

第24篇 目 录

一般参考文献	24-4	24.3.7 试验特性及机械特性	24-47
24.1 电动机及其辅助设备	24-5	24.3.8 运行故障	24-48
24.1.1 恒速交流电动机	24-5	24.4 燃气轮机	24-50
一、鼠笼式交流感应电动机	24-6	24.4.1 效率	24-50
二、交流同步电动机	24-8	24.4.2 设计方案选择	24-51
24.1.2 交流多速电动机	24-10	24.4.3 运行特性	24-53
一、双绕组电动机	24-10	24.5 透平膨胀器	24-55
二、单绕组蔗极电动机	24-11	24.5.1 作用原理介绍	24-55
三、四速双绕组鼠笼式电动机	24-11	24.5.2 特性	24-56
四、极-幅调制感应电动机	24-11	24.5.3 径流式向心透平的设计	24-58
24.1.3 绕线转子交流感应电动机	24-11	24.5.4 效率	24-58
24.1.4 直流电动机	24-13	24.5.5 轴承	24-58
24.1.5 变速拖动装置	24-14	一、径向轴承	24-58
24.1.6 电动机机壳	24-15	二、推力轴承	24-59
24.1.7 电动机的控制	24-16	24.5.6 轴封	24-59
一、起动机型式	24-16	一、转轴密封	24-59
二、电动机保护	24-19	二、转子密封	24-59
三、特殊控制	24-21	24.5.7 可变截面喷嘴	24-59
24.2 往复式热力发动机	24-24	24.5.8 转子共振	24-60
24.2.1 蒸汽机	24-24	24.5.9 气流的凝结	24-60
24.2.2 内燃机	24-25	24.5.10 应用	24-61
一、设计特性	24-25	24.5.11 润滑	24-61
二、运行特性	24-26	24.5.12 隔绝气体系统	24-62
三、安装及费用	24-28	24.5.13 尺寸选取	24-62
24.2.3 自由活塞式燃气发生器	24-30	24.5.14 仪表装置	24-63
一、设计特性	24-30	24.6 从液流势能中回收功率	24-64
二、运行特性	24-30	24.6.1 基本原理	24-64
三、安装及运行	24-31	一、经济性	24-64
24.3 汽轮机	24-33	二、发展	24-65
24.3.1 汽轮机型式	24-33	三、水力特性	24-66
24.3.2 级及阀门的选择方案	24-34	24.6.2 运行特性	24-67
24.3.3 叶片及级的型式	24-34	24.6.3 设计上的考虑	24-69
24.3.4 特性和效率	24-36	一、例 2	24-69
24.3.5 汽轮机的控制	24-41	二、设计基本原理	24-73
一、控制系统各元件	24-41	24.6.4 安装特点	24-73
二、速度控制系统	24-41	一、液体汽化	24-73
三、抽汽压力控制	24-45	二、液体容积	24-74
24.3.6 汽轮机的选用	24-45	三、过程的控制	24-74

四、速度.....	24-74	三、电气及电子速度控制.....	24-81
五、起动及超载.....	24-75	四、液力转矩变换器.....	24-81
六、发电.....	24-75	24.7.5 机械联轴器.....	24-81
七、组装式单元机组.....	24-76	一、弹性联轴器.....	24-81
24.7 机械动力传动装置	24-77	二、离合器.....	24-82
24.7.1 带传动.....	24-77	24.7.6 轴承.....	24-82
24.7.2 链传动.....	24-78	一、轴承型式.....	24-83
24.7.3 齿轮传动.....	24-78	二、止推轴承.....	24-84
24.7.4 变速传动.....	24-79	三、滚珠及滚柱轴承.....	24-85
一、可变距滑轮.....	24-79	24.7.7 润滑系统.....	24-86
二、液力变速传动.....	24-80		

第24篇 过程机器的传动

作者:

Frank L.EVans 篇主编

Carl R.Olson 电动机及其辅助设备

H.Steen-Johnsen 汽轮机

J.S.Swearingen 透平膨胀器

Eric Jenett 从液流势能中回收功率

译者:

唐致实 电动机及其辅助设备 (黄焕焜审校)

往复式热力发动机 (汪希萱审校)

汽轮机

燃气轮机

透平膨胀器

从液流势能中回收功率

机械动力传动装置

1. 2000.10.12

2000.10.12

第24篇 目 录

一般参考文献	24-4	24.3.7 试验特性及机械特性	24-47
24.1 电动机及其辅助设备	24-5	24.3.8 运行故障	24-48
24.1.1 恒速交流电动机	24-5	24.4 燃气轮机	24-50
一、鼠笼式交流感应电动机	24-6	24.4.1 效率	24-50
二、交流同步电动机	24-8	24.4.2 设计方案选择	24-51
24.1.2 交流多速电动机	24-10	24.4.3 运行特性	24-53
一、双绕组电动机	24-10	24.5 透平膨胀器	24-55
二、单绕组蔗极电动机	24-11	24.5.1 作用原理介绍	24-55
三、四速双绕组鼠笼式电动机	24-11	24.5.2 特性	24-56
四、极-幅调制感应电动机	24-11	24.5.3 径流式向心透平的设计	24-58
24.1.3 绕线转子交流感应电动机	24-11	24.5.4 效率	24-58
24.1.4 直流电动机	24-13	24.5.5 轴承	24-58
24.1.5 变速拖动装置	24-14	一、径向轴承	24-58
24.1.6 电动机机壳	24-15	二、推力轴承	24-59
24.1.7 电动机的控制	24-16	24.5.6 轴封	24-59
一、起动机型式	24-16	一、转轴密封	24-59
二、电动机保护	24-19	二、转子密封	24-59
三、特殊控制	24-21	24.5.7 可变截面喷嘴	24-59
24.2 往复式热力发动机	24-24	24.5.8 转子共振	24-60
24.2.1 蒸汽机	24-24	24.5.9 气流的凝结	24-60
24.2.2 内燃机	24-25	24.5.10 应用	24-61
一、设计特性	24-25	24.5.11 润滑	24-61
二、运行特性	24-26	24.5.12 隔绝气体系统	24-62
三、安装及费用	24-28	24.5.13 尺寸选取	24-62
24.2.3 自由活塞式燃气发生器	24-30	24.5.14 仪表装置	24-63
一、设计特性	24-30	24.6 从液流势能中回收功率	24-64
二、运行特性	24-30	24.6.1 基本原理	24-64
三、安装及运行	24-31	一、经济性	24-64
24.3 汽轮机	24-33	二、发展	24-65
24.3.1 汽轮机型式	24-33	三、水力特性	24-66
24.3.2 级及阀门的选择方案	24-34	24.6.2 运行特性	24-67
24.3.3 叶片及级的型式	24-34	24.6.3 设计上的考虑	24-69
24.3.4 特性和效率	24-36	一、例 2	24-69
24.3.5 汽轮机的控制	24-41	二、设计基本原理	24-73
一、控制系统各元件	24-41	24.6.4 安装特点	24-73
二、速度控制系统	24-41	一、液体汽化	24-73
三、抽汽压力控制	24-45	二、液体容积	24-74
24.3.6 汽轮机的选用	24-45	三、过程的控制	24-74

