

普通高等教育机电类规划教材

电机学

(第3版)

华中理工大学 许实章 主编

机械工业出版社

普通高等教育机电类规划教材

电 机 学

(第 3 版)

华中理工大学 许实章 主编

机 械 工 业 出 版 社

(京)新字 054 号

本书根据从特殊到一般的认识规律,首先逐一论述直流电机、变压器、感应电机和同步电机四种典型电机的工作原理、基本结构、电磁过程、理论分析方法、运行特性和参数,而于最后统一论述旋转电机的瞬态分析和总结各种电机的共同特点,使读者在掌握各电机个性的基础上,了解它们的共性,对各种电机的内在联系和机电能量转换的实质有一个完整的认识。书中每章都有小结和习题,包括思考题和计算题,便于学习。第3版在压缩全书篇幅、精练内容方面作了较大改进,把原来上下两册合并为一册,与第2版相比,压缩篇幅近1/4,适应当前《电机学》课程学时较少的需要,但在阐述方法上仍然突出基本原理和物理概念,保留了该书第1版和第2版的特色。

本书可作为高等学校电机及其控制专业或电机专业的“电机学”课程的教材,也可作为其他电力类各专业的“电机学”教材,对电机制造厂和电力部门的技术人员,也是一本很好的参考书。

电 机 学

(第3版)

华中理工大学 许实章 主编

责任编辑:赖尚元 版式设计:霍永明

封面设计:姚毅 责任校对:肖新民

责任印制:卢子祥

地址: 出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

邮政编码: 100037

北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

四川省金堂新华印刷厂印刷

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 27.5·字数 669千字

1980年3月北京第1版·1988年12月北京第2版

1995年5月北京第3版·1995年5月成都第14次印刷

印数: 107 001—111 000·定价: 15.95元

ISBN 7-111-04424-X/TM·548(课)

前 言

本书自1980年出版第1版以来,为大多数高等院校所欢迎,1988年出版了该书的第2版,在内容和篇幅上作了较大精练和改进。至1993年止,本书已累计印刷了十四次,上下册皆分别出书十万多册,是我国高等院校电机学教材中被采用得最多的一部。

随着我国高等教育的改革和发展,电机专业拓宽专业范围,将电机及其控制结合在一起,教学计划作了调整。相应地,电机学课程的学时作了较大压缩,教学大纲作了修改。为了适应这一新形势,本书在前面两版的基础上,编写了这个第3版。

本书第3版是根据1992年9月在天津召开的全国电机专业教学指导委员会制定和通过的《电机学》教材编写大纲编写的。全书内容满足专业发展新方向的需要,而在篇幅上比第1版压缩将近一半,比第2版压缩了近1/4,从上下两册变为1册,符合少而精的原则,适应了新教学计划的要求。但在编写方法上仍然贯彻前两版的精神,即在体系上仍然贯彻从特殊到一般的认识规律,在逐一论述三种电机和变压器之后,再总结各种电机的共同特点,而在阐述上突出基本原理和物理概念,因此保持了本书原有的特色。

根据大纲要求,本书第3版在最后的总结部分前面增加了“旋转电机瞬态分析”一篇。一方面作为前面逐一论述各种电机中的瞬态部分的进一步总结提高,贯彻从特殊到一般的认识规律。另一方面,“电机瞬态过程”原是电机专业后续的专门化课程,现将其基本内容作为《电机学》主要内容之一来学,有利于学生学了电机学课程之后就比较全面地掌握电机的基础理论,也使对后续课程的选修有较大的自由度。

本书第3版仍由原来的三个学校合编,仍由华中理工大学许实章教授担任主编。具体分工如下:华南理工大学蒋豪贤教授编写引言和直流电机;浙江大学林瑞光副教授编写同步电机;华中理工大学熊衍庆副教授编写变压器和总结,马志云教授编写旋转电机瞬态分析,许实章教授编写交流电机理论的共同问题和感应电机,并对全书作了统一全稿及按新的国家标准更新有关内容等仔细的修改工作。参加本书第1版和第2版编写的还有:华南理工大学潘观海教授,浙江大学王毓东副教授。浙江大学许承千教授、沈云宝副教授、钱张耀高工参加了第1版部分章节的编写。华中理工大学许锦兴教授参加了第2版部分章节的编写。

