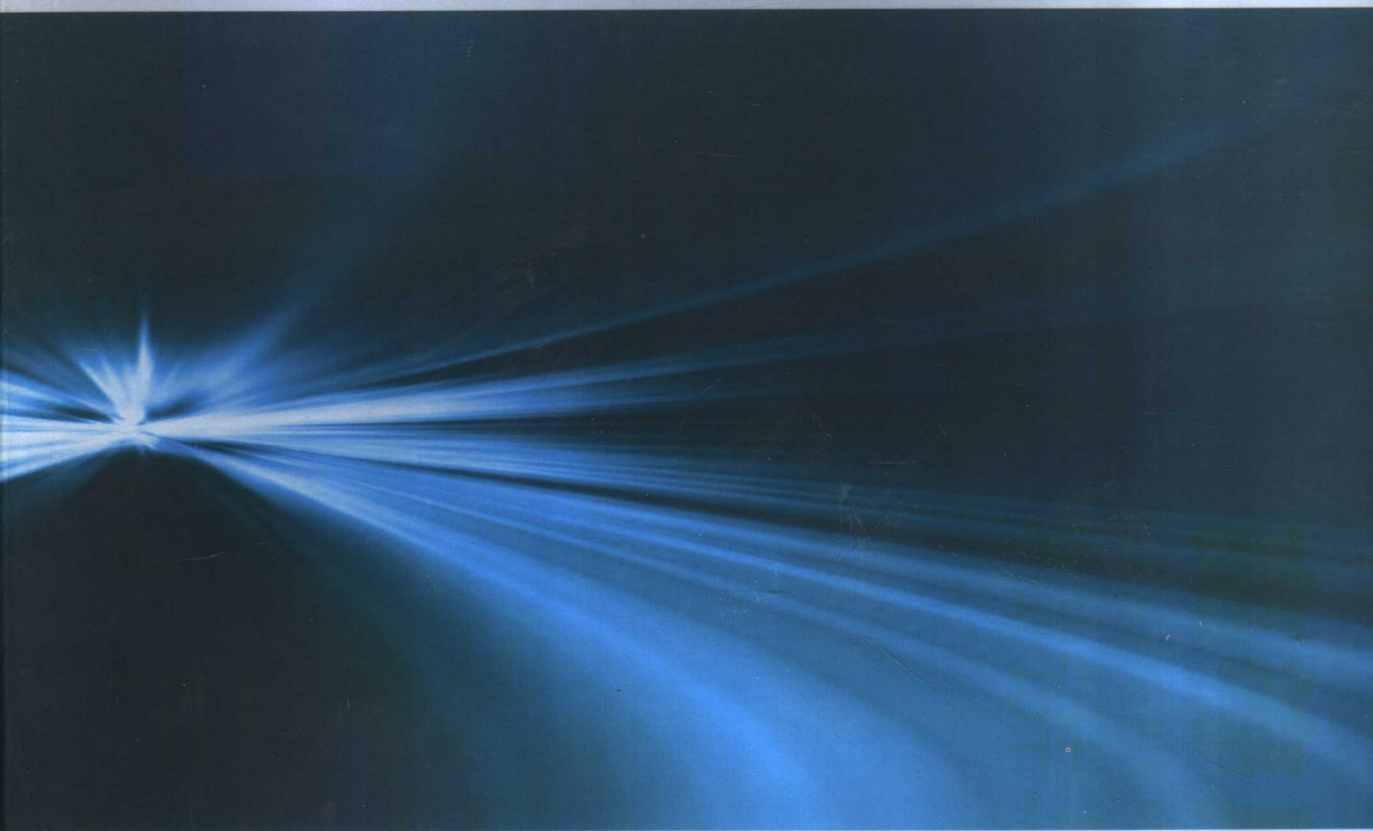


电机及电力 拖动基础

主编 宋起超 乔 爽



哈尔滨地图出版社

电机及电力拖动基础

DIANJI JI DIANLI TUODONG JICHU

主 编 宋起超 乔 爽

副主编 商 进 赵洪涛

主 审 朱传辉

哈尔滨地图出版社

• 哈尔滨 •

图书在版编目·CIP·数据

电机及电力拖动基础/宋起超, 乔爽主编. —哈尔滨:
哈尔滨地图出版社, 2006.12
ISBN 7-80717-322-X

I. 电… II. ①宋…②乔… III. ①电机②电力传
动 IV. ①TM3②TM921

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 043652 号

哈尔滨地图出版社出版发行

(地址: 哈尔滨市南岗区测绘路 2 号 邮编: 150086)

哈尔滨庆大印刷厂印刷

开本: 850 mm × 1 168 mm 1/32 印张: 18 字数: 400 千字

2006 年 12 月第 1 版 2006 年 12 月第 1 次印刷

印数: 1 ~ 500 定价: 25.80 元

内 容 提 要

本书系统地论述了电机及电力拖动系统的整体功能和相关的技术知识，重点介绍了电机及电力拖动系统的组成和结构、系统的设计和计算以及系统运行。本书共分 13 部分，包括磁路、变压器、特殊变压器、直流电机、电力拖动系统的动力学基础、直流电动机的电力拖动、交流电机绕组电动势和磁动势、感应电机、三相异步电动机的电力拖动、同步电动机、控制电机、电力拖动系统中的电动机的选择、附录（实验）部分。

