

普通高等学校部委级重点教材

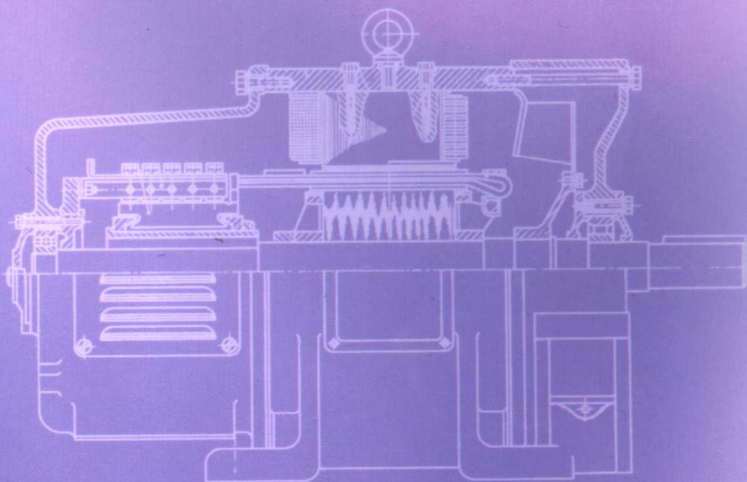
自动化专业系列教材

电机学与拖动基础

DIANJIXUE YU TUODONG JICHU

第二版

麦崇滴 编



华南理工大学出版社

普通高等学校部委级重点教材
自动化专业系列教材

电机学与拖动基础

(第二版)

麦崇滴 编

华南理工大学出版社
·广州·

内 容 简 介

本书主要内容包括直流电机、电力拖动的动力学基础、直流电动机的电力拖动、变压器、交流电机的基础理论、异步电动机、三相异步电动机的电力拖动、同步电机、微控电机及电动机容量的选择等十一章,着重讲述各种电机的工作原理、运行性能及分析计算方法。

本书取材丰富、结构严谨、重点突出、系统性强;各章相对独立,便于读者取舍。每章配有例题,附有足够数量的思考题与习题。

本书第一版是自控、船电类专业本科《电机学与拖动基础》课程用的“九五”规划部委级重点教材。本书为第二版,内容有增删,部分内容的安排作了调整,可供新专业目录的高等学校本科自动化专业、电气工程及其自动化专业、机械电子工程专业和其他相关专业使用,亦可作职业技术学院、专科、成人高等教育同类专业的教材,还可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电机学与拖动基础/麦崇禧编. —2版. —广州:华南理工大学出版社,2006.1

(自动化专业系列教材)

ISBN 7-5623-1244-3

I. 电… II. 麦… III. ①电机学-高等学校-教材 ②电力传动-高等学校-教材
IV. TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 082046 号

总 发 行: 华南理工大学出版社(广州五山华南理工大学 17 号楼,邮编 510640)

发行部电话:020-87113487 87111048(传真)

E-mail: scutl3@scut.edu.cn

<http://www.scutpress.com.cn>

责任编辑: 赖淑华 王魁葵

印 刷 者: 广东省农垦总局印刷厂

开 本: 787×1092 1/16 印张: 24 字数: 600 千

版 次: 2006 年 1 月第 2 版第 5 次印刷

印 数: 10001~13000 册

定 价: 35.00 元

版权所有 盗版必究

出版说明

根据国务院发〔1978〕23号文件批转试行的《关于高等学校教材编审出版若干问题的暂行规定》，中国船舶工业总公司负责全国高等学校船舶类专业规划教材编审、出版的组织工作。

为做好教材编审组织工作，中国船舶工业总公司相应地成立了“船舶工程”、“船舶动力”两个教材委员会和“船电自动化”、“惯性导航及仪器”、“水声电子工程”、“液压”、“水中兵器”五个教材小组，聘请了有关院校的教授、专家 50 余人参加工作。船舶类专业教材委员会(小组)是有关船舶类专业教材建设研究、指导、规划和评审方面的专家组织，主要任务是协助船舶总公司做好高等学校船舶类专业教材的编审工作，为教材质量审查把关。

经过前四轮教材建设，共出版教材 300 余种，建立了较完善的规章制度，扩大了出版渠道，在教材的编审依据、计划体制、出版体制等方面实行了有成效的改革，这些为“九五”期间船舶类专业教材建设奠定了良好基础。根据国家教委对“九五”期间高校教材建设要“抓好重点教材，全面提高质量，继续增加品种，整体优化配套，深化管理体制和运行机制的改革，加强组织领导”的要求，船舶总公司于 1996 年又制定了“全国高等学校船舶类专业教材(九五)选题规划”。列入规划的选题共 133 种，其中部委级重点选题 49 种，一般选题 84 种。

