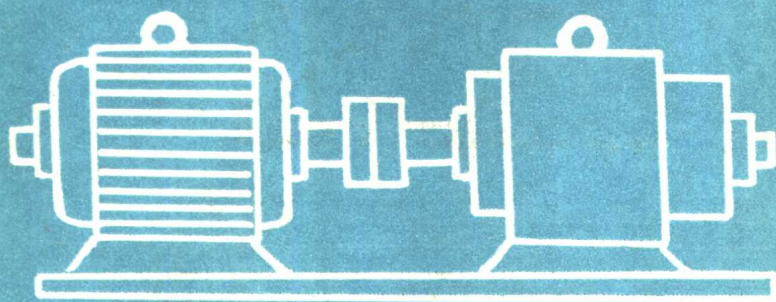


高等院校适用

电机与拖动

侯恩奎 主编



机械工业出版社

高等院校适用

电机与拖动

侯恩奎 主编

机械工业出版社

内 容 简 介

本书共有十章,包括直流电机、直流电机拖动、变压器、交流电机的绕组与磁势、异步电机、异步电机拖动、同步电机、控制电机、多电机拖动与电机的容量选择。讲述了各种电机的基本结构、作用原理、特性及使用方法。着重基本原理,又注意到与实际结合。本书可作为高等院校工业电气自动化专业教材,也可以作为各种业余大学相近专业的教材,还可供从事电气传动、自动控制的工程技术人员参考。

电 机 与 拖 动

侯恩奎 主编

*

责任编辑: 贡克勤 封面设计: 王迪功

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

西安电子科技大学出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16·印张 24.125·字数 589 千字

1991 年 8 月西安第一版·1991 年 8 月西安第一次印刷

印数 0,001—5 000·定价: 8.50 元

*

ISBN7-111-02947-X / TM · 379(X)

前 言

本书是在从事本专业多年教学的基础上,参照工业电气自动化专业全国统一教学大纲编写的,内容力求紧密结合专业,满足专业要求。

本书由陕西机械学院侯恩奎副教授主编(编写第四、八章、第五章§5-7、第七章§7-6),西北纺织工学院潘曙先教授主审。参加编写的有陕西机械学院赵立通老师(编写第一、二章)、张明毫副教授(编写第八章§8-7、第九、十章)和刘安红老师(编写第五章);西安工业学院翟明久高级工程师(编写第三、六章)和呼爱国老师(编写第七章)。

翟明久高级工程师还参加了该书的审稿工作。

西安工业学院罗致康副教授、张昭良副教授参加了编写大纲的讨论,提了不少宝贵意见,在此表示感谢。

由于编者水平有限,经验不足,书中不妥和错误之处在所难免,欢迎广大读者批评指正。

编 者

1990年11月

主要符号表

A —— 变压器组导线截面积; 电机发热时间常数	e —— 自然对数数底
a —— 直流电机电枢绕组支路对数; 交流电支路数; 异步机起动电流减少倍数; 加速度	e_L —— 直流电机换向元件中自感电动势
B —— 磁通密度 (磁感应强度)	e_M —— 直流电机换向元件中互感电动势
B_a —— 直流电机电枢反应产生的磁感应强度	e_a —— 直流电机电枢反电动势
B_{av} —— 平均磁通密度	e_c —— 感应同步器余弦绕组所加电压
B_k —— 直流电机换向极的磁通密度	e_k —— 直流电机换向磁极感电动势
B_m —— 磁通密度最大值	e_s —— 感应同步器正弦绕组所加电压
B_r —— 脉冲变压器的剩磁磁通密度	F —— 电机磁势
B_δ —— 气隙磁通密度	F_a —— 直流电机电枢反应磁势
b —— 异步电动机起动转矩变化倍数	F_{ad} —— 直轴电枢反应磁势分量
b_k —— 直流电机换向片宽度	F_{aq} —— 交轴电枢反应磁势分量
C_M —— 电磁转矩常数	F_f —— 直流电机主磁极磁势
C_e —— 电动势常数	F_z —— 异步机能耗制动时的直流磁势
D —— 直径	F_ϕ —— 相磁势幅值
D_a —— 直流电机电枢铁心外径	F_0 —— 空载磁势
E_N —— 额定电动势; 一个线圈电动势	G —— 变压器绕组铜线重量
E_R —— 旋转变压器输出绕组电动势	GD_2 —— 飞轮矩
E_W —— 变压器绕组每匝电动势; 异步机串级调速时的附加电动势	I —— 电流
E_a —— 直流电机电枢绕组感电动势	I_L —— 负载电流; 转差离合器的励磁电流
E_m —— 最大电动势	I_N —— 额定电流
E_s —— 变压器漏磁电动势; 直流电机元件中电动势	I_a —— 直流电机电枢电流; 同步电机电枢电流
E_t —— 匝电动势	I_k —— 短路电流
E_σ —— 异步机漏磁电动势	I_m —— 电流的最大值
E_1 —— 交流机定子绕组感电动势; 变压器一次侧电动势	I_{st} —— 起动电流
E_2 —— 异步机转子不动时的电动势; 变压器二次侧电动势	I_z —— 异步机能耗制动时通入定子绕组的电流
	I_0 —— 变压器空载电流; 异步电机空载电流
	I_1 —— 变压器一次侧电流; 交流电机

