

高等专科学校试用教材

电机学

冯欣南 编

机械工业出版社

GAOZHUANJIAOCAI

前 言

本书是高等专科学校电机专业的试用教材，是根据机械工业部教育局初步审定的电机专业招收高中毕业生，学制为三年的教学大纲组织编写的。

本书也适用于职工大学、业余大学。中等专业学校也可选用，并可供有关工程技术人员参考。

全书共分七篇，包括直流电机，变压器，交流绕组、电势和磁势，感应电机，同步电机，控制微电机和电机实验。为使全书的基本内容突出，书中着重论述四种典型电机的基本结构、电磁过程、理论分析方法、运行特性和参数。扼要地介绍了一些特殊运行状态、暂态过程以及各类控制电机的原理和特性，并适当地介绍一些新型电机和特殊电机。电机实验是为了配合《电机学》而编写的，电机实验中所论述的电机试验方法与工厂、科研单位所采用的方法基本上是一致的，但又具有教学上的要求和特点。为了便于学生复习和自学，每章末大部分附有小结、思考题和作业题；书末还附有作业题的参考答案，供核对之用。附录中，介绍有关公式的推导，供教学参考。

本书在编写的过程中，参考了1979年由冯欣南主编的中专《电机学》教材，在此基础上，加强基本理论和基本知识的阐述，并适当地加深加宽。

本书由冯欣南副教授编写，哈尔滨电工学院史乃副教授主审。

本书于1983年1月在上海召开了审稿会，参加审稿会议的有史乃，向跃庆，罗德升，余剑雄，徐余法，潘珊珊，胡幸鸣等同志。主审及与会同志，对本书提出了许多宝贵意见。在此，谨表示衷心感谢。

本书的缺点和错误在所难免，诚望使用本书的师生和广大读者批评指正。

编者

1983年7月

主要符号表

A ——线负载	F_k ——换向极绕组磁势
a ——并联支路数(交流)、支路对数(直流)	F_c ——线圈磁势
B ——磁通密度	F_{q1} —— q 个线圈所生的基波磁势
B_δ ——气隙磁密	F_{ϕ_1} ——单相绕组所生的基波磁势
B_f ——轭磁密	F_{ϕ_v} ——单相绕组所生的 v 次谐波磁势
B_t ——齿磁密	f ——频率、力、磁势瞬时值
B_v —— v 次谐波磁密	f_1 ——定子频率
B_{ad} ——直轴电枢磁场磁密	f_2 ——转子频率
B_{aq} ——交轴电枢磁场磁密	f_v —— v 次谐波频率
B_k ——换向极磁密	f_N ——额定频率
b ——宽度	I ——电流
b_p ——极靴宽度	I_N ——额定电流
ϕ_s, b_t ——槽宽、齿宽	I_0 ——空载电流
E ——电势	I_ϕ ——相电流
E_ϕ ——相电势	I_1 ——变压器一次侧(感应电机定子)电流
E_0 ——空载电势	I_2 ——变压器二次侧(感应电机转子)电流
E_a ——电枢电势	I_2' —— I_2 的折算值
E_1 ——变压器一次侧(感应电机定子)电势	I_a ——电枢电流
E_2 ——变压器二次侧(感应电机转子)电势	I_f ——励磁电流
E_2' —— E_2 的折算值	I_{f0} ——空载励磁电流
$E_{\sigma 1}$ ——变压器一次侧(感应电机定子)漏磁电势	I_{fN} ——额定励磁电流
$E_{\sigma 2}$ ——变压器二次侧(感应电机转子)漏磁电势	I_h ——堵转电流(电动机)或短路电流(发电机或变压器)
E_{ad} ——直轴电枢反应电势	I_m ——电流最大值
E_{aq} ——交轴电枢反应电势	I_{re} ——空载电流的有功分量(铁耗电流)
e_x ——电抗电势	I_μ ——空载电流的无功分量(激磁电流)
e_k ——换向电势	I_{st} ——起动电流
F, F ——磁势(值)、磁势(空间相量)	I_K, I_{K0} ——控制电流
F_f ——励磁磁势	I_+ ——电流的正序分量
F_{f0} ——空载励磁磁势	I_- ——电流的负序分量
F_{fN} ——额定励磁磁势	K ——变压器变比、系数
F_1 ——变压器一次侧(感应电机定子)磁势	K_s ——饱和系数
F_2 ——变压器二次侧(感应电机转子)磁势	K_e ——感应电机定、转子的电势变比
F_a ——电枢反应磁势	K_t ——感应电机定、转子的电流变比
F_{ad} ——直轴电枢磁势	K_q ——绕组的分布系数(基波)
F_{aq} ——交轴电枢磁势	K_y ——绕组的短距系数(基波)
F_δ ——气隙磁势	K_w ——绕组系数(基波)
	K_{wv} —— v 次谐波绕组系数

K_w ——波形系数	r'_2 —— r_2 的折算值
K_c ——短路比	r_f ——励磁绕组电阻
$L_{\sigma 1}$ ——变压器一次侧(感应电机定子)的漏感	r_s ——串励绕组电阻
$L_{\sigma 2}$ ——变压器二次侧(感应电机转子)的漏感	r_k ——换向极绕组电阻、短路电阻
T ——转矩、电磁转矩、时间常数、周期	R_a, r_a ——电枢回路电阻、电枢绕组电阻
T_o ——机械转矩	r_m ——激磁电阻(铁耗电阻)(交流)
T_1 ——输入转矩	s ——转差率
T_2 ——输出转矩	s_N ——额定转差率
T_{st} ——起动转矩	s_m ——临界转差率
T_0 ——空载转矩	S ——面积
T_N ——额定转矩	t ——时间、齿距
T_{max} ——最大转矩	U ——电压有效值、电源电压
T_L ——负载转矩	U_N ——额定电压
T_k ——短路转矩、堵转转矩、换向周期	$U_1, U_{\phi 1}$ ——一次(定子)电压、一次(定子)相电压
m ——相数	U_2 ——二次(转子)电压
N ——导体数	U_k ——短路电压
N_s ——每槽导体数	U_K, U_{K0} ——控制电压
n ——转速	U_{K+} ——控制电压的正序分量
n_s ——同步转速	U_{K-} ——控制电压的负序分量
n_N ——额定转速	U_F ——激磁或励磁绕组电压
n_0 ——理想空载转速	w ——绕组匝数
n_v —— v 次谐波转速	w_f ——励磁绕组匝数
P ——功率	w_s ——串励绕组匝数
P_N ——额定功率	w_a ——电枢绕组每元件匝数
P_{em} ——电磁功率	w_1 ——变压器一次绕组(定子)匝数
P_o ——机械功率	w_2 ——变压器二次绕组(转子)匝数
P_1 ——输入功率	x ——电抗
P_2 ——输出功率	x_a ——电枢反应电抗
p_0 ——空载损耗	x_σ ——漏抗
p_k ——短路损耗	$x_{\sigma 1}$ ——变压器一次绕组(定子)漏抗
p ——极对数、损耗	$x_{\sigma 2}$ ——变压器二次绕组(转子)漏抗
p_o ——机械损耗	x_{ad} ——直轴电枢反应电抗
p_A ——杂 耗	x_{aq} ——交轴电枢反应电抗
p_{cu} ——铜损耗	x_d ——直轴同步电抗
p_{Fe} ——铁损耗	x_q ——交轴同步电抗
Q ——无功功率	x_m ——激磁电抗
q ——每极每相槽数	x_k ——短路电抗
R_p, r_p ——调节电阻	x'_d, x'_q ——直轴、交轴暂态电抗
r_1 ——变压器一次绕组(感应电机定子)电阻	x''_d, x''_q ——直轴、交轴次暂态电抗
r_2 ——变压器二次绕组(感应电机转子)电阻	x_0 ——零序电抗
	x_+ ——正序电抗
	x_- ——负序电抗

