



电机学 — 旋转电机设计

〔民主德国〕 K.福格特 等著

机械工业出版社

电 机 学

旋 转 电 机 设 计

〔民主德国〕 K.福格特 等著

刘彦清 译
顾其善 校



机 械 工 业 出 版 社

内 容 简 介

本书是G. 荣勒主编的《电机学》的第三卷（第一卷：《电机基础》，第二卷：《旋转电机理论》）。书中详细介绍了电机设计的一系列问题：绕组的设计；磁路、换向、集肤效应、损耗、电感、电抗、时间常数、力和发热（包括风扇）的详细计算；直流电机、异步电机、同步电机和交流换向器电机的设计实例。特别是基于电子计算机的广泛使用，从分析到计算均侧重于现代计算方法，如磁路、集肤效应、电机优化设计等计算，分别给出了计算程序框图。

本书可供大专院校电机专业师生、从事电机的研究、设计、制造和试验工作的工程技术人员参考。

Elektrische Maschinen

Berechnung rotierender elektrischer Maschinen

K. Vogt u. a.

VEB VERLAG TECHNIK BERLIN 1978

电 机 学

旋 转 电 机 设 计

〔民主德国〕 K. 福格特 等著

刘彦清 译

顾其善 校

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 787×1092¹/₁₆·印张26¹/₄·字数 632千字

1986年10月北京第一版·1986年10月北京第一次印刷

印数 0,001—3,550·定价 6.50元

统一书号：15033·6249

译者的话

为适应我国电机教学、科研、设计和制造迅速发展的需要，加速四个现代化建设，我们翻译了K.福格特等著的德文版《旋转电机设计》。该书为G.米勒主编的《电机学》的第三卷（第一卷：《电机基础》；第二卷：《旋转电机理论》）。

原书为德累斯登工业大学电机专业教科书。分析计算均从实际出发，并列举了设计实例。特别是基于电子计算机的广泛使用，从分析到计算都侧重于现代计算方法。本书以各种类型电机的计算题目和设计任务为重点而编写。

第一篇介绍了电机绕组的设计；第二篇详述了磁路、换向、集肤效应、损耗、电感、电抗、时间常数、力和发热（包括风扇）的计算；第三篇阐述了电机的设计原理和优化设计；第四篇列举了直流电机、异步电机、同步电机和交流换向器电机的设计实例。

书中删去了原序。对原书错漏之处作了修正和补充，并相应加了注解。

本书的翻译得到哈尔滨电机研究所、哈尔滨工业大学、哈尔滨电工学院、哈尔滨电缆厂等单位 and 俞宗瑞、梁维燕、沈从龙、游善良、陆忠麒、张德怡、汤蕴璆等同志的支持和鼓励，特别是得到王歆勤同志的大力支持和协助。协助工作的还有刘存义、徐思进、左俊业、刘保安等同志，对此深表谢意。参加本书翻译工作的还有刘珂音、何显荣、刘锡民和佳音同志。

由于水平所限，加之时间仓促，书中错误在所难免，恳请读者批评指正。

主要符号

a	相绕组的并联支路数	δ	整数
a	换向器绕组的并联支路对数	G	电流密度
a	距离, 长度	G_n	自然数
a, b, c	三相绕组的各相名称	G_o	偶数
A	电枢线负荷	G_u	奇数
A	平面, 横截面积	h	高度
b	加速度	H	磁场强度
b	宽度	H_o	霍莫克龙(Homochron)数
b	弧长	i, I	电流
b_i	计算极弧	i	标么值电流
$b_{z\theta}$	一个线圈组的相带宽	I	积分
B	磁通密度	j	虚数部分(虚部)
B_{zs}	视在齿磁通密度	j	热流密度
$B(x)$	磁通密度分布(磁场曲线)	J	惯性矩
B_i	毕奥系数	k	整数
c, C	系数, 常数	k	常数, 系数
c	弹簧常数	k	换向片数, 电枢线圈数
c	比热(热容量)	k	考虑损耗增大影响的系数
c_m	求平均电抗电动势用系数	k	饱和系数
C	利用系数, 利用率	k_c	卡特系数
C	极形系数	k_r	电阻比
C_m	极形因数	k_x	漏磁比
d, D	直径	K	绝对粗糙度
d	厚度	l	长度
d_{gl}	等效(水力)直径	l_m	平均线匝长
D	电枢直径	l_s	平均导体长或线棒长
e, E	感应电动势	L	电感
e	偏心率(偏心度)	L_{vv}	绕组 v 的自感
e_r, E_r	电枢电抗电动势	$L_{v\mu}$	绕组 v 和 μ 之间的互感
e_{tr}, E_{tr}	变压器电动势	m	相绕组的相数
E	弹性模数	m	换向器绕组的重路数
E	电场强度	m	尺寸, 比例
Eu	欧拉数(Euler)	m	质量
f	分布载荷	m	一个槽中的导体数
f	频率	M	转矩
f_d	固有频率	n	整数
$f_b(x)$	磁场形状	n	一个槽里叠放的导体数
F	力	n	q 的分母

