

普通高等教育



“十五”

PUTONG
GAODENG JIAOYU
SHIWU
GUIHUA JIAOCAI

规划教材

电机学 (第二版)

牛维扬 李祖明 编著



中国电力出版社

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

普通高等教育



“十五”

PUTONG
GAODENG JIAOYU
SHIWU
GUIHUA JIAOCAI

规划教材

电 机 学

(第二版)

编著 牛维扬 李祖明

主审 张春镐



中国电力出版社

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

内 容 提 要

本书是在1998年版《电机学》的基础上,为满足应用型高等工科院校电力类相关专业的教学要求,全面修订和改编的,是普通高等教育“十五”规划教材。

全书共分5篇18章,主要介绍变压器、异步电机、同步电机、直流电机稳态运行的基本理论知识和基本分析方法,还适当地介绍了有特点的几种特殊电机的原理,以加强电机学基本知识的应用,并扩大知识面。本书在选材和编写时,适当简化电机电磁理论的推导,强调理论知识的应用和实际运行问题的分析;主要内容均配有例题,以加深理解及提高应用能力;各章均配有习题,以加强训练。

本书可作为普通高等院校电气工程及其自动化等专业的本科教材,也可作为高职高专教育、函授教育的教材,还可作为从事电工技术工作的工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

电机学/牛维扬,李祖明编著.—2版.—北京:中国电力出版社,2005

普通高等教育“十五”规划教材

ISBN 7-5083-3552-X

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

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第092202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>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2000年5月第一版

2005年9月第二版 2005年9月北京第九次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 21印张 482千字

印数 28071—32070册 定价 29.80元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)



由中国电力教育协会组织的普通高等教育“十五”规划教材，经过各方的努力与协作，现在陆续出版发行了。这些教材既是有关高等院校教学改革成果的体现，也是各位专家、教授丰富的教学经验的结晶。这些教材的出版，必将对培养和造就我国 21 世纪高级专门人才发挥十分重要的作用。

自 1978 年以来，原水利电力部、原能源部、原电力工业部相继规划了一至四轮统编教材，共计出版了各类教材 1000 余种。这些教材在改革开放以来的社会主义经济建设中，为深化教育教学改革，全面推进素质教育，为培养一批批优秀的专业人才，提供了重要保证。原全国高等学校电力、热动、水电类专业教学指导委员会在此间的教材建设工作中，发挥了极其重要的历史性作用。

特别需要指出的是，“九五”期间出版的很多高等学校教材，经过多年的教学实践检验，现在已经成为广泛使用的精品教材。这批教材的出版，对于高等教育教材建设起到了很好的指导和推动作用。同时，我们也应该看到，现用教材中有不少内容陈旧，未能反映当前科技发展的最新成果，不能满足按新的专业目录修订的教学计划和课程设置的需要，而且一些课程的教材可供选择的品种太少。此外，随着电力体制的改革和电力工业的快速发展，对于高级专门人才的需求格局和素质要求也发生了很大变化，新的学科门类也在不断发展。所有这些，都要求我们的高等教育教材建设必须与时俱进，开拓创新，要求我们尽快出版一批内容新、体系新、方法新、手段新，在内容质量上、出版质量上有突破的高水平教材。

根据教育部《关于“十五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》的精神，“十五”期间普通高等教育教材建设的工作任务就是通过多层次的教材建设，逐步建立起多学科、多类型、多层次、多品种系列配套的教材体系。为此，中国电力教育协会在充分发挥各有关高校学科优势的基础上，组织制订了反映电力行业特点的“十五”教材规划。“十五”规划教材包括修订教材和新编教材。对于原能源部、电力工业部组织原全国高等学校电力、热动、水电类专业教学指导委员会编写出版的第一至四轮全国统编教材、“九五”国家重点教材和其他已出版的各类教材，根据教学需要进行修订。对于新编教材，要求体现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和教学内容、课程体系的改革成果，在教材内容和编写体系的选择上不仅要有本学科（专业）的特色，而且注意体现素质教育和创新能力与实践能力的培养，为学生知识、能力、素质协调发展创造条件。考虑到各校办学特色和培养目标不同，同一门课程可以有多本教材供选择使用。上述教材经中国电力教育协会电气工程学科教学委员会、能源动力工程学科教学委员会、电力经济管理学科教学委员会的有关专家评审，推

