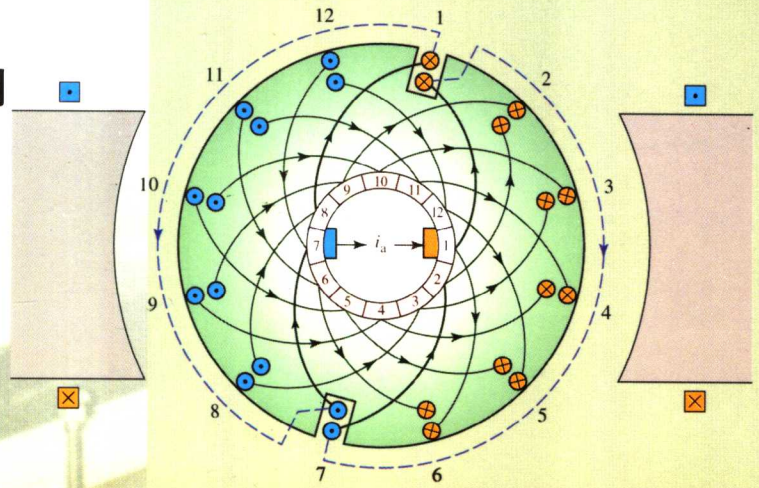


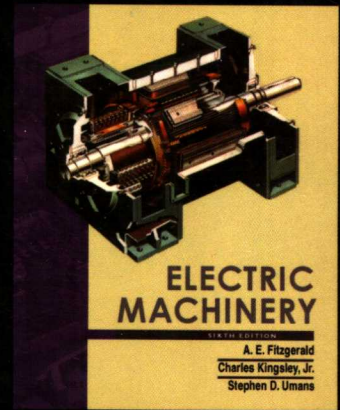
高等学校教材系列



电机学

(第六版)

Electric Machinery
Sixth Edition



A. E. Fitzgerald

[美] Charles Kingsley, Jr. 等著

Stephen D. Umans

刘新正 苏少平 高琳 等译

Mc
Graw
Hill



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry
<http://www.phei.com.cn>

电机学 (第六版)

Electric Machinery, Sixth Edition

本书的主要特色

- 每一章都包含了定量分析的例题来说明所涉及的重要概念,且多数例题都配有带答案的练习题以进一步增强理解。这些特色通过教材版面的设计已清楚地体现了出来,使得教师和学生能方便地进行查找。
- 新增的有关电力电子学的一章介绍了电力电子学的基本元器件,以及在现代电动机驱动中出现的整流和逆变的典型电路结构。
- 新增了有关直流和交流电动机转速及转矩控制的一章。这一章介绍直流和交流电机中电动机驱动的基本概念,包括对磁场定向控制技术的讨论,该技术广泛应用于现代驱动系统。
- 在单相和两相电动机一章中,包括了对不对称两相感应电机的一般化解析分析,这一分析随后用于单相感应电动机在主绕组和副绕组共同作用下运行的一般情况。这种一般化分析是本书的独特之处,在其他教材中尚未出现过。
- 在这一版中的例题和练习题中引入了流行的交互式计算机软件MATLAB的应用,另外增加了特别需要应用MATLAB的章末习题。在页边空白处放置了图标以指明需要用到MATLAB的地方。

作者简介

- 已故 A. E. Fitzgerald 教授,曾任美国东北大学学术事务副校长一职。此前为该校电机工程系主任、教授,随后被任命为院长。在进入东北大学工作之前, Fitzgerald 教授在麻省理工学院度过了20多年,在那里他获得了硕士和博士学位,并升任电机工程系教授。纵观他的一生, Fitzgerald 教授始终处于电力系统长期规划领域的前沿,在他的学术生涯中一直在工业界担任顾问工程师。Fitzgerald 教授是多个专业协会的会员,其中包括 Sigma Xi, Tau Beta Pi 和 Eta Kappa Nu,同时,他还是 IEEE 会士。

网站

- 与本书相配合的网站, www.mhhe.com/umans, 包含了解答手册的可下载版本(仅提供给教师)。该网站也将作为附加例题、习题和 MATLAB 应用例题,以及本书中图表的 PowerPoint 图片资源。

