

电机学

● 蒋豪贤 编

华南理工大学出版社

1027/08

电 机 学

蒋豪贤 编
黄阜民 主审



华南理工大学出版社
• 广州 •

图书在版编目 (CIP) 数据

电机学/蒋豪贤编. —广州: 华南理工大学出版社, 1997. 9
ISBN 7-5623-1163-3

- I. 电…
- II. 蒋…
- III. 电机学
- IV. TM3

华南理工大学出版社出版发行

(广州五山 邮编 510641)

责任编辑 赖淑华

各地新华书店经销

广州市新光明印刷厂印装

开本: 787×1092 1/16 印张: 25.625 字数: 615 千

1997 年 9 月第 1 版 1997 年 9 月第 1 次印刷

印数: 1—5000

定价: 35.00 元

前 言

本书是为电力系统及其自动化专业、电机电器及控制专业、电气技术专业编写的教材，也适用于工业自动化专业使用。

电机学是一门技术基础课，一直以来各专业学时都在 160 学时以上。但随着现代技术的发展，新技术课程不断出现，而且在当前教学改革的大专业教学计划中，电机学的课时也必须减少。本教材是作者近几年来在教学改革过程中，对本科用 100 学时内的讲稿基础上编写而成的。当然，若对不同专业，学时还可以按具体情况作删减。本书在内容精减后也适用于专科。

本教材是按 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的《电机学》教材编写大纲的基本内容编写的，叙述和分析方法则主要按作者的思路，并吸收其他教材的好的写法。其目的是使学生在学完本课程后，对电机学的内容和分析方法有比较全面的掌握，以利于后续专业课程的学习。

本书由黄阜民老师主审，黄老师对书稿作了详细的审阅，提出了很多宝贵意见，使本书内容得到更大改进。在此谨向黄阜民老师表示衷心感谢。

编 者

1997 年 3 月

主要符号表

A —— 线负载 (线负荷); 面积	e_M —— 互感电动势
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_k —— 换向元件中的旋转电动势
B —— 磁通密度 (磁感应强度)	F —— 磁动势
B_a —— 电枢反应磁场磁通密度	F_a —— 电枢磁动势
B_{ad} —— 直轴电枢反应磁场磁通密度	F_{ad} —— 直轴电枢磁动势
B_{aq} —— 交轴电枢反应磁场磁通密度	F_{aq} —— 交轴电枢磁动势
B_{av} —— 平均磁通密度	F_f —— 励磁磁动势
B_f —— 励磁磁场磁通密度	F_k —— 换向极磁动势
B_v —— v 次谐波磁通密度	F_δ —— 气隙磁动势
B_δ —— 气隙磁通密度	F_1, F_2 —— 一次、二次侧磁动势; 定子、转子磁动势
B_k —— 换向极下的气隙磁通密度	F_m —— 变压器励磁磁动势
B_m —— 磁通密度最大值	f —— 频率; 力; 磁动势的瞬时值
b —— 宽度; 弧长	f_N —— 额定频率
b_p —— 主磁极实际极弧长度	f_1, f_2 —— 感应电机定子、转子频率
b_i —— 主磁极计算极弧长度	H —— 磁场强度
b_k —— 换向片宽度	h —— 高度
C —— 常数; 电容	h_c —— 齿高
C_B —— 电动势常数	I —— 电流 (交流为有效值)
C_T —— 电磁转矩常数	I_d —— 同步电机电枢电流的直轴分量 (直轴电流)
D —— 直径	I_q —— 同步电机电枢电流的交轴分量 (交轴电流)
D_a —— 电枢外径	I_f —— 直流励磁电流
D_{in} —— 电枢内径	I_{Fe} —— 铁损耗电流
D_k —— 换向器外径	I_a —— 电枢电流
E —— 感应电动势 (交流为有效值)	I_N —— 额定电流
E_a —— 电枢反应电动势	I_k —— 短路电流
E_{ad} —— 直轴电枢反应电动势	I_{st} —— 起动电流
E_{aq} —— 交轴电枢反应电动势	I_L —— 负载电流
E_0 —— 空载电动势; 励磁电动势	I_m —— 交流励磁电流
E_σ —— 漏磁电动势 (漏电动势)	I_0 —— 空载电流
E_v —— v 次谐波电动势	I_μ —— 磁化电流
E_1, E_2 —— 一次、二次侧电动势	i —— 电流的瞬时值
$E_{1\sigma}, E_{2\sigma}$ —— 一次、二次侧漏电动势; 定子、转子漏电动势	j —— 电流密度
E_m —— 电动势最大值	K —— 换向片数; 系数; 变比
e —— 电动势的瞬时值; 自然对数的底 ($e=2.718$)	K_σ —— 主极漏磁系数
e_r —— 换向元件中的电抗电动势	K_δ —— 气隙系数 (卡氏系数)
e_L —— 自感电动势	K_μ —— 饱和系数

