

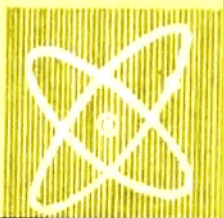
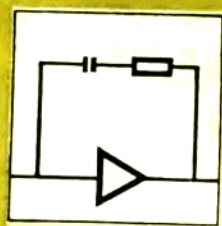
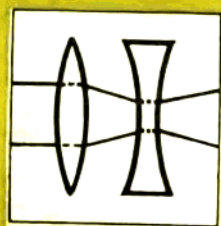
高等学校试用教材



电机学—机电能量转换

上 册

哈尔滨电工学院汤蕴璆 主编



机械工业出版社

σ	漏磁系数	ϕ	瞬时磁通量
τ	极距	φ	相角, 功率因数角
	Φ, ϕ, φ	φ_0	空载功率因数角
Φ	磁通量	φ_K	短路功率因数角
Φ_0	空载磁通		ψ
Φ_a	电枢反应磁通	ψ	磁链, E 和 i 间的夹角
Φ_m	变压器或感应电机的主磁通	ψ_0	内功率因数角
Φ_s	漏磁通	ψ_r	感应电机转子的内功率因数角
Φ_{ad}	直轴电枢反应磁通		Ω, ω
Φ_{aq}	交轴电枢反应磁通	Ω	机械角速度
Φ_v	v 次谐波磁通	Ω_s	同步机械角速度
		ω	电角速度 (角频率)

前 言

本书是根据1978年4月在天津召开的高等院校一机部对口专业座谈会的精神,及1978年10月在合肥召开、有全国有关高等院校代表和教育界、科研界、工程界特邀代表共同参加的“机电能量转换”讨论会所制订的编写大纲编写的。

本书是采用机电能量转换体系编写的一本新电机学教材,全书分上、下册出版。上册包括七章,先阐述机电能量转换的基本原理,机电系统的运动方程及其解法,然后介绍旋转电机中的电势、磁势、电磁转矩以及机电能量转换的条件,使读者一开始就对机电能量转换装置中能量转换的机制,以及分析和解决问题的方法有一个整体和综合的概念。对于象饱和、谐波、开槽的影响,以及发热和冷却等这样一些共同性的工程问题,合并到第四章内扼要介绍。在阐述具体电机的原理和运行时,分成稳态和动态两部分,上册中介绍旋转电机的稳态分析。考虑到与“电工原理”课程的联系,在阐述旋转电机之前,编入“磁路和变压器”一章。下册的前两章为直流和同步电机的动态分析,后两章是交流电机的不对称运行及其他电机。书末还编入机电系统的拉格朗日方程、电机的统一理论、隐极电机的气隙磁场和能量流传、机电系统的类比以及不对称绕组的谐波磁势分析等六篇附录。

本书可作为高等院校强电专业试用教材,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、沈文豹、王振永副教授和杨起同志,合肥工业大学姚守猷副教授和吴奕同志,沈阳机电学院唐任远副教授和王侠的同志等参加编写。汤蕴璆教授担任主编,并对全书作了仔细修改。

本书由太原工学院熊大慰教授主审。熊大慰教授对全书的体系和许多具体问题的写法提出了许多宝贵的意见,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褚应璜、丁舜年、一机部电工总局汤明奇副总工程师、上海工业大学副校长艾维超教授、上海交通大学曾继铎教授、华中工学院林金铭教授、上海工业大学凌松年教授、东方电机厂朱仁堪副总工程师和中国科学院电工研究所研究员朱维衡等的关心和支持,哈尔滨电机厂、上海电机厂、东方电机厂、大连电机厂和沈阳变压器厂等单位为本书提供了资料,在此一并表示谢意。

用机电能量转换的体系编写电机学在国内尚属首次,缺乏实践经验,欢迎读者批评指正。

主要符号表

A, a		F, f	
A	面积, A 相	F	磁动势 (简称磁势), 力
a	交流绕组并联支路数, 直流绕组并联支路对数, a 相, 120° 复量算子	F_a	电枢磁动势
B, b		F_m	感应电机的激磁磁动势
B	磁感强度 (磁密), B 相	F_{ad}	直轴电枢反应磁动势
B_δ	气隙磁密	F_{aq}	交轴电枢反应磁动势
B_{ad}	直轴电枢磁场磁密	$F_{\phi 1}$	单相绕组所生的基波磁动势
B_{aq}	交轴电枢磁场磁密	F_ϕ	单相绕组所生的 ν 次谐波磁动势
B_ϕ	漏磁磁密	F_q	q 个线圈所生磁动势
b	宽度, b 相, 磁感强度瞬时值	F_K	换向极绕组磁动势
$b,$	槽宽	F_δ	气隙磁势
C, c		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	f_ν	ν 次谐波频率
D, d		G, g	
D_1	定子直径	G	重量
D_o	电枢外径	H, h	
E, e		H	磁场强度
E	电动势 (简称电势, 交流表示有效值)	h	高度
E_c	相电动势	I, i	
E_o	空载电动势	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_1	变压器初级绕组 (电机定子绕组) 由主磁通感应的电动势有效值	I_a	直流电机的电枢电流
E_2	变压器次级绕组 (电机转子绕组) 由主磁通感应的电动势有效值	I_m	交流激磁电流
E_2'	E_2 的归算值	I_f	直流励磁电流
E_c	漏抗电动势	I_ϕ	I_m 中的磁化分量
E_{ad}	直轴电枢反应电动势	I_N	额定电流
E_{aq}	交轴电枢反应电动势	I_o	空载电流
E_ϕ	q 个线圈的合成电动势	I_K	短路电流, 堵转电流
e	瞬时电动势	I_{st}	起动电流
e_K	换向电动势	I_1	变压器初级 (感应电机定子) 电流
e_a	电抗电动势	I_2	变压器次级 (感应电机转子) 电流
		I_2'	I_2 的归算值
		I_{1+}	感应电机定子电流的正序分量
		I_{1-}	感应电机定子电流的负序分量