“九五”教材规划是在我国发展社会主义市场经济条件下第一个教材规划，为适应社会主义市场经济外部环境，“九五”船舶类专业教材建设实行指导性计划体制，即在指导性教材计划指导下，教材编审出版由主编学校负责组织实施，教材委员会(小组)进行质量审查，教材编审室组织协调。

“九五”期间要突出抓好重点教材，全面提高教材质量，为此教材建设引入竞争机制，通过教材委员会(小组)评审、择优确定主编，实行主编负责制。教材质量审查实行主审、复审制，聘请主编校以外的专家审稿，最后教材委员会(小组)复审，复审合格后由有关教材委员会(小组)发出版推荐证书，出版社方可出版。全国高校船舶类专业规划教材，就是通过严密的编审程序和高标准、严要求的审稿工作来保证教材质量。

为完成“九五”教材规划，主编学校应充分发挥主导作用。规划教材的立项是由学校申报，立项后由主编校组织实施，教材出版后由学校组织选用，学校是教材编写与教材选用的行为主体，教材计划的执行主要取决于主编校工作情况。希望有关高校切实负起责任，各有方面积极配合，为完成“九五”船舶类专业教材规划、为编写出版更多的精品教材而努力。

由于水平和经验局限，教材的编审出版工作和教材本身还会有很多缺点和不足，希望各有关高校、同行专家和广大读者提出宝贵意见，以便改进提高。

中国船舶工业总公司教材编审室

1997 年 4 月

前 言

本书是根据中船总[1997]013号文:“关于‘九五’部委级重点教材编审出版计划”立项,按教材委员会“九七”工作会议纪要通过的“电机学与拖动基础”教学基本要求而编写的。

按013号文规定:本书适用专业为自控、船电,学时为120节。因此编者力图使本书成为工业电气自动化、自动控制、电气技术、机电一体化、船电等专业均适用的通用教材,并可作为同类专业的业余大学、职工大学、夜大、函授等成人高校的教学用书。不同专业、不同院校可根据授课学时的差异,酌情选学书中带*号的内容。

编者根据工业自动化类专业的性质、教学改革的要求以及多年来从事“电机与拖动基础”课程的教学经验,编写时力求使电机学与电力拖动基础等课程尽量有机地结合起来,并保持各自的系统性与相对独立性。本书力求突出重点、深入浅出地阐明各类电机的基本原理、特性以及电机拖动系统的基本理论,以形成适应专业特点的课程体系。考虑到有些专业的特点,本书增加了同步发电机的内容。

本书由华南理工大学麦崇漪副教授主编,其中第一、三、六、七、八章由麦崇漪编写;第十、十一章由林良养副教授编写;第二、四章由詹前扬副教授编写;第五、九、十二章由翁开潮副教授编写。

本书由哈尔滨工程大学郭镇明教授主审,郭教授对全书进行了十分认真的审阅,并对大纲及书稿提出了许多宝贵的修改意见,在此谨致以衷心的感谢。

在本书编写过程中,得到了华南理工大学工业电气自动化教研室的领导及老师们的大力支持;在编写第二、四、五、九、十二章时,西安交通大学博士生导师刘文江教授曾给予精心的指导;邓万红硕士研究生为本书绘制了部分图稿;华南理工大学出版社的同志们对本书的出版给予极大的帮助;在编写过程中,编者曾参阅了不少兄弟院校的教材,谨此一并致谢。

由于编者水平有限,如有错误或不当之处,恳切希望广大读者批评指正。

编 者

1997年11月

第二版前言

《电机学与拖动基础》第一版问世已多年。进入 21 世纪后,随着科技教育的新发展,为了适应教育部“高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划”而设置的自动化类新的专业目录的教学要求,作者参照教育部高等学校自动化专业指导分委员会于 2004 年制订的《电机与拖动》课程的教学大纲(Auto-3-4-v01),在尽量保持《电机学与拖动基础》第一版总体结构基本不变的基础上,对原书的每一章节进行了全面的修订和改写。

本书是作者根据多年的教学经验,按照高等学校自动化专业指导分委员会要求系列教材应具有“先进性、创新性、适用性”的特点,并在参考了大量国内外文献和教材的基础上编写而成。作者在编写过程中力求做到精选内容、注重基础、突出重点、加强分析,并引入了本学科发展动态及最新科技成果。教材各章之间有相对的独立性,便于读者取舍,以适应不同教学学时的需要。对书中的名词、术语和符号进行了统一。