四、速度.....	24-74	三、电气及电子速度控制.....	24-81
五、起动及超载.....	24-75	四、液力转矩变换器.....	24-81
六、发电.....	24-75	24.7.5 机械联轴器.....	24-81
七、组装式单元机组.....	24-76	一、弹性联轴器.....	24-81
24.7 机械动力传动装置	24-77	二、离合器.....	24-82
24.7.1 带传动.....	24-77	24.7.6 轴承.....	24-82
24.7.2 链传动.....	24-78	一、轴承型式.....	24-83
24.7.3 齿轮传动.....	24-78	二、止推轴承.....	24-84
24.7.4 变速传动.....	24-79	三、滚珠及滚柱轴承.....	24-85
一、可变距滑轮.....	24-79	24.7.7 润滑系统.....	24-86
二、液力变速传动.....	24-80		

符号及单位一览表

符号	定 义	SI单位	US通用单位	符号	定 义	SI单位	US通用单位
b	传动带宽度	m	in	P	轴承平均压力	N/m ²	lbf/ft ²
C	常数			P	功率	kW	kW
C_1	蒸汽速度	m/s	ft/s	$P_{\max}$	最大接触压力	N/m ²	lbf/ft ²
c	间隙	m	ft	p	磁极数		
d	轴承直径	m	ft	Q_s	热量	J	Btu
E	电压	V	V	Q_p	水泵流量	m ³ /h	ft ³ /h
E	弹性模数	N/m ²	lbf/ft ²	Q_t	涡轮机流量	m ³ /h	ft ³ /h
e	泵毛效率	无因次量	无因次量	R	运行负荷	kg	lb
e	自然对数的基			R	气体常数	J/(mol·K)	Btu/mol·°R
e	效率	无因次量	无因次量	R	电枢阻抗	Ω	Ω
e_h	水力效率	无因次量	无因次量	r	半径	m	ft
F	负荷、负载			s	视在功率	kVA	kVA
F_f	摩擦力	N	lbf	$S_{\max}$	最大应力	N/m ²	lbf/ft ²
f	摩擦系数			T	张力	N	lbf
f	频率	Hz	Hz	T	力矩	N·m	lbf·ft
g	重力加速度	m/s ²	ft/s ²	T	温度	K	°R
H	功率	W	hp	T_o	平均温度	K	°R
H_o	理想焓降	J	Btu	T_c	离心应力	N	lbf
H_1	可逆焓降	J/kg	Btu/lb	t	时间	s	s
H_p	总压头(泵)	m	ft	t	传动带厚度	m	in
H_t	总压头(涡轮机)	m	ft	V	电压	V	V
h	油膜厚度	m	ft	V	反电势	V	V
Δh	单位质量的焓降	J/kg	Btu/lb	V_s	传动带速度	m/s	ft/min
I	线路电流	A	A	W	输到压缩机的净功	J	Btu
K_A	常数			W_c	压缩机耗功	J	Btu
K_L	常数			W_{Theor}	理论功	J	Btu
K_v	常数			WK^2	惯性矩	kg·m ²	lb·ft ²
K_T	常数			v	功率因素	无因次量	无因次量
k	常数			Z	粘度	N·S/m ²	cP
Mol. wt	原子量	kg	lb	Z_o	平均可压缩性系数	无因次量	无因次量
N	力	N	lbf	希腊字母			
N_c	压缩机效率	无因次量	无因次量	θ	接触弧长		
N_e	膨胀器效率	无因次量	无因次量	φ	传动带的密度	kg/m ³	lb/in ³
n	转速	r/s	r/min	ϕ	磁通量	Wb	Wb
n_s	比转速(泵或涡轮机)						
P	压力	kPa	lbf/in ²				

一般参考文献

Bartlett, *Steam Turbine Performance and Economics*, McGraw-Hill, New York, 1958. Baumeister, *Standard Handbook for Mechanical Engineers*, 7th ed., McGraw-Hill, New York, 1967. Collins and Canaday, *Expansion Machines for Low Temperature Processes*, Oxford, Fair Lawn, N.J., 1958. Canaday, *Theory of Turbomachines*, McGraw-Hill, New York, 1964. Fink and Carroll, *Standard Handbook for Electrical Engineers*, 10th ed., McGraw-Hill, New York, 1968. Jennings and Rogers, *Gas Turbines Analysis and Practice*, McGraw-Hill, New York, 1953. Katz et al., *Handbook of Natural Gas Engineering*, McGraw-Hill, New York, 1959. Rase and Barrow, *Process Engineering of Process Plants*, Wiley, New York, 1957. Salisbury, *Steam Turbines and Their Cycles*, Wiley, New York, 1950. Scott, *Cryogenic Engineering*, Van Nostrand, Princeton, N.J., 1959. Shepherd, *Principles of Turbomachinery*, Macmillan, New York, 1956. Stepanoff, *Centrifugal and Axial Flow Pumps*, 2d ed., Wiley, New York, 1957. Stodola, *Steam and Gas Turbines*, Peter Smith, New York, 1945.