ISBN 7-5053-9352-9



9 787505 393523 >



责任编辑:李秦华
封面设计:毛惠庚

本书贴有激光防伪标志,凡没有防伪标志者,属盗版图书

ISBN 7-5053-9352-9 定价:49.00元

高等学校教材系列

电 机 学

(第六版)

Electric Machinery

Sixth Edition

A. E. Fitzgerald

[美] Charles Kingsley, Jr. 等著

Stephen D. Umans

刘新正 苏少平 高 琳 等译

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

内 容 简 介

本书从磁路和磁性材料入手,以介绍机电能量转换原理为基础,较深入地阐述了变压器、同步电机、感应电机、直流电机、变磁阻电机和步进电机,以及单相和两相电机的原理。本书的侧重点为电机的物理本质和分析方法,主要目的是使读者在电机原理方面打下坚实的基础。同时,书中初步介绍了电力拖动系统中的电力电子器件和应用线路,并讨论了电机的速度和转矩控制。为体现先进的分析工具,本书将MATLAB软件应用包含在例题及章末习题中。本书作为电机学的经典教材,多次再版,经久不衰。

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的教材或教学参考书,亦可作为工程技术人员的参考用书。

A. E. Fitzgerald, Charles Kingsley, Jr., Stephen D. Umans: **Electric Machinery, Sixth Edition**

ISBN 0-07-366009-4

Copyright © 2003 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 translation edition jointly published by McGraw-Hill Education (Asia) Co. and Publishing House of Electronics Industry. Copyright © 2004.

本书中文简体字翻译版由电子工业出版社和美国麦格劳-希尔教育出版(亚洲)公司合作出版。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:01-2003-1833

图书在版编目(CIP)数据

电机学:第六版/(美)菲茨杰拉德(Fitzgerald, A. E.)等著;刘新正等译.-北京:电子工业出版社,2004.1
(高等学校教材系列)

书名原文:Electric Machinery, Sixth Edition

ISBN 7-5053-9352-9

I. 电... II. ①菲... ②刘... III. 电机学-高等学校-教材 IV. TM3

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第105259号

责任编辑:李秦华

印 刷:北京兴华印刷厂

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

经 销:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:33.25 字数:852千字

印 次:2004年1月第1次印刷

印 数:5000册 定价:49.00元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换;若书店售缺,请与本社发行部联系。

联系电话:(010)68279077。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。

作者简介

已故 A. E. Fitzgerald 教授，曾任美国东北大学学术事务副校长一职。此前为该校电机工程系主任、教授，随后被任命为院长。在进入东北大学工作之前，Fitzgerald 教授在麻省理工学院度过了20多年，在那儿他获得了硕士和博士学位，并升任电机工程系教授。除了《电机学》以外，Fitzgerald 教授还是《电机工程基础》的著者之一。纵观他的一生，Fitzgerald 教授始终处于电力系统长期规划领域的前沿，在他的学术生涯前后一直在工业界担任顾问工程师。Fitzgerald 教授为多个专业协会的会员，其中包括 Sigma Xi, Tau Beta Pi 和 Eta Kappa Nu，同时，他还是 IEEE 的会士。

已故 Charles Kingsley, Jr. 教授，曾任麻省理工学院电机工程与计算机科学系教授，早年在该院获学士和硕士学位。在他的职业生涯中，他曾供职于通用电气公司，波音公司和达特茅斯学院 (Dartmouth College)。除《电机学》之外，Kingsley 教授还是《磁路和变压器》教材的合著者。退休后，他仍继续参与 MIT 的科学研究活动。他还是 IEEE 及其前身美国电机工程师协会的活跃会员和会士。

Stephen D. Umans 是麻省理工学院机电系统实验室、电机工程和计算机科学系主任研究工程师，在该院获电机工程工学学士、硕士及博士学位。他的专业研究方向包括机电、电机及电力系统。在 MIT 期间，他讲授了多门课程包括电机学、电磁学、电力系统，电路理论和模拟电子学等。他还是 IEEE 会士和电力工程协会的活跃会员。

译 者 序

承蒙电子工业出版社厚爱,使我们有幸将美国东北大学和麻省理工学院 Fitzgerald 教授等所著的这本教材翻译给广大读者。

本教材的第一版出版发行于 20 世纪 50 年代初,此后多次再版,经久不衰,直到此次的第六版。时光荏苒,大浪淘沙,历经半个世纪的沉积,在不断完善和发展中,它无疑已经成为了经典之作。

