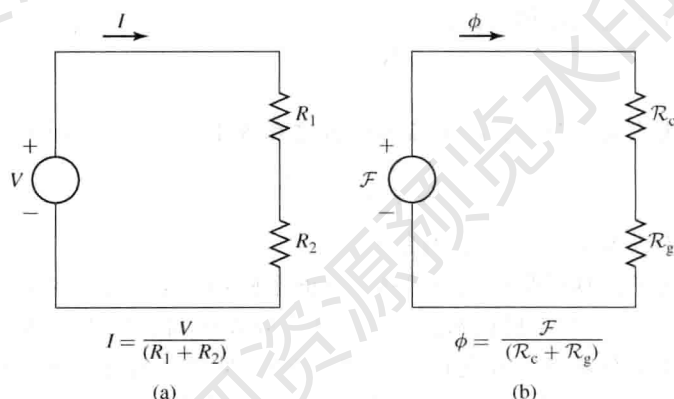


图 1.3 电路和磁路间的类比:(a)电路;(b)磁路

驱使磁通通过磁路各段所需要的磁势,通常称为该段磁路上的磁压降,与它的磁阻成正比变化(正好类似于电路中电阻性元件上的电压降)。考虑图 1.2 中的磁路。从式 1.13 可见,材料的高磁导率会引起低的铁心磁阻,常常可以使其比气隙磁阻小得多,也就是说,因为 $(\mu A_c / l_c) \gg (\mu_0 A_g / g)$, $\mathcal{R}_c \ll \mathcal{R}_g$,所以 $\mathcal{R}_{\text{tot}} \approx \mathcal{R}_g$ 。这样,铁心磁阻可以忽略,就可以从式 1.16 仅根据 $\mathcal{F}$ 和气隙特性来求出磁通:

$$\phi \approx \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}_g} = \frac{\mathcal{F} \mu_0 A_g}{g} = Ni \frac{\mu_0 A_g}{g} \quad (1.20)$$

正如在 1.3 节将看到的,实际磁性材料磁导率不是恒值,而是随磁通量大小变化。从式 1.13 到式 1.16 可见,只要这一磁导率维持足够大,其变化将不会显著影响磁路的性能,该磁路磁阻的主要部分是气隙磁阻。

在实际系统中,如图 1.4 所描绘的,当磁力线通过气隙时,有些向外“散射”。倘若这种边缘效应不是太过分,磁路概念仍然适用。这些边缘磁场的影响是增加气隙的有效横截面积 A_g 。已经探索了不同的经验方法来计及这一影响。短气隙中,采用将气隙长度加到形成横截面积的两个方向的尺寸上来修正这种边缘磁场。本书中通常忽略边缘磁场的效应。如果忽略边缘现象,则 $A_g = A_c$ 。