



国际先进工业技术译丛

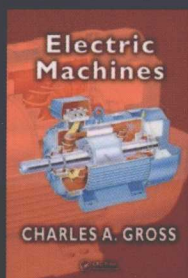
“十二五”

国家重点图书出版规划项目



电机 —— 基本理论与工程实践 Electric Machines

【美】查理·A. 格雷 (Charles A. Gross) 著
张炳义 译



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



国际先进工业技术译丛

电机—— 基本理论与工程实践 Electric Machines

【美】查理·A.格雷斯 (Charles A. Gross) 著
张炳义 译



YZLI0890121608

人民邮电出版社
北 京

图书在版编目 (C I P) 数据

电机 : 基本理论与工程实践 / (美) 格雷斯
(Gross, C. A.) 著 ; 张炳义译. — 北京 : 人民邮电出版
社, 2012. 1

(国际先进工业技术译丛)

ISBN 978-7-115-26846-4

I. ①电… II. ①格… ②张… III. ①电机学 IV.
①TM3

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第227358号

版 权 声 明

Electric Machines / ISBN 978-0-8493-8581-0

Copyright © 2007 by Taylor&Francis Group, LLC

Authorized translation from English language edition published by CRC Press, part of Taylor & Francis Group LLC. All Right Reserved. 本书原版由 Taylor & Francis 出版集团旗下 CRC 出版社出版, 并经其授权翻译出版。版权所有, 侵权必究。

Posts and Telecommunication Press is authorized to publish and distribute exclusively the **Chinese (Simplified Characters)** language edition. This edition is authorized for sale throughout Mainland of China. No part of the publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval, without the prior written permission of the publisher. 本书中文简体字翻译版授权由人民邮电出版社独家出版并限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。

Copies of this book sold without a Taylor&Francis Sticker on the cover are unauthorized and illegal. 本书封面贴有 Taylor & Francis 公司防伪标签, 无标签者不得销售。

北京市版权局著作权合同登记号 图字: 01-2011-3140 号

国际先进工业技术译丛

电机——基本理论与工程实践

◆ 著 [美] 查理·A. 格雷斯 (Charles A. Gross)

译 张炳义

责任编辑 韦 毅

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号

邮编 100061 电子邮件 315@ptpress.com.cn

网址 <http://www.ptpress.com.cn>

三河市海波印务有限公司印刷

◆ 开本: 787×1092 1/16

印张: 23.25

2012 年 1 月第 1 版

字数: 580 千字

2012 年 1 月河北第 1 次印刷

著作权合同登记号 图字: 01-2011-3140 号

ISBN 978-7-115-26846-4

定价: 79.00 元

读者服务热线: (010)67129264 印装质量热线: (010)67129223

反盗版热线: (010)67171154

广告经营许可证: 京崇工商广字第 0021 号

丛 书 前 言

改革开放 30 年来,我国工业得到了飞速发展,在短短 30 年的时间内完成了发达国家上百年的工业化发展历程,建立了相对完整的工业体系。我国已成为全球制造业基地,中国模式备受世人瞩目。在信息技术快速发展以及对节能减排和环境保护日益重视的今天,为了促进我国工业由大变强的发展,我们必须走新型工业化道路,解决工业化过程中面临的一些突出问题,比如如何进一步增强自主创新能力,如何完善对工业行业的管理,如何在一些核心技术和关键技术上有更大的突破,如何促进高新技术与传统产业的结合,等等。

为配合我国工业领域设备改造,推动我国工业领域与国际间、行业内的交流与发展,加速工业生产及制造技术的进步和设备更新换代的步伐,我们精选了国外有关现代工业技术的部分图书,翻译出版了“国际先进工业技术译丛”。本丛书内容主要涉及新型能源开发与利用、绿色设计与制造、资源节约和环境保护、能效管理等方面。这些图书的原著均由英美等国的知名出版集团出版,汇集了多个国家著名专家学者在工业技术领域的重要研究成果,集中反映了当前工业领域的先进理念、方法和技术,对于解决我国当前工业发展过程中的一些关键问题和突出问题具有较大的参考价值。

现代工业技术呈现开放性、智能化、信息化与网络化的特点,融合了自动化技术、信息技术、现代控制技术、网络技术、先进制造技术、环境保护技术及现代管理理论和方法等诸多学科的先进技术,需要各学科的专家及工程技术人员通力合作,从而实现多学科专业知识与系统的集成,形成现代工业发展的手段和模式。因此,“国际先进工业技术译丛”在选编时,以促进信息化和工业化融合、技术创新和节能减排为原则,紧密结合我国国情,力求突出实用性和先进性,希望有助于解决我国工业技术应用中的一些实际问题,促进我国工业技术及管理模式的变革,提高我国工业企业的技术创新能力。