本书注重理论联系实际。理论知识力求全面、深入浅出和通俗易懂；实践技能注重实用性、可操作性和有针对性。同时重视介绍和反映现代的新设备和新技术。每章都附有思考题和习题。

本书可作为应用型本科高等学校、高职高专院校电气工程、电机、自动化、供电技术、智能建筑、楼宇自动化等专业的教材，也可供函授学院、广播电视大学、职工大学以及从事电机和电力系统或其他相关行业的技术人员参考使用。

前 言

本书是依照我国颁布的各种电机拖动标准,根据专业的要求,并结合电机及其电力拖动技术的最新发展和实用技术编写的专业教材。

本书共分 13 部分,包括磁路、变压器、特殊变压器、直流电机、电力拖动系统的动力学基础、直流电动机的电力拖动、交流电机绕组电动势和磁动势、感应电机、三相异步电动机的电力拖动、同步电动机、控制电机、电力拖动系统中的电动机选择、附录(实验)部分。在内容编写上,按照培养学生的一般能力和专业能力相结合、基础知识和创新意识相并重的原则,力求做到“保证基础、加强应用、体现先进”。

本书由宋起超、乔爽共同担任主编,由宋起超负责统稿,其中,第一章至第三章及第十二章由宋起超编写,编写部分为 10.5 万字;第七章至第十章由乔爽编写,编写部分为 11 万字;第四章至第六章及第十一章由商进编写,编写部分为 10 万字;附录的实验部分由赵洪涛编写,编写部分为 7 万字。

本书由朱传辉副教授主审。东北林业大学张建老师和黑龙江科技学院黄耀群老师参与了部分章节的编写工作。我们的家人在书稿的编写过程中给予了极大的帮助,并提出了大量的意见和建议,谨在此表示衷心的感谢!