本教材的主要特点是把分析的重点始终放在阐明电机及机电能量转换的基本原理和物理概念上,淡化对具体电机的结构细节的讨论,这也是当今电机学教学改革的方向。与国内编写的大多数电机学教材相比,在内容的选取、编排和论述方式上有所不同。例如,书中以很大的篇幅介绍了磁性材料,特别是永磁材料的特性及应用;对旋转电机的分析,是以机电能量转换为切入点,并将旋转电机的结构、磁场及转矩计算等共性问题集中在一章进行介绍。

在历次再版时,作者都注重吸纳电机工程学科发展的新技术、新方法,丰富教材内容,使其充满了生机和活力,同时也给读者带来惊喜和满足。除了对传统电机的工作原理和基本特性进行深入透彻地分析以外,教材中还介绍了电动机转速和转矩控制,并在本版中新增了与电机控制相关的电力电子学的内容。此外,在本书部分例题和习题的分析求解中,引入了目前在工程领域广泛应用的 MATLAB 软件,这不仅可以使得许多问题的分析更深入、细致和全面,而且可以使学生在解决具体问题的背景下更好地熟悉和掌握 MATLAB 软件,可谓一举两得。

本书的译者均为西安交通大学电气工程学院的教师。其中第 1 章、第 2 章、第 10 章、第 11 章和附录由刘新正副教授翻译,第 3 章、第 4 章、第 5 章、第 8 章、第 9 章由苏少平老师翻译,第 6 章、第 7 章由高琳副教授翻译。译者力求忠实、准确地反映原著的内容,尽可能体现该书的写作风格,保持其语言特色,但译文中不妥与错误之处仍在所难免,敬请读者指正。

前 言

本书的主要目标仍然是要使读者在机电和电机的基本原理方面打下坚实的基础。纵观其所有版本,《电机学》的重点始终是电机的物理本质和分析方法。掌握本教材所涵盖的内容,将为理解许多实际的电机应用问题打下基础,同时为继续学习有关电机设计和控制的更高级课程做好准备。

虽然这一版中仍保留了以前版本中的许多内容,但也有一些重大改动。主要包括:

- 增加了一章,介绍用于电动机驱动的电力电子学的基本概念。
- 与电机控制有关的专题,以前版本中分散在不同的章节,现已整理到关于转速和转矩控制的单独一章。此外,将这一主题的覆盖面显著扩展,包括了同步和感应电机的磁场定向控制。
- 新版中引入了应用 MATLAB 的例题、练习题及章末习题。
- 单相感应电动机的分析有所扩展,包含了电动机以主绕组和辅绕组(用串联电容供电)运转的一般情况。

电力电子学是许多当代电机应用的重要组成部分。鉴于很多电机学课程现在都包括了电力电子学和驱动系统的讨论,因此将这一主题包含在本版教材的第 10 章。然而,必须强调,这里单独的一章最多也就是介绍性的,因为用一章的篇幅就这一复杂的话题所展开的讨论,不可能比在一本电力电子学教材中就电机学话题所做的介绍更充分。

第 10 章所采取的步骤是,讨论通用电力电子器件,例如二极管,SCR, MOSFET 和 IGBT 的基本特性,并介绍这些器件的简单模型,然后说明如何用这些器件来实现电力电子线路在驱动应用中的两个主要功能:整流(交流到直流的变换)和逆变(直流到交流的变换)。相控整流作为一种控制从固定交流电源产生的直流电压的技术进行了讨论。相控整流可以用于驱动直流电机,也可以为交流驱动中的逆变器提供可控直流输入。类似地,还讨论了产生可变幅值、可变频率的阶梯波及脉宽调制波形的技术。这些技术是调速驱动系统的核心,多见于可调速交流驱动中。

基于电力电子学的驱动系统使得电机的控制具备了极大的适应性,对交流电机来说尤其如此,而交流电机以前几乎只在用固定频率、固定电压的电力系统供电的应用场合才能看到。因而,有关电机控制的一章紧随第 10 章对电力电子学的介绍。