K_e —— 感应电动机的电动势变比	p —— 损耗; 极对数
K_i —— 感应电动机的电流变比	p_{Cu} —— 铜耗 (电阻损耗)
K_a —— 隐极同步电机电枢磁动势的折算系数	p_{Fe} —— 铁耗
K_d —— 直轴电枢磁通密度分布曲线的波形系数	p_{mec} —— 机械损耗
K_q —— 交轴电枢磁通密度分布曲线的波形系数	p_{ad} —— 杂散损耗 (附加损耗)
K_{ad} —— 直轴电枢磁动势的折算系数	Q —— 热量
K_{aq} —— 交轴电枢磁动势的折算系数	q —— 每极每相槽数
K_f —— 励磁磁动势分布曲线的波形系数	R —— 电阻
K_{q1} —— 电动势或磁动势基波的绕组分布系数	R_m —— 磁阻
K_{Y1} —— 电动势或磁动势基波的线圈短距系数	R_a —— 电枢回路内电阻
K_{N1} —— 电动势或磁动势基波的绕组系数	R_f —— 励磁回路总电阻
K_{qv} —— 电动势或磁动势 v 次谐波的绕组分布系数	R_L —— 负载电阻
K_{Yv} —— 电动势或磁动势 v 次谐波的线圈短距系数	R_{st} —— 起动电阻
K_{Nv} —— 电动势或磁动势 v 次谐波的绕组系数	S —— 元件数; 视在功率
K_c —— 短路比	S_N —— 额定视在功率 (容量)
K_v —— 电压波形正弦畸变率	s —— 转差率
L —— 自感; 电感; 长度	s_m —— 发生最大电磁转矩时的转差率
L_r —— 换向元件等效合成漏电感	s_+ —— 转子对正转磁场的转差率
L_o —— 漏电感	s_- —— 转子对反转磁场的转差率
l —— 长度; 导体有效长度	T —— 转矩; 周期; 时间常数
m —— 相数	T_K —— 换向周期
N —— 电枢导体数; 匝数	T_N —— 额定转矩
N_1 、 N_2 —— 变压器一次、二次绕组匝数	T_{em} —— 电磁转矩
N_Y —— 元件匝数	T_1 —— 原动机转矩, 输入转矩
n —— 转速	T_2 —— 负载转矩, 输出转矩
n_1 —— 同步转速; 定子基波旋转磁场的转速	T_0 —— 空载制动转矩
n_2 —— 转子基波旋转磁场相对于转子的转速	T_a —— 定子绕组的时间常数
P —— 功率	T'_d —— 励磁绕组的时间常数
P_N —— 额定功率 (额定容量)	T''_d —— 阻尼绕组的时间常数
P_{em} —— 电磁功率	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
P_{mec} —— 机械功率	t —— 时间, 齿距
P_1 —— 输入功率	U —— 电压 (交流为有效值)
P_2 —— 输出功率	U_N —— 额定电压
P_k 、 p_k —— 短路功率、短路损耗	U_f —— 励磁电压
p_0 —— 空载功率、空载损耗	u —— 电压瞬时值; 虚槽数
	u_k —— 阻抗电压 (短路电压)
	v —— 线速度
	W —— 能量 (储能)
	X —— 电抗
	X_a —— 电枢反应电抗
	X_o —— 漏电抗
	X_{1o} 、 X_{2o} —— 一次、二次侧漏电抗; 定子、转子漏电抗
	X_k —— 短路电抗