x_p ——波梯电抗	$\eta_{\max}$ ——最大效率
x_t ——同步电抗	Λ_σ ——漏磁导
y ——线圈节距、合成节距	μ ——磁导率
y_1 ——第一节距	τ ——极距、温升
y_2 ——第二节距	θ ——温升、角度
y_k ——换向器节距	ϕ ——磁通的瞬时值
y_p ——均压线节距	Φ ——磁通量、每极磁通
Z ——槽数、复数阻抗	Φ_m ——磁通最大值 (匝链)
$ Z $ ——阻抗模	Φ_σ ——漏磁通
$Z_{\sigma 1}$ ——变压器一次绕组 (定子) 漏阻抗 (复数)	Φ_v —— v 次谐波磁通
$Z_{\sigma 2}$ ——变压器二次绕组 (转子) 漏阻抗 (复数)	Φ_0 ——空载磁通
$Z'_{\sigma 2}$ —— $Z_{\sigma 2}$ 的折算值	Φ_{ad} ——直轴电枢反应磁通
Z_+ ——正序阻抗 (复数)	Φ_{aq} ——交轴电枢反应磁通
Z_- ——负序阻抗 (复数)	ψ ——磁链、内功率因数角
Z_0 ——零序阻抗	φ ——功率因数角、相角
Z_1 ——定子槽数	φ_0 ——空载功率因数角
Z_2 ——转子槽数	φ_k ——短路功率因数角
Z_m ——激磁阻抗 (复数)	ψ_0 —— E_0 和 i 间的夹角
Z_k ——短路阻抗 (复数)	ψ_2 ——转子内功率因数角
α ——角度、槽距电角、信号系数、散热系数	Ω ——机械角速度
η, η_N ——效率、额定效率	Ω_s ——同步角速度
	λ ——等效比漏磁导 (等效单位漏磁导)
	J ——电流密度

目 录

主要符号表

绪论	1
----------	---

第一篇 直流电机

第一章 直流电机的基本原理和结构

§ 1-1 直流电机的基本原理	4
§ 1-2 直流电机的基本结构	7
§ 1-3 直流电机的铭牌数据及主要系列	9
§ 1-4 直流电机的励磁方式	10

第二章 直流电机的电枢绕组

§ 2-1 电枢绕组的特点和节距	12
§ 2-2 单迭绕组	14
§ 2-3 单波绕组	17
§ 2-4 复迭绕组	19
§ 2-5 复波绕组	20
§ 2-6 直流电枢绕组的对称条件	21
§ 2-7 均压线	21
§ 2-8 电枢绕组的感应电势	23
§ 2-9 蛙形绕组	24
§ 2-10 小结	26

第三章 直流电机的磁路和电枢反应

§ 3-1 直流电机空载时的磁路和磁势	28
§ 3-2 直流电机负载时电枢的磁势和 磁场	31
§ 3-3 直流电机的电枢反应	33
§ 3-4 小结	35

第四章 直流发电机

§ 4-1 直流电机的电磁转矩	37
§ 4-2 直流电机的基本方程式	38
§ 4-3 并励发电机的自励过程	41
§ 4-4 他励发电机的特性	43
§ 4-5 直流发电机的效率特性	45
§ 4-6 并励发电机的特性	46
§ 4-7 复励发电机的特性	47
§ 4-8 小结	50

