

电 机 学

(第二版)

谢明琛 张广溢 主编

重庆大学出版社

内 容 简 介

全书共 22 章, 主要内容为变压器, 感应电机, 同步电机, 直流电机的工作原理、基本结构、基础理论、运行特性。每章附有思考题和习题, 每篇有总结, 书末有习题的参考答案。

本书是根据专科的培养目标和教学特点编写的, 着重于物理概念和基本关系的阐述, 内容精炼, 适用于电机、电力、电气技术、电器、绝缘、高压等专业的高等专科《电机学》课程教材, 也可供有关技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电机学 / 谢明琛, 张广溢主编. —2 版. —重庆: 重庆大学出版社, 2004. 5

ISBN 7-5624-0981-1

I. 电... II. ①谢... ②张... III. 电机学 IV. TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 001186 号

电 机 学

(第二版)

谢明琛 张广溢 主编

责任编辑: 曾令维 版式设计: 曾令维

责任校对: 蓝安梅 责任印制: 秦 梅

*

重庆大学出版社出版发行

出版人: 张鸽盛

社址: 重庆市沙坪坝正街 174 号重庆大学(A 区)内

邮编: 400030

电话: (023) 65102378 65105781

传真: (023) 65103686 65105565

网址: <http://www.cqup.com.cn>

邮箱: fxk@cqup.com.cn (市场营销部)

全国新华书店经销

重庆升光电力印务有限公司印刷

*

开本: 787×1092 1/16 印张: 17.25 字数: 430 千

1995 年 6 月第 1 版 2004 年 5 月第 2 版 2005 年 2 月第 12 次印刷

印数: 58 001—63 000

ISBN 7-5624-0981-1/TM·40

定价: 20.00 元

本书如有印刷、装订等质量问题, 本社负责调换

版权所有, 请勿擅自翻印和用本书

制作各类出版物及配套用书, 违者必究。

序

近年来我国高等专科教育发展很快,各校招收专科生的人数呈逐年上升趋势,但是专科教材颇为匮乏,专科教材建设工作进展迟缓,在一定程度上制约了专科教育的发展。在重庆大学出版社的倡议下,中国西部地区 14 所院校(云南工学院、贵州工学院、宁夏工学院、新疆工学院、陕西工学院、广西大学、广西工学院、兰州工业高等专科学校、昆明工学院、攀枝花大学、四川工业学院、四川轻化工学院、渝州大学、重庆大学)联合起来,编写、出版机类和电类专科教材,开创了一条出版系列教材的新路。这是一项有远见的战略决策,得到国家教委的肯定与支持。

质量是这套教材的生命。围绕提高系列教材质量,采取了一系列重要举措:

第一,组织数十名教学专家反复研究机类、电类三年制专科的培养目标和教学计划,根据高等工程专科教育的培养目标——培养技术应用型人才,确定了专科学生应该具备的知识和能力结构,据此制订了教学计划,提出了 50 门课程的编写书目。

第二,通过主编会议审定了 50 门课程的编写大纲,不过分强调每门课程自身的系统性和完整性,从系列教材的整体优化原则出发,理顺了各门课程之间的关系,既保证了各门课程的基本内容,又避免了重复和交叉。

第三,规定了编写系列专科教材应该遵循的原则:

1. 教材应与专科学生的知识、能力结构相适应,不要不切实际地拔高;
2. 基础理论课的教学应以“必须、够用”为度,所谓“必须”是指专科人才培养规格之所需,所谓“够用”是指满足后续课程之需要。
3. 根据专科的人才培养规格和人才的主要去向,确定专业课教材的内容,加强针对性和实用性;
4. 减少不必要的数理论证和数学推导;
5. 注意培养学生解决实际问题的能力,强化学生的工程意识;
6. 教材中应配备习题、复习思考题、实验指示书等,以方便组织教学;
7. 教材应做到概念准确,数据正确,文字叙述简明扼要,文、图配合适当。

第四,由出版社聘请学术水平高、教学经验丰富、责任心强的专家担任主审,严格把住每门教材的学术质量关。

出版系列专科教材堪称一项“浩大的工程”。经过一年多的艰苦努力,系列专科教材陆续面市了。它汇集了中国西部地区 14 所院校专科教育的办学经验,是西部地区广大教师长期教学经验的结晶。

纵观这套教材, 具有如下的特色: 它符合我国国情, 符合专科教育的教学基本要求和教学规律; 正确处理了与本科教材、中专教材的分工, 具有很强的实用性; 与出版单科教材不同, 有计划地成套推出, 实现了整体优化。

这套教材立足于我国西部地区, 面向全国市场, 它的出版必将对繁荣我国的专科教育发挥积极的作用。这套教材可以作为大学专科及成人高校的教材, 也可作为大学本科非机类或非电类专业的教材, 亦可供有关工程技术人员参考。因此我不揣冒昧向广大读者推荐这套系列教材, 并希望通过教学实践后逐版修订, 使之日臻完善。

吴云鹏
1993年
仲夏

前 言

根据专科以培养应用型人才为目标的特点,本教材在内容的组织上注意了必需和够用两条原则,删去了传统《电机学》中较繁的分析过程及一些专门问题的讨论,为适合不同专业的需要,少数内容以*号标出,以供选用。本书适用于电力类强电专业,即作为电机、电力、电气技术、电器、绝缘、高压等专业专科电机学课程教材。