24.1 电动机及其辅助设备

所有的电机，不论其型式或功率如何，都是按照同样的基本原理来运行。当电流通过一根位于电磁场中的导线时（电磁场至少应与电流部分地垂直），就会有一个与电流及电磁场方向都垂直的力作用在导线上。在电动机中磁场对转轴轴线向外或向内的辐射都穿过空气间隙，这里所说的空气间隙是指在转子及定子之间的环形间隙。当有电流通过的导线与转轴轴线方向平行时，上述作用力的方向将与转子圆周相切。作用在导线上的力与作用在磁场上的反作用力大小相等，方向相反。这一现象与磁场是由转子产生还是由定子产生都没有关系；它们最后的作用结果都相同；就是使转子发生旋转。

根据这些基本原理，可以制造出各种不同型式的电动机。每一种电机都有不同运行特性，适合在各种特殊的拖动中应用。描写交流电动机普遍运行特性的公式（24-1）～（24-9）已综合在表24-1中。如果有好几种型式电动机都可以采用时，对它们的选择应根据初始投资费用及运行费用（包括维护及可靠性的考虑等）等来决定。

表 24-1 交流电机公式

输出功率	$H = Tn/5250$		(24-1)
	$P = 0.00173Vlye$	(三相)	(24-2)
	$P = 0.001Vlye$	(单相)	(24-3)
输入功率	$P = 0.00173Vly$	(三相)	(24-4)
	$P = 0.001Vly$	(单相)	(24-5)
	$P = 0.746H/e$		(24-6a)
	$S = P/y = 0.746H/ye$		(24-6b)
线电流及功率因素	$I = \frac{0.746H \text{ (输出)}}{1.73Vye}$	(三相)	(24-7)
	$I = \frac{0.746H \text{ (输出)}}{Vye}$	(单相)	(24-8)
	$y = \frac{P \text{ (输入)}}{S}$		(24-9)

式中 e ——效率
 H ——功率，hp
 I ——线电流，A
 n ——速度，r/min
 P ——功率，kW
 S ——视在功率，kVA
 T ——力矩，1bf·ft
 V ——外加电压，V
 y ——功率因素

注：

将马力换算成瓦特乘以746；
 将磅力·英尺换算成牛顿·米，乘以1.356；
 将转每分换算成弧度每秒，乘以0.1047。

24.1.1 恒速交流电动机

绝大部分工业用电动机都是以恒速运行，它们的典型应用是拖动水泵、压气机、风扇、

传输带、破碎机械及搅拌机。

一、鼠笼式交流感应电动机

这种型式的电动机是最常用的一种恒速拖动装置。它们在设计上比较简单，因此价格很低，而且有高度的可靠性。各种转速及不同功率（马力）的交流鼠笼式电动机的有代表性的价格见图24-1。

典型的三相鼠笼式电动机有一个与电源相连接的定子绕组。转子是一个装在转轴上的圆柱形磁性材料结构，并且在其表面上加工出许多和转轴相平行（或是略为偏斜）的槽；可以把裸导条嵌入到这些槽内，也可以用熔化的金属浇铸于其中，转子两端用环形端环连接。术语“鼠笼”就是从这种条状结构的转子而得名的。运行时当电流通过定子绕组就产生一个旋转磁场，除非转子以与定子旋转磁场严格同步的转速旋转，否则旋转磁场就要切割转子绕组。切割作用的结果将在转子中感应出电动势，因此就在转子中产生电流，该电流与电磁场作用的结果将产生旋转力矩。

典型的中等尺寸的鼠笼式电动机可设计成在2~3%转差率下运行（以同步速度的97~98%来运行）。

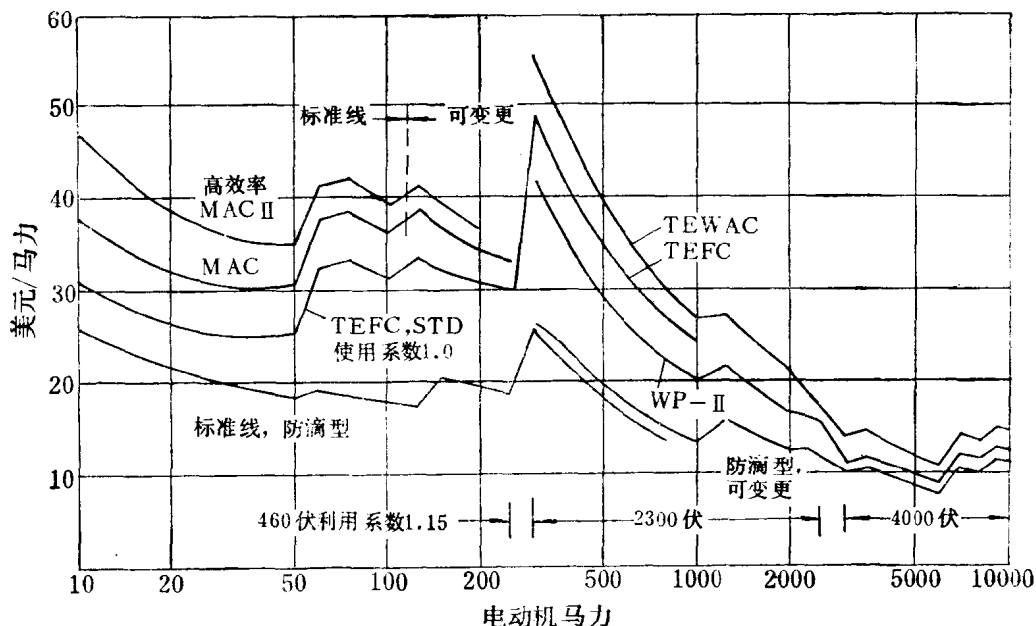


图 24-1 10~10000hp的1800r/min鼠笼式感应电动机的价格（美元/单位马力）。除了TEFC标准外，从10到250hp电动机的使用系数已标明在图上；250hp以上的标准使用系数为1.0。图中数字是1979年6月的价格，将美元/单位马力换算成美元/单位千瓦可乘以1.34；将马力换算成千瓦可乘以0.746