i 电流的瞬时值
 J, j 转动惯量
 j 电流密度, 虚数符号
 K, k

K 换向片片数
 k 常数, 变压器变比
 k_s 饱和系数
 k_i 电流变比
 k_e 电势变比
 k_d 气隙系数
 k_q 绕组分布系数
 k_j 绕组节距系数
 k_w 绕组系数
 $k_{0, \nu}$ ν 次谐波分布系数
 $k_{y, \nu}$ ν 次谐波的节距系数
 $k_{w, \nu}$ ν 次谐波的绕组系数
 k_c 短路比

L, l

L 自感, 磁路长度
 L_{10} 变压器初级(感应电机定子)漏感
 L_{20} 变压器次级(感应电机转子)漏感
 l 长度

M, m

M 互感
 m 相数
 m_1 交流电机定子相数
 m_2 感应电机转子相数

N, n

N 每相串联匝数
 n 转子转速
 n_c 每个线圈的匝数
 n_N 额定转速
 n_0 空载转速
 n_s 同步转速
 n_ν ν 次谐波旋转磁场的转速
 n_2 转子基波旋转磁场相对于转子的转速
 Δn^* 转速变化率

P, p

P 功率
 P_N 额定功率
 P_m 电磁功率
 P_M 感应电动机的总机械功率

P_K 堵转功率, 短路功率, 短路损耗
 P_1 输入功率
 P_2 输出功率
 P_0 空载功率, 空载损耗
 p 损耗, 极对数
 p_{Cu} 铜耗
 p_{Fe} 铁耗
 p_d 杂散损耗
 p_M 机械损耗

Q, q

Q 无功功率, 热量
 q 每极每相槽数

R, r

R 电阻
 R_m 磁阻
 R_L 负载电阻
 r 电阻
 r_1 变压器初级(感应电机定子)电阻
 r_2 变压器次级(感应电机转子)电阻
 r'_2 r_2 的归算值
 r_f 励磁绕组电阻
 r_a 电枢电阻
 r_R 端环电阻
 r_B 笼条电阻
 r_K 变压器或感应电机的短路电阻
 r_m 激磁电阻

S, s

S 视在功率
 S_N 额定视在功率
 s 转差率
 s_N 额定转差率
 s_m 最大转矩时的转差率
 s_+ 转子对正序磁场的转差率
 s_- 转子对负序磁场的转差率

T, t

T 转矩, 时间常数, 周期
 T_K 换向周期
 T_Q 机械时间常数
 T_θ 发热时间常数
 T'_d 直轴暂态时间常数
 T_a 电枢回路时间常数
 T_l 励磁回路时间常数
 T_N 额定转矩

T_0	空载转矩	x_d'	直轴次暂态电抗
T_m	电磁转矩		Y, y
T_{max}	最大转矩	y	绕组成节距
T_{D1}	同步电动机的牵入转矩	y_1	第一节距
T_{st}	起动转矩	y_2	第二节距
T_1	输入转矩	y_K	换向器节距
T_2	输出转矩		Z, z
t	时间, 齿距	Z	阻抗, 槽数
	U, u	Z_m	激磁阻抗
U	电压 (交流表示有效值)	Z_A	短路阻抗
U_N	额定电压	Z_+	正序阻抗
U_φ	相电压	Z_-	负序阻抗
U_1	电源电压, 定子端电压	Z_0	零序阻抗
U_{1+}	定子端的正序电压	$Z_{1\sigma}$	变压器初级 (感应电机定子) 漏阻抗
U_{1-}	定子端的负序电压	$Z_{2\sigma}$	变压器次级 (感应电机转子) 漏阻抗
U_0	空载电压	$Z_{2\sigma}'$	$Z_{2\sigma}$ 的归算值
U_K	短路电压, 堵转电压, 换向器片间电压		α
u	电压的瞬时值	α	角度, 相邻两槽间的电角度, 角加速度
ΔU	电压变化率		β
ΔU	每对电刷的电压降		β
	V, v		δ
v	速度, 线速度	δ	气隙, 功率角
	W, w		ε
W	功, 能	ε	小数, 短距角
	X, x		η
x	电抗, 横座标 (代表距离)	η	效率
x_d	电枢反应电抗	η_N	额定效率
x_+	正序电抗	η_{max}	最大效率
x_-	负序电抗		θ
x_0	零序电抗	θ	温度, 角度
x_{ad}	直轴电枢反应电抗		Λ, λ
x_{aq}	交轴电枢反应电抗	Λ	磁导
x_σ	定子漏抗	Λ_σ	漏磁导
x_s	同步电抗	λ	比漏磁导, 导热系数
x_d	直轴同步电抗		μ
x_q	交轴同步电抗	μ	磁导率, 转子谐波次数
x_m	激磁电抗	μ_c	空气磁导率
x_K	短路电抗	μ_{Fe}	铁心磁导率
$x_{1\sigma}$	变压器初级 (感应电机定子) 漏抗		ν
$x_{2\sigma}$	变压器次级 (感应电机转子) 漏抗	ν	谐波次数
$x_{2\sigma}'$	$x_{2\sigma}$ 的归算值		ρ
x_d'	直轴暂态电抗	ρ	电阻率