荐作为高等学校教材。

在“十五”教材规划的组织实施过程中，得到了教育部、国家经贸委、国家电力公司、中国电力企业联合会、有关高等院校和广大教师的大力支持，在此一并表示衷心的感谢。

教材建设是一项长期而艰巨的任务，不可能一蹴而就，需要不断完善。因此，在教材的使用过程中，请大家随时提出宝贵的意见和建议，以便今后修订或增补。（联系方式：100761 北京市宣武区白广路二条1号综合楼9层 中国电力教育协会教材建设办公室 010-63416237）

中国电力教育协会

第三版前言

本书是在1998年版《电机学》(专科适用)教材的基础上,经数年使用积累经验,为满足应用型高等工科院校拓宽专业面、加强应用性的教学要求,同时教学时数又有所减少的情况下,全面修订和改编的,作为“十五”规划教材出版。

本书针对电力类相关专业,按教学时数100学时左右编写(含实验)。改编时保留原初版教材的内容体系,并根据从事电工技术现场实际工作的需要,精选教材内容,侧重稳态运行分析,突出基本理论、基本分析方法,力求文字顺畅便于自学。本书在修订和改编时采取了如下措施:

(1)合并和调整章节内容编排,精练文字表述,使教材正文篇幅有较大幅度削减,而涉及“应用”的内容又稍有增加。

(2)适当精减或简化电机电磁理论的阐述及推导,增强运行性相关问题的分析及例题示范。

(3)教材内容的重点是介绍各类电机、变压器稳态运行的基本知识、基本分析方法和基本计算。

(4)各类电机、变压器的非正常运行,着重点在物理概念、现象及其影响方面,不强调计算。

(5)增添部分有特点的特殊电机的介绍,并作为电机基本知识的应用实例,同时扩大学生视野。

(6)精选和修订例题和习题,使之尽可能具有典型性、工程性和实用性,以提高学生分析实际问题的能力。

本教材各篇具有相对的独立性,讲授顺序可视具体专业的教学要求进行调整。部分章节及段落前标注“*”号的内容,可以选讲或供学生自学,视需要而定,所以完成本书基本内容的教学,也可压缩至80学时左右。本教材也适用于做高职高专教育相关专业的教材,或供从事电工技术类工作的工程技术人员参考。

本书第五篇由李祖明老师改编,其余各篇由牛维扬老师改编并统稿。本书承太原理工大学张春镐教授审定,提出的宝贵意见对完善和提高教材质量起到重要作用,谨在此表示衷心的感谢。

由于水平所限,又处于探索之中,书中难免有不足、错误和处理不当之处,敬请批评指正,以便今后改进。

编者

2005.4

目 录

序
第二版前言
绪 论

第一篇 变 压 器

第一章 变压器基本知识	7
第一节 变压器工作原理及分类	7
第二节 电力变压器基本结构	8
第三节 变压器发热与冷却	13
本章小结	14
习题	14
第二章 变压器运行原理	15
第一节 变压器空载运行	15
第二节 变压器负载运行	21
第三节 变压器参数的实验测定及参数标么值	27
第四节 变压器运行特性	33
本章小结	39
习题	39
第三章 三相变压器及其运行	43
第一节 三相变压器磁路系统及绕组联结	43
第二节 三相变压器联结组标号	44
第三节 绕组联结和磁路结构对电压波形的影响	49
第四节 变压器并联运行	52
第五节 三相变压器不对称运行	55
* 第六节 变压器运行的瞬变过程	60
本章小结	63
习题	64
第四章 特殊变压器	67
第一节 三绕组变压器	67
第二节 自耦变压器	72
* 第三节 仪用互感器	74
* 第四节 分裂绕组变压器	76