“国际先进工业技术译丛”的翻译和审定工作主要由国内相关领域的知名专家学者和专业人士承担,力求准确真实地反映原著内容并便于国内读者理解和接受。本丛书致力于“传播国际先进工业生产管理理念,推广工业领域重大技术创新成果”,以便使我国工业领域内的相关人员能够对现代工业方面的知识和技术有更深入和全面的了解,并在我国现代化工业的建设中加以应用。今后我们将继续加强对国际上工业技术领域优秀图书的翻译和出版工作,欢迎专家学者以及广大读者提出宝贵意见和建议。

译者序

其实国内关于电机的各种书籍，包括电机学的各种版本已经不胜枚举，作为多年从事电机专业教学与科研的工作者，对电机的理论和技术应该是不陌生的。可是，当我应人民邮电出版社之邀，翻译美国奥本大学查理·A. 格雷（Charles A. Gross）教授所著的《电机》时，随着一章章译文的成稿，我不禁为格雷教授对电机学的独特理解和分析方法而折服。从物理概念而不是数学推导来介绍电机的基本理论；通过取自具体实际工程应用的例题计算和大量与实际相结合的习题，来加深读者对电机基本理论、分析和计算方法的理解，这与国内各个版本电机学书籍都有着很大的不同。特别是把供电电源、电机、控制器、机械负载融合到一起分析，更突出了该书学以致用用的教学理念，与我们国内的情况确实有明显的不同。至于该书自身的特点和学习方法，格雷教授已经在他的序言和后记中有了非常完美的描述。

在译稿完成的时候，我要感谢我的博士、硕士研究生在本书的初译稿中所做的工作，特别是博士生李庆旭，硕士生蒙越、齐雯、苏义等都为译文的最后完成做了许多工作。翻译书必然不是著书，所以要简单得多。但是，由于译者自身因素所限，难免在最后统稿和定稿中，存在不尽人意之处，敬请读者见谅。

谢谢！

译者

2011年10月

序 言

电磁现象的基本应用有两个：

- 能量的处理和转换；
- 信息的处理和转换。

虽然电气工程学通常被认为包含了以上两个学科，但在第二次世界大战前，对于能量方面的研究才是此专业的重点。而在二战之后，由于电子工业的迅猛发展和军事工业的需求，电气专业的重点转向了信息方面，几个革命性的创新^①更是促进了这一改变。时至今日，电子信息方面的应用之广及其功能之强甚至已经远远超过了科幻小说家们的想象力。现在处于科技革命的中期，科技发展的前途仍不可估量。

话说回来，虽然信息处理本身如此先进和强大，但对于人类来说，它并非最重要的。人类社会最基本的需求仍然是：衣、食、住、行、水和空气。要满足这些需求，就要掌控能量。因此，人类社会要发展，就要求能够大范围、有效率、经济、稳定、安全和环保地使用能量。电磁形式的能量方便控制，所以它是满足以上条件的关键。因此，电磁能和机械能的转换以及实现转换的装置或机器，一直都是电气及其相关学科的基础内容。

本书适用于电机的学习。这里所说的电机，指的是包括电源、控制器、电机和机械负载的完整系统的一部分。电机是主要的学习对象，但电源、控制器和机械负载的相关知识也会提到。

读者可以通过电机的设计、应用和控制 3 个方面来学习电机。设计方面包括电机的详细结构，内部磁场和力学的分析，内部损耗，电机的电路模型和电机测试得到的电机参数。应用方面包括电机的运行方式（电动机、发电机、电磁制动），不同负载、不同规格的电机型号的选择和通过等效电路分析电机性能。控制方面包括调速方式的选择（调压调速和变频调速等），控制器所需的硬件、工作状态（电动机运行，发电机运行，电磁制动）、静态和动态（尤其是启动）的性能，以及一些附加问题如谐波影响等。本书的讲述尽量全面：从电机的基本

①

a 廉价可靠的固态半导体器件的发明。

b 用二进制就可以表示所有信息的发现。

c 上一条（b）所用的二进制信息可用电量来表示。

d（a）中所说的半导体器件可以大量生产，并且尺寸、造价和能耗在不断减小。

e 集成电路的发明，并且尺寸、造价在不断减小，而复杂度却在不断增加。

结构和运行原理出发,并结合实例以及一些相关的控制问题来讲述。

本书面向本科以上学历人员编写,读者应具备基本的工程物理和数学知识背景,还有基本的电路知识。大多数^②内容都包含在一个学期约 3 学分的课程里。当然,如果所有内容都详细讲解,或者把基础知识复习一遍,会需要更多的时间。本书至少在 3 个方面很有用:用作电机学的必修课或者选修课的教科书;用作电机学选修课的补充读物,电力系统专业基础课的补充读物;用作工程师的通用参考书。本书的内容和传统的参考资料相比,更着重于分析的深度。作为教科书使用时,推荐的教学目录如下。

电机学准备知识:工程物理,数学,电路。电磁装置基本问题的全面讲解,电机的设计、应用和控制 3 个方面都会讲到。课程包含直流电机和单相、多相感应电机及同步电机。讲述了电动机的驱动、控制问题,以及基本的整流电路。用大量实例讲解了旋转电机和直线电机。另外也有变压器的相关内容。

