

电机学教程

(第2版)

杨莉 陈瑛 张景明 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书主要论述电机学及其统一理论,全书包含绪论和6篇正文。前5篇涵盖了变压器、直流电机、异步电机、同步电机和特种电机的内容,对以上各类电机的基本结构、工作原理、运行性能和工作特性进行了详细的分析和论述。

本书特色分明,一改以往各种版本的《电机学》的编写模式,内容精简、编排合理、结构新颖,各种电机的分类一目了然。

此外,本书首次在《电机学》教材中对“电机统一理论”进行了论述,实现了对电机学理论的创新。

与本书同时出版的还有与之配套的学习指导书,书中不但附有全部的“习题解答”,还有“内容提要”“疑难剖析”“拾遗补阙”“习题补充”等针对性的学习指导内容,相信其对读者的学习会大为有益。

本书为电气工程及其自动化专业(含各专业方向)电机学课程教材,也可作为自动化及其他相关专业的电机原理课程的选用教材,还可供有关技术人员参考。

版权所有,侵权必究。举报电话:010-62782989,beiqinquan@tup.tsinghua.edu.cn。

图书在版编目(CIP)数据

电机学教程/杨莉,陈瑛,张景明编著.—2版.—北京:清华大学出版社,2022.11

ISBN 978-7-302-60576-8

I. ①电… II. ①杨… ②陈… ③张… III. ①电机学—高等学校—教材 IV. ①TM3

中国版本图书馆CIP数据核字(2022)第064251号

责任编辑:佟丽霞 赵从棉

封面设计:常雪影

责任校对:赵丽敏

责任印制:沈 露

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座

邮 编:100084

社 总 机:010-83470000

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:三河市君旺印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:20.75

字 数:502千字

版 次:2012年11月第1版 2022年11月第2版

印 次:2022年11月第1次印刷

定 价:59.80元

产品编号:087298-01

电机学是电气工程及其自动化专业一门重要的专业基础课。其教材虽然版本很多,在编写体系上却大都沿用旧时电机制造专业教材的编写方式,因此,已远不能满足宽口径的电气工程及其自动化专业中的各专业方向的共同要求。

此外,由于教学改革的需要,专业课的课程门类与学时数均已大幅精简。这样,课程内容与学时之间的矛盾日显突出,迫切需要一本能够解决上述矛盾,既在篇幅上大为精简,又在内容上涵盖更广的电机学教材。正是在这种背景下,本书对原版《电机学》教材进行了全新编著,并更名为《电机学教程》。

本书一改以往的编写方式,删去了大量的各种电机内部结构,以及各种电磁现象细节的描述,使全书内容精简,重点突出。

此外,本书还在结构上进行了重新编排,将以往版本《电机学》惯用的“四大电机”的编写形式,改为“五大类电机”的编写结构,即将原分散在“四大电机”内的各类特种电机集中编写在一篇中(取名为“特种电机”)。这样,既突出了“四大电机”这一电机学的主要内容,又使各种电机的分类一目了然。

虽然学界对“电机统一理论”的提法已有时日,但至今尚未见有关论著公开发表。戴文进教授首次提出了“电机统一理论”,相信这是电机学理论的一次创新,也是对电机理论发展做出的一点贡献。

全书共分6篇。其中,绪论、第3篇、第5篇由杨莉编写,第1篇、第2篇由陈瑛编写,第4篇由张景明编写,第6篇由戴文进编写。全书由杨莉统稿。在本书的编写过程中,得到了戴文进教授的大力支持和帮助,在此表示衷心的感谢。

本书所有编者虽都长期工作在电机学的教学第一线,且对该门课程的教学改革有一定体会,但毕竟水平有限,加之本书在结构体系和内容取舍上均作了较大改动,故书中谬误在所难免,敬请读者不吝指正。

编者

2022年8月于南昌大学

清华大学出版社

主要符号表

A	区域,面积	k_y	绕组分布系数
a	并联支路对数	k_μ	饱和系数
B	磁通密度,磁感应强度	L	自感,长度
B_δ	气隙磁通密度	L_m	励磁电感
C	电容	L_t	同步电感
C_e	电势常数	L_σ	漏电感
C_T	转矩常数	M	互感
E	开路电压,感应电动势	m	相数
E_1, E_2	一次(定子)绕组感应电动势,二次(转子)绕组感应电动势	N	匝数
E_σ	漏感应电动势	N_{eff}	每相有效匝数
F	磁动势	N_f	励磁绕组匝数
F_a	电枢反应磁动势	N_s	串励绕组匝数
F_{ad}	直轴电枢反应磁动势	n	机械转速
F_{aq}	交轴电枢反应磁动势	n_1	同步转速
f	机械力,电源频率	P	有功功率
f_s	转差频率	P_{cm}	电磁功率
H	磁场强度	P_{mec}	机械功率
I	电流相量的幅值;直流电流	P_{syn}	比整步功率
I_a	电枢电流	p	磁极对数
I_d	电流的直轴分量	p_{ad}	附加损耗
I_f	励磁电流	p_{Cu}	铜损耗
I_L	线电流,负载电流	p_{Fe}	铁损耗
I_q	电流的交轴分量	p_{mec}	机械损耗,摩擦和风阻损耗
I_ϕ	相电流	q	每极每相槽数
i	电流瞬时值	R_1	一次(定子)绕组电阻
J	电流密度	R_2	二次(转子)绕组电阻
k	变压器变比	R_2'	R_2 的折算值
k_A	自耦变压器变比	R_a	电枢绕组电阻
k_c	短路比	R_{as}	串励绕组电阻
k_M	静态过载倍数	R_m	励磁电阻,磁阻
k_N	绕组系数	S	视在功率
k_q	绕组短距系数	s	转差率
k_{st}	起动倍数	T	电磁转矩
		T_0	空载转矩

T_1	输入转矩	y_2	绕组第二节距
T_2	输出转矩	Z	交流绕组槽数
T_{syn}	比整步转矩	Z_1, Z_2	一次(定子)阻抗,二次(转子)阻抗
T_{st}	起动转矩	Z_m	励磁阻抗
t	时间,温度	α	槽距角,角度,电角度
U	电压	β	夹角,机械特性斜率
U_0	空载电压	δ	气隙
U_k	短路电压	ϵ	小数,误差
$X_{1\sigma}$	一次(定子)绕组漏电抗	η	效率
$X_{2\sigma}$	二次(转子)绕组漏电抗	θ	温升,功率角
X_a	电枢反应电抗	λ	单位面积磁导,导热系数
X_{ad}	直轴电枢反应电抗	μ	磁导率
X_{aq}	交轴电枢反应电抗	ν	谐波次数
X_d	直轴同步电抗	τ	极距
X_k	短路电抗	Φ	磁通
X_m	励磁电抗	Φ_0	励磁磁通
X_p	保梯电抗	Φ_δ	气隙磁通
X_q	交轴同步电抗	Φ_σ	漏磁通
X_t	同步电抗	Ψ	磁链,内功率因数角
X_σ	漏电抗	Ω	机械角速度
y	绕组合成节距	ω	角频率,电角速度
y_1	绕组第一节距	φ	相位角,阻抗角

第 0 章 绪论	1
0.1 电机总览	1
0.2 电磁理论基础	3
0.3 铁磁材料和磁路	6
0.4 电机制造材料	13
小结	15
习题	15
第 1 篇 变 压 器	
第 1 章 变压器概览	18
1.1 变压器的用途	18
1.2 变压器的分类与基本结构	19
1.3 变压器的额定值与标么值	22
小结	23
习题	23
第 2 章 变压器的运行分析	24
2.1 变压器的空载运行	24
2.2 变压器的负载运行	30
2.3 变压器的参数测定	34
2.4 变压器运行时的特性指标	38
小结	41
习题	41
第 3 章 三相变压器	43
3.1 三相变压器的磁路系统	43
3.2 三相变压器的电路系统	44
3.3 三相变压器的空载电动势波形分析	47