n	转速	u	每槽每层线圈边数
n_s	同步转速	ω	圆周速度
N	槽数	U	圆周
N	叶片数	$U, V, W,$	
N'	槽星形图的射线数	X, Y, Z	三相绕组线端标记
N^*	原绕组槽数	\bar{u}	异步电机复数变比
N_0	空(未嵌线)槽数	\bar{u}_h	异步电机的实数变比
N_0	所讨论相在上层占据的槽数	v	速度
N_n	所讨论相在下层占据的槽数	v	圆周速度, 线速度
N_s	所讨论相占据的槽数	v	比损耗, 单位损耗
N_g	所讨论相以外的另一相占据的槽数	V	损耗, 损耗功率
Nu	努舍尔特(扩散)准数(NuBelt)	V	磁压降
p	压力	V	体积, 容积
p	极对数	V	体积电流
p^*	原绕组极对数	w	匝数
p_q	横向压力, 径向压力	w	每相串联匝数, 支路串联匝数
P	功率, 容量	w	旋转系统中的相对速度
P_i	内功率	w_m	磁能密度
P_s	视在功率	W	线圈节距, 线圈宽
Pe	培克勒准数(Peclet)	W	向量磁位
Pr	普朗陀准数(Prandtl)	W_m	磁能
q	每极每相槽数, 槽数	x, y, z	坐标
q	热源密度	x	相对电抗
q	源电荷	x_v	线圈节距缩短量
Q	一个线圈组的线圈数	X	电抗
Q	分层导体的槽数	y	变形
Q	热流	y	节距, 绕组节距
r	半径	y	绕组合成节距
R	电阻, 阻力	y_1	第一节距, 线圈节距
R_w	热阻	y_2	第二节距, 接线跨距
Re	雷诺数(Regnol)	y_0	均压连接跨距
s	路径, 磁路	y_v	槽节距缩短量
s	滑差(转差率)	z	导体数
St	斯坦顿(Stanton)数	z	每相导体数
t	时间	z	q 的分子
t	槽星形图的圆图数	Z	求绕组系数进行相加的向量数
t^*	原绕组槽星形图的圆图数	Z^+, Z^-	槽星形图中每个相带的向量数
t_s	换向绕组的端部连接线数	α, β, γ	角度, 相角
T	时间间隔	α	极弧系数
T	时间常数	α	求实心导体换算高度的换算系数
T	周期	α^*	求分层导体换算高度的换算系数
u, U	电动势, 电压	α_p	扁平系数
u	相对电动势(电压)	α_n	槽距角

α_r	向量角	Λ	流函数
$\alpha_{z,c}$	槽星形图中相带角	μ	磁导率
$\alpha_{z,p}$	相对坐标中绕组的相带宽	μ_0	真空磁导率
β	折算到换片距的参数	μ	摩擦系数
β_s	折算到换向片距的节距缩短量	ν	谐波次数
β	实心导体换算高度	ν	运动粘度
β^*	分层导体换算高度	ξ, η	坐标
γ, Γ	相对坐标	ξ	流动系数
γ	涡流表面分布 \ominus	ξ	绕组系数
γ	计算 k_c 用补加系数	$\xi_{c,cr}$	斜槽系数
γ	上下层电流间的相位移	ρ	密度, 比重
Γ	闭合线积分	ρ	标么值半径
δ	气隙	ρ	漏磁系数
δ^*	等效气隙宽	ρ	在50赫兹和1特斯拉时的单位磁化损耗
Δ	透入深度	σ	平均切向力
Δ_m	标么值质量	σ	拉应力
ε	相对坐标中的斜槽	σ_L	纵向拉力
ε	许用偏差	τ	极距
ε	相关偏心率(偏心度)	φ	交变量的相位
ε	相对粗糙度, 相对光洁度	φ	填充系数
ζ	Pichelmayr 换向系数	φ	供气系数
η	效率	φ	电位
η	相对坐标中线圈宽度	φ_m	磁位
η	计算分层股线导体电阻比用补加系数	$\varphi(\beta),$	
η	计算力用补加函数	$\psi(\beta)$	计算电阻比用补加函数
η	动力粘度	$\varphi'(\beta),$	
η_r	换算系数, 简化系数	$\psi'(\beta)$	计算漏磁比用补加函数
η_s	短距角	Φ	磁通
θ	温度	Φ	速度位
θ	相对换向时间	Φ	复(数)位
θ_m	相对换向极磁动势	ψ	磁链
Θ	磁动势	ψ	压力系数
$\Theta(x)$	磁动势分布(磁场励磁曲线)	ω	圆频率
κ	电导率	ω	角速度
λ	相对电枢长	Ω	标么值速度
λ	磁场谐波波长		
λ	旋转磁场的谐波次数	下标	
λ	相对磁导	a	电枢
λ, λ_w	导热系数	a	拉力
$\lambda(x)$	计算力的补加函数	a, b, c	相标记
Λ	磁导	ab	给出的