定子电流	P_s —— 异步机转差功率
I_{12} —— 自耦变压器公共绕组部分的电流	P_Ω —— 异步机的机械功率
I_2 —— 变压器二次侧电流, 异步机转子电流	P_1 —— 电机输入功率
I_{23} —— 变压器二次侧三次谐波电流	P_2 —— 电机输出功率
J —— 转动惯量	p —— 电机磁极对数
K —— 直流电机换向片数; 比例常数	p_{Fe} —— 电机的铁耗
K_e —— 直流电机主磁通为常数时的电动势系数	p_{Cu} —— 电机的铜耗
K_M —— 直流电机主磁通为常数时的电磁转矩系数	p_{Cua} —— 直流电机电枢铜耗
K_R —— 磁滞损耗比例系数	p_f —— 直流电机励磁损耗
K_w —— 涡流损耗比例系数	p_k —— 短路损耗
k_{w1} —— 异步电机定子的绕组系数	p_{mec} —— 电机机械损耗
k_{w2} —— 异步电机转子的绕组系数	p_Δ —— 电机杂耗; 同步机机械损耗
k_i —— 异步电机定、转子电流比; 起动电流倍数	p_Ω —— 异步电机机械损耗
k_p —— 绕组的分布系数	p_0 —— 电机空载损耗
k_y —— 绕组的短矩系数	Q —— 电机的无功功率
L —— 电感; 导体长度	R —— 异步机降压起动时串入定子电路的电阻
L_k —— 直流电机换向元件自感; 脉冲变压器漏电感	R_a —— 直流电机、同步电机电枢电阻
L_m —— 脉冲变压器励磁电感	R_L —— 异步电动机起动时转子所串电阻
L_1 —— 异步机定子漏电感	R_f —— 直流电机励磁绕组电阻
L_2 —— 异步机转子漏电感	R_{fc} —— 直流发电机励磁回路的临界电阻
l —— 导体有效长度	R_k —— 变压器、异步电机的短路电阻
M —— 互感系数	R_L —— 负载电阻
m —— 质量; 相数; 串电阻起动级数	R_m —— 变压器、异步电机的励磁电阻, 磁阻
N —— 步进电机的拍数; 绕组匝数; 电动机允许小时接通次数	R_N —— 额定电阻
N_a —— 直流电机电枢绕组有效匝数	R_{pm} —— 频敏变阻器的励磁电阻
N_f —— 直流电机主磁极绕组匝数	R_1 —— 变压器一次绕组电阻、异步电机定子电阻
N_R —— 旋转变压器输出绕组匝数	R_2 —— 变压器二次绕组电阻, 异步电机转子电阻
n —— 转速	r_k —— 直流机换向元件电路中电阻
n_0 —— 直流电动机理想空载转速	S —— 直流电机元件数; 变压器视在功率; 脉冲变压器的铁心截面
n_1 —— 异步电机同步转速	s —— 异步电机转差率
P_M —— 电机电磁功率	s_m —— 异步电机产生最大转矩时的转差率
P_N —— 电机额定功率	

T ——转短; 周期
 T_J ——惯性转矩
 T_L ——负载转矩
 T_N ——额定转矩
 T_T ——异步电机拖动系统的时间常数
 T_a ——加速转矩
 T_{av} ——加速转矩平均值
 T_m ——最大转矩
 T_{mT} ——异步电机能耗制动时的最大转矩
 T_{max} ——同步电机最大电磁转矩
 T_{st} ——起动转矩
 T_0 ——空载转矩, 脉冲变压器平顶部分下降时间常数
 T_1 ——输入转矩
 T_2 ——输出转矩
 t_k ——脉冲变压器的脉冲宽度
 t_m ——异步电机能耗制动时的最大转矩比例系数
 U_N ——额定电压
 U_a ——控制信号电压, 直流机电枢绕组端电压
 U_1 ——变压器一次侧电压; 异步机定子电压
 U_2 ——输出电压; 变压器二次侧电压; 异步机转子电压
 U_{20} ——变压器二次侧空载电压
 u ——电压瞬时值
 u_k ——短路电压
 u_{kr} ——短路电压的有功分量
 u_{kx} ——短路电压的无功分量
 V_m ——异步电机能耗制动时的最大转矩比例系数
 v ——异步电机能耗制动时的转差率; 线速度
 v_m ——异步电机能耗制动时的临界转差率
 X ——异步电动机降压起动时串入定子电路的电抗