由于编者水平有限,书中难免有错漏之处,敬请同行、师生和广大读者批评指正。

编 者

2006 年 12 月

主要符号表

A	面积; A 相	F_a	电枢磁动势
a	交流绕组并联支路数; a 相; 120° 复数算子	F_m	感应电机的激磁磁动势
a_m	直流电机并联支路对数	F_{ad}	直轴电枢磁动势
B	磁通密度; B 相	F_{aq}	交轴电枢磁动势
B_δ	气隙磁密	$F_{\phi 1}$	单相绕组的基波磁动势
B_{ad}	直轴电枢磁场磁密	F_ν	单相绕组的 ν 次谐波磁动势
B_{aq}	交轴电枢磁场磁密	F_{q1}	q 个线圈的基波合成磁动势
b	宽度; b 相; 磁通密度瞬时值	f	频率; 力; 磁动势的瞬时值
C	C 相	f_1	定子频率
C_T	转矩常数	f_2	转子频率
C_e	电动势常数	f_N	额定频率
c	比热容; c 相	f_ν	ν 次谐波频率
D_1	定子内径	H	磁场强度
D_a	电枢外径	I	电流 (交流表示有效值); 同步电机的 电枢电流; 直流电机的线路电流
E	电动势 (交流表示有效值)	I_a	直流电机的电枢电流
E_ϕ	相电动势	I_m	交流激磁电流
E_0	空载电动势	I_f	直流励磁电流
E_1	变压器一次绕组 (电机定子绕组) 由主磁通感应的电动势有效值	I_μ	激磁电流中的磁化分量
E_2	变压器二次绕组 (电机转子绕组) 由主磁通感应的电动势有效值	I_N	额定电流
E_2'	E_2 的归算值	I_0	空载电流; 零序电流
E_q	q 个线圈的合成电动势	I_K	短路电流; 堵转电流
e	电动势的瞬时值	I_{st}	起动电流
e_c	换向电动势; 线圈电动势	I_1	变压器一次绕组 (感应电机定子) 电流
F	磁动势	I_2	变压器二次绕组 (感应电机转子) 电流

I_2	I_2 的归算值	n_2	转子基波旋转磁场相对于转子的转速
I_+	电流的正序分量	Δn	转速调整率
I_-	电流的负序分量	P	功率
i	电流的瞬时值	P_N	额定功率
J	转动惯量	P_e	电磁功率
K	换向片数	P_Ω	转换功率
k	变压器的电压比	P_K	堵转功率; 短路功率
k_i	电流比	P_1	输入功率
k_e	电动势比	P_2	输出功率
k_{d1}	基波分布因数	P_0	空载功率
k_{p1}	基波节距因数	p	损耗、极对数; 时间的微分算子
k_{w1}	基波绕组因数	p_0	极对数
k_{dv}	v 次谐波的分布因数	P_{cu}	铜耗
k_{pv}	v 次谐波的节距因数	P_{Fe}	铁耗
k_{wv}	v 次谐波的绕组因数	P_Δ	杂散损耗
L	自感	P_Ω	机械损耗
$L_{1\sigma}$	变压器一次绕组 (感应电机定子) 的漏磁电感	Q	槽数、热量
l	长度	q	每极每相槽数
M	互感	R	电阻
m_1	交流电机定子相数	R_m	激磁电阻; 磁组
m_2	感应电机转子相数	R_1	变压器一次绕组 (感应电机定子) 电阻
N	每相串联匝数	R_2	变压器二次绕组 (感应电机转子) 电阻
n	转子转速	R_2'	R_2 的归算值
n_N	额定转速	R_f	励磁绕组电阻
n_0	空载转速	R_a	电枢电阻
n_s	同步转速	R_k	变压器 (感应电机) 的短路电阻
n_γ	v 次谐波旋转磁场的转速数	R_Ω	旋转阻力系数
		S	视在功率