与第一版相比,第二版增加了整流变压器、脉冲变压器、笼型异步电动机的软起动方法、稀土永磁同步电动机及其应用,同步电动机的调速方法、无换向器电动机、力矩电动机、直线电动机、笼型异步电动机每小时允许通电次数的确定等内容;删去了交流电动机的时一空相矢图、异步电动机变频调速实施方法等内容;删去了电力拖动的机械过渡过程一章,将有关内容安排在交、直流电动机的电力拖动两章中。考虑到新的专业目录对教材内容的要求,重新组织编写同步电机一章,以介绍同步电动机为主;为了兼顾某些专业的特点,仍保留了同步发电机的内容,作为非基本要求内容处理。根据原理相近的内容放在一起介绍的原则,重新安排了直流电机及微控电机两章的内容。

本教材适用于高等学校本科自动化专业、电气工程及其自动化专业,以及引导性专业目录中电气工程与自动化专业、机械电子工程专业,也适用于其他相关专业。本书还可作为职业技术学院、专科、成人高等教育《电机与拖动》相应课程的教材,还可供有关工程技术人员参考。

本书由华南理工大学麦崇漪教授编写。在本书的编写过程中,编者曾参考了不少兄弟院校的教材及文献,在此谨对他们致以衷心的感谢。对本书第一版的另外三位作者华南理工大学的林良养副教授、翁开潮副教授、詹前扬副教授对本书曾作过的重大贡献深表谢意。华南理工大学工业自动化教研室罗飞教授、游林儒教授、郝晓田高级工程师、吴玉香副教授对本书提出不少宝贵意见,并给予大力支持,在此一并致谢。

由于编者水平有限,书中如有错误或不当之处,恳请广大读者批评指正。

编 者

2004 年 8 月

目 录

第一章 绪论	1
§ 1-1 电机及电力拖动系统发展概况.....	1
* § 1-2 本课程常用的电磁概念和定律.....	2
第二章 直流电机	9
§ 2-1 直流电机的基本工作原理及结构.....	9
§ 2-2 直流电机的电枢绕组	14
§ 2-3 直流电机的磁场	20
§ 2-4 直流电机的换向	25
§ 2-5 直流电机的电枢电动势、电磁转矩和电磁功率.....	28
§ 2-6 直流发电机	31
§ 2-7 直流电动机	36
小结	41
思考题与习题	42
第三章 电力拖动的动力学基础	45
§ 3-1 电力拖动系统的运动方程式	45
§ 3-2 多轴电力拖动系统的简化	47
§ 3-3 生产机械的负载转矩特性与电力拖动系统稳定运行的条件	52
小结	55
思考题与习题	55
第四章 直流电动机的电力拖动	57
§ 4-1 他励直流电动机的机械特性	57
§ 4-2 他励直流电动机的起动	62
§ 4-3 他励直流电动机的制动	65
§ 4-4 他励直流电动机的调速	74
* § 4-5 他励直流电动机的机械过渡过程	83
* § 4-6 他励直流电动机过渡过程的能量损耗	92
* § 4-7 串励及复励直流电动机的电力拖动	94
小结	98
思考题与习题.....	100
第五章 变压器	105
§ 5-1 变压器的基本工作原理和结构.....	105
§ 5-2 单相变压器的空载运行.....	109
§ 5-3 单相变压器的负载运行.....	114
§ 5-4 变压器参数的测定和标么值.....	119

§ 5-5 变压器的运行特性·····	123
§ 5-6 三相变压器·····	126
* § 5-7 变压器的并联运行·····	132
§ 5-8 专用变压器·····	134
小结·····	142
思考题与习题·····	143
第六章 交流电机的基础理论 ·····	147
§ 6-1 交流电机的基本工作原理·····	147
§ 6-2 交流电机的绕组·····	149
§ 6-3 交流电机绕组的感应电动势·····	155
§ 6-4 交流电机绕组产生的磁动势·····	160
小结·····	168
思考题与习题·····	168
第七章 异步电动机 ·····	170
§ 7-1 异步电动机的基本结构和额定值·····	170
§ 7-2 三相异步电动机转子静止时的电磁关系·····	173
§ 7-3 三相异步电动机转子旋转时的电磁关系·····	179
§ 7-4 三相异步电动机的功率与转矩·····	187
§ 7-5 三相异步电动机的工作特性·····	191
§ 7-6 三相异步电动机的参数测定·····	192
§ 7-7 单相异步电动机·····	195
小结·····	199
思考题与习题·····	200
第八章 三相异步电动机的电力拖动 ·····	202
§ 8-1 三相异步电动机的机械特性·····	202
§ 8-2 笼型三相异步电动机的起动·····	209
§ 8-3 绕线型三相异步电动机的起动·····	218
§ 8-4 三相异步电动机的制动·····	221
§ 8-5 三相异步电动机改变磁极对数的调速·····	233
§ 8-6 三相异步电动机的变频调速·····	237
§ 8-7 三相异步电动机改变转差率的调速·····	242
* § 8-8 三相异步电动机的机械过渡过程·····	252
* § 8-9 三相异步电动机过渡过程的能量损耗·····	254
小结·····	257
思考题与习题·····	258
第九章 同步电机 ·····	261
§ 9-1 同步电机的类型和结构·····	261
§ 9-2 同步电动机的工作原理和电枢反应·····	264
§ 9-3 同步电动机的电动势平衡方程式、同步电抗与相量图·····	268