同步转速由电力网的频率和电动机定子绕组型式所决定。如果定子绕组仅形成一个S磁极和一个N磁极，那么这是一台双极电动机；电机的极数永远是偶数（2、4、6、8等）。同步转速 n 是：

$$n = 120 f / p \quad (24-10)$$

式中 n ——转速, r/min;

f ——频率, Hz(cycles/s);

p ——极数。

实际运行转速要比同步转速小一个转差值。转差值的大小取决于电动机的尺寸及其使用

情况。一般说来，电动机的功率愈大，则转差率将愈小，一台7460W(10hp) 通常的电动机的转差率为2.5%。功率超过 746kW 的电动机 (1000hp) 的转差率可能小于 0.5%。高转差率的电动机 (最大转差率可达 13%)，用于拖动惯性大的机器及要求较大起动力矩的场合；典型的应用是拖动压榨机和冲床。由全国电气制造商协会 (NEMA) 设计的各种电动机 (功率到 149kW (200hp) 为止) 其速度随力矩而变化的典型曲线如图24-2所示。该种电动机的典型特性及应用见表24-2。

表 24-2 鼠笼式感应电动机的特性及其典型应用			
	NEMA A 及 B	NEMA C	NEMA D
起动力矩	正 常	大	大
运行转差率	小	小到中等	大
应 用	泵 压气机 风扇, 机床 一般用途	磨粉机 传输带 电 梯	破碎机 冲 床 冲压机

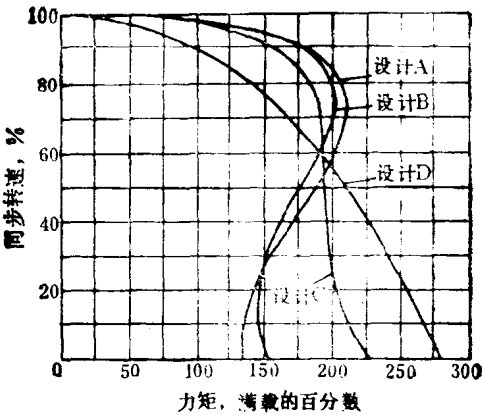


图 24-2 NEMA设计的各种型式鼠笼式感应电动机的速度-力矩典型曲线 (对设计型式的说明见表24-2)。

起动或控制 鼠笼式感应电动机的控制或起动通常包括将额定电压接入电动机接线端时的情况在内。图 24-2 上的速度-力矩特性曲线就是按额定电压下起动到整个运行范围来绘制的。通过专门计算可以求得电动机起动电流的数值。然而按标准化(NEMA A或B)设计的电动机在额定电压下起动时的起动电流可达到额定负荷时电流的6到6.5倍。特别是对于大功率电动机，这一起动涌流可能在电源线路中产生一个极不希望的电压降，从而能够使其他一些正在运行中的电动机停止转动或使电灯暂时暗淡无光，甚至能够引起电力系统的一些复杂控制设备的故障。鉴于这种情况可以采用其它一些方法来起动电动机。

① 降压起动 在起动前用电抗器、电阻器或变压器暂时连接在电动机前面来减小起动电流，而限制电压降低。但是这也将使起动力矩减小。在采用串联电抗器或电阻器的方法来起动时，力矩值将按照线路中电流减小的平方倍来减小；在采用变压器的方法起动时，力矩的减小将与电流减小值成正比。电阻器电抗器及变压器都是可调节的，这样我们可以在力矩及电流之间选取一个合理的折衷值。

② 星形-三角形起动 一台绕组按三角形接线的电动机在起动时可以把绕组改接成星形，这样仅有原来电压值57.7%作用在每一相绕组上。这时所发出的力矩亦降低为原来的 $(0.577)^2$ 倍，即只有33%，由于不能进行任何调节，所以这种方法仅在起动负荷及加速力矩小于电动机正常起动时的 $\frac{1}{3}$ 值的场合才能应用。在美国很少采用这一方法。

③ 部分绕组起动 双绕组电动机可采用这种方法起动，在起动时仅把其中一组绕组投入运行。因此其起动力矩和电流都将是原有数值的 $\frac{1}{2}$ 左右。在此采用了二个接触器 (起动开关) 代替原来的一个大接触器，不需要再采用电抗器及变压器。这种方法的缺点为可用

力矩是一个固定值，并且由于绕组间可能存在的不平衡而引起的谐波干扰，可使速度-力矩曲线发生改变，以致很可能无法使电动机加速。

电气制动 在鼠笼式电动机中最常用的电气制动是反接制动和再生制动。鼠笼式电动机旋转方向是由所输入电源的相位次序来决定的。如果把三相电动机中的任何二相的接线端互换，则电动机就要反转。如果这种情况出现在电动机正在旋转时，则电动机将会突然停止转动，然后再反转。为了达到更有效的制动，在停止时最好能卸去负荷。在仅用于估算时，可以假设制动力矩差不多就等于起动力矩。制动时间可按下式估算

$$t = WK^2 n / 308T \quad (24-11)$$

式中 t —— 时时，s；

WK^2 —— 惯性，lb·ft²；

n —— 旋转速度，r/min；

T —— 力矩，lbf·ft。

把lb·ft²(磅·平方英尺) 换算为kg·m²(千克·平方米) 乘以0.042，将r/min(转/分) 换算为rad/s(弧度/秒) 乘以0.104，将lbf·ft(磅·力·英尺) 换算为N·m(牛顿·米) 乘以1.356。

这一估计值常常是不精确的，因为还有一些次要的因素，例如转子饱和及谐波分量等也有影响。如果在各种极限状态下使用电动机，则需要与电动机制造厂商进行咨询。

再生制动发生在运行速度超过电动机同步转速时，这可能是由于进行负载超速或在多速电动机由于从高速切换到低速而引起的。其作用原理与电动机的正常运行相类似，不同之处是这时的转差率为负数。在这种情况下电动机将以感应发电机的型式来运行，向电力网输出功率。如果这时有外界功率源，例如气体膨胀器或是向下倾斜的输送机械的话，那么再生制动是进行调速、储存能量及起动从动机器(或驱动机器)的一个极有效的方法。一台感应发电机可以向电源输出的功率差不多就等于它以电动机方式运行时的额定功率。再生制动仅能用于那些能够吸收这一再生能量，并能对电动机供给所需的励磁功率(无功功率)的电力系统中。