本章小结	78
习题	79

第二篇 交流电机绕组、电动势和磁动势

第五章 交流电机绕组及其感应电动势	81
第一节 交流绕组构成的基本知识	81
第二节 三相交流绕组连接实例	83
第三节 正弦磁场下相绕组感应电动势	87
第四节 非正弦磁场下高次谐波电动势	90
本章小结	95
习题	96
第六章 交流绕组的磁动势	98
第一节 单相绕组的磁动势——脉振磁动势	98
第二节 三相绕组基波合成磁动势——圆形旋转磁动势	104
*第三节 两相绕组产生的磁动势	108
本章小结	111
习题	112

第三篇 异步电机

第七章 三相异步电动机工作原理	114
第一节 异步电机基本知识	114
第二节 三相异步电动机磁场及感应电动势	119
第三节 负载运行时基本方程式等效电路、相量图	124
第四节 异步电动机参数的实验测定	132
*第五节 笼型转子的极数、相数和参数折算	134
本章小结	135
习题	136
第八章 异步电动机功率、转矩和运行分析	138
第一节 异步电动机功率及转矩方程	138
第二节 异步电动机转矩——转差率曲线	143
第三节 异步电动机工作特性	149
第四节 异步电动机启动方法	151
*第五节 高启动转矩的笼型异步电动机	156
*第六节 异步电动机调速方法简介	157
本章小结	161
习题	162
第九章 单相异步电动机和两种特殊的感应电机	164

第一节 单相异步电动机	164
* 第二节 直线感应电动机简介	168
* 第三节 感应调压器	172
习题	174

第四篇 同 步 电 机

第十章 同步发电机运行原理	176
第一节 同步电机的基本知识	176
第二节 空载和负载时同步电机的磁场	180
第三节 隐极同步发电机电动势方程、同步电抗、相量图	185
第四节 凸极同步发电机电动势方程、同步电抗、相量图	192
第五节 同步发电机功率及转矩方程	199
本章小结	200
习题	201
第十一章 同步发电机特性及参数测定	203
第一节 同步发电机空载、短路特性及 x_d 测定	203
第二节 零功率因数负载特性及漏电抗 X_l 测定	205
第三节 稳态电抗的实验测定	208
第四节 同步发电机外特性及调节特性	209
本章小结	212
习题	212
第十二章 同步发电机并联运行及同步电动机	214
第一节 投入并联运行的条件和方法	214
第二节 同步发电机功角特性	217
第三节 并网后有功功率调节、稳定和振荡的概念	220
第四节 并网后无功功率调节和 V 形曲线	224
* 第五节 并网的同步发电机工作状态	228
第六节 同步电动机和同步调相机	230
本章小结	238
习题	238
第十三章 同步发电机非正常运行	242
第一节 分析不对称运行的相序阻抗和相序等效电路	242
第二节 同步发电机不对称运行实例分析	245
第三节 同步发电机三相突然短路的物理情况	248
第四节 同步发电机突然短路的瞬变和超瞬变电抗	251
第五节 突然短路电流及其衰减	255
本章小结	261
习题	262

* 第十四章 同步发电机励磁方式简介	264
第一节 励磁系统概念及要求	264
第二节 同步发电机励磁方式简介	265
第三节 感应子发电机原理	267

第五篇 直 流 电 机

第十五章 直流电机基本知识	269
第一节 直流电机的工作原理、主要结构、额定值	269
第二节 直流电机电枢绕组	275
第三节 直流电机的电枢反应	279
第四节 电枢绕组感应电动势和电磁转矩	283
第五节 直流电机换向	284
本章小结	288
习题	289
第十六章 直流发电机	291
第一节 直流发电机基本方程	291
第二节 直流发电机特性	293
第三节 并励发电机自励建压	297
本章小结	298
习题	298
第十七章 直流电动机	300
第一节 直流电动机基本方程	300
第二节 直流电动机运行特性	303
第三节 直流电动机调速	309
第四节 直流电动机启动及电气制动	312
本章小结	316
习题	316
* 第十八章 特殊直流电机	318
第一节 直流测速发电机和直流伺服电动机	318
第二节 交直流两用串激电动机	320
本章小结	322
参考文献	323