X_L ——负载电抗
 X_a ——同步电机定子绕组电抗
 X_d ——直轴同步电抗
 X_k ——变压器短路电抗
 X_m ——励磁电抗
 X_{pm} ——频敏变压器的励磁电抗
 X_q ——交轴同步电抗
 X_s ——同步电抗
 X_σ ——同步电机定子漏电抗
 X_1 ——变压器一次侧漏电抗; 异步机定子漏电抗
 X_2 ——变压器二次侧漏电抗; 异步电机转子不动时漏电抗
 y ——直流电机电枢绕组的合成节距
 y_k ——直流电机换向片节距
 y_1 ——直流电机电枢绕组第一节距
 Z ——电机槽数; 阻抗
 Z_L ——负载阻抗
 Z_R ——步进电机转子齿数
 Z_k ——短路阻抗
 Z_m ——变压器及异步机励磁阻抗
 Z_{pm} ——频敏变阻器励磁阻抗
 Z_1 ——变压器一次侧漏阻抗; 异步机定子漏阻抗
 Z_2 ——变压器二次侧漏阻抗; 异步机转子漏阻抗
 α ——交流伺服电机控制信号系数; 控制特性斜度; 交流电机槽距角
 β ——短距角; 变压器的负载系数
 β_m ——变压器最大效率时的负载系数
 γ ——自整角机失调角
 ΔA ——异步电动机过渡过程中的能量损耗
 Δn ——电动机的转速降落
 Δu ——变压器二次侧电压变化率; 直流电机电刷接触电压降
 η ——效率
 η_{max} ——最大效率

θ	——转角; 温度	Φ_m	——直流电机主磁极磁通; 变压器及异步机主磁通幅值
θ_b	——步距角	Φ_s	——变压器的漏磁通
$\theta_{\max}$	——绝缘材料的允许最高温度	Φ_σ	——直流电机主磁极漏磁通
θ_1	——发送机转角	Φ_0	——空载主磁通
θ_2	——接收机转角	φ	——功率因数角
λ_M	——过载系数	φ_1	——变压器一次侧功率因数角, 异步机定子电路功率因数角
μ	——媒质磁导率	φ_2	——变压器二次侧功率因数角; 异步机转子电路功率因数角
μ_{Fe}	——铁磁材料磁导率	ψ	——磁链; 同步机主磁极电动势与电枢电流之间的夹角; 变压器, 异步电动机的电势 $-E'_1$ 与 I_0 的夹角
μ_r	——媒质相对磁导率	ψ_s	——漏磁链
ν	——谐波次数	Ω	——机械角速度
ρ	——惯性半径	Ω_1	——同步角速度
τ	——极距; 温升	ω	——电角速度; 角频率
$\tau_{\max}$	——绝缘材料的允许最高温升		
Φ	——主磁通		
Φ_N	——额定主磁通		
Φ_a	——直流电机电枢反应磁通		
Φ_f	——同步机励磁磁通		
Φ_k	——直流电机换向磁极磁通		

