

内 容 简 介

全书包含总论和五篇共二十二章,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。

电 机 学

谢明琛, 张广溢 主编

责任编辑 曾令维

*

重庆大学出版社出版发行

新华书店经销

重庆花溪印制厂印刷

*

开本: 787×1092 1/16 印张: 16 字数: 393 千

1995年6月第1版 1995年6月第1次印刷

印数: 1-7000

ISBN 7-5624-0981-1/TM·40 定价: 11.00元

(川)新登字 020 字

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:张广溢编写第一篇变压器;余学文编写第三篇感应电机;何建平编写第五篇直流电机;谢明琛编写总论,第二篇交流电机的绕组、电动势和磁动势,第四篇同步电机,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选取作了大量工作,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作了仔细审阅,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

目 录

主要符号表

总论	1
§ 0-1 电机在国民经济中的作用	1
§ 0-2 电机的主要类型及电机中所用的材料	1
§ 0-3 研究电机时常用的基本定律	2
§ 0-4 电机中的损耗及电机的发热和冷却	6
§ 0-5 本课程的性质、任务、分析步骤及学习方法	7
思考题	8
习题	8

第一篇 变 压 器

第一章 变压器的工作原理和结构	9
§ 1-1 变压器的工作原理和分类	9
§ 1-2 变压器的基本结构	10
§ 1-3 变压器的额定值	13
思考题	14
习题	14
第二章 变压器的运行原理与特性	15
§ 2-1 变压器的空载运行	15
§ 2-2 变压器的负载运行	19
§ 2-3 变压器的参数测定	23
§ 2-4 标么值	26
§ 2-5 变压器的运行特性	27
思考题	30
习题	30
第三章 三相变压器	31
§ 3-1 三相变压器的磁路系统	31
§ 3-2 三相变压器的电路系统——绕组的连接法与联结组	32
§ 3-3 三相变压器空载电动势波形	35
§ 3-4 三相变压器的不对称运行	37
思考题	43
习题	43
第四章 变压器的并联运行	44
§ 4-1 变压器的理想并联运行条件	44
§ 4-2 变压器并联运行时的负载分配	45
思考题	47

习题	47
第五章 变压器的瞬变过程	48
§ 5-1 变压器空载合闸时的瞬变过程	48
§ 5-2 变压器副方突然短路时的瞬变过程	50
* § 5-3 变压器的过电压现象	52
思考题	53
习题	53
第六章 三绕组变压器及其他变压器	54
§ 6-1 三绕组变压器	54
§ 6-2 自耦变压器	58
§ 6-3 电压互感器和电流互感器	60
思考题	61
习题	62
总结	63

第二篇 交流电机的绕组、电动势和磁动势

第七章 交流电机的绕组和电动势	67
§ 7-1 交流电机的基本工作原理	67
§ 7-2 交流绕组的基本要求和分类	68
§ 7-3 槽电动势星形图及分相	69
§ 7-4 三相单层绕组	70
§ 7-5 三相双层绕组	74
§ 7-6 正弦分布磁场下的绕组电动势	76
* § 7-7 非正弦分布磁场下电动势中的高次谐波及其削弱方法	79
思考题	82
习题	82
第八章 交流电机绕组的磁动势	83
§ 8-1 单相绕组的脉振磁动势	83
§ 8-2 三相绕组合成磁动势的基波	88
§ 8-3 时间相量和空间矢量	90
* § 8-4 椭圆形旋转磁动势	91
* § 8-5 三相绕组合成磁动势的高次谐波	92
思考题	94
习题	95
总结	96

第三篇 感应电机

第九章 概述	99
§ 9-1 感应电机的基本结构	99
§ 9-2 感应电机的转差率及 3 种运行状态	101
§ 9-3 感应电动机的额定值	102
思考题	103
习题	103
第十章 感应电动机的运行原理	104