第五章 直流电动机

§ 5-1 电机的可逆原理	53
§ 5-2 电动机运行的基本方程式	54

§ 5-3 直流电动机的起动	54
----------------------	----

§ 5-4 直流电动机的工作特性	57
------------------------	----

§ 5-5 直流电动机的机械特性	62
------------------------	----

§ 5-6 电力拖动机组稳定运行的条件	64
---------------------------	----

§ 5-7 直流电动机的调速	65
----------------------	----

§ 5-8 直流电动机的制动	70
----------------------	----

§ 5-9 各种直流电动机的应用范围	73
--------------------------	----

§ 5-10 小结	74
-----------------	----

第六章 直流电机的换向

§ 6-1 换向的电磁理论	78
---------------------	----

§ 6-2 火花及其产生的原因	83
-----------------------	----

§ 6-3 改善换向的方法	84
---------------------	----

§ 6-4 无火花区和换向极的 试验调整(*)	88
----------------------------------	----

§ 6-5 小结	89
----------------	----

第七章 其他直流电机

§ 7-1 无刷直流电动机	91
---------------------	----

§ 7-2 晶闸管整流供电的直流电动机 的特点(*)	94
-------------------------------------	----

§ 7-3 磁流体发电机(*)	95
-----------------------	----

第八章 旋转电机的发热和冷却

§ 8-1 电机中常用绝缘材料的等级和 电机各部分的温升限度	96
---	----

§ 8-2 电机的发热和冷却过程	98
------------------------	----

§ 8-3 电机的定额	101
-------------------	-----

§ 8-4 电机的通风冷却方式	102
-----------------------	-----

§ 8-5 小 结	104
-----------------	-----

第二篇 变压器

第九章 变压器的分类和基本结构

§ 9-1 变压器的分类	105
--------------------	-----

§ 9-2 电力变压器的基本结构	106
------------------------	-----

§ 9-3 变压器的发热和冷却	111
-----------------------	-----

§ 9-4 变压器的额定值	113
---------------------	-----

第十章 单相变压器的运行原理

§ 10-1 变压器的空载运行	114
-----------------------	-----

§ 10-2 变压器的负载运行	120
-----------------------	-----

§ 10-3 变压器的折算	121
---------------------	-----

§ 10-4 变压器的等效电路和相量图	122	§ 16-2 三相绕组的旋转磁势	208
§ 10-5 变压器参数的测定	124	§ 16-3 椭圆形旋转磁势	213
§ 10-6 标么值 (相对值)	128	§ 16-4 小结	216
§ 10-7 变压器的运行特性	130	第四篇 感应电机	218
§ 10-8 小结	134	第十七章 感应电机的基本结构和运行状态	218
第十一章 三相变压器	137	§ 17-1 感应电机的三种运行状态	218
§ 11-1 三相变压器的磁路系统	137	§ 17-2 感应电机的分类和基本结构	220
§ 11-2 三相变压器的连接组	138	§ 17-3 感应电动机的额定值	222
§ 11-3 三相变压器的空载电势波形	142	§ 17-4 小结	222
§ 11-4 变压器的并联运行	145	第十八章 三相感应电动机的运行分析	223
第十二章 变压器的瞬变过程	149	§ 18-1 转子绕组开路时的情况	223
§ 12-1 过电流现象	149	§ 18-2 转子堵住不转时的感应电机	226
§ 12-2 过电压现象	152	§ 18-3 转子旋转时的感应电机	230
第十三章 三绕组变压器及其它用途的变压器	155	§ 18-4 感应电动机的功率和转矩平衡关系	235
§ 13-1 三绕组变压器	155	§ 18-5 笼型转子参数的计算	237
§ 13-2 自耦变压器	157	§ 18-6 小结	239
§ 13-3 仪用互感器	159	第十九章 感应电动机的运行特性	241
§ 13-4 电焊变压器 (*)	160	§ 19-1 感应电动机的电磁转矩和机械特性	241
§ 13-5 整流变压器	161	§ 19-2 感应电动机的工作特性	246
§ 13-6 脉冲变压器 (*)	163	§ 19-3 用直接负载法求取工作特性	247
§ 13-7 直流互感器 (*)	166	§ 19-4 感应电动机的圆图	248
第三篇 交流绕组及其电势和磁势	168	§ 19-5 空载试验和短路试验	250
第十四章 交流绕组的感应电势	169	§ 19-6 由圆图求取感应电动机的工作特性	252
§ 14-1 导体中的感应电势	169	§ 19-7 小结	255
§ 14-2 槽电势星形图	170	第二十章 三相感应电动机的起动、调速和制动	258
§ 14-3 线圈电势	171	§ 20-1 笼型感应电动机的起动	258
§ 14-4 分布绕组的电势	172	§ 20-2 绕线型感应电动机的起动	260
§ 14-5 在非正弦分布磁场下电势中的高次谐波及其削弱方法	175	§ 20-3 深槽型及双笼型电动机	263
§ 14-6 齿谐波电势及其削弱方法	179	§ 20-4 谐波转矩对起动的影 响	264
§ 14-7 小结	181	§ 20-5 感应电动机的变极调速	266
第十五章 交流绕组	183	§ 20-6 感应电动机的变频调速	269
§ 15-1 交流绕组的构成原则和分类	183	§ 20-7 绕线型电动机改变转子电路电阻的调速	270
§ 15-2 三相单层绕组	184	§ 20-8 感应电机的制动	271
§ 15-3 三相双层绕组	189	§ 20-9 小结	273
§ 15-4 分数槽绕组	195	第二十一章 感应电动机在非正常情	
§ 15-5 正弦绕组的安排方法	198		
§ 15-6 小结	200		
第十六章 交流绕组的磁势	201		
§ 16-1 单相绕组的脉振磁势	201		

况下运行及单相感应电动机	275	§ 26-3 零功率因数负载特性	318
§ 21-1 感应电动机在非额定电压下的运行	275	§ 26-4 同步发电机的运行特性	321
§ 21-2 感应电动机在非额定频率下的运行	275	§ 26-5 发电机的电压变化率和额定励磁电流的确定	322
§ 21-3 三相感应电动机在不对称电压下的运行	276	§ 26-6 同步发电机的损耗和效率	324
§ 21-4 单相感应电动机	278	§ 26-7 小结	325
§ 21-5 小结	282	第二十七章 同步发电机的并联运行	327
第二十二章 感应发电机及特殊感应电动机	283	§ 27-1 同步发电机的并联合闸	327
§ 22-1 感应调压器	283	§ 27-2 同步电机的电磁功率	330
§ 22-2 感应发电机	284	§ 27-3 与无穷大电网并联时同步发电机有功功率的调节	332
§ 22-3 直线感应电动机	286	§ 27-4 与无穷大电网并联时同步发电机无功功率的调节	334
§ 22-4 电磁调速感应电动机(*)	287	§ 27-5 相近容量的电机并联运行时的功率调节	337
§ 22-5 小结	288	§ 27-6 小结	340
第二十三章 交流换向器电动机	290	第二十八章 同步电动机和补偿机	342
§ 23-1 单相串激换向器电动机	290	§ 28-1 同步电机的可逆原理	342
§ 23-2 三相并激换向器电动机	291	§ 28-2 同步电动机的相量图	343
§ 23-3 小结	295	§ 28-3 同步电动机的电磁功率和转矩	344
第五篇 同步电机	296	§ 28-4 同步电动机的V形曲线	344
第二十四章 同步电机的类型和基本结构	296	§ 28-5 同步补偿机	346
§ 24-1 同步电机的基本类型	296	§ 28-6 同步电动机的起动	348
§ 24-2 隐极同步发电机的基本结构	297	§ 28-7 磁阻同步电机	348
§ 24-3 凸极同步发电机的基本结构	299	§ 28-8 小结	352
§ 24-4 同步电机的冷却问题简述	301	第二十九章 同步发电机的突然短路	354
§ 24-5 额定值	302	§ 29-1 三相突然对称短路	354
第二十五章 同步电机的运行原理	303	§ 29-2 暂态电抗和次暂态电抗	354
§ 25-1 同步发电机的空载运行	303	§ 29-3 三相突然短路电流(*)	356
§ 25-2 同步电机的电枢反应	304	§ 29-4 小结	359
§ 25-3 凸极发电机的电势方程式和相量图	308	第三十章 同步电机的励磁方式	360
§ 25-4 隐极发电机的电势方程式和相量图	309	§ 30-1 直流励磁机励磁	360
§ 25-5 直轴和交轴同步电抗的意义	310	§ 30-2 交流整流励磁系统	361
§ 25-6 磁势——电势相量图	311	§ 30-3 三次谐波励磁方式	363
§ 25-7 小结	313	§ 30-4 各种励磁方式的比较	364
第二十六章 同步发电机的运行特性	315	第六篇 控制电机	365
§ 26-1 空载特性	315	第三十一章 交磁电机放大机	367
§ 26-2 短路特性	315	§ 31-1 概述	367
		§ 31-2 交磁放大机的工作原理和结构特点	367
		§ 31-3 交磁放大机的放大系数、时间常数和品质系数	369

