

高等学校试用教材

电机学—机电能量转换

哈尔滨电工学院 汤蕴璆 主编

GAODENG XUE
XIAOJIAOCAI

机械工业出版社

3

高等学校试用教材

电机学——机电能量转换

哈尔滨电工学院 汤蕴璆 主编



机械工业出版社

本书是一本采用机电能量转换体系编写的新电机学教材。全书共13章，前八章主要阐述机电能量转换的基本原理（能量关系，保守系统及其储能，电磁转矩的一般公式，能量转换的机制和条件），变压器，交流电机理论的共同问题，以及直流电机、感应电机和同步电机的稳态分析；后五章阐述分析旋转电机的一般方法（运动方程的建立和解法，统一电机理论）和旋转电机的动态分析。书末还编入不对称绕组的谐波磁势分析，拉格朗日方程的导出，隐极交流电机的气隙磁场和能量流传等五个附录。本书可作为高等院校本科强电专业的教材，亦可供有关专业的研究生和科技人员参考。

电机学——机电能量转换

哈尔滨电工学院 汤蕴璆 主编

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

北京市密云县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 $30 \frac{1}{4}$ · 字数 743 千字

1981年6月北京第一版

1986年6月北京第二版·1986年6月北京第四次印刷

印数 13,001—15,800 · 定价 5.00 元

*

统一书号：15033·5042

前 言

本书是在1981~1982年出版的高等学校试用教材《电机学——机电能量转换（上、下册）》的基础上，根据1983年5月高等学校电机专业教材编审小组制订的新教学计划和教学大纲以及审定的修改大纲修订的。

本书是采用机电能量转换体系编写的一本新电机学教材，全书共13章。前八章主要阐述机电能量转换的基本原理，交流电机理论的共同问题，以及变压器、直流电机、感应电机和同步电机的稳态分析；后五章阐述旋转电机的一般分析方法，以及直流电机、同步电机和感应电机的动态分析。书末还编入不对称绕组的谐波磁势分析，拉格朗日方程的导出，隐极电机的气隙磁场和能量流传等五个附录。本书可作为高等工科院校强电专业的教材，亦可供有关专业的研究生和科技人员参考。

本书由哈尔滨电工学院汤蕴璆教授、史乃副教授，上海交通大学任仲岳副教授，合肥工业大学吴奕同志，沈阳机电学院王侠的同志等参加编写，汤蕴璆教授担任主编。参加本书第一版编写的还有姚守猷教授，唐任远教授、沈文豹、王振永和杨起副教授。

本书由太原工学院熊大慰教授主审。熊大慰教授对本书的体系和许多具体问题的写法提出了许多宝贵意见，对此编者表示衷心感谢。

本书的编写得到了中国科学院学部委员丁舜年，上海交通大学曾继铎教授、李仁定副教授，华中工学院林金铭教授，清华大学陈汤铭副教授，西安交通大学汪国梁副教授等的关心和支持；哈尔滨电机厂、上海电机厂、东方电机厂、大连电机厂、沈阳变压器厂等单位为本书提供了图片和资料，在此一并表示谢意。

编者

1985年

主要符号表

A	面积, A 相	F_{ν}	单相绕组所生的 ν 次谐波磁势
a	交流绕组并联支路数, a 相, 120° 复量算子	F_q	q 个线圈所生磁势
a_m	直流电机并联支路对数	F_K	换向极绕组磁势
B	磁感强度(磁密), B 相	F_δ	气隙磁势
B_δ	气隙磁密	f	频率, 力, 磁势的瞬时值
B_{ad}	直轴电枢磁场磁密	f_1	定子频率
B_{aq}	交轴电枢磁场磁密	f_2	转子频率
B_σ	漏磁磁密	f_N	额定频率
b	宽度, b 相, 磁感强度瞬时值	f_ν	ν 次谐波频率
b_s	槽宽	G	重量
C	C 相	H	磁场强度
C_T	转矩常数	h	高度
C_e	电势常数	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
c	比热	I_a	直流电机的电枢电流
D_1	定子直径	I_m	交流励磁电流
D_a	电枢外径	I_f	直流励磁电流
E	电动势(简称电势, 交流表示有效值)	I_μ	I_m 中的磁化分量
E_ϕ	相电势	I_N	额定电流
E_0	空载电势	I_0	空载电流
E_1	变压器一次绕组(电机定子绕组)由主磁通感应的电势有效值	I_k	短路电流, 堵转电流
E_2	变压器二次绕组(电机转子绕组)由主磁通感应的电势有效值	I_{st}	起动电流
E_2'	E_2 的归算值	I_1	变压器一次(感应电机定子)电流
E_σ	漏抗电势	I_2	变压器二次(感应电机转子)电流
E_{ad}	直轴电枢反应电势	I_2'	I_2 的归算值
E_{aq}	交轴电枢反应电势	I_{1+}	感应电机定子电流的正序分量
E_q	q 个线圈的合成电势	I_{1-}	感应电机定子电流的负序分量
e	电势瞬时值	i	电流的瞬时值
e_K	换向电势	J	转动惯量
e_R	电抗电势	j	电流密度, 虚数符号
F	磁动势(简称磁势), 力	K	换向片片数
F_a	电枢磁势	k	常数, 变压器变比
F_m	感应电机的激磁磁势	k_s	饱和系数
F_{ad}	直轴电枢反应磁势	k_i	电流变比
F_{aq}	交轴电枢反应磁势	k_e	电势变比
F_ϕ	单相绕组所生的基波磁势	k_{y1}	基波分布因数
		k_{y1}	基波节距因数