从教材与后续课的衔接考虑,本书内容的顺序为总论,变压器,交流电机的绕组、电动势和磁动势,感应电机,同步电机,直流电机。为便于学生学习,在每章后附有思考题、习题,每篇后有总结,书末有习题的参考答案。

本书由重庆大学谢明琛副教授,陕西工学院张广溢副教授,贵州工学院余学文副教授,四川工业学院何建平老师共同编写。具体分工为:张广溢编写第1篇变压器;余学文编写第3篇感应电机;何建平编写第5篇直流电机;谢明琛编写总论,第2篇交流电机的绕组、电动势和磁动势,第4篇同步电机,并对全书进行统稿。

本书在编写过程中得到各校电机教研室老师的大力支持,重庆大学电机教研室对该书的大纲进行了多次讨论、修订;张世炳副教授对本书的图稿及习题的选取做了大量工作,并对全部习题答案进行了核算校对;对此,全体编者表示衷心的感谢。

本书由重庆大学杨顺昌教授主审,杨老师对初稿及统稿后的第二稿均做了仔细审阅,并提出了许多宝贵意见,对此致以深切的谢意。

由于水平有限,错误在所难免,望读者多提宝贵意见。

编 者
1993年8月

修订版前言

本书是在 1995 年出版的电类统编教材“电机学”的基础上修订的。

根据原书的使用情况,修订时在总论中增加了“铁磁材料的特性”一节,以便学习时对电机中能量转换的媒介——磁场有更深入的了解。其次,增加了例题的数量,更便于自学和深刻理解课程内容。另外根据新的国家标准以及理论研究的深入和生产的发展对原书中一些图形及内容的陈述也做了一定的修订,这些修订将会使该书使用起来更方便实用。

本书由谢明琛、张广溢共同修订,由张广溢修订第 1 篇变压器,第 5 篇直流电机;由谢明琛修订总论,第 2 篇交流电机的绕组、电动势和磁动势,第 3 篇感应电机,第 4 篇同步电机,并对全书进行统稿。

编 者
2004 年 3 月

主要符号表

A——线负载; 面积	f——频率; 力; 磁动势的瞬时值
a——并联支路数(交流); 支路对数(直流)	f_N ——额定频率
B——磁通密度	f_1 、 f_2 ——定子、转子频率
B_{av} ——平均磁通密度	H——磁场强度
B_δ ——气隙磁通密度	h——高度
B_m ——最大磁通密度	I——电流
B_a ——电枢磁场磁密	I_N ——额定电流
B_{ad} 、 B_{aq} ——直轴、交轴电枢磁场磁密	I_0 ——空载电流、激磁电流; 零序电流
B_{fl} ——励磁磁场的基波磁密	I_{Fe} ——铁耗电流
b——宽度; 弧长	I_μ ——磁化电流
c——常数; 电容	I_1 、 I_2 ——一次、二次侧电流
C_e ——电动势常数	I_f ——励磁电流
C_T ——转矩常数	I_d 、 I_q ——同步电机电枢电流的直轴、交轴分量
D——直径	I_K ——短路电流
E——感应电动势	I_{st} ——起动电流
E_0 ——空载电动势	i——电流瞬时值
E_a ——电枢反应电动势	J——转动惯量
E_m ——电动势最大值	K——换向片数; 系数
E_1 、 E_2 ——一次、二次侧电动势	k——变压器的变比; 系数
$E_{1\sigma}$ 、 $E_{2\sigma}$ ——一次、二次侧漏电动势	k_e ——感应电机的电动势变比
E_{ad} 、 E_{aq} ——直轴、交轴电枢反应电动势	k_i ——感应电机的电流变比
E_v —— v 次谐波电动势	k_μ ——饱和系数
e——电动势瞬时值; 自然对数的底 ($e = 2.718$)	k_y ——短距系数
e_L ——自感电动势	k_q ——分布系数
e_M ——互感电动势	k_N ——绕组系数
F——磁动势	k_c ——短路比
F_1 、 F_2 ——一次、二次侧磁动势	k_u ——电压波形正弦性畸变率
F_0 ——激磁磁动势; 空载磁动势	L——电感; 自感
F_a ——电枢磁动势	l——长度
F_{ad} 、 F_{aq} ——直轴、交轴电枢磁动势	M——互感
F_{fl} ——励磁磁动势基波幅值	m——相数
F_δ ——气隙磁动势	N——电枢总导体数; 匝数
	N_1 、 N_2 ——一次、二次侧每相串联匝数