\ominus 原文把 Wirbelbelegung 误为 Winkelbelegung——译者注。

<i>ab</i>	线段, 距离, 章节	<i>n</i>	正常的, 标准的, 额定的
<i>ā</i>	相带变化	<i>NH</i>	槽谐波
<i>b</i>	嵌线的	<i>o</i>	上层
<i>b</i>	虚数部分 (虚部)	<i>o</i>	高次谐波
<i>bez</i>	基准绕组	<i>o</i>	上面的, 上层的
<i>B</i>	电刷, 电刷对	<i>o</i>	表面
<i>B</i>	磁通密度	<i>p</i>	磁极
<i>d</i>	纵轴磁场分量	<i>p</i>	脉动, 脉冲, 波动
<i>D</i>	阻尼笼	<i>pk</i>	磁极铁心
<i>e</i>	励磁绕组	<i>pl</i>	极间
<i>ers</i>	等效的	<i>q</i>	横轴, 横向, 正交
<i>f</i>	同步电机励磁绕组	<i>q</i>	磁场横轴分量
<i>Fe</i>	铁磁材料	<i>r</i>	扼部
<i>g</i>	互感分量	<i>r</i>	半径
<i>gr</i>	线圈组	<i>r</i>	相对的
<i>gr</i>	极限值	<i>r</i>	电阻
<i>ges</i>	饱和值	<i>r</i>	环, 圈
<i>GN</i>	两边开槽	<i>r</i>	摩擦
<i>k</i>	主磁场	<i>r, res</i>	合成的
<i>h</i>	磁滞	<i>red</i>	换算的, 简化的, 缩小的
<i>h</i>	水平的	<i>s</i>	自感分量
<i>i</i>	计算(理想)的	<i>s</i>	叠绕组
<i>i</i>	电流	<i>s</i>	槽口
<i>i, k, n, p</i>	一般代号	<i>s</i>	漏磁桥区域
<i>j</i>	转子磁轭	<i>s</i>	线棒
<i>k</i>	换向器	<i>sch</i>	极靴
<i>k</i>	补偿绕组	<i>sch</i>	视在的, 假设的
<i>k</i>	槽楔区域	<i>schr</i>	斜槽, 倾斜
<i>k</i>	短路, 短接	<i>sp</i>	线圈
<i>Kr</i>	临界值	<i>st</i>	换向片
<i>l</i>	空气	<i>str</i>	相
<i>l</i>	导体, 导体区域	<i>S</i>	定子
<i>L</i>	转子	<i>t</i>	部分, 部件
<i>m</i>	体积平均值	<i>t</i>	切向的, 正切的
<i>m, mitt</i>	平均值 (空间的)	<i>u</i>	下层
<i>mech</i>	机械的, 力学的	<i>u</i>	未嵌线的, 空槽的
<i>max</i>	最大值	<i>u</i>	下面的
<i>min</i>	最小值	<i>u</i>	电动势, 电压
<i>n</i>	额定值	<i>u</i>	(反复) 磁化
<i>n</i>	槽	<i>ū</i>	过渡, 过载
<i>n</i>	槽距	<i>ū</i>	导体区域的槽部
<i>n</i>	滑入换向片	<i>v</i>	通风管道, 通风槽, 通风沟

XII

v	滑出换向片	v	交链绕组
v	垂直, 立式	v	分区, 部分区域
vzb	带有符号的	ξ, η	分量
w	绕组	σ	漏磁, 漏磁场
w	波绕组	σ	折算到拉力负荷
w	绕组端部	0	修正值, 比值, 基准值
w	换向磁场	0	在磁极中心线处的 ($x = 0$)
w	有功分量, 实数部分(实部)	0	零序系统
w, w_P	换向极	0	空载
wb	涡流	$1, 3, 5, \dots$	折算到第 1, 3, 5, ... 次谐波
wz	换向区	2	逆序磁场分量
x, y, z	分量	ϕ	折算到直径
z	齿	\perp	垂直
z	齿顶		
z	相带, 区(域)	上角	
z	附加	\angle	复数参数
zu	输入	\angle^*	共轭复数
zul	许用值, 允许值	\wedge	振幅值
zw	支路	\rightarrow	向量
δ	气隙	$*$	标么值
ε	偏心率, 偏心度	—	时间平均值
λ	折算到轴与 λ	—	线段, 距离
μ	磁化	$'$	瞬变参数
μ	励磁绕组	$''$	超瞬变参数
μ, ν, ρ	一般编号	$+, -$	正负号
ν	折算到第 ν 次谐波	$'', ''', ''''$	一般相区别的标志

