



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
高等院校电气工程系列教材

电机学

ELECTRIC MACHINERY

潘再平 章玮 陈敏祥 编著
戈宝军 主审



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
高等院校电气工程系列教材

电机学

Electric Machinery

潘再平 章 玮 陈敏祥 编 著
戈宝军 主 审

浙江大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

电机学/潘再平编著. —杭州:浙江大学出版社,
2008. 8
ISBN 978-7-308-06148-3
I. 电... II. 潘... III. 电机学 IV. TM3
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 120586 号

电机学

潘再平 章 玮 陈敏祥 编 著
戈宝军 主 审

责任编辑 杜希武
封面设计 刘依群
出版发行 浙江大学出版社
(杭州天目山路 148 号 邮政编码 310028)
(网址: <http://www.zjupress.com>
<http://www.press.zju.edu.cn>)
排 版 星云光电图文制作工作室
印 刷 杭州富阳育才印刷有限公司
开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 16.5
字 数 401 千字
版 印 次 2008 年 8 月第 1 版 2008 年 8 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-308-06148-3
定 价 29.00 元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社发行部邮购电话 (0571)88925591

内容简介

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,是针对电气工程及其自动化专业电机学课程教学需要而编写的,其内容经过精选,保持了学科的完整性,更注意适合教学的需求。本书内容包括导论、直流电机、变压器、交流电机理论的一般问题、异步电机、同步电机等。

本书可作为普通高等学校及成人高等学校电气工程及其自动化专业主干课程电机学的教材或参考书,也可供相近专业本科生、研究生及从事电机制造与运行、运动控制技术等领域工作的工程技术人员选用。

前 言

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

电机学是电气工程及其自动化学科的主干专业基础课程,在电气工程领域人才培养中起到非常重要的作用。随着本科教学改革进行,浙江大学坚持“以人为本、整合培养、求是创新、追求卓越”的教育理念,构建“宽、专、交”相结合的本科生培养框架。为提高学生的全面素质及创新能力,对电气工程及其自动化专业的教学体系、教学计划作了全面的调整,电机学的教学学时数有所下降。因此,原有的电机学的教学大纲、教材已不适合目前教学改革的需要,有必要编写新的符合教学改革新要求的电机学教材。

浙江大学电机系统及其控制学科(原电机教研室)非常重视电机学教材的建设,1959年就编写了电机学教材与电机学习题集在校内使用;1961年在中国工业出版社出版了《电机学》教材;由杨耀德教授主编的《电机学》于1966年在机械工业出版社出版,国内许多院校使用了此教材。1990年根据当时电工技术类和电力类两个高校教学指导委员会确定的电机学教学大纲,由王毓东教授主编的《电机学》教材由浙江大学出版社出版,并得到了较为广泛的应用。本教材是在上述教材的基础上根据目前教学改革的要求而编写的。

本书共分6章。第1章为导论,主要介绍电机的基本概念及电机学中经常用到的基本电磁定律;第2章为直流电机,主要介绍直流电机的基本原理、基本结构,分析直流电机的磁路和电路系统,研究直流电机的电磁过程和运行特性;第3章为变压器,介绍变压器的结构、分析变压器的运行原理与特性等;第4章为交流电机理论的一般问题,本章对交流电机绕组的结构型式、感应电动势、磁动势等进行分析;第5章为异步电机,主要介绍异步电机的结构、工作原理、运行特性、异步电动机的起动、调速、制动等内容;第6章为同步电机,主要介绍同步电机的结构、工作原理、运行特性、同步发电机的并联运行等内容。

本书编写时注意了电机学本身学科内容的系统性、完整性和教学所需要的循序渐进性,同时也突出了对电气工程及其自动化专业教学需要。编写中注意文字流畅、概念清晰,叙述

深入浅出,每章均有小结、思考题与习题,方便读者学习。根据本教材的使用情况,将编写出版配套教材《电机学学习指导》,以方便读者(尤其是远程教育等成教学生)自学。

本书由潘再平、章玮、陈敏祥合作编写。其中,陈敏祥老师编写第3章、第5章;章玮老师编写第4章、第6章;潘再平老师编写第1章、第2章,并对全书进行统稿。编写过程中参考了浙江大学杨耀德教授、王毓东教授主编的2部电机学教材及其它兄弟院校编写的电机学教材,对于本书所用参考文献的所有作者,在此深表谢意。本书由电机学国家精品课程负责人,哈尔滨理工大学戈宝军教授主审。戈老师对全书进行了认真审阅,提出了许多宝贵的意见,在此表示衷心的感谢。

限于编著者学识水平有限和教材篇幅的限制,错误及疏漏之处在所难免,恳切希望广大读者批评指正。

编著者

2008年7月于浙江大学

目 录

第 1 章 导论	(1)
1.1 概述	(1)
1.1.1 电机的主要作用	(1)
1.1.2 电机的发展	(1)
1.2 电机的基本概念	(2)
1.2.1 电机的定义	(2)
1.2.2 电机的分类	(2)
1.2.3 电机的制造材料	(3)
1.3 基本电磁定律	(4)
1.3.1 全电流定律	(4)
1.3.2 电磁感应定律	(4)
1.3.3 电磁力定律	(5)
1.4 铁磁材料特性	(5)
1.4.1 铁磁材料的磁导率	(5)
1.4.2 磁滞现象与磁滞损耗	(6)
1.4.3 涡流与涡流损耗	(7)
1.5 电机的磁路	(7)
1.5.1 磁路基本概念	(7)
1.5.2 磁路欧姆定律	(7)
1.5.3 磁路基尔霍夫第一定律	(8)
1.5.4 磁路基尔霍夫第二定律	(9)
1.5.5 磁路与电路的类比	(9)
本章小结	(10)
习题与思考题	(10)
第 2 章 直流电机	(11)
2.1 直流电机结构与工作原理	(11)
2.1.1 直流电机的基本结构	(11)
2.1.2 直流电机的工作原理	(13)
2.1.3 直流电机的励磁方式	(15)
2.1.4 直流电机的额定值	(16)
2.2 直流电机电枢绕组	(16)

2.2.1	电枢绕组概述	(16)
2.2.2	单叠绕组	(19)
2.2.3	单波绕组	(21)
2.3	直流电机磁场与电枢反应	(23)
2.3.1	直流电机空载气隙磁场	(23)
2.3.2	直流电机的电枢磁场	(25)
2.3.3	电枢反应	(27)
2.4	电枢绕组的感应电动势和电磁转矩	(29)
2.4.1	直流电机感应电动势	(29)
2.4.2	直流电机的电磁转矩	(30)
2.5	直流发电机	(31)
2.5.1	直流发电机的基本方程式	(31)
2.5.2	他励直流发电机的特性	(33)
2.5.2	并励直流发电机的自励条件和特性	(35)
2.6	直流电动机	(39)
2.6.1	直流电动机的基本方程	(39)
2.6.2	直流电动机的工作特性	(40)
2.6.3	直流电动机的机械特性	(42)
2.6.4	直流电动机起动	(46)
2.6.5	直流电动机调速	(48)
2.6.6	直流电动机制动	(50)
2.7	直流电机的换向	(54)
2.7.1	换向过程	(54)
2.7.2	换向电磁原理	(54)
2.7.3	产生火花的原因	(57)
2.7.4	改善换向的方法	(58)
	本章小结	(60)
	习题与思考题	(61)
第3章	变压器	(66)
3.1	变压器的原理、结构及额定值	(66)
3.1.1	变压器工作原理及类型	(66)
3.1.2	变压器的结构	(67)
3.1.3	变压器的额定值	(69)
3.2	变压器的运行原理与特性	(70)
3.2.1	变压器空载运行	(70)
3.2.2	变压器的负载运行	(75)
3.2.3	变压器的参数测定	(80)
3.2.4	变压器标么值	(82)
3.2.5	变压器的运行特性	(83)

3.3 三相变压器	(86)
3.3.1 三相变压器的磁路系统	(86)
3.3.2 三相变压器的电路系统	(87)
3.3.3 三相变压器的空载电势波形	(89)
3.3.4 三相变压器的并联运行	(92)
3.3.5 三相变压器的不对称运行	(94)
3.4 特种变压器	(97)
3.4.1 自耦变压器	(97)
3.4.2 互感器	(99)
本章小结	(100)
习题与思考题	(101)
第4章 交流电机理论的一般问题	(105)
4.1 交流绕组的基本概念和要求	(105)
4.1.1 三相交流绕组的要求	(105)
4.1.2 三相交流绕组的基本概念	(105)
4.1.3 三相单层绕组	(107)
4.1.4 三相双层绕组	(109)
4.2 基波磁场下的绕组电动势	(112)
4.2.1 导条的感应电动势	(113)
4.2.2 线圈的电动势	(114)
4.2.3 线圈组的电动势	(114)
4.2.4 相电动势和线电动势	(115)
4.3 非正弦磁场下绕组的感应电势及其削弱方法	(117)
4.3.1 谐波电动势	(117)
4.3.2 削弱谐波电动势的方法	(118)
4.4 单相绕组的磁动势	(121)
4.4.1 整距线圈的磁动势	(121)
4.4.2 整距分布绕组的磁动势	(123)
4.4.3 双层短距绕组的磁动势	(123)
4.4.4 单相绕组的磁动势	(124)
4.4.5 单相绕组的谐波磁动势	(124)
4.5 三相绕组的合成磁动势	(125)
4.5.1 三相绕组的基波合成磁动势	(125)
4.5.2 三相绕组的合成谐波磁动势	(126)
4.6 不对称和非正弦电流下三相绕组的磁动势	(127)
4.6.1 不对称电流下三相绕组的磁动势	(127)
4.6.2 非正弦电流下三相绕组的磁动势	(128)
4.7 交流电机的时-空相量图	(128)
4.8 交流电机的主磁通、漏磁通	(130)

本章小结	(130)
习题与思考题	(131)
第 5 章 异步电动机	(133)
5.1 异步电动机的工作原理、结构和分类	(133)
5.1.1 异步电动机的主要用途与分类	(133)
5.1.2 异步电动机的基本工作原理及运行状态	(134)
5.1.3 异步电动机的结构	(135)
5.1.4 异步电动机的额定值	(137)
5.2 异步电动机的运行原理	(137)
5.2.1 异步电动机的磁场、主磁通、漏磁通和漏电抗	(137)
5.2.2 异步电动机转子堵转时的电磁关系	(139)
5.2.3 异步电动机转子旋转时的电磁关系	(143)
5.2.4 异步电动机转子各物理量的折算	(147)
5.2.5 异步电动机的等效电路	(150)
5.2.6 异步电动机参数的测定	(150)
5.2.7 笼型转子的绕组数据	(152)
5.3 异步电动机的运行特性	(153)
5.3.1 异步电动机的功率平衡方程	(153)
5.3.2 异步电动机的转矩平衡方程	(156)
5.3.3 异步电动机的电磁转矩	(156)
5.3.4 异步电动机的机械特性及稳定性	(160)
5.3.5 异步电动机的工作持性	(160)
5.4 异步电动机的起动	(162)
5.4.1 异步电动机的起动要求及起动方法	(162)
5.4.2 鼠笼式异步电动机的起动	(162)
5.4.3 绕线式异步电动机的起动	(165)
5.4.4 改善起动性能的感应电动机	(167)
5.4.5 异步电机的附加转矩以及对起动的影响	(169)
5.5 异步电动机的调速	(171)
5.5.1 变极调速	(171)
5.5.2 改变定子绕组电压调速	(172)
5.5.3 绕线式异步电动机转子回路串电阻调速	(172)
5.5.4 绕线式异步电动机的串级调速	(173)
5.5.5 变频调速	(175)
5.6 异步电动机的制动	(179)
5.6.1 异步电动机的反接制动	(179)
5.6.2 异步电动机的发电机制动	(180)
5.6.3 异步电动机的能耗制动	(181)
5.7 三相异步电动机在不对称电压下运行及单相异步电机	(182)

5.7.1 三相异步电动机在不对称电压下的运行	(182)
5.7.2 单相异步电动机	(184)
本章小结	(189)
习题与思考题	(189)
第6章 同步电机	(193)
6.1 同步电机的原理和结构	(193)
6.1.1 同步电机的基本构造型式	(193)
6.1.2 同步电动机的励磁方式	(197)
6.1.3 同步电机的冷却方式	(199)
6.1.4 额定值	(199)
6.2 同步发电机的运行原理	(200)
6.2.1 同步发电机的基本原理	(200)
6.2.2 同步发电机的空载运行	(200)
6.2.3 负载运行时的电枢反应	(202)
6.2.4 隐极同步发电机的负载运行	(203)
6.2.5 凸极同步发电机的负载运行	(206)
6.2.6 同步发电机的运行特性和参数测定	(209)
6.3 同步发电机的并联运行	(218)
6.3.1 并联合闸的条件与方法	(218)
6.3.2 同步发电机的功角特性	(221)
6.3.3 并网运行时有功功率调节和静态稳定	(222)
6.3.4 并网运行时无功功率调节和 V 形曲线	(225)
6.4 同步电动机和同步调相机	(227)
6.4.1 同步电动机的基本电磁关系	(227)
6.4.2 同步电动机的运行特性	(229)
6.4.4 同步调相机	(232)
6.5 同步发电机的不对称运行	(232)
6.5.1 同步发电机不对称运行时的参数和等效电路	(233)
6.5.2 同步发电机的不对称运行	(235)
本章小结	(238)
习题与思考题	(239)
主要符号表	(243)
参考文献	(249)

第 1 章 导 论

1.1 概 述

电能是能量的一种重要形式。电能在生产、传输、分配、管理、使用、控制和能量转换等方面都极为方便,因此在人类生活、工农业生产等方面得到广泛的应用。电机是与电能有关的能量转换机械,它是工业、农业、交通运输、国防及日常生活中常用的重要设备。

1.1.1 电机的主要作用

(1) 电能的生产、传输和分配

在发电厂,发电机由汽轮机、燃气轮机、柴油机、水轮机、风轮机驱动,而后者将燃料燃烧、原子核裂变产生的能量或水的势能、风的动能转化为机械动能传给发电机,由发电机转换成电能,然后经变压器升高电压,通过输电线把电能传送各用电地区,再经变压器降低电压供用户使用。

(2) 驱动各种生产机械和装备

在工农业、交通运输、国防等部门和生活设施中,电动机被极为广泛地用来驱动生产机械、设备和器具。如机床驱动、电力给排水、农副产品加工、矿石采掘和传送、电驱动车的牵引、鼓风设备、起重设备、轧钢机械、造纸设备、化工机械及家用电器的驱动等一般都采用电动机来驱动。

(3) 自动控制系统中的控制元件

控制电机在控制系统、自动化系统中作为执行、检测、放大和解算元件。这类电机的功率一般都比较小,但品种繁多、用途各异。

1.1.2 电机的发展

1821 年法拉第发现了载流导体在磁场中会受到力的作用这一现象,此后就出现了原始模型电机,电机发明至今已近 200 年。

电机的初期发展经历了:1) 电磁感应定律的发现;2) 直流电机的发展;3) 单相交流电的应用;4) 三相交流电的应用等四个阶段。至 19 世纪末,直流电机、异步电机、同步电机、变压器等常规电机都已得到应用,相应的基本理论和设计方法也已初步建立。

20 世纪是电机发展的新时期。由于工业的高速发展对电机提出了各种新的、更高的要求,人们对电机内部的电磁过程、发热过程进行了深入的研究,对材料和冷却技术进行了不

断的改进,电机的单机容量、功率密度、材料利用率等都得到很大提高,电机的性能也明显改进、完善。如浙江大学郑光华教授等科研人员于1958年发明了电机双水内冷技术,该技术创造性地解决了国际上未能解决的电机转子水内冷的技术难题,打开了当时我国自制大型发电机的坦途。目前,我国已能制造70万千瓦水轮发电机组(三峡水电站)。同时,电力电子技术、微电子技术和计算机技术的发展,新型电机控制策略(如矢量控制、直接转矩控制等)的应用,使得交流调速系统性能指标已达到直流调速系统的水平,并已全面取代了直流调速系统。

进入21世纪,电机工业面临巨大的机遇和挑战。超导技术的实用化将有助于大容量电机的研制;使用新原理、新结构、新材料、新工艺的各种新型特种电机将使电机的应用范围进一步扩大;电力电子技术、微电子技术、计算机技术和电机的结合将使电机从单机到系统,具有智能化。总之,尽管电机是有近200年历史的电气装备,但将电机与最新的科学技术相结合,我们面临的电机系统将会得到更大的发展,在国民经济中将起到更为重要的作用。

1.2 电机的基本概念

1.2.1 电机的定义

在电机学中讨论的电机是指依靠电磁感应作用而运行的电气设备,用来进行电能生产、传输、使用和电能特性变换的机电装置。电机本身不是能源,只起到了转换或传递能量的作用。要使电机输出能量,必须先给电机输入能量,电机的输入、输出量中必有一个是电能,或两个都是电能,电机的能量转换或传递过程遵守能量守恒定律。

1.2.2 电机的分类

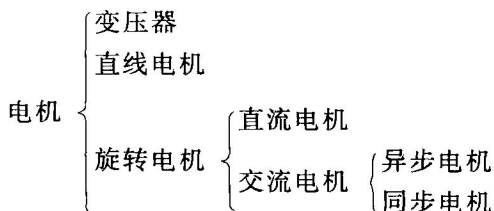
电机的种类很多,结构和用途也各不相同,分类方法也很多,电机学中常采用以下分类方法。

1. 按能量转换功能和用途来分

- (1) 发电机:将机械能转换成电能的电机。
- (2) 电动机:将电能转换成机械能的电机。
- (3) 变压器:改变交流电电压的静止电气装置。
- (4) 控制电机:进行信号转换和传递,用于控制系统中作为执行、检测或解算元件。

另外还有变流机、变频机和移相等,分别用来改变电流、频率和相位。上述的发电机和电动机仅是电机的两种运行方式,其本身是可逆的。

2. 按原理与运动方式来分



1.2.3 电机的制造材料

电机是按电磁感应定律而实现能量转换的,因此,电机中应该有电和磁的通路,即电路和磁路,构成电路和磁路的材料为导电材料和导磁材料。导体与机壳及铁芯之间,各导体之间都必须用绝缘材料隔离。另外还需要将电、磁两部分结合在一起的结构材料。

1. 导电材料

铜是最常用的导电材料,电机中的电路通常是线圈(电机学中称绕组),线圈一般是由铜线绕制而成。电力工业中使用的标准铜在 20°C 时的电阻率为 $17.24 \times 10^{-9} \Omega\text{m}$,相对密度为 $8.9\text{g}/\text{cm}^3$ 。铝也常用在电机的电路中,中小型鼠笼式异步电机的转子绕组通常用铝浇铸而成,也有少量电机的定子绕组用铝线绕制。铝在 20°C 时的电阻率为 $28.2 \times 10^{-9} \Omega\text{m}$,相对密度为 $2.7\text{g}/\text{cm}^3$ 。电机中的集电环用黄铜、青铜和钢等制成;而电刷则用碳—石墨、石墨或电化石墨等制成。

2. 导磁材料

钢铁是电机中的导磁材料(也称铁磁材料)。如磁通是交变的,为减少磁路中的涡流损耗,导磁材料应该用薄钢片,通常为硅钢片,也称为电工钢片。电工钢片中含有少量的硅,使其有较高的电阻,且又具有良好的导磁性能。电工钢片的标准厚度为 0.35mm 、 0.5mm 、 1mm 等。变压器所用的钢片较薄,普通旋转电机所用的则可厚一些。在高频电机中需使用更薄的电工钢片。每片电工钢片的两面均涂有一层很薄的绝缘漆,使涡流回路的电阻增大,从而减少涡流损耗。导磁性能较好的铸钢也用作电机的导磁材料,但整体的钢材仅用来传导不随时间变化的磁通。

3. 绝缘材料

电机中使用的绝缘材料有电工纸、云母片、玻璃纤维板、玻璃丝带、聚酯漆和环氧树脂等,绝缘材料应具有介电强度高、耐热性好等特点。电机常用绝缘材料按性能可分为表 1-1 所示的各个等级。

表 1-1 绝缘材料的等级

绝缘等级	Y	A	E	B	F	H	C
极限允许温度($^{\circ}\text{C}$)	90	105	120	130	155	180	> 180

绝缘等级与所使用的绝缘材料有关。而绝缘材料的寿命与其工作温度直接相关,运行温度过高会使绝缘材料加速老化,使其机械强度和绝缘性能下降。

4. 结构材料

电机中的机座、端盖、主轴、轴承、螺杆等都是用作机械支撑的,称为结构部件。结构部件的材料通常为钢铁。要注意的是在漏磁场附近,最好使用非磁性材料,如木制槽楔、非磁性钢丝、黄铜等。

1.3 基本电磁定律

1.3.1 全电流定律

设空间有 n 根载流导体,各导体中流过的电流分别为 I_1, I_2, \dots, I_n ,则沿任何可包含所有这些导体的闭合路径 l ,场强度 H 的线积分等于该回路所包围的导体电流的代数和,即

$$\oint_l H \cdot dl = \sum_{i=1}^n I_i \quad (1-1)$$

式(1-1)即为全电流定律,也称为安培环路定律。若导体电流方向与积分路径方向符合右手螺旋定则,如图1-1所示,则电流取正号,反之为负号。图1-2为全电流定律示意图,图中的闭合曲线 l 和 l' ,路径不同,但包围的通电导体相同,因此其线积分的结果都等于 I_1, I_2 和 I_3 的代数和,按右手螺旋定则, I_1 和 I_3 取正号、 I_2 取负号,即

$$\oint_l H \cdot dl = \oint_{l'} H \cdot dl = \sum_{i=1}^3 I_i = I_1 - I_2 + I_3$$

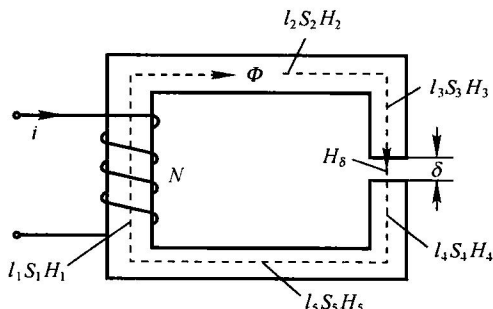


图 1-1 右手螺旋定则

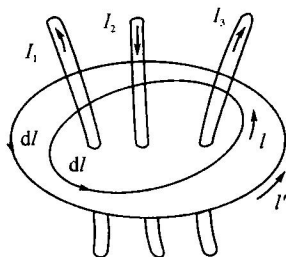


图 1-2 全电流定律示意图

1.3.2 电磁感应定律

将一个匝数为 N 的线圈置于磁场中,线圈中有磁通 Φ 通过,与线圈交链的磁链 $\Psi = N\Phi$,则无论什么原因,当该线圈所交链的磁链发生变化时,在线圈内就会产生感应电动势,这种现象称为电磁感应。感应电动势的大小和该线圈所交链的磁链变化率成正比,该感应电动势会在线圈中产生电流,该电流建立的磁通用来阻止线圈中磁通的变化,即阻止 Ψ 的变化。如果感应电动势的正方向与磁通的正方向符合右手螺旋定则,则该感应电动势可用下式表示:

$$e = - \frac{d\Psi}{dt} = - N \frac{d\Phi}{dt} \quad (1-2)$$

导致式(1-2)中磁通 Φ 变化的原因有两种,一种是磁通由时变电流产生,即磁通是时间 t 的函数;另一种就是线圈与磁场间有相对运动,即磁通是位移量 x 的函数。现分别说明由上述两种磁通 Φ 变化而产生的电动势。

(1) 变压器电动势

线圈与磁场相对静止,但穿过线圈磁通的大小或方向发生变化,由此产生的感应电动势

称为变压器电动势。图 1-3 为单相变压器的原理图,可通过此图来说明变压器电动势的情况。

设图 1-3 中的线圈 N_1 通入时变电流 i_1 ,而线圈 N_2 开路。这时由 i_1 所建立的磁通也随时间而变化,因此与线圈 N_1 和 N_2 所交链的磁链也随时间而变化,从而分别在线圈 N_1 和 N_2 中感应出电动势 e_1 和 e_2 ,其方向如图 1-3 所示。感应电动势 e_1 由线圈 N_1 中电流 i_1 的变化在自身线圈中产生,故称为自感电动势;而由于 i_1 的变化在另一线圈 N_2 中产生的电动势 e_2 则称为互感电动势。

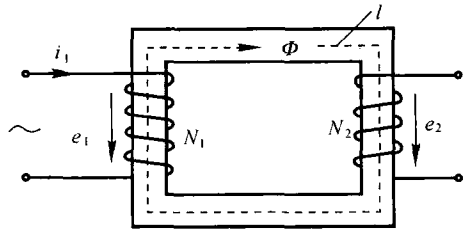


图 1-3 单相变压器原理图

(2) 旋转电动势

旋转电动势也称为速率电动势。磁通本身不随时间变化,而线圈与磁场之间有相对运动,从而使线圈中的磁链发生变化。这种情况通常发生在旋转电机中,故称为旋转电动势。

旋转电动势可看作导体在均匀磁场中运动而切割磁力线时,该导体中产生的电动势。当磁通密度 B 、导体(长度为 l)和导体相对磁场运动速度 v 这三者相互垂直时,则导体中产生的旋转电动势为

$$e = Blv \quad (1-3)$$

其方向可用右手定则确定。

1.3.3 电磁力定律

载流导体在磁场中会受到力的作用,这种力是磁场与电流相互作用而产生的,在电机学中通常将这种力称为电磁力。若长度为 l 的导体处于磁通密度为 B 的均匀磁场中,当导体与磁通密度方向垂直,导体中流过的电流为 i 时,电磁力可用下式表示

$$F = Bli \quad (1-4)$$

其方向可用左手定则确定。在电机中由电磁力产生的转矩称为电磁转矩。

1.4 铁磁材料特性

电机和变压器都是以磁场为媒介,利用电磁感应来实现能量转换,所以其内部一定要有传导磁通的磁路和传导电流的电路。为了增加磁路的导磁性能,使其在所需的磁通密度下具有较小的励磁电流,通常采用高导磁性能的硅钢片来制造电机和变压器的铁芯,而磁路的其他部分常采用导磁性能较高的钢板和铸钢制造。

1.4.1 铁磁材料的磁导率

铁磁材料是具有高导磁性能的材料,包括铁、钴、镍及其合金等。铁磁材料与常用的导电材料(如铜和铝等)相比较,虽然其电阻率较大,但仍然是一种良好的导电材料。

高导磁性能是铁磁材料所特有的。非铁磁材料(如铜、铝、绝缘材料和空气等)的磁导率和真空中的磁导率 μ_0 接近,而铁磁材料的磁导率比 μ_0 大几百倍到几千倍。电机、变压器和电

磁铁等中所使用的铁磁材料的磁导率约为 μ_0 的 200 ~ 6000 倍,所以在同样大小的励磁电流情况下,带铁芯线圈的磁通比空芯线圈的磁通大得多。

铁磁材料之所以具有高导磁性能,是由于铁磁材料内部具有许多强烈磁化了的自发磁化单元—磁畴。平时,由于磁畴是杂乱无章排列的,磁场相互抵消,所以对外不显示磁性。但在外界磁场的作用下,磁畴沿外界磁场的方向作有规则的排列,形成一个附加磁场叠加在外磁场上,使总磁场大大加强。