目 录

绪论	1	第四章 旋转电机的工程问题	160
§ 0-1 电机发展简史	1	§ 4-1 旋转电机的运行性能	160
§ 0-2 我国电机制造业发展概况	5	§ 4-2 饱和、谐波、开槽的影响	162
第一章 磁路与变压器	7	§ 4-3 损耗和效率	168
§ 1-1 磁路	7	§ 4-4 电机的发热和冷却	170
§ 1-2 铁磁材料对励磁电流的影响	14	§ 4-5 额定值	178
§ 1-3 交流铁心线圈	16	第五章 直流电机的稳态分析	180
§ 1-4 变压器	21	§ 5-1 直流电机的结构和励磁方式	180
§ 1-5 变压器的空载运行	23	§ 5-2 电枢绕组	183
§ 1-6 次级电流的作用, 理想 变压器	27	§ 5-3 空载磁路和电枢反应	189
§ 1-7 变压器的电抗和等效电路	29	§ 5-4 直流电机的运动方程	195
§ 1-8 三相电力变压器	36	§ 5-5 直流电机中的能量转换	201
§ 1-9 标么值	40	§ 5-6 直流发电机的稳态特性	203
§ 1-10 变压器的稳态运行	43	§ 5-7 直流电动机的稳态特性	211
§ 1-11 自耦变压器和三绕组变压器	47	§ 5-8 直流电动机的调速	215
§ 1-12 音频变压器	51	§ 5-9 直流电动机的制动	221
§ 1-13 耦合电路的暂态响应	54	§ 5-10 换向	222
第二章 机电能量转换的基本原理	61	第六章 感应电机的稳态分析	230
§ 2-1 机电能量转换过程中的能量 关系	62	§ 6-1 感应电机的结构和运行状态	230
§ 2-2 单边激励的机电装置	63	§ 6-2 三相感应电动机的磁势和 磁场	233
§ 2-3 双边激励的机电装置	68	§ 6-3 感应电机的运动方程	238
§ 2-4 保守系统和状态函数	71	§ 6-4 感应电机参数的测定	247
§ 2-5 机电系统的运动方程	74	§ 6-5 感应电机内的能量转换	250
§ 2-6 运动方程的解法	82	§ 6-6 转矩-转差率特性	254
§ 2-7 用电场作为耦合场的机电 装置	96	§ 6-7 感应电动机的稳态运行特性	259
第三章 旋转电机的基本概念	102	§ 6-8 感应电动机的起动	265
§ 3-1 旋转电机的构成和作用原理	102	§ 6-9 深槽和双笼感应电动机	270
§ 3-2 感应电势	108	§ 6-10 感应电动机的调速	272
§ 3-3 三相交流绕组	117	§ 6-11 谐波磁场对 $T_m \sim s$ 曲线的 影响	278
§ 3-4 分布绕组的磁势	123	§ 6-12 感应调压器	281
§ 3-5 旋转磁势波	129	第七章 同步电机的稳态分析	285
§ 3-6 旋转电机的电磁转矩	133	§ 7-1 同步电机的结构	285
§ 3-7 机电能量转换的条件	139	§ 7-2 空载磁路和电枢反应	288
§ 3-8 运动方程的变换	143	§ 7-3 同步电机的运动方程	292
		§ 7-4 同步电机的稳态功角特性	300

§ 7-5	同步电机的能量转换.....	304	运行.....	314
§ 7-6	同步电抗的测定.....	306	§ 7-9	同步电动机.....
§ 7-7	同步发电机的稳态运行特性.....	309	§ 7-10	同步补偿机.....
§ 7-8	同步发电机与电网的并联		§ 7-11	同步电机的励磁系统.....
				323

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）现代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）现代直流电机的产生和形成时期

电机发展初期的历史主要是直流电机发展的历史。早在1821年，法拉第就发现了载流导体在磁场内受力并发生机械运动的现象，法拉第的试验模型可以认为是现代直流电动机的雏型。1831年，法拉第又发现了电磁感应定律；二年以后，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，楞次已经证明了电机的可逆原理，但是由于当时人们对电机缺乏了解，所以在1870年以前，直流发电机和电动机一直被看作为两种根本不同的机械各自独立发展着。

