



高等学校“十一五”规划教材

电机与拖动

Dianji Yu Tuodong

主编 李晓竹

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

内 容 简 介

本书在讲述磁路的基本概念和基本定律的基础上,较为详细地讲述了变压器、直流电机、交流电机、异步电机、同步电机的基本结构和工作原理,并就各种电机的机械特性以及它们启动、调速、制动的基本原理和基本方法进行了较为全面的讲述,最后简要介绍电机选择方面的基本知识和方法。

本书可作为高等学校自动化、电气工程及其自动化及相关专业的教材,亦可供相关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电机与拖动/李晓竹主编. —徐州:中国矿业大学出版社,2009.1

ISBN 978 - 7 - 5646 - 0200 - 0

I. 电… II. 李… III. ①电机②电力传动 IV. TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 004521 号

书 名 电机与拖动

主 编 李晓竹

责任编辑 何 戈

责任校对 杜锦芝

出版发行 中国矿业大学出版社

(江苏省徐州市中国矿业大学内 邮编 221008)

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

排 版 中国矿业大学出版社排版中心

印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司

经 销 新华书店

开 本 787×1092 1/16 印张 16.25 字数 404 千字

版次印次 2009 年 1 月第 1 版 2009 年 1 月第 1 次印刷

定 价 25.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

《电机与拖动》是高等学校(矿业)信息与电气工程“十一五”规划教材之一,为大学本科自动化、电气工程及其自动化等专业而编写,也可供其他相关专业的大学生和科技人员使用。

电机与拖动知识在现代工业生产、农业生产、交通运输、信息技术和日常生活等各个方面应用甚广。本书考虑到随着科学技术的飞速发展,学生认识和实践的领域需要逐步扩大和加深,以及本课程精简学时势在必行的现实,从21世纪人才培养的总体要求出发,以保证基础知识、降低理论深度、加强工程应用为原则,进行知识的重组和学时的分配,培养满足社会需要的应用创新型人才。

本书在编写过程中,更新教学内容体系,联系实际、通俗易懂地阐明电机与拖动的基本概念、基本理论和基本分析方法,力求深入浅出、循循诱导,培养、提高学生分析问题和解决问题的能力。书中各章均有重点、难点和小结,并配有启发性及典型的工程实例和习题,供学生学习时参考。

本书由李晓竹任主编,上官璇峰、胡霞、蔡文皓任副主编。编写分工如下:

辽宁工程技术大学李晓竹编写绪论、第三章、第十一章,李洪珠编写第二章,荣德生编写第四章,刘艳丽编写第一章;西安科技大学杨战社编写第五章,蔡文皓编写第六章;河南理工大学上官璇峰编写第七章、第八章;安徽理工大学胡霞编写第九章、第十章。

本书的编写与出版,承蒙高等学校(矿业)信息与电气工程“十一五”规划教材编写委员会以及国内同行专家的热忱支持和鼎力相助,在此表示感谢!由于时间和水平有限,书中难免有不足之处,恳请广大读者批评指正。

编 者

2008年1月

目 录

绪论	1
第一章 磁路	3
第一节 磁场的基本物理量	3
第二节 铁磁物质的磁性能	4
第三节 磁路的基本定律	6
第四节 铁芯线圈电路	9
本章小结	11
思考题和习题	12
第二章 变压器	13
第一节 变压器的基本结构和额定值	13
第二节 变压器的变换关系	17
第三节 变压器的基本理论	20
第四节 变压器的参数测定	25
第五节 变压器的运行特性	29
第六节 三相变压器	33
第七节 自耦变压器与仪用互感器	41
第八节 小容量变压器的设计	44
本章小结	45
思考题和习题	46
第三章 电力拖动系统的动力学理论	48
第一节 电力拖动系统的运动方程式	48
第二节 多轴电力拖动系统的简化	49
第三节 电力拖动系统的机械特性	54
第四节 电力拖动系统稳定运行的条件	56
本章小结	58
思考题和习题	58
第四章 交流旋转电机理论的共同问题	61
第一节 交流电机的工作原理	61

第二节 交流绕组	65
第三节 交流绕组的感应电势	68
第四节 交流绕组的磁势	72
本章小结	77
思考题和习题	78
第五章 异步电机	79
第一节 异步电机的基本结构和额定值	79
第二节 异步电动机的基本理论	82
第三节 异步电动机的机电能量转换	90
第四节 异步电动机的工作特性	92
第五节 单相异步电动机	94
本章小结	97
思考题和习题	98
第六章 异步电动机的电力拖动	100
第一节 三相异步电动机的机械特性	100
第二节 三相异步电动机的启动	107
第三节 三相异步电动机的制动	117
第四节 三相异步电动机的调速	129
本章小结	141
思考题和习题	141
第七章 同步电机	144
第一节 同步电机的基本结构、工作原理和额定值	144
第二节 同步发电机	147
第三节 同步电动机	155
第四节 特种同步电动机	169
本章小结	172
思考题和习题	173
第八章 同步电动机的电力拖动	175
第一节 同步电动机的机械特性	175
第二节 同步电动机的启动	177
第三节 同步电动机的调速与制动	179
本章小结	181
思考题和习题	182

