



普通高等教育“十一五”国家级规划教材 (高职高专教育)
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI

DIANJIXUE

电机学

(第二版)

叶水音 主编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

Electric Power Technology

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材（高职高专教育）。

全书共有 26 章，按照变压器、交流绕组及其电动势和磁动势、异步电机、同步电机、直流电机和控制电机的顺序共分为六篇。全书内容的编写，着重阐述物理概念，根据电力生产实践，适当降低电机理论分析的深度，简化了传统《电机学》中较繁的分析过程，增强了有关实践应用的内容。

本书主要作为高职高专院校电力技术类专业或相近专业的教材，亦可作为电力类高级工的培训教材，还可供从事电气类工作的工程技术人员和教学人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电机学/叶水音主编. —2 版. —北京: 中国电力出版社, 2009

普通高等教育“十一五”国家级规划教材. 高职高专教育

ISBN 978-7-5083-8058-2

I. 电… II. 叶… III. 电机学-高等学校: 技术学校-教材 IV. TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 168570 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2005 年 2 月第一版

2009 年 1 月第二版 2009 年 1 月北京第五次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 19 印张 458 千字

定价 28.60 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言

本书第一版为教育部职业教育与成人教育司推荐教材,第一版出版后受到同行们的普遍关注和好评,2008年初本书被列为普通高等教育“十一五”国家级规划教材(高职高专教育),因此修订出版第二版。

本书依据三年多的使用实践与广大读者的宝贵建议和意见,在维持第一版教材内容及体系基本不变的基础上,进行了局部修改和完善,更新了部分概念和内容,使之更适应高职高专院校的教学需要。

本书由福建电力职业技术学院叶水音高级讲师担任主编,并负责修改同步电机和控制电机部分,李启煌副教授修改绪论和异步电机部分,苏翠云副教授修改变压器部分,郑国华副教授修改交流绕组及其电动势、磁动势和直流电机部分。

本书由保定电力职业技术学院刘景峰副教授和武汉电力职业技术学院魏涤非副教授担任主审。在修订过程中得到许多同行和工程技术人员的关心和支持,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中错误和不妥之处,敬请读者批评指正。

编 者

2008年8月

第一版前言

本书为教育部职业教育与成人教育司推荐教材,是根据教育部审定的电力技术类专业主干课程的教学大纲编写而成的,并列入教育部《2004~2007年职业教育教材开发编写计划》。本书经中国电力教育协会和中国电力出版社组织专家评审,又列为全国电力职业教育规划教材,作为职业教育电力技术类专业教学用书。

本书体现了职业教育的性质、任务和培养目标;符合职业教育的课程教学基本要求和有关岗位资格和技术等级要求;具有思想性、科学性、适合国情的先进性和教学适应性;符合职业教育的特点和规律,具有明显的职业教育特色;符合国家有关部门颁发的技术质量标准。本书既可以作为学历教育教学用书,也可作为职业资格和岗位技能培训教材。

编者本着“满足电力及相关行业发展对人才素质的要求,反映相关专业科技发展的最新成就,体现21世纪职业教育教学内容和课程体系改革的成果,在内容和体系上有本学科(专业)的特色”和“紧紧围绕培养高等技术应用性专门人才开展编写工作。基础课程教材应注重体现应用为目的,以必需够用为度,以讲清概念、强化应用为教学重点;专业课程教材着重加强针对性和实用性”的精神,在教材内容的编写中,着重阐述物理概念,根据电力生产实践,适当降低电机理论分析的深度,简化了传统《电机学》中较繁的分析过程,增强了有关实践应用的内容。书中带“*”号标记的章节供选学。

全书由福建电力职业技术学院叶水音高级讲师担任主编,并编写同步电机和控制电机部分,李启煌高级讲师编写绪论和异步电机部分,苏翠云高级讲师编写变压器部分,郑国华高级讲师编写交流绕组及其电动势、磁动势和直流电机部分。

全书由保定电力职业技术学院刘景峰高级讲师担任主审。在编写过程中得到许多同行和工程技术人员的关心和支持,在此表示衷心感谢。

由于编者水平有限,书中错误和不妥之处,敬请读者批评指正。

编者

目 录

前言	
第一版前言	
绪论	1

第一篇 变 压 器

第一章 变压器的基本知识和结构	11
第一节 变压器的基本工作原理	11
第二节 变压器的分类	11
第三节 变压器的基本结构	12
第四节 变压器的铭牌数据	16
小结	17
习题	17
第二章 变压器的运行原理	18
第一节 单相变压器的空载运行	18
第二节 单相变压器的负载运行	25
第三节 等值电路	27
第四节 变压器的参数测定	30
第五节 变压器的运行特性	35
小结	39
习题	39
第三章 三相变压器	41
第一节 三相变压器的磁路系统	41
第二节 三相变压器的连接组别	42
第三节 三相变压器绕组连接方式及铁心结构型式对电动势波形的影响	46
第四节 三相变压器的不对称运行	48
第五节 单相变压器 V/V 连接	52
小结	53
习题	54
第四章 变压器的运行分析	55
第一节 变压器的并联运行	55
第二节 变压器的突然短路	59
第三节 变压器的空载投入	62
* 第四节 三相变压器的常见故障及处理	63
小结	65
习题	65