§ 9-4 同步电动机的功率关系与功角、矩角特性	271
§ 9-5 同步电动机的工作特性、励磁调节和 V 形曲线	277
§ 9-6 同步电动机的起动和调速	280
§ 9-7 无换向器电动机	283
§ 9-8 磁阻同步电动机和永磁同步电动机	288
* § 9-9 同步发电机的基本方程式、相量图和运行特性	292
* § 9-10 同步发电机的并联运行	296
小结	300
思考题与习题	301
第十章 微控电机	303
§ 10-1 概述	303
§ 10-2 伺服电动机	303
§ 10-3 力矩电动机及低惯量直流伺服电动机	309
§ 10-4 测速发电机	312
§ 10-5 自整角机	315
§ 10-6 旋转变压器	321
§ 10-7 感应同步器	324
§ 10-8 磁滞同步电动机与步进电动机	327
§ 10-9 直线电动机	330
小结	332
思考题与习题	334
第十一章 电动机的选择	336
§ 11-1 概述	336
§ 11-2 电动机的发热、冷却及工作制	337
§ 11-3 连续工作制及连续周期工作制电动机容量的选择	340
§ 11-4 短时工作制电动机容量的选择	345
§ 11-5 断续周期工作制电动机容量的选择	348
§ 11-6 笼型异步电动机每小时允许通电次数的确定	351
§ 11-7 选择电动机容量的工程法	353
§ 11-8 电动机电流种类、型式、额定电压与额定转速的选择	353
小结	355
思考题与习题	356
附录 符号表	357
参考文献	372

第一章 绪 论

§ 1-1 电机及电力拖动系统发展概况

人类社会的生存和发展离不开能源。常见的能源形式有多种,如热能、光能、化学能、机械能、电能、原子能等。电能与其他能源相比具有明显的优点:它适宜大量生产、集中管理、远距离传输和自动控制。因此,在现代社会中,电能的应用已遍及各行各业。

电能的生产、转换、传输、分配、使用与控制等,都必须通过能够进行能量传递与变换的电磁机械来实现,这些电磁机械称为电机。

电机的分类方法很多,按其功能可分为:

- (1)发电机:把机械能转换成电能;
- (2)电动机:把电能转换成机械能;
- (3)变压器、变频器、变流机、移相器:分别用于改变电压、频率、电流及相位;
- (4)微控电机:用作各类自动控制系统的控制元件。

值得指出的是,从基本原理看,发电机与电动机仅是电机的两种不同运行方式,从能量转换角度看,二者是可逆的。

电能的生产集中在火力、水力及原子能发电厂进行,由厂内的发电机组完成。为了减少输电中的能量损失,远距离输电均采用高电压,然后经降压再供给用户,电压的升高和降低都是由变压器完成的。

电能转换为机械能主要由电动机完成,电动机拖动生产机械运动称为电力拖动,如金属切削机床、矿山机械、交通运输机械、起重机械、化工机械、农用机械、电动工具乃至家用电器等。

电力拖动系统的发展,从最初的成组拖动,经过单电机拖动直至发展为现代电力拖动的基本形式——多电动机拖动。

电力拖动系统主要分为直流与交流拖动系统两大类:直流电动机具有良好的起、制动性能,宜于在宽广范围内平滑调速,在需要高性能可控电力拖动的领域中得到广泛的应用。而交流电力拖动系统,近年来发展很快,已成为世界电力拖动研究的中心课题,其技术日趋成熟,处于扩大应用、系列化的新阶段,在各工业部门中有逐渐取代直流拖动的趋势。

电力拖动自动化在新型电机、大功率半导体器件、大规模集成电路、电子计算机及现代控制理论发展的推动下,发生了巨大的变革,由单机自动化扩展到生产过程与管理的自动化。例如,柔性制造系统,它集数控机床、数控加工中心、智能机器人、自动化仓库、自动导向小车等自动化设备于一体,是计算机辅助设计、辅助制造、计算机网络等技术高度发展、综合利用的结晶。