目 录

译者的话
主要符号

第一篇 旋转电机绕组

1. 一般名称和定律	1	2.4 绕组的选择	55
1.1 电枢绕组的一般名称	1	2.4.1 计算公式	55
1.1.1 绕组各部分的名称	1	2.4.2 同步电机	56
1.1.2 绕组名称	2	2.4.3 异步电机	58
1.2 电枢绕组的一般规则	6	3. 换向器绕组	61
1.2.1 绕组元件中感应电动势向量图 的一般规则	6	3.1 绕组构成规则和绕组名称	61
1.2.2 电枢线圈构成绕组的一般规则	9	3.1.1 线圈的基本布置	61
2. 相绕组的构成	11	3.1.2 基本接线方法	63
2.1 绕组构成规则	11	3.1.3 闭路条件	65
2.1.1 相带构成规则	11	3.1.4 对称条件	67
2.1.2 对称条件	15	3.1.5 均压连接	71
2.1.3 对称的分数槽绕组	16	3.2 绕组的设计和选择	74
2.1.4 原绕组	19	3.2.1 标准绕组的设计	75
2.2 绕组的设计	21	3.2.2 特种绕组	83
2.2.1 整数槽绕组	22	3.2.3 设计公式	86
2.2.2 单层分数槽绕组	27	3.2.4 绕组的选择	87
2.2.3 双层分数槽绕组	36	4. 磁极绕组	90
2.2.4 特种绕组	39	4.1 凸极绕组	90
2.3 由槽星形图确定绕组系数	47	4.1.1 并励绕组	90
2.3.1 基本规则	47	4.1.2 串励绕组	91
2.3.2 整数槽绕组	49	4.2 分布在槽中的绕组	91
2.3.3 分数槽绕组	51	4.2.1 补偿绕组	91
		4.2.2 阻尼绕组	92

第二篇 旋转电机设计基础

5. 磁路	93	5.3 气隙磁场的磁化曲线	104
5.1 设计基础	93	5.3.1 磁极形状和磁动势分布对气 隙磁场的影响	104
5.1.1 磁场的解析处理方法	93	5.3.2 气隙分界面的间断对气隙磁场的 影响	108
5.1.2 主要计算程序	95	5.4 磁路铁磁部件的特性段	114
5.2 磁场的求解	98	5.4.1 具有近似均匀磁场的磁路分段	114
5.2.1 无载流体恒磁导率的场域	98	5.4.2 沿积分路径截面变化的磁路分段	115
5.2.2 有载流体恒磁导率的场域	101		
5.2.3 磁场的模拟解法和数值解法	102		

5.4.3 沿积分路径磁通变化的磁路分段	118	7.3.3 换向极绕组	192
5.5 磁路中各段磁场的相互影响	124	7.4 影响换向的因素	197
5.5.1 齿区磁场对气隙磁场的影响	125	7.4.1 电刷的影响	197
5.5.2 并列磁路分段的磁化特性	127	7.4.2 绕组设计和换向极结构的影响	199
5.5.3 轭部磁场对气隙磁场的影响	129	8. 电流集肤效应	201
5.6 空载特性曲线的确定	132	8.1 电流集肤效应的基本关系	201
5.6.1 集中(励磁)绕组的直流励磁	133	8.1.1 基本关系的确定	201
5.6.2 分布(励磁)绕组的直流励磁	135	8.1.2 绕组设计观点	203
5.6.3 多相交流励磁	139	8.2 电流集肤效应的分层计算	204
5.6.4 特殊励磁方式	143	8.2.1 单边电流集肤效应	204
5.7 负载电流对励磁绕组磁场的影响	146	8.2.2 双边电流集肤效应	207
5.7.1 电枢磁动势为线性分布的电机	146	8.2.3 参数的定义	210
5.7.2 正弦分布电枢磁动势和均匀气隙电机	149	8.3 电流集肤效应的严密解析计算	213
5.7.3 正弦形分布电枢磁动势和不均匀气隙的电机	153	8.3.1 基本公式	213
6. 漏磁	157	8.3.2 实心导体	215
6.1 漏磁场的划分	157	8.3.3 分层导体	221
6.1.1 部分漏磁场的定义	157	8.3.4 编织线棒	225
6.1.2 解析表达式	159	8.3.5 换向器绕组	226
6.2 漏磁的计算基础	162	9. 损耗	228
6.2.1 漏磁通的基本计算	162	9.1 电路中损耗	228
6.2.2 漏磁链的基本计算	163	9.1.1 绕组电阻	228
6.3 漏磁通的计算	165	9.1.2 绕组中的损耗	230
6.3.1 槽-齿顶漏磁通	166	9.1.3 电刷接触损耗	230
6.3.2 凸极漏磁通	167	9.2 磁路中的损耗	230
6.4 漏磁链的计算	168	9.2.1 反复磁化损耗	231
6.4.1 槽和齿顶漏磁	168	9.2.2 气隙磁场中的高次谐波产生的损耗	235
6.4.2 绕组端部漏磁	174	9.3 机械损耗	239
6.4.3 高次谐波漏磁	176	9.3.1 气体摩擦和轴承摩擦产生的损耗	239
6.4.4 磁极漏磁	178	9.3.2 电刷摩擦损耗	240
7. 换向	179	9.4 效率	240
7.1 换向过程	179	10. 力	242
7.1.1 基本换向过程	179	10.1 求解力的基本关系式	242
7.1.2 电刷接触负荷	181	10.1.1 由场量求解作用在载流体上的力	242
7.2 换向的基本解析方法	182	10.1.2 由场量求解交界面上的力	243
7.2.1 网络方程	182	10.1.3 由电感的变化求解力	245
7.2.2 换向区域	183	10.2 作用在嵌入槽中导体上的力	246
7.2.3 网络方程的求解	185	10.2.1 切向力	246
7.3 换向的实用计算	187	10.2.2 径向力	247
7.3.1 电枢电抗电动势曲线	187	10.3 作用在叠片铁心上的径向力	250
7.3.2 电枢平均电抗电动势	190	10.3.1 一般现象	250