N_c ——线圈匝数	t ——时间
n ——转速	U ——电压
n_N ——额定转速	U_N ——额定电压
n_1 ——同步转速	U_f ——励磁电压
P ——功率	$U_1、U_2$ ——一次、二次侧电压
P_N ——额定功率	u ——电压瞬时值
P_1 ——输入功率	u_k ——阻抗电压(短路电压)
P_2 ——输出功率	v ——线速度
P_{em} ——电磁功率	W ——能量
P_{mec} ——总机械功率	x ——电抗
p ——极对数; 损耗	$x_{1\sigma}、x_{2\sigma}$ ——一次、二次侧漏电抗
p_{Cu} ——铜耗	x_{σ} ——同步电机电枢漏电抗
p_{Fe} ——铁耗	x_p ——保梯电抗
p_{mec} ——机械损耗	x_k ——短路电抗
p_{ad} ——附加损耗	x_a ——电枢反应电抗
p_k ——短路损耗	x_t ——同步电抗
p_0 ——空载损耗	$x_{ad}、x_{aq}$ ——直轴、交轴电枢反应电抗
Q ——无功功率	$x_d、x_q$ ——直轴、交轴同步电抗
q ——每极每相槽数	$x'_d、x'_q$ ——直轴、交轴瞬变电抗
$R、r$ ——电阻	$x''_d、x''_q$ ——直轴、交轴超瞬变电抗
R_1 ——一次侧电阻	$x_+、x_-、x_0$ ——正序、负序、零序电抗
R_2 ——二次侧电阻	y ——节距; 合成节距
R_a ——电枢回路电阻	Z ——复数阻抗; 槽数
R_f ——励磁回路电阻	$Z_1、Z_2$ ——一次、二次侧漏阻抗; 感应电机定子、转子槽数
R_L ——负载电阻	Z_L ——负载阻抗
R_{st} ——起动电阻	Z_k ——短路阻抗
R_m ——磁阻	Z_m ——激磁阻抗
S ——视在功率; 元件数	$Z_+、Z_-、Z_0$ ——正序、负序、零序阻抗
S_N ——额定视在功率(额定容量)	α ——角度; 空间电角度; 系数
s ——转差率	β ——角度; 负载系数
s_N ——额定转差率	γ ——角度; 电导率
s_m ——产生最大电磁转矩的转差率	δ ——气隙长度
T ——转矩; 周期; 时间常数	η ——效率
T_N ——额定转矩	η_N ——额定效率
T_{em} ——电磁转矩	η_{max} ——最大效率
T_1 ——原动机转矩; 输入转矩	θ ——温度; 功率角
T_2 ——负载转矩; 输出转矩	Λ_m ——磁导
T_0 ——空载制动转矩	λ ——比漏磁导
T_j ——惯性转矩	

μ ——磁导率

τ ——极距; 温升

Φ ——磁通; 每极磁通

Φ_m ——磁通最大值

Φ_0 ——空载磁通; 励磁磁通

Φ_σ ——漏磁通

Φ_a ——电枢反应磁通

Φ_1 ——基波磁通

* ——右上角加星标的为标么值

Φ_v —— v 次谐波磁通

Φ_{ad} 、 Φ_{aq} ——直轴、交轴电枢反应磁通

Φ ——磁通瞬时值

ϕ ——相位角; 功率因数角

Ψ ——磁链

ψ ——相位角

Ω ——机械角速度

Ω_s ——同步角速度

ω ——角频率

'——右上角加撇的为折算值

总 论

0.1 电机在国民经济中的作用

能源是国民经济发展的重要命脉, 由于电能适宜于大量生产、集中管理、远距离传输、灵活分配及自动控制, 因而电能成为现代最常用的一种能源。电机是与电能的生产、传输和使用有关的能量转换机械, 其主要作用是:

0.1.1 电能的生产、传输和分配中的主要设备

在发电厂中, 发电机由汽轮机、水轮机、柴油机或其他动力机械带动, 这些原动机将燃料燃烧的热能、水的位能、原子核裂变的原子能等转化为机械能传给发电机, 由发电机将机械能转换为电能。由于绝缘水平的限制, 发电机发出的电压一般为(10.5 ~20) kV, 为了减少远距离输电中的能量损失, 经济地传输电能, 应采用高压输电, 一般输电电压为110、220、330、500 kV或更高, 因此采用升压变压器将发电机发出的电压升高后再进行电能的传输。到各用电区, 为安全使用电能, 各用电设备又需要不同的低电压, 因此还需各种电压等级的降压变压器将电压降低, 然后供给各用户。在电力工业中, 发电机和变压器是发电厂和变电站的主要设备。

0.1.2 各种生产机械和装备的动力设备

在工农业、交通运输、国防工程及日常生活中广泛使用各种电动机作原动机, 拖动生产机械和装备, 例如各类机床、电力排灌、农副产品加工、矿石采掘和传送、电车和电力机车的牵引、鼓风、起吊、轧钢、造纸、医疗器械、家用电器等的驱动设备都是采用不同类型、容量的交、直流电动机。

0.1.3 自动控制系统中的重要元件

随着科学技术的发展, 工农业和国防设施的自动化程度越来越高。各种各样的控制电机被用作执行、检测、放大和解算元件。这类电机一般功率较小, 品种繁多, 用途各异, 精度要求较高。例如火炮和雷达的自动定位, 人造卫星发射和飞行的控制, 舰船方向舵的自动操纵, 机床加工的自动控制与显示, 电梯的自动选层与显示, 以及计算机、自动记录仪表、医疗设备、录音、录像、摄影和现代家用电器设备等的运行控制、检测或记录显示等, 都使用了大量的微特电机。

目前电机工业的发展主要体现在以下几方面:

1) 发电机、变压器单机容量不断提高。单机容量愈大, 单位容量的用料愈节省, 电站的机组可减少, 使制造、运行、维护的费用均可降低。这与材料性能提高和电机冷却技术的发展密切相关。世界上单机容量已突破1 000 MW。我国已制成600 MW的汽轮发电机和即将自制三峡电站用700 MW的水轮发电机。