3.4 三相变压器的并联运行	48
小结	52
习题	52

第2篇 直流电机

第4章 直流电机概览	56
4.1 直流电机的用途和基本工作原理	56
4.2 直流电机的结构	57
4.3 直流电机的励磁方式	59
4.4 直流电机的额定值	60
小结	60
习题	61
第5章 直流电机的运行分析	62
5.1 直流电机的磁场	62
5.2 直流电机的电枢绕组	66
5.3 电枢绕组的感应电动势与电机的电磁转矩	69
5.4 直流电机运行的基本方程式	71
5.5 直流电机的换向问题	75
小结	76
习题	77
第6章 直流电机的运行特性	79
6.1 直流发电机的运行特性	79
6.2 直流电动机的机械特性和工作特性	84
6.3 直流电动机的起动、调速与制动	88
小结	94
习题	94

第3篇 异步电机

第7章 异步电机概览	98
7.1 异步电机的用途	98
7.2 异步电机的分类与基本结构	98
7.3 三相异步电动机的铭牌和额定值	101
小结	102
习题	103

第 8 章 三相异步电动机的运行原理	104
8.1 三相异步电动机定子绕组及其电动势	104
8.2 三相异步电动机定子绕组的磁动势	112
8.3 三相异步电动机的工作原理	115
8.4 三相异步电动机转子堵转时的电磁关系	118
8.5 三相异步电动机转子旋转时的电磁关系	123
小结	128
习题	129
第 9 章 三相异步电动机的运行特性	131
9.1 三相异步电动机的功率与转矩	131
9.2 三相异步电动机的机械特性与工作特性	134
9.3 三相异步电动机的参数测定	143
9.4 三相异步电动机的起动、调速与制动	145
小结	154
习题	154
第 4 篇 同步电机	
第 10 章 同步电机概览	158
10.1 同步电机的用途和分类	158
10.2 同步电机的基本结构	159
10.3 同步电机的额定值	160
小结	161
习题	162
第 11 章 同步发电机的运行分析	163
11.1 同步发电机的空载运行	163
11.2 同步发电机对称负载时的电枢反应	164
11.3 隐极同步发电机的对称负载运行分析	169
11.4 凸极同步发电机的对称负载运行分析	173
11.5 同步发电机的空载和短路特性	177
11.6 同步发电机的零功率因数负载特性	180
11.7 外特性和调整特性	182
小结	184
习题	185

第12章 同步发电机的并网运行	188
12.1 同步发电机的并联条件和方法	188
12.2 同步发电机的平衡方程式和功角特性	190
12.3 同步发电机有功功率的调节和静态稳定	194
12.4 同步发电机无功功率的调节和V形曲线	197
小结	200
习题	202
第13章 同步电动机与同步调相机	205
13.1 同步电机的可逆原理	205
13.2 同步电动机的电动势方程式和相量图	206
13.3 同步电动机的功角特性和功率平衡方程式	207
13.4 同步电动机无功功率的调节和V形曲线	207
13.5 同步电动机的起动	208
13.6 同步调相机	209
小结	209
习题	210
第5篇 特种电机	
第14章 中小型特种电机	214
14.1 无换向器电动机	214
14.2 转供电式三相并励交流换向器电动机	220
14.3 电磁转差调速异步电动机	225
14.4 直线电机	226
14.5 开关磁阻电动机	229
14.6 特种变压器的运行分析	233
小结	239
习题	240
第15章 微电机	242
15.1 驱动微电机	242
15.2 控制微电机	252
小结	280
习题	280

第6篇 电机统一理论

第16章 基本电磁规律的对立统一	284
16.1 电动机中的情形	284
16.2 发电机中的情形	285
16.3 变压器中的情形	286
小结	291
习题	292
第17章 励磁系统方式的分类统一	293
17.1 单边励磁磁路的特点	293
17.2 双边励磁磁路的特点	296
小结	298
习题	298
第18章 功角平面分布的完美统一	299
18.1 同步电机稳定运行时的功率角区间	299
18.2 异步电机稳定运行时的功率角区间	301
18.3 直流电机稳定运行时的功率角	302
18.4 变压器运行时的功率角	303
小结	305
习题	306
第19章 静态稳定判据的集中统一	307
19.1 电磁功率随转速而变化的一类电机的判据	307
19.2 电磁功率随功率角而变化的一类电机的判据	311
小结	313
习题	314
第20章 分析工具的高度统一	315
20.1 四大电机的平衡方程	315
20.2 四大电机的等效电路	316
20.3 四大电机的相量图	317
小结	318
习题	318
参考文献	319

清华大学出版社

0.1 电机总览

0.1.1 电机在国民经济生活中的作用

电能是能量的一种形式。与其他形式的能量相比,电能具有明显的优越性,适宜于大量生产、集中管理、远距离传输和自动控制。人类对能量利用和控制的能力决定着社会的生产潜能,从而又影响着人类生活方式的进步。目前,全球每年电能的用量大约为 10^4 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$,并且还在以每年 10 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 的速度增长。

电机是将电能从最初的能源形式转换过来的重要工具,也是将大部分电能转换为机械能的装置。在电力工业、工矿企业、农业、交通运输业、国防、科学文化及日常生活等领域,电机都是十分重要的设备。在电力工业中,将机械能转换为电能的发电机以及将电网电压升高或降低的变压器都是电力系统中的关键设备。在工矿企业中,各种机床电机、轧钢机、压缩机、起重机、水泵、风机,交通运输中的汽车电器、电力机车、磁悬浮列车、城市轨道交通列车,农业中的电力排灌、农产品加工,日常生活中的汽车、办公设备、电冰箱、空调、洗衣机,航海和航空领域中的舰船推进电源、航空电机,以及国防、文教、医疗等领域都需要不同特性的电机。随着工业企业电气化、自动化、智能化的发展,还需要众多的各种容量的精密控制电机,作为整个自动控制系统中的重要元件。

显然,电机在国民经济建设中起着重要的作用,随着生产的发展和科学技术水平的提高,它本身的内容也在不断深化和更新。

0.1.2 电机的发明简史

电机的历史可追溯到 1831 年迈克尔·法拉第发明的盘式电机,这是一种真正的直流电机。此后,人们对电机的兴趣一直停留在实验室阶段和处于好奇的状态。直到 19 世纪 70 年代,托马斯·爱迪生为了让电灯进入千家万户,开始了商业目的直流发电机的研制。在此项工作中,爱迪生提出将电能从集中的发电站输出,然后对用户进行分配这个全新概念。他作为领路人,倡导广泛地应用电动机,并引入电网的基本框架这一概念。

电机历史上主要的里程碑是,1888 年尼古拉·特斯拉发明了三相感应电动机并申请了专利。特斯拉的交流电的理论领先于查理斯·施泰因梅茨十来年,1900 年可靠的卷铁芯式变压器问世,从而开创了长距离输电的新纪元。当时,美国为完成电气化的进程又花了 30 年的时间,而且直至 20 世纪 30 年代,美国的农村配电系统还没有完成。但是无论如何,在此期间美国的电气化进程进展还是很顺利的。电机的推广应用,紧紧跟随着电网扩张的

脚步。

尽管今天应用的电机学的理论可追溯到100年以前,但是其更新和提高了的脚步从来没有停止过。更好的铁磁和绝缘材料的不断研制,使功率密度比早期电机的功率密度超出一个数量级。大容量电机的制造技术降低了电机制造成本,因而为其更广泛的应用打开了大门。可靠的高功率等级的开关装置,以及近几十年来由于“固态革命”产生的微处理机,使电气拖动领域的控制水平大大提高。所有这一切,都是能量的利用与控制能力的提高,从而不断地促进着人类生活方式的进步。

0.1.3 电机的分类

电机是一种以磁场作为中间媒介的双向能量转换装置,用于实现机械能和电能的转换、电能形式的变换和信号的传递、变换。而利用光电效应、压电效应、热电效应和化学反应等产生电能的装置通常不包括在电机范畴内。电机本身不是能源,但其输入、输出中至少有一方必须为电能。

电机的用途广泛,种类很多,按照电机在应用中的能量转换功能可分为以下几种:

- (1) 发电机——将机械能转换为电能的电机;
- (2) 电动机——将电能转换为机械能的电机;
- (3) 变换器——将电能转换为另一种形式的电能的电机,如变压器、变流器、变频器、移相器;
- (4) 控制电机——作为控制系统中的元件,进行信号的传递、变换,不以功率传递为主要功能。