第 11 章将以前版本中分布在各章的有关电机控制的内容集中在一起,现在分成 3 个主要小节:直流电机的控制、同步电机的控制和感应电机的控制。此外用一个简短的第 4 节讨论了可变磁阻电机的控制。每一小节都以讨论转速控制开始,然后讨论转矩控制。

很多电动机驱动系统都是建立在磁场定向控制(也称为矢量控制)技术基础之上。新版中一个重要的增加内容就是第 11 章中有关磁场定向控制的讨论。这是略微高深一点的内容,在介绍性的电机学出版物中一般不会碰到。因而,本章的构架使得这部分内容可以根据教师的判断在教学中进行取舍。磁场定向控制首先出现在同步电动机的转矩控制一节,其中推导了基本方程,并与直流电机的控制进行了类比分析,再以最通用的方式出现在感应电动机的转矩

控制一节。

教师应该注意到,磁场定向控制的完整论述需要用到 $dq0$ 变换。这一变换,以前版本中出现在第 6 章,用来分析同步电机,现在被放在新版的附录 C 中。此外,附录 C 的讨论已扩展到包括感应电机 $dq0$ 变换的推导,对感应电机,定子和转子量都必须进行变换。

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繁琐和枯燥,在交流电机的分析中尤其如此,因为分析中有大量涉及到复数的代数运算。近十年中的重大发展之一就是计算机软件的广泛应用,例如 MATLAB 的应用,使这种问题的求解变得非常容易。MATLAB 在很多大学得到广泛使用,并有学生版本。

鉴于这一发展,新版本在例题、练习题以及章末的习题中融入了 MATLAB 的应用。但应该强调, MATLAB 的应用,无论如何也不是选用本书所必需的,更确切地说,它是一个提高内容。本书现在包含了一些有趣的例题,但在数学运算上可能会很冗长乏味。同样,现在有些章末习题,当用 MATLAB 求解时相对简单,但如果采用手算求解就相当不切实际。要注意到,每个 MATLAB 例题和练习题都已经用符号  做了标记,这些标记在书的页边空白处可以看到。建议或需要用 MATLAB 来完成的章末习题也同样做了标记。

应该强调,除 MATLAB 之外,还有许多其他的数值分析软件包,包括各种各样的电子表格软件包,可以用来按照与 MATLAB 相类似的方式进行计算及绘图。如果 MATLAB 软件在读者所在院校无法获得或不为读者所偏爱,鼓励教师和学生选择任何他们用起来惬意的软件包。任何软件,只要能简化复杂的计算,使学生把注意力集中在概念上而不是数学计算上,就同样能取得好的效果。

另外,应该注意到,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,以使他们从繁琐的手算折磨中解脱出来。这种途径是对使用计算器辅助计算的合理延伸。当然,在解课后习题时,仍然应该要求学生以书面的形式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,一旦问题完全公式化了,从摆弄数字本身一般不再能学到什么东西。于是,学习的过程就应延续到对结果的检查分析,既要根据正在学习的主题理解其含义,又要考察结果是否具有物理意义。

将 MATLAB 引入本版《电机学》还获得了一个额外的好处。正如以前版本的读者将意识到的,单相感应电动机的分析处理从未完善过,其原因在于从未考虑过单相感应电动机运转在主绕组和辅绕组同时励磁(电容与辅绕组串联)的一般情况。事实上,单相感应电动机这样的分析处理,在作者所知道的其他任何介绍性的电机学教材中尚未出现过。

原因很简单:这种一般性的分析处理数学上很复杂,需要求解许多联立的复代数方程式。然而,这正是像 MATLAB 这样的软件所擅长处理的一类问题。因而,这一新版《电机学》包括了这种对单相感应电动机的一般性分析处理,并给出一个已计算出的定量分析例题,及章末习题来完善分析。

对于一门单纯介绍性的课程来说,本版《电机学》中很可能包含了太多的内容。但是,本版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希望包括的主题内容。与第五版相同,最初的两章介绍了磁路的基本概念、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 章给出了对各种类型电机的总览和介绍。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,而且对理解本书其余大多数

内容不会产生太大影响。

接下来的 5 章对各种类型的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,以及单/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,基于的是第 6 章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 5 章的内容。

第 10 章对电力电子学的介绍性的讨论几乎是孤立的。希望介绍这一内容的教师可以按照自己的意愿来做,而不必在课程中按本书所出现的次序讲授。此外,这一部分也不是理解本书中介绍的电机学内容所必需的,因此,选择将此内容放在其他单独的课程中的教师无论如何也不会感到有什么缺陷。