§ 31-4	去磁效应对放大机性能的影响	370
§ 31-5	交磁放大机的特性	371
§ 31-6	小结	372
第三十二章	直流控制电机	373
§ 32-1	直流伺服电动机概述	373
§ 32-2	枢控式直流伺服电动机	374
§ 32-3	磁极控制的直流伺服电动机	375
§ 32-4	直流测速发电机	375
§ 32-5	小结	377
第三十三章	自整角机	378
§ 33-1	概述	378
§ 33-2	力矩式自整角机	379
§ 33-3	差动式自整角机	384
§ 33-4	控制式自整角变压器	385
§ 33-5	小结	387
第三十四章	旋转变压器	388
§ 34-1	概述	388
§ 34-2	正、余弦旋转变压器	389
§ 34-3	有补偿的正、余弦旋转变压器	392
§ 34-4	线性旋转变压器	393
§ 34-5	旋转变压器的主要技术指标	394
§ 34-6	旋转变压器的应用举例	394
§ 34-7	感应同步器	395
§ 34-8	小结	396
第三十五章	交流伺服电动机	397
§ 35-1	两相伺服电动机的控制方式	397
§ 35-2	两相伺服电动机的运行和结构特点	398
§ 35-3	两相伺服电动机的机械特性	399
§ 35-4	两相伺服电动机的调节特性	402
§ 35-5	绕组参数和工艺缺陷对电机性能的影响	403
§ 35-6	小结	403
第三十六章	交流测速发电机	405
§ 36-1	空心杯转子感应测速发电机的 工作原理	405
§ 36-2	测速发电机的主要误差	407
§ 36-3	测速发电机的应用举例	409
§ 36-4	小结	410
第三十七章	自控装置中的同步电动机	411

§ 37-1	步进电动机	411
§ 37-2	磁滞同步电动机(*)	418
§ 37-3	小结	419
第七篇	电机实验	421
第三十八章	电机实验的一般问题	421
§ 38-1	电机实验的性质和目的	421
§ 38-2	电机实验的基本要求	421
§ 38-3	基本测量方法	422
第三十九章	直流电机实验	433
§ 39-1	直流电机的认识实验	433
§ 39-2	直流发电机实验	435
§ 39-3	并励电动机实验	439
§ 39-4	串励电动机实验	442
第四十章	变压器实验	445
§ 40-1	单相变压器的空载和短路实验	445
§ 40-2	变压器连接组别(极性)实验	449
第四十一章	三相感应电动机实验	454
§ 41-1	三相感应电动机的起动与调速	454
§ 41-2	三相感应电动机的空载和短路 实验	456
§ 41-3	三相感应电动机温升、负载试 验	460
第四十二章	同步电机实验	467
§ 42-1	三相同步发电机实验	467
§ 42-2	三相同步发电机参数的测定	470
§ 42-3	三相同步电动机实验	472
附录		475
附录 I	激磁支路移前的等效电路公式 推导	475
附录 II	较精确圆图负载支路电流 I_2' 公 式的推导	475
附录 III	同步电机电枢磁势的折算	477
附录 IV	幅值控制时两相伺服电动机的 理论分析	480
附录 V	同步发电机的不对称运行	484
附录 VI	同步电机的振荡	494
习题答案		503
参考书目		507

〔注〕 章、节标题后有(*)者为选读部分。

绪 论

一、电机在国民经济中的作用和意义

电能是现代最常用的一种能源。它用在生产、管理、传输、分配、使用控制以及能量转换等方面均较方便。

电机是与电能有关的能量转换机械。它是工业、农业、交通运输事业中的重要动力设备。

在电力工业中，电机是发电厂的主要动力设备。如将水力、热力、风力、太阳能、核能等转换为电能，都要使用发电机。为了经济地传输和分配电能，尚需用变压器把一种电压的交流电能转换为另一种电压的交流电能。

在机械工业、冶金工业、化学工业以及其它各种工业企业中，都用电动机作为原动机。

在农业中，随着农业机械化的进展，在排灌、脱粒、碾米、铡草等农业机械中，亦广泛采用电动机。

在军事和各种自动控制系统中，如雷达、航空、无线电、计算技术和航天技术等，需要大量的控制电机作为自动化系统的元件。如电机放大机能够以小的功率控制大的功率；执行电动机可将电气信号转变为机械动作；测速发电机将机械旋转变为电气信号以测量或调节转速；旋转变压器的输出电压转子偏转角的某种已知函数，或用来求解三角问题；自整角机则可使两个或数个机械上不相联系的轴同时发生偏转以传送信号等等。

在医疗、文教以及日常生活中，电机的应用也日趋广泛。

为了适应实现四个现代化的新形势，工业、农业、国防都将提出新的要求，不仅要求电机能适应各种不同的工作条件，而且要在品种、质量和性能等方面满足特定的要求。因之，电机工业与国民经济各部门之间的关系是十分密切的，是国民经济各部门中不可缺少的一个重要环节。

二、我国电机制造业发展情况

解放前，我国的电机制造业极为落后。当时的电机制造厂主要做些装配和修理工作，生产的发电机的单机容量不超过 200kW，电动机不超过 180 马力，变压器不超过 2000kVA，汽轮和水轮发电机组从未生产过。