以上是推荐教学大纲的一个概要,也是对全书简单的介绍。教师可以根据自己的需要对大纲进行删减。附录 A 提供了国际单位制以及各单位之间的转换关系,以便查阅。附录 B 简明地介绍了电路的基本概念,内容包括三相和对称电路。附录 C 提供了谐波方面的相关资料。如果学生的背景知识不是非常扎实,最好将这些内容在恰当的时间进行讲解。

有经验的工程学教师都知道,学生只有通过解决问题,才能巩固他们对技术理论的理解。为此,每章最后都列有习题。每道习题都有自己独特的教学目的,起到巩固和加强本章所学内容的作用,并且和之前的章节相互关联。所以建议把每道题都布置为作业。如果想通过改变习题中的关键数据来改变所有习题的答案,可以参考如下示例。

例 4.3 中的电动机,定子电压为平衡额定值,频率为 60Hz,转速为 1785r/min,转子短路,求出所有的电流、功率、转矩、转差、功率因数和效率。

改动此题:当转速变为 1775r/min 时求解上题。

此书配套了一个公用软件。还有如下两个相关的工程分析程序。

XFMR: Transformers and Magnet Core Analyses

EMAP: Electric Machine Analysis Program

这些程序可以在下面的网站下载:

<ftp://ftp.eng.auburn.edu/pub/grossca>

在“grossca”下可以找到一个名为“programs”的文件夹,这个文件夹包含了“xfmr”和“emap”。要在线运行它们,只要双击后缀名为“.exe”的文件即可。

以上软件都是免费的。

任何书都不可能完全由一个人编写,本书也一样。许多人以各种方式对本书的出版作出了贡献(并未全部列举): W. M. Feaster, R. Mark Nelms, Dallas W. Russell, L.L. Grigsby, J. L. Lowry, George McPherson, Stephen L. Smith 和 J. D. Irwin. 特别感激 Sandy Johnson 在编辑方面所做的工作。本书还得到了如 General Electric, Alabama Power Company, the Southern Company, Reliance Electric, Rockwell, ABB 和 Siemens 等公司的全力支持和帮助。最后,向我的家庭,尤其是我的妻子 Dodie 表示衷心的感谢!

^② 教师可以选择忽略变压器(见第 2 章)、感应电机不对称运行的性能(见第 6 章)、同步电机不对称运行的性能(见第 8 章)、直线电机(见第 10 章)还有其他的一些章节的内容。

目 录

第 1 章 基本电磁概念.....1	2.9 用于三相变压器分析的序电路模型.....53
1.1 磁的基本概念.....1	2.10 变压器中的谐波.....57
1.2 线性磁力系统: 磁路.....3	2.11 总结.....60
1.3 电压、电流和磁场的相互作用.....6	习题.....60
1.4 材料的磁特性.....8	
1.5 非线性磁路分析.....12	第 3 章 基本机械概念.....64
1.6 永久磁铁.....16	3.1 常见观点.....64
1.7 超导磁体.....17	3.2 效率.....67
1.8 基本的直线电机.....18	3.3 负载转矩—速度特性.....68
1.9 基本的旋转电机.....23	3.3.1 恒转矩负载 ($n=0$; $T_L=A_0$).....68
1.10 多绕组的电磁系统.....25	3.3.2 线性 (一阶) 转矩负载 ($n=1$; $T_L=A_1\omega_L$).....68
1.11 漏磁通.....30	3.3.3 抛物线 (二阶) 转矩负载 ($n=2$; $T_L=A_2\omega_L^2$).....68
1.12 电磁系统中额定的概念.....31	3.3.4 n 阶转矩负载 ($T_L=A_0 + A_1\omega_L + A_2\omega_L^2 + \dots + A_n\omega_L^n$).....69
1.13 总结.....32	3.3.5 恒功率负载.....70
习题.....32	3.4 极惯性矩.....71
第 2 章 变压器.....35	3.5 传动装置.....73
2.1 理想变压器.....35	3.6 运行模式.....75
2.2 变压器的额定值和标么值.....37	3.7 平动系统.....75
2.3 非理想的三绕组变压器.....39	3.8 典型事例分析: 电梯.....76
2.4 非理想的双绕组变压器.....42	3.9 原动力.....80
2.5 变压器的效率和电压变化率.....43	3.9.1 水轮机.....81
2.6 工程实用问题.....45	3.9.2 蒸汽轮机.....81
2.7 自耦变压器.....46	3.9.3 燃气轮机.....82
2.8 三相系统中的变压器工作原理.....47	3.9.4 风力机.....82
2.8.1 Y-Y 连接.....49	3.9.5 电动机—发电机组.....84
2.8.2 Y- Δ 连接.....49	
2.8.3 Δ -Y 连接.....50	
2.8.4 Δ - Δ 连接.....50	
2.8.5 开三角连接.....50	
2.8.6 之字形连接.....50	