2) 中小型电机技术和经济指标不断改进。随着新材料、新技术、新工艺的不断出现, 计算

机对电机进行设计与分析的应用,使产品更新的速度进一步加快。

- 3) 电机应用范围不断扩大,类型及品种愈来愈多。
- 4) 超导技术和磁流体技术的发展和应用将对电机工业的发展起突破性的作用。

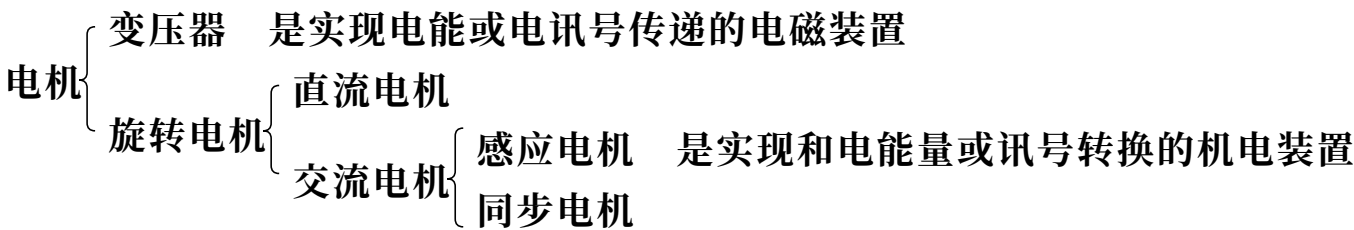
0.2 电机的主要类型及电机中所用的材料

0.2.1 电机的主要类型

按功能分为:

- 1) 发电机 把机械能转换为电能。
- 2) 电动机 把电能转换为机械能。
- 3) 变压器、变频器、变流机、移相器 分别用于改变电能的电压、频率、电流及相位。
- 4) 控制电机 作为自控系统中的元件。

按实际结构分为:



0.2.2 电机中所用材料

电机一般是以磁场为耦合场,利用电磁感应和电磁力的作用而实现能量传递或讯号转换的装置。因此,电机中所用的材料可分为以下 4 类:

- 1) 导电材料 作为电机中的电路系统。为减小 I^2R 损耗,要求材料的电阻率小。常用紫铜及铝。
- 2) 导磁材料 作为电机中的磁路系统。为在一定励磁磁动势下产生较强的磁场和降低铁耗,要求材料有较高的磁导率和较低的铁耗系数,常用硅钢片、钢板和铸钢。
- 3) 绝缘材料 作为带电体之间及带电体与铁心间的电气隔离。要求材料的介电强度高且耐热强度好。按耐热能力可分为 A、E、B、F、H、C 六级,其最高允许工作温度分别为 105 °C、120 °C、130 °C、155 °C、180 °C、高于 180 °C。
- 4) 结构材料 使各部分构成整体、支撑和连接其他机械。要求材料的机械强度好,加工方便,重量轻。常用铸铁、铸钢、钢板、铝合金及工程塑料。

0.2.3 铁磁材料的特性

(1) 铁磁材料的导磁性

铁磁材料包括铁、钴、镍及其合金。除此之外的所有材料统称非铁磁材料。非铁磁材料的磁导率接近真空的磁导率 μ_0 , $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ 。由于 μ_0 为常数,故在磁场中其磁感应强度 B 与磁场强度 H 成正比,即 $B = \mu_0 H$, B 与 H 的关系为直线。

铁磁材料由于其内部存在大量称为“磁畴”的很小的自发磁化区域,它们相当于一块块小磁铁,在材料未被磁化时,“磁畴”杂乱地排列着,磁场互相抵消,对外不显示磁性。但在外磁

场作用下,“磁畴”即倾向于沿外磁场方向排列,产生一附加磁场叠加在外磁场上,使得总磁场比同一外磁场作用于非铁磁材料时强得多,故铁磁材料的磁导率 μ_e 比 μ_0 大得多,通常 μ_e 为 μ_0 的 2 000 ~6 000 倍。另外,由于附加磁场的大小与外磁场强度有关,故 μ_e 不是常数, B 与 H 的关系是曲线, $B = f(H)$ 称磁化曲线。图 0-1 表示 D11 硅钢片的磁化曲线。由图可见,随 H 的增加, B 先增加较快后逐渐变慢, H 达一定值后, B 与 H 的关系又趋于线性。这是由于外磁场增加时,“磁畴”逐渐顺外磁场方向排列,附加磁场不断增强,到后来所有“磁畴”都转到与外磁场方向一致时,附加磁场就不能再增加了,即使 H 再增加, B 的增加也很有限,这称磁饱和现象。故铁磁材料的特点是:在一定磁场范围内 μ_e 很大,且不是常量, H 达到一定值后出现磁饱和。