λ_s ——— 同步电抗	η_N ——— 额定效率
X_d ——— 直轴同步电抗	$\eta_{\max}$ ——— 最大效率
X_q ——— 交轴同步电抗	θ ——— 温度
X_{ad} ——— 直轴电枢反应电抗	λ ——— 比漏磁导; 散热系数
X_{aq} ——— 交轴电枢反应电抗	μ ——— 磁导率
X'_d ——— 直轴瞬变电抗	τ ——— 极距; 温升
X''_d ——— 直轴超瞬变电抗	τ_N ——— 额定温升
X_+ ——— 正序电抗	Φ ——— 磁通; 每极磁通; 变压器主磁通
X_- ——— 负序电抗	Φ_m ——— 主磁通最大值
X_0 ——— 零序电抗	Φ_o ——— 漏磁通
y ——— 节距; 合成节距	Φ_1 ——— 基波磁通
z ——— 电枢槽数; 阻抗 (复阻抗的模)	Φ_v ——— v 次谐波磁通
z_1 ——— 虚槽数	Φ_a ——— 电枢反应磁通
Z ——— 阻抗 (复数)	Φ_{ad} ——— 直轴电枢反应磁通
Z_1, Z_2 ——— 一次、二次绕组漏阻抗; 定子、转子漏阻抗 (复数)	Φ_{aq} ——— 交轴电枢反应磁通
Z_L ——— 负载阻抗 (复数)	Φ_0 ——— 励磁磁通
Z_k ——— 短路阻抗 (复数)	ϕ ——— 磁通瞬时值
Z_+ ——— 正序阻抗 (复数)	ϕ_o ——— 漏磁通瞬时值
Z_- ——— 负序阻抗 (复数)	φ ——— 相位角
Z_0 ——— 零序阻抗 (复数)	ψ ——— 相位角
α ——— 系数; 角度	Ψ ——— 磁链
β ——— 系数; 角度	Ω ——— 机械角速度
γ ——— 电导率	Ω_1 ——— 同步角速度
δ ——— 气隙长度	ω ——— 角频率
η ——— 效率	* ——— 右上角加星标的为标么值
	—— 右上角加撇的为折算值

目 录

主要符号表	1
导 论	1
§ 0-1 电机及其在国民经济中的作用	1
§ 0-2 电机的发热和温升	1
§ 0-3 电机常用绝缘材料	3
§ 0-4 电机的冷却及机壳的防护	3
§ 0-5 电机的额定值与定额	4
§ 0-6 电机中的导电材料和铁磁材料	5
§ 0-7 磁路计算的基本原理与方法	10
§ 0-8 电机学课程的性质和任务	18
习题	19

第一篇 变压器

第一章 变压器的基本工作原理和主要结构	23
§ 1-1 变压器的工作原理和分类	23
§ 1-2 变压器的主要结构部件	24
§ 1-3 变压器的发热和冷却	28
§ 1-4 变压器的额定值	30
习题	30
第二章 变压器的运行分析	33
§ 2-1 变压器运行的电磁过程与正向惯例	33
§ 2-2 变压器空载运行分析	33
§ 2-3 变压器负载运行分析及等效 T 形电路	37
§ 2-4 变压器等效 T 形电路及简化等效电路	42
§ 2-5 变压器参数测定	44
§ 2-6 标么值	47
§ 2-7 变压器的运行特性	51
习题	56
第三章 三相变压器	59
§ 3-1 三相变压器的磁路系统	59
§ 3-2 三相变压器的电路系统与联结组	60
§ 3-3 三相变压器的绕组联结和磁路系统对电动势波形的影响	62

§ 3-4 变压器的并联运行	66
习题	70
第四章 三相变压器的不对称运行	73
§ 4-1 对称分量法	73
§ 4-2 Y/Y ₀ 联结三相变压器的单相负载运行与中点移动	76
习题	81
第五章 变压器的瞬变过程	82
§ 5-1 变压器空载合闸时的瞬变过程	82
§ 5-2 二次侧突然短路时的瞬变过程	83
习题	86
第六章 特殊电力变压器及互感器	87
§ 6-1 三绕组变压器	87
§ 6-2 自耦变压器	91
§ 6-3 电流互感器和电压互感器	95
习题	96