3.9.6 独立应急电源	85	5.9.1 晶闸管可控整流电路	145
3.9.7 车载电气系统	85	5.9.2 IGBT 可控整流电路	146
3.10 总结	85	5.10 交流电动机驱动	148
习题	86	5.11 交流电动机驱动: 动态性能 分析	150
第 4 章 多相感应电机稳态运行	89	5.12 电动机的反转性能	152
4.1 电机结构	89	5.13 四象限控制器	153
4.1.1 定子结构	90	5.14 总结	154
4.1.2 转子构成	90	习题	154
4.2 定子绕组排布	91	第 6 章 多相感应电机的不对称 运行	158
4.3 旋转磁场	95	6.1 非对称运行	158
4.4 定子和转子的相互作用	98	6.1.1 正序响应	159
4.5 基于等效电路的性能分析	101	6.1.2 负序响应	160
4.6 等效电路参数的实验测取	105	6.1.3 零序响应	160
4.6.1 直流实验	106	6.2 单相运行	163
4.6.2 堵转实验	107	6.3 三相电机在单相电源下运行	165
4.6.3 空载实验	107	6.4 在非正弦电压下运行	167
4.7 运行状态: 电动机、发电机、 电磁制动	109	6.5 两相感应电机	170
4.8 动态性能	111	6.6 单相感应电机	170
4.9 鼠笼转子电机	116	6.7 单相感应电机在单绕组下运行	178
4.10 温升问题	120	6.8 等效电路中的参数测定	181
4.11 总结	123	6.8.1 直流测试	181
习题	124	6.8.2 转子堵转测试	181
第 5 章 交流电动机的控制	127	6.8.3 空载测试	182
5.1 负载转矩—速度特性的控制	127	6.9 动态性能	183
5.2 电机转矩—速度特性的控制	128	6.10 总结	185
5.3 调压和变频	130	习题	186
5.4 电力半导体开关器件	131	第 7 章 多相同步电机: 稳态 运行	187
5.4.1 电力半导体二极管	132	7.1 电机结构	187
5.4.2 电力半导体晶闸管	132	7.1.1 定子结构	187
5.4.3 绝缘栅双极晶体管	133	7.1.2 转子结构	187
5.4.4 半导体元件的主要指标	134	7.2 由感应电机演化的电机模型	189
5.5 单向逆变器	135	7.3 转子和定子电路的相互作用: 磁化特性	190
5.6 三相逆变器	138	7.4 隐极同步电机: 发电机运行	191
5.7 交流变直流: 整流器	142		
5.8 三相整流器	144		
5.9 可控整流电路	145		

7.5 隐极同步电机: 电动机运行	196
7.6 凸极同步电机	199
7.7 同步电机参数测试	207
7.7.1 直流测试: R_a	207
7.7.2 开路实验: 磁化特性和励磁电阻	208
7.7.3 短路实验: X_d	209
7.7.4 滑差实验: X_q	209
7.7.5 空载实验: 旋转损耗	209
7.7.6 零功率因数滞后实验: X_l	210
7.7.7 V 型曲线	214
7.8 实际工况中的同步发电机运行	215
7.8.1 源动力	216
7.8.2 励磁系统	216
7.8.3 容量曲线	218
7.8.4 抽水蓄能	220
7.9 永磁同步电机	221
7.10 多相同步磁阻电机	223
7.11 无刷直流电机	223
7.12 总结	225
习题	225

第 8 章 多相同步电机: 通用耦合电路模型

8.1 同步电机的通用耦合电路模型	230
8.2 $0dq$ 转换	234
8.3 在 $0dqFDQ$ 模型中的功率和转矩	239
8.4 利用发电机惯例的 $0dqFDQ$ 模型	240
8.5 三相平衡稳速运行的发电机特性	242
8.6 同步机的标么值	246
8.7 T 型等效电路	249
8.8 源自厂家的数据 $0dqFDQU$ 常数	251
8.9 $0dqFDQU$ 模型的特点	258

8.10 总结	260
习题	260

第 9 章 直流电机

9.1 机械结构	264
9.1.1 定子结构	265
9.1.2 转子 (电枢) 结构	265
9.2 直流电压的产生	268
9.3 直流电机的发电机运行模式	273
9.4 直流电机的电动机运行模式	275
9.5 直流电机速度控制	277
9.5.1 变励磁调速	277
9.5.2 调压调速	278
9.5.3 四象限运行	279
9.5.4 直流电机反转	280
9.6 直流电机的参数测定	280
9.6.1 R_a 的测定	280
9.6.2 瞬时测试: L_a	280
9.6.3 开路实验: 磁化特性和励磁阻抗	280
9.6.4 空载实验: 旋转损耗的测定	281
9.7 直流电动机驱动: 半波整流	281
9.7.1 半波二极管直流电动机驱动	282
9.7.2 半波晶闸管直流电动机驱动	283
9.7.3 半波 IGBT 直流电动机驱动	285
9.8 直流电动机驱动: 全波整流	286
9.8.1 全波二极管直流电动机驱动	286
9.8.2 全波晶闸管直流电动机驱动	287
9.8.3 晶闸管三相六脉冲直流电动机驱动	288
9.9 四象限工作	290
9.10 直流电动机的动态分析	290
9.11 电梯中的应用	293
9.12 一个更全面的电动机模型	296