电力拖动自动化的发展,为工业发展和科学技术进步开创了更加广阔美丽的前景,需要我们更深入地研究电力拖动自动化的基本科学技术。

电机学与拖动基础是一门专业基础课。本书从实用角度出发,对同步发电机,交、直流

电动机,微控电机与变压器等的工作原理、主要运行特性进行分析,重点分析电动机与生产机械组成的电力拖动系统的运行特性及其计算与实验方法,为今后学习运动控制系统等专业课准备必要的理论基础。

* § 1-2 本课程常用的电磁概念和定律

为了学好本课程,下面将本书中常用的电磁概念和定律简要地复习一下。

一、磁的基本物理量

(一)磁感应强度(或磁通密度) B

磁场是由电流产生的,描述磁场强弱及方向的物理量是磁感应强度 B 。为了形象地描绘磁场,可用磁感应线,或称磁力线来描绘磁场的空间分布,磁力线的方向与产生它的电流方向符合右手螺旋定则。如果电流通过一根直导体,用右手握住直导体,伸直大拇指表示电流方向,则弯曲的四指即为磁力线的方向。如果电流通过一匝或多匝线圈,用右手握住线圈,弯曲的四指表示线圈导体中电流的方向,则伸直的大拇指即为线圈内部磁力线的方向。

磁感应强度量值可用通过垂直于磁场方向的单位面积的磁力线数来表示,单位为特斯拉(T)。

(二)磁通 Φ

穿过某一截面 S 的磁感应强度 B 的通量,即穿过截面 S 的磁力线根数称为磁感应通量,简称磁通,用 Φ 表示

$$\Phi = \int_S B \cdot dS \quad (1-1)$$

在均匀磁场中,如果截面 S 与 B 垂直,则

$$\Phi = BS \quad \text{或} \quad B = \Phi/S \quad (1-2)$$

当截面 S 与 B 不垂直,若 S 的法线与 B 的夹角为 α ,则

$$\Phi = BS \cos \alpha \quad (1-3)$$

磁通单位为韦伯(Wb)。

$$1 \text{ T} = 1 \text{ Wb/m}^2$$

(三)磁场强度 H

它可定义为:介质中某点的磁感应强度 B 与介质磁导率 μ 之比。

$$H = B/\mu \quad (1-4)$$

它表示在由某一宏观电流分布所产生的磁场中,如果分别充满不同的介质,则在场中同一点的磁场强度是相同的,而与介质种类无关。而磁感应强度 B 会随着介质的不同而不同,不同的程度取决于介质的磁导率 μ 。

磁场强度单位为安/米(A/m)。

(四)磁动势 F

电流通过的路径是电路,在电路中电流是由电动势产生的。同样,在磁路中,产生磁通 Φ 的是磁动势 F ,它等于流过线圈电流 I 与其匝数 W 的乘积,简称磁势。

$$F = I \cdot W \quad (1-5)$$

磁动势的方向由产生它的线圈电流按右手螺旋定则确定。磁动势的单位是安匝或安。

(五)磁阻 R_m

和电路中的电阻一样,磁路中也有磁阻 R_m ,它对磁通起阻碍作用。磁阻与磁路的平均长度 l 、磁路截面积 S 及磁路材料的磁导率 μ 有关,即

$$R_m = \frac{l}{\mu S} \quad (1-6)$$

二、磁性材料

自然界的物质按导磁能力的大小,或者说按磁化的特性,可分为磁性材料与非磁性材料两大类。磁性材料又称铁磁材料,主要是铁、镍、钴及其合金,下面简介其磁性能。

(一)导磁性

磁导率是用来衡量物质导磁能力的物理量。由实验测得真空的磁导率 μ_0 为

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$$

它是一个常数。任何一种物质的磁导率 μ 与真空磁导率 μ_0 的比,称为该物质的相对磁导率 μ_r ,即

$$\mu_r = \mu / \mu_0 \quad (1-7)$$

磁导率的单位是亨利/米(H/m),即欧姆·秒/米($\Omega \cdot \text{s/m}$)。

对非磁性材料, $\mu \approx \mu_0$, $\mu_r \approx 1$,几乎不具有磁化特性,而且各种非磁性材料的磁导率都是常数。

而铁磁材料的磁导率很高, $\mu_r \gg 1$,可达数百、数千乃至数万,故它们具有被强烈磁化的性能。

铁磁物质之所以能被磁化,是因为它们内部存在磁畴,当没有外磁场存在时,各个磁畴排列混乱,磁场互相抵消,对外不显示磁性。一旦有了外磁场,磁畴将按外磁场方向转向,外磁场越强,排列越整齐,这样便产生了与外磁场同方向的磁化磁场,使铁磁物质内部的磁感应强度大大增强,亦即铁磁物质被强烈磁化了。