第五章 其他变压器	67
第一节 自耦变压器	67
第二节 三绕组变压器	70
第三节 分裂变压器	72
小结	73
习题	74

第二篇 交流绕组及其电动势和磁动势

第六章 交流绕组及其电动势	75
第一节 交流绕组的基本知识	75
第二节 三相单层绕组	78
第三节 三相双层绕组	80
第四节 正弦磁场下绕组的感应电动势	84
第五节 非正弦磁场下电动势中的高次谐波及其削弱方法	88
小结	94
习题	95
第七章 交流绕组的磁动势	96
第一节 单相脉振磁动势	96
第二节 脉振磁动势的分解	101
第三节 三相基波旋转磁动势	104
第四节 三相绕组合成磁动势的高次谐波	108
小结	109
习题	110

第三篇 异步电机

第八章 异步电动机的基本结构和工作原理	111
第一节 异步电动机的基本工作原理	111
第二节 异步电动机的基本结构	113
第三节 异步电动机的铭牌数据	115
小结	117
习题	117
第九章 异步电动机的运行分析	118
第一节 异步电动机在转子不动时的电磁关系	118
第二节 异步电动机在转子旋转时的电磁关系	121
第三节 异步电动机的等值电路	123
第四节 异步电动机的电磁转矩及机械特性	126
小结	133
习题	134
第十章 异步电动机的电力拖动	136
第一节 异步电动机的起动概述	136

第二节	笼式异步电动机的起动	137
第三节	绕线式异步电动机的起动	139
第四节	深槽式和双笼式异步电动机	140
第五节	异步电动机的调速	142
* 第六节	异步电动机的制动	144
* 第七节	异步电动机的常见故障及处理	145
	小结	149
	习题	149
第十一章	单相异步电动机	150
	小结	152
	习题	152
第十二章	异步电动机的异常运行	153
第一节	在非额定电压和非额定频率下的运行	153
第二节	不对称运行	154
第三节	一相断线的运行	154
	小结	155
	习题	155

第四篇 同 步 电 机

第十三章	同步发电机的基本工作原理和结构	156
第一节	同步发电机的基本工作原理	156
第二节	同步发电机的基本结构	157
第三节	同步发电机的铭牌数据	161
	小结	162
	习题	162
第十四章	对称负载时的电枢反应	164
第一节	空间向量与时间相量	164
第二节	对称负载时的电枢反应	165
第三节	电枢反应对机电能量转换和电机端电压的影响	167
	小结	168
	习题	168
第十五章	同步发电机的电动势方程式、相量图、特性及参数	170
第一节	同步电抗	170
第二节	隐极同步发电机的电动势方程式和相量图	171
第三节	凸极同步发电机的电动势方程式和相量图	176
第四节	同步发电机的特性	180
第五节	稳态参数的测定	186
	小结	187
	习题	188
第十六章	同步发电机的并列运行	189
第一节	并列条件与方法	189

第二节	并列运行时有功功率的调节	192
第三节	并列运行时无功功率的调节	198
小结		203
习题		204
第十七章	同步电动机	206
第一节	同步电动机的基本方程式和相量图	206
第二节	同步电动机无功功率的调节和同步调相机	208
小结		210
习题		211
第十八章	同步发电机的异常运行	212
第一节	不对称运行	212
第二节	无励磁运行	219
第三节	振荡	220
小结		221
习题		222
第十九章	同步发电机三相突然短路	223
第一节	磁链守恒原理	223
第二节	突然短路时定子绕组电抗的变化	224
第三节	三相突然短路电流	227
第四节	同步发电机的常见故障及运行事故的处理	231
小结		234
习题		235
第二十章	同步发电机的励磁方式简介	236
第一节	励磁系统的作用及要求	236
第二节	励磁方式简介	237
小结		239
习题		239

第五篇 直 流 电 机

第二十一章	直流电机的基本原理和结构	240
第一节	直流电机的基本原理	240
第二节	直流电机的基本结构	241
第三节	直流电机的铭牌和励磁方式	243
小结		245
习题		245
第二十二章	直流电机的电枢绕组	246
第一节	电枢绕组的基本概念	246
第二节	单叠绕组和单波绕组	247
第三节	感应电动势和电磁转矩	250
小结		252
习题		253

第二十三章 电枢反应和换向	254
第一节 电枢反应	254
第二节 换向	256
第三节 改善换向的方法	258
小结	259
习题	260
第二十四章 直流发电机	261
第一节 并励直流发电机的自励条件	261
第二节 基本方程式	262
第三节 运行特性	263
小结	266
习题	266
第二十五章 直流电动机	268
第一节 基本方程式	268
第二节 并励电动机的机械特性	269
第三节 起动和制动	270
第四节 调速	273
* 第五节 直流电动机的常见故障及处理	275
小结	276
习题	276

* 第六篇 控制电机简介

第二十六章 常用控制电机	277
第一节 步进电动机	277
第二节 伺服电动机	281
第三节 测速发电机	284
第四节 自整角机	287
参考文献	292

绪 论

0-1 引 言

本书主要讨论电力系统中常用的变压器、同步电机、异步电机和直流电机的基本结构、基本原理和运行性能。

一、电机的作用

电能是现代生产中最主要的能源。而电机是电能的产生、输送和使用中不可缺少的设备。在发电厂中,发电机一般由汽轮机或水轮机驱动,把机械能转换成电能;在工厂中,电动机使用电能进行电力拖动,将电能转换成机械能。为了经济地传输和分配电能,采用变压器升高电压,把电能送到远距离的用电地区,然后再经过变压器降低电压供用户使用。

随着我国现代化事业的发展,各种不同类型的电机在工农业、国防、文教、医疗以及日常生活中的应用愈来愈广泛。同时,随着生产自动化水平的提高,电机已不仅是只作为系统中的一个独立的元件来考虑了,它的参数、运行性能和结构型式,都与系统密切相关。电机在各种自动控制系统中,既是控制对象,又可以作为执行元件。电机性能的好坏,直接关系到控制系统运行的稳定性、可靠性及动态品质,乃至生产效率、产品质量等。

二、电机制造业的发展简况

电机的发展是从19世纪初开始的。1821年法拉第进行通电导体在磁场中产生电磁力的实验,发现了电动机的作用原理之后,又在1831年提出了电磁感应定律,从而奠定了发电机的理论基础。经过一个多世纪的发展,目前电机的制造技术已相当完善,电机应用也十分普遍,其类型也相当齐全。电机种类虽然繁多,但大致可归纳为:

- (1) 发电机(交流与直流):把机械能转换成电能。
- (2) 电动机(交流与直流):把电能转换成机械能。
- (3) 变压器、变频器、移相等:分别用于改变电压、电流、频率和相位等。
- (4) 控制电机:用于控制系统中传递信号、执行指令等。

电机一般采用良好的导磁材料和导电材料制成相应的磁路和电路系统,用以进行电磁感应和产生电磁力,从而产生电磁功率和电磁转矩,达到转换和传递能量的目的。

随着科学技术和电力工业的不断发展,电机制造工艺目前已发展到相当完善的阶段。单机的容量也不断地增大,这已成为电机制造业的重要趋势。

电机的体积、质量、所需材料、损耗和造价等与电机本身的容量并不成正比关系。机组容量愈大,单位容量所用材料、损耗和造价就愈低,综合管理的经济效益也愈高。单机容量的不断提高是与导磁、导电和绝缘材料的改进,以及电机冷却技术的进步紧密相关的。电机的冷却方式已由外冷发展到内冷,相继制成了使用空气、氢气和水等不同冷却介质的发电机。特别是定子和转子导体内部都采用水冷的技术(简称双水内冷),首先是在我国取得成功的,以后不少国家也相继采用。

我国电机制造业的发展是十分迅速的,1970年制造了330kV、360MVA的大型电力

变压器，1972年制造了300MW双水内冷汽轮发电机；目前已能制造840MVA、500kV的变压器，600MW汽轮发电机和700MW水轮发电机。随着我国国民经济的迅速发展，我国电机制造业即将进入世界先进行列。

三、电机学的特点

电机学是基础课向专业课过渡的一门技术基础课，内容上既有较强的理论，又必须联系实际。电机学中的问题，既有单相的又有三相的，既有电的又有磁的，既有时间的又有空间的，既有正弦的又有非正弦的，既有对称的又有不对称的，既有饱和的又有不饱和的，既有静止的又有旋转的，既有稳态的又有暂态的等。有些情况下为了突出主要矛盾通常采用忽略次要因素，作某些假定的处理方法，使思路更加清晰，物理概念更加明确；但在另一些条件下，某些次要因素，又成为主要的了。因此，分析问题时必须以生产实际为依据，分清矛盾的主次，抓住主要因素解决问题。