在1860年以前，由于人们还不善于从 $f = Bli$ 这个角度来考虑问题，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。以1834年雅可比(Якоби)所设计的15瓦的电动机为例，该电动机由一组静止的磁极和一组可以转动的磁极组成，依靠两组磁极之间的电磁力和换向器的换向作用，得到了连续的旋转运动。当时，电动机均用蓄电池作为电源，因此在经济上电动机尚不能和蒸汽机竞争。这样，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。

直流发电机的产生虽然比电动机晚，但是，由于当时生产的需要（电报、电解、电镀），促使发电机发展得较快。在1834~70年这个阶段内，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（1851年首先由辛斯坦德提出，1863年再次由华尔德提出），使磁场得以初步加强；其后又从用蓄电池他励，发展到自励（1851年首先由希奥尔特提出，1866~67年再次由华尔德和西门子提出），最终地解决了加强励磁的问题。1867年，马克斯威尔对自励现象作出了数学分析，是为电机理论中的第一篇经典性论文。在电枢方面，1870年，格拉姆(Gramme)提出了环形闭合电枢绕组的结构，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，换向和散热情况均较良好，所以环形电枢绕组出现以后，T型绕组很快就被淘汰。

关于环形电枢绕组的结构，早在1860年，潘启诺梯(Pacinotti)已在电动机的模型中提出过，当时没有受到人们的重视。十年以后，格拉姆又在发电机上提出环形电枢的结构；在电机发展史上，由于对这二种结构进行对比的结果，终于使电机的可逆原理为公众所接受，从此发电机和电动机的发展合而为一。

1870~90年是直流电机发展的另一阶段。70年代以后，由于社会生产力的发展和城市人口的集中，使得照明负载的用电量大大增加，这在客观上大大地促进了直流发电机的发展。另一方面，城市交通运输的发展，对电动机的发展亦起了很大的影响。因此在这个阶段内，

直流电机发展得较快。

在这个阶段内,电枢方面的第一个重大改进是鼓型电枢绕组的发明(1873年由海夫纳-阿尔泰涅克提出)。和T型电枢绕组相比较,环型电枢绕组具有分布的优点,但是却使铜线的利用变差。鼓型电枢绕组既具有T型和环型电枢绕组的优点,又免除了它们的缺点;因为鼓型电枢绕组实质上就是T型电枢绕组的分布化。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心的槽中(1878年);有槽铁心和鼓型电枢绕组的结构一直沿用到今天。

为了解决在提高电、磁负荷以后所产生的发热问题,1880年,爱迪生(Edison)提出采用迭片铁心;这样就大大地减少了铁心损耗,同时降低了电枢绕组的温升。同年,马克西提出将铁心分成几迭,每迭之间留出一定宽度的通风槽以加强散热。这二种结构一直到现在仍然普遍采用。

所有上述进步,使得直流电机的电磁负荷、单机容量和效率都提高到前所未有的水平;这样,换向器上的火花问题就成为当时的突出问题。1884年,曼奇斯(Menges)发明了补偿绕组和换向极;1885年,福勃斯(Forbs)提出用炭粉来做电刷。由于采取了这些措施,使得火花问题暂告缓和。但是,换向极和补偿绕组的采用,又促进了电、磁负荷和单机容量的进一步提高,而容量继续提高的主要困难和限制,仍然是换向器上的火花问题。

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,使得人们能够自觉地对设计电机的磁路。1891年,阿诺尔德(Arnold)建立了直流电枢绕组的理论,使直流电机的设计和计算建立在更加科学的基础上。因此,到十九世纪九十年代,直流电机就已经具备了现代直流电机的一切结构特点。

1882年是直流电机发展史上的一个重要转折点。这一年,通过试验,台勃莱兹(Deprez)把米斯巴哈水电站发出的2千瓦的直流电能,通过一条57公里长的输电线送到慕尼黑,从而证明了远距离输电的可能性。台勃莱兹的试验,为电能和电机的应用打开了广阔的前景。但是,随着直流电的进一步广泛应用,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,电压愈高,线路的损耗就愈小;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,直流电机的换向就愈来愈困难;换向器上的火花使得直流电机的工作很不可靠。因此,自从80年代以后,人们的注意力就自然地逐渐转移到交流方面。

(二) 现代交流电机的形成和发展时期

早在1832年(即法拉第发现电磁感应定律的后一年),人们就知道了单相交流发电机。以后陆续发展出来的各种结构的直流发电机,实质上只不过是一台交流发电机加上一个换向器。在十九世纪七十年代以前,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,所以交流电机实际上没有什么发展。

1876年,亚勃罗契诃夫首次采用交流和开磁路式串联变压器,来供电给他所发明的“电烛”,是为交流电用于照明系统的开始。1884年,霍普金斯兄弟发明了具有闭合磁路的变压器。次年,齐波诺斯基(Zipernowski)、德利(Deri)和勃拉第(Blathy)三人又提出了心式和壳式结构;由于这三位工程师的倡导,使得单相变压器在照明系统中得到了一定的应用。当时,交流电动机尚未发明,所以应用交流电来驱动各种工作机械的问题未获解决。