此外,按照所应用的电流种类,电机可分为直流电机和交流电机。按运动方式来分,电机可分为静止设备和旋转设备,前者为变压器,后者包括直流电机、异步电机和同步电机。

本书基本按原理分类,主要包含变压器、直流电机、异步电机、同步电机等四大类电机。此外,对在工业控制和特殊传动领域广泛使用的特种电机也进行了专门叙述。

0.1.4 电机学课程特点和学习方法

电机学是电气工程及其自动化专业必修的一门重要专业基础课,是后续专业课程的理论基础。通过对电机的基本结构、电磁关系、工作原理和运行性能的分析,可使学生逐步掌握电机的基本理论和基本分析方法,提高分析和解决电机实际工程问题的能力。

电机原理始于带电导体和磁场间的相互作用,对变压器和旋转电机来说,两个或两个以上空间磁场相互之间的作用是分析的主要内容。对物理学中电、磁、机械三类变量之间的相互关系和相互影响的理解,是学习电机学的基础。同时,电机学的研究对象是实际使用的各种具体电机,不是条件单纯、非具体的理想化元件。这就要求学生要理论联系实际,善于抓住主要矛盾,重视电机学实验和实践环节。

虽然电机形式多样,但本书对电机的分析过程具有共同性。首先概览该类电机的结构、特点、应用、基本原理、参数规格等,然后对其工作原理和电磁关系进行定性分析,再通过电路方程、等效电路和相量图等形式对电机中的各物理量及相互关系进行定量分析,最后对电机运行性能和实际应用进行总结。这就要求学生要融会贯通,重点培养分析问题和解决问题的能力。

0.2 电磁理论基础

各类电机的运行都以基本电磁定律和能量守恒定律为基础,基尔霍夫电流定律和基尔霍夫电压定律等电路定律在电路课程中已作详细叙述,下面简单介绍电机学中常用的基本磁路定律和判定定则。

0.2.1 电磁力定律(洛伦兹力方程)

电磁场是一个空间区域,运动电荷在电磁场中将受到力的作用,其大小和方向由下式决定:

$$\mathbf{F} = q \mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (0-1)$$

式中, $\mathbf{F}$ 为力,单位为 N; q 为电荷电量,单位为 C; $\mathbf{v}$ 为电荷运动速度,单位为 m/s; $\mathbf{B}$ 为磁感应强度,也称为磁通密度,单位为 T。

电荷在导体中流动就形成电流。如图 0-1 所示,如一大小为 I 的电流在均匀磁场中流过长度为 l 的导体,则式(0-1)中的 $q \mathbf{v}$ 可由 $l \mathbf{I}$ 替代,因而得

$$\mathbf{F} = l \mathbf{I} \times \mathbf{B} \quad (0-2)$$

由于图 0-1 中的 $\mathbf{B}$ 和 $\mathbf{I}$ 垂直,则力的大小由式 $F = BIl$ 决定,电磁力的方向由左手定则判定。即磁力线方向($\mathbf{B}$ 的方向)穿过左手掌心,四指方向指向电流方向,则大拇指所指方向即为通电导体的受力方向。

例 0-1 如图 0-1 所示的导体,处于图中所示方向的磁场中,其大小为 $B(t) = 5 \cos \omega t$ (T),导体的长度为 25 cm,流过的电流 $i(t) = 2 \cos \omega t$ (A),方向如图 0-1 中 $\mathbf{I}$ 所示,求导体上所受的作用力。

解 由于 $\mathbf{I}$ 和 $\mathbf{B}$ 相互垂直,因此,由式(0-2)可知力的大小为

$$\begin{aligned} F &= l \cdot i(t) \cdot B(t) \cdot \sin(\pi/2) \\ &= 0.25 \times 2 \cos \omega t \times 5 \cos \omega t \\ &= 2.5 \cos \omega t \cos \omega t = 1.25 + 1.25 \cos 2\omega t \text{ (N)} \end{aligned}$$

力 $\mathbf{F}$ 的方向向上。

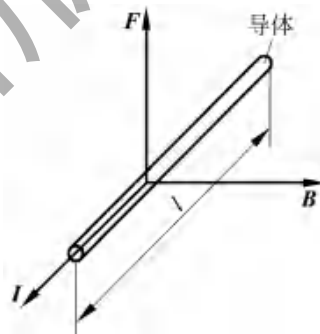


图 0-1 洛伦兹力

0.2.2 毕奥-萨伐尔(Biot-Savart)定律

电荷的流动,即电流,产生磁场强度 $\mathbf{H}$ 。在距一长载流导体垂直距离为 R (单位为 m) 的任意一点 P 处的 $\mathbf{H}$ (单位为 A/m) 的大小和方向,由下式决定:

$$\mathbf{H} = \frac{1}{2\pi R} \mathbf{I} \times \mathbf{a}_R \quad (0-3)$$

式中,被一以 R 为半径的环形路径所包围的电流矢量 $\mathbf{I}$ (单位为 A),以及矢量 $\mathbf{a}_R$ 如图 0-2 所示。磁通密度 B 可根据式(0-4)由磁场强度 H 求出:

$$B = \mu H = \mu_r \mu_0 H \quad (0-4)$$

系数 μ (单位为 H/m) 为磁导率,由磁场所在点的材料特性决定,而相对磁导率 μ_r 是一无量

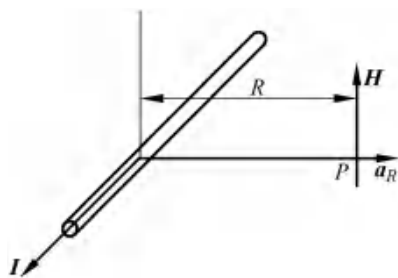


图 0-2 毕奥-萨伐尔定律

位的量,其表示式为

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (0-5)$$

式中 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$, 为真空中的磁导率。

例 0-2 直径可忽略不计的导体长 10 m, 载 5 A 的恒定电流, 假定导体足够长, 所处空气的磁导率为 $\mu = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ 。求与导体距离为 R 处的磁通密度 B 和磁场强度 H (参考图 0-2)。

解 点 P 可以以半径 R 绕着导体任意转动, 其每点的 H 值相同, 方向为逆时针, 据式(0-3), 可得与导体距离为 R 处的 H 值为

$$H = \frac{I}{2\pi R} = \frac{5}{2\pi R} = \frac{0.796}{R} (\text{A/m})$$

据式(0-4), 得

$$B = \mu H = 4\pi \times 10^{-7} \times \frac{0.796}{R} = \frac{1 \times 10^{-6}}{R} (\text{T})$$

0.2.3 右手定则

根据毕奥-萨伐尔定律(简称毕-萨定律), 运用右手定则, 可以很方便地判断一载流导体周围磁场的方向。即假设用右手握住一载流导体, 且大拇指的方向指向电流的方向, 微微握紧的四指所指的方向便为 B 或 H 的方向。

磁通 Φ (单位为 Wb) 的大小由下式得出:

$$\Phi = \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} \quad (0-6)$$

式中, $d\mathbf{A}$ 为 $\mathbf{B}$ 经过截面积的微分。若 $d\mathbf{A}$ 所处的平面与 $\mathbf{B}$ 正交, 则由右手定则可知磁通 Φ 的方向。图 0-3 给出了由已知电流 I 决定的磁场方向。

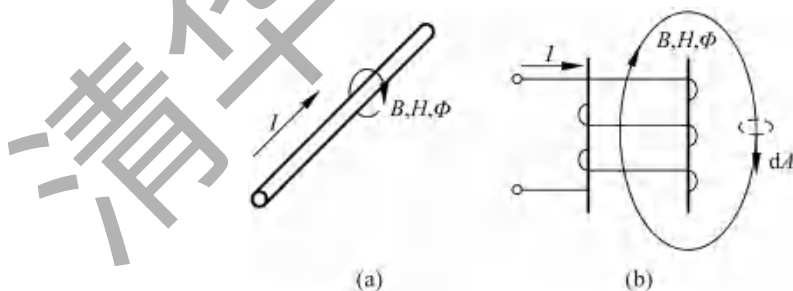


图 0-3 右手定则示意图

(a) 直导线; (b) 圆线圈

0.2.4 法拉第电磁感应定律

一匝数为 N , 与交变磁通 Φ 匝链的线圈, 其两端的感应电动势 e 大小为

$$e = N \frac{d\Phi}{dt} \quad (0-7)$$

0.2.5 楞次定律

式(0-7)中电压极性由楞次定律判断。交变磁通在线圈中感应电动势的极性如此判断:若该感应电动势产生一电流,则该电流产生的磁通将阻碍原磁通的改变。图0-4中示出了产生电动势 e 的极性的两种情况。在这两种情况中,磁通的方向是相同的,但前一种情况下磁通是增大的,而后一种情况下磁通则是减小的。