电机学课程的另一个特点是涉及的学科知识面广，牵扯到的问题繁杂，诸如发热与冷却、高压与绝缘、导电与导磁、机械与化学等，学习中要求具有较宽的知识面和较强的综合分析问题的能力。

总之，电机学是一门理论性、实践性和综合性较强的课程，学习时应重视基本物理概念，强调联系工程实际，要熟悉数学计算方法，掌握实验技能，重视理论与实际相结合，方能收到良好的学习效果。

0-2 铁磁材料的基本特性

一、铁磁材料的磁滞回线与基本磁化曲线

铁磁材料包括铁、钴、镍及其合金。

电机和电器中作为导磁的铁心，在受线圈交流电流激励时，受到反复磁化和去磁的作用，在此过程中，磁场强度（亦称磁化力） H 往复地在一个正的最大值（ $+H_m$ ）和一个负的最大值（ $-H_m$ ）之间变化，如图0-1所示。如果铁磁材料最初是以完全去磁的零状态开始，则初次磁化过程的磁通密度（亦称磁感应强度） B 是沿着“起始化曲线”随 H 值的增加而上升。当达到图0-1所示 a_1 点时，磁通密度达最大值（ $+B_m$ ），与之相应的磁场强度为（ $+H_m$ ）。随后转入去磁过程，当 H 值从（ $+H_m$ ）开始减小时， B 并不按原来的起始磁化

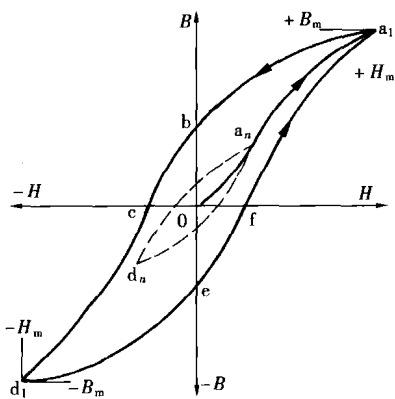


图0-1 磁滞回线

曲线减小，而是沿另一曲线 a_1b 下降。当 H 值降到零时， B 并未回到零值， H 值过零后向相反增加， B 值继续下降，直到 H 在“负”方向达到某值时， B 值才下降到零，此后， H 继续向负值方向增加，铁磁材料开始被反向磁化，磁化过程沿图示 cd_1 曲线进行。当反向磁场强度达负的最大值（ $-H_m$ ）时，磁通密度达到图中 d_1 点（ $-B_m$ ）。以后，磁场强度从 $-H_m$ 开始绝对值减小，铁磁材料处于反方向去磁，该去磁过程沿图示 d_1e 曲线进行，直到 H 绝对值减至零， B 值仍不为零， e 点并不与坐标原点重合。若 H 又从零开始向正值方向增加，铁磁材料又重复正方向的磁化过程。

如此继续正方向的磁化与去磁和反方向的磁化与去磁，经多次循环以后，形成对称于坐标原点的闭合回线，如图 0-1 中曲线 $a_1bcd_1efa_1$ ，称磁滞回线。

工程实用中，通常就 B 与 H 的函数关系，取不同的 H_m 值，得到若干个对称于坐标原点的磁滞回线，由各回线的顶点确定不同 H_m 相应的 B_m 值，把这些点连接起来，就是铁磁材料的基本磁化曲线，简称为“ $B-H$ 曲线”，如图 0-2 所示。工程上把铁磁材料的 $B-H$ 曲线作为电机理论分析和设计计算的依据。由于该曲线在坐标的第一、三象限中都是对称的，通常只取第一象限的这一段来表征铁磁材料的磁化特性。

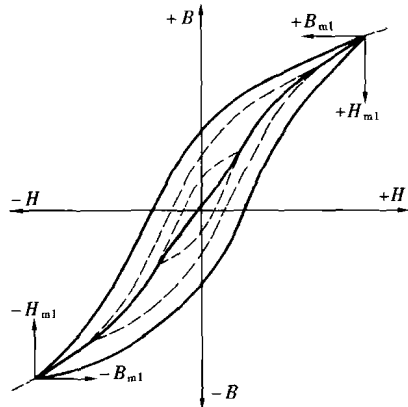


图 0-2 基本磁化曲线

二、铁磁材料具有下述三个共同特性

(1) 磁滞性：从图 0-1 可以看出对应同一磁场强度 H 值，在去磁过程中的磁通密度 B ，比磁化过程中的磁通密度 B 要大一些。如果要达到同一 B 值，还需要去磁再多一点。可见磁通密度 B 的变化滞后磁场强度 H 的变化。铁磁材料具有的这种特点，叫作“磁滞现象”。在图 0-1 中 Ob 段叫“剩余磁通”，简称剩磁 B_r 。使 B 值达零时的 H 值称“矫顽力”，用符号 H_c 表示，为图 0-1 中的 Oc 段。 B_r 和 H_c 是铁磁材料的两个重要参数。