直流动力制动是采用把直流电通到定子绕组中的方法来实现的。首先应使电动机的接触器或起动器断开，卸去交流功率，然后借助于第2个接触器把直流电送入到电动机。与原来的旋转交流磁场不同，直流电将产生一个静止的磁场，转子铜条在切割这一磁场后产生了感应电流，感应电流和直流磁通相互作用的结果将产生一个制动力矩。只要调整直流电流的数值就可以很容易地改变制动作用的大小。对于标准化电动机采用这种方法的一个非常有利的因素是在满负荷转速时这种制动作用极富有弹性，能减少冲击；而且制动作用一般是随着速度的减少而增大，并在速度等于零的附近达到其极大值。在停转状态时制动力矩也等于零，但是制动力矩的极大值却发生在相当低的速度时，这时的静摩擦力通常已足以防止电动机发生滑动。制动力矩的极大值可以达到非常高的数值，因此应当对转轴、齿轮和联轴器等零件的强度进行核算。还应当特别注意到频繁的起动及停车常常会引起电动机的过热。

二、交流同步电动机

交流同步电动机是以与电力网频率严格同步的转速来旋转的，因此这种型式的电动机在最现代化电力网中运行时实际上将是一种真正的恒速电动机。

和在感应电动机中情况一样，在同步电动机中通常也是由定子电流产生一个旋转磁场。但与感应电动机不同之处为其转子是由在转子周界上均匀分布的成对的磁极所组成。转子磁场与相应的由交流电所产生的定子磁场有相同的极数。转子或者说磁场绕组是用直流电供

电，因此转子磁场相对于转子的结构来说是静止的。当转子磁场与定子的电流（同相分量）相互作用时将产生力矩。在空载情况下，当直流磁场中有适当的电流时，转子和定子电磁场的中心线将互相重合。加在定子绕组上的电压被由转子磁场在定子中所产生的（感应）反电动势所平衡，因此在定子绕组中不会有交流电流通过。但是在加上负载后，转子速度就要减慢，因此出现了转子相对于交流磁场而言的位移。这一位移将使定子的外加电势和感应电势之间出现差值，并在定子中产生电流；电流与转子磁场之间相互作用的结果就产生旋转力矩。

同步电动机不能在加上直流电磁场后就起动。但可以像感应电动机一样地起动；为此可以把能够像鼠笼式转子一样作用的许多铜条嵌入在转子磁极的表面上，并在转子两个端面处用端环连接在一起。这些铜条或称阻尼条还可以阻尼掉在额定转速时出现的振动。当电动机差不多接近额定转速95%时（取决于电动机的用途及设计）再把直流电通到磁场中，然后转子将被“拉入”同步转速。阻尼条不会影响同步转速时的特性，因为它们设计成仅供改进其起动性能之用。这样在加速特性上将获得很大的弹性来满足在某些应用中的特殊要求，但又不致于影响在正常转速时的效率或同步转速时的其他各种特性。总而言之，在设计鼠笼式电动机转子时必须起动特性及额定转速时的特性两者之间选取一个折衷方案。直流磁场一般在起动时要用一个电阻器加以短接，特别是在接近同步转速时它可使电动机产生加速力矩。

功率因数的补偿作用是同步电动机的一个重要的特点。同步电动机的功率因数可超前80%或100%。通常需要采用功率因数超前的机器来补偿其余各机组负荷的滞后功率因数（例如感应电机的负荷）。以防止触犯美国电力法规中的罚款条例。即使是功率因数为100%的电动机在负荷降低时也能以超前的功率因数来运行。同步电动机比静止电容器优越之处是它们本身所具有的调节动力系统电压的趋向，例如在电压降低时将有更多的超前无功功率被释放到动力系统中。与此相反，在电压升高时输送到动力系统无功功率将按照电压降的平方倍而成正比地减少。释放给动力系统的超前无功功率的大小取决于直流磁场电流的数值，它是一个完全可以调节的数值。

磁场电流是一个重要的控制因素。它不仅仅能够控制功率因数的大小，还能控制同步力矩值（即电动机拉出同步时的负载）。例如加强磁场可以防止在某预定的瞬时高负荷或电压降时失去同步现象的发生。对具有已知的高值瞬时力矩的负荷通常采用功率因数为80%的同步电动机来拖动。在此所需的附加磁场可同时提供额外的拉出同步力矩，并校正动力系统的功率因数，在要求有高的拉出同步力矩时，采用超前功率系数电动机的费用比一台力矩相同，但功率因数值为1的电动机的费用要低。

直流电磁场的励磁可以用各种方式来实现。一台供励磁用直流发电机（励磁机）可以由同步电动机直接传动，也可以通过传动带与同步电动机相连接（但这种方式很少采用），还可以用一个小功率的电动机来单独地传动（电动机-发电机组式励磁机）。直接传动或带传动励磁机只供给一台同步电动机的励磁的需要，因此可以用调节励磁机磁场的方法来控制同步电动机励磁电流的大小。电动机-发电机组式的励磁机可以同时供应一台或许多台同步电动机的励磁电流。为了提高励磁电流供应的可靠性，可以采用将几台电动机-发电机组式的励磁机并列运行的方法，来同时供应多台同步电动机励磁的需要；在这种情况下励磁机供应的励磁电压通常是固定不变的（例如125或250V），而各台同步电动机的磁场可以用它们本身的磁场变阻器来控制（其容量要比励磁机变阻器大很多）。也可以采用静止型励磁器（整流器）来供应单台或多台同步电动机的励磁。对整流器需要进行特别设计以防止在拉出同步时的电压冲击而引起损坏。但是这些励磁机，不管是旋转型或静止型，都要通过电刷或集电环

才能把直流电送入到同步电动机转子磁场中去。

另外一种新的励磁方法是采用无刷励磁。在此，一台交流发电机（励磁机）直接与同步电动机连接或者就装在同步电动机的转轴上。交流励磁机有一个定子磁场和一个交流转子电枢，电枢直接和一个装在同步电动机转轴上的静止型可控硅整流器相连接，能够检测同步转速和相角等参数的静止型控制元件和磁场放电电阻器同样也装在转子上。改变励磁机的磁场就可以调节同步电动机磁场电流，而不需要再装电刷及集电环。无刷励磁非常适合在一些容易失火的环境中使用，在这些环境中如果采用通常的有刷电机，则必须对碳刷及集电环加上保护罩壳。