解放后，我国电机制造业得到了很快的发展。仅在十年内，已能制造 50000kW 的汽轮发电机，72500kW 的水轮发电机，120000kVA 的变压器和 2000kW 的感应电动机等。整个电机制造业的技术水平有了显著提高，掌握了产品的设计方法和制造工艺，电机自给率达到 75%。

随着国民经济的进一步发展，电机制造业已进入自行试验研究和自行设计的阶段，建立了系列产品。1961 年以后，J₂、JO₂ 系列正式投产。1982 年 Y 新系列正式定型生产，新系列和旧系列相比，效率提高、体积缩小、重量减轻、起动转矩增大、噪声和振动降低。在中小型感应电机、直流电机和微电机方面各有十几个至几十个系列。在大型电机方面，我国已制成容量为 300MW 双水内冷汽轮发电机。目前正在引进国外技术并着手试制 600MW 的定子水冷转子氢冷汽轮发电机的考核样机。在变压器方面，目前正在自行设计和制造了电压为

500kV、容量可达 550000kVA 及以上的各种类型变压器。在直流电机方面，目前已能生产可控硅整流供电直流电动机。

三、电机的主要类型

电机是一种动力机械，其主要任务是进行能量转换。按照能量的转换方式，电机可分为

- (一) 将机械能转换为电能——发电机；
- (二) 将电能转换为机械能——电动机；
- (三) 将电能变为电能——用来变化电流（交流变直流）的换流机；用来变化频率的变频机；用来变化电压的变压器。
- (四) 不以功率传递为主要职能，而在电工机械系统中起调节、放大和控制的作用——电机放大机和各种微型控制电机。

按照速度分类，电机可分为

- (一) 没有固定的同步速度——直流电机；
- (二) 静止电器——变压器；
- (三) 作为电动机运行时，速度恒小于同步速度 $n_s \left(n_s = \frac{60f}{p} \right)$ ，作为发电机运行时，速度恒大于同步速度——感应电机；
- (四) 速度等于同步速度——同步电机；
- (五) 速度可以在宽广范围内随意调节——交流换向器电机。

微电机除控制微电机外，尚有驱动微电机。微电机是近期国内外发展较快的一个分支，在近20年已远远跨出军用范围而进入民用，且步入家庭。就其发展速度及产量来说，甚至超过大中型电机。

各类电机的工作原理均建立在下列几个基本定律的基础上，即

- (1) 回路定律(全电流定律)；
- (2) 电磁感应定律(法拉第定律)；
- (3) 电路定律；
- (4) 电磁力定律（毕-萨定律）；
- (5) 能量守恒定律。

熟练地掌握上述的基本电磁定律，是深入研究电机基本理论的基础。

四、本课程的任务和研究方法

电机学是电工专业的技术基础课。它与电工基础课的性质不同，在电工基础课中所研究的问题总是理想化的和单纯的，在电机学中要求运用理论来解决实际问题；而在实际问题中，情况往往是复杂的又是综合的。因此在分析时，又需将问题简化，找出主要矛盾，运用理论加以解决。这样所得的结果有一定的近似性，并能够正确反映客观规律。在学习这门功课时，要从实际出发，不仅要了解公式中数量上的关系，更重要的是从公式中看到它们所表达的物理概念。由于事物是相互联系的，所以在学习时应注意把各种电机联系起来，这样才能对各种电机有深入的了解。

(一) 分析和研究电机原理的方法和步骤

- (1) 分析电机在空载和负载运行时电机内部的物理情况(即磁势和磁场)；
- (2) 列出电机的电势、磁势、功率和转矩方程式；

(3) 求解方程, 即确定电机的运行特性并加以分析。对发电机来说, 特性中以外特性为最重要, 对电动机, 以机械特性为最重要; 其次, 是电机的效率、功率因数、温升和过载能力等性能指标。

(二) 分析和研究电机内部的磁场与基本方程式

(1) 不计饱和时, 常用迭加原理来分析电机的各个磁场及相应的电势。考虑饱和时, 常把主磁通和漏磁通分开处理, 前者用磁化曲线来确定, 后者用其效果作为漏抗压降来处理;

(2) 用等效电路来表示电机时, 需用折算法;

(3) 在分析交流电机的稳态运行时, 常利用等效电路和相量图;

(4) 分析不对称运行时, 常用双旋转磁场理论和对称分量法;

(5) 研究凸极电机(直流电机、凸极同步电机)问题时, 常用双反应理论。

研究电机的又一重要方法是科学实验, 其实验方法基本上分两种: 一种是直接法, 另一种是间接法。直接法是将电机带上负载, 在接近实际情况下进行实验, 并测得数据与理论计算的结果相比较, 以判定理论计算是否正确; 间接法是利用空载、短路试验, 测得电机的参数, 然后间接算出电机的性能。

本课程的任务主要是为培养学员的专业知识和解决实际问题的能力打下理论基础, 及电机实验的操作技术。

第一篇 直流电机

直流电机是电能和机械能相互转换的旋转电机之一。它可以将机械能转换为直流电能，称为直流发电机；也可以将直流电能转换为机械能，称为直流电动机。直流电动机具有良好的起动性能，且能在宽广的范围内平滑而经济地调节速度。因此直流电动机在起动和调速要求较高的机械上广泛地使用。例如用来拖动轧钢机、电气机车、内燃机车、船舶机械、矿井卷扬机和要求广泛调速的切削机床等。直流发电机可作为各种直流电源。例如直流电动机的直流电源、同步电机的励磁机以及化学工业方面用作电解电镀的低压大电流的直流电源等。与交流电机比较，直流电机的结构复杂，消耗较多的有色金属，运行中维修比较麻烦，致使直流电机的应用受到一定的限制。随着电子技术的迅速发展，采用晶闸管供电作为直流电源，在生产上的应用越来越广泛，大有取代直流发电机的趋势。但直流电动机由于其性能优越，因此在许多场合下仍占很重要的地位。

第一章 直流电机的基本原理和结构

本章将说明直流电机的基本原理、主要结构、部件和直流电机的主要类型。

§ 1-1 直流电机的基本原理

图 1-1 表示一台两极交流发电机的工作原理图。电机的磁场是由在空间上静止的磁极 N、S 所建立，并能产生恒定的磁通量；磁极之间的空间内装置一个能转动的电枢，在它的上面绕有元件 $abcd$ 。元件的两端与固定于转轴上的两个集电环相连接，集电环与静止的电刷 AB