按磁滞回线形状的不同，铁磁材料又可分为软磁材料和硬磁材料两大类。磁滞回线窄，剩磁 B_r 和矫顽力 H_c 都小的材料称为软磁材料，如铸铁、钢、硅钢片等，软磁材料的磁导率较高，可用以制造电机和变压器铁心。磁滞回线宽， B_r 和 H_c 都大的材料称为硬磁材料，硬磁材料有铁氧体、铝镍钴和稀土三大类，其中稀土永磁材料是近年发展的新材料，其 B_r 、 H_c 和 $(BH)_m$ 都很大，是一种性能优异的永磁材料。采用稀土永磁材料研制永磁电机是电机学科当前的发展方向之一。

(2) 饱和性：图 0-3 曲线 1 为任一铁磁材料的 $B-H$ 曲线，可粗略地分为三段，设最初磁化是从剩磁为零开始，随 H 的增加 B 缓慢上升，如图 0-3 $0a$ 段。之后，随 H 的增加 B 值便迅速增加， B 与 H 近似成正比关系变化，如图 0-3 ab 段。再以后，随着 H 的增加 B 的增加又缓慢下来，如图 0-3 bc 段。过 c 点以后， H 再增加， B 值增加得愈来愈小，出现了所谓的饱和现象。如图 0-3 曲线 2 所示，与各段相应的磁导率 μ_{Fe} ($\mu_{Fe} = B/H$) 也随 H 的变化

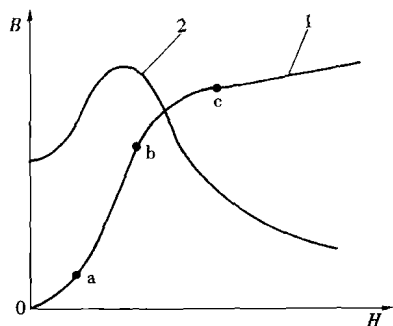


图 0-3 铁磁材料的磁化曲线

和 μ_{Fe} 随 H 变化的曲线

1—磁化曲线；2— μ_{Fe} 随 H 变化的曲线

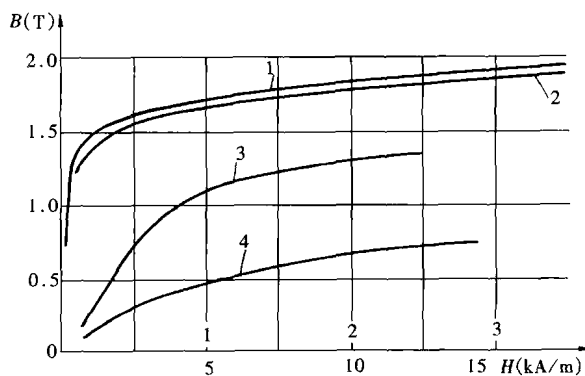


图 0-4 不同材料的 $B-H$ 曲线

1—电机用硅钢片；2—高电阻硅钢片；3—锻钢；4—铸铁

而变化,在不饱和段内,随 H 的增加而增加,在饱和段内,则随 H 的增加而减小。对于结构和尺寸相同,但铁磁材料不同的磁路达到磁饱和段所需要的磁场强度 H 值亦不相同,如图 0-4 所示。

(3) 高导磁性: 试验表明所有非铁磁材料(如铝、铜等)的磁导率都接近真空的磁导率 μ_0 , 而对于电机中常用的导磁材料,其磁导率 $\mu_{Fe} = (2000 \sim 6000)\mu_0$ 。因此在同样大小的励磁电流下,铁心线圈中的磁通比空心线圈的磁通大得多。

0-3 磁性材料的铁损耗

带铁心的交流线圈中,除线圈电阻上的功率损耗(称为铜损耗)外,处于反复磁化下的铁心中也要产生功率损耗,该损耗以发热的方式表现出来,成为铁磁损耗(简称铁损耗)。铁损耗是由磁滞现象及涡流作用产生的。

一、磁滞损耗

铁磁材料在交流磁场作用下,正、反方向的交替磁化过程,材料内部磁畴之间不停地相互摩擦,引起铁磁材料发热,消耗功率,这种由线圈交流电流反复磁化而引起的铁损耗,称为“磁滞损耗”。磁滞回线面积愈大,磁滞损耗愈大。通入线圈交流励磁电流的频率愈高,损耗亦愈大。

由于硅钢磁滞回线面积较小,故电机和变压器的主磁路常采用硅钢片制成。

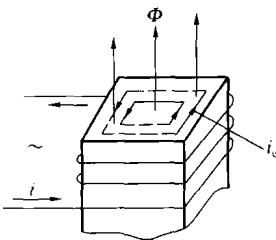


图 0-5 涡流损耗

二、涡流损耗

由于铁磁材料大多又是导体,在交变的磁场作用下,变化的磁通在铁心中将感应电动势并产生电流 i_e , 这些电流在铁心内部环绕磁通呈旋涡状流动,故称为“涡流”,如图 0-5 所示。涡流在铁心中引起损耗,使铁心发热。

为了减小涡流损失,交变磁路的铁心都是用硅钢片叠成,并在片间涂上绝缘漆限制涡流只在较小截面内流通,以形成较大电阻。不言而喻,频率越高感应电动势就愈大,涡流损耗亦愈大。

三、铁心损耗

铁心中磁滞和涡流损耗之和,称为铁心损耗,用 p_{Fe} 表示。

对于一般硅钢片,当磁性材料体积、厚度均为一定且在正常工作磁通密度范围内 ($1T < B_m < 1.8T$) 时,铁损耗 p_{Fe} 可近似写成

$$p_{Fe} \approx C_{Fe} f^{1.3} B_m^2 G \quad (0-1)$$

式中 C_{Fe} ——铁心损耗系数;

G ——铁心质量。

式 (0-1) 表明,总的铁心损耗与频率的 1.3 次方、磁通密度的平方和铁心质量成正比。

0-4 磁路及其基本定律

电机和变压器都是利用磁场作为介质来实现能量传递与变换的装置。除某些特殊电机的

磁场是用永磁铁产生的以外，在大多数情况下，磁场都是用通电线圈来产生的，而且利用具有良好导磁性能的材料，把磁场集中在一定范围内，形成磁路。由于磁通的变化要感应电动势，因此在学习电机之前，除应对铁磁材料的基本性质有所了解外，还应掌握磁路和电磁感应等基本定律。

磁路问题是局限于一定路径内的磁场问题，因此对电机的专门研究，应该运用电机电磁场理论来分析。在工程运用上为了分析问题简便，把本是场的问题等效为路的问题来研究，这是允许的。因此一般而言，磁场的各个基本物理量也适用于磁路，至于场和路二者的差别：如饱和、介质温度等影响将在遇到具体问题时加以说明。

图 0-6 (a)、(b) 为两种常见的磁路。

由于铁心导磁性能比空气好得多，因此，磁通绝大部分是在铁心内通过，称为主磁通，相应的路径称为主磁路；少量经过部分铁心和空气而闭合的磁通，称为漏磁通，相应的路径称为漏磁路。

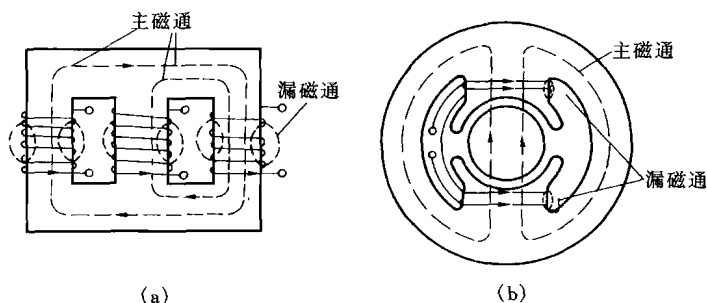


图 0-6 电机常见磁路

(a) 变压器磁路；(b) 二极直流电机磁路

用来产生磁通的电流叫励磁电流。由励磁电流的性质不同磁路可分为直流磁路和交流磁路。图 0-6 (a) 为交流磁路，图 0-6 (b) 为直流磁路。

磁路的分析和计算如同电路的分析和计算一样，可以通过一些基本定律来进行。在电机研究中，以下几条定律是常用的。

一、安培环路定律

安培环路定律（又称全电流定律）：在磁路中，沿任一闭合路径，磁场强度矢量的线积分，等于该闭合路径交链的电流的代数和，用公式表示为

$$\oint \vec{H} \, d\vec{l} = i_1 + i_2 + i_3 + \dots = \sum i \quad (0-2)$$

当电流的方向与闭合路径的积分方向符合右螺旋定则时，式 (0-2) 中电流 i 的前面取“+”，反之取“-”。将此定律应用于图 0-7 所示磁路中，取中心线即平均长度的磁力线回路为积分回路，由于中心线各点的磁场强度矢量的大小相同，其方向又与 $d\vec{l}$ 的方向一致，故