§ 10-1 主磁通和漏磁通	104
§ 10-2 转子静止时感应电动机的运行	104
§ 10-3 转子旋转时感应电动机的运行	107
§ 10-4 感应电动机参数的测定	112
§ 10-5 笼形转子的极数、相数和参数计算	114
思考题	116
习题	116
第十一章 感应电动机的功率、转矩及工作特性	118
§ 11-1 感应电动机的功率和转矩平衡方程式	118
§ 11-2 感应电动机的电磁转矩及机械特性	119
§ 11-3 感应电动机的工作特性	124
思考题	125
习题	125
第十二章 感应电动机的起动、调速和制动	127
§ 12-1 感应电动机的起动性能	127
§ 12-2 感应电动机的起动方法	127
§ 12-3 深槽和双笼型感应电动机	130
§ 12-4 感应电动机的调速	131
§ 12-5 感应电动机的制动	133
思考题	134
习题	135
第十三章 单相感应电动机	136
§ 13-1 单相感应电动机的工作原理	136
§ 13-2 单相感应电动机的类型	136
思考题	138
总结	139

第四篇 同步电机

第十四章 概述	143
§ 14-1 同步电机的基本结构	143
§ 14-2 同步电机的励磁方式	146
§ 14-3 同步电机的额定值	147
思考题	148
第十五章 同步发电机的运行原理及运行特性	149
§ 15-1 同步发电机的空载运行	149
§ 15-2 对称负载时的电枢反应	150
§ 15-3 同步电抗的概念	152
§ 15-4 隐极同步发电机的电动势方程式和相量图	153
§ 15-5 凸极同步发电机的电动势方程式和相量图	154
§ 15-6 同步发电机的空载、短路、零功率因数特性及电抗测定	156
§ 15-7 同步发电机的外特性和电压变化率	160
思考题	162
习题	163

第十六章 同步发电机的并联运行	164
§ 16-1 投入并联运行的条件和方法	164
§ 16-2 同步发电机的功率和转矩方程式	165
§ 16-3 同步发电机的稳态功角特性	166
§ 16-4 同步发电机与大电网并联运行时有功功率的调节和静态稳定	167
§ 16-5 无功功率的调节和 V 形曲线	169
* § 16-6 同步发电机的振荡和动态稳定的概念	172
思考题	175
习题	175
第十七章 同步电动机和同步调相机	176
§ 17-1 同步电动机的基本方程式、相量图和功角特性	176
§ 17-2 无功功率的调节	178
§ 17-3 同步电动机的起动方法	179
• § 17-4 同步调相机	179
思考题	181
习题	181
第十八章 同步发电机的不对称运行	183
§ 18-1 同步发电机不对称运行时的参数和等效电路	183
§ 18-2 同步发电机的不对称稳定短路	184
§ 18-3 不对称运行对电机的影响	186
思考题	187
习题	187
第十九章 同步发电机的突然短路	188
§ 19-1 超导体闭合回路磁链守恒原理	188
§ 19-2 对称突然短路的物理过程	188
§ 19-3 超瞬变电抗和瞬变电抗	190
§ 19-4 突然短路电流及其衰减	192
* § 19-5 突然短路对电机的影响	193
思考题	194
习题	194
总结	195

第五篇 直流电机

第二十章 直流电机的工作原理和结构	199
§ 20-1 直流电机的工作原理	199
§ 20-2 直流电机的基本结构	200
§ 20-3 直流电机的额定值	202
思考题	202
习题	202
第二十一章 直流电机的共同问题	203
§ 21-1 直流电机的空载磁场	203
§ 21-2 直流电机的电枢绕组	204
§ 21-3 直流电机的电枢磁动势和磁场	209

§ 21-4 电枢绕组的感应电动势	211
§ 21-5 直流电机的电磁转矩	212
* § 21-6 直流电机的换向	213
思考题	215
习题	216
第二十二章 直流发电机和直流电动机	217
§ 22-1 直流电机按励磁方式分类	217
§ 22-2 直流电机的基本方程式	217
§ 22-3 他励发电机的运行特性	220
§ 22-4 并励发电机的自励条件和特性	221
§ 22-5 复励发电机的特点	223
§ 22-6 直流电动机的工作特性	224
§ 22-7 直流电动机的机械特性	225
§ 22-8 直流电动机的起动与调速方法	228
* § 22-9 直流电动机的制动	230
思考题	231
习题	232
总结	233
习题答案	235
参考书目	239