(二)磁饱和性

铁磁物质的磁化磁场,不会随外磁场的增强而无限地增强。当外磁场增大到一定值时,全部磁畴的磁场方向都转向与外磁场方向相一致,磁性不再增强时,磁化磁场的磁感应强度 B 便达到饱和值。铁磁材料的磁感应强度 B 随外磁场强度 H 的变化曲线,称为磁化曲线,见图 1-1 的 $B=f(H)$ 曲线。磁化曲线的 $0a$ 段,外磁场 H 较弱,主要是与外磁场同方向的磁畴边界增大的过程, B 增加缓慢。在 ab 段,外磁场 H 较强,主要是磁畴沿外磁场方向的转动过程, B 迅速增大。在 bc 段,外磁场增大时,能够沿外磁场方向转动的磁畴越来越少了, B 的增加逐渐变慢,出现磁饱和现象, c 点为饱和点。过了饱和点,铁磁材料的磁导率 μ_{Fe} 趋于 μ_0 。由于铁磁材料的 B 与 H 不成正比,因此其磁导率 μ_{Fe} 不是常数,随 H 而变化,见图 1-1 中 $\mu_{Fe}=f(H)$ 曲线。

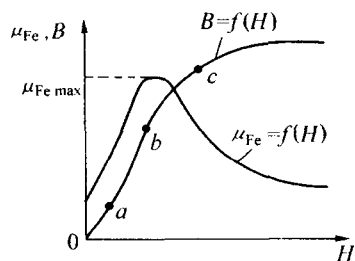


图 1-1 铁磁材料的磁化曲线

虽然磁通 Φ 与 B 成正比,产生磁通的励磁电流 I 与 H 成正比,但铁磁物质的 B 与 H 不

成正比,因此 Φ 与 I 也不成正比。

(三)磁滞性

当铁磁物质被反复磁化时,相应于外磁场增加的上升磁化曲线与相应于外磁场减小的下降磁化曲线不重合,如图 1-2 所示,这种现象称为磁滞,即磁化过程是不可逆的。用测量方法求取磁化曲线时,实际上得到的是磁滞回线。在磁滞回线上,当 H 下降到零时, B 不是零而是 B_r ,称剩余磁感应强度,又称剩磁;而对应 B 等于零时的 H_c 称为矫顽力。

铁磁物质根据磁滞回线的形状及其在工程上的用途可分为两大类。

(1)软磁材料 具有较小的矫顽力,磁滞回线较窄,且磁导率高。常用的有铸铁、硅钢、坡莫合金及铁氧体等。一般用来制造电机、电器及变压器等的铁心。

(2)硬磁材料 具有较大的矫顽力,磁滞回线较宽,有较高的剩磁 B_r 。常用的有碳钢、钴钢、镍铝钴合金及钕铁硼等。一般用来制造永久磁铁。

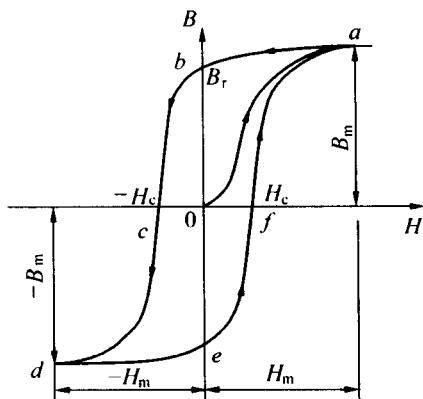


图 1-2 磁滞回线

三、全电流定律(安培环路定律)

凡导体中有电流流过时,就会产生与该载流导体相交链的磁通,它们之间的大小与方向可用全电流定律来表征。

设空间有 n 根载流导体,其电流分别为 $I_1, I_2, \dots$ 则沿任何闭合路径 l ,对磁场强度 H 的线积分,等于该闭合回路所包围的导体电流的代数和,即

$$\oint_l H dl = \sum I \quad (1-8)$$

此即全电流定律。若导体电流方向和积分路径方向符合右手螺旋定则时,该电流取正号,反之取负号。对图 1-3 中电流所示方向, $\sum I = I_1 + I_2 - I_3$ 。

如果磁场是由电流为 I 、匝数为 W 的线圈产生,则对于包含线圈全部匝数的任何路径均有

$$\sum I = IW$$

于是全电流定律可改写为

$$\oint_l H dl = IW \quad (1-9)$$

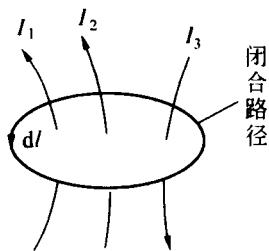


图 1-3 全电流定律

四、磁路基尔霍夫定律

(一)磁路基尔霍夫第一定律

电气设备中经常遇到一些具有分支的磁路,如图 1-4 所示。当线圈流过电流 I 后,产生的磁通设为 Φ_1 ,在 A 处分为两条并联支路,其磁通分别为 Φ_2 和 Φ_3 。