$$\oint \vec{H} \, d\vec{l} = \oint H dl = H \oint dl = Hl \quad (0-3)$$

电流的代数和 $\sum I$ 则等于线圈的匝数 N 与电流 I 的乘积，因此

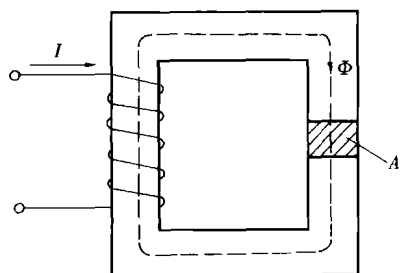


图 0-7 无分支磁路

$$Hl = NI \quad (0-4)$$

通常把作用于磁路上的励磁安匝数 NI 称为磁路的磁动势，以 F 表示之。

二、磁路的欧姆定律

由于磁场强度等于磁通密度除以磁导率，即 $H = \frac{B}{\mu}$ ，且在均匀磁场中 $B = \frac{\Phi}{S}$ (S 为磁路截面积)，故式 (0-3) 可以写成

$$Hl = \frac{B}{\mu}l = \frac{\Phi}{\mu S}l = \Phi \frac{l}{\mu S} = \Phi R_m \quad (0-5)$$

或

$$F = NI = Hl = \Phi R_m = \frac{\Phi}{\lambda} \quad (0-6)$$

$$R_m = \frac{l}{\mu S}$$

$$\lambda = \frac{1}{R_m}$$

式中 F ——磁路的磁动势，单位为安匝；

R_m ——磁路的磁阻；

λ ——磁路的磁导。

式 (0-6) 称磁路的欧姆定律，它表明，作用在磁路上的总磁动势 F 等于磁路内的磁通量 Φ 与磁路磁阻 R_m 的乘积。

三、磁路与电路的比较

如表 0-1 列出磁路与电路形式上的相似关系。

表 0-1 磁路与电路形式上的对应关系

一、物 理 量					
磁 路			电 路		
名 称	常用符号	通用单位	名 称	常用符号	通用单位
磁动势	F	安匝 (A)	电动势	E	伏 (V)
磁通量	Φ	韦 (Wb)	电 流	I	安 (A)
磁感应强度	$B (= \Phi/S)$	韦/平方米 (Wb/m ²)	电流密度	$J (= I/S)$	安/平方毫米 (A/mm ²)
磁 阻	$R_m (= l/\mu S)$	1/亨 (H ⁻¹)	电 阻	$R (= \rho l/S)$	欧 (Ω)
磁 导	$\lambda (= 1/R_m)$	亨 (H)	电 导	$G (= 1/R)$	S
二、基 本 定 律					
磁 路			电 路		
欧姆定律	$F = \Phi R_m$		欧姆定律	$E = IR$	

应当指出虽然磁路定律在形式上与电路定律有许多相似处，但它们的物理本质是有区别的：①在电路中，电动势的方向与电流方向一致（或相反）；在磁路中，产生磁动势的电流与磁动势的正方向之间符合右手螺旋关系。②电路中电流要引起 I^2R 的功率损耗，而磁路

中只有当磁通交变时才引起铁耗。③电路中导体的电阻率 ρ 在一定温度下是常数，而磁路中铁心的磁导率 μ_{Fe} 随饱和程度的增加而降低。④在线性电路中，计算时可以应用叠加原理；在磁路中，只有在不考虑饱和效应时才能应用叠加原理，而随着磁通密度的增高，具有铁心的磁路必然越来越饱和。

0-5 电磁基本定律

一、法拉第电磁感应定律

1. 法拉第定律

设有一线圈放在磁场中，无论出于什么原因，例如线圈本身的运动，或者磁场强度本身发生变化等，造成了和线圈交链的磁通随时间发生变化时，线圈内部就会感应出电动势，这种现象称为电磁感应。设线圈有 N 匝，则感应电动势的大小与线圈匝数成正比，与单位时间内磁通量的变化率成正比，称为法拉第定律。如果把感应电动势的正方向与磁通的正方向规定为符合右螺旋定则，则感应电动势可表示为

$$e = - \frac{d\psi}{dt} = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (0-7)$$

$$\psi = N\phi$$

式中 ψ ——穿过整个线圈的磁链。

线圈因受穿过它的磁通量变化而产生感应电动势，其大小由法拉第定律确定。其方向决定于感应电动势在线圈中产生的电流。该电流所产生的磁场总是阻碍原来产生感应电动势的那个磁场发生变化，这种现象又称为楞次定律。

2. 变压器电动势和运动电动势

(1) 变压器电动势。若线圈与磁场相对静止，则线圈中的感应电动势是由于与线圈相交链的磁通量本身随时间变化而产生，这种感应电动势成为变压器电动势。按法拉第定律，变压器电动势可写成

$$e = - \frac{d\psi}{dt} = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (0-8)$$