由于设计上比较复杂，而且需要单独的电源供应其励磁，同步电动机通常仅应用在需要大功率电力拖动的场合（数百hp或更大功率）。功率达59680kW即80000hp的同步电动机已经制造出来。由于同步电动机在功率及特性上可变幅度大，而且效率及功率因数都很高，所以在各种拖动场合中都得到了广泛的应用。通常，在拖动大功率往复压缩机时毫无例外地都采用发动机型同步电动机（没有轴或轴承）。另外一些典型的应用包括拖动锥形精浆机、压缩机、泵、球磨机、磨矿机、切碎机、破碎机等。拖动转速最低可达80r/min，最高拖动转速则取决于转子的构造，而且与功率大小有关，在1800r/min时最大功率可达2,238kW（3,000hp）；在1200r/min时最大功率可达29,840kW（40,000hp）。

同步转速可以按（24-10）式计算，如果所需拖动的转速超过电机的同步转速，可以考虑采用增速齿轮箱；大功率高速离心式压缩机就是采用这种传动方式的一个例子，也可以制造双极3,600r/min（60Hz）的同步电动机，但是和齿轮传动相比较，这种方案并不经济。

24.1.2 交流多速电动机

鼠笼式感应电动机本身是一种单速的动力机器，但是在专门设计的电动机中，采用对定子绕组进行不同组合的方法仍可以实现多速运行。

一、双绕组电动机

这种型式电动机的设想是最简单的。那就是设计二个独立无关的定子绕组（三相或仅二相），并按不同的极数来绕制，例如一个绕组可以绕成4极（60Hz-1800r/min），另一个绕组可以绕成6极（60Hz-1200r/min），在运行时仅有一个绕组与电源相连接。这种方法采用于转速比不是2:1时，因为二个绕组彼此独立无关，因此可以得到各种不同的速度比值的组合。二个绕组不一定都设计成同样的功率。

双绕组电动机可以设计成等力矩、变力矩或等功率（马力）输出等各种不同型式。等功率电动机可以在二种转速时都发出同样的马力数（因此在低转速时将发出较大的力矩）。等力矩电动机在每一种转速时都能够发出同样大小的力矩值（例如拖动传送带运输机）。可变力矩电动机可以按照负荷来设计，其中力矩值随速度二次方而变化及负荷随速度三次方而变化。

典型的应用如下表所示

可变力矩型	等力矩型	等功率（马力）型
风 扇	传送带运输机	工 具 机
离 心 泵	进 料 机	
	往复式压气机	

二、单绕组庶极电动机

这种型式电动机用于其低转速为高转速的一半的场合。但它们只能在三相交流电源中应用。把特殊设计的绕组在电动机外部的接线盒中进行不同组合(电动机控制器)就可得到所需的速度变化。采用这一方法只能得到一个2:1的速度比,例如可以得到3600/1800、1800/900及1200/600r/min,它们也可以设计成变力矩、等力矩及等功率输出(马力)等不同型式,其力矩特性和双绕组电动机相类似,但是双速单绕组电动机的控制要比双速双绕组电动机复杂。

三、四速双绕组鼠笼式电动机

这种型式电动机就是综合上面二种方法而设计的。定子绕组由二个庶极绕组组成。从每一个绕组可以得到比值为2:1的二种转速。在标准的60Hz电力网中各相应转速为1800/1200/900/600r/min及1200/900/600/450r/min。四速电动机也可以设计成可变量矩、等力矩及等功率(马力)等三种型式。

四、极-幅调制感应电动机

这是一种单绕组鼠笼式感应电动机,它可以按照任何极数或转速来设计,例如8/10极为900/720r/min,4/20极为1800/360r/min。极幅调制感应电动机的重量要比同样规格的双绕组电动机轻,外形尺寸也比较小。在高速或低速运行时整个绕组都投入工作,因此具有较大的热容量及比较高的效率。其基本原理是:当一种频率被另外一种频率(调制频率)作用时将产生新的频率,新频率的数值将等于此二种频率的和与差。例如一个6极磁场被一个2极磁场来调制时将产生一个4极及一个8极磁场。但是4极磁场可以被具有适当几何形状的绕组所抵消。因此这台极幅调制感应电动机在正常的接线方式下将以6极磁场的转速来运行(60Hz, 1200r/min),而在一半绕组被反接从而产生一个双极调制频率时,电动机将以8极磁场的转速来运行。

在上面关于多极交流电动机的介绍中,仅讨论了感应电动机。它们不具有具体明显的转子磁极,因此只需改变定子磁场的结构形态就可以改变电动机的转速。如果要求一台交流同步电动机也能实现多速运行的话,那么在每一种旋转速度时都要有不同的转子结构,因此多速电动机只有在鼠笼式感应电动机中才是现实可行的。

24.1.3 绕线转子交流感应电动机

绕线转子交流感应电动机的作用原理和鼠笼式电动机相同。然而正如它的名称所指出的,转子是由绕组而不是由铜条所组成,这些绕组由装在转轴上的滑环来连接。在滑环上滑动的碳刷和外电阻相连接或者短接。由于绕线转子电动机的转子的外电阻是可以改变的,所以在特性上具有极大的灵活性。转子的外电阻影响力矩-转速曲线的形状;随着电阻的增大,电动机最大力矩出现时的转速将减少。图24-3所示是当转子的外电阻从零(在顶点)增大到非常大的数值时(左端点)对电动机特性的影响。

电动机在降速运行时的效率要降低,效率的数值差不多等于运行转速以同步转速表示的百分比。因此当电动机以同步转速的75%来运行时,输入功率中将仅有75%是输送到负荷,而另外的1/4则损耗在转子电阻上。因此转子外电阻应当能够保证散逸掉这一热量,此外在带负荷升速到其运行转速的时间内在转子电阻中所产生的热量将等于为加速这一负荷(摩擦加惯性)所需的能量。转子的电阻值(内电阻及外电阻之和)必须具有蓄积住这一热量而不致过热的能力,因为加速时间非常之短,一般说来不可能散逸掉任何显著的热量。