第九章 直流电机	183
第一节 直流电机的基本结构和额定值.....	183
第二节 直流电机的工作原理.....	188
第三节 直流电机的基本理论.....	189
第四节 直流电机的机电能量转换.....	192
第五节 直流电机的换向.....	199
本章小结.....	201
思考题和习题.....	202
第十章 直流电动机的电力拖动	204
第一节 直流电动机的机械特性.....	204
第二节 他励直流电动机的启动.....	209
第三节 他励直流电动机的制动.....	211
第四节 他励直流电动机的调速.....	220
本章小结.....	225
思考题和习题.....	226
第十一章 电动机的选择	228
第一节 电动机选择的主要内容.....	228
第二节 选择电动机额定功率的条件.....	230
第三节 电机的发热与冷却.....	231
第四节 电动机的工作制与额定功率.....	233
第五节 恒定负载电动机额定功率的选择.....	236
第六节 变动负载电动机额定功率的选择.....	239
本章小结.....	247
思考题和习题.....	248
参考文献	251

绪 论

一、电机与拖动的作用

生产机械为了完成各种工艺过程,需要由原动机提供机械能。在大工业时代,人们普遍采用蒸汽机作为原动机。到了 19 世纪末期,由于热力学与电磁学的物理理论发展渐趋完备,使得电能成为主要能源。因为电能在生产、传输、分配、使用和控制等方面具有无可比拟的优点,所以电动机很快取代了蒸汽机而成为生产机械的主要原动机。这种以电动机为原动机拖动生产机械来满足各种工艺过程要求的拖动方式称为电力拖动或电机拖动。

电力拖动系统的结构如图 0-1 所示,它一般由电动机、传动机构、生产机械、控制设备和电源等基本环节组成。其中:电动机是机电能量转换设备,用来将电源输入的电能转换为生产机械需要的机械能,或者将生产机械的机械能转换成电能回馈至电网,因而电动机是生产机械的原动机。传动机构用以传递动力,实现速度大小和运动方式的变换,例如齿轮、卷筒、钢丝绳等。生产机械是在生产过程中用来完成各种生产工艺过程要求而直接工作的机械,例如金属切削机床的主轴、电梯的升降室和轧钢机的轧辊等。电源提供电动机在机电能量转换过程中需要的电能,一般由发电机把机械能变换成电能或者由静止变流器进行电能的变流来获取。为了使电能进行经济传输和合理分配,通常还需要变压器将一种电压等级的交流电转变为同频率、另一电压等级的交流电传输到用户的电源上。控制设备通过控制电动机来控制生产机械完成各种生产工艺的要求,例如:电动机的启动、制动、反转和转速自动调节;在负载和外部条件变化下电动机自动保持转速恒定;按照预先给定的程序或外部条件使电动机自动改变运行速度;等等。

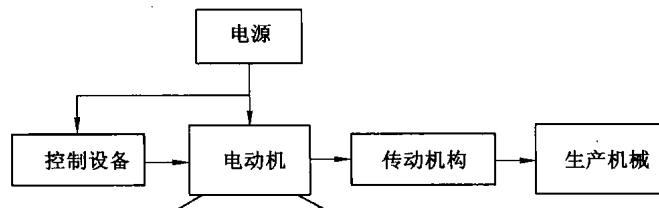


图 0-1 电力拖动系统结构图

目前,电能仍然是最主要的能源形式,因而使得能够实现机电能量转换的各类电机作为生产机械的原动机,在国民经济的各个部门扮演着极为重要的角色,同时电力拖动也在各种工业企业的机械设备中被广泛应用,如机床、电铲、轧钢机、提升机、风机、水泵、纺织机、造纸机等等。不仅如此,在农业、交通运输、航运、航天、国防、文教、医疗以及家用电器等各个领域,电力拖动的应用也十分普遍。

目前,以电动机为原动机拖动生产机械运转是现代工业生产自动化和电气化的主要标志之一。随着功率半导体器件、数控技术和电子计算机技术的飞速发展和广泛应用,进一步

赋予了电力拖动系统更高的静、动态品质,已能够满足现实中生产工艺过程的各种要求。然而无论现代电力拖动系统的性能多么完善、结构如何复杂,从根本上讲,电力拖动系统仍然主要由电动机、传动机构和生产机械三个部分组成,因此研究其运行原理和运行特性是电机与拖动的主要任务。

二、电机与拖动的分类

电机的应用广泛,性能各异,种类繁多。

在动力系统中,按照电机的功能可以将其分类为:

- (1) 发电机——由机械能转换成电能;
- (2) 电动机——由电能转变成机械能。

在电力拖动系统中,通常按照系统中电动机所应用的电能形式来对其进行分类,分为:

- (1) 直流电力拖动系统——应用直流电,采用直流电动机进行拖动;
- (2) 交流电力拖动系统——应用交流电,采用交流电动机进行拖动。

目前,这两种拖动方式在各个领域中均有应用。

三、本课程的性质、任务和要求

本课程是电气工程学科的一门技术基础课,同时又具有专业课的性质。它主要研究电机的基本理论和电动机拖动生产机械完成各种工艺过程的要求,为学习本学科专业的后续课程奠定必要的理论基础。

本课程的任务是使学生从运行的观点上了解各类电机的基本结构并掌握其工作原理、内部电磁物理过程、功率关系与机械特性;掌握电机在拖动各种生产机械时的启动、制动和调速三大问题;了解选择电动机的基本原则;培养学生分析问题与解决问题的能力。

为了较好地掌握这门课,学习时需注意以下一些问题:

- (1) 要了解电机的结构,注意观察实物,增强感性知识。
- (2) 要很好地复习电和磁的基本定律,如电磁感应定律和电磁力定律、电路的基尔霍夫第一和第二定律、磁路的欧姆定律和全电流定律,以便熟练地运用这些定律分析电机方面的问题。
- (3) 分析电动机拖动生产机械的运行时,要找出并抓住主要矛盾,进行必要的简化,然后再运用基本理论加以解决,这是工程上处理问题常用的方法。
- (4) 不仅要掌握各类电机与拖动的个性,更要寻找并掌握其共性,从而掌握规律性,进一步深化对知识体系的认识。
- (5) 要认真独立地做适量的习题,以培养分析问题和解决问题的能力。
- (6) 要重视实验环节,掌握电机与拖动理论的实际应用,培养应用型和技能型人才。

“电机与拖动”是一门理论性和实践性都比较强的课程,涉及的基础理论和实际知识面广,是电磁学、动力学、热力学等学科知识的综合。用理论分析电机与拖动的实际问题时,必须结合电机的具体结构,采用工程观点和分析方法。在掌握基本理论的同时,还要注意培养实验操作技能和计算方法。

第一章 磁 路

【本章重点】 磁路的欧姆定律和基尔霍夫定律;交流铁芯线圈的电路方程及电磁关系。

【本章难点】 交流铁芯线圈的电磁关系。

第一节 磁场的基本物理量

磁场可由电流产生,整个磁场的情况可用磁感应线来描述。磁感应线是闭合的曲线,且与闭合电路相交链,其方向与产生该磁场的电流方向符合右手螺旋定则。磁感应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应线的疏密程度来表示。

在对磁场进行分析和计算时,常用到以下几个物理量。

一、磁通 Φ

穿过磁场中某一截面积 A 的磁感应线数称为通过该面积的磁通量,简称磁通,用 Φ 表示,其单位为韦伯(Wb)。

二、磁感应强度 B

磁感应强度 B 是描述磁场内某一点磁场强弱和方向的物理量,它是一个矢量,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,各点的磁感应强度的大小和方向均相同。若通过与磁感应线垂直的某面积 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为磁通密度。 B 的单位为特斯拉(T), A 的单位为平方米(m^2)。

三、磁场强度 H

磁场强度 H 是进行磁场计算时引进的一个物理量,是一个矢量,其方向与 B 的方向相同,单位为安/米(A/m)。

H 与 B 的主要区别是: H 代表电流本身产生的磁场的强弱,反映了电流的励磁能力,其大小只与产生的该磁场的电流成正比,与介质的性质无关; B 代表电流所产生的以及介质被磁化后所产生的总磁场的强弱,其大小不仅与电流的大小有关,还与介质的性质有关。

四、磁导率 μ

磁导率 μ 是表示磁场介质磁性的物理量,用它来衡量物质的导磁能力,单位是亨/米(H/m)。它等于磁感应强度 B 与磁场强度 H 之比,即

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

真空的磁导率为一常数,用 μ_0 表示,其值为

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m} \quad (1-3)$$

第二节 铁磁物质的磁性能

物质按导磁性能分为顺磁物质、反磁物质和铁磁物质三种。顺磁物质的磁导率 μ 比真空的磁导率 μ_0 略大,反磁物质的磁导率略小于真空磁导率。而铁磁物质的磁导率是真空磁导率的几百倍甚至上千倍。工程上把非磁性物质的 μ 均视为等于 μ_0 ,即非磁性物质的 B 和 H 成线性关系。

磁性物质亦称铁磁物质,其磁性能主要有以下几点。

一、高导磁性

磁性物质的 $\mu \gg \mu_0$,二者之比可达数百至数万。如铸钢的 μ 约为 μ_0 的 1 000 倍,硅钢片的 μ 约为 μ_0 的 6 000~7 000 倍,坡莫合金的 μ 可比 μ_0 大几万倍。

磁性物质的这一特点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,称为“磁畴”。磁化前,无外磁场作用时,如图 1-1 所示,磁畴杂乱地排列,磁场互相抵消,对外界不显磁性。若将铁磁物质放入磁场,则在外磁场作用下,磁畴的轴线趋于一致,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,如图 1-2 所示。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,故铁磁物质的磁导率比非铁磁物质大得多。

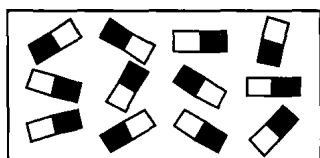


图 1-1 磁畴(磁化前)

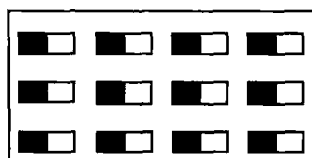


图 1-2 磁畴(磁化后)

磁性物质的这一性质在变压器和电机中得到了广泛应用。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,其磁导率 $\mu_{Fe} = (2\,000 \sim 6\,000)\mu_0$,而非铁磁性材料的磁导率接近真空的磁导率 μ_0 ,故在同样的电流下,铁芯中的 B 和 Φ 将大大增加,比铁芯外的 B 和 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。

二、磁饱和性

磁性物质的磁导率 μ 不但远大于 μ_0 ,而且不是常数,即 B 与 H 不成正比。二者的关系称为 $B-H$ 曲线或磁化曲线。当磁场强度 H 由零逐渐上升时,磁感应强度 B 从零逐渐增加的过程如图 1-3 所示,称为起始

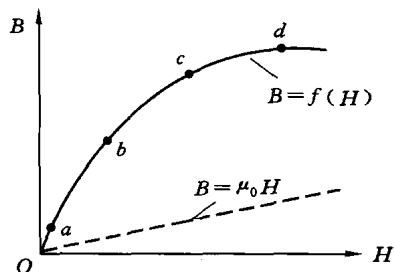


图 1-3 磁性物质的起始磁化曲线

磁化曲线或初始磁化曲线。

起始磁化曲线基本分为四个阶段:开始磁化时,外磁场较弱,磁通密度增加得不快,如图 1-3 的 Oa 段所示。随着外磁场的增强,材料内部大量磁畴开始转向,越来越多地趋向于外磁场方向,此时 B 值增加得很快,如 ab 段所示。若外磁场继续增加,大部分磁畴已趋于外磁场方向,可转向的磁畴越来越少, B 的增加渐渐变慢,出现饱和现象,如 bc 段所示。饱和以后,磁化曲线基本上成为与非铁磁材料的磁化曲线相平行的直线,如 cd 段所示。

磁化曲线开始拐弯的点(即图中的 b 点)称为膝点。设计电机和变压器时,为使主磁路内得到较大的磁通量而又不过分增大励磁电动势,通常把铁芯内的工作磁通密度选择在膝点附近。

磁饱和现象的存在使得磁路问题的分析成为非线性的问题,因而要比线性电路的分析复杂。

磁化曲线一般很难用准确的数学式来表达,都是用实验方法测绘出来的,它是进行磁路计算不可缺少的资料,几种常用的磁性材料的磁化曲线如图 1-4 所示。

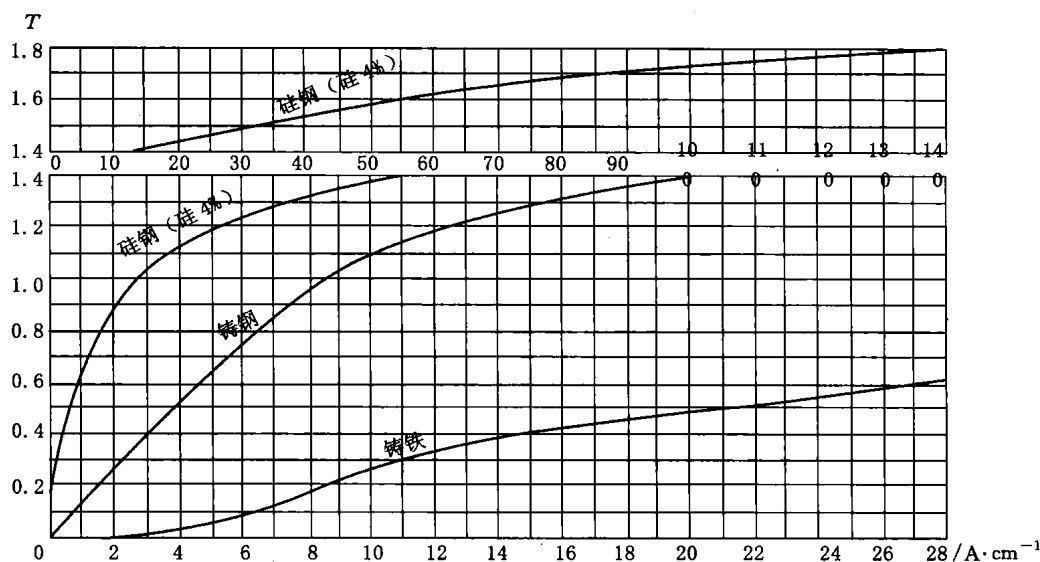


图 1-4 基本磁化曲线

三、磁滞性

铁磁材料的磁通密度 B 的变化滞后于磁场强度 H 的变化的现象称为磁滞现象。磁滞现象反映了磁性物质都具有保留其磁性的倾向。当线圈中通入交流电流时,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 1-5 所示的称为磁滞回线的闭合曲线变化。

当 H 降为零时,铁芯的磁性并未消失,它所保留的磁感应强度 B_r ,称为剩磁感应强度。永久磁铁的磁性就是由 B_r 产生。当 H 反方向增加至 $-H_c$ 值时,铁芯中的剩余磁性才能完全消失,当 $B=0$ 的 H 值 H_c 称为矫顽磁力。

对同一铁磁材料,选取不同的磁场强度 H_m 进行多次交变磁化,可得到一系列大小不同

的磁滞回线,如图 1-6 中的虚线所示,由这些磁滞回线的正顶点与原点连成的曲线称为基本磁化曲线或标准磁化曲线,它通常可表征物质的磁化特性,是分析计算磁路的依据。

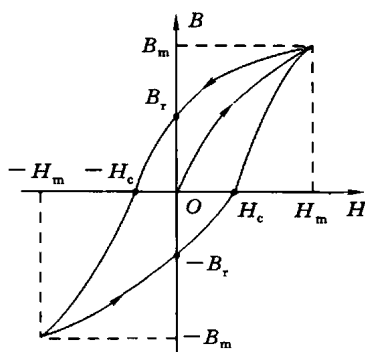


图 1-5 磁滞回线

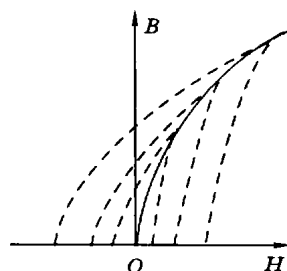


图 1-6 基本磁化曲线

按磁滞回线形状的不同,铁磁材料又可分为硬磁(永磁)材料和软磁材料两大类。硬磁物质的磁滞回线很宽, B_r 和 H_c 都很大,如钴钢、铝镍钴合金和钕铁硼合金等,常用来制造永久磁铁。软磁物质的磁滞回线很窄, B_r 和 H_c 都很小,如软铁、硅钢、坡莫合金和铁氧体等,常用来制造变压器、电机和接触器等的铁芯。

第三节 磁路的基本定律

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,将线圈绕于其上并通以电流产生磁场,如图 1-7 所示。电流通过线圈时所产生的磁通可以分为两部分: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_0 称为漏磁通。主磁通、漏磁通通过的路径分别称为主磁路和漏磁路。由于漏磁通很小,可以忽略不计。

研究电流与它所产生的磁场的问题基本都可简化为磁路的分析和计算的问题。磁路的分析和计算同电路的分析和计算一样,可以通过一些磁路的基本定律来进行。

一、磁路欧姆定律

现以图 1-8 所示的磁路为例来介绍磁路欧姆定律的内容。

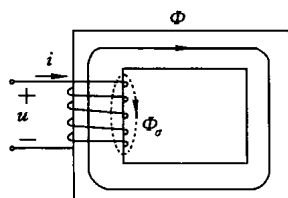


图 1-7 磁路

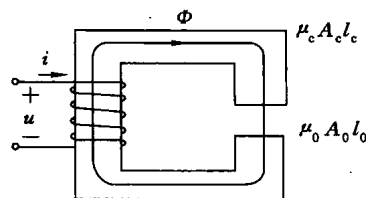


图 1-8 磁路欧姆定律

该磁路由铁芯和空气隙两部分组成。设铁芯部分材料相同、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 。由于磁感应线是连续的, 通过该磁路各截面积的磁通 Φ 相同, 而且磁感应线的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

$$B_c = \frac{\Phi}{A_c} \quad B_0 = \frac{\Phi}{A_0} \quad H_c = \frac{B_c}{\mu_c} = \frac{\Phi}{\mu_c A_c} \quad H_0 = \frac{B_0}{\mu_0} = \frac{\Phi}{\mu_0 A_0}$$

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。用公式表示, 即

$$\oint H dl = \sum I \quad (1-4)$$

当电流的方向与闭合电路的积分方向符合右手螺旋定则时, 电流取正号, 反之取负号。将此定律应用于图 1-8 所示磁路, 取其中心线处的磁感应线回路为积分回路, 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(1-4)左边为

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

令 $R_{mc} = \frac{l_c}{\mu_c A_c}$, $R_{m0} = \frac{l_0}{\mu_0 A_0}$, 则

$$R_m = R_{mc} + R_{m0} = \frac{l_c}{\mu_c A_c} + \frac{l_0}{\mu_0 A_0} \quad (1-5)$$

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

式(1-4)右边的 $\sum I$ 等于线圈的匝数 N 与电流 I 的乘积, 即

$$\sum I = NI$$

而 NI 为线圈的磁通势(简称磁势), 用 F 表示, 即

$$F = NI \quad (1-6)$$

因此

$$R_m \Phi = F$$

或写成

$$\Phi = \frac{F}{R_m} \quad (1-7)$$

此式称为磁路欧姆定律, 它表明作用在磁路上的磁势等于磁路内的磁通量与磁阻的乘积。

由于 $\mu_c \gg \mu_0$, 所以尽管 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, 磁路的磁阻 R_m 将显著增加, 若磁势 F 一定, 则磁路中的磁通 Φ 将减小。反之, 若要保持磁路中的磁通一定, 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。

磁路欧姆定律只是在形式上和电路欧姆定律相似, 其本质是根本不同的, 例如: 当电路开路时, 磁路并不中断; 不管是直流还是交流电流, 通过电阻时都会有功率损耗, 而恒定磁通下的磁路却没有功率损耗。

二、磁路基尔霍夫第一定律

当铁芯为有分支磁路时, 如图 1-9 所示, 各部分的磁通分别为 Φ_1 、 Φ_2 和 Φ_3 , 方向如图 1-9 所示。取闭合面如图中虚线所示, 则根据磁通连续性原理, 若令穿出闭合面的磁通为

正,反之为负,有

$$\Phi_3 - \Phi_2 - \Phi_1 = 0$$

即,在磁路的任何一个闭合面上,磁通的代数和等于零,这一定律为磁路基尔霍夫第一定律,它是由磁通连续性原理得到的。用公式表示即为

$$\sum \Phi = 0 \quad (1-8)$$

三、磁路基尔霍夫第二定律

磁路中任一回路按磁导率、截面积或磁通的不同可分成若干段,这三者中任何一个不同, H 都不会相同。对图 1-9 中的最外边的闭合回路,若取回路的环形方向为顺时针方向,则根据全电流定律,当磁场方向与回路环形方向一致时, Hl 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, F 取正号,反之取负号,有

$$F_1 - F_2 = \oint H dl = H_1 l_1 - H_2 l_2$$

式中, Hl 为磁位差,用 U_m 表示,即

$$U_m = Hl \quad (1-10)$$

由此可见,沿任何闭合磁路的总磁势恒等于各段磁位降的代数和。用公式表示为

$$\sum U_m = \sum F \quad (1-11)$$

称为磁路基尔霍夫第二定律,利用它便可对磁路进行分析和计算。

例 1-1 设图 1-10 所示磁路由硅钢制成。磁势 $F_1 = N_1 I_1 = F_2 = N_2 I_2$, 线圈的绕向、直流电流 I_1 和 I_2 的方向以及各部分磁通的方向均如图中所示。磁路左右两边对称,具体尺寸是: $A_1 = A_2 = 8 \text{ cm}^2$, $l_1 = l_2 = 30 \text{ cm}$, $A_3 = 20 \text{ cm}^2$, $l_3 = 10 \text{ cm}$ 。若已知 $\Phi_3 = 0.002 \text{ Wb}$, 问两个线圈的磁势各是多少?

解 根据磁路基尔霍夫定律可列出下面三个方程式:

$$\Phi_3 - \Phi_2 - \Phi_1 = 0; \quad U_{m1} + U_{m3} = F_1; \quad U_{m2} + U_{m3} = F_2$$

由于 $F_1 = F_2$, 从以上方程式可知 $U_{m1} = H_1 l_1 = U_{m2} = H_2 l_2$ 。又由于 $l_1 = l_2$, 所以 $H_1 = H_2$, 因而 $B_1 = B_2$, $\Phi_1 = \Phi_2$ 。可见,计算这种对称的磁路时,只要算出左面或右面磁路的磁势即可。

由于

$$\Phi_1 = \Phi_2 = \frac{\Phi_3}{2} = \frac{0.002}{2} = 0.001 \text{ Wb}$$

所以

$$B_1 = \frac{\Phi_1}{A_1} = \frac{0.001}{8 \times 10^{-4}} = 1.25 \text{ T}$$

$$B_3 = \frac{\Phi_3}{A_3} = \frac{0.002}{20 \times 10^{-4}} = 1 \text{ T}$$

由图 1-4 的磁化曲线查得 $H_1 = 6 \text{ A/m}$, $H_3 = 3 \text{ A/m}$, 最后求得

$$F_1 = F_2 = U_{m1} + U_{m3} = H_1 l_1 + H_3 l_3 = (6 \times 0.3 + 3 \times 0.1) \text{ A} = 2.1 \text{ A}$$

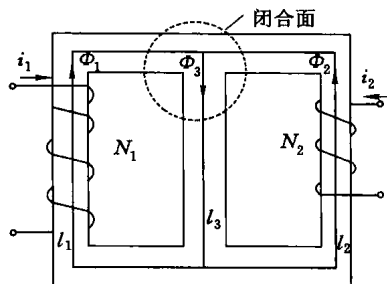


图 1-9 有分支磁路

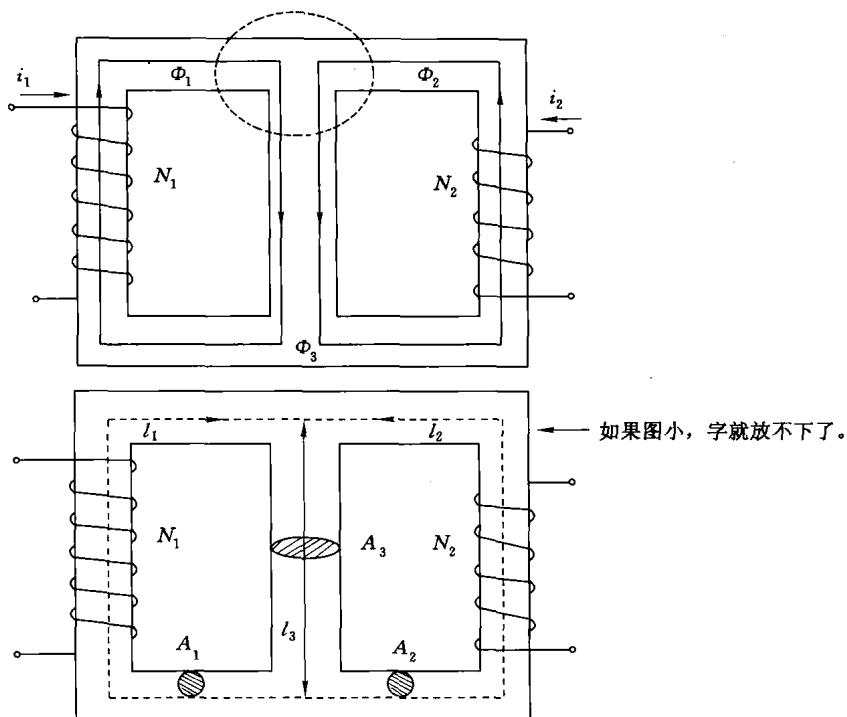


图 1-10 例 1-1 的磁路

第四节 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,将产生恒定磁场,不会在线圈中产生感应电势。即在直流电路中,线圈的电感相当于短路,线圈的电流 I 只与线圈的电压 U 和电阻 R 有关,故

$$I = \frac{U}{R} \quad (1-12)$$

线圈消耗的功率也只有线圈电阻消耗的功率,即

$$P = UI = RI^2 \quad (1-13)$$

二、交流铁芯线圈电路

(一) 电磁关系

如图 1-11 所示,当铁芯线圈两端加上交流电压 u 时,线圈中通过交流电流 i ,它将产生交变的磁通,其中大部分是主磁通 Φ ,很小部分是漏磁通 Φ_s ,交变的主磁通和漏磁通分别在线圈中产生感应电势 e 和 e_s ,此外,线圈中还有电阻 r 。图中选择 u 与 i 的参考方向一致, e 、 i 与磁感

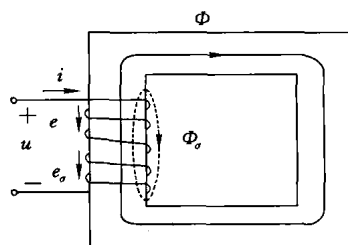


图 1-11 交流铁芯线圈电路

应线的参考方向符合右手螺旋定则,根据基尔霍夫电压定律

$$u = -e - e_s + ri$$

用相量表示,则可写成

$$\dot{U} = -\dot{E} - \dot{E}_s + r\dot{I} \quad (1-14)$$

由于漏磁通经过的路径主要是非磁性物质,其磁导率为一常数, Φ_s 与 i 成正比。因此,与漏磁通对应的线圈电感

$$L_s = \frac{N\Phi_s}{i} \quad (1-15)$$

是一常数,称为线圈的漏电感,可用一个理想电感元件来代替它。它在交流电路中的电抗

$$x_s = \omega L_s = 2\pi f L_s \quad (1-16)$$

称为线圈的漏电抗,简称漏抗。

因电感电压与电感电势的相位相反,因此

$$\dot{E}_s = -jx_s \dot{I} \quad (1-17)$$

将式(1-17)代入式(1-14)中,即可得到铁芯线圈电路中的电势平衡方程式为

$$\dot{U} = -\dot{E} + \dot{I}(r + jx_s) = -\dot{E} + Z_s \dot{I} \quad (1-18)$$

式中

$$Z_s = r + jx_s \quad (1-19)$$

称为线圈的漏阻抗。

由于主磁通集中在铁芯中,铁芯的磁导率不是常数, Φ 与 i 之间不是线性关系。与主磁通对应的线圈的电感也不是常数。主磁通产生的感应电势 e 不能用 e_s 的方式来处理,可以直接用电磁感应定律分析。

设主磁通为 $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$,则

$$\begin{aligned} e &= -N \frac{d\Phi}{dt} = -N \frac{d}{dt}(\Phi_m \sin \omega t) = -\omega N \Phi_m \cos \omega t \\ &= 2\pi f N \Phi_m \sin(\omega t - 90^\circ) \\ &= E_m \sin(\omega t - 90^\circ) \end{aligned}$$

可见,在相位上感应电势 e 滞后于主磁通 Φ 的电角度为 90° ,在数值上它的有效值为

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi N f \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4.44 N f \Phi_m \quad (1-20)$$

用相量表示,即

$$\dot{E} = -j4.44 N f \dot{\Phi}_m \quad (1-21)$$

一般来说,铁芯线圈中的 r 和 x_s 都很小,如果将它忽略不计,则

$$\dot{U} = -\dot{E} = -j4.44 N f \dot{\Phi}_m \quad (1-22)$$

写成标量的形式为

$$U = E = 4.44 N f \Phi_m \quad (1-23)$$

式(1-23)说明,当外加电压 U 和频率 f 不变时,主磁通的最大值 Φ_m 几乎不变。

(二) 功率关系

交流铁芯线圈的有功功率为

$$P = UI \cos \varphi \quad (1-24)$$

它包括两部分,其一为线圈电阻上的功率损耗,称为铜损耗 p_{Cu} ,简称铜损,其值为

$$p_{Cu} = I^2 r \quad (1-25)$$

其二为交变的磁通在铁芯中产生的功率损耗,称为铁损耗 p_{Fe} ,简称铁损。铁损耗包括磁滞损耗和涡流损耗。

磁滞损耗是指当铁磁材料置于交变磁场中时,材料被反复交变磁化,与此同时,磁畴之间互相摩擦,消耗能量,因而造成的损耗。在物理学中曾经学过,磁性物质反复磁化一周时单位体积所消耗的能量与磁滞回线的面积成正比,因而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,而磁滞回线的面积与磁感应强度的最大值 B_m 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

$$p_k = K_h f B_m^\alpha V \quad (1-26)$$

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,对一般电工钢片, α 的值在 1.6~2.3 之间。

为了减小磁滞损耗,铁芯应选用磁滞回线面积小的软磁物质制成,如硅钢等。

涡流损耗是指当通过铁芯的磁通随时间变化时,铁芯中将产生感应电势,并引起环流。这些环流在铁芯内部围绕磁通作漩涡状流动,称为涡流,如图 1-12(a) 所示。涡流在铁芯电阻上引起的损耗称为涡流损耗,它的经验公式为

$$p_e = K_e d^2 f^2 B_m^2 V \quad (1-27)$$

式中, p_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

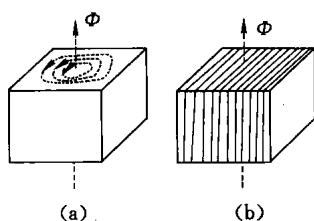


图 1-12 涡流损耗

(a) 涡流; (b) 硅钢片叠成的铁芯

硅钢改为由如图 1-12(b) 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以减小涡流和涡流损耗。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等电气设备中应用。

铁芯中磁滞损耗与涡流损耗之和称为铁芯损耗,即

$$p_{Fe} = p_k + p_e \quad (1-28)$$

对于一般的电工钢片,计算铁损耗的经验公式为

$$p_{Fe} = K_{Fe} f^\beta B_m^2 G \quad (1-29)$$

式中, K_{Fe} 为铁芯的损耗系数; β 为频率系数,其值在 1.2~1.6 之间; G 为铁芯重量。由上式亦可看出,恒定磁通的磁路无铁芯损耗。

本章小结

本章介绍了磁通量、磁感应强度、磁场强度、磁导率等基本的物理量;对于变压器和电机中常用的铁磁物质的高导磁性、磁饱和性和磁滞性进行了说明;建立了磁路的概念和磁路求解常用的磁路基本定律;对于交流铁芯线圈电路的电路方程、电磁关系、功率关系和铁芯损