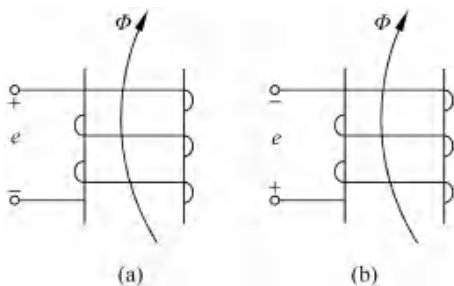


图0-4 楞次定律示意图

(a) 磁通增大($d\Phi/dt > 0$); (b) 磁通减小($d\Phi/dt < 0$)

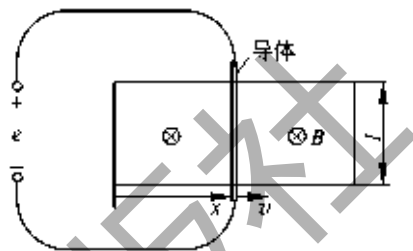


图0-5 $B\cdot l\cdot v$ 定则示意图

0.2.6 $B\cdot l\cdot v$ 定则

下面分析图0-5中,由长为 l 的直导体(单位为m)与少许连线形成的矩形区域。此处,一直不变的均匀磁通垂直进入纸面。此时,该导体以速度 v (单位为m/s)沿着纸面向右运动切割磁力线。由式(0-6)可知,图中由导体与其连线形成的一匝线圈两端感应电动势的磁通为

$$\Phi = BA = Blx \quad (0-8)$$

由于 $N=1$,根据式(0-7),可得

$$e = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{dBlx}{dt} = Bl \frac{dx}{dt} = Blv \quad (0-9)$$

由于磁通密度 B 不变,故有式(0-9)的结果。因此, $B\cdot l\cdot v$ 定则仅适用于恒定磁场。图0-5中的感应电动势极性可由楞次定律来检验,这时应注意,通过一匝线圈的磁通是增加的。

0.2.7 安培电路定律(全电流定律)

电路与其产生的磁场之间的关系为

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \sum I = F \quad (0-10)$$

式中, $d\mathbf{l}$ 为沿积分的闭合路径中的长度元, F 为磁动势。虽然式(0-10)在一般情况下求解很麻烦,但若沿积分路径某一段上的磁场强度是均匀的,则方程就变得简单多了。在图0-6中,假定磁场强度 H 在 l_1 、 l_2 、 l_3 和 l_4 各段上都是均匀的,则由式(0-10)可得

$$\begin{aligned} \oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} &= H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_3 l_3 + H_4 l_4 \\ &= NI = F \end{aligned} \quad (0-11)$$

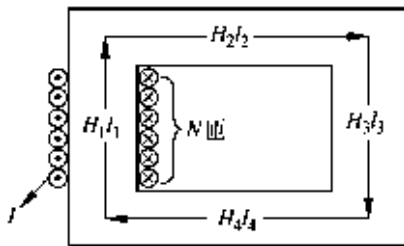


图0-6 安培电路定律示意图

0.2.8 能量守恒定律

机电能量转换,是指将能量从电能转换为机械能,或者将机械能转换为电能的过程。这种转换并不是直接的,而需首先将其转换为媒介形式的磁能(然后再转换为另一种形式的能量)。这种转换是可逆的,只是在转换过程中伴随有消耗的热能。

电机在能量转换或传递的过程中必须遵守能量守恒定律。虽然可任意假定,但还是按惯例假定能量从电机的一对端口流进,并由机械负载吸收,即转化为运动。这样能量转换符合以下等式:

$$\begin{aligned} & \{\text{电能输入}\} - \{\text{绕组热损耗}\} - \{\text{铁芯损耗}\} \\ & = \{\text{机械系统能量}\} + \{\text{摩擦损耗}\} + \{\text{磁场储能}\} \end{aligned}$$

0.3 铁磁材料和磁路

从磁性能方面看,所有材料分为铁磁材料和非磁性材料两类,这主要取决于它们的磁化曲线。非磁性材料的磁化曲线是线性的,而铁磁材料的磁化曲线为非线性的 $B-H$ 曲线。实际电机几乎整个磁路都是用铁磁材料制作的。

0.3.1 饱和现象

图 0-7(a)中典型的铁磁材料的 $B-H$ 特性曲线,通常分为线性区域和饱和区域。两者之间的转折点就是人们通常所说的膝点。此外,图 0-7(b)中还示出了铁磁材料的 μ_r-H 曲线。

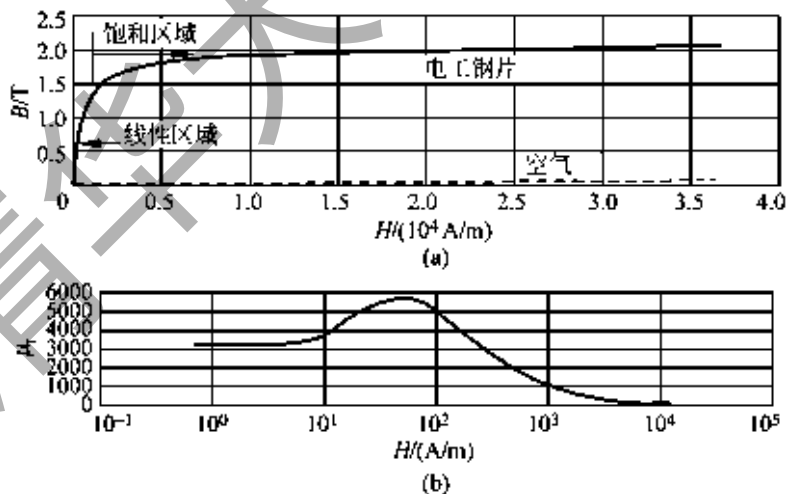


图 0-7 磁化特性曲线

非铁磁材料的相对磁导率 $\mu_r = 1$ ($\mu_r = \mu / \mu_0$),而在整个实用的磁通密度范围内,铁磁材料的相对磁导率要比 1 大得多(其值为 2000~6000)。

专门用于机电能量转换装置的电工钢片,是用特殊加工工艺生产出来的,主要用于某些特殊场合。铁磁材料的原子的电子数比内层全电子数要少,因此,由电子旋转产生的磁场在原子内部并不能完全抵消。所以,铁磁材料的每一个原子就有一个磁力能。当熔化的铁磁

材料凝固时,在原子层面的区域内便形成晶体。在每一个区域内,所有原子的磁力能排列一致。

无向性电工钢片要经过特殊的冶金工艺程序加工,以便使其形成斜角形的磁畴,如图 0-8(a)所示,其中晶体的结构达到了静态磁平衡。如图 0-8(b)所示,只需一个中等程度的 H 场,便可使原子的磁力能方向相反,且在每一晶体中能有效地移动磁畴。由于此时的合成磁力能的方向向右,因此磁通的方向也是自左向右的。这种磁畴移动现象发生在图 0-7(a)中磁化曲线的线性区域段。若 H 场方向向上,则磁畴便这样移动,以使磁力能的方向也向上;若此时施加一中等程度的 H 场,材料中的磁通流向可为任何方向。这种支持任意方向磁通的潜能,使得这种材料适用于构造电机的磁路,这便是无向性电工钢片的基础。