主要符号表

A——线负载;面积	F_{f1} ——励磁磁动势基波幅值
a——并联支路数(交流);支路对数(直流)	F_s ——气隙磁动势
B——磁通密度	f——频率;力;磁动势的瞬时值
B_{av} ——平均磁通密度	f_N ——额定频率
B_g ——气隙磁通密度	f_1, f_2 ——定子、转子频率
B_m ——最大磁通密度	H——磁场强度
B_s ——电枢磁场磁密	h——高度
B_{ad}, B_{aq} ——直轴、交轴电枢磁场磁密	I——电流
B_{f1} ——励磁磁场的基波磁密	I_N ——额定电流
b——宽度;弧长	I_0 ——空载电流、激磁电流;零序电流
c——常数;电容	I_{Fe} ——铁耗电流
C_e ——电动势常数	I_μ ——磁化电流
C_T ——转矩常数	I_1, I_2 ——一次、二次侧电流
D——直径	I_f ——励磁电流
E——感应电动势	I_d, I_q ——同步电机电枢电流的直轴、交轴分量
E_0 ——空载电动势	I_K ——短路电流
E_s ——电枢反应电动势	I_{st} ——起动电流
E_m ——电动势最大值	i——电流瞬时值
E_1, E_2 ——一次、二次侧电动势	J——转动惯量
$E_{1\sigma}, E_{2\sigma}$ ——一次、二次侧漏电动势	K——换向片数;系数
E_{ad}, E_{aq} ——直轴、交轴电枢反应电动势	k——变压器的变比;系数
E_v —— v 次谐波电动势	k_e ——感应电机的电动势变比
e——电动势瞬时值;自然对数的底 ($e=2.718$)	k_i ——感应电机的电流变比
e_L ——自感电动势	k_μ ——饱和系数
e_M ——互感电动势	k_y ——短距系数
F——磁动势	k_q ——分布系数
F_1, F_2 ——一次、二次侧磁动势	k_N ——绕组系数
F_0 ——激磁磁动势;空载磁动势	k_c ——短路比
F_s ——电枢磁动势	k_u ——电压波形正弦性畸变率
F_{ad}, F_{aq} ——直轴、交轴电枢磁动势	L——电感;自感
	l——长度

M ——互感
 m ——相数
 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
 n ——转速
 n_N ——额定转速
 n_1 ——同步转速
 P ——功率
 P_N ——额定功率
 P_1 ——输入功率
 P_2 ——输出功率
 P_{em} ——电磁功率
 P_{mec} ——总机械功率
 p ——极对数;损耗
 p_{cu} ——铜耗
 p_{Fe} ——铁耗
 p_{mec} ——机械损耗
 p_{ad} ——附加损耗
 p_k ——短路损耗
 p_0 ——空载损耗
 Q ——无功功率
 q ——每极每相槽数
 R, r ——电阻
 R_1 ——一次侧电阻
 R_2 ——二次侧电阻
 R_a ——电枢回路电阻
 R_f ——励磁回路电阻
 R_L ——负载电阻
 R_{st} ——起动电阻
 R_m ——磁阻
 S ——视在功率;元件数
 S_N ——额定视在功率(额定容量)
 s ——转差率
 s_N ——额定转差率
 s_m ——产生最大电磁转矩的转差率
 T ——转矩;周期;时间常数
 T_N ——额定转矩