交流感应电动机的发明,完全建立在产生旋转磁场这一研究工作的基础上。旋转磁场的概念始于1824年,当时阿拉果(Arago)转动一个悬挂着的磁针,在磁针外围围绕一个金属

圆环，以研究磁针旋转时圆环所起的阻尼作用，这就是首次利用机械力所产生的旋转磁场。1825年，根据作用力和反作用力的原理，利用外绕金属圆环的旋转，阿拉果使悬挂的磁针得到一定的偏转（称为阿拉果旋转现象），这个现象实质上就是以后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方法，首次用电的办法获得了旋转磁场。如果在四个磁极的中间放上一个铜盘，由于感应涡流的作用，铜盘将随着磁场的变动而旋转，这就是最初的感应电动机。1883年，台勃莱兹在巴黎科学院提出，把二个在时间和空间上各自相差 $\frac{1}{4}$ 周期的交变磁场合成，就可以得到一个旋转磁场。但是，台勃莱兹的论文当时并未受到重视。

真正应用交流电来产生旋转磁场，并做出实际的感应电动机，以弗拉利斯（Ferraris）和特斯拉（Tesla）二人始。1885年，在不知前人研究成果的情况下，弗拉利斯得出了与拜依莱和台勃莱兹同样的结论；并且进一步把利用交流电来产生旋转磁场，和利用铜盘来产生感应涡流这两个思想结合起来，制成了第一台二相感应电动机。1888年，弗拉利斯在意大利科学院提出了“利用交流电来产生电动旋转”的经典论文。同一时期（1886~1888年），特斯拉亦独立地从事于旋转磁场的研究和试验，而且和弗拉利斯互不相涉和几乎同时地发明了感应电动机。

1889年，多利沃-多勃罗夫斯基提出采用三相制的建议，同时设计和制出了第一台三相变压器和三相感应电动机。和单相或二相系统比较，在输送同样电能的条件下，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二相的好。三相制的这些优点，在1891年建成的劳芬到法兰克福的三相电力系统中充分地显示了出来。在劳芬的水电站中装有300马力、55伏的三相交流发电机，经过三相变压器把电压升高到30000伏，然后经过175公里长的输电线，把电能送到法兰克福。再经过降压变压器供电给一系列照明负载，和一台100马力的三相感应电动机。这个系统为顺利运行表明，三相交流电不但便于输送和分配，并且亦可以用作电力驱动；三相电动机的结构简单、工作可靠。因此，自从1891年以后，三相制就迅速地推广使用；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，由于交流发电站的飞快发展，利用低速的往复式蒸汽机来做原动机已经不能满足需要，当时要求出现能和发电机直接相连的高速原动机。由于生产上的迫切需要，以及许多技术人员的苦心研究，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1000千瓦以上的汽轮发电机组。在交流汽轮发电机出现以后，三相同步电机的结构逐渐明显地划分为高速和低速二类；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，到十九世纪末和本世纪初，几乎所有的工厂都采用了旋转磁极、电枢绕组嵌放在定子铁心槽内的结构。随着电力系统和单机容量的逐步增大，频率亦逐步趋于标准化；在欧洲大陆一般以50赫作为标准工频，美国则为60赫。

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，开耐莱（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二个大小相等、转向相反的旋转磁场的办法来分析单相感应电动机；虽然弗拉利斯所得的结果仍不免于错误，但是他所用的方法，却对旋转电机的理论分析有着

不可磨灭的贡献,这种方法以后被称为双旋转磁场理论。同年(1894年)和下一年,波梯(Potier)和乔治(Goerge)又建立了交轴磁场理论。1899年,在研究凸极同步电动机的电枢反应时,勃朗台尔(Blondel)提出了双反应理论;这个理论后来被道黑提(Doherty)、尼古尔(Nickle)和派克(Park)等人所发展,成为现代同步电机理论的基础。

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,大体上都已经建立起来。

(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:由于工业和运输业的飞速发展,对电机提出了各种新的和更高的要求;另一方面,由于自动化和遥控、遥测方面的需要,出现了一系列专供控制用的控制电机。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,使得交、直流电机的单机容量和材料利用得到了很大的提高,性能亦有显著的改进。

就材料利用来说,以德国AEG厂出品的三相笼型3.7千瓦、1500转/分的感应电动机为例,1889年该机重155公斤,1901年减至108公斤,1930年降低到42公斤;外型尺寸亦显著缩小。就单机容量来说,本世纪初,水轮发电机的单机容量不超过1000千瓦,而现在则已超过500000千瓦;如果进一步改善通风系统和推力轴承的结构,单机容量还可以提高。本世纪初,汽轮发电机的单机容量不超过5000千伏安;以后由于转子材料和结构的改进,1930年单机容量已提高到100000千瓦。四十年代,由于采用了氢冷,单机容量提高到150000千瓦左右。五十年代,相继出现了氢内冷、油冷和水冷等冷却方法,使单机容量进一步提高。目前,汽轮发电机的单机容量已达1000000千瓦左右。