磁通连续性原理指出:穿入任一闭合面的磁通必然等于穿出该闭合面的磁通,故对 A 闭合面而言,流入该面的磁通 Φ_1 必然等于流出该面的磁通 Φ_2 与 Φ_3 之和,即

$$\Phi_1 = \Phi_2 + \Phi_3$$

或 $\Phi_1 - \Phi_2 - \Phi_3 = 0$

式中,将穿入闭合面的磁通取正号,穿出闭合面的磁通取负号。从上式见,穿过闭合面的总磁通量等于零。上式又可记为

$$\sum \Phi = 0 \quad (1-10)$$

式(1-10)称为磁路基尔霍夫第一定律。

(二)磁路基尔霍夫第二定律

取任一闭合磁路,如图 1-4 中 ABCD 磁路,根据全电流定律有

$$\oint_l H dl = \oint_{l_1} H dl + \oint_{l_3} H dl = H_1 l_1 + H_3 l_3$$

式中, H_1 为 CDA 段的磁场强度, l_1 为该段的平均长度; H_3 为 ABC 段的磁场强度, l_3 为该段的平均长度。这个磁路的磁动势 F 为

$$F = IW = H_1 l_1 + H_3 l_3$$

式中,电流 I 的方向与回路方向符合右手螺旋定则时记为正,反之为负。 $H_1 l_1$ 、 $H_3 l_3$ 分别称为 l_1 、 l_3 段的磁压降。

上式推广到任一闭合磁路则为

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

式(1-11)表示,在任何闭合磁路中,磁动势的代数和等于磁压降的代数和,称为磁路基尔霍夫第二定律。

五、磁路欧姆定律

由磁路基尔霍夫第二定律

$$HI = WI = F$$

考虑到 $H = B/\mu$, $B = \Phi/S$, 得

$$\Phi = \frac{F}{l/\mu S} = \frac{F}{R_m} = \Lambda_m F \quad (1-12)$$

$$R_m = l/\mu S, \quad \Lambda_m = 1/R_m \quad (1-13)$$

上式中, R_m 为 l 段磁路的磁阻,单位为 $1/H$; Λ_m 为 l 段磁路的磁导,单位为 H 。

式(1-12)称为磁路的欧姆定律。由铁磁材料构成的磁路,由于磁路饱和及磁滞的影响, R_m 不为恒值,故只能用此式进行定性分析,不能用于定量计算。

六、电磁感应定律

设一个 W 匝线圈,与它交链的磁通随时间变化时,线圈中便会产生感应电动势,此现

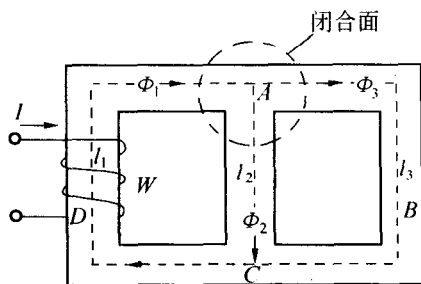


图 1-4 有分支磁路

象称电磁感应现象。当感应电动势的正方向与产生它的磁通正方向符合右手螺旋定则时, 则感应电动势 e 可用下式表示:

$$e = - \frac{d\psi}{dt} = - W \frac{d\phi}{dt} \quad (1-14)$$

式中, $\psi = W\phi$ 为交链此线圈的总磁链。

式(1-14)中的 ψ 和 ϕ 的单位均为 Wb, 时间 t 的单位为 s, 则 e 的单位为 V。式中负号表示: 如果此感应电动势使线圈中流过电流, 该电流所产生的磁通起着反对交链线圈磁通变化的作用, 这个物理规律称为楞次定律。

设与线圈交链的磁通随时间按正弦规律变化, 有

$$\phi = \Phi_m \sin \omega t$$

则

$$\begin{aligned} e &= - W \frac{d\phi}{dt} = - W \Phi_m \frac{d}{dt} \sin \omega t \\ &= - W \omega \Phi_m \cos \omega t = E_m \sin(\omega t - 90^\circ) \end{aligned} \quad (1-15)$$

式中 Φ_m —— 磁通幅值;

ω —— 磁通变化角频率, rad/s, $\omega = 2\pi f$;

f —— 磁通变化频率, Hz;