最后,教师可能希望从第 11 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,基本上是对较早前有关各种类型电机的章节中所出现的内容的相对直接的扩展。有关磁场定向控制的内容理解起来稍显复杂,它是建立在附录 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,当然也是合情合理的。

McGraw-Hill 已建立了网站 www.mhhe.com/umans 来支持这一新版《电机学》。网站将包括解答手册的可下载版本(仅提供给教师)及本书图表的 PowerPoint 图片(申请方式详见书后的“教学支持说明”)。这是本书的一个新特色,我们在很大程度上是在白手起家,并且将继续探索不同的方式来补充和增强课本内容。例如,鉴于教师总是在寻找新的例题和习题,我们将建立一种机制,以便教师能将例题及习题提交到网站上发表(名誉归其作者),供其他教师分享。

我们也正在考虑建立一个专注于 MATLAB 及其他数值分析软件包的网站。对 MATLAB 使用者,该网站可能包含着将 MATLAB 运用到电机学的提示或建议;同时对那些希望将仿真引入他们课程的教师,网站或许会提供一些 Simulink 例题。同样,使用其他软件包而不是 MATLAB 的教师,可能想提交他们的建议或经验体会,与其他使用者分享。从这个意义上说,网站看来还会成为加强教师间互相交流的理想资源。

很明显,网站将是一个活文档,它将根据使用者的输入不断更新发展。作者极力鼓励每一个人经常访问网站,呈送建议、习题、例题以及评论。我衷心期望这个网站成为本电机学教材所有使用者的有用资源。

Kingsley 教授最初邀请我参编了本书的第四版,他本人也积极地参与了该版本的编写,他还担任了第五版的顾问。遗憾的是,Kingsley 教授在第五版出版后就去世了,没能看到这一新版工作的开始。他是一个杰出的人、一个值得尊敬的老师和朋友。我们永远怀念他。

我要感谢我的许多同事,感谢他们在本版编写期间的卓有见解和富有帮助的讨论。我的朋友,Jeffrey Lang 教授,对首次出现在本版中的电力电子学和磁场定向控制的系统性叙述方面给予了极大帮助。他也曾在第五版中第一次出现的变磁阻电机的讨论中提出了非常宝贵的见解和建议。同样,Gerald Wilson 教授,他是我的研究生论文导师,现在已经成为我的朋友和事业上的同事,并一直是颇有价值的建议和见解的持续不断的源泉。

在更私人方面,我想表达我对妻子 Denise 和孩子 Dalya 和 Ari 的爱,感谢她(他)们容忍了这一版《电机学》占用我的许多业余时间。我向孩子们许诺,当这一版《电机学》的工作完成后,我会给他们读《哈利·波特》(Harry Potter),我最好能兑现这一许诺!另外,我要提到我终身的

朋友 David Gardner,他饶有兴致地关注着本版的工作,但却没能活着看到它完成。他是一个非凡的人,就在最终草稿接近完成以前,由于肌肉萎缩的并发症而去世。

最后,我想要感谢参与这一工程的评审人员,他们的意见和建议对本版的最后定稿起着至关重要的作用。他们是:

Ravel F. Ammerman, Colorado School of Mines

Juan Carlos Balda, University of Arkansas, Fayetteville

Miroslav Begovic, Georgia Institute of Technology

Prasad Enjeti, Texas A&M University

Vernold K. Feiste, Southern Illinois University

Thomas G. Habetler, Georgia Institute of Technology

Steven Hietpas, South Dakota State University

Heath Hofmann, Pennsylvania State University

Daniel Hutchins, U.S. Naval Academy

Roger King, University of Toledo

Alexander E. Koutras, California Polytechnic State University, Pomona

Bruno Osorno, California State University, Northridge

Henk Polinder, Delft University of Technology

Gill Richards, Arkansas Tech University

Duane F. Rost, Youngstown State University

Melvin Sandler, The Cooper Union

Ali O. Shaban, California Polytechnic State University, San Luis Obispo

Alan Wallace, Oregon State University

我要特别感谢 Zagazig 大学的 Ibrahim Abdel-Moneim Abdel-Halim 教授,是他付出巨大努力发现了草稿文档中的许多打字和数字错误。