目 录

主要符号表

绪论	1
----------	---

§ 0-1 电机及电力拖动系统发展概况	1
---------------------------	---

§ 0-2 学习本书常用的基本定律与公式	2
----------------------------	---

第一章 直流电机的工作原理	9
---------------------	---

§ 1-1 直流电机的基本工作原理	9
-------------------------	---

§ 1-2 直流电机的结构、铭牌数据及 主要系列	11
-----------------------------------	----

§ 1-3 直流电机的电枢绕组	14
-----------------------	----

§ 1-4 直流电机的磁场	21
---------------------	----

§ 1-5 直流发电机	29
-------------------	----

§ 1-6 直流电动机	36
-------------------	----

§ 1-7 直流电机的换向	43
---------------------	----

小 结	49
-----------	----

习 题	52
-----------	----

第二章 直流电动机的电力拖动	55
----------------------	----

§ 2-1 电力拖动系统的运动方程式	55
--------------------------	----

§ 2-2 生产机械的机械特性	58
-----------------------	----

§ 2-3 工作机构转矩、力、转动惯量、飞轮矩 与质量的折算	59
---	----

§ 2-4 他励直流电动机的机械特性	64
--------------------------	----

§ 2-5 他励直流电动机的起动	73
------------------------	----

§ 2-6 他励直流电动机的过渡过程	81
--------------------------	----

§ 2-7 他励直流电动机的调速	90
------------------------	----

§ 2-8 他励直流电动机的制动	101
------------------------	-----

§ 2-9 他励直流电动机过渡过程中的能量损 耗 ΔA	111
--	-----

小 结	115
-----------	-----

习 题	120
-----------	-----

第三章 变压器	125
---------------	-----

§ 3-1 变压器的工作原理、用途及 结构	125
--------------------------------	-----

§ 3-2 单相变压器的空载运行	129
------------------------	-----

§ 3-3 单相变压器的负载运行	133
------------------------	-----

§ 3-4 变压器的等值电路及相量图	135
--------------------------	-----

§ 3-5 等值电路参数的测定	138
-----------------------	-----

§ 3-6 标么值	140
-----------------	-----

§ 3-7 变压器的运行特性	141
----------------------	-----

§ 3-8 三相变压器	147
-------------------	-----

§ 3-9 变压器的并联运行	153
----------------------	-----

§ 3-10 特殊变压器	157
--------------------	-----

小 结	164
-----------	-----

习 题	165
-----------	-----

第四章 交流电机绕组的电动势	
----------------	--

与磁势	169
-----------	-----

§ 4-1 交流电机绕组及其电动势	169
-------------------------	-----

§ 4-2 交流绕组的磁势	180
---------------------	-----

小 结	192
-----------	-----

习 题	193
-----------	-----

第五章 异步电机	196
----------------	-----

§ 5-1 异步电机的工作原理及 基本结构	196
--------------------------------	-----

§ 5-2 异步电机的等值电路和相量图	201
---------------------------	-----

§ 5-3 异步电动机的功率和转矩	209
-------------------------	-----

§ 5-4 异步电动机的工作特性	212
------------------------	-----

§ 5-5 异步电动机的参数测定	213
------------------------	-----

§ 5-6 三相异步电动机的机械特性	215
--------------------------	-----

§ 5-7 单相异步电动机	222
---------------------	-----

小 结	226
-----------	-----

习 题	227
-----------	-----

第六章 三相异步电动机的电力	
----------------	--

拖动	229
----------	-----

§ 6-1 笼型三相异步电动机的起动方法 ...	229
--------------------------	-----

§ 6-2 绕线式三相异步电动机的起动	243
---------------------------	-----

§ 6-3 三相异步电动机的调速	247
------------------------	-----

§ 6-4 三相异步电动机的各种运行状态 ...	267
--------------------------	-----

§ 6-5 三相异步电动机过渡过程的能量 损耗	277	第九章 多电机拖动系统	346
小 结	288	§ 9-1 刚性联接的双电动机拖动系统	346
习 题	290	§ 9-2 同步旋转系统(电轴)	349
第七章 同步电机	293	小 结	357
§ 7-1 同步电机的结构与工作原理	293	第十章 电力拖动系统中电动机的 选择	359
§ 7-2 同步电动机的电动势平衡方程式和相 量图	298	§ 10-1 选择电动机额定功率的 基本依据	359
§ 7-3 同步电机的功率、转矩及功角 特性	299	§ 10-2 电动机发热与冷却的规律	361
§ 7-4 同步电动机的工作特性和 V 型 曲线	303	§ 10-3 电动机的不同工作方式	362
§ 7-5 同步电动机的起动	306	§ 10-4 长期工作方式电动机额定功率的 选择	364
§ 7-6 小容量同步电动机	308	§ 10-5 短时工作方式电动机额定功率的 选择	367
小 结	310	§ 10-6 周期性断续工作方式电动机额定 功率的选择	369
习 题	311	§ 10-7 影响电动机最大输出功率的 其它因素	370
第八章 控制电机	313	§ 10-8 选择电动机额定功率的统计法 ...	372
§ 8-1 概述	313	§ 10-9 笼型转子三相异步电动机允许小时 接通次数	372
§ 8-2 伺服电动机	313	§ 10-10 电动机种类、额定电压、额定转速和 型式的选择	374
§ 8-3 测速发电机	319	小 结	375
§ 8-4 自整角电机	324	参考书目	376
§ 8-5 旋转变压器	329		
§ 8-6 感应同步器	334		
§ 8-7 步进电动机	337		
小 结	343		
习 题	344		

绪 论

§ 0-1 电机及电力拖动系统发展概况

一、电能与电机

(一) 电能

在现代,电能是一种广泛应用的能源,电能与其他能源相比,有突出的优点。首先电能的生产与转换比较经济,目前我国公共电网就是由众多的火力发电厂与水力发电站并网运行组成的;其次电能传输与分配比较容易,尤为突出的是,它可以远距离输送,可把某地生产的电能输送到几千公里之外的地区去;再者电能的使用与控制比较方便,且易于实现自动化。因此,在现代社会中,电能的应用已遍及各行各业中。

在电能的生产、转换、传输、分配、使用与控制等方面,都必须通过能够进行能量(或信号)传递与变换的电磁机械,这些电磁机械被广义地称为电机。

(二) 电机

通常所说的电机,是指那些利用电磁感应原理设计制造而成的、用于实现能量(或信号)传递与变换的电磁机械的统称。按电机的功能来分类,电机可分为

发电机——把机械能转变成电能;