10.3.2	基波磁场的作用	250	11.3.2	无旋平面绝对气流表达式的解法	298
10.3.3	磁拉力	252	11.3.3	设计参数的确定	309
10.3.4	由旋转磁场及其(反)作用合成的旋转力波	255	11.3.4	风扇中的气流损耗	310
10.4	作用在转子上的轴向力	260	12.	电感和电抗	312
10.4.1	一般现象	260	12.1	主电感	312
10.4.2	气隙磁场产生的轴向力	261	12.1.1	励磁绕组的主电感	313
10.4.3	绕组端部漏磁场产生的轴向力	266	12.1.2	相绕组的主电感	313
10.5	作用在绕组端部导体上的力	266	12.1.3	相绕组的主电抗	315
10.5.1	一般现象和关系式	266	12.1.4	换向器绕组的主电感	317
10.5.2	等长平行导体间的力	270	12.1.5	考虑饱和影响	317
10.5.3	双层绕组上下层导体间的力	271	12.2	漏电感和漏电抗	318
10.5.4	作用在绕组端部支架上的合力	272	12.2.1	相绕组的漏电感和漏电抗	318
11.	散热	274	12.2.2	励磁绕组的漏电感	319
11.1	基本方程	274	12.3	特征电感和电抗	319
11.1.1	热量的传递	274	12.3.1	同步电机的电感和电抗	319
11.1.2	冷却介质的运动	275	12.3.2	异步电机的电感和电抗	323
11.1.3	边界条件	276	13.	时间常数	325
11.1.4	简化的热传导微分方程	277	13.1	固有时间常数	325
11.1.5	相似理论	280	13.1.1	绕组的固有时间常数	325
11.1.6	流动介质的特性	281	13.1.2	铁磁路实心段的固有时间常数	326
11.2	冷却过程的工程计算	283	13.1.3	转子时间常数	326
11.2.1	流体的无源元件(通风沟)	283	13.2	特征时间常数	327
11.2.2	热传递	286	13.2.1	两个相互交链绕组的时间常数	327
11.2.3	等效热路图	288	13.2.2	同步电机的时间常数	328
11.3	流体力学中的有源元件(风扇)	292	13.2.3	异步电机的时间常数	329
11.3.1	风扇中气流的基本表达式	292			

第三篇 旋转电机设计

14.	基本设计过程	331	15.	考虑附加条件的设计	344
14.1	设计公式	332	15.1	可纳入设计公式中的附加条件	344
14.1.1	设计公式的推导	332	15.1.1	机械约束条件	344
14.1.2	主要设计值	337	15.1.2	电气约束条件	344
14.1.3	主要尺寸的求解	337	15.2	不可纳入设计公式的附加条件	346
14.2	设计适用值	339	15.2.1	规定的运行性能	346
14.2.1	几何尺寸适用值	339	15.2.2	优化设计	347
14.2.2	电磁负荷适用值	341	15.2.3	借助电子计算机实现优化	349

第四篇 主要类型旋转电机的设计和计算过程

16.	直流电机	353	16.1.2	电枢绕组的设计	354
16.1	设计和计算过程	353	16.1.3	换向器设计	355
16.1.1	主要尺寸的确定	354	16.1.4	磁路设计	356

16.1.5 验算	356	18.1.3 磁路设计	384
16.2 算例	356	18.1.4 验算	385
16.2.1 设计	357	18.2 算例	385
16.2.2 验算	361	18.2.1 设计	385
16.2.3 其它结构型式电机的设计参数	367	18.2.2 验算	389
17. 异步电机	369	18.2.3 其它结构型式电机的设计参数	397
17.1 设计和计算过程	369	19. 交流换向器电机	398
17.1.1 主要尺寸的确定	369	19.1 交流并励换向器电机的设计和计算过程的评述	398
17.1.2 绕组设计	370	19.1.1 设计	398
17.1.3 磁路设计	371	19.1.2 验算	399
17.1.4 验算	372	19.2 一台转子供电的交流并励换向器电机算例	399
17.2 算例	373	19.2.1 参数和尺寸	400
17.2.1 设计	373	19.2.2 绕组	400
17.2.2 验算	376	附录 磁化曲线	402
17.2.3 其它结构型式电机的设计参数	382	参考文献	403
18. 同步电机	383		
18.1 设计和计算过程	383		
18.1.1 主要尺寸的确定	383		
18.1.2 电枢绕组设计	384		

第一篇 旋转电机绕组

1. 一般名称和定律

电机的基本作用原理是以磁场和绕组的相互作用为基础的。其中绕组的布置、接线及其线端的电气参数基本上决定了电机的运行状况，并由此确定了电机的类型。根据绕组在电机作用机理上能承担的任务，把绕组分为：电枢绕组、励磁绕组、补偿绕组和阻尼绕组。

电枢绕组系指内部感生能量所需电动势的绕组。励磁绕组能建立能量转换所需的磁场，但异步电机却是通过电枢绕组的励磁建立磁场的。励磁绕组通常不参与能量转换。补偿绕组是对电机运行性能产生影响的辅助磁场绕组。也可以把换向极绕组视为补偿绕组。补偿绕组也不参与能量转换。同步电机的阻尼绕组装在一个特殊位置上。主要用来阻止不希望的附加效应、逆序磁场和振荡。而在异步电机中，阻尼绕组和电枢绕组的作用相同。

考虑到几何结构和内部接线，把最主要的绕组分成相绕组、换向器绕组和凸极绕组。

将分布在槽中的单个线圈连接成单相或多相绕组组成了所谓的交流电枢绕组。但在隐极同步电机中也用它作励磁绕组。换向器绕组是把排列在槽中的单个线圈连接成一个或几个闭合回路，并与换向器相连接。换向器绕组作为电枢绕组的一部分，它不仅用在直流电机中，而且也用于交流换向器电机。凸极绕组通常制成集中励磁绕组。

1.1 电枢绕组的一般名称

在《旋转电机理论》(Th)第6章已介绍了绕组的最主要名称。对复杂绕组的处理，还需以新名称完善和补充一部分内容。为完整起见，下一节将重复说明已提及的名称。

1.1.1 绕组各部分的名称

绕组的基本单元是线圈。线圈由一些集中排列和串联连接的线匝组成。因为在一个线圈内没有结点，所以线圈中的所有线匝流有相同的电流。

电枢绕组的每个线圈嵌在电枢的两个槽中。在两个槽中嵌放的线圈，直线部分称线圈边，两个线圈边之间的连接部分称线圈端部、绕组端部或端部连接线。两个线圈边之间的距离（沿电枢表面测量）称线圈节距（图1.1）。

位于线圈平面上的对称轴将该线圈分成两个半线圈，或把每圈线匝分成两个半线匝或两根导体。假如线圈只由一匝构成，则可把半线匝称为导条。

若一个槽中有几个线圈边，常将线圈边叠放成两层，也有极少数叠放成两层以上。在各层中也可以并列放置几个线圈边。因为各线圈的端部本身就是交叉的（图1.1），所以必须把线圈端部弯转到几个彼此相邻的平面或层上去（见图1.3）。

借助于连接线把各线圈连接成绕组。所有属于单相系统或多相系统中同一相的线圈构成

一个相。每相绕组可以由串联线圈的几个并联连接的支路组成。在特殊情况下，也存在部分并联连接的〔第1册第Ⅲ章〕。

用线圈组来表示一相中所有直接并排布置的线圈。线圈组的所有线圈常常直接串联连接。每极每相的线圈边在电枢周边占据的部位称几何相带。

首先仅就单一绕组各部分进行命名。本节不作详细说明，将在下节阐明。

1.1.2 绕组名称

线圈节距、线圈匝数、层数、线圈端部平面数、线圈端部的形状和位置、端部连接线以及线圈的制造方式为整个电枢绕组的一般名称。此外，对于相绕组和换向器绕组还有专门的绕组名称，在阐述这种类型绕组时再介绍它的名称。

假如一套绕组的线圈节距 W 等于极距 τ_p ，则称其为全节距绕组或直径绕组，这是因为在一个两极电枢上的线圈端部成为一条直径（图 1.2 a）。短距绕组（或弦绕组），线圈节距小于（或大于）极距，而且在两极电枢上线圈端部成为一条弦（图 1.2 b）。

框形绕组由匝数为 w_{sp} （1 匝以上）的线圈组成。假如一套绕组的每个线圈都由 1 匝组成，就称为棒形绕组（见图 1.6）。根据层数可分为单层绕组和双层绕组（图 1.3）。多于两层的绕组是罕见的。

根据制造方法可分为成型框形绕组或镶嵌绕组、散嵌绕组、穿入式绕组或牵入式绕组和半成型框形绕组。

成型框形绕组是把已制成且完全绝缘的线圈嵌入电机的开口槽中（图 1.4 a）。散嵌绕组是把初步成型线圈的单根导线“散嵌”在绝缘好的半开口槽中构成的（图 1.4 b）。散嵌