E_m —— 感应电动势幅值, $E_m = W\omega\Phi_m$ 。

从式(1-15)可见, 当磁通按正弦规律变化时, 感应电动势亦按正弦规律变化, 且其相位滞后磁通 90° 电角度, 其相量图和波形图见图 1-5。

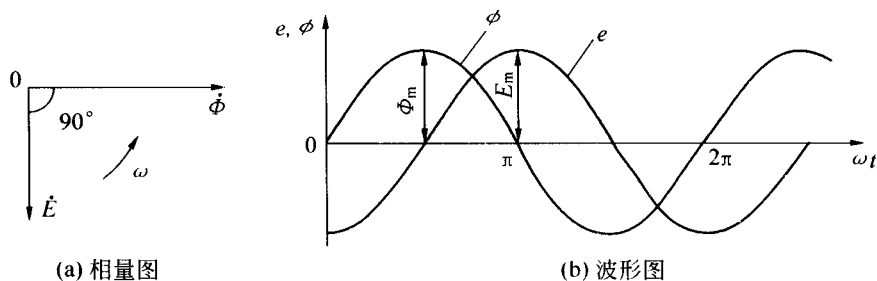


图 1-5 感应电动势与磁通的相位关系

感应电动势的有效值

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \sqrt{2}\pi f W \Phi_m = 4.44 f W \Phi_m \quad (1-16)$$

复电动势为

$$\dot{E} = - j f W \dot{\Phi} \quad (1-17)$$

引起线圈中磁通变化的原因不同, 其感应电动势亦不一样, 在电机中通常有如下两种形式。

(一) 旋转电动势(切割电动势)

当导体与磁场有相对运动, 导体切割磁力线时而感应电动势, 称旋转电动势。若磁力线、导体和运动方向三者互相垂直, 则导体的感应电动势

$$e = Blv \quad (1-18)$$

式中, B 的单位为 T, l 的单位为 m, 直导体切割磁力线的线速度 v 的单位为 m/s, 则 e 的单位为 V。

沿直导体 l 上感应电动势 e 的方向由右手定则决定, 见图 1-6。

(二) 变压器电动势

线圈与磁场相对静止, 但穿过线圈的磁通大小或方向发生变化, 这种情况与变压器一样, 故这种线圈感应的电动势称变压器电动势。

1. 自感电动势

当线圈 W_1 通入随时间而变化的电流 i 时, 则由 i 产生的与线圈 W_1 自身交链的磁链也随时间而变化, 此时在线圈 W_1 中将感应电动势, 此电动势称自感电动势 e_L 。由于线圈磁通是线圈本身电流产生的, 所以 i 与 Φ 的正方向符合右手螺旋定则, 且 e_L 与 Φ 的正方向亦符合右手螺旋定则, 可见, 自感电动势的正方向应与电流的正方向一致, 见图 1-7。 e_L 可由下式表示:

$$e_L = - \frac{d\psi_L}{dt} = - W_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (1-19)$$

式中 $\psi_L = W_1 \phi$ —— 线圈自感磁链。

自感磁链由线圈电流 i 产生, 单位电流所产生的自感磁链称为线圈的自感系数 L , 简称自感, 单位为亨(H)。

$$L = \psi_L / i \quad (1-20)$$

将式(1-20)代入式(1-19), 得

$$e_L = - \frac{d\psi_L}{dt} = - L \frac{di}{dt} \quad (1-21)$$

在不饱和铁心线圈和空心线圈中, ψ_L 与 i 成正比, L 为常数。上式表明, 自感电动势与线圈的自感系数和电流的变化率成正比。

若线圈内电流按正弦规律变化, 则

$$\begin{aligned} e_L &= - L \frac{di}{dt} = - L \frac{d}{dt} I_m \sin \omega t = - I_m L \omega \cos \omega t \\ &= - I_m X_L \cos \omega t = E_{Lm} \sin(\omega t - 90^\circ) \end{aligned} \quad (1-22)$$

式中 I_m —— 电流幅值;

$X_L = \omega L$ —— 自感电抗, Ω ;

$E_{Lm} = X_L I_m = \omega L I_m$ —— 自感电动势幅值。

从式(1-22)可见, 流过线圈的电流正弦变化时, 线圈自感电动势也按正弦变化, 在相位上滞后电流 90° 电角度。

2. 互感电动势

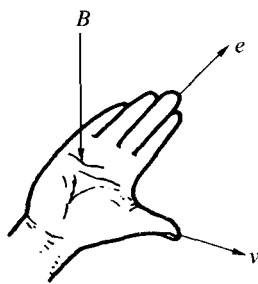


图 1-6 右手定则

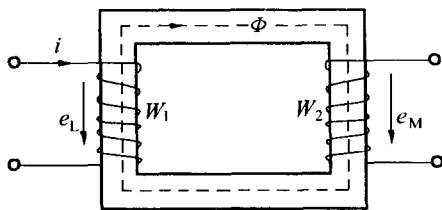


图 1-7 感应电动势的正方向