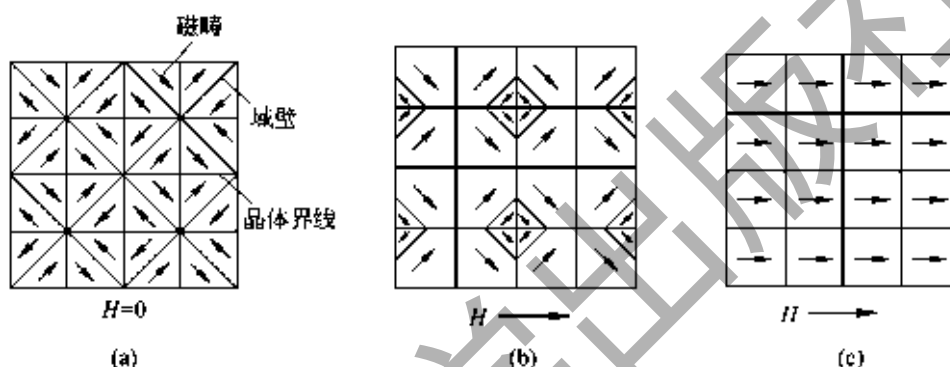


图 0-8 磁化过程

(a) 无外加 H 场; (b) 外加中等 H 场; (c) 外加强 H 场

在磁畴完全崩溃后,磁力能仍然有一个唯一的方向,这就是外施磁场的方向。如若外施磁场明显增加,则所有的磁力能便沿着外施磁场方向一致排列,如图 0-8(c)所示。在外施磁场大大增加的情况下,从磁畴的崩溃到磁力能的排列一致,大约增加了 15% 的磁通。该现象发生在图 0-7(a)中磁化曲线的饱和区域段。

另一些冶金加工工艺,采用加强晶体结构和控制轧制方向的方法,可产生纹理取向电工钢片。在这种情况下,磁畴几乎是沿一个方向,只需必要的磁畴移动,便可获得很高的磁通密度。因此,纹理取向电工钢片与无向电工钢片相比,只需一很小的 H 场,便可获得很高的 B 场。这种纹理取向电工钢片在变压器中得到了很好的应用,因为变压器的磁路方向是一定的。

0.3.2 磁滞现象与磁滞损耗

若对一铁磁材料样品外施一磁场,而后再移开,在不再对其施加反向磁场的情况下,磁畴便不会在原处出现。其内在原因是,一些原子的磁力能的排列方向与原来的排列轴心不一致。因此,其磁力能并不为零,因而产生一个小的 B 场。这样,下降的 $B-H$ 曲线段,并不再沿上升的 $B-H$ 曲线段返回,这种现象称为磁滞现象。由于存在磁滞现象,对铁磁进行反复磁化可得到一条闭合曲线,称为磁滞回线。反复磁化过程中所消耗的能量称为磁滞损耗,该损耗与磁滞回线的面积(由磁通密度的最大值 B_m 决定)、磁场交变频率 f 和铁磁材料体积 V 成正比,可用经验公式表示为

$$p_{Hy} = C_{Hy} B_m^n f V$$

其中, C_{Hy} 为与材料有关的磁滞损耗系数; $n=1.5\sim 2$, 估算时一般取 $n=2$ 。

0.3.3 涡流现象与涡流损耗

因为铁芯是导磁体也是导体, 交变磁场在铁芯内产生自行闭合的感应电流, 称为涡流, 涡流在铁芯中产生热损耗, 即所谓涡流损耗。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; 铁芯的电阻率越大, 涡流流过的路径越长, 涡流损耗就越小。电机铁芯通常由加入适量硅的硅钢片(又称电工钢片)叠压而成, 由于硅的加入使铁芯材料的电阻率增大, 硅钢片沿磁力线方向排列, 钢片间有绝缘层, 叠片越薄, 损耗越低, 如图 0-9(a)~(c)所示。如不计饱和影响, 由正弦波电流所激励的交变磁场中的铁芯涡流损耗的经验公式为

$$p_{Ft} = C_{Ft} B_m^2 f^2 d^2 V$$

其中, C_{Ft} 为取决于材料性质的涡流损耗系数; d 为铁芯叠片厚度; 其余符号的含义同前。

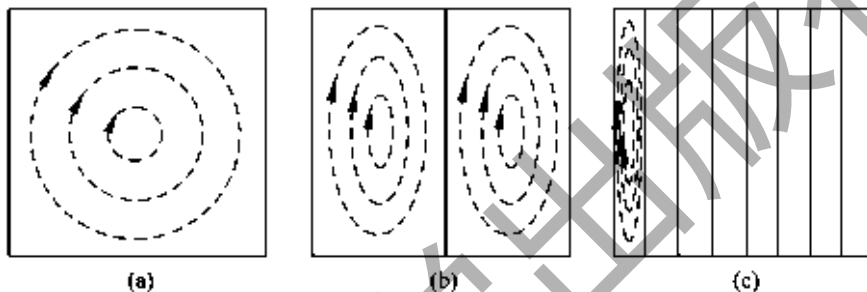


图 0-9 铁磁材料中的涡流

磁滞损耗和涡流损耗之和为铁芯损耗, 对于一般电工钢片, B_m 在 1.8 T 以内, 可近似表示为

$$p_{Fe} = C_{Fe} B_m^2 f^{1.3} G \quad (0-12)$$

式中, C_{Fe} 为铁芯的损耗系数; G 为铁磁材料的质量; 其余符号的含义同前。

工程上常用实验测出并以曲线或表格表示各种铁磁材料在不同频率、不同磁通密度下的比损耗(每千克材料的铁芯损耗), 再计算铁磁损耗 p_{Fe} 。

铁芯损耗均转化为热能使铁芯温度升高。为防止电机过热, 一方面采用硅钢片以减小铁芯损耗, 另一方面则应采取散热降温措施。

0.3.4 磁路

由铁磁材料构成的磁通路径, 是机电能量转换装置中重要的组成部分。当今所有实际的电动机、发电机、移相器和变压器等, 都是由一个或多个这样的磁通路径构成的。沿着激励源伸展开的磁通路径叫磁路。磁路设计的目的是, 在一有限的空间内, 以最少的励磁磁动势, 达到建立一定磁通的目的。在大多数情况下, 机电装置的物理功能要求磁路中有一个或多个气隙。一个明显的特例就是变压器, 其整个磁路都是由铁磁材料构成的。

当分析磁路时, 通常将其分为两类问题: 第一为建立一定磁通, 求其所需的磁动势; 第二为已知励磁磁动势, 求其建立的磁通。

若铁磁材料的 $B-H$ 曲线是线性关系, 则解决这两类问题都非常简单。然而情况往往是, 除单一均匀磁路这种极少数情况外, 由于磁路的非线性, 第二类问题通常需用图解法或

试探法来求解。如果在磁路中存在多条路径,则第一类问题很可能就需要用图解法或试探法来求解。

0.3.5 磁路分析方法

恒定磁动势作用下的交流磁路分析,与直流磁路的分析之间可进行类比。除受磁路非线性限制外,磁路的分析方法与电路的分析方法是类似的。

在由铁磁材料构成的磁路中,式(0-11)的积分路径与磁场方向是一致的。如若沿整个闭合的线积分路径中的磁通 Φ 为常数,那么,由 $B = \mu H$ 和 $B = \Phi/A$ 知,式(0-11)可改写为

$$\oint \Phi \frac{dl}{\mu A} = NI = F \quad (0-13)$$

由式(0-11)得

$$\Phi_1 \int_{l_1} \frac{dl}{\mu_1 A_1} + \dots + \Phi_n \int_{l_n} \frac{dl}{\mu_n A_n} = NI = F \quad (0-14)$$

$$\Phi_1 R_1 + \dots + \Phi_n R_n = NI = F \quad (0-15)$$

$$R_1 = \frac{l_1}{\mu_1 A_1}, \quad \dots, \quad R_n = \frac{l_n}{\mu_n A_n} \quad (0-16)$$

R 即为人们通常说的磁阻,意为磁通在磁路中,就像电流在电路中遇到的一种阻碍。再将这种类比延伸到电路,也就是磁动势与电压之间沿着闭合路径的所有磁动势降之和,必须等于该磁路中的磁动势。这是与基尔霍夫电压定律的最直接的类比。