第二篇 同步电机

第七章 同步电机的基本工作原理和主要结构	97
§ 7-1 同步电机的基本工作原理	97
§ 7-2 同步电机的基本结构	98
§ 7-3 同步电机的额定值	103
习题	103
第八章 交流绕组及其电动势	104
§ 8-1 交流绕组的基本要求和分类	104
§ 8-2 槽电动势星形图	104
§ 8-3 三相双层叠绕组	105
§ 8-4 三相单层同心式绕组	109
§ 8-5 在正弦分布磁场下的绕组电动势, 节距系数、分布系数和绕组系数	110
§ 8-6 在非正弦分布磁场下电动势中的高次谐波及其削弱方法	114
§ 8-7 齿谐波电动势及其削弱方法	118
习题	120
第九章 交流绕组的磁动势	122
§ 9-1 单相绕组的脉振磁动势	122
§ 9-2 三相绕组的基波旋转磁动势	127
§ 9-3 三相绕组合成磁动势的高次谐波	130
§ 9-4 圆形和椭圆形旋转磁动势	133
习题	135
第十章 同步发电机的运行分析	137
§ 10-1 同步发电机的空载运行分析	137

§ 10-2	对称负载时的电枢反应	139
§ 10-3	隐极同步发电机的负载运行分析	141
§ 10-4	凸极同步发电机的双反应理论	147
§ 10-5	凸极同步发电机的负载运行分析	149
习题		154
第十一章	同步发电机的运行特性	156
§ 11-1	同步发电机的空载特性和短路特性, 直轴不饱和电抗	156
§ 11-2	同步发电机的零功率因数负载特性, 保梯电抗和直轴饱和电抗	160
§ 11-3	同步发电机的外特性、电压调整率和调整特性	164
§ 11-4	同步发电机稳态参数的测定	169
习题		169
第十二章	同步发电机的并联运行	173
§ 12-1	同步发电机的功率平衡方程式和转矩平衡方程式	173
§ 12-2	同步发电机的电磁功率和功角特性	175
§ 12-3	同步发电机并联投入的条件和方法	178
§ 12-4	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	181
§ 12-5	同步发电机与大电网并联运行时无功功率的调节和 V 形曲线	185
§ 12-6	两台容量相近的同步发电机的并联运行	187
习题		189
第十三章	同步电动机和同步调相机	191
§ 13-1	同步电机的三种运行状态	191
§ 13-2	同步电动机的基本方程、相量图和功角特性	192
§ 13-3	同步电动机无功功率的调节	195
§ 13-4	同步电动机的起动方法	196
§ 13-5	同步调相机	197
习题		198
第十四章	同步发电机的不对称运行	200
§ 14-1	同步发电机不对称运行时对称分量法的应用	200
§ 14-2	三相同步发电机的不对称稳定短路	204
§ 14-3	负序和零序参数的测定	207
§ 14-4	不对称运行对电机的影响	209
习题		209
第十五章	同步发电机的突然短路	211
§ 15-1	同步发电机三相对称突然短路的特点	211
§ 15-2	三相对称突然短路的物理过程与短路电流的计算	212
§ 15-3	突然短路对电机的影响	223
习题		224
第十六章	同步发电机的振荡	226
§ 16-1	同步发电机振荡的物理过程	226

§ 16-2	振荡过程中同步发电机的转矩与转矩平衡方程	229
§ 16-3	并接在无穷大电网上同步发电机的衰减自由振荡	231
§ 16-4	并接在无穷大电网上同步发电机的强迫振荡	231
§ 16-5	同步电机单机运行时的强迫振荡	232
§ 16-6	同步发电机动态稳定的概念	233
习题		233
第十七章	特殊同步电机	235
§ 17-1	磁阻同步电动机	235
§ 17-2	步进电动机	237
§ 17-3	永磁同步电机	240
§ 17-4	爪极同步电机	241
习题		242

第三篇 感应电机

第十八章	感应电机的基本原理与主要结构	245
§ 18-1	感应电机的基本工作原理	245
§ 18-2	感应电机的主要结构部件	248
§ 18-3	感应电机的额定值	251
习题		252
第十九章	感应电动机的运行分析	253
§ 19-1	感应电机的磁场与电抗	253
§ 19-2	感应电动机转子不动时的运行分析	255
§ 19-3	感应电动机转子旋转时的运行分析	257
§ 19-4	感应电动机的等效电路	261
§ 19-5	笼型转子的相数、极数、参数计算	265
§ 19-6	感应电机的参数测定	267
习题		271
第二十章	感应电动机的功率、转矩和工作特性	272
§ 20-1	感应电动机的功率、功率平衡方程式与转矩平衡方程式	272
§ 20-2	感应电机的电磁转矩	276
§ 20-3	感应电动机的工作特性	280
习题		283
第二十一章	三相感应电动机的起动、调速和制动	284
§ 21-1	感应电动机的起动过程	284
§ 21-2	三相感应电动机的起动方法	285
§ 21-3	深槽式和双笼感应电动机	289
§ 21-4	感应电动机的附加转矩及其对起动的影响	291
§ 21-5	感应电动机的调速方法	295
§ 21-6	感应电动机的制动方法	298

习题	300
第二十二章 三相感应电动机在不对称电压下的运行及单相感应电动机	301
§ 22-1 三相感应电动机在不对称电压下运行分析	301
§ 22-2 单相感应电动机	304
§ 22-3 三相感应电动机在非正弦电压下的运行	310
习题	311
第二十三章 感应发电机和特殊感应电机	312
§ 23-1 感应发电机	312
§ 23-2 交流伺服电动机	315
§ 23-3 交流测速发电机	317
§ 23-4 感应调压器	318
习题	320

第四篇 直流电机

第二十四章 直流电机的工作原理和基本结构	321
§ 24-1 直流电机的工作原理	321
§ 24-2 直流电机的主要结构部件	323
§ 24-3 直流电机的额定值	327
习题	328
第二十五章 直流电机的磁场、电枢绕组和电枢反应	329
§ 25-1 直流电机空载时的磁场及磁化曲线	329
§ 25-2 直流电机电枢绕组的基本特点	331
§ 25-3 单叠绕组	333
§ 25-4 单波绕组	336
§ 25-5 直流电机的电枢磁动势和磁场	340
§ 25-6 交轴电枢反应和直轴电枢反应	343
§ 25-7 电枢绕组的感应电动势	344
§ 25-8 直流电机的电磁转矩	346
习题	347
第二十六章 直流电机的基本方程式和运行特性	349
§ 26-1 直流电机按励磁方式的分类	349
§ 26-2 直流电机的电动势平衡、功率平衡和转矩平衡	350
§ 26-3 直流发电机的运行特性	356
§ 26-4 直流电动机的工作特性	363
§ 26-5 直流电动机的起动、调速与制动	367
习题	373
第二十七章 直流电机的换向	376
§ 27-1 直流电机的换向过程	376
§ 27-2 换向的电磁理论及补充	377

§ 27-3 产生火花的原因	383
§ 27-4 改善换向的措施	384
§ 27-5 环火及补偿绕组	388
习题	389
第二十八章 特殊直流电机	390
§ 28-1 直流伺服电动机	390
§ 28-2 直流测速发电机	392
§ 28-3 其他直流电机	393
§ 28-4 单相串励换向器电动机	393
习题	395
参考文献	396

导 论

§ 0-1 电机及其在国民经济中的作用

电机是一种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，对我国社会主义经济建设有着重要的作用。

电机的分类方法很多，按其功能可分为：

- (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，这种特性称为电机的可逆性。

在电力工业中，发电机是火力发电厂、水力发电厂、核发电厂、柴油机发电厂、燃汽轮机发电厂等的主要设备，变压器是变电站的主要设备；在机械、纺织、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，一个现代化的工厂需要几百台以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，诸如汽车电机、船用电机和航空电机，至于电车、电气机车需要具有优良起动性能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；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。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电机。

社会生产的要求，人类生活的追求，推动着科学技术和电机理论的新发展，例如最近超导技术、磁流体发电技术、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。

§ 0-2 电机的发热和温升

电机运行是能量转换的过程，这时电机的绕组中流过电流，电流在绕组电阻上的功率 I^2R ，以及电机铁心中交变磁场导致的磁滞与涡流引起的功率损耗都转化为热量而散失，相应于转化为热量而散失的能量，称为能量损耗。损耗的能量全部转化为热量，引起电机发

热。存在损耗的部分是电机中的热源，热量的出现和积累，引起这些部分温度升高。温度过高影响耐热能力薄弱的绝缘材料，大大缩短了它的寿命，严重时甚至可能将电机烧毁。所以对于不同的绝缘材料，有相应的最高允许工作温度，在此温度以下长期工作，绝缘材料的电性能、机械性能和化学性能不会显著变坏；如超过此温度，则这些性能迅速变坏或引起快速老化。于是电机各部分应该因其结构材料的不同而有一个最高工作温度的限值。

电机部件温度升高的同时，热量便开始由高温向低温部分流动，热流所及部分的温度也升高。当电机的温度高于周围介质的温度时，就向冷却介质散出热量。电机某部分的温度 θ 与电机周围介质的温度 θ_0 之差，称为电机该部分的温升 τ ，即

$$\tau = \theta - \theta_0 \quad (0-1)$$

温升的单位用绝对温度 K。从数值上看，用 K 与用摄氏温度 $^{\circ}\text{C}$ 表示的温差是一样的。电机温升的高低，同电机损耗即发热量的多少及散热的快慢有关。所以，温升是电机损耗与散热情况的量度，它成为评价电机性能的一个指标。

电机某部分的温度 $\theta = \theta_0 + \tau$ 是受到具体运行地点的冷却介质温度 θ_0 影响的。为了制造基本上能在全国各地适用的电机，国家标准 GB755—87 根据我国各地区气候的一般情况，把周围冷却空气的最高温度规定为

$$\theta_{0\max} = 40^{\circ}\text{C}$$

当周围冷却介质的最高温度一定时，电机各部分的最高温度决定于它们的温升。这时，为了保证电机的安全运行和具有适当的寿命（能正常运行的使用年限），电机各部分的温升不应超过一定数值，也就是说电机各部分的允许温升有一定的最大值，称为温升限值，它由国家标准 GB755—87 规定。

由于不同的测温方法可以得到不同类型的温度，因此在规定温升限值的同时应规定具体的测温方法。测温方法通常有：

(1) 温度计法 该法是用酒精温度计、半导体点温计等贴附在电机可接触到的表面，以测出接触点表面的温度。

(2) 电阻法 它是通过测量绕组在冷态和热态时的电阻来推算出绕组在热态时的温度。若测得绕组在冷态温度 θ_0 时的电阻为 R_0 ，热态时的电阻为 R_θ ，则绕组热态时的平均温度为

$$\theta = \theta_0 + \frac{R_\theta - R_0}{R_0} (G + \theta_0) \quad (0-2)$$

式中 G ——常数，对铜绕组取 235；对铝绕组取 225。

(3) 埋置检温计法 在电机的绕组、铁心或其他需要测温的位置，在电机装配时预先埋置检温计。检温计通常有热电偶和电阻温度计两种。这种方法可在电机运行中测出被测点温度。

当把电机作为一个各点温度都相同，而且表面各点散热能力也相同的均质等温体时，电机的温升按指数规律增长，温升稳定值

$$\tau_\infty = \frac{Q}{\lambda A} \quad (0-3)$$

式中 Q ——单位时间内均质等温体中产生的热量，它比例于电机功率损耗；

A ——均质等温体的散热表面积；

λ ——表面散热系数，即当温升为 1K 时，每单位时间内从单位表面上通过对流和辐

射而散走的热量。 λ 的大小取决于散热表面的性质和周围冷却气体的流动速度。

上式表明,电机的稳定温升由单位时间的发热量 Q 、散热表面积的大小 A 和散热系数 λ 确定。因此,要降低电机的温升可有三种办法:一是设法减少电机的损耗,以便降低 Q ;二是增加散热表面积 A ;三是提高电机的散热能力,改进冷却方法,即增大 λ 。

§ 0-3 电机常用绝缘材料

绝缘材料按耐热能力的高低分成六个等级:

(1) A级绝缘 包括经过浸渍处理的棉纱、丝、纸等有机纤维材料以及普通漆包线上的磁漆等。目前只在变压器中使用。最高允许工作温度为 105°C 。

(2) E级绝缘 包括用聚酯树脂、环氧树脂、三醋酸纤维等制成的薄膜,聚乙烯醇缩醛高强度漆包线上的磁漆等。最高允许工作温度为 120°C 。

(3) B级绝缘 包括云母、石棉、玻璃丝等无机物;用提高了耐热性能的有机漆或树脂作为粘合物制成的材料及其组合物;聚酯高强度漆包线上的磁漆等。最高允许工作温度为 130°C 。

(4) F级绝缘 包括云母、石棉、玻璃丝等无机物用硅有机化合物改性的合成树脂漆,或耐热性能符合这一等级要求的醇酸、环氧等合成树脂作为粘合物而制成的材料或其组合物。最高允许工作温度为 155°C 。

(5) H级绝缘 包括硅有机物以及云母、石棉、玻璃丝等无机物用硅有机漆作为粘合物而制成的材料。最高允许工作温度为 180°C 。

(6) C级绝缘 包括无粘合剂的云母、石英、玻璃等;用热稳定性特别优良的硅有机树脂、聚酰亚胺浸渍漆等处理过的石棉、玻璃纤维织物或其制成品;聚酰亚胺基漆包线的磁漆、聚酰亚胺薄膜等。C级绝缘是要求更高的绝缘材料,正在生产中推广使用,其最高允许工作温度尚未确定,但应在 180°C 以上。

绝缘材料的寿命受电机工作温度影响很大。例如A级绝缘材料的寿命 t 与使用温度 θ 有如下关系:

$$t = Ce^{-a\theta} \quad (0-4)$$

式中 C 、 a ——由试验决定的常数;

e ——自然对数的底数;

t ——寿命,年;

θ ——工作温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

上式表明,绝缘材料寿命随工作温度按指数函数下降。可见,若电机运行时温度超过规定值,那么其使用寿命将短于规定值。

§ 0-4 电机的冷却及机壳的防护

电机的冷却决定了电机的散热能力,从而直接影响电机的寿命。电机冷却的主要问题就是确定冷却介质和冷却方式,也就是要确定用什么介质来带走电机中所产生的热量,以

及这些介质在电机内的流动方式。

一、冷却介质

一般电机的冷却介质分成两类：

(1) 气体冷却 即利用空气、氢气或其他气体作为冷却介质。氢气的热容量较空气大，冷却效果更好。

(2) 液体冷却 即利用水、油等作为冷却介质。由于液体的热容量和导热能力比气体大得多，因此仅指冷却而言，效果比气体好得多。

二、冷却方式

冷却方式很多，总的说来可分两大类：

(1) 间接冷却 冷却介质只与电机的铁心、绕组、机壳的外表面接触，热量要先从内部传导到这些部分，然后再散给冷却介质。间接冷却大多数是空气冷却，这时它又有自然冷却式和扇冷式等。

(2) 直接冷却 冷却介质（多数用氢气或水）进入发热体（例如空心导线）内部，直接从发热体吸收热量并将它带走。显然，直接冷却的效果要比间接冷却好得多，它的采用促进了现代巨型电机的发展。不过，直接冷却时电机结构却又复杂得多。

扇冷式，水冷式和氢冷式都是强迫冷却方式。

三、机壳的防护形式

机壳的防护形式主要有：

(1) 开启式 这种电机的机壳结构对转动和带电部分没有专门的保护，并且冷却方式常为自然冷却。

(2) 防护式 这种电机内部转动和带电部分有必要的机械保护，以防止固体异物和水进入电机内部，以及防止人体意外的接触。防护形式分两种，第一种防护形式的电机能防止固体异物进入电机，如防尘式；第二种防护形式能防止电机进水而引起有害影响，如防滴电机、潜水电机等。

此外，还有一种防爆电机，其机壳的结构足以阻止电机内部的气体爆炸传递到电机外部，从而避免了电机外部的燃烧性气体发生爆炸。

§ 0-5 电机的额定值与定额

一、电机的额定值

电机制造厂按国家标准，根据电机的设计和试验数据而规定的每台电机的正常运行状态和条件，称为电机的额定运行情况。

表征电机额定运行情况的各种数值，如电压、电流、功率等称为电机的额定值。额定值一般标记在电机的铭牌上。