当外界磁场强度很小时,还不足以影响磁畴,此时随着磁场强度 H 的增大,磁通密度(或称磁感应强度) B 的增大缓慢,如图 1-4 中 Oa 段所示;当外界磁场强度达到一定数值后,磁畴开始沿外界磁场的方向作有规则的排列,因此, B 随着 H 的增大几乎按正比地迅速增大,如图 1-4 中 ab 段所示;在 bc 段,磁畴在外界磁场作用下已逐渐排列整齐,故随 H 的增大, B 的增大速度减慢;在 c 点以后,因磁畴沿外界磁场方向已几乎排列整齐,故当 H 继续增大时, B 几乎不再增大(实际增大速度与空气中一样)。当 H 增大, B 的增大减慢或几乎不变的现象称为磁饱和现象。所以铁磁材料的磁化特性曲线是一条具有饱和特性的曲线。图 1-4 中也给出了铁磁材料的磁导率随磁场强度 H 的变化曲线。

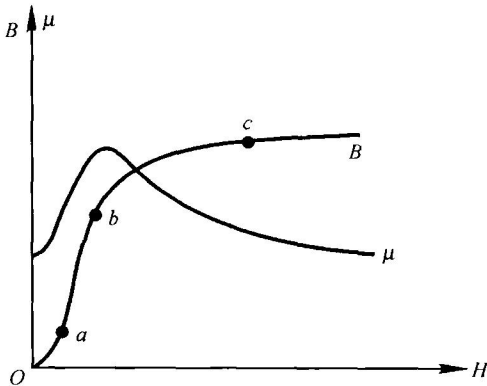


图 1-4 铁磁材料的磁化曲线

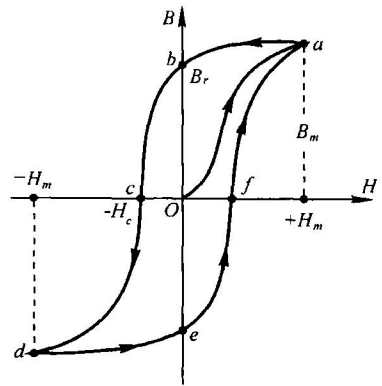


图 1-5 铁磁材料的磁滞回线

1.4.2 磁滞现象与磁滞损耗

在测取铁磁材料时,如图 1-5 所示,当 H 从零上升到某一最大值 H_m 时, B 沿磁化曲线 Oa 上升, H_m 对应的磁通密度为 B_m ;当 H 由 H_m 下降到零时, B 沿着另一条曲线 ab 下降到某一数值 B_r , B_r 称为剩余磁通密度(或称剩余磁感应强度),这种 B 的变化滞后于 H 的变化称为磁滞现象;若此时反向磁化,则当 H 变到某一数值 $Oc = -H_c$ 时,剩余磁场全被抵消, H_c 称为矫顽力;继续增强反向磁化强度达到 $-H_m$ 时, B 为 $-B_m$,如曲线 cd 段所示;此时开始削弱反向磁场强度, B 将沿 de 变化到 e 点,这时的 $B = -B_r$;当反向磁化强度继续减弱到零时, B 沿 ef 变化;这时若正向励磁, B 将沿 fa 上升,直至 a 点。当 H 在 $+H_m$ 和 $-H_m$ 反复多次变化后才能得到闭合曲线 $abcdefa$,称为铁磁材料的磁滞回线。同一材料,在不同的 H_m 值下有不同的磁滞回线。将不同 H_m 值下所得的磁滞回线的顶点连接起来所得的曲线(基本上就是曲线 Oa)称为基本磁化曲线。

铁磁材料在外界交变磁场作用下反复磁化时,内部磁畴必将随外界磁场变化而不停往返转向,磁畴间相互摩擦而消耗能量,引起损耗,称为磁滞损耗。磁滞损耗 p_h 与最大磁通密