本书第3版由清华大学李发海教授主审,李教授对书稿作了详细审阅,提出了很多宝贵意见。湖南大学蒋定宇教授为本书第1版和第2版主审。

这里,谨向李发海教授、蒋定宇教授和很多用过本书、提出过宝贵意见的同志表示衷心感谢。

主要符号表

A ——线负载(线负荷); 面积	e_r ——电抗电动势
a ——直流电枢绕组并联支路对数; 交流绕组每相并联支路数	e_L ——自感电动势
B ——磁通密度(磁感应强度)	e_M ——互感电动势
B_a ——电枢反应磁场磁通密度	e_k ——换向元件中的旋转电动势
B_{ad} ——直轴电枢反应磁场磁通密度	F ——磁动势
B_{aq} ——交轴电枢反应磁场磁通密度	F_a ——电枢磁动势(基波幅值)(直流电机为最大值)
B_{av} ——平均磁通密度	F_{ad} ——直轴电枢磁动势(基波幅值)(直流电机为最大值)
B_{f1} ——励磁磁场的基波磁通密度	F_{aq} ——交轴电枢磁动势(基波幅值)(直流电机为最大值)
B_ν —— ν 次谐波磁通密度	F_{f1} ——励磁磁动势基波幅值
B_δ ——气隙磁通密度	F_k ——换向极磁动势
B_k ——换向极下的气隙磁通密度	F_δ ——气隙磁动势
B_m ——磁通密度最大值	F_1, F_2 ——一次、二次侧磁动势, 定子、转子磁动势
b ——宽度; 弧长	F_m ——变压器激磁磁动势
b_p ——主磁极实际极弧长度	f ——频率, 力, 磁动势的瞬时值
b_t ——主磁极计算极弧长度	f_N ——额定频率
b_k ——换向片宽度	f_1, f_2 ——感应电机定子、转子频率
C ——常数; 电容	H ——磁场强度
C_E ——电动势常数	h ——高度
C_T ——电磁转矩常数	h_s ——齿高
D ——直径	I ——电流(交流为有效值); 同步电机的电枢电流
D_a ——电枢外径	I_d ——同步电机电枢电流的直轴分量(直轴电流)
D_{ia} ——电枢内径	I_q ——同步电机电枢电流的交轴分量(交轴电流)
D_k ——换向器外径	I_f ——直流励磁电流
E ——感应电动势(交流为有效值)	I_a ——电枢电流
E_a ——电枢反应电动势	I_N ——额定电流
E_{ad} ——直轴电枢反应电动势	I_k ——短路电流
E_{aq} ——交轴电枢反应电动势	I_{st} ——起动电流
E_0 ——空载电动势; 励磁电动势	I_L ——负载电流
E_ϕ ——漏磁电动势(漏电动势)	I_m ——交流励磁电流
E_ν —— ν 次谐波电动势	I_0 ——空载电流
E_1, E_2 ——一次、二次侧电动势	
$E_{1\phi}, E_{2\phi}$ ——一次、二次侧漏电动势; 定子、转子漏电动势	
E_m ——电动势最大值	
e ——电动势的瞬时值; 自然对数的底($e = 2.718$)	

- I_m ——磁化电流
 i ——电流的瞬时值
 j ——电流密度
 K ——换向片数；系数
 k ——变比；系数
 k_σ ——主极漏磁系数
 k_δ ——气隙系数（卡氏系数）
 k_μ ——饱和系数
 k_e ——感应电动机的电动势变比
 k_i ——感应电动机的电流变比
 k_a ——隐极同步电机电枢磁动势的折算系数
 k_d ——直轴电枢磁通密度分布曲线的波形系数
 k_q ——交轴电枢磁通密度分布曲线的波形系数
 k_{ad} ——直轴电枢磁动势的折算系数
 k_{aq} ——交轴电枢磁动势的折算系数
 k_f ——励磁磁动势分布曲线的波形系数
 k_{q1} ——电动势或磁动势基波的绕组分布系数
 k_{y1} ——电动势或磁动势基波的线圈短距系数
 k_{N1} ——电动势或磁动势基波的绕组系数
 k_{qv} ——电动势或磁动势 v 次谐波的绕组分布系数
 k_{yv} ——电动势或磁动势 v 次谐波的线圈短距系数
 k_{Nv} ——电动势或磁动势 v 次谐波的绕组系数
 ϵ ——短路比
 k_v ——电压波形正弦性畸变率
 L ——自感；电感；长度
 L_r ——换向元件等效合成漏电感
 L_σ ——漏电感
 l ——长度；导体有效长度
 m ——相数
 N ——电枢导体数；匝数
 N_1, N_2 ——变压器一次、二次绕组匝数
 N_Y ——元件匝数
 n ——转速
 n_1 ——同步转速；定子基波旋转磁场的转速
 n_2 ——转子基波旋转磁场相对于转子的转速
 P ——功率
 P_N ——额定功率（额定容量）
 P_{em} ——电磁功率
 P_{mec} ——机械功率
 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（电阻损耗）
 p_{Fe} ——铁耗
 P_{mec} ——机械损耗
 p_{ad} ——杂散损耗（附加损耗）
 Q ——热量
 q ——每极每相槽数
 R ——电阻
 R_m ——磁阻
 R_a ——电枢回路内电阻
 R_f ——励磁回路总电阻
 R_L ——负载电阻
 R_{st} ——起动电阻
 S ——元件数；视在功率
 S_N ——额定视在功率（变压器容量）
 s ——转差率
 s_m ——发生最大电磁转矩时的转差率
 s_+ ——转子对正转磁场的转差率
 s_- ——转子对反转磁场的转差率
 T ——转矩；周期；时间常数
 T_N ——额定转矩
 T_{em} ——电磁转矩
 T_1 ——原动机转矩，输入转矩
 T_2 ——负载转矩，输出转矩
 T_0 ——空载制动转矩
 T_a ——定子绕组的时间常数
 T'_a ——励磁绕组的时间常数
 T''_a ——阻尼绕组的时间常数
 T_{d0} ——定子绕组和阻尼绕组都开路时的励磁绕组的时间常数
 t ——时间
 t_1 ——齿距
 U ——电压（交流为有效值）
 U_N ——额定电压
 U_f ——励磁电压
 u ——电压瞬时值；虚槽数
 u_k ——阻抗电压（短路电压）
 v ——线速度