Stephen D. Umans

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	17
1.5 永磁体	22
1.6 永磁材料的应用	26
1.7 小结	31
1.8 习题	32
第 2 章 变压器	42
2.1 变压器概述	42
2.2 空载运行	44
2.3 二次侧电流的影响和理想变压器	47
2.4 变压器电抗及等效电路	50
2.5 变压器的工程分析	54
2.6 自耦变压器和多绕组变压器	60
2.7 三相变压器	63
2.8 电压互感器和电流互感器	66
2.9 标么值体系	70
2.10 小结	76
2.11 习题	77
第 3 章 机电能量转换原理	83
3.1 磁场系统中的力和转矩	83
3.2 能量平衡	86
3.3 单边励磁磁场系统中的能量	87
3.4 由储能确定磁场力和转矩	90
3.5 由磁共能确定力和转矩	96
3.6 多边励磁磁场系统	101
3.7 含永磁体系统中的力和转矩	106
3.8 动态方程	113
3.9 分析方法	116
3.10 小结	118
3.11 习题	119
第 4 章 旋转电机概述	129
4.1 基本概念	129

4.2	交流和直流电机概述	131
4.3	分布绕组的磁势	139
4.4	旋转电机中的磁场	147
4.5	交流电机中的旋转磁势波	150
4.6	感应电势	155
4.7	隐极电机的转矩	160
4.8	直线电机	169
4.9	磁场饱和	171
4.10	漏磁通	173
4.11	小结	175
4.12	习题	176
第 5 章	同步电机	183
5.1	多相同步电机概述	183
5.2	同步电机的电感和等效电路	185
5.3	开路特性和短路特性	191
5.4	稳态功角特性	198
5.5	稳态运行特性	205
5.6	凸极效应, 直轴和交轴理论简介	211
5.7	凸极电机的功角特性	216
5.8	永磁交流电动机	220
5.9	小结	221
5.10	习题	223
第 6 章	多相感应电机	229
6.1	多相感应电机概述	229
6.2	多相感应电机中的电流和磁通	232
6.3	感应电动机的等效电路	233
6.4	等效电路分析	237
6.5	应用戴维南定理计算转矩和功率	241
6.6	利用空载试验和堵转试验确定参数	248
6.7	转子电阻的影响; 绕线式和双笼型转子	257
6.8	小结	262
6.9	习题	263
第 7 章	直流电机	270
7.1	概述	270
7.2	换向器的作用	275
7.3	电枢磁势的影响	277
7.4	分析基础: 电路方面	280

7.5	分析基础:磁路方面	282
7.6	稳态性能分析	286
7.7	永磁直流电机	291
7.8	换向和换向极	295
7.9	补偿绕组	297
7.10	串励通用电动机	299
7.11	小结	300
7.12	习题	300
第 8 章	变磁阻电机和步进电机	308
8.1	VRM 分析基础	308
8.2	实际 VRM 的结构	314
8.3	产生转矩的电流波形	318
8.4	非线性分析	325
8.5	步进电动机	331
8.6	小结	338
8.7	习题	339
第 9 章	单相电动机和两相电动机	343
9.1	单相感应电动机:定性分析	343
9.2	单相感应电动机及同步电动机的起动和运行性能	345
9.3	单相感应电动机的旋转磁场理论	351
9.4	两相感应电动机	356
9.5	小结	371
9.6	习题	371
第 10 章	电力电子学概述	374
10.1	电力电子开关	374
10.2	整流:交流到直流的变换	384
10.3	逆变:直流到交流的变换	409
10.4	小结	419
10.5	参考文献	420
10.6	习题	421
第 11 章	转速及转矩控制	426
11.1	直流电动机的控制	426
11.2	同步电动机的控制	441
11.3	感应电动机的控制	455
11.4	变磁阻电动机的控制	469
11.5	小结	471
11.6	参考文献	472
11.7	习题	473

附录 A 三相电路	480
附录 B 交流分布绕组的电势、磁场和电感	492
附录 C dq0 变换	501
附录 D 实际电机性能和运行的工程问题	509
附录 E 常数、SI 单位转换系数表	518

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互相转换的装置。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、传动装置和传感器。

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。针对变压器分析所得到的方法,奠定了后续讨论电机的基础。