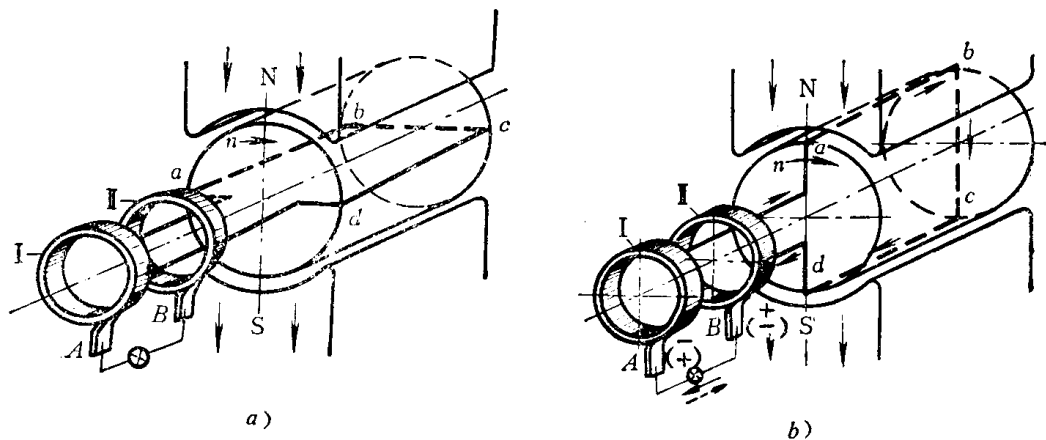


图1-1 交流发电机工作原理图

a) 电刷 A 、 B 之间电势为零 b) 电刷 A 、 B 之间电势最大

滑动接触，通过电刷与外电路的负载接通。

如图 1-2 所示，磁极下气隙中的磁密 B_x 是按正弦分布的。当电枢被原动机拖动以顺时针方向旋转时，根据电磁感应定律，则线圈边在任一 x 处所感应的电势为

$$e = B_x l v \quad (1-1)$$

式中 e ——线圈边电势；

B_x ——气隙中 x 处的磁密；

l ——元件边的有效长度；

v ——元件边的切向线速度。

在图 1-1 a 所示位置，元件边 ab 和 cd 处在两个磁极之间的中心线上，该处磁密为零，其感应电势为零，因此电刷 A 、 B 之间的电势为零。当电枢顺时针方向转过 90° 时（如图 1-1 b 所示），元件边 ab 中电势的方向是由 a 到 b ，而 cd 中电势的方向则由 c 到 d 。这样，外电路的电流从集电环 II 经电刷 B 流出，而后再经电刷 A 流入集电环 I。从图可见：电刷 A 的极性为“-”，电刷 B 的极性为“+”。

当电枢旋转 180° 后， ab 与 cd 在磁极下的位置互相对换，元件边中的电势改变了方向，因此电刷 A 的极性变为“+”，电刷 B 的极性变为“-”。这种发出交流电的发电机称为交流发电机。由于气隙磁密 B 是按正弦分布的，故电枢旋转一周时，电刷 A 、 B 之间的电势大小随时间作正弦变化，如图 1-3 所示。

一、直流发电机原理

图 1-4 表示直流发电机模型，它与交流发电机模型不同的地方，只是将两个集电环改为一个特殊的滑动接触装置，称为换向器（或称整流子）。元件 ab 和 cd 的两线端分别接在互相绝缘的两个铜换向片 I 和 II 上，并将电刷 A 、 B 移至磁极位置而与换向器保持滑动接触。

当电枢表面以速度 v 顺时针方向旋转时，在图 1-4 a 所示瞬间，电刷 A 是通过换向片 I 与 N 极下的元件边 ab 相连，电刷 B 通过换向片 II 与 S 极下的元件边 cd 相连，根据右手定则，元件中的电势方向是由 a 到 d ，故电刷 A 的极性为“-”，电刷 B 的极性为“+”，负载上的电流方向是由 B 流向 A 。当电枢转过 180° 时，元件的两个有效边的位置互相调换，如图 1-4 b 所示，此时电刷 A 通过换向片 II 与 N 极下的元件边 cd 相连，电刷 B 通过换向片 I 与 S 极下的元件边 ab 相连，此时元件中的电势方向相反了（从 d 到 a ），但电刷的极性还是不变。由此可见，通过换向器的作用，使电刷 A 始终与 N 极下的元件边相连，电刷 B 始终与 S 极下的元件边相连，所以当电枢在磁场中继续旋转时，元件中的电势虽与在交流发电机中一样，每转过一对磁极（N 和 S），电势方向改变一次，但在电刷 A 和 B 之间的电势却是一个方向不变