k_{w1}	基波绕组因数	R_f	励磁绕组电阻
k_{qv}	v 次谐波分布因数	R_o	电枢电阻
k_{yv}	v 次谐波的节距因数	R_L	负载电阻
k_{wv}	v 次谐波的绕组因数	R_R	端环电阻
K_c	短路比	R_B	笼条电阻
L	自感	R_k	变压器或感应电机的短路电阻
$L_{1\sigma}$	变压器一次侧(感应电机定子)漏感	R_m	激磁电阻
$L_{2\sigma}$	变压器二次侧(感应电机转子)漏感	S	视在功率
l	长度	\mathcal{S}_N	额定视在功率
M	互感	s	转差率
m	相数	s_N	额定转差率
m_1	交流电机定子相数	s_m	最大转矩时的转差率
m_2	感应电机转子相数	s_+	转子对正序磁场的转差率
N	每相串联匝数	s_-	转子对负序磁场的转差率
n	转子转速	T	转矩, 时间常数, 周期
n_c	每个线圈的匝数	T_K	换向周期
n_N	额定转速	T'_d	直轴瞬态时间常数
n_0	空载转速	T_a	电枢回路时间常数
n_s	同步转速	T_f	励磁回路时间常数
n_v	v 次谐波旋转磁场的转速	T_N	额定转矩
n_2	转子基波旋转磁场相对于转子的转速	T_0	空载转矩
Δn^*	转速变化率	T_m	电磁转矩
P	功率	T_{max}	最大转矩
P_N	额定功率	T_{pi}	同步电动机的牵入转矩
P_m	电磁功率	T_{st}	起动转矩
P_o	感应电动机的总机械功率	T_L	负载转矩
P_h	堵转功率, 短路功率, 短路损耗	t	时间, 齿距
P_1	输入功率	U	电压(交流表示有效值)
P_2	输出功率	U_N	额定电压
P_o	空载功率, 空载损耗	U_ϕ	相电压
P	损耗, 极对数	U_1	电源电压, 定子端电压
P_{Cu}	铜耗	U_{1+}	定子端的正序电压
P_{Fe}	铁耗	U_{1-}	定子端的负序电压
P_Δ	杂散损耗	U_0	空载电压
P_o	机械损耗	U_k	短路电压, 堵转电压
Q	无功功率, 热量	u	电压的瞬时值
q	每极每相槽数	Δu^*	电压变化率
R	电阻	$2\Delta U_s$	每对电刷的电压降
\mathcal{R}_m	磁阻	v	速度, 线速度
R_1	变压器一次侧(感应电机定子)电阻	W	功, 能
R_2	变压器二次侧(感应电机转子)电阻	X	电抗
R'_2	R_2 的归算值	X_o	电枢反应电抗

X_+ 正序电抗
 X_- 负序电抗
 X_0 零序电抗
 X_{ad} 直轴电枢反应电抗
 X_{aq} 交轴电枢反应电抗
 X_s 定子漏抗
 X_d 同步电抗
 X_d' 直轴同步电抗
 X_q 交轴同步电抗
 X_m 激磁电抗
 X_k 短路电抗
 $X_{1\sigma}$ 变压器一次侧(感应电机定子)漏抗
 $X_{2\sigma}$ 变压器二次侧(感应电机转子)漏抗
 $X'_{1\sigma}$ $X_{2\sigma}$ 的归算值
 X_d' 直轴瞬态电抗
 X_d'' 直轴超瞬态电抗
 y 绕组合成节距
 y_1 第一节距
 y_2 第二节距
 y_k 换向器节距
 Z 阻抗, 槽数
 Z_m 激磁阻抗
 Z_k 短路阻抗
 Z_+ 正序阻抗
 Z_- 负序阻抗
 Z_0 零序阻抗
 $Z_{1\sigma}$ 变压器一次侧(感应电机定子)漏阻抗
 $Z_{2\sigma}$ 变压器二次侧(感应电机转子)漏阻抗
 $Z'_{1\sigma}$ $Z_{2\sigma}$ 的归算值
 α 角度, 相邻两槽间的电角度
 β 夹角, q 个线圈的总夹角
 δ 气隙, 功率角
 ϵ 小数, 短距角

η 效率
 η_N 额定效率
 η_{max} 最大效率
 θ 温度, 角度
 Λ 磁导
 Λ_0 漏磁导
 λ 比漏磁导, 导热系数
 μ 磁导率, 转子谐波次数
 μ_0 空气磁导率
 μ_{Fe} 铁芯磁导率
 ν 谐波次数
 ρ 电阻率
 σ 漏磁系数
 τ 极距
 Φ 磁通量
 Φ_0 空载磁通
 Φ_a 电枢反应磁通
 Φ_m 变压器或感应电机的主磁通
 Φ_0 漏磁通
 Φ_{ad} 直轴电枢反应磁通
 Φ_{aq} 交轴电枢反应磁通
 Φ_ν ν 次谐波磁通
 ϕ 磁通量的瞬时值
 φ 相角, 功率因数角
 φ_0 空载功率因数角
 φ_k 短路功率因数角
 ψ 磁链, E 和 i 间的夹角
 ψ_0 内功率因数角
 ψ_2 感应电机转子的内功率因数角
 Ω 机械角速度
 Ω 同步机械角速度
 ω 电角速度(角频率)