绪 论

一、电机的定义及作用

电机是根据电磁感应定律和电磁力定律实现电能与机械能之间能量形式转换的机械，其机电能量转换过程如图 0-1 (a) 所示，图中箭头方向表示能量传递方向。变压器也是根据电磁感应定律工作的能量转换器械，只不过它是把一种数值的电压、电流转换成另一种数值的电压、电流，其能量转换过程如图 0-1 (b) 所示。从基本原理上讲，它与异步电机有许多相似之处。

电机学就是研究电机、变压器的基本结构、原理和运行特性的科学。

在现代社会中，一

般将各种自然能源（如水力、风力、热力等）通过电机生成电能（发电），在使用地点再通过电机转换成能够利用的能量形态（用电），所以概括地说，电机的主要作用有以下三点。

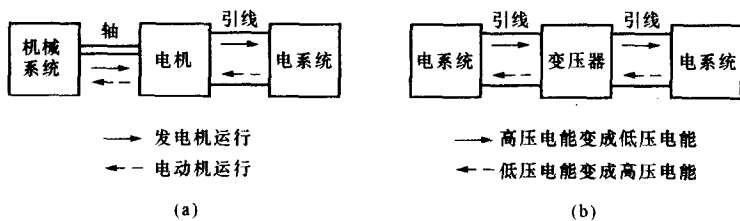


图 0-1 电机的能量转换过程示意图

(a) 电机；(b) 变压器

(1) 进行电能的生产、传输和分配。如发电厂中，由汽轮机（或水轮机、柴油机）带动电机发电，将机械能转换成电能，这种电机称为发电机。然后，用变压器升高电压，通过输电路把电能送到各用电地区，再经过降压变压器变成可供利用的低压电能，供用户使用。

(2) 驱动各种生产机械和装备。用户使用电动机将电能转换成机械能，用来拖动各种生产机械设备和用具。例如驱动机床、电力排灌、机车牵引、抽水鼓风、轧钢造纸以及家用电器的驱动等等。

(3) 作为各种控制系统、自动化装置的执行、检测、放大和计算元件。

总之，作为与电能有关的能量转换机械，电机是工业、农业、交通运输、国防以及日常生活中最常用的重要设备，其应用场合将越来越广。

二、电机的主要类型

电机作为一种机电能量转换元件，是适应工农业生产、科学技术和日常生活的需要而发展的。由于使用电机的场合要求多种多样，至今已发展了种类越来越多的电机，总体上可作如下分类。

从能量传递、转换功能及用途来分：

(1) 变压器：把一种数值的交流电压、电流转换成另一种数值，也可用来改变相数、相位和阻抗。

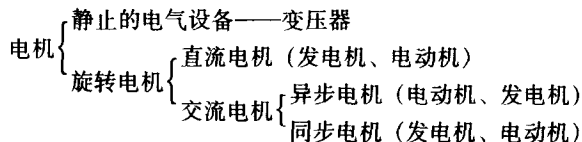
(2) 发电机: 将输入的机械能转换成电能输出。

(3) 电动机: 将输入的电能转换成机械能形式, 驱动生产、生活机械装备。

(4) 控制电机: 作为控制系统中执行、检测、放大和计算元件。

上述分类中的发电机与电动机, 实际是电机运行中的两种状态, 此两种状态是可逆的。上述分类中, 除变压器为静止的电气设备外, 其余均为旋转电机。

从电机性能特点、电源性质上, 还可概括地作如下分类:



本课程将按变压器、异步电机、同步电机、直流电机及特殊电机的顺序, 介绍它们的基本结构、原理和运行特性。

三、本课程特点及学习方法

电机学课程主要介绍各类电机的工作原理和基本运行规律。它与先行课物理、电路等课程不同的是, 针对着具体的电机设备, 应用电磁感应定律和电磁力定律, 分析发生在有限的电机空间内的电磁过程, 再将此复杂过程简化为基本方程和等效电路、相量图, 从而得到电机运行的基本规律和观念。