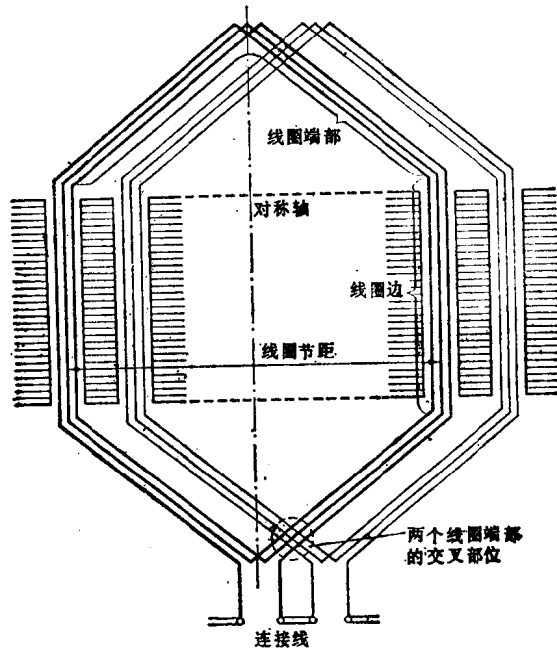


图1.1 绕组各部分名称

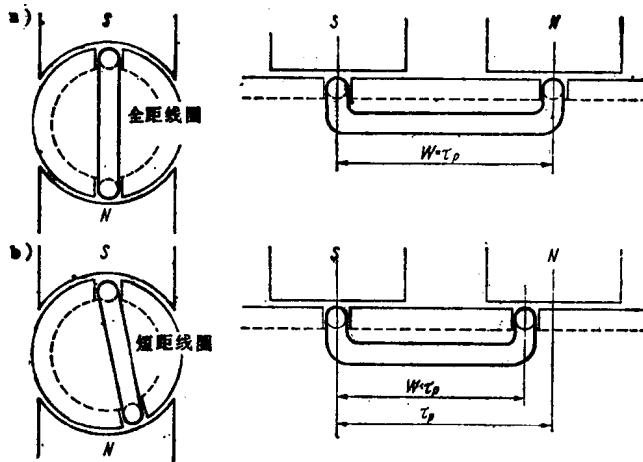


图1.2 根据线圈节距命名的电枢绕组
a) 全距绕组 ($W = \tau_p$) b) 短距绕组 ($W < \tau_p$)

毛
字
一

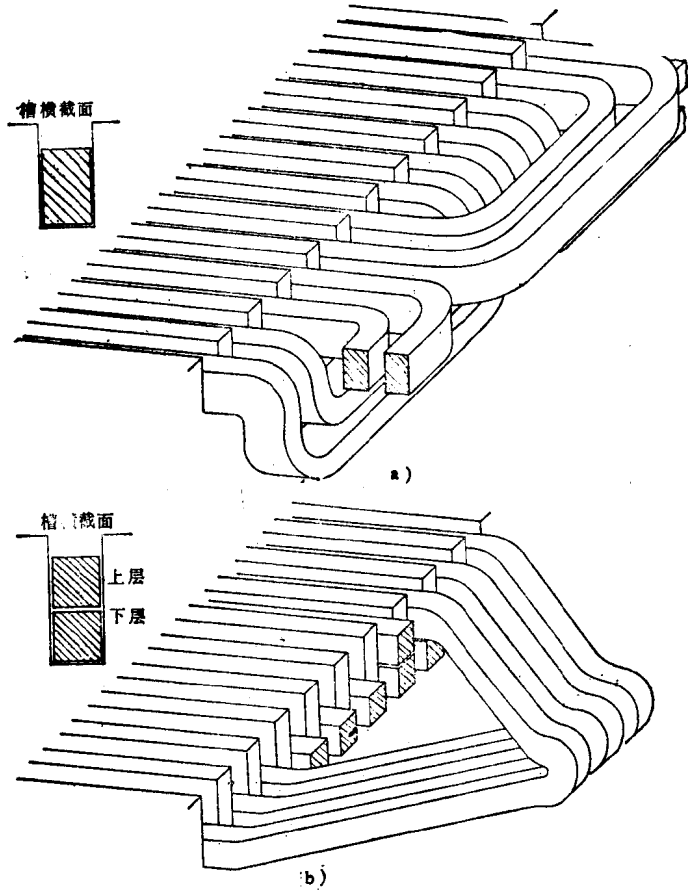


图1.3 根据层数命名的电枢绕组
 a) 单层绕组 b) 双层绕组

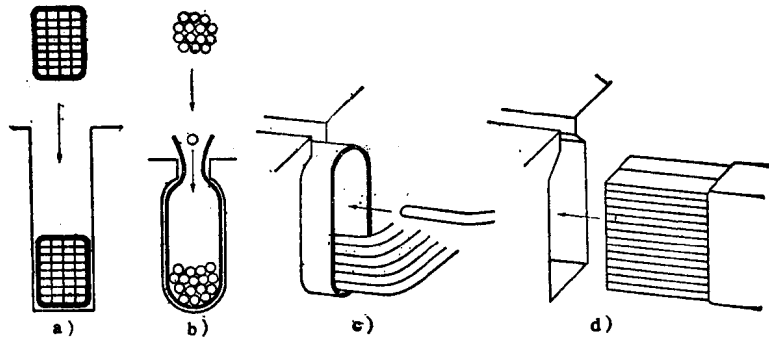


图1.4 根据制造方式命名的电枢绕组
 a) 成型圆形绕组或嵌嵌绕组 b) 散嵌绕组 c) 穿入或牵入绕组 d) 半成型圆形绕组

后，将线圈整形，并把槽绝缘包封在线圈边上。假如槽绝缘是用封闭的绝缘套筒构成，则必须“穿入”单根导线。这时就构成一个穿入式绕组或牵入式绕组（图 1.4 c）。这种绕组的制造很费时间，越来越被其它类型的绕组所取代。对于少见的半成型圆形绕组是把半成型的

线圈、半线圈或通常绝缘好的线棒插入多半是半开口槽中（图 1.4 d）。这时，仅在线圈的一端加工成型。线圈的另一端

（第二端）（它在半成形线圈中是分开的）插入后再成型和连接。棒形绕组线圈的第二端在插入后常常整形成渐开线形端部连接。按照线圈的成型形状或线圈端部划分，可分为矩形框形绕组（图 1.3 a、2.8 b、2.8 c 和 2.8 d）、梯形框形绕组（图 2.8 e）和具有渐开线端部的渐开线框形绕组（图 1.5）。矩形框形绕组和梯形框形绕组几乎只制成单层绕组。在梯形框形绕组中，线圈组（有时也是单个线圈）的形状相同。后者可构成一套具有等节距框形绕组。双层绕组通常由相应于图 1.3 b 的成型线圈制成。这种双层成型线圈有时也被用作大型电机的单层绕组。双层成型线圈的节距都相等。因为这种绕组的线圈端部构成篮形，所以也称为篮形绕组（见图 1.1、1.3 和 2.13）。

假如把一套篮形绕组或渐开线绕组的端部连接线连接成在相同的极对下的线圈串联连接，则将形成一个环形的绕线方向。把这种绕组称为叠绕组（图 1.6 a 和 b）。假如把相邻极对下的线圈串联起来，则形成一套波形绕组，故称为波绕组（图 1.6 c 和 d）。对于棒形绕组，因其形状特殊，很容易识别（图 1.6 c）。

根据矩形框形绕组端部构成的平面数，可分为两平面绕组或两层绕组和三平面绕组或三层绕组（图 1.7，图 1.3 a）。所有其它形状线圈的端部均位于两个平面内。假如一套篮形绕组的线圈端部排列成圆筒形（这种情况出现在极对数多的定子绕组和转子绕组中），则称为套筒形绕组或圆筒形绕组（图 1.8 a）。假如这种绕组排列成圆锥形，则称为圆锥形套筒绕组或渐开线绕组（图 1.8 b）。渐开线绕组的线圈端部也可以位于一个与端面平行的平面中，

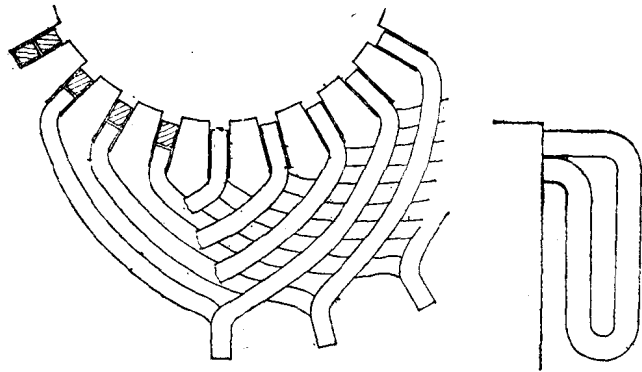


图 1.5 根据线圈端部形状命名的电枢绕组——渐开线绕组

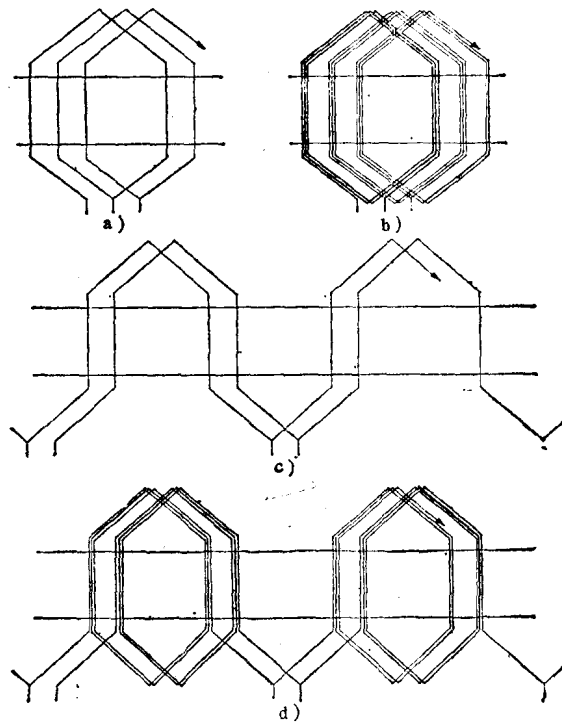


图 1.6 根据线圈匝数和端部连接线的布置命名的电枢绕组
a) 棒形叠绕组 b) 框形叠绕组 c) 棒形波绕组 d) 框形波绕组

根据矩形框形绕组端部构成的平面数，可分为两平面绕组或两层绕组和三平面绕组或三层绕组（图 1.7，图 1.3 a）。所有其它形状线圈的端部均位于两个平面内。假如一套篮形绕组的线圈端部排列成圆筒形（这种情况出现在极对数多的定子绕组和转子绕组中），则称为套筒形绕组或圆筒形绕组（图 1.8 a）。假如这种绕组排列成圆锥形，则称为圆锥形套筒绕组或渐开线绕组（图 1.8 b）。渐开线绕组的线圈端部也可以位于一个与端面平行的平面中，