下面分析如图 0-10(a)所示的具有分布参数的电路图,图中有一电源电压 V ,其驱动电流流过 3 根串联金属棒。每一金属棒的电阻值可由 $R = \rho \frac{l}{A}$ 计算,这便可用左边所画的集中参数的电路图作为实际的分布参数电路图的等效电路模型。运用由式(0-14)~式(0-16)引出的磁阻的概念,对于图 0-10(b)中的磁路,也可由类似电路的方法得到其右边的集中参数的磁路图。磁路与其类似的电路中各量的比较如表 0-1 所示。

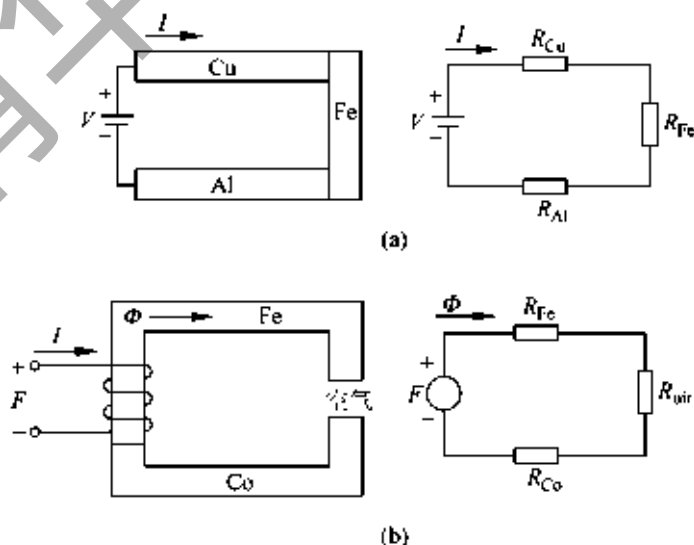


图 0-10 分布与集中参数路径图

(a) 电路; (b) 磁路

表 0-1 电路与磁路的比较

物理量及其单位		基本定律		
电 路	磁 路	定 律	电 路	磁 路
电动势 E/V	磁动势 F/A	欧姆定律 基尔霍夫第一定律 基尔霍夫第二定律	$I = \frac{U}{R}$	$\Phi = \frac{F}{R_m}$
电流 I/A	磁通 Φ/Wb		$(R = \frac{1}{G} = \rho \frac{l}{A})$	$(R_m = \frac{1}{\Lambda} = \frac{l}{\mu A})$
电阻 R/Ω	磁阻 R_m/H^{-1}			
电导 G/S	磁导 Λ/H			
电导率 $\sigma/(\text{S}/\text{m})$	磁导率 $\mu/(\text{H}/\text{m})$			
电流密度 $J/(\text{A}/\text{m}^2)$	磁通密度 B/T			
$(J = \frac{I}{A})$	$(B = \frac{\Phi}{A})$		$\sum i = 0$ $\sum u = \sum e$	$\sum \Phi = 0$ $\sum Hl = \sum Ni$

由于已确立了电路与磁路之间的类比关系,因此磁路的分析便简单得多了。只是在铁磁材料中,磁导率 μ 是磁通密度 B (即磁场强度 H) 的函数,由此便产生了一个如电路分析中的问题,即怎样确定电阻值究竟是不是电流的函数。

0.3.6 气隙边缘效应

如图 0-11(a)所示,当磁通在两个铁磁磁路表面之间的气隙穿过时,磁场面将会向边缘扩展。这时气隙中的导磁面,将比两边面积相等的铁磁材料的导磁面更大。当气隙的长度大于 0.5 mm 时,由于磁通穿过气隙时其可用有效面积大大增加,使得在进行气隙磁场密度计算时,若用气隙两边的铁磁材料的面积进行计算,便会产生很大误差。除非铁磁材料处于饱和区,否则气隙磁动势降总是占总磁动势的绝大部分。因此,气隙磁动势的计算误差便接近整个磁路磁动势的计算误差。

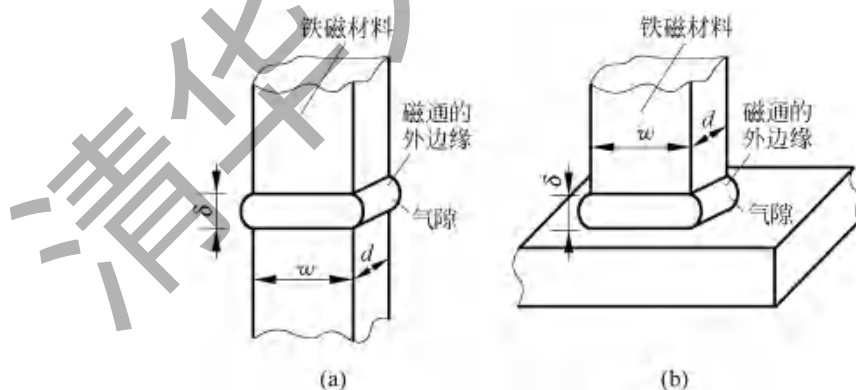


图 0-11 气隙边缘效应

(a) 气隙两边铁磁磁路面积相同; (b) 气隙两边铁磁磁路面积相差悬殊

通常气隙两边多为图 0-11(a)所示的气隙两边铁磁磁路面积相等的情况。如将沿着气隙磁场的边缘所生成的边缘路径看成在 4 个角上带有 1/4 球面的半圆柱形的路径,则气隙的磁导为

$$\mu_g = \mu_0 \left[\frac{wd}{\delta} + 0.52(w + d) + 0.308\delta \right] \quad (0-17)$$

对如图 0-11(b)所示的气隙两边铁磁磁路面积相差悬殊的情况,其合乎情理的气隙磁导计算公式为

$$p_g = \mu_0 \left[\frac{wd}{\delta} + 1.04(w + d) + 0.616\delta \right] \quad (0-18)$$

0.3.7 漏磁通

经由并非人为理想设计路径的磁通,称为漏磁通。图 0-12 给出了非理想设计路径中的气隙漏磁通 Φ_σ 的示意图。在任何实际的磁路中,一些漏磁通经由不同材料的磁路路径。一般说来,当磁路饱和时漏磁通便会增加。

0.3.8 串联磁路

漏磁通忽略不计,仅有单一路径的磁路称为串联磁路。很明显,其类似于单回路电路。图 0-10(b)和图 0-12 中分别示出了没有漏磁通通过和有漏磁通通过的串联磁路的实物图和类似的电路图。

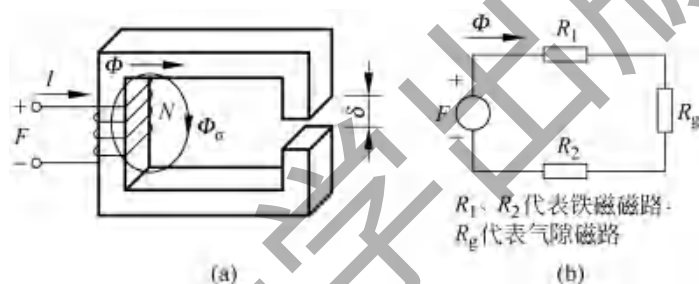


图 0-12 串联磁路(C 字形)

(a) 实物图; (b) 原理图

0.3.9 并联磁路

具有两个或两个以上磁路路径,且忽略漏磁通的磁路,称为并联磁路。除某些可看成线性磁路的情况外,无论是分析第一类还是第二类磁路问题,都至少有一部分需要用到图解法或插值法。求解并联磁路时,不管磁通路径多么复杂,都可以使用这样一种磁路的分析方法,该磁路的主要路径环绕着两个高磁阻的区域或窗口。图 0-13 所示的基本几何形状的图形称为双磁路。尽管为了能够降低尺寸维度进行简化分析,图 0-13 中的磁路采用水平中心线为其对称轴,但人们选择时也可有例外。此外,通常选择矩形磁路以简化磁路长度和横截面的计算。以上介绍的磁路分析方法,对于几何形状更为复杂的电机磁路的分析也同样适用。

0.3.10 永磁材料

永磁材料是一种典型的合金材料,经对其外施一 H 磁场后,仍然有一部分剩余磁通密度 B_r 残留。为使磁通密度能降至零,必须施加一个与原磁场方向相反的 H 磁场。这个外加磁场的大小须达到矫顽力 H_c 。

静态磁滞回线是永磁电机材料的关键特性。磁滞回线是当铁磁材料受到周期变化的磁

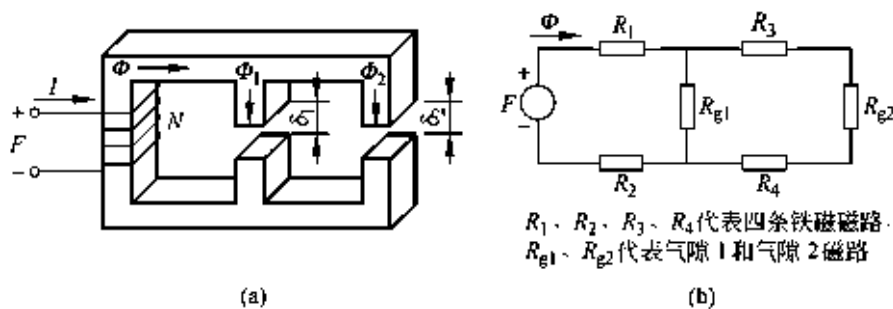


图 0-13 并联磁路(双窗口)

(a) 实物图; (b) 原理图

场作用时,由材料的 B - H 值的轨迹所包围的一个非零的环形区域。材料的运行点按逆时针方向绕着该环运动。一般来说,磁滞环的区域越大,其永磁性能就越好。图 0-14 示出了三种截然不同的磁滞回线。

第一种磁滞回线[图 0-14(a)]是低碳钢的,这种钢主要是用于制作电机和变压器的铁芯材料的电工钢片。即使磁化的饱和程度很高,以至于材料中的所有磁畴方向都不一致,当移去外部磁场后,剩磁仍然很小,通常 $B_r < 0.5 \text{ T}$ 。比剩磁 B_r 更有意义的是矫顽力的典型值,为 $H_c < 50 \text{ A/m}$ 。只要稍加一点反向磁场,便可使磁通密度等于零。

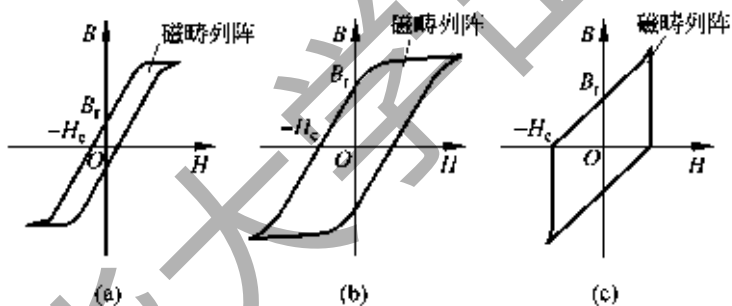


图 0-14 铁磁材料的磁滞回线

(a) 低碳钢的永磁性能; (b) 不可复原的永磁性能; (c) 可复原的永磁性能

第二种磁滞回线[图 0-14(b)]是不可复原(容易去磁)的永磁材料的,如铝镍钴(一种铝、镍与钴的合金)。这种材料以较高的 $B_r (> 1 \text{ T})$ 和不很大的 $H_c (< 100 \text{ kA/m})$ 著称。由于成本相对较低,许多永磁装置都用这类磁性材料来制作。

第三种磁滞回线[图 0-14(c)]是陶瓷(钡或锶的铁氧体)或稀土(钕铁硼或钕钴合金)这类弹性永磁材料的特性曲线。陶瓷的成本极低,其特性为 $B_r < 0.4 \text{ T}$, $H_c < 300 \text{ kA/m}$ 。稀土的成本较高,但性能很好,其特性为 $B_r > 1 \text{ T}$, $H_c > 600 \text{ kA/m}$ 。从性能来看,稀土绝对是一种好材料。

此外,还要说明铁磁材料的两个特性。其一是居里温度,在这个温度下,铁磁材料中的磁力能方向各不相同,因而变成非磁性的。对于所有实用的电磁装置来说,其居里温度都远远高于实际的运行温度。其二是磁致伸缩,其为铁磁材料在外部磁场方向上的一种塑性变形,其每米尺寸的变化是微米级。虽然磁致伸缩会对性能产生一些小的影响,但主要是人听觉范围内的励磁振动,这便给电磁装置带来两倍电源频率的噪声。

0.4 电机制造材料

电机的技术经济指标在很大程度上与其制造材料有关。性能优越的材料能提高电机的性能,还可节省尺寸。正确地选择导电材料、磁性材料和绝缘材料等,在设计和制造电机时极为重要。同时,在选择材料时,必须保证电机的各部分都有足够的机械强度,使其即使在按技术条件所允许的不正常运行状态下,也能承受较大的电磁力而不致损坏。

根据电机所用材料的功能,可将其分为导电、导磁、绝缘、机械支撑四种材料。

0.4.1 导电材料

铜是最常用的导电材料,电机中的绕组一般都用铜线绕成。电力工业上用的标准铜,在温度为 20°C 时的电阻率为 $17.24 \times 10^{-9} \Omega \cdot \text{m}$,即长度为 1 m 、截面积为 1 mm^2 的铜线,其电阻为 $17.24 \times 10^{-3} \Omega$,密度为 8.9 g/cm^3 ,含铜量 99.9% 以上。电机绕组用的导体是硬拉后再经过退火处理的。换向片的铜片则是硬拉或轧制的。

铝的电阻率为 $28.2 \times 10^{-9} \Omega \cdot \text{m}$,相对密度为 2.7 g/cm^3 。作为导电金属,铝的重要性仅次于铜。铝线在输电线路应用也很广,但和铜线电机相比,铝线电机的体积较大,在电机中尚不能普遍使用。而鼠笼式异步电动机的转子绕组则常用铝浇铸而成。

黄铜、青铜和钢都可作为集电环的材料。

碳也是应用于电机的一种导电材料。电刷可用碳-石墨、石墨或电化石墨制成。为了降低电刷与金属导体之间的接触电阻,某些牌号的电刷还要镀上一层厚度约为 0.05 mm 的铜。碳刷的接触电阻并不是常数,它随着电流密度的增大而减小。每对电刷的接触电压降随着电刷的牌号不同略有不同。

0.4.2 导磁材料

前已述及钢铁是良好的导磁材料。铸铁因导磁性能较差,应用较少,仅用于截面积较大、形状较复杂的结构部件。各种成分的铸钢的导磁性能较好,应用也较广。特性较好的铸钢为合金钢,如镍钢、镍铬钢,但价格较高。整块的钢材,仅能用以传导不随时间变化的磁通。

如磁通是交变的,为了减少铁芯中的涡流损耗,导磁材料应当用薄钢片,称为电工钢片。根据轧制工艺不同,电工钢片分为热轧钢片和冷轧钢片。电工钢片的成分中含有少量的硅,因而其电阻较大,同时又有良好的磁性能。因此,电工钢片又称为硅钢片。随着牌号的不同,各种电工钢片的含硅量也不相同,最低的为 0.8% ,最高的可达 4.8% 。含硅量越高则电阻越大,但导磁性能越差。在近代的电机制造工业中,变压器和电机的铁芯越来越多地应用冷轧硅钢片,它具有较小的比损耗,且有较高的磁导率。此外,与无取向电工钢片相比,有取向电工钢片可工作在更高磁通密度下。

电工钢片的标准厚度为 0.35 、 0.5 、 1 mm 等。变压器用较薄的钢片,旋转电机用较厚的钢片。高频电机需用更薄的钢片,其厚度可为 0.2 、 0.15 、 0.1 mm 。钢片与钢片之间常涂有一层很薄的绝缘漆。一叠钢片中铁的净长和包含有片间绝缘的叠片毛长之比称为叠片因数。对于表面涂有绝缘漆、厚度为 0.5 mm 的硅钢片来说,叠片因数的数值为 $0.93 \sim 0.95$ 。