T_{em} ——电磁转矩
 T_1 ——原动机转矩;输入转矩
 T_2 ——负载转矩;输出转矩
 T_0 ——空载制动转矩
 T_j ——惯性转矩
 t ——时间
 U ——电压
 U_N ——额定电压
 U_f ——励磁电压
 U_1, U_2 ——一次、二次侧电压
 u ——电压瞬时值
 u_k ——阻抗电压(短路电压)
 v ——线速度
 W ——能量
 x ——电抗
 $x_{1\sigma}, x_{2\sigma}$ ——一次、二次侧漏电抗
 x_s ——同步电机电枢漏电抗
 x_p ——保梯电抗
 x_k ——短路电抗
 x_s ——电枢反应电抗
 x_t ——同步电抗
 x_{ad}, x_{aq} ——直轴、交轴电枢反应电抗
 x_d, x_q ——直轴、交轴同步电抗
 x_d', x_q' ——直轴、交轴瞬变电抗
 x_d'', x_q'' ——直轴、交轴超瞬变电抗
 x_+, x_-, x_0 ——正序、负序、零序电抗
 y ——节距;合成节距
 Z ——复数阻抗;槽数
 Z_1, Z_2 ——一次、二次侧漏阻抗;感应电机
 定子、转子槽数
 Z_L ——负载阻抗
 Z_k ——短路阻抗
 Z_m ——激磁阻抗
 Z_+, Z_-, Z_0 ——正序、负序、零序阻抗
 α ——角度;空间电角度;系数
 β ——角度;负载系数
 γ ——角度;电导率
 δ ——气隙长度

η ——效率
 η_N ——额定效率
 η_{max} ——最大效率
 θ ——温度;功率角
 Λ_m ——磁导
 λ ——比漏磁导
 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_ν —— ν 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_1 ——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

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:

一、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。发电机发出的电压一般为 $10.5 \sim 20\text{kV}$,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 $110、220、330、500\text{kV}$ 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。

二、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交、直流电动机。

三、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。

§ 0-2 电机的主要类型及电机中所用的材料

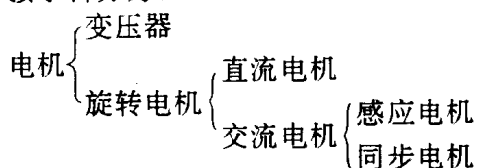
一、电机的主要类型

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。

按学科分为：



二、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转换的机械。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 等6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。

§ 0-3 研究电机时常用的基本定律

一、全电流定律(安培环路定律)

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

$$\oint_l H \cdot dl = \sum I \quad (0-1)$$

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 0-1。

二、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:

$$e = - \frac{d\psi}{dt} = - N \frac{d\Phi}{dt} \quad (0-2)$$

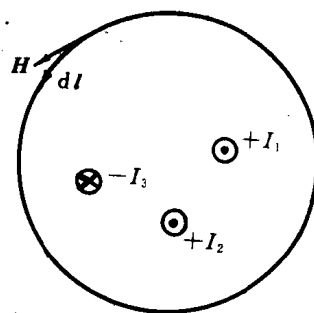


图 0-1 全电流定律

式中, N 为线圈的匝数, Φ 为穿过线圈的磁通。

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 0-2。

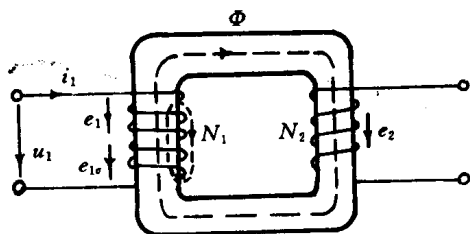


图 0-2 变压器电动势

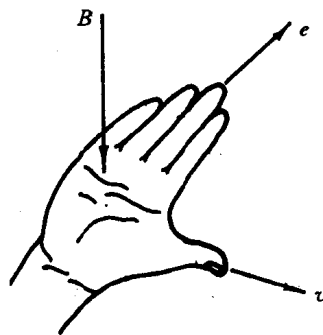


图 0-3 右手定则

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

$$e = Blv \quad (0-3)$$

感应电动势的方向由图 0-3 所示的右手定则确定。

三、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

$$f = Bli \quad (0-4)$$

电磁力的方向由图 0-4 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。

四、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

$$u = iR \quad (0-5)$$

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

$$\sum i = 0 \quad (0-6)$$

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

$$\sum e = \sum u \quad (0-7)$$

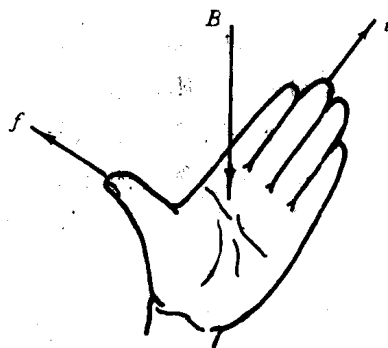


图 0-4 左手定则

该定律是电机中电动势平衡方程式的理论依据。

五、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。铁磁物质由于其内部结构特点,其磁导率 μ_{Fe} 可达非铁磁物质磁导率 μ_0 的数千倍,且 μ_{Fe} 的大小随外磁场大小变化而变化,存在磁饱和现象,其 $B=f(H)$, $\mu=f(H)$ 关系曲线如图 0-5 所示;其次,在交变磁场作用下,存在磁滞和涡流现象,在铁磁物质内产生能量损耗,即铁耗。非铁磁物质的磁导率为常量, $\mu_0=4\pi\times 10^{-7}\text{H/m}$,其 $B=f(H)$ 为直线。

从磁场的基本关系可导出与电路定律相似的磁路定律如下:

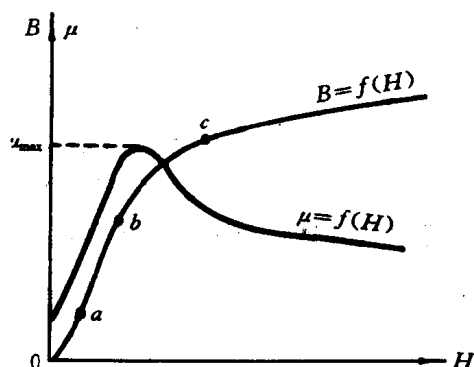


图 0-5 铁磁材料的磁化曲线

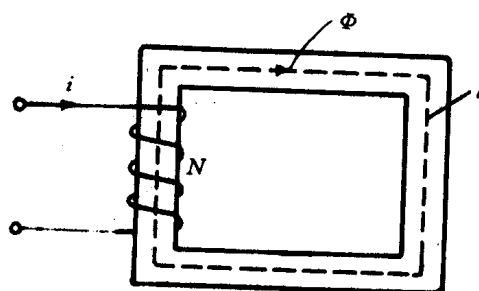


图 0-6 无分支磁路

1. 磁路的欧姆定律

将全电流定律应用到图 0-6 所示材料相同截面相等的无分支闭合磁路上,则有 $\oint_l H d\vec{l} = Hl = \sum I = Ni$

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

$$\Phi = \frac{Ni}{l/\mu A} = \frac{F}{R_m} = F\Lambda_m \quad (0-8)$$

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

$$\sum \Phi = 0 \quad (0-9)$$

在图 0-7 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

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = \Sigma Hl = \Sigma Ni = \Sigma F = \Sigma \Phi R_m \quad (0-10)$$

即沿任一闭合磁路,磁压降的代数和等于磁动势的代数和。

在图 0-7 中,沿 l_1, l_2 组成的闭合磁路,则有

$$F_1 - F_2 = N_1 i_1 - N_2 i_2 = H_1 l_1 - H_2 l_2 = \Phi_1 R_{m1} - \Phi_2 R_{m2}。$$

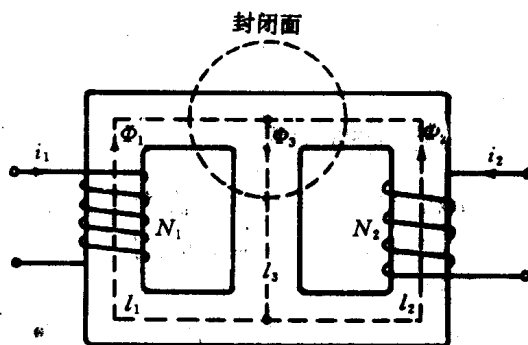


图 0-7 有分支磁路

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。

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 $\Sigma i = 0$		$\Sigma \Phi = 0$	
基尔霍夫第二定律 $\Sigma e = \Sigma u$		$\Sigma F = \Sigma Hl = \Sigma \Phi R_m$	

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 $G_{\text{气}}$ 约为 $G_{\text{铁}}$ 的 10^{20} 倍,而 μ_{Fe} 仅为 μ_0 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。

六、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 Σp 之和,即

$$P_1 = P_2 + \Sigma p \quad (0-11)$$

上述定律是建立电机运行时基本方程式的理论依据。