电动机——把电能转变成机械能;

变压器、变频器、变流机、移相等,是分别用于改变电压、频率、电流及相位的,即把一种类型的电能转变成另一种类型的电能。

控制电机——应用于各类自动控制系统中的控制元件。

值得指出的是,从基本工作原理来看,发电机与电动机仅是电机的两种不同的运行方式,从能量转换的观点来看,二者是可逆的。

上述的各种电机中,有些是静止的,如变压器,有些是旋转的,如各种类型的发电机与电动机。按电流的类型及工作原理的某些差异,旋转电机又可分为直流电机、交流异步电机、交流同步电机及各种具有专门用途的控制电机等。后面我们将对各种电机的工作原理、运行状态与特性等进行详细地分析。

二、电机应用的发展情况

电机应用最广的是将其作为原动力,即利用电动机将电能转变成机械能拖动生产机械。由电动机作为动力拖动生产机械进行工作的系统,统称为电力拖动系统,如金属切削机床、矿山机械、交通运输机械与起重类机械等,其组成都可用方框图综合表示,见图 0-1。

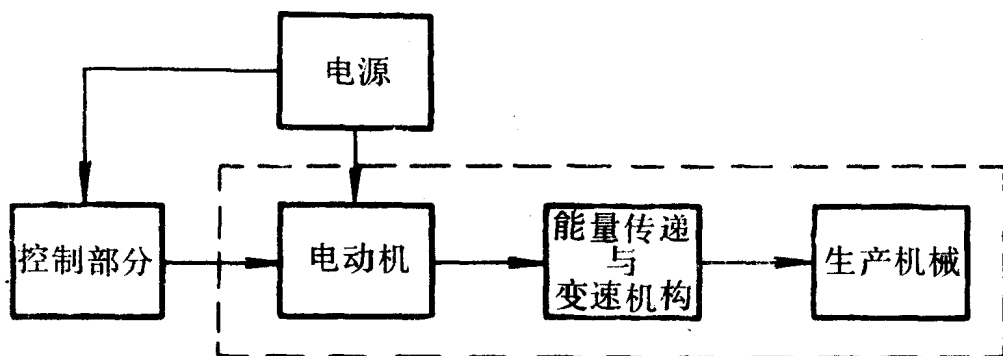


图 0-1 电力拖动系统方框图

关于控制部分与电源部分将有专门课程论述，本书重点分析图 0-1 中虚线框内电机及其拖动部分的有关内容。

目前电力拖动系统主要有两种型式：一种为单电动机拖动，即一台生产机械选配一台容量合适的电动机做为总动力，再利用机械传动与变速装置将动力分配到不同的运动部件上去，如普通的金属切削机床，其特点是电气控制线路简单，机械结构复杂；另一种为多电动机拖动，即在同一台生产机械上，不同的运动部件采用多台电动机分别单独拖动，如桥式起重机的主钩、辅钩、大车与小车均由各自独立的电动机拖动，又如，一台 A 系列刨床就用了 11 台电动机与发电机。多电机拖动的特点是：电气控制线路复杂，机械结构简单，操作与维修方便、运行可靠，且易于实现工作过程的自动化控制。

三、本书的内容

本书从使用角度出发，对电力拖动系统中常用的交、直流电机、控制电机与变压器等的基本工作原理、基本结构与主要运行特性进行分析；重点分析电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。

本书主要由直流电机及其拖动、变压器、交流电机及其拖动、控制电机、多电机拖动与电机容量选择等部分组成。

§ 0-2 学习本书常用的基本定律与公式

为了学好本课程，在本节中，将本书中常用的一些基本定律与公式概要地复习一下。

一、磁与电磁的基本知识

(一) 电流的磁效应

如果电流通过一根直导体，导体的周围就有磁力作用，产生磁场。可以通过铁屑来证明磁场的存在。导体周围磁感应线（又称磁力线）的方向可用右手螺旋定则来判定，方法是：用右手握住直导体，伸直的大拇指表示电流方向，则弯曲的四指即为磁感应线的方向。

如果把导体绕成一匝或多匝线圈，通过电流时将产生磁场，磁感应线的方向与电流方向同样符合右手螺旋定则。方法是：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感应线的方向。

上述两种方法都称为右手螺旋定则，但手指表示电磁量不同，使用时应加以注意。

(二) 磁的基本物理量

1. 磁感应强度 B

在一个永久磁铁的磁场中, 放一长为 L 的直导体, 在导体中通以电流 I , 这时导体受力 f , 使导体向外运动, 如图 0-2 所示。导体的有效长度越长、通的电流越大, 则导体受力越大。用载流导体在磁场中所受的力 f 比上导体中的电流 I 与导体长度 L 的乘积表示该点磁场的性质, 并称为该点的磁感应强度, 用 B 表示

$$B = \frac{f}{IL}$$

磁感应强度是个向量, 单位是特斯拉 (T)。

$$1\text{T} = 1 \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2} = 10^4 \text{Gs}$$