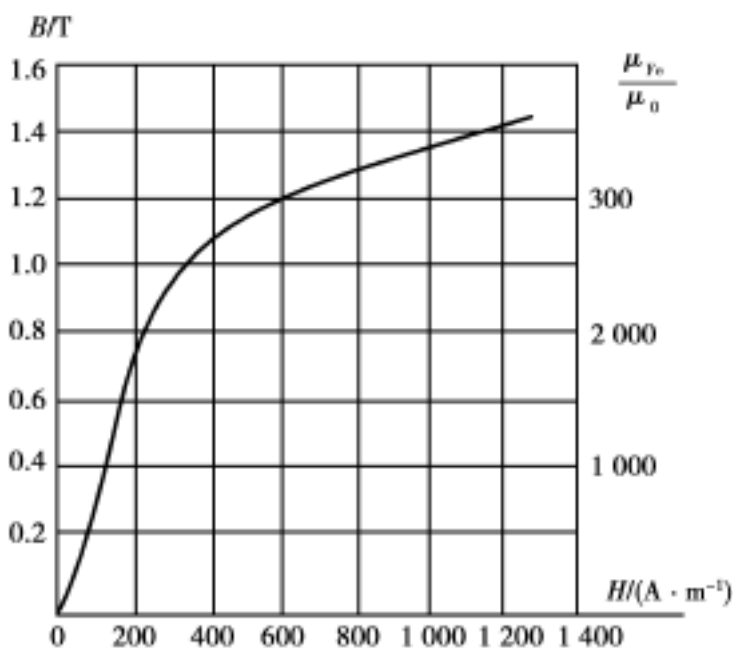


图 0-1 D11 硅钢片的 B-H 曲线

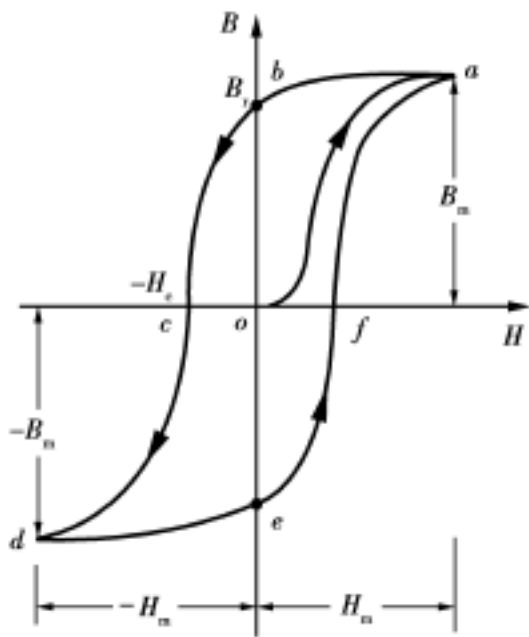


图 0-2 铁磁材料的磁滞回线

(2) 铁心损耗

1) 磁滞回线及磁滞损耗: 由图 0-2 可见, 在测取铁磁材料磁化曲线时, 当 H 由零上升到某个最大值 H_m 时, B 沿曲线 oa 上升; 当 H 由 H_m 下降到零时, B 不是沿 ao 下降, 而是沿 ab 下降。若继续进行反方向磁化, 当 H 由零变为 $-H_m$ 时, B 沿 bcd 变化; 当 H 由 $-H_m$ 变为零, B 沿 de 变化; 当 H 再由零变为 H_m , B 沿 efa 变化, 即反复磁化, 一个循环磁化曲线为一闭合回线 abcdefa, 称磁滞回线。这是由于“磁畴”顺外磁场方向排列而引起的。 B_r 称剩余磁感应强度, 简称剩磁; H_c 称矫顽力。同一种材料, 在不同的 H_m 下有不同的磁滞回线, 将所有回线的顶点连接起来得到的磁化曲线称基本磁化曲线, 即工程上所使用的磁化曲线。同 $-H_m$ 下, 不同的材料又有不同的磁滞回线, 根据回线的形状不同, 铁磁材料又分软磁材料和硬磁材料。前者回线狭窄, B_r 和 H_c 均小且 μ_e 较高, 如硅钢片, 钢及铸铁, 可用作电机中的磁路; 后者回线较宽, B_r 和 H_c 均较大, 且最大磁能积 $(BH)_m$ 较大, 如铁氧体、铝镍钴和稀土材料, 可作永久磁铁。

若产生外磁场的激磁电流是交流, 则铁磁材料受到交变磁化, 磁畴不断变换方向相互摩擦将消耗能量, 这种能量损耗称磁滞损耗。显然, 同一铁心, B_m 愈大, 磁滞损耗愈大; 电流交变频率 f 愈大, 磁滞损耗愈大。

2) 涡流损耗: 当穿过铁心的磁通随时间交变时, 根据电磁感应定律, 铁心中将感应出电动势和电流。这些电流在铁心内围绕磁通呈漩涡状流动, 称涡流, 如图 0-3 所示。涡流在铁心中引起的电阻损耗称涡流损耗, 其大小与钢片厚度、材料电阻率、交变磁化的频率及最大磁密

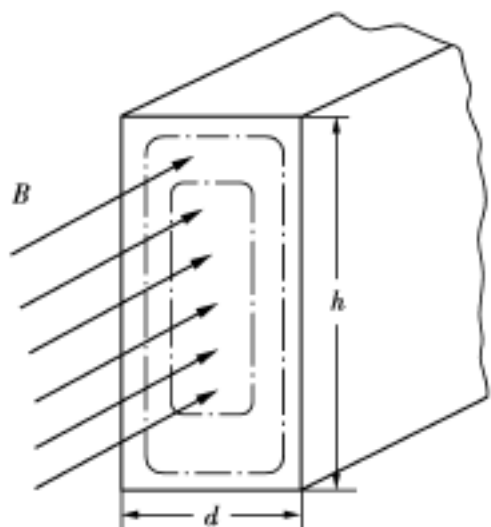


图 0-3 硅钢片中的涡流

有关。

电机和变压器中的磁路主要由铁磁材料构成,称为铁心,当铁心中穿过交变磁通时将产生磁滞和涡流损耗,二者合称铁耗。单位质量的铁耗通常用下式计算:

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

式中 $p_{1/50}$ ——铁耗系数。代表 $B_m = 1 \text{ T}$, $f = 50 \text{ Hz}$ 时每千克铁磁材料中的损耗;

