



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电机学

汤蕴璆 编著

第4版



免费
电子课件

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

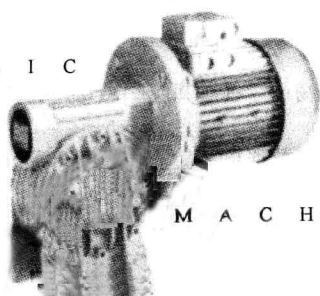
电 机 学

第4版

汤蕴璆 编著

郑时刚 主审

E L E C T R I C



M A C H I N E R Y



机械工业出版社

全书共 10 章。前 8 章阐述磁路、变压器、直流电机、交流电机理论的共同问题、感应电机、同步电机、机电能量转换原理,以及单相串激电动机、永磁电动机和开关磁阻电动机;后两章阐述控制电机和电机的发热与冷却。除第 8、9、10 三章以外,每章后面附有习题和部分答案。为引导学生用计算机来求解电机问题,针对感应电机的稳态运行计算,编入相应的计算机源程序。书末编有 9 个附录,对于希望深入理解电机理论及其工程应用的学生和青年教师,会有一定帮助。全书的编写方针为“削枝强干,推陈出新”。

本书可作为高等学校电气工程与自动化专业和其他强、弱电结合专业的教材,也可供有关科技人员作为参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

电机学/汤蕴璆编著. —4 版. —北京:机械工业出版社, 2011.5

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-111-34138-3

I. ①电… II. ①汤… 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 (2011) 第 064756 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 闫晓宇 责任编辑: 闫晓宇 卢若薇

版式设计: 霍永明 责任校对: 李秋荣

封面设计: 张 静 责任印制: 乔 宇

北京机工印刷厂印刷 (三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2011 年 7 月第 4 版第 1 次印刷

184mm×260mm · 28.75 印张 · 710 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-34138-3

定价: 53.00 元



凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010) 88361066

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销售一部: (010) 68326294

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售二部: (010) 88379649

读者购书热线: (010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

本书是在2008年出版的普通高等教育“十一五”国家级规划教材《电机学 第3版》的基础上全面修改而成。

全书共10章。总教学时数为90~100学时。除第8章、第9章和第10章以外,每章后面附有习题及部分答案。书末编有9个附录。本书可作为高等学校电气工程与自动化专业和其他强弱电结合专业的教材,也可供科技人员作为参考用书。

本书的特点是:

(1) 注重基本概念、基本理论和基本方法的阐述,使学生掌握分析电机的方法,建立牢固的物理概念,为学习后继课程和今后解决日常遇到的工程问题作好准备。

(2) 阐明机电能量转换的机制和条件,为将来开发和研究新型电机建立准则。

(3) 对直流电机和其他过时、次要的内容,以及属于设计、工艺和结构方面的内容,进行较多的删减。

(4) 编入用计算机计算感应电机稳态运行性能的内容。

(5) 各章具有相对独立性,讲授内容和次序可以根据具体情况进行调整。

(6) 书末的9个附录,属于正文所述基本内容的扩展和深化,对于希望较为深入地理解电机理论及其工程应用的学生、青年教师和科技人员,会有一定帮助。

与第3版比较,第4版增加了电抗与磁导的关系、交流短距线圈的磁动势、三相合成磁动势的波形、考虑饱和时凸极同步发电机的相量图、定子漏抗和电枢等效磁动势的测定、感应电动机变频调速的分析、感应电动机的不对称运行、六相和其他多相绕组、交流串激电动机等内容。在附录E中,作者提出了复数磁导率的概念,使变压器和交流电机中激磁电阻的导出,从传统上由物理概念出发来推导,变成由电磁关系出发的严格数学推导。

全书的编写方针是:“削枝强干,推陈出新”,目标是编写一本取材精、科学性强、概念清和便于教学的教材。

关于三相电压、电流和三相绕组的下角标注,考虑到国际上绝大多数电机学教材仍沿用A、B、C和a、b、c(对转子或二次绕组),且A、B、C的大、小写书写起来不易混同,故从教学角度考虑,本书仍沿用A、B、C而不用U、V、W。

本书由汤蕴璆和梁艳萍编著,梁艳萍教授编写了第5章中的两个计算机程序,并参加了第2章和附录C的编写,汤蕴璆教授负责其他各章和其他附录的编写以及全书的定稿。本书由哈尔滨大电机研究所郑时刚高级工程师主审。主审对许多问题的写法提出了宝贵意见,对此编者表示衷心感谢。另外,编者还要对本书第一、第二和第三版作出很大贡献的史乃教授、罗应立教授、李仁定教授、陆永平教授和徐怡、刘公直两位高级工程师表示感谢。哈尔滨电机厂、沈阳变压器厂和大连电机厂等单位为本书提供了产品照片,在此一并表示感谢。

作者

主要符号表

A	面积; A 相	f_N	额定频率
a	交流绕组的并联支路数; 线负载	f_ν	ν 次谐波频率
a	120° 复数算子; a 相	H	磁场强度
a_{Σ}	直流电枢绕组的并联支路对数	H_M	永磁体内的磁场强度
B	磁通密度; B 相	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
B_δ	气隙磁密	I_a	直流电机的电枢电流
B_{ad}	直轴电枢磁场磁密	I_m	交流激磁电流
B_{aq}	交轴电枢磁场磁密	I_f	直流励磁电流
b	宽度; 磁通密度瞬时值; b 相	I_μ	激磁电流中的磁化分量
C	C 相	I_N	额定电流
C_T	转矩常数	I_0	空载电流; 零序电流
C_e	电动势常数	I_k	短路电流; 堵转电流
c	比热容; c 相	I_{st}	起动电流
D_1	定子内径	I_1	变压器一次绕组(感应电机定子绕组)电流
D_a	电枢外径	I_2	变压器二次绕组(感应电机转子绕组)电流
E	电动势(交流表示有效值)	I_2'	I_2 的归算值
E_ϕ	相电动势	I_+	正序电流
E_0	空载电动势; 激磁电动势	I_-	负序电流
E_1	变压器一次绕组(感应电机定子绕组)中由主磁通所感应的电动势(有效值)	i	电流的瞬时值
E_2	变压器二次绕组(感应电机转子绕组)中由主磁通所感应的电动势(有效值)	K	换向片数
E_2'	E_2 的归算值	k	变压器的电压比
E_q	q 个线圈的合成电动势	k_i	电流比
e	电动势的瞬时值	k_e	电动势比
e_c	线圈电动势; 换向电动势	k_{d1}	基波分布因数
F	磁动势	k_{p1}	基波节距因数
F_a	电枢磁动势	k_{w1}	基波绕组因数
F_m	感应电机的激磁磁动势	k_{dv}	ν 次谐波的分布因数
F_{ad}	直轴电枢磁动势	k_{pv}	ν 次谐波的节距因数
F_{aq}	交轴电枢磁动势	k_{wv}	ν 次谐波的绕组因数
$F_{\phi 1}$	单相绕组的基波磁动势	L	自感
$F_{\phi \nu}$	单相绕组的 ν 次谐波磁动势	$L_{1\sigma}$	变压器一次绕组(感应电机定子绕组)的漏电感
F_{q1}	q 个线圈的基波合成磁动势	$L_{2\sigma}$	变压器二次绕组(感应电机转子绕组)的漏电感
f	频率; 电磁力; 磁动势的瞬时值	l	长度
f_1	定子频率	M	互感; 物体的质量
f_2	转子频率		

m_1	交流电机定子的相数	s_N	额定转差率
m_2	感应电机转子的相数	s_m	临界转差率
N	每相串联匝数	s_+	转子对正向旋转磁场的转差率
N_c	每个线圈的匝数	s_-	转子对反向旋转磁场的转差率
n	转子转速	T	转矩;时间常数
n_N	额定转速	T_c	换向期
n_0	空载转速	T'_d	直轴瞬态时间常数
n_s	同步转速	T_a	电枢时间常数
n_ν	ν 次谐波旋转磁场的转速	T_f	励磁绕组时间常数
n_2	转子基波旋转磁场相对于转子的转速	T_N	额定转矩
n_{oi}	理想空载转速	T_k	堵转转矩
Δn	转速调整率	T_0	空载转矩
P	功率	T_2	输出转矩
P_N	额定功率	T_L	负载转矩
P_e	电磁功率	T_e	电磁转矩
P_Ω	转换功率	T_{max}	最大转矩
P_k	短路功率;堵转功率	T_{pi}	同步电动机的牵入转矩
P_1	输入功率	T_{st}	起动转矩
P_2	输出功率	T_{e+}	正序电磁转矩
P_0	空载功率	T_{e-}	负序电磁转矩
p	损耗;极对数	t	时间
p	时间的微分算子	U	电压(交流表示有效值)
p_{Cu}	铜耗	U_N	额定电压
p_{Fe}	铁耗	U_ϕ	相电压
p_Δ	杂散损耗	U_L	线电压
p_Ω	机械损耗	U_1	电源电压;定子端电压
Q	槽数	U_+	正序电压
q	每极每相槽数	U_-	负序电压
q	热流密度	U_0	空载电压;零序电压
R	电阻	U_k	短路电压;堵转电压
R_m	激磁电阻;磁阻	u	电压的瞬时值
R_1	变压器一次绕组(感应电机定子绕组)电阻	Δu	电压调整率
R_2	变压器二次绕组(感应电机转子绕组)电阻	$2\Delta u_s$	每对电刷的电压降
R'_2	R_2 的归算值	v	线速度
R_f	励磁绕组电阻	W	功;能
R_a	电枢电阻	W_m	磁场能量
R_k	变压器(感应电机)的短路电阻	W'_m	磁共能
R_λ	导热热阻	X	电抗
R_α	散热热阻	X_σ	定子漏抗
R_i	绕组主绝缘的导热热阻	X_a	电枢反应电抗
S	视在功率	X_s	同步电抗
S_N	额定视在功率	X_d	直轴同步电抗
s	转差率	X_q	交轴同步电抗

X_m	激磁电抗	θ	温度;角度
X_k	短路电抗	θ_s	定子上的电角度
X_+	正序电抗	θ_0	冷态温度
X_-	负序电抗	$\Delta\theta$	温升
X_0	零序电抗	$\Delta\theta_{Cu}$	铜线温升
X_{ad}	直轴电枢反应电抗	$\Delta\theta_{Fe}$	铁心温升
X_{aq}	交轴电枢反应电抗	$\Delta\theta_\infty$	稳态温升
$X_{1\sigma}$	变压器一次绕组(感应电机定子绕组)漏抗	Λ	磁导
$X_{2\sigma}$	变压器二次绕组(感应电机转子绕组)漏抗	Λ_σ	漏磁导
$X'_{2\sigma}$	$X_{2\sigma}$ 的归算值	λ	单位面积的磁导;导热系数
X'_d	直轴瞬态电抗	μ	磁导率;转子谐波次数
X''_d	直轴超瞬态电抗	μ_0	空气磁导率
X''_q	交轴超瞬态电抗	μ_{Fe}	铁心磁导率
γ	绕组的合成节距	ν	谐波次数
γ_1	第一节距	τ	极距
γ_c	换向器节距	Φ	磁通量;热流
Z	阻抗;电枢导体数	Φ_0	空载磁通;直流电机和同步电机的主磁通
Z_m	激磁阻抗	Φ_a	电枢反应磁通
Z_k	短路阻抗	Φ_m	变压器或感应电机主磁通的幅值
Z_+	正序阻抗	Φ_σ	漏磁通
Z_-	负序阻抗	Φ_{ad}	直轴电枢反应磁通
Z_0	零序阻抗	Φ_{aq}	交轴电枢反应磁通
$Z_{1\sigma}$	变压器一次绕组(感应电机定子绕组)的漏阻抗	Φ_ν	ν 次谐波磁通
$Z_{2\sigma}$	变压器二次绕组(感应电机转子绕组)的漏阻抗	Φ_{Cu}	铜线发出的热流
$Z'_{2\sigma}$	$Z_{2\sigma}$ 的归算值	Φ_{Fe}	铁心发出的热流
α	角度;相邻两槽间的电角度;散热系数	ϕ	磁通量的瞬时值
β	夹角; q 个线圈的总角度	φ	相角;功率因数角
δ	气隙长度;功率角	φ_0	空载功率因数角
δ_1	转矩角(气隙合成磁场与定子磁动势间的夹角)	φ_k	短路功率因数角
ε	小数;短距角	ψ	磁链; $\dot{E}$ 和 $\dot{I}$ 间的夹角
η	效率	ψ_0	同步电机定子的内功率因数角
η_N	额定效率	ψ_2	感应电机转子的内功率因数角
η_{max}	最大效率	Ω	转子的机械角速度
		Ω_s	同步机械角速度
		ω	角频率;电角速度

目 录

前言

主要符号表

绪论	1
0.1 电机在国民经济中的作用	1
0.2 电机发展简史	2
0.3 我国电机工业发展概况	6
0.4 电机的分析方法	7
0.5 本课程的任务	9
0.6 课程特点和学习方法建议	10
第1章 磁路	11
1.1 磁路的基本定律	13
1.2 常用的铁磁材料及其特性	16
1.3 磁路的计算	22
1.4 电抗与磁导的关系	28
习题	31
第2章 变压器	33
2.1 变压器的工作原理和基本结构	35
2.2 变压器的空载运行	39
2.3 变压器的负载运行和基本方程	43
2.4 变压器的等效电路	46
2.5 等效电路参数的测定	51
2.6 三相变压器	53
2.7 标么值	60
2.8 变压器的运行特性	63
2.9 变压器的并联运行	66
2.10 三绕组变压器、自耦变压器和仪用互感器	70
小结	76
习题	77
第3章 直流电机	81
3.1 直流电机的工作原理和基本结构	83
3.2 直流电枢绕组	88

3.3	空载和负载时直流电机的磁场	95
3.4	电枢的感应电动势和电磁转矩	98
3.5	直流电机的基本方程	100
3.6	直流发电机的运行特性	103
3.7	直流电动机的运行特性	108
3.8	直流电动机的起动、调速和制动	113
3.9	换向	118
	小结	122
	习题	123
第4章	交流电机理论的共同问题	127
4.1	交流绕组的构成原则和分类	129
4.2	三相双层绕组	129
4.3	三相单层绕组	134
4.4	气隙磁场正弦分布时交流绕组的感应电动势	137
4.5	感应电动势中的高次谐波	142
4.6	通有正弦电流时单相绕组的磁动势	147
4.7	通有对称三相电流时三相绕组的磁动势	152
4.8	三相交流绕组所产生的气隙磁场和相应的电抗	161
4.9	交流电机的电磁转矩	162
	小结	166
	习题	168
第5章	感应电机	171
5.1	三相感应电机的结构和运行状态	173
5.2	三相感应电动机的磁动势和磁场	176
5.3	三相感应电动机的电压方程和等效电路	183
5.4	感应电动机的功率方程和转矩方程	190
5.5	笼型转子的极数、相数和参数的归算	195
5.6	感应电动机参数的测定	198
5.7	感应电动机的转矩 - 转差率曲线	202
5.8	感应电动机的工作特性	206
5.9	感应电动机的起动, 深槽和双笼电动机	208
5.10	感应电动机的调速	212
5.11	单相感应电动机	219
5.12	感应发电机和感应电动机的制动, 直线感应电动机	225
	小结	230
	习题	232

第 6 章 同步电机	235
6.1 同步电机的基本结构和运行状态	237
6.2 空载和负载时同步发电机的磁场	242
6.3 隐极同步发电机的电压方程、相量图和等效电路	246
6.4 凸极同步发电机的电压方程和相量图	249
6.5 同步发电机的功率方程和转矩方程	255
6.6 同步电抗的测定	256
6.7 定子漏抗和电枢等效磁动势的测定	259
6.8 同步发电机的运行特性	261
6.9 同步发电机与电网的并联运行	264
6.10 同步电动机与同步补偿机	275
6.11 同步发电机的不对称运行	284
6.12 同步发电机的三相突然短路	292
6.13 磁阻电动机	300
小结	303
习题	305
第 7 章 机电能量转换原理	309
7.1 机电能量转换过程中的能量关系	311
7.2 机电装置的电能输入、磁场储能和机械能输出	312
7.3 机电装置中的能量转换过程	320
7.4 机电能量转换的条件	324
小结	327
习题	328
第 8 章 单相串激电动机、永磁电动机和开关磁阻电动机	329
8.1 单相串激电动机	331
8.2 永磁电动机	335
8.3 正弦波永磁无刷电动机	338
8.4 矩形波永磁无刷电动机	341
8.5 开关磁阻电动机	347
第 9 章 控制电机	357
9.1 直流测速发电机	359
9.2 直流伺服电动机	359
9.3 交流两相伺服电动机	361
9.4 旋转变压器	363

9.5 自整角机	365
第 10 章 电机的发热和冷却	369
10.1 电机的温升和温升限值	371
10.2 电机内热量的传导和散出	372
10.3 绕组和铁心的稳态温升	375
10.4 在不同的工作制下运行时电机的发热和冷却	377
10.5 电机的冷却方式	380
附 录	383
附录 A 感应电动势	383
A.1 法拉第电磁感应定律	383
A.2 槽内线圈的感应电动势	387
附录 B 电磁转矩	392
B.1 载流导体和铁磁物质在磁场中所受到的力	392
B.2 铁磁物质和空气交界面处的磁场力	393
B.3 载流导体置于槽内时作用在电枢上的切向电磁力	395
B.4 用磁能和虚位移法求旋转电机的电磁转矩	397
B.5 用磁共能和虚位移法求旋转电机的电磁转矩	400
B.6 用虚位移法求电磁转矩时应注意的问题	402
B.7 用 $T_e = \frac{\partial W_m'}{\partial \theta}$ 导出交流电机的电磁转矩公式	403
附录 C 短距线圈的磁动势	406
C.1 短距线圈磁动势的分析	406
C.2 双层整数槽短距绕组的磁动势	408
附录 D 分数槽绕组	409
D.1 分数槽绕组相带的划分	409
D.2 分数槽叠绕组和波绕组	411
D.3 分数槽绕组的对称条件	414
D.4 分数槽绕组的磁动势	415
附录 E 复数磁导率和铁心线圈的激磁阻抗	420
E.1 复数磁导率的引入	420
E.2 交流铁心的磁导纳和铁心线圈的激磁阻抗	421
附录 F 谐波磁场对三相感应电动机转矩 - 转差率曲线的影响	423
F.1 异步寄生转矩	423
F.2 同步寄生转矩	424
F.3 削弱寄生转矩的方法	425
附录 G 三相感应电动机的不对称运行	426
G.1 对称分量法	426

G.2	三相感应电动机的正序、负序和零序阻抗	429
G.3	三相感应电动机的不对称运行	431
附录 H	两相感应电动机的不对称运行	434
H.1	两相对称分量法	434
H.2	对称两相感应电动机的不对称运行	435
H.3	不对称两相感应电动机的运行	439
附录 I	六相和其他多相绕组	442
I.1	六相定子绕组的构成	442
I.2	其他多相绕组	444
I.3	多相绕组的电动势和磁动势	444
I.4	电磁转矩	445
参考文献		446

绪 论

0.1 电机在国民经济中的作用

电机是一种机电能量转换或信号转换的电磁机械装置。就能量转换的功能来看,电机可分为发电机和电动机两大类。发电机用以把机械能转换为电能。在发电站中,通过原动机先把各类一次能源(燃料发出的热能,水的位能,原子能,风能等)蕴藏的能量转换为机械能,然后通过发电机把机械能转换为电能,再经输、配电网路送往城市各工矿企业、家庭等各种场合供公众使用。电动机则是把电能转换为机械能,用来驱动各种用途的生产机械和装置,满足不同的需求。电力变压器则是将一种交流电压、电流转换成同频率的另一种电压、电流的静止电器。

由于一次能源形态的不同,可以制成不同类型的发电机。利用水力资源,和水轮机配合,可制成水轮发电机;利用煤、石油等能源的热能,和锅炉、汽轮机配合,可制成汽轮发电机。此外,还有利用风能、原子能等能源的各类发电机。

到2009年底,我国的电站总装机容量已达8.74亿kW,年总发电量为 3.64×10^4 亿kW·h。从发电量看,已居世界第二位。随着三峡水利电力工程和大亚湾、秦山等核电站的建成和发电,逐年加大了水力资源的开发和建设核电站的投资。我国西部各水系蕴藏着丰富的水力资源,新疆、内蒙古、黑龙江和沿海各省拥有丰富的风力资源。优先发展水电,加快发展风电,积极发展核电和太阳能发电,将会增加洁净能源的比重,这不仅将大大改善环境保护,并且是一条可持续发展之路。

电动机作为动力设备,已广泛应用于机械行业的工作母机,冶金行业的高炉、转炉、平炉和轧钢机,交通运输行业中的电车、电力机车,各类企业中的鼓风、起吊、运输传送,农业中的电力排灌、农副产品加工,以及医疗器械、家用电器等各行各业,大至冶金企业使用的高达上万千瓦的电动机,小至小功率电动机、乃至几瓦的微电动机。在各类动力机械中,电动机的容量已超过总容量的60%。

根据应用场合的要求和电源的不同,电动机有直流电动机、交流同步电动机、交流感应电动机,以及满足不同需求的特种电动机。20世纪70年代以后,由于大功率电力电子器件、微电子器件、变频技术以及计算机技术取得的一系列进展,还研制出多种调速性能优良、效率较高、能满足不同要求的交流电动机调速系统,和由变频器供电的一体化电机。

就信号转换功能的控制电机而言,大体上有测速电机、伺服电机、旋转变压器和自整角机等几种,这些电机主要用于自动控制系统中作为检测、执行、随动和解算元件,例如机床加工的自动控制,舰船方向舵的自动控制,大炮和雷达的自动定位,飞机的飞行控制,计算机、自动记录仪表的运行控制等。这类电机通常为微型电机,对精度和快速响应的要求较高。

总之,在电力工业中,发电机是生产电能的主要设备;变压器是变电站输、配电线路中对电压进行变换的主要设备;在机械、冶金、纺织、煤炭、石油、化工、交通运输和家用电器等行业中,电动机是各种生产机械的主要动力设备;在国防和民用的各种自动控制系统中,控制电机是重要和不可缺少的元件。因此,电机在国民经济的各个领域中得到极其重要的作用。

0.2 电机发展简史

电机发展的历史,大体上可以分成三个时期:(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。

1. 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(Faraday)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)利用永久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形。虽然早在1833年,楞茨(Lenz)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做两种不同的电机各自独立发展着。对于直流电动机,当时是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,并采用蓄电池作为电源。因此要使电动机在工业中得到广泛应用,就必须提供较大的廉价的直流电源。

这样,由于生产(电报、电解、电镀、电动机电源)上的需要,使直流发电机得到较快的发展。在1834~1870年这段时间内,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形电枢绕组。由于环形绕组为分布绕组,电压脉动较小,换向和散热情况也较好,所以T形绕组不久就被淘汰。关于环形电枢绕组,早先曾在电动机模型中提出过,但没有受到重视。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,此后直流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(Hefner-Altenek)发明了鼓形电枢绕组,提高了电枢导线的利用率。为了加强绕组的机械固定和减少铜线内部的涡流损耗,电枢铁心采用了开槽结构,绕组的有效部分被放入槽内。1880年,爱迪生(Edison)提出采用叠片铁心,以减少铁心损耗、降低电枢绕组的温升。鼓形电枢绕组和电枢开槽、叠片铁心的结构,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年霍普金生兄弟(John and Edward Hopkinson)确立了磁路的欧

姆定律。1891 年阿尔诺特 (Arnold) 建立了直流电枢绕组理论。这些理论使直流电机的设计和计算建立在更为科学的基础上。到 19 世纪 90 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。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, 直流电机的换向也越来越困难。因此 19 世纪 80 年代以后, 人们的注意力就逐渐转移到交流方面。

2. 交流电机的形成和发展时期

早在 1832 年, 单相交流发电机就已出现。但是在 1870 年以前, 人们对交流电还不很了解, 生产上也没有对交流电的需要。1876 年, 亚勃罗契柯夫 (Яблочников) 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 (Zipernowsky)、德利 (Deri) 和勃拉第 (Blathy) 等三人又提出了变压器的芯式和壳式结构, 以后单相变压器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原始工作基础。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 $1/4$ 周期的交变磁场合成, 可以得到一个旋转磁场。1885 年, 弗拉利斯 (Ferraris) 把利用交流电来产生旋转磁场, 和采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; 1888 年, 他又提出了“利用交流电来产生电动旋转”的经典论文。同一时期, 台斯拉 (Tesla) 也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两相感应电动机。

1889 年, 多利伏 - 多勃罗伏尔斯基 (Доливо-Добровольский) 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, 用铜也较节省; 三相电机的性能、效率和材料利用也比两相电机好。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得到充分显示。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, 也可用作电力驱动。三相电动机的结构简单、工作可靠。到 20 世纪初叶, 在电力工业中, 交流三相制已占据绝对统治的地位。

19 世纪 80 年代的末期, 由于交流发电站的迅速发展, 要求发展能与发电机直接连接的高速原动机。由于许多科技人员的潜心研究, 很快就出现了高速的汽轮机。到 90 年代初期, 许多电站中已经装有 1000kW 的汽轮发电机组。此后, 三相同步发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心槽内的结构。随着电力系统的逐渐扩大, 频率也趋于标准化, 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,19世纪90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)开始用复数和相量来分析交流电路。1894年,海兰特(Heyland)发表了“多相感应电动机和变压器性能的图解确定法”的论文,是感应电机理论中的第一篇经典论文。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方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)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,此理论后来成为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。

3. 电机理论、设计和制造工艺逐步达到完善化的时期

20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。另外,由于自动化技术的需要,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,电机的性能也有显著改进。

就材料利用来说,以德国AEG厂出品的三相笼型3.7kW、1500r/min的感应电动机为例,1889年该机重155kg,1901年减少到108kg,1930年进一步降低到42kg,外形尺寸也显著减小。就单机容量来说,20世纪初,水轮发电机的最大单机容量不超过1000kW,而现在则已达到700MW;汽轮发电机的单机容量开始时不超过5000kW,1930年提高到100MW,40年代和50年代以后,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超过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,使不对称运行时交流电机内部的物理情况得以弄清,并使同步电机和感应电机的分析方法初步得到统一。1926~1930年,道赫提(Doherty)和聂克尔(Nickle)两人在发展勃朗台尔双反应理论的基础上,先后发表了五篇经典论文,在仔细地分析了气隙比磁导和同步电机内部的磁场分布以后,导出了凸极同步电机的稳态电压方程和相量图,直轴和交轴同步电抗,稳态和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;初步建立起同步电机稳态和瞬态分析的理论和计算方法。同一时期,许多学者(Wiesmann, Alger, Park, Kilgore)又研究并提出了电枢漏抗、同步电抗和直轴瞬态电抗的计算公式和测定方法,为同步电机稳态和瞬态参数的计算确立了基础。1929年,派克(Park)发表了“同步电机的双反应理论(I)—通用分析方法”的经典论文,提出dq0变换和瞬态运行时同步电机的电压方程(即派克方程),以及运算电抗的概念等一系列思想。以后又经过一批学者(Crary, Concordia, Rankin, Stanley, Lyon, Clarke)的多年努力,使交流电机的瞬态分析理论得以建立。

为了进一步找出分析各种电机的统一方法,经过对各类电机的综合考察,1935~1938年, Kron (Kron) 提出了原型电机的概念,并且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。运动方程一旦建立,根据一定的步骤,即可画出电机的等效电路。Kron 的工作,不但揭示了各种电机和各种分析方法之间的相互联系,从而使电机理论逐步趋于统一,而且还为许多复杂问题的求解提供了途径,所以它是电机理论的一个重大发展。

在 1920~1940 年间,还有许多学者 (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及其削弱,感应电机的噪声等问题进行了一系列的研究,使感应电机的运行性能得到明显提高。

20 世纪 40 年代前后,由于第二次世界大战的影响,自动控制技术得到很大的发展,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,旋转变压器等。同时,自整角机和伺服电动机的性能也有很大的提高。同一时期,小型分马力电机的理论也有较大的发展。

1954 年,柯伐煦 (Kovács) 提出了空间矢量法,并导出了转速为 ω_k 的旋转坐标系中感应电机的空间矢量电压方程,为后来感应电机速度和转矩的矢量控制打下了理论基础。1957~1969 年,卡佐夫斯基 (Казовский) 发表了一系列论文,提出用频率法来分析和求解交流电机的各种瞬态过程和非正常运行情况,为交流电机的瞬态分析作出了新的贡献。但是在计算机引入以前,对于转速为变化的交流电机动态问题,除极少数借助于微分分析器和动态模型机组而得到解答之外,其余则无法求出解答。

1965 年以后,计算机逐步被引入到电机工程的各个领域,先是模拟计算机,然后是数字计算机。由于数字计算机的快速发展和各种数值方法和软件包的应用,各种电机内的磁场分布,参数的不饱和及饱和值,以及电机内三维温度场的分布等等,都可以用计算机得到其数值解。由于状态方程和数值解法的引入,动态运行时交流电机的非线性运动方程也可以用计算机顺利解出,从而使各种动态问题的计算、分析得以实现。这是电机分析中的又一次突破。

电枢开槽、线圈置于槽内以后,由于导体所处位置的磁场明显减弱,线圈内的感应电动势和作用在转子上的电磁转矩是否会相应减小? 实践表明,开槽以后感应电动势和电磁转矩并未发生变化,但是理论上应当如何解释,此问题曾经长期困扰着电机工程的研究人员。从 1896 年一直到 1960 年,经过许多学者对产生电动势和电磁转矩的机理进行认真分析、推导和实验研究后,此问题最终得到解决。接下来是电机内部机电能量转换的机理问题。就交流电动机而言,电能是如何从定子输入并转变成气隙磁场的磁能;气隙磁能又在什么条件下变换为转子的机械能,并输出给负载? 从 1950 年开始,国内外许多学者对此问题进行了一系列的研究。到目前为止,此问题可认为已经弄清。

在电机的理论体系方面,除了传统的电机学体系之外,从 1959 年起,以怀特 (White) 和伍德逊 (Woodson) 为首,逐步建立起一种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装置的一种,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其运动方程,用统一的方法来研究各种电机的电动势、电磁转矩和能量转换