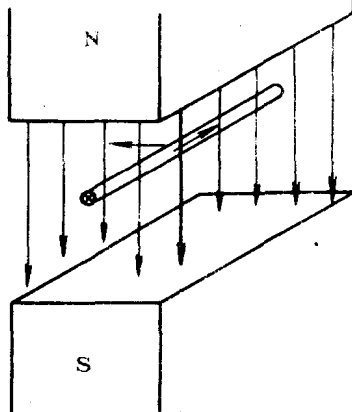


图 0-2 磁场对通电导体的作用力

2. 磁通 Φ

把描述磁场在空间分布情况的物理量称作磁通, 以 Φ 表示。磁通的定义是磁感应强度 B 和与它垂直方向的某一截面 S 的乘积。在均匀磁场中

$$\Phi = BS$$

磁通单位为韦伯 (Wb)。辅助单位有麦克斯韦, 简称 mx。

$$1\text{Wb} = 10^8 \text{mx}$$

为了把磁通、磁感应强度与磁力线密切地联系起来, 通常也定义: 通过垂直于磁场方向上某一截面积的磁力线数叫磁通。因而上式可写为

$$B = \frac{\Phi}{S}$$

则 B 就是单位面积上的磁通, 所以磁感应强度又称磁通密度, 辅助单位为高斯 (Gs)

$$1\text{Gs} = 1 \frac{\text{mx}}{\text{cm}^2}$$

3. 磁导率 μ

磁导率是表征媒介质磁化性质 (即导磁能力) 的物理量, 用 μ 表示。磁导率的单位是亨利/米 (H/m), 即欧姆·秒/米 ($\Omega \cdot \text{s}/\text{m}$)。对于不同的媒介质, 磁导率也不同, 真空中的磁导率

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

把某种媒介质的磁导率与真空中磁导率的比值, 称为该媒介质的相对磁导率, 用 μ_r 表示

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

它的物理意义是: 在其他条件相同的情况下, 某介质中的磁感应强度是真空中多少倍。

4. 磁场强度 H

磁场强度的大小等于磁场中某点的磁感应强度 B 与介质磁导率 μ 的比值, 即

$$H = \frac{B}{\mu}$$

单位是安/米(A/m)。

二、全电流定律 (又称安培环路定律)

(一) 全电流定律

设空间有几根载流导体, 导体中的电流分别为 $I_1, I_2, I_3 \dots, I_n$, 则沿任何闭合途径 l 对磁场强度 H 的线积分, 等于该闭合回路所包围的电流的代数和, 即

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

此即全电流定律, 见图 0-3。图中, 导体中电流方向与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。

当把全电流定律应用到电机或变压器中的多段磁路时, 式 (0-1) 可改写为

$$\sum H_k l_k = \sum I = IN \quad (0-2)$$

式中 N ——线圈的有效匝数;

IN ——总磁势 F , 单位为 A;

H_k ——第 k 段磁路的磁场强度, 单位为 A/m;

l_k ——第 k 段磁路的平均长度, 单位为 m。

式(0-2), 每一段 Hl 称为该段磁路的磁压降, 而 IN 是作用在整个磁路上的总磁势, 在电机中就是励磁绕组的安匝数。此式表明, 作用在磁路上的总磁势等于各段磁路的磁压降之和。

(二) 磁路欧姆定律

因为 $H = B / \mu$ $B = \Phi / S$

所以有

$$\begin{aligned} F = IN &= \sum_1^n H_k l_k = \sum_1^n \frac{B_k}{\mu_k} l_k \\ &= \sum_1^n \frac{1}{\mu_k} \frac{\Phi}{S} l_k = \Phi \sum_1^n \frac{l_k}{\mu_k S} \\ &= \Phi \sum_1^n R_{mk} = \Phi R_m \end{aligned}$$

或写为

$$\Phi = \frac{F}{R_m} = \frac{IN}{R_m} \quad (0-3)$$

式中 R_m ——整个磁路的总磁阻, 单位为 1/H;

μ ——相对磁导率。

式(0-3)表示磁通 Φ 、磁势 F 与磁路磁阻 R_m 三者之间的关系。因为它与电路中的欧姆定律表示形式相同, 故称其为磁路欧姆定律。值得指出的是, 在铁磁材料构成的磁路中, 由于磁路饱和及磁滞的影响, R_m 不为恒值, 因此只能用此式进行定性分析, 不能用于定量计算。