绕线转子电动机的上述特性决定了它的应用范围，它们可以用来加速惯性很大的负载，

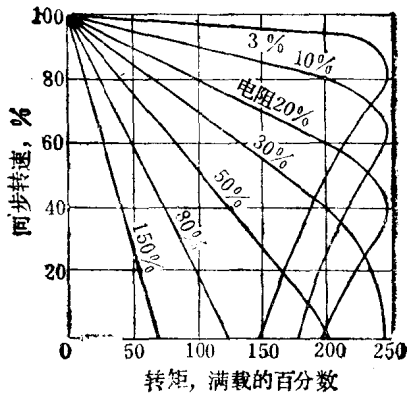


图 24-3 绕线转子感应电动机在次级（转子）回路中外加电阻值改变时的典型转速-力矩曲线。
在此电阻值按转矩值为100%（满载）及转速为零时电阻值为100%来表示

例如压碎机，这时可以利用一个大的外加电阻来吸收它的热量。对于冲击-加速力矩非常敏感的负载，在转子中串接一个数值较大的启动电阻后，可以得到缓慢的启动加速过程；这种作用也可以用来吸收像齿轮中的间隙而引起的冲击性负载。绕线转子电动机还可用来系例如冲床和轧碎机等型式的负载，在此，由于机械系统的惯性而产生了非常大的瞬时尖峰负载，允许系统在这种峰值负荷下减速；在转子回路中串接固定的电阻就可获得这种软特性。绕线式电动机还可以用在需要变速拖动的场合，例如水泵、起重设备及其他一些并不需要精确调速的地方，降速运行的损失对于水泵负载来说并不十分重要，因为在转速减少时其效率

虽然比较低，但是力矩及马力功率值也迅速下跌。如果力矩是按照速度的平方来减少，则电动机转子的电阻损失的最大值不会超过其额定转速负载的10.5%（发生在转速及效率都为额定值的70%，力矩为额定值的50%，功率为额定值的35%时，这时损失达30%，因此可折算为额定转速下的额定负载的10.5%）。

绕线转子电动机的控制 由前述可知，无论是将外加（转子）辅助电阻按档进行调整或用水阻器进行连续调节（这一方法一般很少采用）都可以控制绕线转子电动机。在采用改变辅助电阻的方法来调节电动机的速度、力矩或控制它的加速性能时通常采用多档的可变电阻。可以用手来逐档切换（一般可采用一个鼓形开关），也可以用一个接触器来实现。

除了采用辅助电阻器控制方式外，还可采用其他一些装置例如电抗器及可控硅（固态可控整流器）来实现对绕线电动机的控制。采用固定数值的辅助电抗器和电阻器相配合，可以得到一个近似为常值的加速力矩，而仅需最小数目的加速档次。由于转差频率随着电动机转速的变化而改变，这将使有效电抗以及所引起的电抗器的电阻都发生连续的改变。辅助电阻器、电抗器及接触器都可以设计成可变型式来提供适当的加速度-转速力矩特性，以保护传送带运输机及类似的负载。

可饱和电抗器 是一种可以用小直流信号来进行调节的电抗器，既可用于初级回路（定子）的控制，也可用于次级回路（转子）的控制中，在初级回路中用来控制电动机的电压，因此也就控制了力矩。与固定不变的电阻器和测速计的反馈信号配合可组成控制系统。这种系统可用于要求对速度及力矩的进行精细控制的一些起重机械或吊车中，如果在二相或三相线路中的每一相中都采用二个饱和电抗器，那么甚至还可以实现电动机的反转。在初级和/或次级回路中采用定值的或饱和的电抗器，再与次级电阻器相配合，可以使绕线转子电动机具有较大范围的控制能力及高的弹性。

可控硅 现在已经取代了饱和电抗器，它具有体积小和效率高等优点，并且可以采用各种型式的控制系统。在一台现代化的起重机拖动控制系统中次级回路采用定值的电阻器，而在初级回路中采用二组可控硅元件（一组用于起吊，一组用于下降）。如采用测速电机反馈装置来检测电动机的速度，可以全部都采用可控硅来控制电动机，并在正反转二个方向上都得到

速度的调节和对转矩的限制功能。各式各样的控制系统都是有可能实现的，但是应当根据应用上的要求来进行专门的设计。

24.1.4 直流电动机

直流电动机的速度可以在相当大的范围内进行调节。而且在整个速度范围内都可以保持很高的效率，这一点和线绕电动机是不相同的，在线绕电动机中其效率差不多是和速度成正比。但是直流电动机的这种适应性是在付出较昂贵的费用及采用更加复杂的结构的代价下取得的。

直流电动机的磁场是由定子产生。转子是电枢。和交流电动机中的磁场不一样，直流电动机的磁场并不旋转。电枢中的电流与定子磁场相互作用而产生力矩。

电枢绕组切割磁场后将产生一个与外加电压相反的反电势，输入电压及产生的电压（反电势）之差值加到电枢电阻上将产生相应的电枢电流。电枢的力矩与电枢电流和磁通量成正比。反电势的数值一般和外加电势很相近，因此改变外加电势的大小就可以改变电动机的转速；此外，改变磁场的电流也可以改变它的转速

$$E = V + I_R \quad \text{或} \quad I = (E - V)/R \quad (24-12)$$

$$V = kn\phi \quad (24-13)$$

式中 E ——外加电压；

V ——反电势；

R ——电枢阻抗；

I ——电枢电流；

k ——常数——取决于电动机的设计；

n ——转速，r/min；

ϕ ——磁场的磁通量。

电枢中产生的反电势与所切割的磁通量数值成正比；在改变磁场电流的大小时，电动机必须相应地改变其转速才能产生同样数值的反电势。

直流电动机中的励磁绕组可以采用不同的连接方式。在并激直流电动机中电枢绕组及磁场电路并联，采用这种励磁方式可以得到近似不变的旋转速度，而与外加的电压无关。如果外加电压降低，磁场强度就减少，因而反电势也将降低。改变磁场电流和/或改变电枢电压都可以独立无关地使电动机的速度改变。增大电枢电压可以使转速增加，增加磁场电流将使转速降低。