X

W ——能量 (储能)	δ ——气隙长度
X ——电抗	η ——效率
X_a ——电枢反应电抗	η_N ——额定效率
X_o ——定子漏电抗, 即定子漏抗	η_{max} ——最大效率
X_{1o}, X_{2o} ——一次、二次侧漏电抗; 定子、转子漏 电抗	θ ——温度
X_k ——短路电抗	λ ——比漏磁导; 散热系数
X_l ——同步电抗	μ ——磁导率
X_d ——直轴同步电抗	τ ——极距; 温升
X_q ——交轴同步电抗	τ_N ——额定温升
X_{ad} ——直轴电枢反应电抗	Φ ——磁通; 每极磁通; 变压器主磁通
X_{aq} ——交轴电枢反应电抗	Φ_m ——主磁通最大值
X'_d ——直轴瞬变电抗	Φ_r ——漏磁通
X''_d ——直轴超瞬变电抗	Φ_1 ——基波磁通
X_+ ——正序电抗	Φ_v —— ν 次谐波磁通
X_- ——负序电抗	Φ_a ——电枢反应磁通
X_0 ——零序电抗	Φ_{ad} ——直轴电枢反应磁通
y ——节距; 合成节距	Φ_{aq} ——交轴电枢反应磁通
Z ——电枢槽数; 阻抗 (复数)	Φ_o ——励磁磁通
Z_i ——虚槽数	ϕ ——磁通瞬时值
Z_1, Z_2 ——一次、二次绕组漏阻抗; 定子、转子 漏阻抗 (复数)	ϕ_{1o}, ϕ_{2o} ——一次、二次绕组的漏磁通瞬时值; 定 子、转子绕组漏磁通
Z_L ——负载阻抗	φ ——相位角
Z_k ——短路阻抗	ψ ——相位角
Z_+ ——正序阻抗 (复数)	Ψ ——磁链
Z_- ——负序阻抗 (复数)	Ω ——机械角速度
Z_0 ——零序阻抗 (复数)	Ω_1 ——同步角速度
α ——系数; 角度	ω ——角频率
β ——系数; 角度	$*$ ——右上角加星标的为标么值
γ ——电导率	$'$ ——右上角加撇的为折算值

目 录

前言

主要符号表

导言1

第一节 电机及其在国民经济中的作用1

第二节 我国电机工业发展概况1

第三节 电机中所用的材料和铁磁材料2

第四节 磁路计算的基本原理和方法7

第五节 电机学课程的性质与任务15

习题15

第一篇 直 流 电 机

第一章 直流电机的工作原理和基

本结构19

第一节 直流电机的工作原理19

第二节 直流电机的主要结构部件21

第三节 直流电机的额定值24

第四节 小结25

习题25

第二章 直流电机的磁路、电枢绕

组和电枢反应27

第一节 直流电机空载时的磁场及磁路 计算27

第二节 气隙所需磁动势28

第三节 齿部及其他铁心部分所需磁动势30

第四节 直流电机的磁化曲线30

第五节 直流电机电枢绕组的基本特点34

第六节 单叠绕组36

第七节 单波绕组39

第八节 直流电机的电枢磁动势和磁场42

第九节 交轴电枢反应和直轴电枢反应44

第十节 电枢绕组的感应电动势46

第十一节 直流电机的电磁转矩47

第十二节 小结48

习题49

第三章 直流电机的基本方程式和

运行特性51

直流电机按励磁方式的分类51

第二节 直流电机的能量转换与可逆性52

第三节 直流电机的基本方程式53

第四节 他励发电机的运行特性57

第五节 并励发电机的自励条件和外特性60

第六节 复励发电机的特点63

第七节 直流电动机的工作特性64

第八节 直流电动机的机械特性67

第九节 直流电动机的起动、调速与制动68

第十节 小结74

习题74

第四章 直流电机的换向78

第一节 直流电机的换向过程78

第二节 换向的电磁理论79

第三节 产生火花的原因84

第四节 改善换向的措施85

第五节 环火及补偿绕组88

第六节 小结89

习题90

第五章 电机的发热和冷却91

第一节 电机的温升及温升限值91

第二节 电机中常用的绝缘材料及其允 许温度93

第三节 电机的发热和冷却过程94

第四节 电机的定额96

第五节 电机的冷却方式及机壳的防护 形式96

第六节 小结98

第六章 直流伺服电动机与测速发

电机100

第一节 直流伺服电动机100

第二节 直流测速发电机101

第三节 小结102

习题103

第二篇 变 压 器

第七章 变压器的工作原理和基本

结构1

第一节 变压器的工作原理和分类	105	第三篇 交流电机理论的共同问题	
第二节 变压器的主要结构部件	106	第十三章 交流绕组及其电动势	179
第三节 变压器的发热与冷却	109	第一节 交流电机的基本工作原理	179
第四节 变压器的额定值	111	第二节 交流绕组的基本要求和分类	181
第五节 小结	111	第三节 槽电动势星形图	181
习题	112	第四节 三相双层叠绕组	182
第八章 变压器的运行原理	113	第五节 三相单层绕组	186
第一节 变压器的空载运行	113	第六节 在正弦分布磁场下的绕组电动势	188
第二节 变压器的负载运行	118	第七节 在非正弦分布磁场下电动势中 的高次谐波及其削弱方法	192
第三节 变压器的参数测定	125	第八节 齿谐波电动势及其削弱方法	195
第四节 标么值	128	第九节 小结	197
第五节 变压器的运行特性	132	习题	197
第六节 小结	136	第十四章 交流绕组的磁动势	199
习题	136	第一节 单相绕组的磁动势	199
第九章 三相变压器	139	第二节 三相绕组合成磁动势的基波	205
第一节 三相变压器的磁路系统	139	第三节 圆形和椭圆形旋转磁动势	208
第二节 三相变压器的电路系统——绕 组的联结法和联结组	140	第四节 三相绕组合成磁动势的高次 谐波	210
第三节 三相变压器绕组的联结法和磁 路系统对电动势波形的影响	143	第五节 时间矢量与空间矢量	212
第四节 变压器的并联运行	146	第六节 小结	213
第五节 小结	150	习题	213
习题	151	第四篇 感应电机	
第十章 三相变压器的不对称运行	153	第十五章 感应电机的主要结构	215
第一节 对称分量法	153	第一节 感应电机的主要结构部件	215
第二节 Y, y_n 联结三相变压器的单相 负载	155	第二节 感应电机的额定值	218
第三节 小结	160	第三节 小结	219
习题	160	习题	219
第十一章 变压器的瞬变过程	162	第十六章 感应电机的运行原理	220
第一节 变压器空载合闸时的瞬变过程	162	第一节 感应电机的三种运行状态	220
第二节 二次侧突然短路时的瞬变过程	164	第二节 感应电机的磁场、主磁通、漏 磁通和漏电抗	222
第三节 小结	166	第三节 转子静止时感应电动机的运行	224
习题	167	第四节 转子旋转时感应电动机的运行	230
第十二章 三绕组变压器及其他用途 变压器	168	第五节 感应电动机转子侧各物理量的 折算	234
第一节 三绕组变压器	168	第六节 感应电机的等效电路	237
第二节 自耦变压器	172	第七节 感应电机的参数测定	241
第三节 电流互感器和电压互感器	175	第八节 笼型转子的相数、极数和参数 计算	244
第四节 小结	177		
习题	177		

第九节 小结	246	习题	295
习题	247	第二十二章 同步电机的运行原理	296
第十七章 感应电动机的功率、转矩 和工作特性	249	第一节 同步发电机的空载运行	296
第一节 感应电机的功率和转矩平衡方 程式	249	第二节 电压波形正弦性畸变率和电话 谐波因数	297
第二节 感应电机的电磁转矩	253	第三节 对称负载时的电枢反应	298
第三节 感应电动机的工作特性	258	第四节 隐极同步发电机的负载运行	300
第四节 小结	260	第五节 凸极同步发电机的双反应理论	304
习题	260	第六节 凸极同步发电机的负载运行	306
第十八章 三相感应电动机的起动 和调速	262	第七节 小结	310
第一节 感应电动机的起动性能	262	习题	310
第二节 三相感应电动机的起动方法	263	第二十三章 同步发电机的运行特性	312
第三节 深槽式和双笼感应电动机	267	第一节 同步发电机的空载特性和短路 特性	312
第四节 感应电动机的附加转矩及其对 起动的影响	269	第二节 同步发电机的零功率因数负载 特性	313
第五节 感应电动机的调速方法	273	第三节 同步发电机的外特性和调整特 性	316
第六节 小结	274	第四节 同步发电机的短路比和直轴同 步电机	317
习题	274	第五节 电压调整率和额定励磁电流的 求法	318
第十九章 三相感应电动机在不对 称电压下运行及单相感 应电动机	275	第六节 稳态参数的测定	321
第一节 三相感应电动机在不对称电压 下的运行	275	第七节 小结	322
第二节 单相感应电动机	278	习题	322
第三节 三相感应电动机在非正弦电压 下的运行	283	第二十四章 同步发电机的并联运行	325
第四节 小结	283	第一节 投入并联的条件和方法	325
习题	284	第二节 同步发电机的功率和转矩平衡 方程式	327
第二十章 特种感应电机	285	第三节 同步发电机的功角特性	328
第一节 交流伺服电动机	285	第四节 同步发电机与大电网并联运行 时有功功率的调节和静态稳定	330
第二节 交流测速发电机	286	第五节 无功功率的调节和V形曲线	333
第三节 感应调压器	287	第六节 小结	335
第四节 小结	289	习题	335
习题	289	第二十五章 同步电动机和同步调 相机	337
第五篇 同步电机		第一节 同步电动机的基本方程式、矢 量图和功角特性	337
第二十一章 同步电机的基本结构	291	第二节 无功功率的调节	339
第一节 同步电机的基本结构形式	291	第三节 同步电动机的起动方法	340
第二节 额定值	294	第四节 同步调相机	342
第三节 小结	295		

第五节 小结	343
习题	343
第二十六章 同步发电机的不对称运行	345
第一节 同步发电机不对称运行时的各相序阻抗和等效电路	345
第二节 三相同步发电机的不对称稳定短路	348
第三节 负序和零序参数的测定	350
第四节 不对称运行对电机的影响	352
第五节 小结	352
习题	353
第二十七章 同步电机的突然短路	354
第一节 超导体闭合回路磁链守恒原理	354
第二节 对称突然短路的物理过程	354
第三节 瞬变电抗和超瞬变电抗及其测定方法	359
第四节 突然短路电流及其衰减时间常数的计算	361
第五节 突然短路对电机的影响	366
第六节 小结	367
习题	368

第六篇 旋转电机瞬态分析

第二十八章 旋转电机瞬态分析的基本方法	369
第一节 交流电机在相坐标系中的电	

压方程式和磁链方程式	369
第二节 交流电机在 $d, q, 0$ 坐标系统中的电压方程式和磁链方程式	374
第三节 标么值	378
第四节 同步电机的等效电路和运算电抗	382
第五节 功率和电磁转矩	390
第六节 转矩方程式	392
第七节 交流电机的动态方程式	393
第八节 小结	395
习题	396
第二十九章 交流电机的瞬态分析	397
第一节 凸极同步电机对称稳态运行	397
第二节 同步电机三相对称突然短路	401
第三节 感应电动机的起动分析	404
第四节 小结	407
总结 旋转电机进行机电能量转换的共同特点	408
第一节 电机中的磁场储能	408
第二节 电磁转矩与磁场储能的关系	410
第三节 机电能量转换的物理过程	411
第四节 磁场的余能	412
第五节 电磁转矩	415
第六节 从磁场观点求电磁转矩	415
第七节 从耦合电路观点求电磁转矩, 机电能量转换条件	419
参考文献	429

导 言

第一节 电机及其在国民经济中的作用

电机工业是机械工业的一部分。电机是一种其工作原理基于电磁感应定律和电磁力定律之上，实现机电能量转换或电能特性变换的机械，具有电能生产、传输和使用或作为电量之间、电量与机械量之间的变换器的功能，是工业、农业、交通运输业和家用电器的重要组成部分，对我国社会主义建设有着重要的作用。

电机的分类方法很多，按其功能来看，可分为：

1. 发电机 把机械能转换成电能；
2. 电动机 把电能转换成机械能；
3. 变压器、变频器、变流机、移相器 分别用于改变电压、频率、电流及相位；
4. 控制电机 在自动控制系统中作为执行、检测和解算元件。

应该指出，从基本原理上看，发电机和电动机只不过是电机的两种运行方式，它们本身是可逆的。

电机在现代社会的所有行业和部门中，都需要并且愈来愈广泛地使用。在电力工业中，电机是发电厂的主要设备；在机械、冶金、石油、煤炭和化学工业中，广泛应用电动机驱动各种生产机械；一个现代化工厂需要几百台至几万台各种不同的电动机；在交通运输业中，需要各种专用电机，电车、电气机车需要具有优良起动和调速性能的牵引电动机，特别是近代关于电动汽车和以直线电动机为动力的磁悬浮高速列车的开拓，推动了新型电动机的发展；在航运和航空、航天工业中，需要很多特殊要求的船用电机和航空电机；随着农业机械化的发展，电力排灌、谷物和农产品加工，都需用电动机拖动；在各种自动控制系统中，需要各种各样的控制电机作为系统元件；一个工业化国家的家庭，家用电器的电机达三四十台以上。

随着社会的进步、科学技术和电机理论的新发展，例如最近超导体技术、电子与计算机技术的新突破，催促着新一代电机的研究与开拓，为电机技术展现了激动人心的广阔前景。

第二节 我国电机工业发展概况

解放前，我国电机厂主要分布于沿海几个大城市，它们的规模小、设备陈旧、技术落后，主要从事电机的修理与装配，且产品类型混乱，标准不一，质量很低。当时生产的最大单机容量：发电机不超过200kW，电动机不超过180kW，变压器不超过2MV·A，成套发电设备全由外国进口。

解放后，我国电机工业同国民经济各部门一样，得到了迅速发展。1953年进行了中小型电机产品的全国统一设计，到1957年底，我国电机产品的自给率已达75%，电动机的产量达

1455MW, 是1949年刚解放时的23.9倍; 发电机的单机容量达到汽轮发电机12MW, 水轮发电机10MW。我国社会主义经济建设的第一个五年计划(1953~1957年)期间, 电机工业取得了巨大的成就, 并奠定了进一步发展的基础。

在电动机方面, 1961年J₂、JO₂新系列正式投产, 质量有了显著提高。1982年, 新的按国际电工委员会(IEC)标准自行设计的中小型感应电动机Y系列, 又取代了JO₂系列。Y系列是基本系列, 可从中派生其他系列。目前, 我国高等院校和有关科研机关正在研制Y系列感应电机派生的YX系列节能电机。单台电动机方面能反映我国生产水平的还有: 2极, 6.3MW笼型感应电动机, 与锅炉给水装置配套; 6极, 15MW同步电动机, 与空气压缩机配套等。

在发电机方面, 1958年试制成功世界首创的12MW双水内冷汽轮发电机, 1972年研制成功300MW双水内冷水轮发电机和汽轮发电机。当前, 我国已能生产50、100、200、300、600MW氢外冷和氢内冷系列汽轮发电机, 双水内冷汽轮发电机形成了从12、25、50、(75)、100、125、(200)、300MW的完整系列。我国还能生产适应不同水头、转速和功率, 与各种类型水轮机配套的水轮发电机, 最大功率为320MW; 从外形尺寸讲, 葛洲坝电站的170MW水轮发电机, 定子外径为20m, 推力负荷38MN, 都居世界前列。此外, 我国还生产了一台为整流负荷提供短时脉冲电源的4极、80MW, 定子绕组采用双Y移30°接法的六相同步发电机, 为我国把六相绕组用于大型汽轮发电机创造了良好条件。

在直流电机方面, 除了系列生产一般用途的中小型电机以及晶闸管整流供电直流电动机外, 还生产各种特殊用途的产品, 如轧钢、舰艇和牵引用大型直流电机。在单台电机方面, 目前我国生产的大型直流电机, 电枢外径3.8m, 功率7000kW, 1000V, 375/506 r/min, 电枢周速达75.5 m/s, 换向难度及整体水平已接近国外先进水平。

在电力变压器方面, 1959年制成了220kV, 120MV·A的高压电力变压器。目前, 我国已能生产500kV级高压电力变压器, 满足电力系统的各种要求。主要电力变压器有220kV级, 包括双绕组、无励磁调压系列; 双绕组、有载调压系列。