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,磁场是能量传递和转换的媒介。永磁材料也得到了广泛应用。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于实践。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,这些知识是在工科学生的基础物理课程中讲授的。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学习本书的先决条件。磁路分析方法,代表对精确的场理论解的代数近似,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,涉及到求解麦克斯韦方程及各种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。

首先假设,对本书中处理的系统,涉及到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。此项涉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,而麦克斯韦方程使磁场与产生磁场的电流相关联。

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

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

式 1.1 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 表述为:磁通密度 \mathbf{B}

① 虽然不能得到精确的解析解,但基于计算机的数值解法(有限元和边界元法构成许多商品化程序的基础)相当普及,已成为分析和设计不可或缺的工具。然而,正如在本书中可看到的,这些方法最好用来使建立在解析法基础上的分析更精致。采用数值法对电机原理和基本特性的理解并无帮助,因而,本书中将不做讨论。

守恒,即没有净磁通进入或离开一个闭合面(这等于是说,不存在磁场的单极磁荷源)。从这些式子可见,磁场量可以由源电流的瞬时值惟一确定,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到磁路的概念。复杂几何结构中,磁场强度 H 和磁通密度 B 的通解极难得到。然而,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。高磁导率材料的存在,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。读者将会看到,本节描述的磁路这一概念的应用,对本书中的许多情况相当适用^①。

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,其磁导率远远大于周围空气的磁导率($\mu \gg \mu_0$)。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 所示。

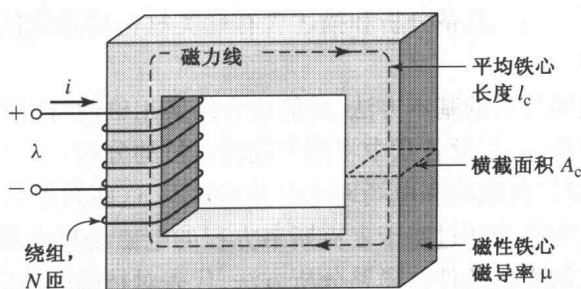


图 1.1 简单磁路

由于磁性铁心的高磁导率,精确解将会表明,磁通几乎全部被限定在铁心,磁力线沿铁心所规定的路径而行,因为横截面积相同,横截面上的磁通密度基本相同。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 仅显示了单一线圈,而变压器及大多数旋转电机具有至少两个绕组, Ni 必须用所有绕组的安培-匝数的代数和来取代。

穿过表面 S 的磁通是 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 的单位为韦伯(Wb)。

式 1.2 表述为:进入或离开闭合面的净磁通(等于 B 在该闭合面上的面积分)为 0。这等于是说,进入围绕某一体积的表面的磁通,必须从该表面的其他部分离开体积,因为磁力线形成闭合回线。

这些论据可以用来证明在如图 1.1 中铁心磁路的横截面上,磁通密度为均匀的假设。此

^① 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;及麻省理工学院的“Magnetic Circuits and Transformers”,M.I.T. 出版,1965,第 1 章到第 3 章。

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 = 铁心中磁通

B_c = 铁心中磁通密度

A_c = 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:

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

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} 的关系为磁场所在材料的特性。通常假设为线性关系,因而:

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

式中 μ 称为磁导率。在 SI 单位制中, \mathbf{H} 是以安培每米为单位来度量, \mathbf{B} 是韦伯每平方米,也称为特斯拉(T), μ 是韦伯每安培-匝-米,或等效为亨每米。在 SI 单位中,自由空间的磁导率为 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ 亨每米。线性磁性材料的磁导率可以用 μ_r 来表示,其值为相对于自由空间的磁导率,即 $\mu = \mu_r \mu_0$ 。变压器和旋转电机中用到的材料 μ_r 的典型值范围从 2000 到 80 000。铁磁材料的特性在第 1.3 节和第 1.4 节描述。暂时假设 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。

变压器绕在如图 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 将按铁心及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 的结构可以作为有两个串联部分的磁路来分析:磁导率 μ , 横截面积 A_c , 平均长度 l_c 的磁性铁心和磁导率 μ_0 , 横截面积 A_g , 长度 g 的气隙。铁心中,磁通密度可以假设为均匀,因而:

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

^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 $\int \mathbf{H} dl$ 来计算。