S_N	额定视在功率	Δu	电压调整率
s	转差率	$2\Delta U_s$	每对电刷的电压降
s_N	额定转差率	W	功; 能
s_m	最大转矩时的转差率	W_m	磁场能量
s_+	转子对正向旋转磁场的转差率	X	电抗
s_-	转子对反向旋转磁场的转差率	X_a	电枢反应电抗
T	转矩; 时间常数; 周期	X_+	正序电抗
T_c	换向期	X_-	负序电抗
T_d'	直轴瞬态时间常数	X_0	零序电抗
T_a	电枢时间常数	X_{ad}	直轴电枢反应电抗
T_f	励磁绕组时间常数	X_{aq}	交轴电枢反应电抗
T_N	额定转矩	X_σ	定子漏抗
T_0	空载转矩	X_s	同步电抗
T_e	电磁转矩	X_d	直轴同步电抗
$T_{\max}$	最大转矩	X_q	交轴同步电抗
T_{pi}	同步电动机的牵入转矩	X_m	激磁电抗
T_{st}	起动转矩	X_k	短路电抗
T_2	负载转矩	$X_{1\sigma}$	变压器一次绕组(感应电机定子)漏抗
t	时间; 温度	$X_{2\sigma}$	变压器二次绕组(感应电机转子)漏抗
U	电压(交流表示有效值)	$X_{2\sigma}'$	$X_{2\sigma}$ 的归算值
U_N	额定电压	X_d'	直轴瞬态电抗
U_ϕ	相电压	X_d''	直轴超瞬态电抗
U_1	电源电压; 定子端电压	y	绕组合成节距
U_+	正序电压	y_1	第一节距
U_-	负序电压	y_2	第二节距
U_0	空载电压; 零序电压	y_c	换向器节距
U_k	短路电压; 堵转电压	Z	阻抗; 电枢导体数
u	电压的瞬时值	Z_m	激磁阻抗

Z_k	短路阻抗	μ_{Fe}	铁心磁导率
Z_+	正序阻抗	ν	谐波次数
Z_-	负序阻抗	τ	极距
Z_0	零序阻抗	Φ	磁通量
$Z_{1\sigma}$	变压器一次绕组（感应电机定子） 漏阻抗	Φ_0	空载磁通；同步电机的主磁通
$Z_{2\sigma}$	变压器二次绕组（感应电机转子） 漏阻抗	Φ_a	电枢反应磁通
$Z'_{2\sigma}$	$Z_{2\sigma}$ 的归算值	Φ_m	变压器或感应电机的主磁通
α	角度；相邻两槽间的电角度	Φ_σ	漏磁通
β	夹角； q 个线圈的总夹角	Φ_{ad}	直轴电枢反应磁通
δ	气隙；功率角	Φ_{aq}	交轴电枢反应磁通
ε	小数；短距角	Φ_ν	ν 次谐波磁通
η	效率	ϕ	磁通量的瞬时值
η_N	额定效率	φ	相角；功率因数角
$\eta_{\max}$	最大效率	φ_0	空载功率因数角
θ	温升；角度	φ_k	短路功率因数角
Λ	磁导	ψ	磁链； $\dot{E}$ 和 $\dot{I}$ 间的夹角
Λ_σ	漏磁导	ψ_0	内功率因数角
λ	单位面积的磁导；导热系数	ψ_2	感应电机转子的内功率因数角
μ	磁导率；转子谐波次数	Ω	转子的机械角速度
μ_0	空气磁导率	Ω_s	同步机械角速度
		ω	角频率；电角速度

目 录

绪论	1
第一章 磁路	3
第一节 磁路的基本物理量	3
第二节 磁性材料的磁性能	5
第三节 磁路及其基本规律	8
第四节 铁心线圈	11
思考题和习题	15
第二章 变压器	18
第一节 变压器的结构及其分类	18
第二节 变压器的工作原理及空载运行	21
第三节 变压器的负载运行	26
第四节 变压器参数的试验测定	32
第五节 变压器的运行特性	34
第六节 三相变压器	37
第七节 变压器的铭牌	42
第八节 变压器的维护及故障分析	43
思考题和习题	47
第三章 特殊变压器	50
第一节 三绕组变压器	50
第二节 自耦变压器	52
第三节 仪用互感器	55
第四节 电焊变压器	57
第五节 磁性调压器	58
思考题和习题	61
第四章 直流电机	63
第一节 直流电机的基本工作原理	63
第二节 直流电机的主要结构	65
第三节 直流电机的电枢绕组	68
第四节 直流电机的磁场	75
第五节 直流发电机	79
第六节 直流电动机	83
第七节 直流电机的换向	87
思考题和习题	91
第五章 电力拖动系统的动力学基础	92
第一节 生产机械的典型负载转矩特性	92
第二节 电力拖动系统的运动方程式	94