现在, 我国自己的电机工业体系已经基本建立。有了统一的国家标准、统一的电机、变压器系列, 能制造成套的大、中型火力和水力发电设备, 基本上能生产国民经济各部门所需要的各种类型电机。

但是, 与工业发达的国家相比, 在某些技术方面还比较落后。目前, 美国已生产出单机容量为1152MW的2极汽轮发电机, 700MW的水轮发电机; 俄罗斯已生产出1200MW的2极汽轮发电机, 640MW的水轮发电机; 它们正在试制和生产1000~1500MW的4极汽轮发电机。我国电机工业面临提高产品质量和发展新产品, 特别是大型和特殊电机的科研任务。我们应当深入研究电机发展中的问题, 吸取新的科技成果, 学习国外先进经验, 为加速我国电机工业的发展, 赶上和超过世界先进水平, 作出新的贡献。

第三节 电机中所用的材料和铁磁材料

电机是利用电磁感应作用实现能量转换的。这样它主要有电路部分, 包含导电材料与绝缘材料; 磁路部分, 主要是磁性材料; 以及结构部分的材料。

导电材料, 电机绕组常采用紫铜线或铝线, 它的导电性能良好, 电阻损耗 I^2R 小。

绝缘材料，作为带电导体之间或它与铁心之间的绝缘。要求介电强度高，耐热性能好。常用的绝缘材料有A、E、B、F、H等几种等级，它们的性能不同，耐热能力也不同。例如B级绝缘材料，在130℃下能长期使用，超过130℃则老化很快；H级则可在180℃下长期使用。

结构材料，是组成电机整体所必需的，主要要求机械强度好，加工方便，常用的有铸铁、铸钢和钢板；小型电机也有采用铝合金的。

导磁材料也称铁磁材料，电机磁路的铁磁材料主要是硅钢片。它是电机中一种比较特殊的材料，它的磁导率对磁场具有非线性，又有磁化过程的不可逆性和磁滞现象，在交变磁场作用下有磁滞损耗和涡流损耗。因此，我们简要讨论如下：

一、铁磁材料的磁导率

磁介质的磁导率

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (0-1)$$

式中 磁感应强度 B （即磁通密度）是描述磁介质中实际的磁场强弱及方向的物理量，为了形象地描绘磁场的空间分布，采用磁感应线，亦称磁力线来描绘磁场的空间分布。磁力线是无头无尾的闭合曲线，磁力线的方向与产生它的电流方向符合右手螺旋定则。 B 的单位为T（1T = 1Wb/m²）。

磁场强度 H ，是指任何磁介质中，磁场某点的磁感应强度 B 与同一点上的磁导率 μ 的比值， $H = B/\mu$ 。由此看来， H 不是磁介质中该点磁场强弱与方向的实际值，它只是一个辅助性的物理量，反映了磁场的源，比如产生磁场的电流，在该点的作用。也可看作磁介质内外界磁场的作用。如果磁介质是均匀而且各向同性的，则 B 和 H 是同方向的。 H 的单位为A/m。

磁导率 μ 是反映磁介质磁性能的系数，它的单位为H/m。

非铁磁材料的磁感应强度 B 与磁场强度 H 成正比，其比例系数即磁导率为常数，并且都接近于真空的磁导率 μ_0 ， $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m。非铁磁材料的 B 与 H 成线性关系。

但铁磁材料却是非线性的。铁磁材料内部存在着很多很小的强烈地沿同一方向自发磁化了的区域，称为“磁畴”。磁化前，磁畴杂乱地排列，磁场互相抵消，对外界不显示磁性。

在外界磁场 H 的作用下，铁磁材料中的磁畴出现了两种过程，与外磁场同向的磁畴边界扩大的增大过程；其他方向的磁畴顺外磁场方向转动的过程。图0-1表示铁磁材料的磁感应强度 B 随外磁场强度 H 的变化曲线，称为铁磁材料的磁化曲线。磁化曲线的 oa 段，外磁场 H 较弱， H 的增加，主要是与外磁场同方向的磁畴边界增大的过程， B 增加缓慢。在 ab 段，外磁场 H 较强，主要是磁畴沿外磁场方向转动过程， B 迅速增大。在 bc 段，外磁场增大时，能够沿外磁场方向转动的磁畴越来越少了， H 增加， B 的增加渐渐变慢，出现了磁饱和现象。 H 增大到 c 点以后，铁磁材料内所有的磁畴都转到外磁场一致的方向

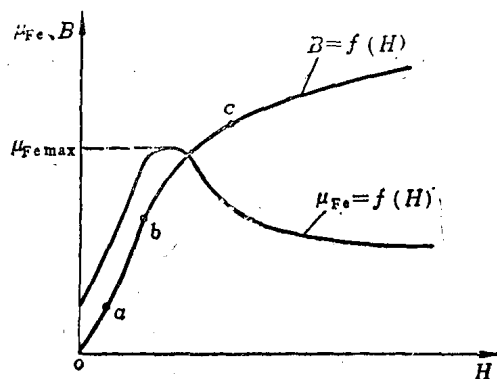


图0-1 铁磁材料的磁化曲线

向了, B 与 H 的关系类似于真空中的情况。铁磁材料的磁化曲线 $B = f(H)$ 表明, 铁磁材料的磁导率 $\mu_F = B/H$ 也随 H 的变化而变化, 是非线性的, 在图0-1上作出了 $\mu_F = f(H)$ 曲线。