由于所介绍的各类电机, 事实上也是现代工业生产和生活中实际使用电机的“原型”, 为使所分析的现象简明, 抓住主要脉络, 往往要做工程上允许的(近似地)假设, 若假设条件改变, 分析过程和结果也会相应变动。对此应充分注意, 才能分析生产实际中有关电机运行的具体问题。因此学习本课程应注意以下几点:

(1) 在明确电机基本结构的基础上, 懂得应用电磁规律将复杂的电机物理情况转化为电路和磁路问题, 掌握电机运行的基本理论(基本方程、等效电路、相量图)。

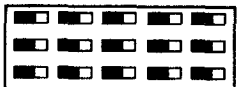
(2) 紧密联系实际, 用工程的观点, 应用电机基本理论, 抓住主要矛盾, 分析和研究实际问题, 会定量计算电机稳态运行中的一般问题。

(3) 重视实验、习题、实习, 在实践中练好基本功。

四、铁磁材料特性及磁路定律等有关知识的复习



(a)



(b)

图 0-2 磁畴

(a) 未磁化时; (b) 磁化后

电机是依据电磁感应定律而工作的, 铁心磁路是其重要的组成部分。现将电磁学有关知识简要复习、归纳如下。

1. 铁磁物质磁化及铁心磁路饱和特性

电机及变压器铁心均由铁磁物质(如硅钢片等)制成。铁磁物质包括铁、镍、钴及其合金。铁磁物质置于外磁场中会显著增强磁场。这是因为铁磁物质在外磁场中被磁化, 产生附加磁场, 叠加在外磁场上, 使得合成磁场大大增强的缘故。图 0-2 是铁磁物质磁化的示意图, 其中(a)图表示未磁化前, 铁磁物质内部具有极性的磁畴分子杂乱无章地排列着, 所以铁磁材料本身不呈现

磁性。一旦将铁磁物质置于外磁场中 [见 (b) 图], 各个磁畴将按外磁场方向趋向一致, 从而形成附加磁场叠加在外磁场上使总磁场加强, 所以铁磁材料的导磁率 $\mu_{Fe} \gg \mu_0$ 。 μ_0 为真空中的导磁率, 一般可认为是非铁磁材料的导磁率。电机中常用铁磁材料的导磁率 $\mu_{Fe} \approx (2000 \sim 6000) \mu_0$ 。

将尚未磁化的铁磁材料置于磁场中进行磁化时, 随着磁场强度 H 的逐渐增大, 磁通密度 B 将随之增大, 曲线 $B = f(H)$ 呈非线性特征, 称为铁磁材料的起始磁化曲线。如图 0-3 所示。在曲线 oa 段, 铁磁材料的部分磁畴开始按外磁场 H 的方向转向; 在曲线 ab 段, 大量磁畴按外磁场 H 方向取向, B 值正比增大; 在曲线 bc 段, 可以按外磁场 H 转向的磁畴数量越来越少, B 值增加变慢, 称为“饱和”。达到饱和之后, 随 H 值增加, B 值的增加规律基本与非铁磁材料的规律 $B = \mu_0 H$ 相同, 如曲线 cd 段及其以后。

曲线 $B = f(H)$ 称为铁磁材料的磁化曲线, 其上 b 点, 是曲线开始拐弯的点, 称为膝点, 表示磁路开始饱和。电机、变压器铁心内的工作磁通密度 B , 通常选择在膝点附近, 以便磁路内既有较大磁通量, 又不会过分饱和以免增大励磁电流。