思考题和习题	96
第六章 直流电动机的电力拖动	97
第一节 他励直流电动机的机械特性	97
第二节 他励直流电动机的起动	100
第三节 他励直流电动机的调速	103
第四节 他励直流电动机的制动	106
思考题和习题	113
第七章 交流电机绕组电动势和磁动势	115
第一节 交流电机绕组和感应电动势	115
第二节 交流电机绕组的磁动势	127
思考题和习题	131
第八章 感应电机	133
第一节 感应电机的基本结构和工作原理	133
第二节 感应电机的运行原理	138
第三节 感应电机的基本方程式	145
第四节 感应电机的工作特性	151
思考题和习题	152
第九章 感应电动机的电力拖动	154
第一节 感应电动机的机械特性	154
第二节 笼型异步电动机的起动	159
第三节 绕线转子异步电动机的起动	161
第四节 三相异步电动机的调速	164
第五节 三相异步电动机的制动	168
思考题和习题	172
第十章 同步电动机	174
第一节 同步电动机的基本结构和工作原理	174
第二节 同步电动机的电势平衡方程式及向量图	175
第三节 同步电动机的功角特性	176
第四节 同步电动机的起动	177
思考题和习题	178
第十一章 控制电机	180
第一节 测速发电机	180
第二节 伺服电动机	184
第三节 自整角机	189
第四节 步进电动机	193
思考题和习题	196
第十二章 电力拖动系统中的电动机选择	198
第一节 电动机类型、电压、转速及型式的选择	198

第二节	电动机发热及冷却过程	202
第三节	电动机的工作制	207
第四节	电动机容量的选择	211
	思考题和习题	218
附录		220
实验一	直流认识实验	220
实验二	直流并励电动机	226
实验三	直流他励电动机的机械特性	232
实验四	单相变压器	237
实验五	三相变压器	245
实验六	三相异步电动机机械特性	253
实验七	三相异步电动机的起动及调速	259
实验八	步进电动机	264
参考文献		273

绪 论

一、电机及电力拖动发展概述

1820 年奥斯特发现了电流在磁场中受力的物理现象,随后由安培对这种现象进行了科学的总结,发现了磁路定律及全电流定律。在此基础上人们在实验室里制成了直流电动机的模型。1831 年法拉第发现了电磁感应定律,为生产制造各种发电机提供了依据。随后制成了直流发电机,替换了价格昂贵的电池,为直流电动机的广泛应用提供了电源。可见在电机与电力拖动发展史上首先得到应用的是直流电机。1871 年凡麦尔发明了交流发电机。1878 年亚布洛契可夫用交流发电机和变压器为他发明的照明装置供电。1885 年意大利物理学家费拉利斯发现了两相电流可以产生旋转磁场。一年以后费拉利斯和在美国的坦斯拉几乎同时制成了两相感应电动机的模型。

1888 年多里沃多勃罗沃尔斯提出了三相制,并制成了三相感应电动机,奠定了三相电路和三相电机的基础。此后三相交流电迅速地发展起来,到 20 世纪初,各种三相交流电动机均已设计制造成功。进入 20 世纪以后,人们在降低电机成本,减小电机尺寸,提高电机性能,选用新型电磁材料,改进电机生产工艺等方面进行了大量工作,使现代电机与 20 世纪初的电机有很大差别。

我国的电机工业,从新中国成立以来的 50 多年间,建立了独立自主的完整体系。早在 1965 年我国就研制成功当时世界上第一台 125 kW 双水内冷汽轮发电机,显示了我国电机工业的迅速掘起。近些年来,随着对电机新材料的研究并在电机设计、制造工艺中利用计算机技术,普通电机的性能更好、运行更可靠;而控制电机的高可靠性、高精度、快速响应使控制系统完成各种人工无法完成的快速复杂的精巧工作。

在现代化工业生产过程中,为了实现各种生产工艺过程,需要使用各种各样的生产机械。拖动各种生产机械运转,可以采用气动、液压传动和电力拖动。由于电力拖动具有控制简单,调节性能好、损耗小、经济、能实现远距离控制和自动控制等一系列优点,因此大多数生产机械均采用电力拖动。按照电动机的种类不同,电力拖动系统分为直流电力拖动系统和交流电力拖动系统两大类。

电力拖动的发展过程,交、直流两种拖动方式并存于各生产领域,各时期科学技术的发展水平不同,它们所处的地位也有所不同。在交流电出现以前,直流电力拖动是惟一的一种电力拖动方式。随着经济实用交流电动机的研制成功,使交流电力拖动在工业中得到了广泛的应用。但是随着生产技术的发展,特别是精密机械加工与冶金工业生产过程的进步,对电力拖动在启动、制动、正反转以及调速提出了新的、更高的要求。由于交流电力拖动比直流电力拖动在技术上难以实现这些要求,所以 20 世纪以来,在可逆、可调速与高精度的拖动领域中,在相当长一个时期内几乎都是采用直流电力拖动,而交流电力拖动则主要用于恒转速系统。

虽然直流电动机具有调速性能优异这一突出优点,但是由于它具有电刷与换向器,这使得它

的故障率较高，电动机的使用环境受到限制（如不能在有易燃、易爆气体及尘埃多的场合使用），其电压等级、额定转速、单机容量的发展也受到限制，所以在 20 世纪 60 年代以后，随着电力电子技术的发展，交流调速的不断进步和完善，在调速性能方面由落后状态发展到可与直流调速相媲美。今天，交流调速在很多场合已取代直流调速。在不远的将来，交流调速将完全取代直流调速，可以说这是一种必然的发展趋势。

电机是利用电磁感应原理工作的机械，它应用广泛，种类繁多，性能各异，分类方法也很多。常见的分类方法为：按功能用途分，可分为发电机、电动机、变压器和控制电机 4 大类。

按照电机的结构或转速分类，可分为变压器和旋转电机。根据电源的不同，旋转电机又分为直流电机和交流电机两大类。交流电机又分为同步电机和异步电机两类。

二、本课程的性质、任务和内容

本课程是电气自动化控制、供用电技术和机电一体化等专业的一门专业基础课。它是将“电机学”、“电力拖动”和“控制电机”等课程有机结合而成的一门课。

本课程的任务是使学生掌握变压器、交直流电机及控制电机的基本结构和工作原理以及电力拖动系统的运行性能、基本分析计算、电机选择及试验方法，为学习后续课程和今后的工作打下必要的基础，同时也培养学生在电机及电力拖动方面分析问题和解决问题的能力。

本课程的内容有直流电机，直流电动机的电力拖动，变压器，三相交流异步电动机，三相交流异步电动机的电力拖动，单相异步电动机，同步电机，控制电机，电动机的选择等。

第一章 磁 路

电机是通过电磁感应原理来实现能量变换的机械。因此,电和磁是构成电机的两大要素,缺一不可。电在电机中主要是以路的形式出现。即由电机内的线圈(或绕组)构成电机的电路。磁在电机中是以场的形式存在的,一般工程分析计对,常把磁场简化为磁路来处理,而其准确度也已满足要求。与电路相比,磁路方面的理论知识也需要掌握。

第一节 磁路的基本物理量

磁场是由磁体(或电流)生成的。描述磁场的物理量很多,其中反映磁场基本特征的物理量主要是磁感应强度、磁通、磁导率以及引出量磁场强度。

一、磁感应强度 B

磁感应强度 B 是表征磁场性质的基本物理量之一,是矢量,反映的是介质磁场中某点的磁场强弱及其方向。它的大小由下面式子确定,如图 1-1 所示。上式表明,磁感应强度的大小由介质磁场中某点磁场作用于 1 m 长、通 1 A 电流的载流导体时,在垂直于磁场的方向上所受力的大小来衡量;磁感应强度的方向与产生磁场的电流呈右手螺旋定则(或右手定则)关系。

$$B = \frac{F}{ql \sin \alpha} = \frac{F}{Il \sin \alpha} \quad (1-1)$$

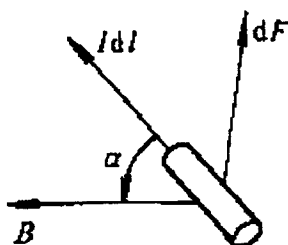


图 1-1 F 、 B 、 I 的关系

如果某电流的磁场,其磁感应强度的大小和方向处处相同,称这种磁场为均匀磁场, B 的单位是特斯拉(T);工程制单位是高斯(Gs)。二者的关系为 $1\text{ T} = 10^4\text{ Gs}$ 。

二、磁通 Φ

磁通是表征磁场性质的另一个基本物理量,是矢量,反映的是磁场中某一截面 S 内磁场的强弱和方向。它的大小指的是磁力线垂直穿过截面 S 时的磁感应强度通量,由式子

$$\phi = BSC \cos \beta \quad (1-2)$$

确定,如图 1-2 所示。由此来看, B 也属于磁通密度。磁通的方向与 B 的方向一致。 Φ 的单位是

韦伯(Wb), 工程制单位是麦克斯韦(Mx)。二者的关系为 $1\text{Wb}=10^8\text{Mx}$ 。如果是非均匀磁场, 式(1-2)中的磁感强度 B 应取平均值。

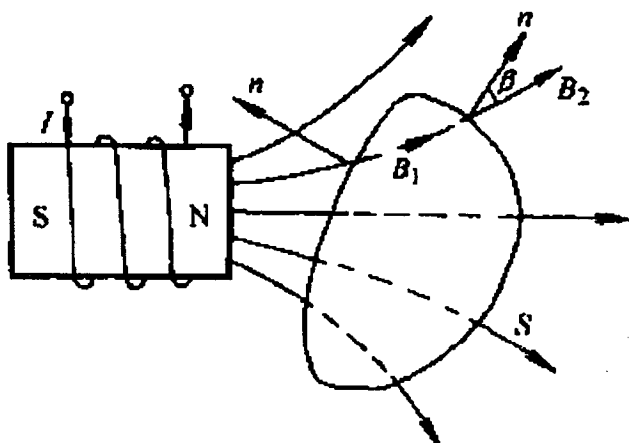


图1-2 Φ 、 B 、 S 的关系

三、磁导率 μ

磁导率 μ 是表征物质导磁能力的物理量, 是标量。 μ 的单位是亨/米(H/m)。自然界的物质按照它们对磁的敏感程度, 可以分为两大类: 磁性物质和非磁性物质。实验测出, 真空(或空气)的导磁能力极弱, 其磁导率是一个常数, 数值为

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

其他物质的导磁性能用相对磁导率 μ_r 来表示。 μ_r 定义: 任一物质的磁导率 μ 和真空磁导率 μ_0 的

比值称为此物质的相对磁导率, 即 $\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$ 。

注: (1)非磁性物质: 对磁极不敏感, 几乎没有导磁能力, μ 很小, 接近于 $\mu_r \mu_0 \approx 1$ 。

(2)磁性物质: 对磁非常敏感, 有极强的导磁能力, μ 很高, μ_r 也相当大, 高达 10^2 , 若 $\mu_r \gg 1$ 时, 对应的物质称铁磁性物质。

磁性物质如果处在电流磁场中, 对电流的磁场会产生极大的影响。

四、磁场强度 H

磁场强度 H 是为了分析和计算磁路的方便而引入的一个物理量, 是矢量。反映的是电流产生的磁场中某点磁场的强弱和方向。它的大小由安培环路定律(又称全电流定律)确定, 即

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

式(1-4)的含义是: 电流产生的磁场中, 磁场强度 H 沿任意闭合磁力线的线积分等于穿过该闭合磁力线的所有电流的代数和。其中电流的正负取值规定如下: 先假设某绕向为沿闭合磁力线积分的方向, 凡是与该绕向符合右手螺旋定则的电流取“+”; 与该绕向不符合右手螺旋定则的电流取

“”。

H 的方向与 B 的方向一致。 H 的单位是安/米(A/m)。

注:

(1)由式(1-4)可知, H 的数值只与产生磁场的电流以及磁场的分布情况有关, 与磁场中有无磁介质无关。

(2) H 与 B 二者数值不等, 主要区别是: H 表示的是电流本身产生的磁场, 反映的是电流的励磁能力; B 表示的是电流磁场与磁介质磁化后具有的附加磁场合成后的总磁场, 其数值不仅与电流的大小有关, 而且与磁介质的磁导率有关。

(3) Φ 、 B 、 S 三者之间有一定的关系: 若磁力线与截面 S 垂直时, 假设所含介质磁导率为 μ , 则由 $\Phi=BS$, $B=\mu H$; 若含非磁性介质, 其磁导率为 μ_0 , 那么, $\Phi_0=B_0S_0$, $B_0=\mu_0 H_0$ 。

第二节 磁性材料的磁性能

一、铁磁材料

主要指铁、镍、钴及其合金, 磁性材料是构成磁路的主要材料。它们具有下列磁性能。

(一) 高磁导率

磁性材料的磁导率很高, 其中 $\mu_r \gg 1$, 可达数百、数千, 直至数万。这就使它们具有被强烈磁化的特性。铁磁材料的磁化特性可用磁畴理论来说明。我们知道电流产生磁场, 物质的分子中带电粒子在运动, 形成分子电流, 分子电流也要产生磁场。在铁磁材料内部还有许多很小的天然磁化区, 称为磁畴。在没有外磁场作用时, 各个磁畴排列混乱, 磁场互相抵消, 对外部显示不出磁性来, 如图 1-3a 所示。如果外磁场存在, 磁性材料的磁畴沿外磁场方向转向, 就显示出磁性来。随着外磁场的增强, 磁畴逐渐转到与外磁场相同的方向上, 如图 1-3b 所示。这样, 便产生了一个很强的与外磁场相同的磁化磁场, 而使磁性物质内的磁感应强度大大增加。这就是说磁性物质被强烈磁化了。

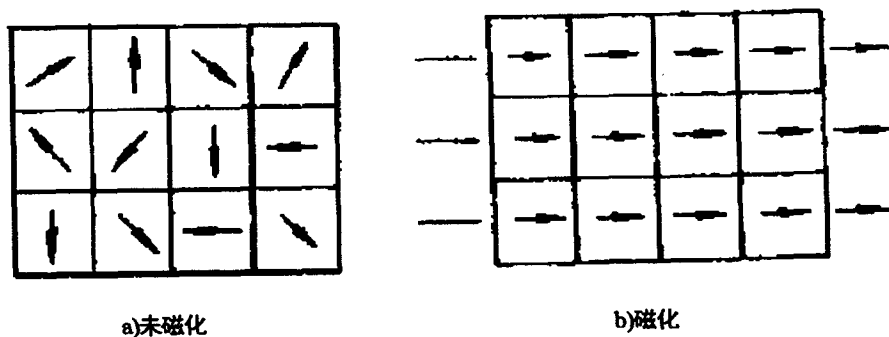


图 1-3 磁化物质的磁化

铁磁材料可被强烈磁化这一特性较广泛地应用于电工设备中, 电机、变压器及各种铁磁元件