二、磁滞与磁滞损耗

由于磁畴在外磁场作用下边界增大与转动时彼此之间产生的界面“摩擦”, 相应于外磁场增加的上升磁化曲线与相应于外磁场减小的下降磁化曲线不重合, 如图0-2所示, 这种现象称为磁滞, 即铁磁材料的磁化过程是不可逆的。用测量方法求取磁化曲线时, 实际上得到的是磁滞回线。在磁滞回线上, 当 H 下降到零时, B 不是零而是 B_r , 称为剩余磁感应强度; 而对应于 B 等于零时的 H , 称为矫顽力。

对于磁滞回线很宽的铁磁材料, 其 B_r 很大, 表示没有外磁场 H 激励时, 铁磁材料仍有很强的磁感应强度; H_c 很大, 表示此类铁磁材料一经磁化就很难退磁, 能长期保持磁性, 这类铁磁材料称为硬磁材料, 也称永磁材料。它们的磁性能常用 B_r 、 H_c 和最大磁能积 $(BH)_m$ 三项指标表征。永磁电机常用的永磁材料有铁氧体、铝镍钴、稀土钴、钕铁硼等, 尤其是后两种具有优良性能, 而我国稀土资源丰富, 是值得大力发展的。

大多数铁磁材料的磁滞回线很窄, B_r 、 H_c 都很小, 在工程磁路计算上, 取 $B = f(H)$ 为单值函数时, 误差仍在允许范围之内。为此, 将不同 B_m 值的许多不同磁滞回线在第一象限内的顶点连接起来而得到的磁化曲线, 称为铁磁材料的基本磁化曲线或平均磁化曲线, 如图0-3所示。磁滞回线很窄的铁磁材料称软磁材料, 如电机铁心常用的硅钢片、铸钢、铸铁等。各种软磁材料的磁化曲线或相应的数据表, 可在手册中查到。表0-1是硅钢片D23(新型号为DR510-50)的磁化曲线数据表。

在交变磁场中, 铁磁材料反复磁化时, 磁畴之间互相摩擦, 消耗能量, 其对应的损耗功率称为磁滞损耗。图0-4为截面积为 A , 中心线长为 l 的铁磁材料圆环, 其上均匀而紧密

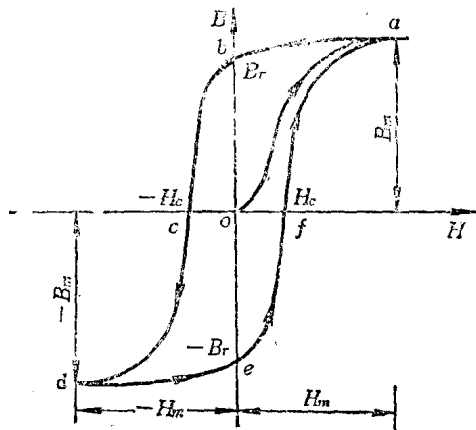


图0-2 铁磁材料的磁滞回线

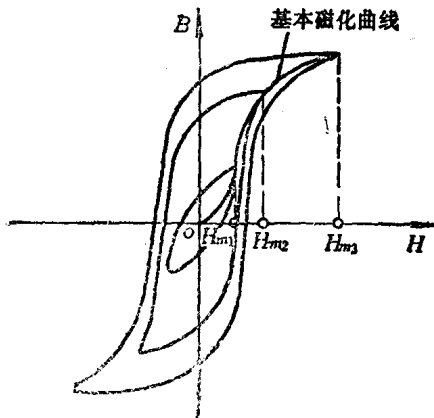


图0-3 基本磁化曲线

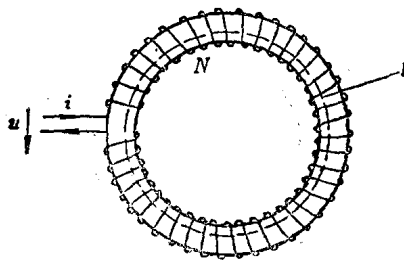


图0-4 铁心圆环

表0-1 50Hz、0.5mm、D23磁化曲线

B(T)	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	B(T)
0.4	1.38	1.40	1.42	1.44	1.46	1.48	1.50	1.52	1.54	1.56	0.4
0.5	1.58	1.60	1.62	1.64	1.66	1.69	1.71	1.74	1.76	1.78	0.5
0.6	1.81	1.84	1.86	1.89	1.91	1.94	1.97	2.00	2.03	2.06	0.6
0.7	2.10	2.13	2.16	2.20	2.24	2.28	2.32	2.36	2.40	2.45	0.7
0.8	2.50	2.55	2.60	2.65	2.70	2.76	2.81	2.87	2.93	2.99	0.8
0.9	3.08	3.13	3.19	3.26	3.33	3.41	3.49	3.57	3.65	3.74	0.9
1.0	3.83	3.92	4.01	4.11	4.22	4.33	4.44	4.56	4.67	4.80	1.0
1.1	4.93	5.07	5.21	5.36	5.52	5.68	5.84	6.00	6.16	6.33	1.1
1.2	6.52	6.72	6.94	7.16	7.38	7.62	7.86	8.10	8.36	8.62	1.2
1.3	8.90	9.20	9.50	9.80	10.1	10.5	10.9	11.3	11.7	12.1	1.3
1.4	12.6	13.1	13.6	14.2	14.8	15.5	16.3	17.1	18.1	19.1	1.4
1.5	20.1	21.2	22.4	23.7	25.0	26.7	28.5	30.4	32.6	35.1	1.5
1.6	37.8	40.7	43.7	46.8	50.0	53.4	56.8	60.4	64.0	67.8	1.6
1.7	72.0	76.4	80.8	85.4	90.2	95.0	100	105	110	116	1.7
1.8	122	128	134	140	146	152	158	165	172	180	1.8