β ——随硅钢片含硅量增高而减小的系数,其数值范围为 $1.2 \sim 1.6$ 。

0.3 研究电机时常用的基本定律

0.3.1 全电流定律(安培环路定律)

有电流就会在它周围产生磁场,在磁场中沿任一闭合回路磁场强度的线积分等于穿过该回路所有电流的代数和,即

$$\oint_l H \cdot dl = \sum I \quad (0-2)$$

式中,电流方向与闭合回路环绕方向符合右手螺旋关系时为正,反之为负,见图 0-4。

0.3.2 电路定律

1) 欧姆定律 一段电路上的电压降 u 等于流过该电路的电流 i 与电路的电阻 R 的乘积,即

$$u = iR \quad (0-3)$$

2) 基尔霍夫第一定律(电流定律) 在电路中任一节点上,电流的代数和恒等于零,即

$$\sum i = 0 \quad (0-4)$$

3) 基尔霍夫第二定律(电压定律) 在电路中,对任一回路,沿回路环绕一周,回路内所有电动势的代数和等于所有电压降的代数和,即

$$\sum e = \sum u \quad (0-5)$$

该定律是电机中电动势平衡方程式的理论依据。

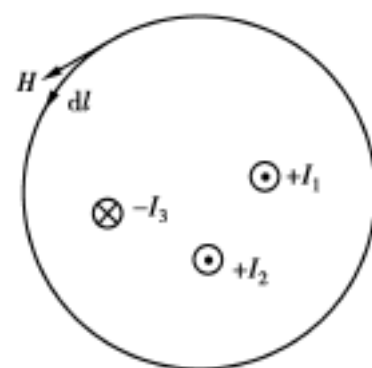


图 0-4 全电流定律

0.3.3 磁路及磁路定律

电流在它周围的空间建立磁场,磁场的分布常用一些闭合线(磁力线)来描述,磁力线所经路径称为磁路。磁路的材料不同,其导磁性能不同。电机中工作磁通(常称主磁通)所经的路径主要由铁磁材料构成,以提高其导磁性能,即减小产生一定磁通所需的磁动势。对磁路的分析和计算,通常选取平均磁力线作积分路线。

从描述磁场的基本物理量关系及全电流定律可导出与电路定律相似的磁路定律如下:

(1) 磁路的欧姆定律

将全电流定律应用到图 0-5 所示材料相同截面 (A) 相等的无分支闭合磁路上, 则有

$$\oint_l H dl = Hl = \sum I = Ni = F$$

因为 $B = \mu H = \frac{\Phi}{A}$, 即 $\frac{\Phi l}{\mu A} = Ni$, 于是

$$\Phi = \frac{Ni}{l/\mu A} = \frac{F}{R_m} = F \Lambda_m \quad (0-6)$$

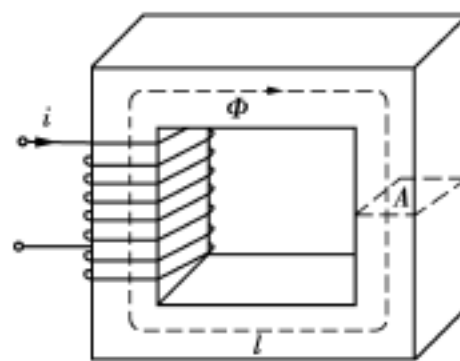


图 0-5 无分支磁路

即磁路中的磁通 Φ 等于作用在该磁路上的磁动势 F 除以磁路的磁阻 R_m (或乘以磁导 Λ_m), 这就是磁路的欧姆定律。

(2) 磁路的基尔霍夫第一定律

由于磁力线是闭合线, 因此, 对任一封闭面而言, 穿入的磁通必等于穿出的磁通, 这就是磁通连续性原理。对有分支的磁路而言, 在磁通汇合处的封闭面上磁通的代数和等于零, 即

$$\sum \Phi = 0 \quad (0-7)$$

在图 0-6 中有

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

(3) 磁路的基尔霍夫第二定律

在磁路计算中, 若构成磁路的各部分有不同的材料和截面, 则应将磁路分段, 每段有相同材料和截面, 其 B , μ 相同。每段磁路上磁场强度 H 与磁路长度 l 的乘积 Hl 称为该段磁路的磁压降, 将全电流定律应用到任一闭合磁路上, 则有

$$\oint H dl = \sum Hl = \sum Ni = \sum F = \sum \Phi R_m \quad (0-8)$$

即沿任一闭合磁路, 磁压降的代数和等于磁动势的代数和。 F 与环流方向符合右手螺旋关系取正, Φ , H 与环流方向一致取正, 否则为负。

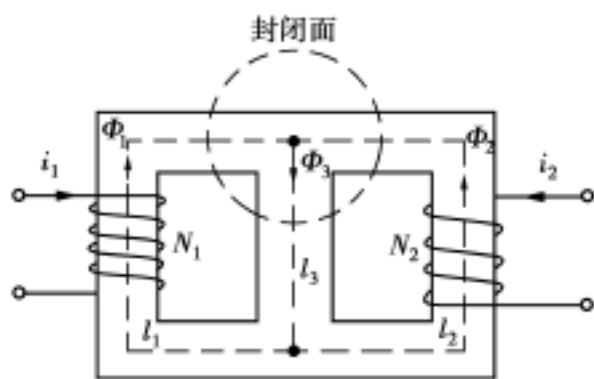


图 0-6 有分支磁路

在图 0-6 中, 沿 l_1 、 l_2 组成的闭合磁路, 则有 $F_1 - F_2 = N_1 i_1 - N_2 i_2 = H_1 l_1 - H_2 l_2 = \Phi_1 R_{m1} - \Phi_2 R_{m2}$ 。