在电机理论方面,从1913年福提斯古(Fortescue)开始分析感应电动机的不对称情况起逐步推广,到1918年,终于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正序、负序和零序三组对称分量;其中正序电流将在电机内部产生一个正向旋转的旋转磁场,负序电流则将产生一个反向旋转的旋转磁场,这样,旋转磁场的概念和分析方法就被推广到不对称运行的情况。由于引入了对称分量法,不对称运行时电机内部的物理情况就比较清楚和便于理解;另一方面,同步电机和感应电机的对称和不对称情况的分析方法亦得到了进一步的统一。1926~30年,道黑提和尼古尔二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,求出了稳态和暂态时同步电机的功角特性,和三相、单相突然短路电流。1929年,派克利用座标变换和算子法,导出了暂态时同步电机的电势方程和算子阻抗。同一时期,许多学者又深入地研究了同步电机内部的磁场分布,得出了各种电抗的计算公式和测定方法。所有这些工作,使得同步电机的理论达到了比较完善的地步。

在感应电机理论方面,同一时期(1920~40年)许多学者(Drefus, 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,异步电机的噪音等问题进行了一系列研究。

为了进一步找出分析各种电机的统一方法,1935~38年,克朗(Kron)系统地提出了利用张量分析来研究旋转电机的方法。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。线路的连接,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,都相当于一定的座标变换。张量方法的应用,

不但进一步揭示了各种电机和分析方法之间的相互连系,从而使电机理论逐步趋于统一,而且还为许多复杂问题的求解提供了系统而简单的途径。

四十年代前后,由于生产技术和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。为了满足控制系统的要求,自整角机的精度和伺服电动机的性能亦有很大提高。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-机械暂态。由于利用了物理模拟和模拟计算机,使得许多复杂的电机的动态运行问题得到了解决。

六十年代到七十年代期间,由于功率电子学和超导技术的发展,以及电子计算机的广泛应用,使得旋转电机的许多方面又得到了新的发展。由于大电流可控硅元件的发展,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;并使大容量交流发电机的励磁系统的性能和可靠性得到进一步提高。使用由硅整流器和可控硅逆变器所组成的变频器作为调频电源,接到感应电动机的定子,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;因此在相当程度上改进了感应电动机的调速性能。由于超导技术的引入,改变了旋转电机的结构,使电机的工作磁感强度达到2特斯拉,从而为提高大型发电机的极限容量提供了新的途径。由于应用数字电子计算机和有关的计算方法(龙格-库塔法,有限差分法,有限单元法),使旋转电机中许多复杂、长期未能解决的理论问题和实际问题,例如各种电机的动态性能问题,交、直流电机内的非线性磁场分布,交流电机的饱和参数,大型汽轮发电机的端部磁场分布,汽轮发电机的负序磁场和损耗,实心转子电机内的涡流分布,不对称绕组的谐波磁场分析,电机内的三维温度场分布等等,均得到了数值解答。

在旋转电机理论方面,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,并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(座标变换,等效电路,方块图)来分析各种电机的稳态和动态性能、电机和系统的联系,从而使得整个电机理论建立在一个比较严密和坚实的基础上。

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矛盾的运动,一切事物都在发展和变化,电机当然亦不例外。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,这些厂主要做些装配、修造工作,规模小,设备差,产品规格混乱,生产成本低,产品质量低,材料多依赖进口,生产能力微不足道。解放前的最高年产量(1947年),发电机为20000千瓦,电动机为68000马力,其中交流发电机的单机容量不超过200千瓦,交流电动机不超过300马力。

解放以来,我国电机制造业得到很快的发展,已逐步建成较为完整的电机制造工业体系。

就电机制造厂而言,三十年来,一方面对沿海地区的原有生产基地分别进行了扩建、改建和技术改造,使其充分发挥潜力;另一方面又在东北、西北、华中和西南等地区建立了新的生产基地,改变了分布不合理的局面。到目前为止,我国已经有了以哈尔滨电机厂、上海电机厂、东方电机厂、北京重型电机厂、沈阳变压器厂、大连电机厂、湘潭电机厂、成都微电机厂为骨干的一系列较大的现代化电机制造厂,为我国的电机制造工业奠定了强大的物质基础。

在产量方面,各种主要产品早在1949~1952年国民经济恢复时期,就达到和超过了解放前的最高水平。由于积极地开展了新产品试制工作,那时已制造出容量为3000千瓦的水轮发电机(1952年),300千瓦的直流发电机和940千瓦的感应电动机。

在1953~1957年的第一个五年计划期间,电机制造工业得到了迅速的发展。在产量方面,1957年年产量达到145.5万千瓦,是1949年的23.9倍。单机容量方面,先后在1954年制成6000千瓦、1956年制成12000千瓦的汽轮发电机,1955年制成10000千瓦的水轮发电机。在系列设计方面,1953年进行了中、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。在这期间,整个电机制造工业的技术水平有了迅速的提高,掌握了一系列产品的设计方法和制造工艺,培养出大量技术工人和干部,并试制出大量的新产品;到1957年年底,我国电机制造工业的产品自给率已达到75%。