9.13 总结	296	11.6 旋转变压器	326
习题	297	11.7 微机电系统	329
第 10 章 直线电机	300	11.8 总结	331
10.1 直线感应电机的结构	301	习题	331
10.1.1 初级设计	301	后记	333
10.1.2 次级设计	302	附录 A 单位和转换因子	334
10.1.3 电磁悬浮 (EML)	303	附录 B 电路概念简介	337
10.1.4 电力悬浮	307	B.1 直流电路概念	338
10.2 直线感应电机模型: 等效 电路	307	B.2 交流电路概念	338
10.3 高速铁路 (HSR) 应用	308	B.3 对称三相交流电路概念	341
10.4 直线同步电机结构	312	B.4 对称分量法	344
10.4.1 直线同步电机的电枢 设计	312	附录 C 谐波概念	347
10.4.2 直线同步电机励磁的 设计	312	C.1 基本概念	347
10.5 直线同步电机隐极模型	312	C.2 系数计算	348
10.6 直线电机在电梯中的应用	315	C.3 有效值	349
10.7 总结	318	C.4 对称性	349
习题	318	C.5 频谱图	350
第 11 章 特种电机与传感器	320	C.6 非正弦激励下的线性电路 响应	352
11.1 交直流两用电动机	320	电机、变压器和电力电子学方面的 参考资料	354
11.2 罩极电机	321		
11.3 磁滞式电动机	321		
11.4 步进电机	322		
11.5 编码器	324		

第 1 章

基本电磁概念

曾经有人说过，电能在没有转化成其他能源形式之前，可能是世界上最不能显示其价值的能源形式。之所以选择电能作为能源，正是由于它很容易控制，并且可以很容易地转换成热、光、声和机械力以及机械运动，这对于现代的工程技术是非常重要的。本书讲述了关于把机械能转换成电能（反过来也一样）的工程问题及其逆问题。“逆问题”的含义是指这个转化过程是可逆的，即是说同样可以方便地实现从电能到机械能的转化。实际上，同一台电机一般可用于任何一种转换方式。这种转换过程不可避免地涉及电荷的定向运动问题，或者叫电流问题，进而衍生出磁场问题。

磁场在机电能量转换过程中扮演了很重要的角色。“电磁机械”这个术语过于麻烦，通常不直接使用，但是它的意义很丰富，因为它准确地反映了磁场在能量转换过程中的中间作用。我们简化这个术语成“电机”，或者进一步简化为“EM”，它是一种能够把电能转化为机械能或者把机械能转化为电能的设备。如果一台电机通常是把机械能转化为电能，那就称其为发电机。实际上更加准确地来说，应该是电机工作在发电机模式，就电机来说没有什么可以用来判定它是一台发电机的内在特征，要识别它是否为发电机，只能依靠在一定程度上外部强加的运行环境。同样地，把电能转化为机械能的电机一般称作电动机。

我们周围到处都是电动机和发电机。在一个典型的现代家庭，平均要用到 60 台电机，如搅拌机、洗衣机、吹风机、微波炉、真空吸尘器、食品加工机、播种机、鼓风机、挂钟、洗碗碟机、垃圾处理机、车库门遥控开关等，所有的这些机器都包含了一台或者多台电动机或者发电机。绝大部分的制造过程不可能没有电动机。尽管汽车仍然是靠内燃机提供动力的，但是也不可避免地含有发电机和多台电动机。如果现代数字计算机好比是人的大脑，电机则可以称作人的肌肉。

本书基于高年级本科生应该具有的工程水平，讲述电机及其相关系统的知识。也就是说，已经假设读者已经掌握了物理、数学、电路和场论等相关的基础知识。在没有特殊声明的情况下，本书通篇都是使用国际单位制或者以十为基数的乘法，换句话说，在所有等式中的默认单位全部都是国际单位制。

1.1 磁的基本概念

由于磁场在机电能量转换过程中至关重要，所以我们从磁场的基础知识开始对问题进行探讨。然而这仅是一本关于工程技术方面的书，不会过多地提供一些对于电磁现象中的所有物理过程和数学方面论证及其严格的探讨，这应该留给物理书去论述。

电磁现象很早就被许多科学家观察到，但是安德烈·玛丽·安培（Andre Marie Ampere，

1775—1836) 特别地发现, 带有电流的导线会在位于其附近的磁性指南针上产生力的作用。这种非接触的作用现象可以用电流周围产生了一种力线(磁力线)的形式来解释, 这有助于形象地理解电流和指针间的相互作用, 因此说电流能够产生围绕其自身的磁场。进一步研究发现, 磁场的强度正比于电流的大小, 磁场的方向则取决于电流的流向。