可见, 磁路与电路, 其物理量和基本定律有一一对应的关系, 见表 0-1。

应该指出, 由于磁路与电路物理本质不同, 即磁路是有限范围内的磁场, 电路是有限范围内的电场, 所以二者存在一定差别, 具体表现为: ①电路中可以有电动势无电流, 磁路中有磁动势必然有磁通; ②电路中有电流就有功率损耗 ($I^2 R$); 而在恒定磁通下, 磁路中无损耗; ③由于 $G_{\text{导}}$ 约为 $G_{\text{绝}}$ 的 10^{20} 倍, 而 μ_e 仅为 μ 的 $10^3 \sim 10^4$ 倍, 故可认为电流只在导体中流过, 而磁路中除主磁通外还必须考虑漏磁通; ④电路中电阻率 ρ 在一定温度下恒定不变, 而由铁磁材料构成的磁路中, 磁导率 μ 随 B 变化, 即磁阻 R_m 随磁路饱和度增加而增大。

表 0-1 磁路和电路的对比

电 路		磁 路	
基本物理量及公式	单位	基本物理量及公式	单位
电流 i	A	磁通 Φ	Wb
电动势 e	V	磁动势 F	A
电压降 u	V	磁压降 $\Phi R_m = Hl$	A
电阻 $R = \rho \frac{l}{A}$	Ω	磁阻 $R_m = \frac{l}{\mu A}$	1/H
电导 $G = \frac{1}{R}$	S	磁导 $\Lambda_m = \frac{1}{R_m}$	H
欧姆定律 $i = \frac{e}{R}$		$\Phi = \frac{F}{R_m} = \Lambda_m F$	
基尔霍夫第一定律 $\sum i = 0$		$\sum \Phi = 0$	
基尔霍夫第二定律 $\sum e = \sum u$		$\sum F = \sum Hl = \sum \Phi R_m$	

0.3.4 电磁感应定律

无论何种原因当与线圈交链的磁链 ψ 随时间变化时, 线圈中将感应电动势 e 。 e 的大小等于线圈所交链的磁链对时间的变化率, e 的方向应符合楞次定律, 即若该电动势产生一个电流, 此电流产生的磁通将反对线圈中磁链的变化。若规定感应电动势的正方向与磁通的正方向符合右手螺旋关系, 则电磁感应定律的数学描述可表示为:

$$e = - \frac{d\psi}{dt} = - N \frac{d\Phi}{dt} \quad (0-9)$$

式中 N ——线圈的匝数;

Φ ——穿过线圈的磁通。

1) 变压器电动势 若线圈不动, 穿过线圈的磁通随时间变化, 则线圈中感应的电动势称为变压器电动势, 见图 0-7 中的 e_1, e_2 。

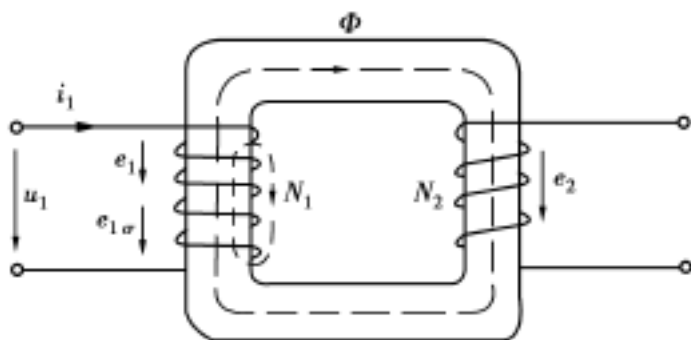


图 0-7 变压器电动势

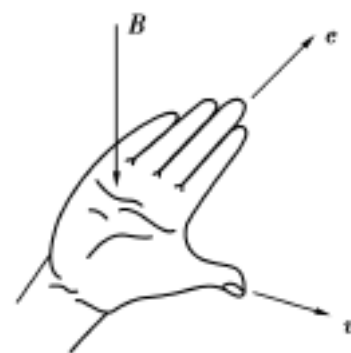


图 0-8 右手定则

若与线圈交链的磁通是由线圈自身流过的交变电流产生的, 则感应电动势称自感电动势, 如图 0-7 中的 e_1 , 可表示为

$$e_1 = e_L = - N_1 \frac{d\Phi_1}{dt} = - L \frac{di_1}{dt} \quad (0-10)$$

式中 L ——自感系数。

$$L = \frac{\Psi_1}{i_1} = \frac{N_1 \Phi_1}{i_1} = N_1^2 \frac{\Phi_1}{N_1 i_1} = N_1^2 \Lambda_m$$

若与线圈交链的磁通是由其他线圈流过的交变电流产生的, 则感应电动势称互感电动势, 如图 0-7 中的 e_2 , 可表示为

$$e_2 = e_M = - N_2 \frac{d\Phi_1}{dt} = - M \frac{di_1}{dt} \quad (0-11)$$

式中 M ——互感系数。

$$M = \frac{\Psi_2}{i_1} = \frac{N_2 \Phi_1}{i_1} = N_1 N_2 \frac{\Phi_1}{N_1 i_1} = N_1 N_2 \Lambda_m$$