在1958~1966年期间,我国的电机制造工业不论是在发展品种、提高产品质量方面,还是在数量方面,又都作出了巨大的成绩。在中、小型感应电动机方面,设计了新的 J_2 、 JO_2 系列并正式投产,该系列和旧系列相比,效率高出1~2%,体积缩小25.5%,重量轻20.1%。中小型感应电机的年产量,在1964年达到350万千瓦;其品种据1966年统计,有60多个系列,330多个品种。在发电设备方面,1959年和1960年相继自行设计和制成了50000千瓦氢冷和100000千瓦氢内冷的汽轮发电机,之后,又进行了50000千瓦以下汽轮发电机新系列的统一设计;同时,1959年制成72500千瓦的水轮发电机,1964年又制成了大型的225000千瓦的水轮发电机组。在直流电机方面,制成了带动1150初轧机的4500千瓦和4930千瓦的直流电动机发电机组。此外,还进行了农村用水轮发电机的统一设计,制成了6300千瓦的大型感应电动机和10900千瓦的同步电动机。在这期间,我国还研制成功了12000千瓦双水内冷汽轮发电机;在此基础上,于1960年又试制成功了100000千瓦的双水内冷汽轮发电机和10000千瓦的双水内冷水轮发电机。在中、小型直流电机和微电机方面,亦进行了大量的工作,作出了合乎我国国情和合理的新的系列设计。为了进一步提高产品质量,这个期间还进行了大量的调查和科学研究工作,并在这一基础上建立和完善了我国自己的电机国家标准和部颁标准。

1969年,上海电机厂制成了125000千瓦的双水内冷汽轮发电机,1972年又试制了300000千瓦的双水内冷汽轮发电机,哈尔滨电机厂在1972年也制成了300000千瓦的双水内冷水轮发电机;所有这些,使我国在大型双水内冷电机的设计和制造工艺方面积累了丰富的实践经验。

为了适应生产方面的需要,还试制和生产了各种不同用途的交、直流电机。与此同时,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亦进行了许多研究、试验和试制工作,得到了许多成果。

综上所述可以看出,解放以来,我国电机制造工业的发展速度是极为迅速的,取得了很大的成就。现在我们在党中央的领导下,正在坚定地向四个现代化的目标前进,只要我们勇于探索,发扬求实精神、革新精神和独创精神,我们一定能在不久的将来赶上并超过世界水平。

第一章 磁路与变压器

变压器是一种能量传递装置，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。

事实上，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。

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；最后再对多绕组变压器、自耦变压器作一简单介绍。

§ 1-1 磁 路

磁通所经过的路径就称为磁路。

在机电装置内，为了得到较强的磁场，常把导线绕成线圈，再把线圈套装或置放在铁心上。这样，当线圈内通有电流时，由于铁心的导磁性能较好，铁心与铁心之间的工作气隙内就可以得到较强的磁场；另一方面，大部份磁通将被约束在铁心内部，并按照一定的路径形成闭合回路，这就构成了磁路。

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。

载流线圈中通过的用以产生（激励）磁路中磁通的电流，通常称为励磁电流（或励磁电

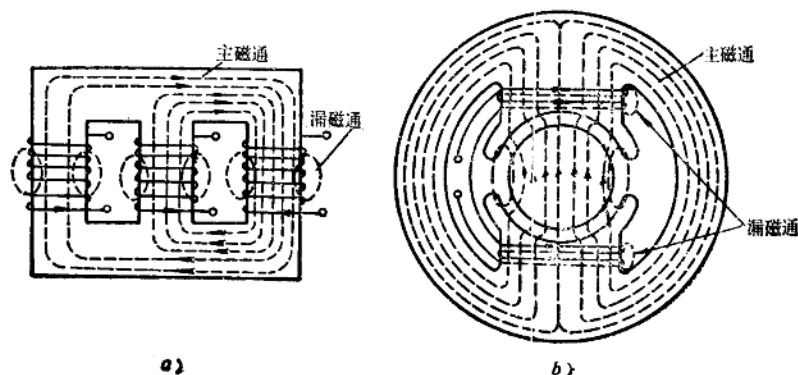


图 1-1 常见的两种磁路

a) 变压器的磁路 b) 二极直流电机的磁路

流)。若激磁电流为直流,则磁路中的磁通亦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交变,这种磁路称为交流磁路;交流铁心线圈、变压器和感应电机的磁路都属于交流磁路^①。