注：1. 查出的磁场强度 H 单位为 A/cm, $1 \text{ A/cm} = 100 \text{ A/m}$ 。

2. $1 \text{ T} = 1 \text{ Wb/m}^2$ 。

地绕有 N 匝线圈，并通以电流 i ，它在铁心内产生的磁场强度为 H ，由全电流定律可得

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \Sigma i$$

$$Hl = Ni$$

$$i = \frac{Hl}{N}$$

铁心内的磁感应强度为 B ，磁通量 $\Phi = BA$ 。

电源供给圆环的瞬时功率：

$$P = ui$$

当忽略线圈电阻，线圈的感应电动势 e 和电流 i 的正方向取得相同时，有

$$u = -e = N \frac{d\Phi}{dt}$$

则

$$P = ui = N \frac{d\Phi}{dt} i = V H \frac{dB}{dt}$$

式中 $V = Al$ ——圆环铁心的体积。

在如上条件下，电源供给线圈的平均功率，都用来补偿建立铁心交变磁通所需的功率，即铁心的磁滞损耗：

$$P_s = \frac{1}{T} \int_0^T P dt = fV \oint H dB \quad (0-2)$$

式中 T ——电流 i 变化的周期；

f ——交变电流的频率， $f = 1/T$ 。

由此可见，磁滞损耗与磁滞回线的面积 ($\oint H dB$)、电流频率、铁心体积 V 成正比。

对于同一铁心，不同铁磁材料的磁滞回线的面积大小不同，故磁滞损耗的大小不同；即使同一材料，磁感应强度最大值 B_m 愈大，则磁滞回线的面积愈大，磁滞损耗也愈大。考虑

到材料和 B_m 的影响, 磁滞损耗的计算公式一般写成

$$p_h = K_h f B_m^\alpha V \quad (0-3)$$

式中 K_h ——取决于不同材料的系数;

α ——由实验确定的指数, 对于常用的硅钢片, 当 $B_m = 0.1 \sim 1.0 \text{ T}$ 时, $\alpha = 1.6$; 当 $B_m = 1.0 \sim 1.6 \text{ T}$ 时, $\alpha \approx 2$ 。

由于硅钢片磁滞回线的面积很小, 故电机、变压器和电器的铁心常用硅钢片制成。

三、涡流与涡流损耗

当交变磁通穿过铁心时, 根据电磁感应定律, 铁心内将感应围绕磁通的涡旋状的电动势和电流, 称为涡电动势和涡电流, 简称涡流。见图0-5。涡电流 i 在铁心等效电阻 R 上的功率损耗 $I^2 R$, 称为涡流损耗。设图0-6的薄硅钢片中, 涡流可近似地认为沿长方形回路(虚线)流动, 若钢片的宽度 b 比其厚度 d 大得多, 可取涡流回路的一边等于钢片的宽度, 而另一边等于 $2x$ 。由于涡流回路的感应电动势 E_w 与磁通交变频率 f 和磁通幅值成正比, 而后者又等于磁通密度幅值 B_m 与面积 $b2x$ 的乘积, 设比例常数为 K , 则得:

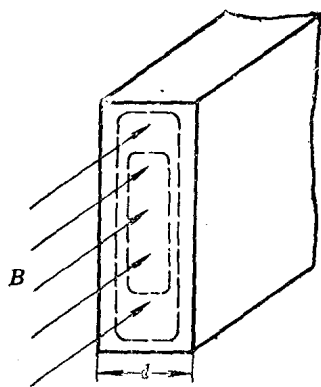


图0-5 一片硅钢片中的涡流

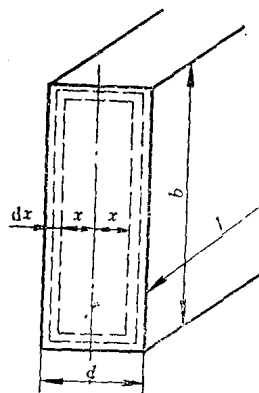


图0-6 硅钢片中涡流损耗的计算

$$E_w = K f b 2x B_m$$

忽略两短边影响时, 涡流回路电阻为

$$dR = \rho \frac{2b}{l dx}$$

式中 ρ ——硅钢片的电阻率;

l ——硅钢片长度。

给定的涡流回路上功率损耗为

$$dp_w = \frac{E_w^2}{dR} = \frac{2K^2 f^2 l b B_m^2}{\rho} x^2 dx$$

若设磁场在截面上均匀分布, 则在钢片的整个体积上的涡流损耗为

$$p_w = \int_0^{\frac{d}{2}} \frac{2K^2 f^2 l b B_m^2 x^2}{\rho} dx = \frac{K^2 f^2 d^2 B_m^2 V}{12\rho} \quad (0-4)$$

式中 $V = lbd$ ——钢片的体积。

上式表明, 涡流损耗与频率 f 的平方、钢片厚度 d 的平方及最大磁感应强度 B_m 的平方成正比, 而与钢片的电阻率 ρ 成反比。由此可见, 为了减少涡流损耗, 首先应减小钢片的厚