0.4.3 绝缘材料

导体与导体间、导体与机壳或铁芯间都须用绝缘材料隔开。绝缘材料的种类很多,可分为天然的和人工的、有机的和无机的,有时也用不同绝缘材料的组合。绝缘材料的寿命和它的工作温度有很大关系,运行温度过高,绝缘材料会加速老化,会丧失机械强度和绝缘性能。在电机材料中绝缘材料的耐热程度较低,为了保证电机在足够长的合理的年限内可靠运行,对绝缘材料都规定了极限允许温度。国家标准根据绝缘材料的耐热能力将其分为七个标准等级,见表 0-2。表中绝缘级别的符号及其极限允许温度是由国际电工技术协会规定的。

表 0-2 绝缘材料的等级

绝缘级别	Y	A	E	B	F	H	C
极限允许温度/℃	90	105	120	130	155	180	>180

Y 级绝缘材料为未用油或油漆处理过的纤维材料及其制品,如棉纱、棉布、天然丝、纸及其他类似的材料。

A 级绝缘材料为经油或树脂处理过的棉纱、棉布、天然丝、纸及其他类似的有机物质。整个绕组可先用油或树脂浸透,再在电烘箱中烘干,此种工艺称为浸渍。纤维间所含的气泡或潮气经过烘干后逸出,油和树脂即行填充原来的空隙。因为油类物质的介质常数较大,所以 A 级绝缘能力较 Y 级绝缘能力强。普通漆包线的漆膜也属于 A 级绝缘。在早期的中小型电机中,A 级绝缘应用最多。20 世纪 60 年代以后,由于绝缘材料工业的发展,中小型电机多采用 E 级绝缘。当今,已普遍采用 B 级及以上绝缘等级。

E 级绝缘材料包括由各种有机合成树脂制成的绝缘膜,如酚醛树脂、环氧树脂、聚酯薄膜等。

B 级绝缘材料包括无机物质(如云母、石棉、玻璃丝)、有机黏合物,或者 A 级绝缘材料为衬底的云母纸、石棉板、玻璃漆布等,B 级绝缘材料多用于大中型电机中。

F 级绝缘材料是用耐热有机漆(如聚酯漆)黏合的无机物质,如云母、石棉、玻璃丝等。

H 级绝缘材料包括耐热硅有机树脂、硅有机漆,以及用它们作为黏合物的无机绝缘材料,如硅有机云母带等。H 级绝缘材料由于价格昂贵,所以仅用于对尺寸和重量限制特别严格的电机。

C 级绝缘材料包括各种无机物质,如云母、陶瓷、玻璃、石英等,其不使用任何有机黏合物。这类绝缘物质的耐热能力极高。它们的物理性质使其不适用于电机的绕组绝缘。C 级绝缘材料在输电线上应用很多。在电机工业中利用陶瓷做成变压器的绝缘套管,用于高压的引出端。

变压器油为特种矿物油,在变压器中它同时起绝缘和散热两种作用。

0.4.4 机械支撑材料

电机上有些结构部件专门用于机械支撑,例如机座、端盖、轴与轴承、螺杆、木块间隔等。在漏磁场附近,机械支撑最好应用非磁性物质。例如置于槽口的槽楔,中小型电机用木材或竹片,大型电机用磷青铜等材料。定子绕组端部的箍环应当用黄铜或非磁性铜制成。转子

外围的绑线采用非磁性钢丝。钢中如含有 25% 镍或 12% 锰,即可完全使其丧失磁性。

制造电机所用的材料种类极多,以上所述仅是大概的情况。

小 结

电机是依靠电磁感应作用实现机电能量转换、不同形式电能之间的变换,或者信号的传递和转换的电气设备。

电机的运行遵从基本电路和磁路定律,特别是电磁感应定律、电磁力定律和全电流定律,而左手和右手定则是判断电机中电磁量的基本判别准则。

铁磁材料呈现出一种非线性的 $B-H$ 曲线特性,这给电机的研究带来分析上的困难。同时必须注意,这种材料具有的磁滞现象和涡流现象会造成使用时的种种问题。将磁路与电路进行类比分析,可加强对磁路的理解,也可用来指导对磁路的分析过程。

在制造中还要根据用户要求,采用不同的导电、导磁、绝缘、支撑等材料才能制造出一台性能优越、运行可靠的电机产品。

习 题

- 0-1 如果磁通密度 B 的方向与导体中心线成 30° 夹角,重新求解例 0-1 中的问题。
- 0-2 设图 0-2 中的导体直径为 D ,求描述导体内磁场强度 H 场的表达式。
- 0-3 假设图 0-5 中磁通密度 B 为均匀场,但其大小随时间变化,其表达式为 $B(t) = B_1 + B_2 \sin \omega t$,求其感应的电动势 e 。
- 0-4 令 $w = d = 50 \text{ mm}$, $\delta = 2 \text{ mm}$,求:如图 0-11 所示的两个气隙结构装置中的气隙磁导率相差的百分数。
- 0-5 电机的磁路常采用什么材料制成? 这些材料有哪些主要特性?
- 0-6 磁滞损耗和涡流损耗是什么原因引起的? 它们的大小与哪些因素有关?
- 0-7 试叙述全电流定律、电磁感应定律和电磁力定律的物理意义以及它们在电机中的作用。

清华大学出版社

第 1 篇

变 压 器

清华大学出版社

1.1 变压器的用途

电力变压器是一种静止的电器,它由绕在同一个铁芯上的两个或两个以上的绕组组成,绕组之间通过交变的磁通相互联系。它的功能是将一种电压等级的交流电能转变为同频率的另一种电压等级的交流电能。

为了将发电厂发出的电能经济地传输、合理地分配和安全地使用,就要用到电力变压器。图 1-1 所示为简单的输配电系统图。发电机发出的电压不可能太高,一般只有 $10.5\sim 20\text{ kV}$,要想将发出的大功率电能直接送到很远的用电区去,几乎是不可能的。这是因为,低电压大电流输电在输电线路上会产生很大的损耗和电压降。为此,需要用升压变压器将发电机端电压变为较高的输电电压。当输电的功率一定时,电压升高,电流就减小,输送过程产生的损耗将降低,能比较经济地将电能送出去。一般来说,输电距离越远,输送的功率越大,要求的输电电压也越高。例如,输电距离为 $200\sim 400\text{ km}$,输送容量为 $200\sim 300\text{ GW}$ 的输电线,输电电压一般需要 220 kV ,输电距离在 1000 km 以上,则要求有更高的输电电压。

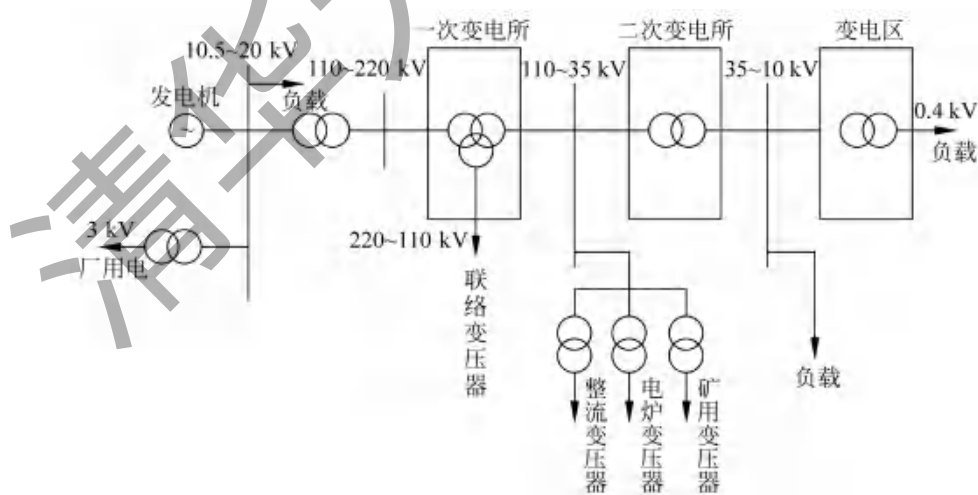


图 1-1 简单的输配电系统图

当电能送到用电区后,还要用降压变压器将电压降为配电电压,然后再送到备用电分区,最后再经配电变压器将电压降到用户所需要的电压等级,供用户使用。大型动力设备采用的电压为 6 kV 或 10 kV ,小型动力设备和照明用电则为 $380/220\text{ V}$,因此就要用到不同等