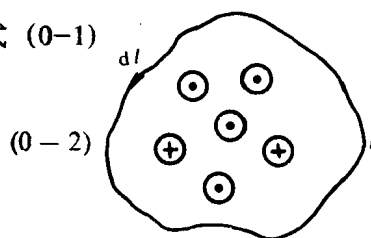


图 0-3 全电流定律

三、电磁感应定律

(一) 电磁感应定律

设一个 N 匝的线圈，当与此线圈交链的磁通随时间发生变化时，线圈中便会产生感应电动势，称此现象为电磁感应现象。当我们规定感应电动势的正方向与产生它的磁通的正方向之间符合右螺旋定则时，则感应电动势可用下式表示

$$e = -\frac{d\psi}{dt} = -N\frac{d\Phi}{dt} \quad (0-4)$$

式中 e ——线圈中产生的感应电动势；

$\psi = \Phi N$ ——交链此线圈的总磁链。

这是一个实验定律，式中右侧的负号表示，如果在感应电动势 e 的作用下，线圈中流过电流，则该电流所产生的磁通起着反对交链线圈磁通 Φ 变化的作用。这个物理规律称为楞次定律。当 Φ 的单位为 Wb ，时间 t 的单位为 s 时，则 e 的单位为 V 。

设与线圈交链的磁通随时间按正弦规律变化，有

$$\begin{aligned} \Phi &= \Phi_m \sin \omega t \\ e &= -N\frac{d\Phi}{dt} = -N\Phi_m \frac{d}{dt} \sin \omega t \\ &= -N\omega\Phi_m \cos \omega t \\ &= E_m \sin(\omega t - 90^\circ) \end{aligned}$$

式中 $E_m = N\omega\Phi_m$ ——感应电动势的最大值。

从而可知，当磁通按正弦规律变化时，感应电动势也将按正弦规律变化，而在相位上感应电动势 e 滞后于磁通 Φ 90° 电角度，其相量关系见图 0-4。

感应电动势的有效值

$$\begin{aligned} E &= \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \frac{N\omega\Phi_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f N\Phi_m \\ &= 4.44f N\Phi_m \end{aligned} \quad (0-5)$$

计入相位关系，可写为

$$\dot{E} = -j4.44f N\Phi_m \quad (0-6)$$

此式为本书常用的感应电动势计算公式。

此外，在本书中还经常用到公式

$$e = Blv \quad (0-7)$$

式中 B ——磁感应强度，单位为 T ；

l ——导体切割磁力线部分的有效长度，单位为 m ；

v ——导体与磁场的相对切割速度，单位为 m/s ；

e ——切割电动势，又称旋转电动势，单位为 V 。

式(0-7)表示，在恒定磁场中，当导体做切割磁力线运动时，若磁力线、导体与运动方向三者相互垂直，导体中产生的切割电动势的大小即可用此式计算，切割电动势 e 的方向可依据右手定则判定。右手定则具体方法是：将右手掌平伸开，张开大拇指与其余四个手指垂直；令磁力线由手心穿过，大拇指表示导体切割磁力线的运动方向，则四个手指即表示切割电动势 e 的方向。如图 0-5 所示。

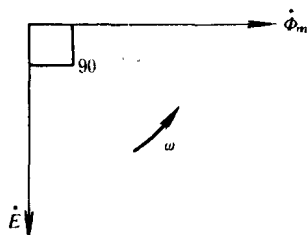
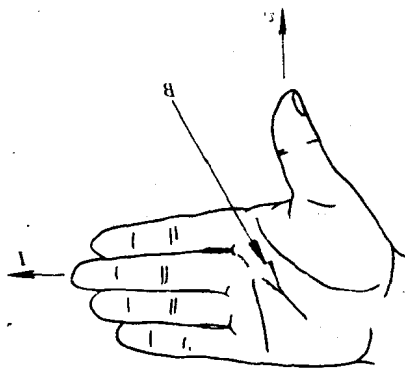
图 0-4 感应电动势 $\dot{E}$ 与 $\dot{\Phi}_m$ 通之间的相位关系

图 0-5 右手定则

(二) 自感电动势 e_L

当线圈中有电流 i 流过, 如电流 i 随时间变化, 则由 i 产生的与线圈自身交链的磁链也将随时间变化, 此时在线圈中将产生感应电动势 e_L , 称其为自感电动势, 表示式为

$$e_L = -\frac{d\psi_L}{dt} = -L \cdot \frac{di}{dt} \quad (0-8)$$

式中 ψ_L ——线圈的自感磁链;

L ——线圈的自感系数, 单位为 H.