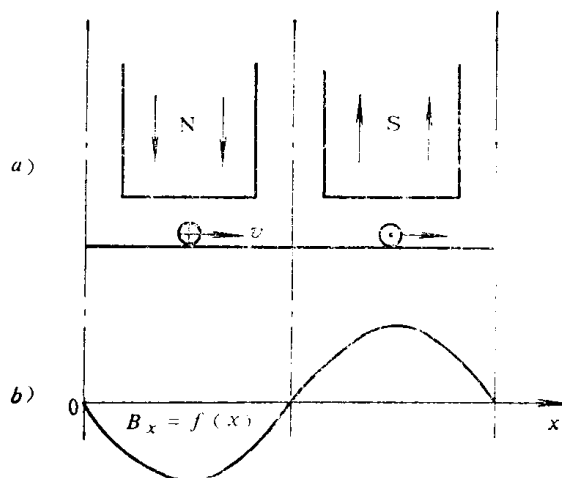


图 1-2 图 1-16 的展开图

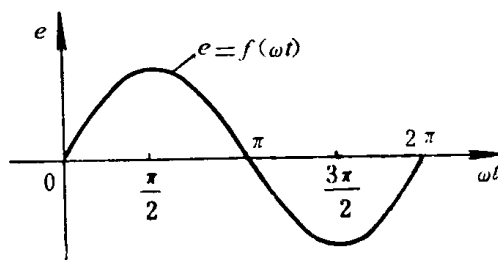


图 1-3 正弦交流电势波形图

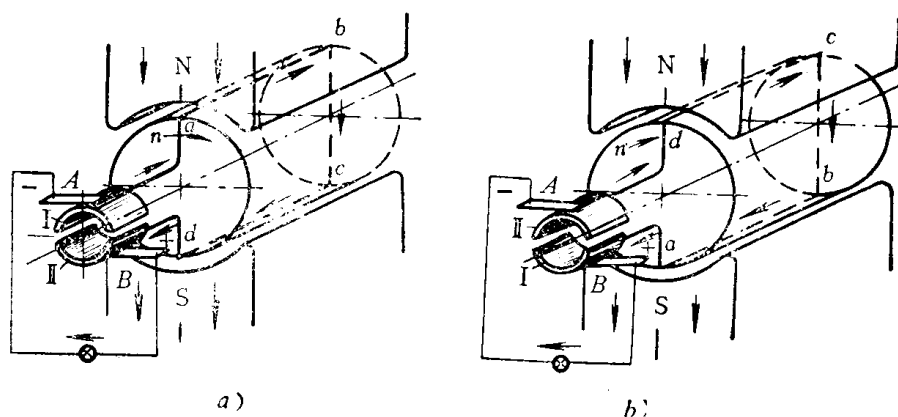


图1-4 直流发电机工作原理图

的脉振电势，如图 1-5 实线所示，这就是直流发电机原理。

从图 1-5 可以看出，电刷 A 、 B 之间的电势在零和最大值之间脉动，这种电势称为脉振电势，因为电势波动太大，不能用做直流电源。如果将电枢铁心上的元件数和相应的换向片增多，就可以减少电势的脉振程度。所以实际应用的直流电机中，采用了较多的元件数，电势脉振已很小，可以认为是恒定电势了。

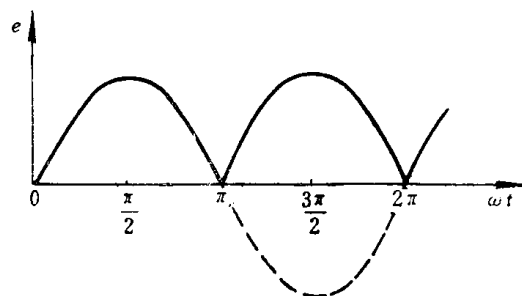


图1-5 直流电势波形图

二、直流电动机原理

如图 1-6 a 所示，电机的电刷 A 、 B 上外加直流电压，这时元件中的电流就由 d 流向 a ，于是载流导体在磁场中就会受到电磁力的作用，其大小为

$$f = B_x li \quad (1-2)$$

式中 i —— 流过元件中的电流；

f —— 载流导体所受的电磁力。

电磁力的方向，可用左手定则确定，从图可知电枢上受到顺时针方向的力矩，称为电磁转矩。当电枢转过 180° 时，如图 1-6 b 所示，这时元件中的电流从 a 流向 d ，元件边中的电流改变了方向，但电磁转矩的方向仍旧不变，保持电枢始终向一个方向旋转。这就是直流电动机原理。

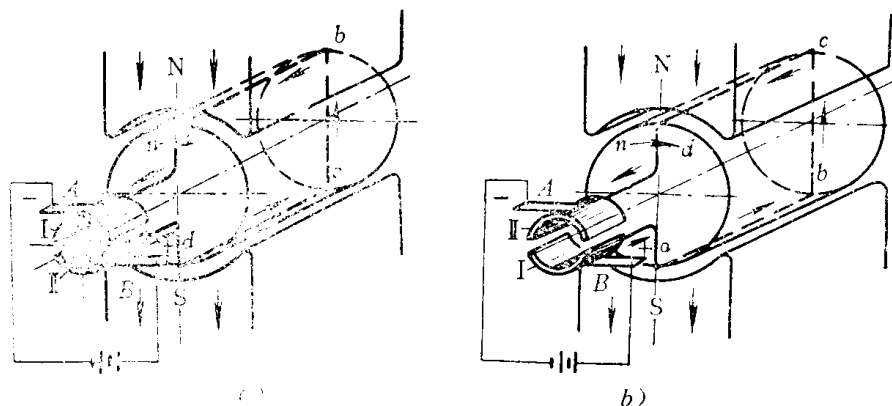


图1-6 直流电动机工作原理

§ 1-2 直流电机的基本结构

从上述直流电机的基本原理可知，直流电机由两个主要部分组成：（1）静止部分（称为定子），主要用来产生磁通；（2）转动部分（称为转子，通称电枢）是机械能变为电能（发电机），或电能变为机械能（电动机）的枢纽。在定子与转子之间留有一定的间隙称为气隙。图1-7是剖视图，图1-8是结构图。从图可见，定子主要由主磁极（简称主极）、换向极、机座、端盖、轴承和电刷装置等部件组成；转子主要由电枢铁心、电枢绕组、换向器、转轴和风扇等部件组成。下面简要介绍直流电机的主要零部件的基本构造、作用及其材料。