这些发现被完美地总结成为一个等式形式, 这就是著名的安培定律, 它提供了磁场强度(H)和电流(i)之间的数量关系。除非特别声明, 本书中所有变量都采用国际单位制。

$$\oint \hat{H} \cdot d\hat{x} = i_{\text{enclosed}} \quad (1.1)$$

下标“enclosed”定义为闭合积分路径。等式(1.1)是安培环路定律的一般形式, 把它应用在如图1.1(a)所示的具体结构中来解释, 该结构是由围绕着 N 匝线圈的闭合铁芯组成。假设我们在铁芯结构的中心线上选取一个积分路径, 这个路径的长度是 l 。进一步假设 H 和 dx 在任何一个地方都是平行的, 也就是 H 持续地沿着 x 路径。则等式(1.1)变成了:

$$Hl = Ni \quad (1.2)$$

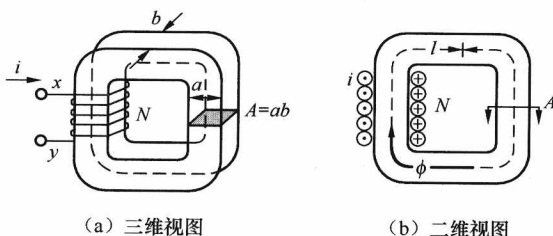


图 1.1 简单的磁路系统

在铁芯中磁通密度(B) (单位为 W/m 或 T) 与 H 的关系可以通过下式表示:

$$B = \mu H \quad (1.3)$$

式中的 μ 是铁芯的磁导率, 单位为 H/m。磁导率与电路中的电导率相类似, 它是材料通过磁场体现出来的, 而且衡量了磁场通过铁芯材料的难易程度。

铁芯中的磁通与磁通密度的关系通过下式表示:

$$\phi = \int \hat{B} \cdot d\hat{A} \quad (1.4)$$

如果 B 是大小恒定, 而且方向垂直于与 dA 处处平行的表面, 等式(1.4)也可以简化为:

$$\phi = BA \quad (1.5)$$

式中的 ϕ 是磁通, 单位为 W (韦伯)。把等式(1.3)和等式(1.5)代入等式(1.2), 有:

$$Ni = \frac{l}{\mu A} \phi \quad (1.6a)$$

定义

$$\mathcal{F} = Ni = \text{磁动势 (mmf)} \quad (1.6b)$$

与

$$\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu A} = \text{磁阻 (单位为 } H^{-1}) \quad (1.6c)$$

等式(1.6a)变成

$$F = \mathfrak{R} \phi = \text{磁动势 (mmf)} \quad (1.7a)$$

或

$$\phi = P\mathcal{F} \quad (1.7b)$$

式中:

$$P = 1/\mathfrak{R} = \mu A/l = \text{磁导 (单位为 H)} \quad (1.7c)$$

等式 (1.7) 是磁场最基本的法则, 有时候也称它为磁的欧姆定律。该等式表明是磁动势 ($\mathcal{F}$) 产生的磁通 (ϕ), 而磁通的多少取决于磁阻 $\mathfrak{R}$ (或者说磁导 p)。

要得到强磁场, 就得加大 μ 和 A , 减小 l 。要加大 μ , 就得选取高磁导率的铁芯材料。要想得到较大的 A 和较小的 l , 可以考虑调整铁芯的几何尺寸。

必须清楚, 这里得到的是近似值, 因为我们假设磁通在铁芯截面上是均匀分布的, 而实际上是做不到的。

同样, 铁芯截面中流过的磁通也不是均匀的, 尤其是在流过 90° 转角处, 磁通流过的路径长度并不是严格意义上的 l 。实际上有一部分磁通甚至不在铁芯里流过。更值得注意的问题是 μ 根本不是确定的常数, 而要确定它为一个合适的值是十分烦琐的事。尽管如此, 我们仍然可以得到有关电场、磁场和几何尺寸之间关系足够精确的结果。若要得到更精确的结果, 就得采用更加复杂的分析方法对这些关系进行分析, 这些方法是基于有限元技术的。

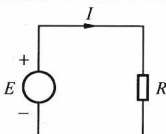
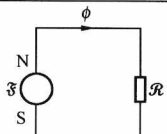
再者, 我们必须清楚地认识到, 所研究的系统本身是三维的, 这一点非常重要。三维的研究方法是, 对于一个确定的系统, 先做一个二维画面, 然后再寻找一个延伸到三维的途径。例如, 用圆圈表示导体流过的电流, $\oplus$ 表示流入, $\ominus$ 表示流出。在简单的研究中, 例如电路原理, 仅需要考虑所有与电有关的参数之间的关系就可以了。而在本书中, 我们关心的重点是电与磁的相互作用问题, 并且最终要把研究拓展到发生在同一时刻的电、磁和机械各量之间的相互作用问题。