目 录

绪论	1	§ 3-7 直流电机的电压方程和 转矩方程	109
§ 0-1 电机发展简史	1	§ 3-8 直流电机中的能量转换	111
§ 0-2 我国电机制造工业发展概况	4	§ 3-9 直流发电机的运行特性	113
§ 0-3 课程的任务	5	§ 3-10 直流电动机的运行特性	120
第一章 磁路与变压器	6	§ 3-11 直流电动机的起动	124
§ 1-1 磁路的概念和计算方法	6	§ 3-12 直流电动机的调速	125
§ 1-2 铁磁材料及其磁化曲线	13	§ 3-13 直流电动机的制动	131
§ 1-3 交流铁芯线圈	15	§ 3-14 换向	132
§ 1-4 电力变压器的基本结构	23	第四章 交流电机理论的共同问题	140
§ 1-5 变压器的空载运行	25	§ 4-1 交流绕组的感应电势	140
§ 1-6 变压器的负载运行	27	§ 4-2 三相交流绕组	153
§ 1-7 变压器的基本方程和等效电路	29	§ 4-3 交流绕组的磁势	164
§ 1-8 变压器等效电路参数的测定	34	§ 4-4 交流电机的电磁转矩	175
§ 1-9 变压器的耦合电路方程	36	第五章 感应电机的稳态分析	185
§ 1-10 三相电力变压器	37	§ 5-1 感应电机的结构和运行状态	185
§ 1-11 标么值	42	§ 5-2 三相感应电动机的磁势和磁场	188
§ 1-12 变压器的电压变化率与效率	45	§ 5-3 三相感应电动机的基本方程 和等效电路	194
§ 1-13 变压器的并联运行	47	§ 5-4 感应电机内的能量转换	199
§ 1-14 自耦变压器和三绕组变压器	50	§ 5-5 笼型转子参数的归算	203
§ 1-15 音频变压器	55	§ 5-6 三相感应电机参数的测定	204
第二章 机电能量转换的基本原理	62	§ 5-7 感应电动机的转矩—转差率曲线	207
§ 2-1 机电能量转换过程中的 能量关系	63	§ 5-8 感应电动机的工作特性	211
§ 2-2 单边激励的机电装置	64	§ 5-9 感应电动机的起动	218
§ 2-3 双边激励的机电装置	71	§ 5-10 深槽和双笼感应电动机	222
§ 2-4 保守系统和状态函数	75	§ 5-11 感应电动机的调速	225
§ 2-5 机电能量转换的条件	78	§ 5-12 谐波磁场对转矩—转差率 曲线的影响	232
§ 2-6 用电场作为耦合场的机电装置	81	§ 5-13 单相感应电动机	235
§ 2-7 旋转电机的构成和作用原理	83	§ 5-14 感应调压器	240
第三章 直流电机的稳态分析	91	第六章 同步电机的稳态分析	244
§ 3-1 直流电机的结构和励磁方式	91	§ 6-1 同步电机的结构和运行状态	244
§ 3-2 直流电枢绕组	94	§ 6-2 同步发电机的空载运行	251
§ 3-3 电枢绕组的感应电势	101	§ 6-3 对称负载时的电枢反应	252
§ 3-4 直流电机的空载磁路	102	§ 6-4 隐极同步发电机的电压方程、 相量图和等效电路	255
§ 3-5 负载时的电枢磁势和电枢反应	104		
§ 3-6 直流电机的电磁转矩	108		

§ 6-5 凸极同步发电机的电压方程和相量图	258	§ 11-2 他励直流发电机的框图和传递函数	376
§ 6-6 同步发电机的转矩方程	261	§ 11-3 他励直流电动机的框图和传递函数	378
§ 6-7 同步发电机的功角特性	262	§ 11-4 直流电动机起动过程的动态分析	385
§ 6-8 同步电机的能量转换	266	§ 11-5 并励发电机的自励过程	387
§ 6-9 同步电机参数的测定	268	第十二章 同步电机的动态分析	391
§ 6-10 同步发电机的运行特性	273	§ 12-1 无阻尼绕组时理想同步电机的运动方程	391
§ 6-11 同步发电机与电网的并联运行	278	§ 12-2 派克方程	395
§ 6-12 同步电动机	283	§ 12-3 同步电机的标么值	399
§ 6-13 同步补偿机	289	§ 12-4 在复频域内同步电机的电压方程, 转子电流的消去	402
第七章 其它型式的交流电机	294	§ 12-5 同步电机的电抗函数	404
§ 7-1 两相伺服电动机	294	§ 12-6 无阻尼绕组的同步发电机的三相突然短路	406
§ 7-2 自整角机	296	§ 12-7 装有阻尼绕组的同步发电机的三相突然短路	413
§ 7-3 磁滞电动机	299	§ 12-8 同步电机的振荡	417
§ 7-4 步进电动机	301	第十三章 感应电机的动态分析	425
第八章 旋转电机的发热和冷却	305	§ 13-1 三相感应电动机的突然短路	425
§ 8-1 旋转电机的损耗	305	§ 13-2 三相感应电动机起动时的机械瞬态	426
§ 8-2 旋转电机的发热和冷却	306	§ 13-3 三相感应电动机的运动方程	427
§ 8-3 旋转电机的定额	311	§ 13-4 三相感应电动机起动过程的动态分析	430
§ 8-4 旋转电机的冷却方式	311	附录	433
第九章 旋转电机分析的一般方法	315	附录一 不对称绕组的磁势谐波分析	433
§ 9-1 旋转电机分析的一般方法	315	附录二 拉格朗日方程的导出	444
§ 9-2 运动方程的建立方法	316	附录三 装有阻尼绕组时同步电机的运动方程和电抗函数	448
§ 9-3 运动方程的解法	324	附录四 隐极交流电机的气隙磁场和能量流传	463
§ 9-4 运动方程的变换	337	附录五 电动机速度的电子控制	467
§ 9-5 电机的统一理论	349	参考书目	476
第十章 交流电机的不对称运行	360		
§ 10-1 不对称运行时三相感应电动机的序阻抗	360		
§ 10-2 三相感应电动机的不对称运行	361		
§ 10-3 两相伺服电动机的不对称运行	366		
§ 10-4 不对称运行时同步发电机的序阻抗	366		
§ 10-5 同步发电机的单相短路和线间短路	370		
第十一章 直流电机的动态分析	374		
§ 11-1 直流电机的运动方程	374		

绪 论

在进入正文之前，先对电机和电机理论的发展概况作一简要介绍。

§ 0-1 电机发展简史

电机发展的历史，大体上可以分为三个时期：（1）直流电机的产生和形成时期；（2）交流电机的形成时期；（3）电机理论、设计和制造工艺逐步达到完善化的时期。

（一）直流电机的产生和形成时期

电机发展史的初期主要是直流电机发展的历史。1821年，法拉第发现了载流导体在磁场内受力的现象；1831年，法拉第又发现了电磁感应定律。两年以后，皮克西（Pixii）利用磁铁和线圈之间的相对运动和一个换向装置，制成了一台旋转磁极式直流发电机，这就是现代直流发电机的雏型。虽然早在1833年，楞茨已经证明了电机的可逆原理，但在1870年以前，直流发电机和电动机一直被看作为两种不同的电机各自独立发展着。

在1860年以前，由于人们还不善于从 $f = Bli$ 这个角度来考察问题，因此当时都从电磁铁之间的相互吸引和排斥作为制造电动机的指导思想。当时，电动机均用蓄电池作为电源，因此要使电动机在工业中得到应用，就必须建立较大的廉价的直流电源。

这样，由于生产上的需要（电报，电解，电镀），促使直流发电机发展得较快。在1834~1870年这一段内，发电机方面出现了三个重大的发明和改进。在励磁方面，首先从永磁转变到用电流来励磁，其后又从用蓄电池他励发展到自励。在电枢方面，1870年格拉姆（Gramme）提出了环形电枢绕组以代替凸极式的T型电枢绕组。由于环形绕组为分布绕组，电压脉动较小，换向和散热情况亦较好，所以T型绕组不久就被淘汰。

关于环形电枢绕组，早先已在电动机模型中提出过，当时没有受到重视。格拉姆在发电机上提出环形电枢结构以后，人们对发电机和电动机中的这两种结构进行了对比，最后终于使电机的可逆原理为大家所接受，此后发电机和电动机的发展合而为一。

1870~1890年是直流电机发展的另一个阶段。1873年，海夫纳—阿尔泰涅克发明了鼓形电枢绕组，提高了导线的利用率。为了加强绕组的机械固定和减少铜线内部的涡流损耗，绕组的有效部分放到铁芯的槽中。1880年爱迪生提出采用叠片铁芯，以减少铁芯损耗、降低电枢绕组的温升。鼓型电枢绕组和有槽叠片铁芯的结构一直沿用到今天。

上述进步使得直流电机的电磁负荷、单机容量和效率大为提高，这样，换向器上的火花问题就成为当时的突出问题。1884年出现了换向极和补偿绕组，1885年开始用炭粉来做电刷。这些措施使火花问题暂告缓和，另一方面又促进了电磁负荷和单机容量的进一步提高。

在电机理论方面，1886年霍普金斯兄弟（John and Edward Hopkinson）确立了磁路的欧姆定律。1891年阿诺尔特（Arnold）建立了直流电枢绕组理论。这就使直流电机的设计和计算建立在更为科学的基础上。因此，到十九世纪九十年代，直流电机已经具备了现代直流电机的主要结构特点。

1882年是电机发展史上的一个转折点。这一年,台勃莱兹(Deprez)把米斯巴哈水电站发出的2kW的直流电,用一条长57km的输电线送到慕尼黑,从而为电能和电机的应用打开了广阔的前景。随着直流电的广泛应用,直流电机很快就暴露出其固有的缺点。如众所周知,远距离输电时,电压越高,线路的损耗就越小,但是制造高压直流发电机却有很大的困难。此外,随着单机容量的日益增大,直流电机的换向亦越来越困难。因此八十年代以后,人们的注意力就逐渐转移到交流方面。

(二) 交流电机的形成和发展时期

1832年,人们就知道了单相交流发电机。但在1870年以前,由于生产上没有需要,加上当时科学水平的限制,人们对交流电还不很了解。1876年,亚勃罗契柯夫首次采用交流和开磁路式串联变压器给“电烛”供电。1884年,霍普金生兄弟发明了具有闭合磁路的变压器。次年,齐波诺斯基、德利和勃拉第等三人又提出了芯式和壳式结构,以后单相变压器就在照明系统中得到了一定的应用。但是应用交流电来驱动各种工作机械的问题仍未获得解决。

交流感应电动机的发明,与产生旋转磁场这一研究工作紧密相连。1825年,阿拉果(Arago)利用金属圆环的旋转,使悬挂在其中的磁针得到一定的偏转,这一现象实质上就是多相感应电动机的工作基础。1879年,拜依莱(Bailey)采用依次变动四个磁极上的激磁电流的办法,首次用电的办法获得了旋转磁场。1883年,台勃莱兹提出,把两个在时间和空间上各自相差 $\frac{1}{4}$ 周期的交变磁场合成,可以得到一个旋转磁场。但是真正应用交流电来

产生旋转磁场,并做出实际可用的感应电动机,是以弗拉利斯(Ferraris)和特斯拉(Tesla)两人开始。1885年,弗拉利斯把利用交流电来产生旋转磁场和用铜盘来产生感应涡流这两个思想结合在一起,制成了第一台两相感应电动机;以后(1888年)又提出了“利用交流电来产生电动旋转”的经典论文。同一时期,特斯拉亦独立地从事于旋转磁场的研究,而且几乎与弗拉利斯同时发明了感应电动机。

1889年,多利伏—多勃罗夫斯基提出采用三相制的建议,并设计和制出了三相感应电动机。与单相或两相系统比较,三相输电系统的效率较高,用铜亦较节省;三相电机的性能、效率和材料利用亦比单相和两相好。三相制的优点,在1891年建成的从劳芬到法兰克福的三相电力系统中充分地显示了出来。这个系统的顺利运行表明,三相交流电不但便于输送和分配,亦可用作电力驱动;三相电动机的结构简单、工作可靠。因此到二十世纪初叶,在电力工业中,交流三相制就占据了绝对统治的地位。

十九世纪八十年代的末期,由于交流发电站的迅速发展,要求发展出能与发电机直接连接的高速原动机。由于生产上的需要以及许多科技人员的苦心研究,很快就出现了高速的汽轮机。到九十年代初期,许多电站中已经装有1000kW的汽轮发电机组。此后,三相同步电机的结构逐渐划分为高速和低速两类,高速的以汽轮发电机为代表,低速的以水轮发电机为代表。同时,由于比较明显的理由,几乎所有的制造厂都采用了磁极旋转、电枢绕组嵌放在定子铁芯槽内的结构。随着电力系统的逐步扩大,频率亦趋于标准化,欧洲以50Hz为标准工频,美国以60Hz为标准工频。

由于工业和运输方面的需要,九十年代还出现了由交流变换为直流的旋转变流机,以及交流换向器电机。

在电机理论方面,1893年左右,肯尼莱(Kenelly)和司坦麦茨(Steinmetz)开始利用

复数和相量来分析交流电路。1894年,海兰(Heyland)提出“多相感应电动机和变压器性能的图解确定法”的论文,是为感应电机理论中的第一篇经典性论文。同年,弗拉利斯已经采用把脉振磁场分解为两个大小相等、转向相反的旋转磁场的办法来分析单相感应电动机,这种方法以后被称为双旋转磁场理论。1894年前后,波梯(Potier)和乔治(Goege)又建立了交轴磁场理论。1899年,在研究同步电动机的电枢反应时,勃朗台尔(Blondel)提出了双反应理论,成为后来研究所有凸极电机的基础。

总的讲来,到十九世纪结束时,各种交、直流电机的基本类型及其基本理论和设计方法,大体上都已建立起来。

(三) 电机理论、设计和制造工艺逐步达到完善化的时期

二十世纪是电机发展史中的一个新时期。这个时期的特点是:由于工业的发展,对电机提出了各种新的和更高的要求;由于自动化方面的需要,出现了一系列控制电机。在这个时期内,由于对电机内部所发生的电磁、发热和其他过程进行了深入的研究,加上材料的改进,使得交、直流电机的单机容量和材料利用得到很大的提高,电机的性能亦有显著改进。

就材料利用来说,以德国AEG厂出品的三相笼型3.7kW、1500 r/min的感应电动机为例,1889年该机重155kg,1901年减到108kg,1930年进一步降低到42kg,外型尺寸亦显著减小。就单机容量来说,二十世纪初,水轮发电机的最大单机容量不超过1000kW,而现在则已超过50万kW;汽轮发电机的单机容量不超过5000kVA,1930年提高到10万kW,四十年代和五十年代,由于采用了氢冷、氢内冷、油冷和水冷等冷却方法,单机容量进一步提高。目前汽轮发电机的单机容量已达1000MW。

在电机理论方面,1918年,福提斯古(Fortescue)提出了求解三相不对称问题的一般方法——对称分量法。对于不对称的三相系统,总可以把不对称的电压和电流分解成三组对称分量,其中正序电流在电机内部产生一个正向旋转磁场,负序电流产生一个反向旋转磁场,这样不对称运行时电机内部的物理情况就比较清楚;另外,同步电机和感应电机的分析方法亦得到进一步的统一。1926~1930年,道黑提和尼古尔两人先后提出了五篇经典性论文,发展了勃朗台尔的双反应理论,求出了瞬态时同步电机的功角特性,以及三相和单相突然短路时的短路电流。1929年,派克利用坐标变换和算子法,导出了瞬态运行时同步电机的电压方程和算子阻抗。同时,许多学者又研究了同步电机内的磁场分布,得出了各种电抗的计算公式和测定方法。这些工作使得同步电机的理论达到了比较完善的地步。在感应电机方面,在1920~1940年间,许多学者(Dreyfus, Punga, Fritz, Möller, Heller)对双笼和深槽电机的理论和计算方法,谐波磁场所产生的寄生转矩,感应电机的噪音等问题进行了一系列的研究。

为了进一步找出分析各种电机的统一方法,1935~1938年, Kron提出了利用张量分析来研究旋转电机。这种方法的特点是,一旦列出原型电机的运动方程,通过特定的转换张量,就可以求出其他各种电机的运动方程。线圈的连接,电刷或集电环的引入,对称分量和其他各种分量的应用等等,都相当于一定的坐标变换。张量方法的应用,不但揭示了各种电机和各种分析方法之间的相互联系,从而使电机理论趋于统一,而且还为许多复杂问题的求解提供了途径。

四十年代前后,由于第二次世界大战的影响,自动控制技术得到了很大的发展,此时出现了一系列新的控制电机,例如电机放大机,交流测速发电机,回转变压器等。同时,自整角机和伺服电动机的性能亦有很大的提高。同一时期,小型分马力电机的理论亦有较大的发

展。五十年代，许多学者进一步研究了同步电机和感应电机的电磁—机械瞬态。由于利用了物理模拟和模拟计算机，使许多复杂的交流电机动态运行问题得到了解决。

在旋转电机理论的体系方面，从1959年起，逐步建立起机电能量转换的新体系。这种体系的特点是：把旋转电机作为机电系统的一种，从电磁场理论出发导出其参数，从汉密尔顿原理和拉格朗日方程出发建立运动方程，用统一的方法来研究各种电机的电势、转矩和进行能量转换的条件和机制，利用统一的方法（坐标变换，方块图和传递函数，状态方程等）来分析各种电机的稳态和动态性能，以及电机和系统的联系，从而使整个电机理论建立在一个比较严密和便于利用电子计算机来求解的基础上。

七十年代以后，由于大电流晶闸管的发展，出现了便于控制、体积小、噪音小的大容量直流电源，从而使直流电动机良好调速性能得以进一步发挥。使用由晶闸管逆变器所构成的变频器，作为感应电动机定子的调频电源，或者串接到绕线型感应电动机的转子，可使感应电动机得到平滑、宽广的调速，并具有较高的效率，从而改进了感应电动机的调速性能。另一个重要发展是，数字电子计算机的广泛应用。由于利用了计算机，使旋转电机中许多复杂的理论和实际问题，例如不对称绕组的谐波磁势分析，各种电机的动态性能分析，交、直流电机内非线性磁场的分布，交流电机的饱和参数，大型汽轮发电机的端部磁场分布，电机内的三维温度场分布等等，均得到了数值解答。

关于电机和电机理论的发展简史，就介绍到这里。辩证法告诉我们，一切事物内部都存在着矛盾的运动，一切事物都在发展和变化，电机亦不例外。研究电机的发展历史，有助于我们认识电机的发展规律及其进一步发展的途径。

§ 0-2 我国电机制造业发展概况

解放前，我国的电机制造业极端落后，全国只有少数几个城市设有电机制造厂，这些厂规模小、设备差，生产能力低，产品规格混乱，材料多依赖进口。解放前的最高年产量（1947年），发电机为2万kW，电动机为68000马力，交流发电机的单机容量不超过200kW，交流电动机不超过300马力。

解放以来，我国的电机制造业发展得很快，已经逐步建成较为完整的电机制造业体系。在产量方面，1949~1952年国民经济恢复时期，各种主要产品就达到和超过了解放前的最高水平。到第一个五年计划结束时（1957年），年产量达到145万kW，是1949年的23.9倍。单机容量方面，1954年制成6000kW、1956年制成12000kW汽轮发电机，1955年制成10000kW水轮发电机。在此期间，我国的电机制造业逐步掌握了一系列产品的设计方法和制造工艺，并进行了中、小型电机产品的全国统一设计，改变了产品规格混乱的现象。到1957年年底，电机制造业的产品自给率已达到75%。

1958~1966年期间，电机制造业无论在发展品种、提高产品质量，还是在数量方面，都作出了巨大的成绩。在中、小型感应电动机方面，设计了J₂、JO₂系列并正式投产。与旧系列相比，该系列效率提高了1~2%，体积缩小了25.5%，重量减轻了20.1%。在发电设备方面，1959年和1960年相继设计和制成了5万kW氢冷和10万kW氢内冷汽轮发电机，之后又进行了5万kW以下汽轮发电机新系列的统一设计；同时，1959年制成了72500kW水轮发电机，1964年又制成了大型的22.5万kW水轮发电机组。在直流电机和中型交流电机

方面，制成了1150初轧机用的4500kW和4930kW直流电动机—发电机组，6300kW大型感应电动机和10900kW同步电动机。在这期间，还研制成功了12000kW双水内冷汽轮发电机，1960年又试制成功了10万kW的双水内冷汽轮发电机。在中、小型直流电机和微电机方面，设计出合乎我国国情的新的系列产品。还进行了许多调查和科学研究工作，建立了我国自己的电机国家标准。

1969~1972年间，又先后制成了12.5万kW和30万kW的双水内冷汽轮发电机。为了适应生产上的需要，1977年后，还试制和生产了各种不同用途的交、直流电机，包括1700mm连轧机上使用的 2×3000 kW的大型直流电动机（1975年），用于晶闸管供电的GZ型（1975年）和GZ2型（1982年）中型直流电动机系列，以及新的中小型Y系列感应电动机（1984年）。并对电机的一些新原理、新结构、新工艺、新材料、新运行方式和测试方法进行了许多研究、试验和试制工作，得到了许多成果。

复习历史，激励将来，我们一定能在这不长的时间里赶上世界先进水平。

§ 0-3 课程的任务

本课程是一门技术基础课。通过本课程的学习，获得电机的基本理论、基本知识和基本技能，为下一步学习专业课作好准备，为今后从事有关专业的专业工作打下基础。

电机是一种机电能量转换装置，它亦是电力系统、自动控制系统中的一个元件。因此本书在内容安排上，先阐述机电能量转换的基本原理，然后以交流电机理论的共同问题和三种主要电机的稳态分析作为中心，进行较详细的说明；最后再上升一步，对旋转电机分析的一般方法，交流电机的不对称运行，以及三种电机的动态分析进行必要的、较为深入的阐述。

学习本课程后，应达到下列基本要求：

(1) 对机电能量转换装置中的能量关系，耦合场、感应电势、电磁力在能量转换中的作用，机电装置运动方程的建立和一般解法有一个基本的了解。

(2) 既要掌握各种电机的共性（例如电势、磁势和电磁转矩的产生和算法，机电能量转换的条件，旋转电机的分析方法等），使学到的知识能够融会贯通，又要掌握各种电机的个性和特点，以便结合实际，对具体问题进行分析达到解决问题的目的。

(3) 对主要电机的基本结构要有一定认识。对各种电机中气隙磁场的性质和时空关系要有深入的了解。

(4) 对各种电机正常稳态时的分析方法和运行性能，要牢固掌握。要能正确地建立电压方程和转矩方程，明确电机中的能量转换关系，对稳态时电机的参数要有清晰的物理概念。能熟练地运用等效电路（相量图）和复数来计算电机的性能和主要运行数据。

(5) 对交流电机的不对称运行和直流电机、同步电机在动态情况下的分析方法以及相应的参数，要建立基本的物理概念；对一些典型的运行和动态过程要能作出正确的分析。

(6) 了解电机的有关工程性问题，例如发热和冷却，励磁系统，各种电机的应用范围，电机的额定值，主要电机的各种工程数据（效率，过载能力，起动性能数据，主要参数）范围等。

(7) 通过实验熟练掌握电机的基本实验方法和操作技能，如运行特性、损耗、稳态参数的求取和测定方法，电动机的起动和调速，发电机的建压和调频、调压等。要求能对实验结果进行分析和评定，并初步具有检查电机故障的能力。

第一章 磁路与变压器

变压器是一种传递电能的装置，在它内部不产生机电能量的转换。但是由于机电能量转换装置的理论与此变压器的理论密切相关，加上变压器在电力系统和电子电路中得到广泛的应用，因此，研究变压器一方面可以作为研究机电能量转换装置的基础，另一方面亦有其自身的实际意义。

绝大多数的机电装置和变压器内都有磁路和电路，耦合磁场的存在及其对电路的相互作用，是能量传递和能量转换过程的一个核心环节。机电装置和变压器的尺寸和性能，很大程度上亦取决于磁路所用磁性材料的性能。

因此，本章先从简单的磁路着手，说明磁路计算的方法，然后从变压器内部磁通和从耦合电路两种观点出发，详细地说明两绕组变压器的理论和分析方法，最后再对自耦变压器和三绕组变压器作一简单介绍。

§ 1-1 磁路的概念和计算方法

(一) 磁路的概念

磁通所经过的路径就称为磁路。

在机电装置和变压器内，常把导线绕成线圈，再把线圈套装或置放在铁芯上。这样，当线圈内通有电流时，由于铁芯的导磁性能较好，大部分磁通将被约束在铁芯内部，并按照一定的路径构成磁路。另一方面，在构成磁路的铁芯与铁芯之间的工作气隙内，将会得到较强的磁场。

图1-1表示两种常见的磁路，其中图a)为变压器的磁路，图b)为二极直流电机的磁路。

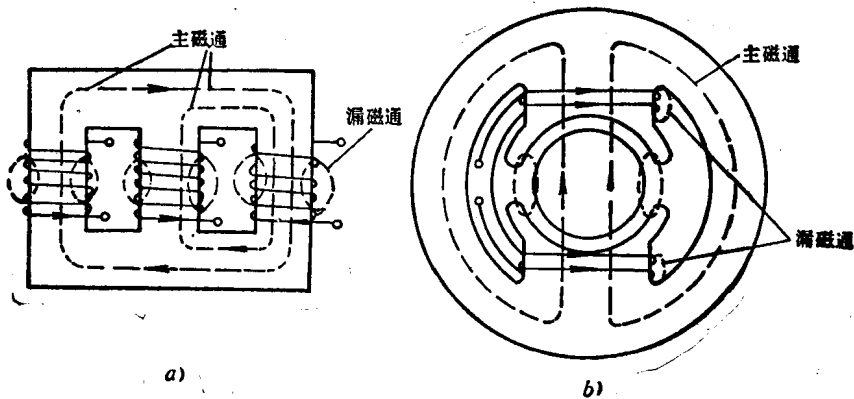


图1-1 常见的两种磁路

a) 变压器的磁路 b) 二极直流电机的磁路

载流线圈中通过的用以产生（激励）磁路中磁通的电流，通常称为**激磁电流**（或励磁电流）。若激磁电流为直流，则磁路中的磁通为恒定而不随时间变化，这种磁路称为**直流磁路**或**恒定磁通磁路**，直流电机的磁路就属于这类。若激磁电流为交流，则磁路内的磁通亦将随时间而变化，这种磁路称为**交流磁路**，交流铁芯线圈、变压器和感应电机的磁路都属于交流磁路[⊖]。

当线圈中通有激磁电流时，铁芯磁路（包括工作气隙）中将通过较多的磁通，这部分磁通通常称为**主磁通**。从路的观点看，主磁通是机电装置赖以进行工作的磁通。除此之外，围绕着载流线圈，在部分铁芯和铁芯周围的空间，还会产生一些分散的较弱的磁通，这部分磁通通常称为**漏磁通**。在图1-1中，分别标出了主磁通和漏磁通的示意图。主磁通的路径比较容易确定，漏磁通的路径较为复杂，需用专门的方法进行计算。考虑到正常工作情况下，漏磁通所占的百分数一般不太大，所以在下面的分析中，先将漏磁通忽略不计，着重说明主磁通所经磁路的计算方法，然后再进一步把漏磁通的影响考虑进去。

构成磁路后，就把原先的磁场计算问题简化成为工程上的磁路计算问题。通常，磁路计算有两种类型：
（1）给定磁路几何尺寸时，计算产生一定的磁通量所需要的激磁安匝，即应有多少匝激磁线圈和多大的激磁电流；
（2）给定一定的激磁安匝时，要求算出给定磁路内的磁通量。

磁路计算在机电装置的计算中占有相当重要的地位。当频率不高，可不计位移电流的“准稳”条件下，用安培环路定律来计算磁路。

（二）安培环路定律

安培环路定律 实验证明，沿着任何一条闭合回线 L ，磁场强度 H 的线积分值 $\oint H \cdot dl$ 恰好等于被该闭合回线所包围的总电流值 $\sum i$ （亦称为全电流），这就是安培环路定律或全电流定律（图1-2）。用公式表示时，

$$\oint H \cdot dl = \sum i \quad (1-1)$$

在式（1-1）中，若电流与闭合回线 L 的循行方向符合右手螺旋关系，就取为正值，否则取为负值。对图1-2所示电流方向， i_1 和 i_2 应取正号， i_3 应取负号。

若沿着长度 l ，磁场强度 H 处处相等，且闭合回路所包围的总电流是由通有电流 i 的 N 匝线圈（或导体）所产生，则式（1-1）可简写成

$$Hl = Ni \quad (1-2)$$

磁路的欧姆定律 由于穿过某一截面积的磁通量 Φ 等于磁通密度 B 的面积分，即

$$\Phi = \int B \cdot dA \quad (1-3)$$

在如图1-3 a) 所示的闭合铁芯磁路中，若认为磁通均匀地通过各个截面，且磁通密度 B 垂直于各个截面，则式（1-3）可简化成

$$\Phi = BA \quad (1-4)$$

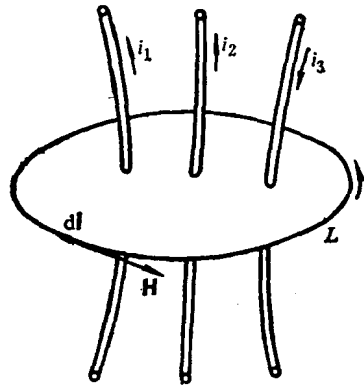


图1-2 安培环路定律

⊖ 为区别起见，以后我们把“励磁电流”作为直流激磁的专称，“激磁电流”作为总称和交流激磁时的名称。

或

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

磁通量 Φ 的单位为韦 (Wb)，磁通密度 B 的单位为特斯拉 (T) 或韦/米² (Wb/m²)，面积 A 的单位为米² (m²)。考虑到磁场强度 H 与磁通密度 B 之间有下列关系：

$$B = \mu H \quad (1-5)$$

式中 μ 为介质的磁导率，单位为韦/米 (H/m)；对于空气， $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ ，对于铁磁材料， μ_r 约为空气的 2000~6000 倍。于是式 (1-2) 可改写成如下形式：

$$Ni = \frac{B}{\mu} l = \Phi \frac{l}{\mu A} \quad (1-6)$$

或

$$F = \Phi \mathcal{R}_m \quad (1-7)$$

式中 $F = Ni$ ——作用在磁路上的安匝数，称为磁路的磁通势，简称为磁势，单位为安匝或安 (A)；

$\mathcal{R}_m = \frac{l}{\mu A}$ ——磁路的磁阻，单位为安/韦 (A/Wb)。

式 (1-7) 表明，作用在磁路上的磁通势等于磁路内的磁通量乘以磁路的磁阻。这与直流电路中

$$E = IR$$

即电势等于电流乘以电路的电阻这一关系相对应，其中磁路中的磁势 F 对应于电路中的电势 E ，磁通量 Φ 对应于电流 I ，磁阻 \mathcal{R}_m 对应于电阻 R 。

所以式 (1-7) 就称为磁路的欧姆定律。图 1-3 b) 表示与图 a) 相应的模拟电路图。

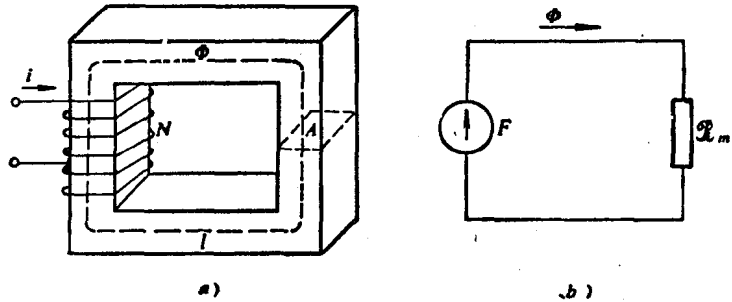


图 1-3 简单的闭合铁芯磁路

a) 铁芯磁路 b) 模拟电路图

磁阻的倒数称为磁导，用 Λ 表示，即 $\Lambda = \frac{1}{\mathcal{R}_m}$ 。

由于磁势 $F = Ni$ ，所以匝数越多、激磁电流越大，磁势就越大。由于磁阻 $\mathcal{R}_m = \frac{l}{\mu A}$ ，所以磁路的磁阻主要取决于磁路的尺寸和所用材料的磁导率。材料的磁导率越高，磁阻就越小；磁路的平均长度越大、截面积越小，磁阻就越大，这些情况与导体电阻的计算公式很相似。

从式 (1-2) 可知，对于均匀磁场， $H = \frac{Ni}{l}$ ，所以磁场强度亦可以理解为产生一定的磁通密度 B 时，单位长度上所需要的磁势。由此可知，磁场强度的单位为安匝/米 (A/m)。

【例 1-1】 有一闭合铁芯磁路，铁芯的截面积为 $9 \times 10^{-4} \text{m}^2$ ，磁路的平均长度 $l = 0.3 \text{m}$ ，铁芯的磁导率 $\mu_r = 5000\mu_0$ ，激磁绕组为 500 匝。试求在铁芯中产生 1Wb/m^2 的磁通密度时所需的激磁电流。

解 本题可用磁路的欧姆定律或安培环路定律求解。