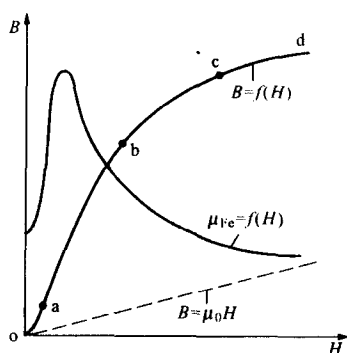


图 0-3 铁磁材料起始磁化曲线和 $\mu_{Fe} = f(H)$ 曲线

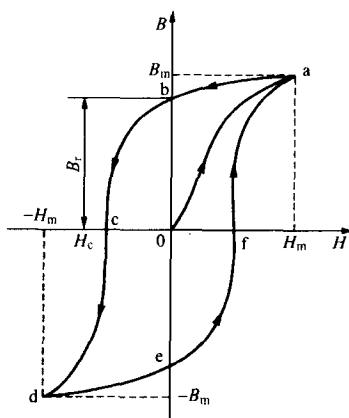


图 0-4 铁磁材料的磁滞回线

2. 交变磁场中的磁滞、涡流现象

若铁磁材料置于交变磁场中, 则铁磁材料在外磁场作用下进行周期性的反复磁化, 其 B 与 H 之间的关系为图 0-4 所示的闭合回线 $abcdefa$ 。由图可见, 当外磁场 H 从零增加到 H_m 时, B 值相应地按起始磁化曲线增加到 B_m , 此后逐渐减小 H , B 值将按曲线 abc 下降, 至 b 点时 $H = 0$, 而 $B = B_r$, B_r 称为剩余磁通密度, 简称剩磁; 若使 B 值从 B_r 减小到零, 则须加反向的外磁场 H_c , H_c 称为矫顽力。铁磁材料这种磁通密度 B 的变化滞后于磁场强度 H 变化的现象, 称为磁滞现象。铁磁材料在交变磁场中周期性磁化, 呈现的 $B \sim H$ 间的闭合回线, 称为磁滞回线。在交变磁场中铁磁材料会有磁滞现象是其基本特性之一。

应当说明, 铁磁材料在不同磁场强度 H_m 下反复磁化时, 可得一系列同心的磁滞回线, 将其顶点连接起来得到的曲线, 称为基本磁化曲线 (又称平均磁化曲线), 如图 0-5 所示, 它不是起始磁化曲线, 但区别不大。电机、变压器铁心磁路计算中, 所使用的都是基本磁化

曲线。

当铁磁材料的铁心处在交变磁场中,除了会产生磁滞现象之外,还同时会产生涡流现象。因为铁心是导电的,当通过铁心的磁通随时间交变时,根据电磁感应定律,铁心中将感应电动势,并在铁心中产生许多闭合的旋涡状的环境,称为涡流 i_w ,如图 0-6 所示。涡流在铁心中引起的 $i_w^2 r$ 损耗,称为涡流损耗 p_w 。

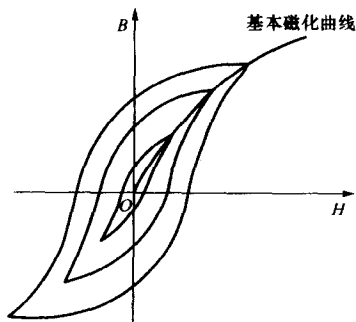


图 0-5 基本磁化曲线

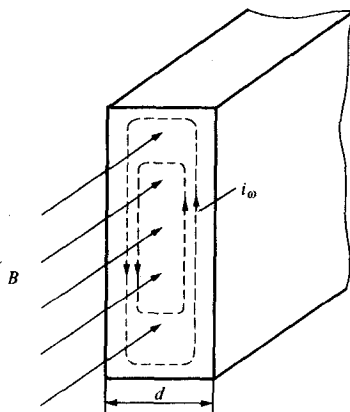


图 0-6 一片硅钢片中的涡流

3. 铁心损耗 p_{Fe}

铁磁材料制成的铁心处在交变磁场中,必然会相伴产生磁滞和涡流现象,相应地引起磁滞和涡流损耗,二者合称为铁心损耗 p_{Fe} 。

分析表明:铁磁材料的铁心在反复磁化中,磁畴之间在不停地摩擦,消耗能量,称为磁滞损耗 p_h ,其大小与磁场交变频率 f 、铁心体积 V 、磁滞回线包围的面积大小有关;涡流损耗 p_w 的大小,与磁场交变频率 f 、铁心电阻率大小以及涡流路径长短等因素有关。