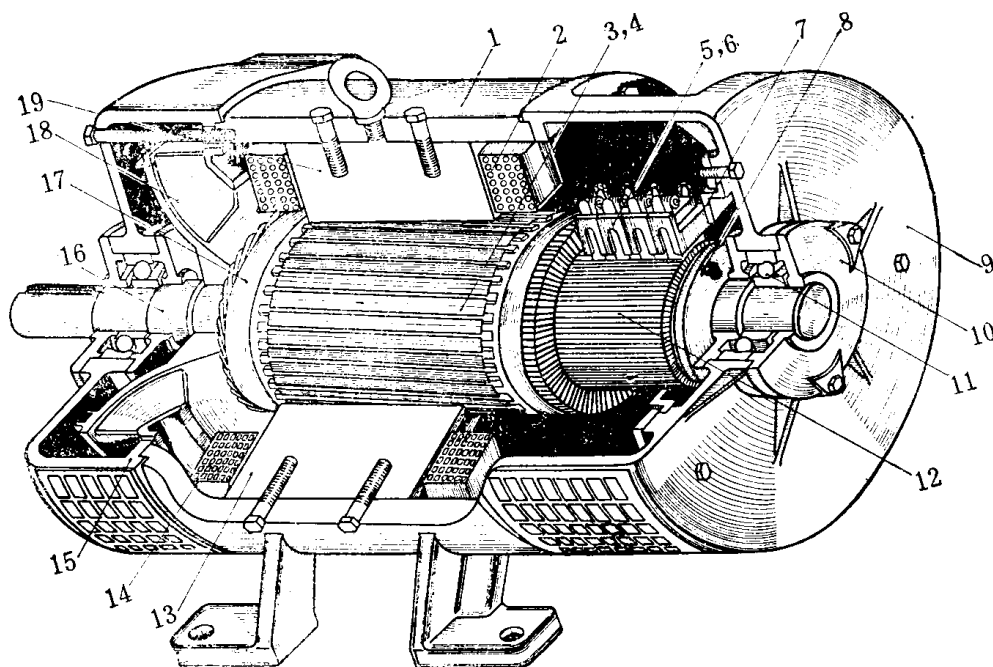


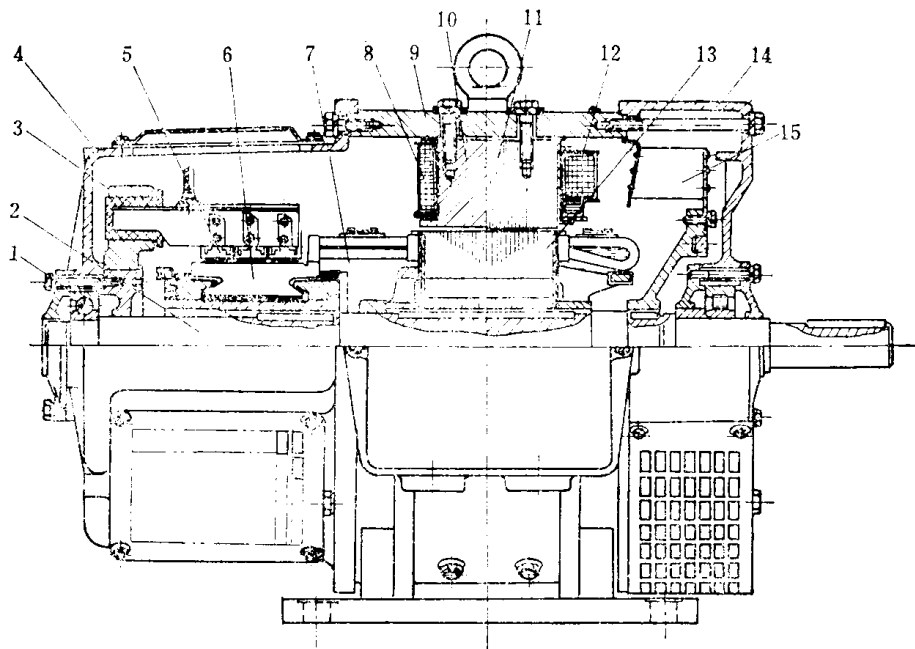
图1-7 防滴式卧式自扇冷直流电机剖视图

主磁极 主磁极的作用是产生主磁通。它由主极铁心和励磁绕组两部分组成，如图1-9，主极铁心一般由1~1.5mm的钢板冲片叠压而成。主磁极总是成对的，各主极上的励磁绕组联接时要能保证相邻磁极的极性按N极和S极依次排列。为了减小气隙中有效磁通的磁阻，改善气隙磁密的分布，磁极下的极掌（或称极靴）较极身宽，这样还可使励磁绕组牢固地套在磁极上。整个磁极用螺钉固定在机座上。

换向极 又称附加极，用来改善电机的换向，其原理将在§6-3中说明。换向极也由铁心和套在铁心上的绕组组成，如图1-10所示。大容量直流电机的换向极铁心，用互相绝缘的薄钢片叠成，以更有利于换向；中小容量直流电机的换向极铁心，由整块钢制成。换向极绕组与电枢电路串联，其极性根据换向要求确定。换向极装置在相邻二主极之间的几何中性线上，并用螺钉固定在机座上。

机座 机座一方面用来固定主极、换向极和端盖等部件，并借助于底脚将电机固定在基础上；另一方面也作为电机磁路的一部分，机座中有磁通经过的部分称为磁轭。机座一般用铸钢或厚钢板焊接而成，以保证良好的导磁性能和机械强度。

隐极式直流电机采用全叠片定子磁轭。主磁极、换向极用硅钢片一次冲出，然后叠压而

图1-8 Z₂-9型直流电机结构图

1—轴承 2—轴 3—刷架 4—前端盖 5—电刷 6—换向器 7—电枢绕组 8—换向极绕组 9—机座 10—换向极铁心 11—主极铁心 12—主极绕组 13—电枢铁心 14—后端盖 15—风扇

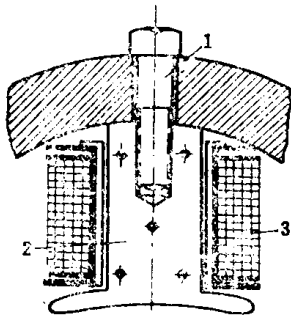


图1-9 主磁极

1—固定主极铁心的螺钉 2—主极铁心
3—励磁绕组

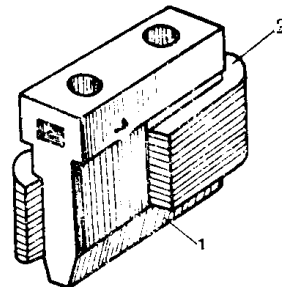


图1-10 换向极

1—换向极铁心 2—换向极绕组

成，不需分别加工制造，不仅适应晶闸管整流电源，而且节省用铜，缩小体积，减轻重量。

电枢铁心 电枢铁心的作用是通过主磁通和固定电枢绕组。为了减少磁滞和涡流损耗，电枢铁心一般用厚 0.5mm，涂过绝缘漆的硅钢板冲片叠成，固定在电枢支架式转轴上。为了加强通风冷却，有的电枢铁心冲有轴向通风孔，较大容量的电机还有径向通风槽。如图 1-11 所示为有槽电枢铁心冲片。

电枢绕组 电枢绕组的作用是感应电势和通过电流，使电机实现能量转换。电枢绕组用带有绝缘的圆导线或矩形截面的导线绕成，其连接规律将在第二章中说明。绕组嵌入槽内后，用槽楔压紧，线圈与铁心间及上下层线圈之间均要妥善绝缘，如图 1-12。为防止电枢旋转时将导线甩出，绕组伸出槽外的端接部分用无纬玻璃丝或非磁性钢丝扎紧。

换向器 如上所述，在发电机中，换向器能使元件中的交变电势变换为电刷间直流电势；在电动机中，它能使外加直流电流变为元件中的交流电流，产生恒定方向的转矩。图 1-13 a 所示为拱形换向器的结构图，它是由许多带有鸽尾的梯形铜片组成的一个圆筒，片间用