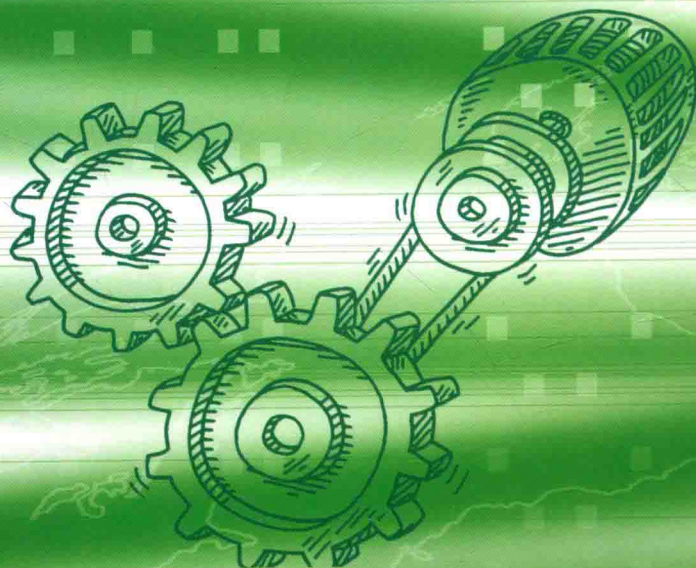


电机拖动基础 与仿真应用

魏立明 © 主编



 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

电机拖动基础与仿真应用

主 编 魏立明

副主编 魏大慧 齐海英 贾友波 贾 雪

于秋红 孟凡姿 程凤琴 冷 壮



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 提 要

全书主要分为三部分,电机与拖动的基本理论、电机与拖动实验以及电机与拖动的MATLAB仿真。全书共13章,内容主要包括磁路、变压器、直流电机、异步电机的基本理论、同步电机的基本理论、控制电机、三相异步电动机的电力拖动、直流电动机的电力拖动、电力拖动系统电动机的选择、电机与拖动教学参考实验、MATLAB概要、变压器的MATLAB仿真、异步电动机的MATLAB仿真。为了适应高等院校教学需要,每章最后都有本章小结、思考题与练习题,同时本书附有相应的思考题与练习题解答。

本书可以作为各高等院校应用型本科电气工程及其自动化专业、建筑电气与智能化专业的教材,也可作为电气信息类其他专业相关课程基础教材,同时也可作为广大工程技术人员参考用书。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

电机拖动基础与仿真应用 / 魏立明主编. —北京:北京理工大学出版社, 2017.5
ISBN 978-7-5682-4043-7

I. ①电… II. ①魏… III. ①电机—电力传动—高等学校—教材②电力传动—机械系统—系统仿真—高等学校—教材 IV. ①TM921

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第107505号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(总编室)

(010)82562903(教材售后服务热线)

(010)68948351(其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京慧美印刷有限公司

开 本 / 787毫米×1092毫米 1/16

印 张 / 18.25

字 数 / 436千字

版 次 / 2017年5月第1版 2017年5月第1次印刷

定 价 / 58.50元

责任编辑 / 封 雪

文案编辑 / 张鑫星

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 李志强

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换

前 言

本书根据教育部教学指导委员会拟定的电工、电子技术系列课程教学基本要求，针对目前应用型高校电机与拖动课程现状并且结合编者多年教学和实践经验以及教学改革成果编写而成，本书是普通高等教育“十三五”规划教材。

随着高等教育改革的深入，尤其是应用型人才培养的总体要求，使得各高等院校均对原有课程的教学内容和学时进行了缩减。本书全面分析了当前教学现状，以保证基础知识、降低理论深度、加强工程应用、更新内容体系作为本书编写的基本依据和主要特点。本书适用于应用型工科院校电气工程及其自动化、建筑电气与智能化等相关专业。

本书分为电机与拖动的基本理论、电机与拖动实验以及电机与拖动的 MATLAB 仿真三部分，教学参考学时为 48~64 学时，其中实验参考学时为 8~12 学时。由于各学科专业的要求不同，各个学校可根据具体的授课学时和专业要求对教材的内容做适当的调整 and 选择。为了充分利用多媒体教学手段，提高教学的现代化水平，编者编制了与本书配套的多媒体课件，以增加课堂的信息量，培养学生的自学能力。

本书由魏立明教授主编，负责全书的组织统稿和定稿，并编写绪论、第 1 章、第 12 章和第 13 章。参加本书编写的还有魏大慧（第 2 章和第 3 章）、齐海英（第 4 章和第 5 章）、贾友波（第 6 章和第 7 章）、贾雪（第 8 章）、于秋红（第 9 章）、孟凡姿（第 10 章）、程凤琴（第 11 章）。书中所有图片由冷壮编辑。

本书在编写过程中参阅或引用了部分参考资料，在此对这些作者表示衷心的感谢。限于编者水平，加之编写时间仓促，其中疏漏和不妥之处在所难免，敬请使用本书的师生及其他读者给予批评指正。

编 者

目 录

绪论	1
第 1 章 磁路	2
§ 1.1 磁场的基本物理量	2
§ 1.2 物质磁性能	3
§ 1.3 磁路的基本定律	7
§ 1.4 铁芯线圈电路	9
本章小结	12
思考题与练习题	12
第 2 章 变压器	14
§ 2.1 变压器的工作原理	14
§ 2.2 变压器的基本结构	17
§ 2.3 变压器的负载运行分析	20
§ 2.4 变压器的参数测定	24
§ 2.5 变压器的运行特性	27
§ 2.6 三相变压器	29
§ 2.7 三相变压器的稳态运行	35
§ 2.8 自耦变压器和三绕组变压器	38
§ 2.9 互感器	42
本章小结	43
思考题与练习题	43
第 3 章 直流电机	46
§ 3.1 直流电机的工作原理与额定值	46
§ 3.2 直流电机的基本结构和励磁方式	49
§ 3.3 直流电机负载时的磁场与电枢反应	53
§ 3.4 电磁转矩和感应电动势的计算	54
§ 3.5 直流电动机的运行分析	56

§ 3.6	直流发电机的运行分析	60
§ 3.7	直流电动机的功率和转矩方程	65
§ 3.8	直流发电机的功率和转矩方程式	67
	本章小结	68
	思考题与练习题	68
第 4 章	异步电机的基本理论	71
§ 4.1	三相异步电动机的工作原理	71
§ 4.2	三相异步电动机的结构	77
§ 4.3	三相异步电动机的电动势	84
§ 4.4	三相异步电动机的磁通势方程式	87
§ 4.5	三相异步电动机的运行分析	90
§ 4.6	三相异步电动机的功率和转矩计算	95
§ 4.7	单相异步电动机	98
	本章小结	100
	思考题与练习题	101
第 5 章	同步电机的基本理论	103
§ 5.1	三相同步电机的工作原理	103
§ 5.2	三相同步电机的基本结构	105
§ 5.3	三相同步电动机的运行分析	107
§ 5.4	三相同步电动机的功率和转矩计算	113
	本章小结	115
	思考题与练习题	115
第 6 章	控制电机	117
§ 6.1	伺服电动机	117
§ 6.2	步进电机	122
§ 6.3	测速发电机	124
§ 6.4	旋转变压器	127
	本章小结	132
	思考题与练习题	133
第 7 章	三相异步电动机的电力拖动	134
§ 7.1	三相异步电动机的机械特性	134
§ 7.2	三相异步电动机的固有机机械特性与人为机械特性	137
§ 7.3	电力拖动系统的稳定运行	142

§ 7.4 三相异步电动机的启动	144
§ 7.5 三相异步电动机的调速	153
§ 7.6 三相异步电动机的制动	159
本章小结	162
思考题与练习题	163
第 8 章 直流电动机的电力拖动	166
§ 8.1 他励直流电动机的机械特性	166
§ 8.2 他励直流电动机的启动	168
§ 8.3 他励直流电动机的调速	171
§ 8.4 他励直流电动机的制动	174
本章小结	181
思考题与练习题	182
第 9 章 电力拖动系统电动机的选择	184
§ 9.1 电动机的发热和冷却	184
§ 9.2 电动机工作制的分类	185
§ 9.3 电动机选择的基本内容	187
§ 9.4 电动机的允许输出功率	189
本章小结	190
思考题与练习题	191
第 10 章 电机与拖动教学参考实验	192
§ 10.1 单相变压器实验	192
§ 10.2 三相变压器实验	194
§ 10.3 笼型三相异步电动机实验	196
§ 10.4 绕线型三相异步电动机实验	199
§ 10.5 三相同步电动机实验	200
§ 10.6 直流发电机实验	202
§ 10.7 直流电动机实验	204
第 11 章 MATLAB 概要	207
§ 11.1 MATLAB 简介	207
§ 11.2 MATLAB 工作环境	208
§ 11.3 MATLAB 语言要点	212
§ 11.4 命令文件 (M 函数和 M 文件) 简介	213
§ 11.5 Simulink 动态系统仿真工具	215

第 12 章 变压器的 MATLAB 仿真	221
§ 12.1 磁路计算	221
§ 12.2 变压器仿真	227
第 13 章 异步电动机的 MATLAB 仿真	237
§ 13.1 异步电动机人为机械特性仿真	237
§ 13.2 三相异步电动机启动和制动的仿真	239
§ 13.3 异步电动机正反转和调速仿真	244
思考题与练习题解答	248
参考文献	283

绪 论

电能的应用已遍及各行各业乃至人类的日常生活，电能的生产、变换、传输、分配、使用和控制等都必须利用电机作为能量转换或信号转换的机电装置。因此，电机是实现能量转换和信号转换的电磁机械装置。在电力工业中，发电机和变压器是发电厂和变电所中的主要设备；在工业中，大量使用电动机作为原动机去拖动各种生产机械，例如，在机械工业、冶金工业、化学工业中，机床、挖掘机、轧钢机、起重机、抽水机、鼓风机等设备都要用电动机来拖动；在自动控制技术中，各种控制电机被广泛作为检测、放大、执行和校正元件来使用。

电机的种类很多，总体上可分为两大类，一类是动力电机，另一类是控制电机。用作能量转换的电机称为动力电机，用作信号转换的电机称为控制电机。

动力电机中，将机械能转换成电能的称为发电机；将电能转换成机械能的称为电动机。按电流种类的不同，动力电机又分为交流电机和直流电机两类。交流电机按工作原理的不同又分为异步电机（感应电机）和同步电机两种，每一种又有单相和三相之分。直流电机按励磁方式的不同分为他励电机、并励电机、串励电机和复励电机四种。控制电机的种类也很多，其容量和体积一般都比较小。变压器是将某个电压的交流电能转换成同频率但不同电压的交流电能，是一种静止的电器，变压器的工作原理与分析方法同电机密切关联，所以也将其列入电机范畴，在本课程中进行讲解。拖动是指用电动机来拖动生产机械运动，以完成一定的生产任务。

电机与拖动课程是一门专业基础课，本课程的任务是使学生掌握直流电机、交流电机、控制电机和变压器的基本结构与工作原理以及电力拖动系统运行性能、分析计算、电机选择与实验方法，为学习后续专业课程奠定基础。本课程的主要内容和重点放在基本知识、基本理论和基本技能上。

第 1 章

磁 路

电机（包括变压器和旋转电机）是一种机电能量转换或信号转换的电磁机械装置，电磁感应是电机工作原理的基础，因此要想了解电机的工作原理及性能，必须具备电和磁两个方面的基础理论知识。有关电路方面的知识，在电路原理课程中已经进行了详细的研究。本章针对磁路方面的知识进行必要的补充，因此，本章围绕磁路进行研究，首先介绍磁场的基本概念，其次介绍磁路的基本定律，最后讨论磁路的计算方法。

§ 1.1 磁场的基本物理量

磁场是实现能量转换、传递或储存的媒介，除某些容量很小的微型电机的磁场是由永久磁铁产生以外，在大多数情况下，磁场都是用电流来产生的，而且把磁场集中在一定范围之内形成磁路。如同将电流流过的路径称为电路，磁通所通过的路径称为磁路，不同的是磁通的路径可以是铁磁物质，也可以是非铁磁物质。磁场由电流产生，磁场的情况可形象地用磁感线来描述。例如，电流通过直导线时的磁场和电流通过线圈时的磁场，如图 1-1 所示。

磁感线是闭合的曲线，且与电流相交链，其方向与产生该磁场的电流方向符合右手螺旋定则。右手螺旋定则的用法是：在图 1-1（a）中用右手大拇指表示电流的方向，其他四指的回转方向代表磁感线的方向；在图 1-1（b）中用右手四个手指的回转方向代表电流的方向，大拇指表示线圈内部磁感线的方向。磁感线上每一点的切线方向与该点磁场的方向一致，而磁场的强弱则可用磁感线的疏密程度表示。若磁感线是一组间距相等的平行线，这种磁场称为均匀磁场，如图 1-2 所示。在对磁场进行分析和计算时，常用到下述物理量，下面就对这些物理量进行详细说明。

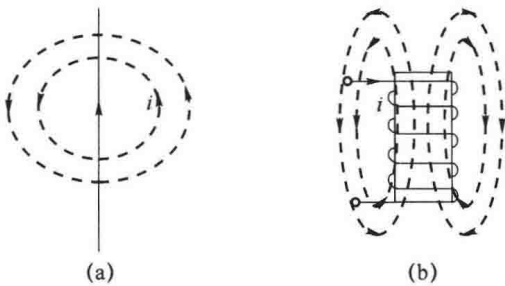


图 1-1 电流磁场

(a) 直导线电流的磁场；(b) 线圈电流的磁场

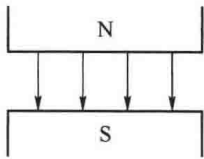


图 1-2 均匀磁场

1. 磁通 Φ

磁场中穿过某一截面积 A 的总磁感线数称为通过该面积的磁通量, 简称磁通, 用 Φ 表示。国际单位制中, Φ 的单位为韦 [伯] (Wb)。

2. 磁感应强度 B

磁感应强度是表征磁场强弱以及方向的物理量, 它是一个矢量, 用 B 表示, 其数值表示磁场的强弱, 其方向表示磁场的方向。在均匀磁场中, 若通过与磁感线垂直的某面积 A 的磁通为 Φ , 则

$$B = \frac{\Phi}{A} \quad (1-1)$$

即磁感应强度在数值上就是与磁场方向垂直的单位面积上通过的磁通, 所以磁感应强度也称磁通密度。国际单位制中, B 的单位为特 [斯拉] (T), $1 \text{ T} = 1 \text{ Wb/m}^2$ 。

3. 磁场强度 H

磁场强度是为了进行磁场计算所引进的一个辅助物理量。磁场强度是一个矢量, 用 H 表示, 其方向与 B 的方向相同, 也为磁场力向。在数值上 H 和 B 不相等, H 和 B 的主要区别如下: H 代表电流本身产生的磁场强弱, 反映了电流的励磁能力, 其大小只与产生该磁场的电流的大小成正比, 与介质的性质无关; B 代表电流产生的以及介质被磁化后所产生的总磁场的强弱, 其大小不仅与电流大小有关, 还与介质的性质有关。国际单位制中, H 的单位为安/米 (A/m)。

4. 磁导率 μ

通电线圈所产生磁场的强弱与线圈中放入的介质有关, 当线圈中放入某类介质时, 磁场大为增强; 而当放入另一类介质时, 磁场可能略有削弱, 表示物质这种磁性的物理量称为磁导率, 用 μ 表示。磁导率为感应强度 B 大小与磁场强度 H 大小之比, 即

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (1-2)$$

磁导率是衡量物质导磁能力的物理量, 单位是亨利/米 (H/m)。真空的磁导率为常数, 用 μ_0 表示, 其值为 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ 。

§ 1.2 物质磁性能

物质按照磁导率的不同, 大体上可分为两大类: 非磁性物质和磁性物质。

一、非磁性物质

非磁性物质亦称为非铁磁物质, 其磁导率 μ 近似等于真空磁导率 μ_0 。非磁性物质又分为顺磁性物质和逆磁性物质两种。顺磁性物质的磁导率比真空的磁导率略大。例如, 变压器油、空气等均为顺磁性物质; 逆磁性物质的磁导率略小于真空的磁导率; 氢、铜等均为逆磁性物质。工程上, 将非磁性物质的磁导率均视为等于真空磁导率, 因此, 非磁性物质的 H 和 B 呈线性关系。

二、磁性物质

为了在一定的励磁作用下能够激励较强的磁场,以使电机和变压器等装置的尺寸缩小、重量减轻、性能改善,因此,必须增加磁路的磁导率。当线圈的匝数和励磁电流相同时,铁芯线圈激发的磁通量要比空心线圈大得多,所以电机和变压器的铁芯常采用磁导率较高的铁磁物质制成,下面对铁磁物质的特性做简要说明。

铁磁物质又称磁性物质,其磁性能主要具有以下三点。

1. 高导磁性

将铁磁物质放入磁场中,磁场会显著增强,这一现象称为铁磁物质的磁化。铁磁物质能够被磁化的原因主要是由于铁磁物质内部存在着很多很小的强烈地沿同一方向自发磁化了的区域,该区域称为“磁畴”。在没有外磁场作用时,其排列如图 1-3 所示,磁畴排列混乱,磁效应互相抵消,对外界不显示磁性。若将铁磁物质放入磁场中,则在外磁场作用下,磁畴就顺外磁场方向而转向,其轴线趋于一致,形成一个附加磁场,叠加在外磁场上,从而使合成磁场大为增强,铁磁物质被磁化,如图 1-4 所示。由磁畴所产生的附加磁场比非磁性物质在同一磁场强度下所激励的磁场强得多,所以铁磁物质的磁导率比非铁磁物质大得多。例如,铸钢的磁导率 μ 约为真空磁导率 μ_0 的 1 000 倍,硅钢片的磁导率 μ 为真空磁导率 μ_0 的 6 000~7 000 倍。

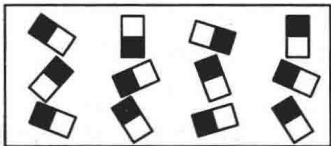


图 1-3 磁畴 (磁化前)

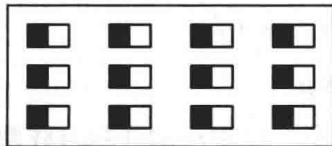


图 1-4 磁畴 (磁化后)

磁性物质的这一性质被广泛应用于变压器和电机中,变压器和电机中的磁场大多是由通过线圈的电流来产生的,而这些线圈都是绕在磁性物质(称为铁芯)上的。采用铁芯后,在同样的电流下,铁芯中的磁感应强度 B 和磁通 Φ 将大大增加并且比铁芯外的磁感应强度 B 和磁通 Φ 大得多,这样,一方面可用较小的电流产生较强的磁场,另一方面可使绝大部分磁通集中在由磁性物质限定的空间内。

2. 磁饱和性

磁性物质的磁导率 μ 不仅远大于真空磁导率 μ_0 ,而且不是常数,即 H 和 B 不成正比。

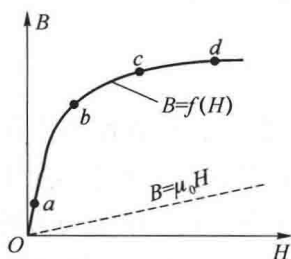


图 1-5 初始磁化曲线

二者的关系称为 $H-B$ 曲线或磁化曲线。将一块尚未磁化的铁磁物质进行磁化,当磁场强度 H 由零逐渐增加时,磁感应强度 B 也随着从零逐渐增加,这个过程如图 1-5 所示,上述曲线称为初始磁化曲线。在 H 比较小时, B 与 H 几乎成正比地增加,当 H 增加到一定值后, B 的增加缓慢下来,到后来随着 H 的继续增加, B 却增加得很少,这种现象称为磁饱和现象。

在图 1-5 所示曲线的 Oa 段, 开始磁化时, 外磁场 H 较弱, 磁通密度增加得不快, 因此 B 增加缓慢。在 ab 段, H 值增加时, B 值增加较快, 这是因为随着 H 值的增加, 有越来越多的磁畴趋向于外磁场方向, 使磁场增强。在 bc 段, 随着 H 值的继续增加, 大部分磁畴已经趋向于外磁场的方向, 能够沿外磁场方向转动的磁畴越来越少, 故 B 的增加渐渐变慢, 出现了磁饱和现象。在 cd 段, 磁性材料内所有的磁畴都转到与外磁场一致的方向, B 和 H 的关系类似于真空中的情况。

3. 磁滞性

磁性物质都具有保留其磁性的倾向, B 的变化总是滞后于 H 的变化, 这种现象称为磁滞现象。当线圈中通入正弦交流电流时 (电流曲线为通过原点的正弦曲线), 若开始时铁芯中的 B 随 H 从零沿初始磁化曲线增加, 最后随着与电流成正比的 H 反复交变, B 将沿着图 1-6 所示的闭合曲线变化, 比闭合曲线称为磁滞回线。

从图 1-6 中的曲线可以看出, 当 H 降为零时, B 并不下降到零而是保持一定数值, 这是由于外磁场消失了, 但是磁畴还不能恢复原来的状态, 还保留一定的磁性, 它所保留的磁感应强度 B 称为剩磁强度, 用 B_r 表示。永久磁铁的磁性就是由 B_r 所产生。当 H 反向增加到 $-H_c$ 时, 铁芯中剩余的磁性才能完全消失。去掉剩磁所必须加的反方向磁势, 称为矫顽磁力, 用 H_c 表示。磁性物质的这一特点是由于磁畴在转向时会遇到摩擦力的阻碍作用而引起的。

对同一铁磁物质, 选取不同的磁场强度 H_m 进行反复磁化, 可以得到一系列大小不同的磁滞回线, 如图 1-7 中的虚线所示, 将这些磁滞回线的顶点连接起来所得到的一条曲线, 称为基本磁化曲线。工程上采用的都是基本磁化曲线, 它通常可表征物质的磁化特性, 是分析计算磁路的依据。

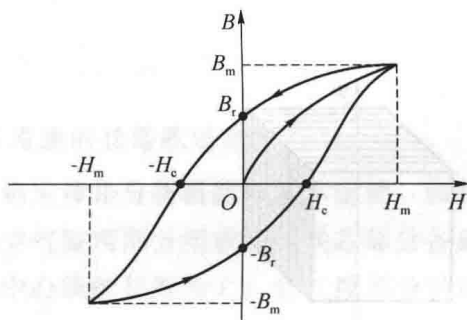


图 1-6 磁滞回线

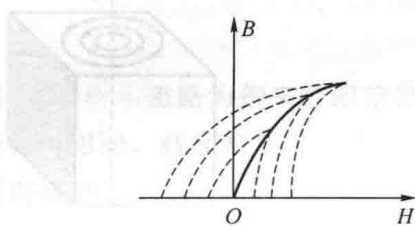


图 1-7 基本磁化曲线

按磁滞回线形状的不同, 磁性物质又可分为硬磁物质和软磁物质两大类。磁滞回线很宽, 剩磁强度 B_r 和矫顽磁力 H_c 都很大的物质称为硬磁物质, 如钴钢、铝镍钴合金和铽铁硼合金等, 由于硬磁物质的剩磁强度大, 所以通常用来制造永久磁铁; 磁滞回线很窄, 剩磁强度 B_r 和矫顽磁力 H_c 都很小的物质称为软磁物质, 如软铁、硅钢片、铸钢等, 由于软磁物质的磁导率较高, 所以通常用来制造变压器和电机的铁芯。

三、铁芯损耗

1. 磁滞损耗 P_h

铁磁材料置于交变磁场中，材料被反复交变磁化，磁畴之间互相摩擦而消耗能量，并以产生热量的形式表现出来，造成的功率损耗称为磁滞损耗。实验分析表明磁滞损耗正比于交流电的频率、铁芯的体积和磁滞回线的面积。实验证明，磁滞回线的面积与磁感应强度的最大值 B_m 以及材料的特性有关。由实验得出的计算磁滞损耗的经验公式为

$$P_h = K_h f B_m^\alpha V \quad (1-3)$$

式中， K_h 为磁滞损耗系数，其大小取决于材料性质； V 为铁芯的体积； α 与材料的性质有关，对一般的电工钢片，其值为 1.6~2.3。为了减小磁滞损耗，铁芯应选用软磁物质制成，如硅钢。因软磁物质的磁滞回线面积小，磁滞损耗小。

2. 涡流损耗 P_e

磁性物质既是导磁材料，又是导电材料。因为铁芯是导电的，当通过铁芯的磁通随时间变化时，由电磁感应定律可知，铁芯中将产生感应电动势，从而在垂直于磁通方向的铁芯平面内产生如图 1-8 所示的旋涡状的感应电流，称为涡流。涡流在铁芯中引起的功率损耗称为涡流损耗。实验分析表明，频率越高，磁通密度越大，感应电动势就越大，涡流损耗也越大。对于由硅钢片叠成的铁芯，经过推导可知，涡流损耗的公式为

$$P_e = K_e d^2 f^2 B_m^2 V \quad (1-4)$$

式中， K_e 为涡流损耗系数，其大小与材料的电阻率成反比； d 为钢片厚度； V 为铁芯的体积。为了减小涡流损耗，一方面可选用电阻率较大的硅钢等磁性材料；另一方面可把整块的硅钢改由如图 1-8 所示的顺着磁场方向彼此绝缘的硅钢片叠成，使涡流限制在较小的截面积内。例如变压器等交流电气设备的铁芯均用厚度为 0.5 mm、0.35 mm、0.27 mm、0.22 mm、0.20 mm、0.08 mm 和 0.05 mm 的硅钢片叠成。近年来，一种磁导率大，铁损耗小，厚度更薄的非晶和微晶材料已在变压器中应用。

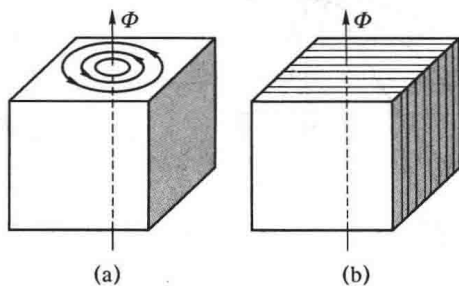


图 1-8 硅钢片中涡流损耗

(a) 整块硅钢；(b) 硅钢片叠成

3. 铁芯损耗

铁芯中的磁滞损耗和涡流损耗都将消耗有功功率，使铁芯发热。磁滞损耗与涡流损耗之和称为铁芯损耗，简称铁损耗，用 P_{Fe} 表示，即

$$P_{Fe} = P_h + P_e = (K_h f B_m^\alpha + K_e d^2 f^2 B_m^2) V \quad (1-5)$$

对于一般的电工钢片, 由式 (1-5) 可得计算铁损耗的经验公式

$$P_{Fe} = K_{Fe} f^{\beta} B_m^2 m \quad (1-6)$$

式中, K_{Fe} 为铁芯的损耗系数; β 为频率系数, 为 $1.2 \sim 1.6$; m 为铁芯质量, 由式 (1-6) 可看出, 恒定磁通的磁路无铁损耗。尽管铁损耗可用类似上述公式计算, 但其准确度不尽如人意, 计算上也不方便, 故工程上多用损耗曲线进行计算, 如图 1-9 所示。此曲线将铁损耗表示为磁感应强度和频率的函数, 而且是单位质量材料的铁损耗。

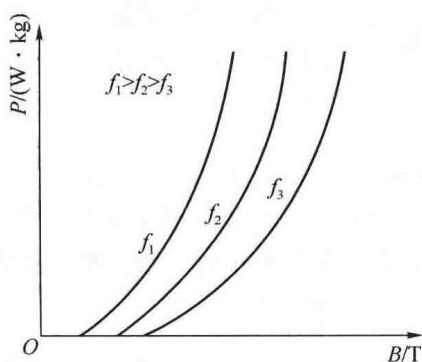


图 1-9 磁性材料的损耗曲线

§ 1.3 磁路的基本定律

如前所述, 在利用磁场实现能量转换的装置中, 常采用具有高导磁性的磁性物质做成铁芯, 将线圈绕于其上通以电流产生磁场, 如图 1-10 所示。电流通过线圈时所产生的磁通可以

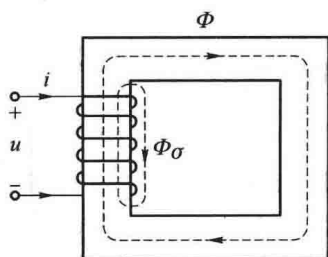


图 1-10 磁路

分为以下两部分: 大部分经铁芯而闭合的磁通 Φ 称为主磁通, 小部分经空气等非磁性物质而闭合的磁通 Φ_{σ} 称为漏磁通, 由于漏磁通较小, 通常可以忽略不计。大量磁通集中通过的路径, 即主磁通通过的路径称为磁路。从工程计算的角度来看, 为了简单方便, 将磁场的问题简化为磁路来处理, 准确度已经足够了。磁路的分析和计算同电路的分析和计算一样, 可以通过一些基本定律来进行。磁路的基本定律是由物理学中已学过的磁通连续性原理和全电流定律导出的。

一、磁路欧姆定律

1. 恒定磁通的磁路欧姆定律

磁路欧姆定律是分析磁路的基本定律, 以图 1-11 所示磁路为例来介绍定律内容, 该磁路由铁芯和空气隙两部分组成。设铁芯部分各处材料相同, 截面积相等, 用 A_c 表示, 它的平均长度即中心线的长度为 l_c ; 空气隙部分的磁路截面积为 A_0 , 长度为 l_0 。若线圈中通入直流电流, 它在磁路中将产生不随时间变化的恒定磁通 Φ 。由于磁感线是连续的, 忽略漏磁通后, 通过该磁路各截面积的磁通 Φ 相同, 而且磁感线分布可认为是均匀的, 故铁芯和空气隙两部分的磁感应强度和磁场强度的数值分别为 $B_c = \frac{\Phi}{A_c}$, $H_c = \frac{B_c}{\mu_c} = \frac{\Phi}{\mu_c A_c}$;

$$B_0 = \frac{\Phi}{A_0}, H_0 = \frac{B_0}{\mu_0} = \frac{\Phi}{\mu_0 A_0}。$$

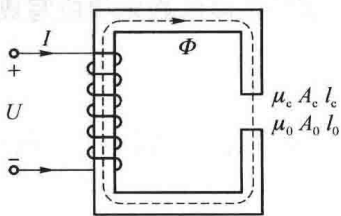


图 1-11 铁芯和空气隙组成的磁路

全电流定律指出：在磁路中，沿任一闭合路径，磁场强度的线积分等于与该闭合路径交链的电流的代数和，其公式如下：

$$\oint H dl = \sum I \quad (1-7)$$

当电流方向与闭合路径的积分方向符合右手螺旋定则时，电流前取正号，反之取负号。将此定律应用于图 1-11 所示磁路，取其中心线处的磁感线回路为积分回路。由于中心线上各点的 H 方向与 l 方向一致，铁芯中各点的 H_c 是相同的，空气隙中各点的 H_0 也相同，故式 (1-7) 可表示如下：

$$\oint H dl = H_c l_c + H_0 l_0 = \left(\frac{l_c}{\mu_c A_c} + \frac{l_0}{\mu_0 A_0} \right) \Phi$$

$$\text{令} \quad R_{mc} = \frac{l_c}{\mu_c A_c}$$

$$R_{m0} = \frac{l_0}{\mu_0 A_0}$$

$$R_m = R_{mc} + R_{m0} = \frac{l_c}{\mu_c A_c} + \frac{l_0}{\mu_0 A_0} \quad (1-8)$$

式中， R_{mc} 、 R_{m0} 、 R_m 分别称为铁芯、空气隙和磁路的磁阻。

式 (1-7) 右边的 $\sum I$ 等于线路匝数 N 与电流 I 的乘积，即

$$\sum I = NI$$

NI 称为线圈的磁通势，用 F 表示，即

$$F = NI \quad (1-9)$$

因此

$$R_m \Phi = F$$

或写成

$$\Phi = \frac{F}{R_m} \quad (1-10)$$

式 (1-10) 称为磁路欧姆定律。它在形式上与直流电路的欧姆定律相似。磁路中的磁通 Φ 、磁通势 F 和磁阻 R_m 分别与电路中的电流 I 、电压 U 和电阻 R 相对应。

由于 $\mu_c \gg \mu_0$ ，尽管 l_0 很小， R_{m0} 仍然比 R_{mc} 大得多。因此，当磁路中有空气隙存在时，磁路中的 R_m 将显著增加，若磁通势 F 一定，则磁路中的磁通 Φ 将减小。反之，若保持磁路中磁通一定，则磁通势就应增加。可见，磁路中应尽量减少不必要的空气隙。

2. 交变磁通的磁路欧姆定律

如果线圈中通入交流电流，它在磁通中产生的是随时间交变的磁通。这时的磁路欧姆定律在形式上与交流电路的欧姆定律相似。由于交变磁通的大小是用磁通的最大值表示的，所以交变磁通的磁路欧姆定律应写成

$$\dot{\Phi}_m = \frac{\dot{F}_m}{Z_m} \quad (1-11)$$

式中， F_m 是磁通势的幅值，其数值为

$$F_m = NI_m = \sqrt{2} NI \quad (1-12)$$

Z_m 是磁路的阻抗，称为磁阻抗。

$$Z_m = R_m + jX_m \quad (1-13)$$

式中， R_m 是磁路的磁阻； X_m 是磁路的磁抗。

二、磁路基尔霍夫定律

现以恒定磁通磁路为例来介绍磁路基尔霍夫定律。

1. 磁路基尔霍夫第一定律

当铁芯为有分支磁路时,如图1-12所示,各部分的磁通分别为 Φ_1 、 Φ_2 和 Φ_3 ,方向如图1-12所示,取闭合面如图1-12中虚线所示,则根据磁通连续性原理,若假设穿出闭合面的磁通为正,反之则为负。

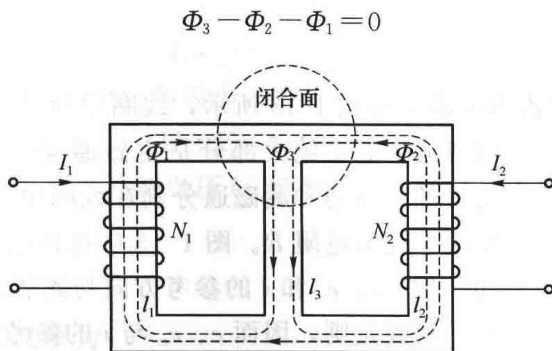


图 1-12 有分支磁路

即在磁路的任何一个闭合面上,磁通的代数和等于零,这一规律称为磁路基尔霍夫第一定律,用公式表示如下:

$$\sum \Phi = 0 \quad (1-14)$$

2. 磁路基尔霍夫第二定律

磁路中任一回路按磁导率、截面积以及磁通的不同可分成若干段。对图1-12中的最外边的闭合回路,若取回路的环行方向为顺时针方向,则根据全电流定律,当磁场方向与回路环形方向一致时, Hl 前取正号,反之取负号,电流方向与回路环形方向符合右手螺旋定则时, NI 前取正号,反之取负号,则有:

$$F_1 - F_2 = \oint \mathbf{H} d\mathbf{l} = \mathbf{H}_1 l_1 - \mathbf{H}_2 l_2$$

式中, Hl 称为磁位差,用 U_m 表示,即 $U_m = Hl$ 。

由此可见,在磁路的任何一个闭合回路中,磁位差的代数和等于磁通势的代数和,这一规律称为磁路基尔霍夫第二定律,用公式表示如下:

$$\sum U_m = \sum F \quad (1-15)$$

利用磁路基尔霍夫定律便可对磁路进行分析和计算。

§ 1.4 铁芯线圈电路

一、直流铁芯线圈电路

当铁芯线圈中通入恒定直流电流时,将产生不随时间变化的恒定磁场,不会在线圈中产