电机、变压器中,铁心损耗 p_{Fe} 常用计算式为

$$p_{Fe} = P_{1/50} \left(\frac{f}{50} \right)^{\beta} B_m^2 G \quad (0-1)$$

式中 B_m ——磁通密度幅值, T;

f ——磁通交变频率, Hz;

G ——铁心质量, kg;

β ——系数,通常 $\beta = 1.2 \sim 1.6$;

$P_{1/50}$ ——单位铁耗,是指当 $f = 50\text{Hz}$ 、 $B_m = 1\text{T}$ 时,每千克硅钢片铁心的损耗, W/kg。

当电机、变压器正常工作时, $1\text{T} < B_m < 1.8\text{T}$, 则式 (0-1) 中 $\beta \approx 1.3$, 即铁心损耗与频率 f 的 1.3 次方、与磁通密度幅值 B_m 的平方及铁心质量 G 三者乘积成正比。

4. 常用磁路定律复习

在分析电机时,常用到以下磁路基本定律提要如下:

(1) 磁路欧姆定律。在电机、变压器里,总是把线圈套在铁心上。当线圈通入电流时,

则线圈周围会形成磁场。由于铁心的导磁率比空气大得多, 则绝大部分磁通将通过铁心并闭合, 这部分磁通称为主磁通; 另外的围绕线圈、通过部分铁心经空气隙闭合的少量分散磁通称为漏磁通。如图 0-7 所示。

磁通流经的路径称为磁路。对应主磁通和漏磁通有主磁路和漏磁路。

磁路的欧姆定律表明: 对任一段材料、截面积均相同的磁路, 作用在该段磁路上的磁动势 F 等于磁通 Φ 与磁阻 R_m 二者的乘积, 即

$$\Phi = F/R_m \quad (0-2)$$

式中: F 指作用在该段磁路上的总磁动势 $F = \sum Ni$; 磁阻 $R_m = l/\mu S$, 即磁路的磁阻 R_m 与磁路长度 l 成正比, 与磁路截面积 S 及导磁率 μ 二者成反比。

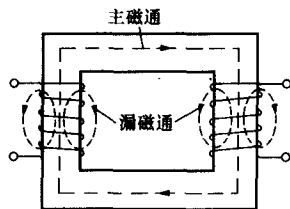


图 0-7 变压器磁路

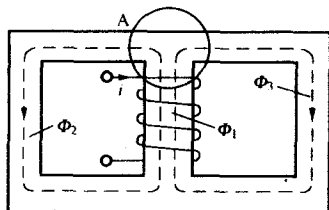


图 0-8 磁路节点定律用图

(2) 磁路的节点定律。根据磁通连续性原理, 对于带有并联分支的分支磁路, 如图 0-8 所示。在图中磁路分支外节点取一个闭合面 A , 则进入闭合面和穿击闭合面的磁通量应相等, 即 $\Phi_1 = \Phi_2 + \Phi_3$, 或

$$\sum \phi = 0 \quad (0-3)$$

(3) 全电流定律。磁场中, 取任一闭合路径回线 l , 沿该闭合线对磁场强度 H 的线积分 $\oint_l H dl$, 恰好等于穿过此闭合回路的全部电流的代数和 $\sum Ni$, 此即全电流定律, 又称为安培环路定律, 用数学式表示为

$$\oint_l H dl = \sum Ni \quad (0-4)$$

如果电流的正方向与闭合回线 l 积分的方向符合右手螺旋关系时, 该电流 i 取正号; 否则取负号, 如图 0-9 所示。

若电机、变压器铁心的磁路不是同一截面, 或者某段磁路材料不同, 则应按材料、截面将全部磁路分段, 则得到 n 段磁路组成的磁回路, 此时全电流定律形式可改写成

$$\sum_{k=1}^n H_k l_k = \sum Ni \quad (0-5)$$

式 (0-5) 表明: 沿任何闭合磁路的总磁动势等于各段磁路磁位降的代数和。

磁路与电路有一定的相似性, 从数学表示形式上看, 可以把磁动势 F 比拟于电路中的电动势 E , 磁通量 Φ 比拟于电路中的电流 I , 磁阻 R_m (磁导 $\Lambda_m = \frac{1}{R_m}$) 可以比拟于电路中的电阻 R (电导 $G = \frac{1}{R}$)。这样, 磁路与电路相应物理量及其定律, 可以列表对比, 以利理解。如表 0-1 所示。

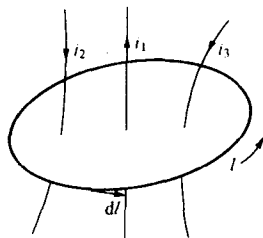


图 0-9 全电流定律用图

表 0-1

磁路与电路的对比

电 路	磁 路
电流 I (A)	磁通 Φ (Wb)
电流密度 J (A/m ²)	磁通密度 B (1T=1Wb/m ²)
电动势 E (V)	磁动势 F (A)
电阻 $R = \rho \frac{l}{S}$ (Ω)	磁阻 $R_m = l/\mu S$ (1/H)
电压降 IR (V)	磁压降 ΦR_m (A)
基尔霍夫第一定律 $\Sigma I = 0$	磁路节点定律 $\Sigma \Phi = 0$
基尔霍夫第二定律 $\Sigma U = \Sigma E$	全电流定律 $\Sigma HI = \Sigma NI$
电路欧姆定律 $I = E/R$	磁路欧姆定律 $\Phi = F/R_m$

第一篇 变 压 器

变压器是一种静止的电气设备，它依据电磁感应原理，将一种数值的交流电压、电流转换为同频率的另一种数值的电压、电流，以供生产、生活使用，它还可以用来做阻抗变换器以及电气测量的中介元件。调压器、电抗器等，其基本原理与变压器十分类似，通常统称为变压器类产品。

变压器用途广泛，种类繁多。其容量，小者只有几伏·安，大的可达数十万伏·安；电压，低的只有几伏，高的可达数十万伏。它们虽然结构各有特殊性，然而基本原理是相通的。本篇以电力变压器为典型，介绍其工作原理、性能及其分析方法。

第一章 变压器基本知识

第一节 变压器工作原理及分类

一、工作原理

如图 1-1 所示，在闭合铁心上放置两个（或两个以上）绕组，各绕组匝数不等。其中与电源相接、接收电能输入的绕组称为一次绕组（又称原边）；与负载相接、向负载提供电能的绕组称为二次绕组（又称副边）。凡一次侧的量均标注下标“1”，凡二次侧的量均标注以下标“2”。

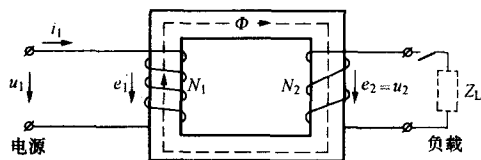


图 1-1 变压器的工作原理

当交流电压 u_1 加到一次绕组上，交流电流 i_1 便流入一次绕组，产生磁动势 $i_1 N_1$ 建立变压器磁场。交变主磁通 ϕ 同时交链各个绕组（称为磁耦合），并在各绕组中引起感应电动势 e_1 和 e_2 ，根据电磁感应定律

$$e_1 = -N_1 \frac{d\phi}{dt}, e_2 = -N_2 \frac{d\phi}{dt} \quad (1-1)$$

式中： N_1 和 N_2 分别为一、二次绕组匝数。

若二次绕组与负载阻抗 Z_L 接通，则电动势 e_2 在二次侧闭合回路内引起电流 i_2 ， i_2 在负载阻抗 Z_L 上的压降即是变压器二次侧端电压 u_2 。这样，电源送入一次侧的电能 $u_1 i_1$ ，通过一、二次绕组磁耦合的联系，使负载阻抗 Z_L 上获得了电能 $u_2 i_2$ 。当然，二次侧是另一种等级的电压和电流。

定义变压器变比 K 为

$$K = \frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2} \approx \frac{u_1}{u_2} \quad (1-2)$$

可知，当电源电压 u_1 确定时，若 N_1/N_2 的匝数比不同，则可以获得不同数值的二次侧电压。这