1.2 线性磁力系统: 磁路

如前所述, 如果铁芯磁导率假定为常数, 则可以称该磁路是线性的。这种情况下, 可以得到与直流电路类似的磁路方程。在直流电路中, 电源是电动势 (E), 而电路中流通的变量是电流 (I), 流通的通道是导体。类似地, 在磁路中, 磁源是磁动势 ($\mathcal{F}$), 而相应流通的变量是磁通 (ϕ), 流通的通道是铁芯。相对于电极有正极 (+) 和负极 (-), 磁极也有北极 (N) 和南极 (S)。表 1.1 总结了磁路与电路的相似之处。

表 1.1

电路与磁路的对比

电路	磁路
 电动势 (E) 电流 (I) 电导率 (σ)	 磁动势 ($\mathcal{F}$) 磁通 (ϕ) 磁导率 (μ)

续表

电路	磁路
$G = \sigma A/l$	$p = \mu A/l$
$R = 1/G$	$\Re = 1/P$
$V = E = RI$	$F = \phi \Re$
对于任何路径	
$\Sigma V = 0$	$\Sigma F = 0$
对于任何节点	
$\Sigma I = 0$	$\Sigma \phi = 0$

我们已经知道磁通流过磁阻会在磁阻上产生一个磁压降。与电路中电压电流定律的结果类似,环绕任何一个闭合磁路的磁压降之和为零,流过任何一个节点的磁通之和也必须为零。下面举例说明。

例 1.1 考虑图 1.2 (a) 中所示的系统,线圈中通入 12A 的电流。

- (a) 画出相应的磁路图。
- (b) 计算铁芯中的磁通 (ϕ) 和磁通密度 (B)。
- (c) 确定铁芯和气隙的磁压降。

解

(a) 磁路图见图 1.2 (b)。

铁芯中的磁压降 $= F = NI = 200 \times 12 = 2400$ 安匝

$$\Re_{\text{core}} = l/(\mu_{\text{core}} A) = 1.398/(2000\mu_0 \times 0.01) = 55.62(\text{mH})^{-1}$$

$$\Re_{\text{ag}} = g/(\mu_0 A) = 0.002/(\mu_0 \times 0.01) = 159.2(\text{mH})^{-1}$$

(b) 磁通和磁通密度

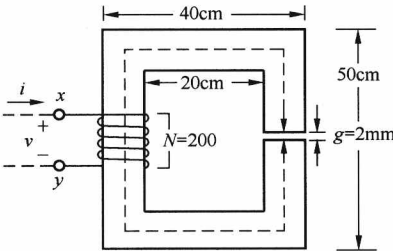
$$\phi = F/(\Re_{\text{core}} + \Re_{\text{ag}}) = 2400/(55.62 + 159.2) = 11.174\text{mWb}$$

$$B = \phi/A = 1.117\text{ T}$$

(c) 铁芯和气隙磁压降

$$F_{\text{core}} = \phi \Re_{\text{core}} = 11.174 \times 55.62 = 621.6 \text{ 安匝}$$

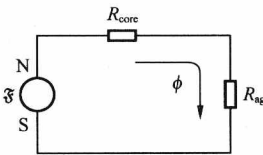
$$F_{\text{ag}} = \phi \Re_{\text{ag}} = 11.174 \times 159.2 = 1778.4 \text{ 安匝}$$



气隙宽 = 10cm
 $A = 100\text{cm}^2$
 $\mu_c = 2000\mu_0$

平均长度 $= l = 2(40) + 2(30) - 0.2 = 139.8\text{cm}$

(a) 例 1.1 的磁路系统



(b) 图(a)的磁路

图 1.2 一个带空气隙的磁路系统

通过例 1.1, 可以得到一些关于磁路的一般性结论。与电路中电流从电源的正极流出一样, 磁路中磁通从磁势的北极 (N) 流出。但是我们怎样来确定线圈的哪一端是 N 极? 一种方法是使用著名的右手定则。用右手朝线圈中电流的方向环绕线圈, 注意大拇指的指向。这个方向就是线圈磁动势使得磁通流出线圈的方向, 该方向线圈的顶部就是 N 极。因此需要两个要素来确定磁动势的磁极, 一个是线圈的绕向, 一个是线圈中电流的流向。

同样, 磁路的并联和串联的概念也与电路类似 (例 1.1 中的两个磁阻是串联的, 处理时可以相加)。要注意的另一个特殊问题是当磁通流出铁芯进入空气时会膨胀。由于这个现象的存在, 一些研究者认为, 可通过增加气隙的宽度 g 来沿各个方向拓展面积 A 。我们的上述计算, 没有考虑这个膨胀的影响, 前提是我们得到的近似值已经足以满足需要。

可用公用软件来支持本书。实际上有以下两个工程分析程序是相关的。

XFMR: 变压器和铁芯的分析

EMAP: 电机的分析程序

通过以下的网站可以得到这些程序:

<ftp://ftp.eng.auburn.edu/pub/grossca>

在 “grossca” 下面可以找到一个叫 “programs” 的文件夹, 在这文件夹里有 “xfmr” 和 “emap” 文件夹。在线运行任何一个文件夹, 双击可执行文件。你可以自由地复制这些软件。

“XFMR” 解决的就是例 1.1 的问题。

铁芯的参数

线性分析	铁芯	气隙
长度 (cm)	139.8	0.200
截面积 (cm ²)	100.0	100.0
相对磁导率	2000.0	1.0
磁阻 (1/mH)	55.624	159.155
磁压降 (安匝)	621.6	1778.4
磁场强度 (kA/m)	0.4446	889.2
磁通密度 (mT)	1117.4	1117.4
总的磁压降 (安匝)	2400.0	
磁通 (mWb)	11.174	
总磁阻 (1/mH)	214.779	
线圈电感 (mH)	186.2	
磁场能量 (mJ)	13409.1	

线圈的数据: 电流 = 12.000A; $N = 200$; 磁势 = $2400.0 = B/K_{ag} + A_x \exp(B_x B)$; H : kA/m; B : mT。

$K_{ag} = 2513.300$; $A_x = 0.000000000$;

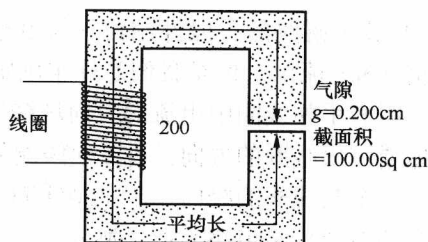
$B_x = 0.009768000$ 。

我们现在来考虑更加复杂的图 1.3。

例 1.2 考虑图 1.3 (a) 中的系统。

(a) 画出磁路图。

(b) 计算磁路中的磁阻。

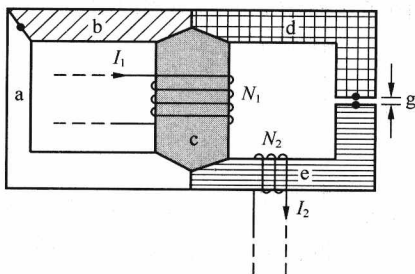


铁芯特性:

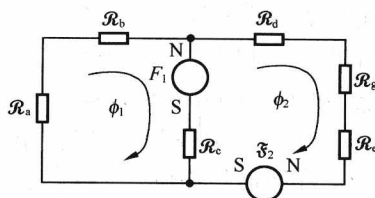
铁芯长=138.80cm; 截面积=100cm²;

$x=y/K_{ag}+A_{xc}\exp(B_{xc}y)$; $x=H(\text{kA/m})$; $y=B(\text{mT})$

$K_{ag}=2513.3$; $A_{xc}=0.000001661$; $B_{xc}=0.009768000$



(a) 双孔磁路系统



(b) 图(a)的磁路

图 1.3 例 1.2 的磁路系统

(c) 写出必要的磁回路方程, 通过这些方程可以求出所有的磁通。

解

(a) 首先把铁芯分成几个截面 A 和磁导率 μ_0 都相同的区域, 磁路如图 1.3 (b) 所示。

$$\mathcal{F}_1 = N_1 I_1, \quad \mathcal{F}_2 = N_2 I_2$$

(b) 选取铁芯截面的几何中点为磁路的路径长 l , 则各段磁路的磁阻为 $\mathfrak{R}_a = \frac{l_a}{\mu_a A_a}$

式中的 l_a 是铁芯区域 a 段的磁路长度; μ_a 是铁芯区域 a 段的磁导率; A_a 是铁芯区域 a 的横截面积。相应地:

$$\mathfrak{R}_b = l_b / (\mu_b A_b), \quad \mathfrak{R}_c = l_c / (\mu_c A_c), \quad \mathfrak{R}_d = l_d / (\mu_d A_d),$$

$$\mathfrak{R}_e = l_e / (\mu_e A_e), \quad \mathfrak{R}_g = l_g / (\mu_0 A_g)$$

(c) 相应的磁通方程如下:

$$(\mathfrak{R}_a + \mathfrak{R}_b + \mathfrak{R}_c) \phi_1 - (\mathfrak{R}_c) \phi_2 = -F_1$$

$$-(\mathfrak{R}_c) \phi_1 + (\mathfrak{R}_c + \mathfrak{R}_d + \mathfrak{R}_e + \mathfrak{R}_g) \phi_2 = F_1 - F_2$$

这些方程可解出回路 ϕ_1 和 ϕ_2 , 铁芯中间支路上的磁通为 $\phi_1 - \phi_2$ 。

1.3 电压、电流和磁场的相互作用

在图 1.1 的系统中, 我们已经确定线圈中的电流在铁芯中产生磁场。然而, 我们还要考虑是什么产生了电流。对于直流情况, 线圈中加直流电源产生了电流, 并满足方程: