



普通高等教育“十五”国家级规划教材

电机学

第2版

汤蕴璆 史乃 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育电机电器及其控制专业 规划教材及参考书目

- | | | | |
|---------------|------------------|------------|----|
| ● 电机学(第2版) | 哈尔滨理工大学 | 汤蕴璆
史乃 | 编著 |
| ● 电机学 | 东南大学 | 徐德淦 | 主编 |
| ● 电机学(非电机专业用) | 西安交通大学 | 汪国梁 | 主编 |
| ● 电机的微机控制 | 上海交通大学 | 李仁定 | 主编 |
| ● 电机设计(第2版) | 西安交通大学 | 陈世坤 | 主编 |
| ● 电机制造工艺学 | 湖南大学 | 方日杰 | 主编 |
| ● 控制电机 | 天津大学 | 杨渝钦 | 主编 |
| ● 电器学(非电器专业用) | 沈阳工业大学
上海铁道大学 | 夏天伟
丁明道 | 主编 |

ISBN 978-7-111-06862-4



定价: 35.00 元

地址: 北京市百万庄大街22号

邮政编码: 100037

联系电话: (010) 68326294

网址: <http://www.cmpbook.com>E-mail: online@cmpbook.com

TM3/41=2

2005

普通高等教育“十五”国家级规划教材

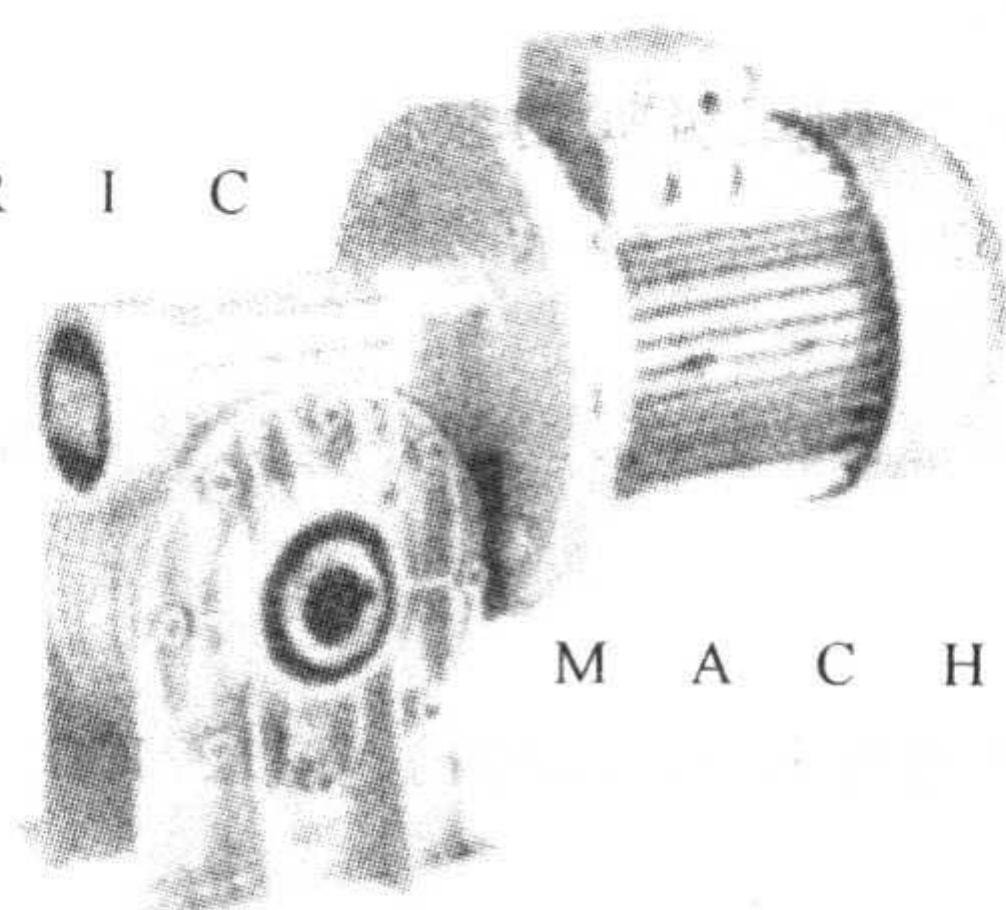
电 机 学

第2版

汤蕴璆 史 乃 编著

陆永平 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

本书是在普通高等教育“九五”国家级重点教材《电机学》的基础上修订而成，全书共10章。前8章阐述磁路、变压器、直流电机、交流绕组及其电动势和磁动势、感应电机和同步电机，以及机电能量转换的原理、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、10三章外，每章后都附有习题和部分答案，书末编有4个附录。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。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，亦可供有关科技人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电机学/汤蕴璆，史乃编著. —2版. —北京：机械工业出版社，2005.1 (2007.8重印)

普通高等教育“十五”国家级规划教材

ISBN 978-7-111-06862-4

I. 电... II. ①汤... ②史... III. 电机学—高等学校—教材
IV. TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 122100 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑：卢若薇 版式设计：冉晓华 责任校对：李秋荣
苏颖杰 封面设计：姚毅 责任印制：洪汉军

北京双青印刷厂印刷

2007年8月第2版第5次印刷

169mm × 239mm · 13.5印张 · 506千字

标准书号：ISBN 978-7-111-06862-4

定价：35.00元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

销售服务热线电话：(010) 68326294

购书热线电话：(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话：(010) 88379711

封面无防伪标均为盗版

前 言

本书是在1999年出版的“九五”国家级重点教材《电机学》和2002年出版的高等教育“面向21世纪课程教材”《电机学》的基础上,对国内外电机学教材的发展情况进行分析后,重新编写的。

全书共10章,总教学时数为80学时。除第8章、第9章和第10章以外,每章后都附有习题及部分答案,书末编有4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,亦可供科技人员参考。

本书是教育部立项的高等教育“十五”国家级规划教材,其特点是:

(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) 为适应近年来电机理论的发展和科研、生产上的需要,增加“永磁电动机和开关磁阻电动机”一章。

(4) 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。

(5) 编入用计算机对感应电机稳态运行进行计算的内容。

(6) 各章具有相对独立性,讲授次序可以根据具体情况进行调整。

(7) 鉴于交流电机的动态分析已有适当的研究生教材出版,本书仅对同步发电机的三相突然短路问题和瞬态电抗,进行物理概念上的说明和简单推导,数学上的严格推导放在附录部分。

(8) 选学内容由教师根据具体情况选定,不再标明。

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,适应面宽和便于教学的简明教材。

本书由汤蕴璆教授和史乃教授编著,由哈尔滨工业大学陆永平教授主审。陆永平教授对许多问题的写法提出了宝贵意见,在此作者表示衷心感谢!

本书的编写得到了太原工业大学熊大慰教授,西安交通大学汪国梁教授、励鹤鸣教授、王兆安教授,合肥工业大学姚守猷教授,清华大学朱东起教授,上海交通大学李仁定教授,山东工业大学胡颂尧教授、肖如鸿教授,沈阳工业大学唐任远院士、谢德馨教授,河北工业大学陈子痛教授,哈尔滨理工大学梁艳萍教授等的关心和支持。哈尔滨电机厂、沈阳变压器厂、上海电机厂和大连电机厂等单位为本书提供了产品照片和资料,在此一并表示感谢。

作者

主要符号表

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

L	自感	R_2	变压器二次绕组(感应电机转子)电阻
$L_{1\sigma}$	变压器一次绕组(感应电机定子)的漏磁电感	R_2'	R_2 的归算值
$L_{2\sigma}$	变压器二次绕组(感应电机转子)的漏磁电感	R_f	励磁绕组电阻
l	长度	R_a	电枢电阻
M	互感	R_k	变压器(感应电机)的短路电阻
m_1	交流电机定子相数	S	视在功率
m_2	感应电机转子相数	S_N	额定视在功率
N	每相串联匝数	s	转差率
N_c	每个线圈的匝数	s_N	额定转差率
n	转子转速	s_m	最大转矩时的转差率
n_N	额定转速	s_+	转子对正向旋转磁场的转差率
n_0	空载转速	s_-	转子对反向旋转磁场的转差率
n_s	同步转速	T	转矩;时间常数;发热时间常数
n_ν	ν 次谐波旋转磁场的转速	T'	冷却时间常数
n_2	转子基波旋转磁场相对于转子的转速	T_c	换向期
n_{oi}	理想空载转速	T_d'	直轴瞬态时间常数
Δn	转速调整率	T_a	电枢时间常数
P	功率	T_f	励磁绕组时间常数
P_N	额定功率	T_N	额定转矩
P_e	电磁功率	T_k	堵转转矩
P_Ω	转换功率	T_0	空载转矩
P_k	堵转功率;短路功率	T_e	电磁转矩
P_1	输入功率	T_{max}	最大转矩
P_2	输出功率	T_{pi}	同步电动机的牵入转矩
P_0	空载功率	T_{st}	起动转矩
p	损耗;极对数	T_2	负载转矩
p	时间的微分算子	T_{e+}	正序电磁转矩
p_{Cu}	铜耗	T_{e-}	负序电磁转矩
p_{Fe}	铁耗	t	时间
p_Δ	杂散损耗	U	电压(交流表示有效值)
p_Ω	机械损耗	U_N	额定电压
Q	槽数;热量	U_ϕ	相电压
q	每极每相槽数	U_1	电源电压;定子端电压
R	电阻	U_+	正序电压
R_m	激磁电阻;磁阻	U_-	负序电压
R_1	变压器一次绕组(感应电机定子)电阻	U_0	空载电压;零序电压
		U_k	短路电压;堵转电压
		u	电压的瞬时值
		Δu	电压调整率

$2\Delta u_s$	每对电刷的电压降	$Z_{2\sigma}'$	$Z_{2\sigma}$ 的归算值
W	功;能	α	角度;相邻两槽间的电角度
W_m	磁场能量	β	夹角; q 个线圈的总夹角
W_m'	磁共能	δ	气隙;功率角
X	电抗	ε	小数;短距角
X_s	电枢反应电抗	η	效率
X_+	正序电抗	η_N	额定效率
X_-	负序电抗	$\eta_{\max}$	最大效率
X_0	零序电抗	θ	温升;角度
X_{ad}	直轴电枢反应电抗	Λ	磁导
X_{aq}	交轴电枢反应电抗	Λ_σ	漏磁导
X_σ	定子漏抗	λ	单位面积的磁导;热导率
X_s	同步电抗	μ	磁导率;转子谐波次数
X_d	直轴同步电抗	μ_0	空气磁导率
X_q	交轴同步电抗	μ_{Fe}	铁心磁导率
X_m	激磁电抗	ν	谐波次数
X_k	短路电抗	τ	极距
$X_{1\sigma}$	变压器一次绕组(感应电机定子)漏抗	Φ	磁通量
$X_{2\sigma}$	变压器二次绕组(感应电机转子)漏抗	Φ_0	空载磁通;同步电机的主磁通
$X_{2\sigma}'$	$X_{2\sigma}$ 的归算值	Φ_s	电枢反应磁通
X_d'	直轴瞬态电抗	Φ_m	变压器或感应电机的主磁通
X_d''	直轴超瞬态电抗	Φ_σ	漏磁通
X_q''	交轴超瞬态电抗	Φ_{ad}	直轴电枢反应磁通
γ	绕组合成节距	Φ_{aq}	交轴电枢反应磁通
γ_1	第一节距	Φ_ν	ν 次谐波磁通
γ_2	第二节距	ϕ	磁通量的瞬时值
γ_c	换向器节距	φ	相角;功率因数角
Z	阻抗;电枢导体数	φ_0	空载功率因数角
Z_m	激磁阻抗	φ_k	短路功率因数角
Z_k	短路阻抗	ψ	磁链; $\dot{E}$ 和 $\dot{i}$ 的夹角
Z_+	正序阻抗	ψ_0	内功率因数角
Z_-	负序阻抗	ψ_2	感应电机转子的内功率因数角
Z_0	零序阻抗	Ω	转子的机械角速度
$Z_{1\sigma}$	变压器一次绕组(感应电机定子)漏阻抗	Ω_s	同步机械角速度
$Z_{2\sigma}$	变压器二次绕组(感应电机转子)漏阻抗	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	7
0.4 本课程的任务	7
第1章 磁路	9
1.1 磁路的基本定律	11
1.2 常用的铁磁材料及其特性	15
1.3 磁路的计算	20
习题	26
第2章 变压器	29
2.1 变压器的基本结构和额定值	31
2.2 变压器的空载运行	33
2.3 变压器的负载运行	37
2.4 变压器的基本方程和等效电路	40
2.5 等效电路参数的测定	44
2.6 三相变压器	47
2.7 标么值	55
2.8 变压器的运行性能	58
2.9 变压器的并联运行	61
2.10 三绕组变压器、自耦变压器和仪用互感器	65
2.11 空载投入电网时变压器的冲击电流	71
小结	73
习题	74
第3章 直流电机	79
3.1 直流电机的工作原理和基本结构	81

3.2	直流电枢绕组	86
3.3	空载和负载时直流电机的磁场	93
3.4	电枢的感应电动势和电磁转矩	97
3.5	直流电机的基本方程	99
3.6	直流发电机的运行特性	102
3.7	直流电动机的运行特性	106
3.8	直流电动机的起动、调速和制动	112
3.9	换向	118
	小结	121
	习题	122
 第4章 交流绕组及其电动势和磁动势		125
4.1	交流绕组的构成原则和分类	127
4.2	三相双层绕组	127
4.3	三相单层绕组	133
4.4	正弦磁场下交流绕组的感应电动势	137
4.5	感应电动势中的高次谐波	143
4.6	通有正弦电流时单相绕组的磁动势	148
4.7	通有对称三相电流时三相绕组的磁动势	153
	小结	160
	习题	161
 第5章 感应电机		163
5.1	感应电机的结构和运行状态	165
5.2	三相感应电动机的磁动势和磁场	168
5.3	三相感应电动机的电压方程和等效电路	174
5.4	感应电动机的功率方程和转矩方程	181
5.5	笼型转子的极数、相数和参数的归算	188
5.6	感应电动机参数的测定	192
5.7	感应电动机的转矩-转差率曲线	195
5.8	感应电动机的工作特性	199
5.9	感应电动机的起动,深槽和双笼电动机	201
5.10	感应电动机的调速	206
5.11	单相感应电动机	211
5.12	感应发电机和直线感应电动机	219
	小结	221
	习题	223

第 6 章 同步电机	227
6.1 同步电机的基本结构和运行状态	229
6.2 空载和负载时同步发电机的磁场	235
6.3 隐极同步发电机的电压方程、相量图和等效电路	239
6.4 凸极同步发电机的电压方程和相量图	242
6.5 同步发电机的功率方程和转矩方程	247
6.6 同步电抗的测定	248
6.7 同步发电机的运行特性	251
6.8 同步发电机与电网的并联运行	255
6.9 同步电动机与同步补偿机	269
6.10 同步发电机的不对称运行	278
6.11 同步发电机的三相突然短路	288
小结	298
习题	300
第 7 章 机电能量转换原理	305
7.1 机电能量转换过程中的能量关系	307
7.2 机电装置中的磁能、磁共能和电磁转矩	308
7.3 机电装置中的能量转换过程	321
7.4 机电能量转换的条件	326
7.5 产生恒定电磁转矩的条件	329
7.6 交流电机的功率因数	332
小结	333
习题	334
第 8 章 永磁电动机和开关磁阻电动机	335
8.1 永磁电动机	337
8.2 正弦波永磁无刷电动机	341
8.3 矩形波永磁无刷电动机	344
8.4 开关磁阻电动机	353
第 9 章 控制电机	365
9.1 直流测速发电机	367
9.2 直流伺服电动机	368
9.3 交流两相伺服电动机	369
9.4 旋转变压器	371

9.5 自整角机	373
第 10 章 电机的发热和冷却	377
10.1 电机的温升和温升限度	379
10.2 电机的发热和冷却	380
10.3 电机的冷却方式	384
10.4 变压器的冷却方式	387
附录	389
附录 A 谐波磁场对感应电动机转矩-转差率曲线的影响	389
A.1 异步寄生转矩	389
A.2 同步寄生转矩	390
A.3 削弱寄生转矩的方法	392
附录 B 两相感应电动机的不对称运行	393
B.1 两相对称分量法	393
B.2 对称两相感应电动机的不对称运行	394
B.3 不对称两相感应电动机的运行	398
附录 C $dq0$ 变换	401
C.1 在 ABC 坐标系中同步发电机的运动方程	401
C.2 $dq0$ 变换和派克方程	404
C.3 同步电机的标么值	408
附录 D 同步发电机三相突然短路电流的数学推导	412
D.1 同步电机的运算电抗和励磁绕组的传递函数	412
D.2 同步发电机的三相突然短路电流	416
参考文献	419

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,电机可分为两大类。第一类是发电机,它把机械能转换为电能;通过原动机先把各类一次能源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,经输、配电网网络送往城市各工矿企业、家庭等各种用电场合。第二类是电动机,它把电能转换为机械能,用来驱动各种用途的生产机械和其他装置,以满足不同的需求。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,可制成不同的发电机。利用水力资源和水轮机配合,可制成水轮发电机;利用煤、石油等资源的热能,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、地热等能源的各类发电机。到2004年,我国的电站总装机容量已达4亿kW,年总发电量为19200亿kW·h。从发电量和装机容量看,均居世界第二位。随着三峡水利电力工程的施工和大亚湾、秦山等核电站的建成和发电,我国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、黑龙江和沿海各省拥有丰富的风力资源。优先发展水电,积极发展核电,加快发展风电,将会增加洁净能源的比重,这将大大改善环境保护,并且是一条可持续发展之路。

电动机作为原动机,已广泛应用于各行各业,大至冶金企业使用的上万千瓦的电动机,小至小功率电动机乃至几瓦的微电动机。在各类原动机中,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控制电机和特种电动机。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,为交流调速技术的发展创造了条件,从而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。

电力工业是一种先行工业,只有当电力工业的增长率高于其他工业的发展速度,并重视高效、节能原则,才能促使整个国民经济全面较快地增长。相信在今后,电力和电机制造工业将会得到更快的发展。

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。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。由于电动机采用蓄电池作为电源,因此要使电动机在工业中得到应用,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,换向和散热情况亦较好,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,此后发电机和电动机的发展合二为一。

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,绕组的有效部分被放到铁心的槽中。1880年,爱迪生提出采用叠片铁心,以减少铁心损耗、降低电枢绕组的温升。鼓形电枢绕组和有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。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, 直流电机的换向亦越来越困难。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

1832 年, 人们就知道了单相交流发电机。但在 1870 年以前, 人们对交流电还不很了解, 生产上亦没有对交流电的需求。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心式和壳式结构, 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 $1/4$ 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, 特斯拉 (Tesla) 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, 亦可用作电力驱动; 三相感应电动机的结构简单、工作可靠。到 20 世纪初叶, 在电力工业中, 交流三

相制已占据了绝对统治的地位。

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 19 世纪 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, 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, 肯耐莱 (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 (Goetze) 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 19 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、1500r/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, 20 世纪初, 水轮发电机的最大单机容量不超过 1000kW, 而现在则已超过 70 万 kW; 汽轮发电机的单机容量在 20 世纪初不超过 5000kW, 1930 年提高到 10 万 kW, 20 世纪 40 年代和 50 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超过 1000MW。

在电机理论方面, 1918 年, 福提斯库 (Fortescue) 提出了求解三相不对称问题的一般方法——对称分量法, 使不对称运行时电机内部的物理情况得以搞清, 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) 两人先后提出了五篇经典论文, 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; 发展了勃朗台尔 (Blondel) 的双反应理论, 初步建立起同步电机瞬态分析的理论 and 计算方法。同一时期, 许多学者 (Wiesmann, Alger, Park, Kilgore) 又研究了同步电机内的磁场分布, 得到了电枢漏抗、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, 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, 克朗 (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, 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, 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, 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、旋转变压器等。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。

1954 年, 柯伐煦 (Kovács) 提出了空间向量法, 并导出在转速为任意值 ω_k 的旋转坐标系中, 感应电机的空间向量电压方程, 为感应电机的速度和转矩控制打下了理论基础。但是在计算机引入以前, 对于转速为变量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与