当线圈中通有激磁电流时,铁心磁路(包括工作气隙)中将产生一定的磁感强度并通过较多的磁通,这部份磁通一般称为主磁通;图1-1中用粗线标出的磁通就是主磁通。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,在部份铁心和铁心周围的空间,还会产生一些分散的较弱的磁场,这部份磁通通常称为漏磁通。在图1-1中,漏磁通用细线标出。主磁通的路径比较容易确定,漏磁通的路径则比较复杂,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都不太大,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,原先的磁场计算问题就简化为工程上的磁路计算问题。所谓磁路计算就是指,为使磁路中具有所要求的磁通量时,激磁线圈应有多少匝,激磁电流应有多大,即应有多少激磁安匝;或是给定一定的激磁安匝,要求算出磁路内有多少磁通量。磁路计算在机电装置的计算中占有相当重要的地位。

在频率不高、位移电流可以忽略不计的“准恒”条件下,磁路可以用安培环路定律来计算。

(一) 安培环路定律

实验证明,沿着任何一条闭合回路 L ,磁场强度 H 的线积分 $\oint H \cdot dl$,恰好等于被该闭合回路所包围的总电流值 $\sum i$ (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,若电流与闭合曲线 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。

机电装置中常用铁心作为主磁路。把安培环路定律应用到截面积为 A 、平均磁路长度为 l 的闭合铁心磁路(图1-3a),若不计漏磁,则铁心内将通过同一磁通 Φ 。

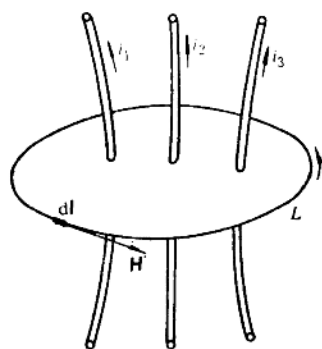


图 1-2 安培环路定律

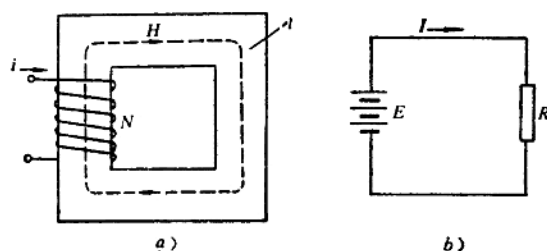


图 1-3 简单的闭合铁心磁路

a) 铁心磁路 b) 模拟电路图

① 为区别起见,以后我们把励磁电流作为直流激励的专称;激磁电流作为总称和交流激励时的名称。

设铁心的各个截面上, 磁感强度 $\mathbf{B}$ 都相等 ($B = \frac{\Phi}{A}$); 沿着长度 l , 磁场强度 $\mathbf{H}$ 亦处处相等;

则式 (1-1) 可简写成

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

式中 N 表示线圈的总匝数, i 为线圈内的电流, Ni 则是作用在铁心上的总安匝数; 它可以由一个线圈产生, 也可以由几个线圈共同产生。

考虑到磁场强度 $\mathbf{H}$ 与磁感强度 $\mathbf{B}$ 之间有下列关系:

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (1-3)$$

式中 μ 为磁介质的磁导率; 空气的磁导率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ 亨/米, 铁磁材料的磁导率约为空气的 2000~6000 倍。另外, 穿过某一截面积的磁通量 Φ 等于磁感强度 $\mathbf{B}$ 的面积分; 即

$$\Phi = \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{a} \quad (1-4)$$

在铁心磁路中, 若认为磁通均匀地通过各个截面, 且磁感强度向量 $\mathbf{B}$ 垂直于各个截面, 则式 (1-4) 可以写成

$$\Phi = BA \quad \text{或} \quad B = \frac{\Phi}{A} \quad (1-5)$$

于是式 (1-2) 可以改写成如下形式:

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

将磁路与电路作形式上的对比, 对应于电路中的电动势, 通常把式 (1-6) 中的 Ni , 即作用在磁路上的安匝数, 称为磁路的磁动势 (简称磁势), 用 F 表示; 对应于电路中的电阻, 把式 (1-6) 中的 $\frac{l}{\mu A}$ 称为磁路的磁阻, 用 R_m 表示; 则式 (1-6) 可改写成

$$F = \Phi R_m \quad \text{或} \quad \Phi = \frac{F}{R_m} \quad (1-7)$$

式 (1-7) 表明, 磁路内的磁通等于作用在磁路上的磁动势除以磁路的磁阻; 这与直流电路中电流等于电动势除以电阻相类似, 所以式 (1-7) 亦称为磁路的欧姆定律。

图 1-3b) 表示与图 a) 所示磁路相对应的模拟电路图。

磁阻的倒数称为磁导, 用 $\mathcal{A}$ 来表示; 即 $\mathcal{A} = \frac{1}{R_m}$ 。

由于磁势 $F = Ni$, 所以匝数愈多、激磁电流愈大, 磁势就愈大。磁势的单位是安匝。

由于磁阻 $R_m = \frac{l}{\mu A}$, 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;

材料的磁导率愈大, 磁阻就愈小; 磁路的平均长度愈长、截面积愈小, 磁阻就愈大; 这些情况与导体电阻的计算公式很相似。磁阻的单位是安匝/韦或安匝/马。

从式 (1-2) 可知, 对于均匀磁场的情况, $H = \frac{Ni}{l}$, 所以磁场强度亦可以理解为产生一定的磁感强度 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/米或