实验表明, 对于空心线圈, 线圈的自感磁链 ψ_L 与流过线圈的电流 i 成正比, 即 $\psi_L = Li$, 或 $L = \psi_L / i$, L 表示单位电流产生的自感磁链, 称其为该线圈的自感系数, 单位为亨利 (H), 简称自感。式 (0-8) 表明, 自感电动势 e_L 正比于电流 i 的变化率和自感系数 L 的乘积。关于 e_L 、 i 、 Φ_L 正方向的规定, 我们规定 e_L 的正方向与电流 i 的正方向一致, 同时又规定磁通 Φ_L 的正方向与产生它的电流 i 的正方向之间符合右手螺旋定则, 这样 e_L 、 i 、 Φ_L 正方向关系如图 0-6 所示。参看式 (0-4), Φ_L 与 ψ_L 之间的关系为

$$\psi_L = N\Phi_L$$

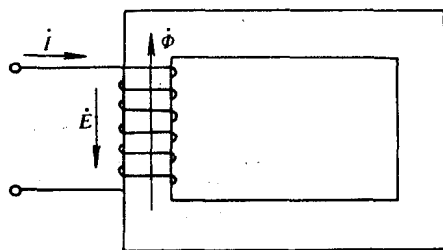
或

$$\Phi_L = \frac{\psi_L}{N}$$

当流过线圈的电流按正弦规律变化时, 有

$$\begin{aligned} e_L &= -L \frac{di}{dt} = -L \frac{d}{dt} I_m \sin \omega t \\ &= -I_m L \omega \cos \omega t \\ &= -I_m X_L \cos \omega t \\ &= E_{Lm} \sin(\omega t - 90^\circ) \end{aligned} \quad (0-9)$$

式中 $E_{Lm} = \omega L I_m = X_L I_m$ ——自感电动势的最大值。

图 0-6 i 、 Φ 、 E 方向的规定

式(0-9)表明, 流过线圈的电流为正弦量时, 线圈中产生的自感电动势也为正弦量, 其幅值为 E_{Lm} , 相位上滞后于电流 90° 电角度。

(三) 互感电动势 e_M

在相邻的两个线圈中, 当线圈 1 中的电流发生变化时, 由它产生并与线圈 2 相交链的一部分磁通 Φ_{12} 也发生变化, 在线圈 2 中将产生感应电动势。因为这种电动势是由相互感应产生的, 所以称其为互感电动势, 用 e_M 表示

$$\begin{aligned} e_{M2} &= -\frac{d\psi_{12}}{dt} = -N_2 \frac{d\Phi_{12}}{dt} \\ &= -M \frac{di_1}{dt} \end{aligned} \quad (0-10)$$

式中 $\psi_{12} = N\Phi_{12}$ ——线圈 1 对线圈 2 的互感磁链;

$M = \psi_{12} / i_1$ ——线圈 1、2 之间的互感系数, 简称互感, 单位为亨(H);

e_{M2} ——线圈 2 中的互感电动势, 其正方向与 i_1 的正方向相同。

对于铁磁材料, 因为磁导率 μ_{Fe} 不是一个常数, 所以铁心的线圈的自感 L 与互感 M 也不是常数, 铁心磁路越饱和, 其自感 L (或互感 M) 的数值越小。

四、电路定律

(一) 基尔霍夫第一、第二定律

第一定律: 对于任意一个节点, $\sum I = 0$, 如果是正弦交流电流, 则有 $\sum i = 0$, 或 $\sum \dot{i} = 0$ 。

第二定律: 对于任意一个回路, 有 $\sum e = \sum u$, 见图 0-7。

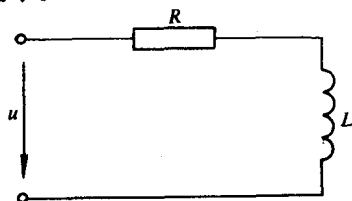


图 0-7 R-L 电路

由回路可得

$$u = iR + L \frac{di}{dt}$$

对于正弦电路, 上式可写成复数形式

$$\dot{U} = \dot{I}R + j\omega L \dot{I} = \dot{I}(R + jX_L) = \dot{I}Z$$

式中 $X_L = \omega L$ ——自感电抗, 简称感抗, 单位为 Ω ;

$\omega = 2\pi f$ ——电流变化角频率, 单位为 $1/s$;

$Z = R + jX_L$ ——交流电路的复阻抗, 单位为 Ω 。

另外, 关于交流电路复数计算方法及三相交流电路的分析计算方法也应十分熟悉。

(二) 欧姆定律

流过电阻 R 中的电流的大小与加在电阻两端的电压 U 的大小成正比, 与电阻 R 的大小成反比, I 、 U 、 R 三者的关系, 称为欧姆定律, 即

$$I = \frac{U}{R} \quad \text{或} \quad U = IR, \quad R = \frac{U}{I}$$

对于交流电路, 则可写成复数形式

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{Z} \quad \text{或} \quad \dot{U} = \dot{I}Z, \quad Z = \frac{\dot{U}}{\dot{I}}$$