Λ_m 为 Φ_1 所经磁路的磁导。

2) 运动电动势(速率电动势) 若磁场恒定, 构成线圈的导体切割磁力线, 使线圈交链的磁链随时间变化, 导体中的感应电动势称运动电动势。若磁力线、导体和运动方向三者相互垂直, 则导体中感应电动势的大小为导体所在处的磁通密度 B 与导体切割磁力线的有效长度 l 及导体相对磁场运动的线速度 v 三者之积。即

$$e = Blv \quad (0-12)$$

感应电动势的方向由图 0-8 所示的右手定则确定。

0.3.5 电磁力定律

载流导体在磁场中要受到力的作用, 该力被称为电磁力。其大小在导体与磁力线相垂直时等于导体所在处磁场的磁通密度 B 与导体有效长度 l 及导体中的电流 i 三者的乘积, 即

$$f = Bli \quad (0-13)$$

电磁力的方向由图 0-9 所示左手定则确定。

在旋转电机中, 作用在转子载流导体上的电磁力将使转子受到一个力矩(等于力乘转子半径), 即电磁转矩。电磁转矩是电机实现机电能量转换的重要物理量。

0.3.6 能量守恒定律

电机是能量转换机械, 在能量转换过程中电机自身消耗的功率称损耗, 稳态运行时, 必然存在输入功率 P_1 等于输出功率 P_2 与所有损耗 $\sum p$ 之和, 即

$$P_1 = P_2 + \sum p \quad (0-14)$$

上述定律是建立电机运行时基本方程式的理论依据。

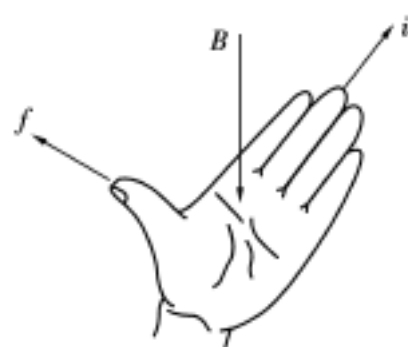


图 0-9 左手定则

0.4 电机中的损耗及电机的发热和冷却

0.4.1 电机中的损耗

电机运行时, 导体中电流产生的电阻损耗 $I^2 R$ 称为铜耗 p_{Cu} ; 铁心中交变磁通产生的磁滞损耗和涡流损耗称为铁耗 p_{Fe} , 其大小与铁心的材料、 B_m^2 及交变频率有关; 转动部分与轴承、电刷及空气间的摩擦损耗称为机械损耗 p_{mec} , 其大小与电机结构及转速有关; 由于齿槽存在, 谐波, 漏磁等因素而引起的额外损耗称为附加损耗 p_{ad} , 其大小与电机型式、容量有关。因此, 电机中总损耗记为 $\sum p$

$$\sum p = p_{Cu} + p_{Fe} + p_{mec} + p_{ad} \quad (0-15)$$

上述损耗一方面降低了电机的运行效率, 一方面转变成热能, 使电机发热, 温度升高。

0.4.2 电机的发热

电机中各种损耗转变的热能, 使电机的温度升高。电机温度升高后, 便通过辐射和对流作用向周围散发热量。当产生的热量等于电机吸收的热量与散发出去的热量之和时, 电机的温度便不再上升而达到某一稳定数值, 此值与周围冷却介质温度之差, 称为温升(单位为 K)。

电机中使用的各种绝缘材料, 都有一定的最高允许工作温度(单位为 $^{\circ}\text{C}$), 在该温度极限内长期工作时, 绝缘材料的电性能、机械性能和化学性能都不会显著变坏, 通常可保证 20 年的寿命。若超过此温度, 绝缘材料会因迅速老化而使性能变坏, 严重时可被烧毁, 造成电机的损坏。

当电机所用绝缘材料的等级确定后, 电机的最高允许温度也就确定了, 其温升限值则取决于冷却介质的温度, 即环境温度。为了制造全国各地全年都适用的电机, 国家标准规定, 环境空气温度为 40°C 。

电机的温升不仅取决于损耗的大小和散热情况, 还与电机的工作方式有关。制造厂按国家标准的要求对电机的全部电量和机械量的数值以及运行的持续时间和顺序所作的规定称为电机的定额。在规定的电量和机械量数值下, 按运行的持续时间和顺序分为: ①连续定额, 即不受时间限制地长期连续运行; ②短时定额, 即从冷态开始在规定的持续时间限值内运行(标准持续时间有 10、30、60 及 90 分钟 4 种); ③周期工作定额, 即长期在一系列完全相同的周期内运行, 每个周期包括一个额定负载时间和一个停机或空载时间, 额定负载时间与整个周期之比称为负载持续率(标准负载持续率有 15%、25%、40% 及 60% 4 种, 每个周期为 10 分钟)。电机应按规定的定额运行, 才能保证它的温升不超过允许温升限值。若把短时或周期工作定额的电机用来长期运行, 则其温升将大大超过允许限值而损坏电机。

0.4.3 电机的冷却

电机的冷却决定了电机的散热能力及电机的温升, 从而直接影响电机的寿命和额定容量。电机冷却的主要问题是确定冷却介质和冷却方式。

冷却介质是指能够直接或间接地带走电机中所产生的热量的物质, 通常有空气、氢气、水