(2) 运动电动势。如果磁场是恒定的（如直流励磁），线圈与恒定磁场之间在正交方向上发生相对运动，如线圈不动，磁场沿线圈垂直方向运动，或磁场不动，线圈沿磁场垂直方向运动，因而引起和线圈相交链的磁通量发生变化，亦会产生感应电动势，称为运动电动势或速率电动势。按法拉第定律，运动电动势可写成

$$e = Blv \quad (0-9)$$

式中 v ——线圈导体沿磁场垂直方向的速度 (m/s)；

l ——线圈边在磁场中的有效长度。

运动电动势的方向按大家熟悉的右手定则确定，如图 0-8 所示。

3. 自感电动势和互感电动势

(1) 自感电动势。当线圈中有交变电流通过时，穿过线圈的磁通量亦发生变化。按法拉第定律，磁通 ϕ 的变化，在线圈内部

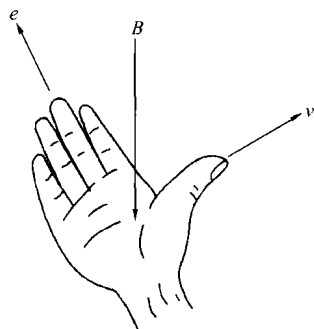


图 0-8 右手定则

便产生感应电动势。这种由于线圈自身电流发生而引起的感应电动势，称为自感电动势，用 e_L 表示。

如果线圈为空心（或非磁性材料），由于磁路无饱和现象，磁导系数为常数，磁链 ψ 与励磁电流 i 成正比，即

$$\psi_L = Li$$

式中 L ——比例常数，称为线圈的自感系数（H）。

自感电动势可写成

$$e_L = -\frac{d\psi_L}{dt} = -L \frac{di}{dt} \quad (0-10)$$

式（0-10）表明，自感电动势与线圈的自感系数成正比，与线圈内电流变化率成正比。

自感系数等于单位电流所产生的磁链，即 $L = \frac{\psi_L}{i}$ ， $\psi_L = N\phi_L$ ，又因磁通 $\phi_L = \frac{Ni}{R_{mL}}$ （ R_{mL} 为相应于自感磁通所经路径的磁阻），于是

$$L = \frac{\psi_L}{i} = \frac{N\phi_L}{i} = \frac{N\left(\frac{Ni}{R_{mL}}\right)}{i} = N^2\lambda_L \quad (0-11)$$

式中 λ_L ——自感磁通所经路径的磁导，为磁阻 R_{mL} 的倒数；

N ——线圈的匝数。

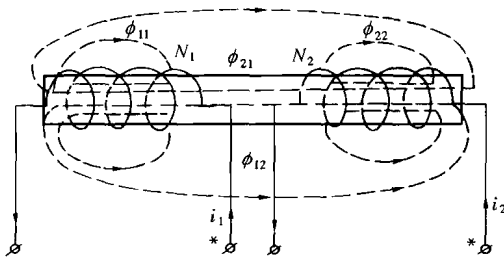


图 0-9 互感磁通和互感电动势

由式（0-11）可知，自感 L 与线圈匝数的平方成正比，与磁路的磁导成正比。由于铁磁材料的磁导率 μ_{Fe} 一般要比空气大得多，因此铁心线圈的自感要比相应空心线圈的自感大得多，且随铁心的饱和程度增加而减小。

（2）互感电动势。假定在线圈 1 的旁边放置有线圈 2，如图 0-9 所示。通过线圈 2 的电流 i_2 所产生的磁通中有一部分磁通 ϕ_{21} 穿过

线圈 1，则 i_2 变化时， ϕ_{21} 将在线圈 1 内产生感应电动势，此电动势称为互感电动势，用 e_{M21} 表示，即

$$e_{M21} = -\frac{N_1 d\phi_{21}}{dt} = -\frac{d\psi_{21}}{dt} \quad (0-12)$$

如果线圈为空心（或非磁性材料），则 i_2 愈大，由 i_2 产生并穿过线圈 1 的互感磁链 ψ_{21} 亦愈大， ψ_{21} 与 i_2 成正比，即

$$\psi_{21} = M_{21}i_2 \quad (0-13)$$

$$M_{21} = \frac{\psi_{21}}{i_2} \quad (0-14)$$

式中 M_{21} ——比例常数，称为线圈 1 和 2 的互感系数（H），互感 M_{21} 等于线圈 2 中通以单位电流时穿过线圈 1 的互感磁链值。

由于 $\psi_{21} = N_1\phi_{21}$ ，而互感磁通 ϕ_{21} 等于线圈 2 所产生的磁动势 N_2i_2 除以互感磁通所路径的磁阻 R_{M21} ，于是

$$M_{21} = \frac{N_1\phi_{21}}{i_2} = \frac{N_1\frac{N_2i_2}{R_{M21}}}{i_2} = N_1N_2\lambda_{21} \quad (0-15)$$