串激励磁电动机的电枢绕组与磁场绕组是串联的。因此两绕组中的电流数值相同。电机转速取决于电压以及负载，因为力矩是电枢电流及磁场强度的乘积；它们二者都决定于电流的大小。在给定的负载力矩时电流是常数，但转速则和所加电压成正比。如果负载发生改变，则转速也将随之改变。如果负载力矩下降为原来的50%，则电动机电流将减少到原来的70%，而使电枢电流和磁场电流的乘积减少到50%。由于磁场电流的减少，电枢中反电势也减少了，电动机转数将增高40%。由于这一特点，如果失去负载，串激电动机的超速是极其严重的。串激电动机适用于速度可以大幅度变化的恒定马力负载的场合，例如电动工具。它们也可用来拖动各种牵引装置例如电瓶车及电气机车或一些起动机械、吊车或电梯等。

复激绕组直流电动机中既有串联磁场绕组，又有并联磁场绕组。增加了一个微弱的串联磁场绕组能够使电动机从零载变化到满载时有合理的速度调整率。并激或复激绕组电动机广

用于各种变速装置中。对于那些要求对速度进行精确调节及控制的拖动装置，复激直流电动机占有非常重要的地位。

一台直流电动机固有的速度-力矩特性曲线可以通过改变其并激及串激磁场之间相对比值的方法使它能在较大范围内变化，串激磁场可以接成使并激绕组增强或削弱。在实际应用中通常都把串激磁场接成使并激磁场增强（积复励方式）的形式。使得在负载增大时有稳定的但略为减少的速率特性。

有流电动机通过其原有的设计性能以及运行中的一些措施所取得巨大的适应性，使得它们特别适合在变速传动装置中应用，尤其是在那些需要进行调节的拖动装置中。

24.1.5 变速拖动装置

最古老的一种变速拖动装置是Ward Leonard系统，它是由一台交流电动机-直流发电机组和一台并激或复激绕组直流电动机所组成。改变发电机的电压就可调节直流电动机的转速。另外一种具有同样的功能的装置是采用一个可变电压的整流器来对一台直流电动机供电。和通常采用的Ward Leonard系统有三台旋转电机不同，在这种系统中仅有一台旋转机械。

现代化的静态可控整流器，例如可控硅整流器对控制信号具有几乎是瞬时的响应速度，因此可以在绝大多数关键性设备中作为可调节拖动装置的电源来使用。根据要求可以设计成对于速度、速度差、张力、力矩、电流、加速度及减速度等参数以及这些参数的任何一种组合形式的检测及调节系统。例如一台拖动装置可以设计成对速度进行调节并对力矩有限制，也可以设计成能对加速度或减速度进行调节或进行限制的调速系统。

电压可调及速度可调的直流拖动装置的典型的应用是绞车、造纸机械及其辅助设备、混料机、进料器、挤压成型机械、辗光机、机床、滚压机、起重机、卷扬机、挖掘机、索铲挖土机等。差不多在各种要求有高度适应性及高效率的拖动装置中都可以采用直流电力拖动。

机械变速拖动装置一般用于调节精度要求不高的场合。在此，由一台恒速交流电动机通过可变矩滑轮及V型传动带来拖动其负载。变速范围可以高达8:1。功率可达18.6kW (25hp)。可以手动或用电动机进行远距离操纵来改变其速度。从零负载变化到满负载时的速度变动率一般在3~6%之间。在整个速度变化范围内都可以保持很高的效率，因为在此没有滑差损耗。

电磁拖动是一种简单的可变速交流拖动装置，它的效率可以和线绕转子电动机差不多。在这种传动装置中由一台鼠笼式电动机通过磁转差离合器来带动负载，转差率由励磁电流及负载的大小来决定，效率与速度成正比。因此这种拖动装置对于低转速及高力矩的连续运行是不经济的，但是对运行速度只要求小幅度变化的风机及离心泵来说，则是一种很理想的拖动方式，在此力矩值随着速度的减少而迅速降低。它也非常适用于加速度控制。电磁拖动装置的功能和液力联轴器相同。

整流变速拖动装置一般由一台线绕转子电动机和直接连接在同一根轴上的一台直流电动机所组成，绕线转子电动机的转子绕组和一台整流器相连接，整流器的直流输出供给直流电动机。半导体整流器的发展使得这一应用成为现实可行。这种高效率变速拖动装置目前已在数百千瓦功率设备中应用。因为线绕转子电动机转子中的损耗现在可以用来产生轴功率，并没有在电阻器中损失掉。所以拖动装置的效率在整个速度变化范围内都保持很高的数值。一台典型的223.8kW (300hp)整流拖动装置可以在3:1速度范围内运行，而且在整个速度范围内

的效率都保持在83%以上。整流器变速拖动特别适用于高转矩和低转速的拖动中,例如挤压机、搅拌机、水泵、风机及干燥器等。

对于这种拖动系统的一种改进就是采用固态整流器和可控硅整流器,把绕线转子的可变频率的滑差电功率先变成直流电,然后再变为电网频率的功率(在美国为60Hz),这样就可以作为有用的能源再馈送到电网中去。

交流变频电源也可用来拖动鼠笼式电动机以实现变速拖动。小功率合成纤维纺锭的拖动是在这方面应用上的一个典型例子,在此要求许多台电动机以恒速运行。在许多要求精确同步的拖动的场合可以采用同步磁阻电动机。这是一些鼠笼式电动机,转子做成光滑圆柱或有槽的,因为转子的位置在定子磁场中作相对运动时使磁路发生改变,因此在转子上形成了磁极。这样就保证转子在小负载运行时能够按照和定子磁场严格的同步转速来旋转,拖动所需的电源可以是任何一种变速装置拖动的交流发电机或是一台固态逆变器。

24.1.6 电动机机壳

除了在容易发生火灾或爆炸危险的区域(危险区域)以外,电动机的机壳都设计成仅对其内部工作部件进行保护之用。绝缘材料及加工工艺的不断发展,对需要提供保护的程度发生了影响,从而也影响着电动机机壳的设计及分类。

开式防滴型机壳是感应电机、高速同步电机及工业用直流电机的一种标准型机壳。这种设计对于绝大部分室内运行以及许多室外运行电机都是很有有效的。防滴型结构能够对电机内部工作元件提供良好的机械性保护,并能防止可滴性液滴或较大质量脏污颗粒落入到电机内。然而它不能防止大气中雾粒、尘埃或腐蚀性烟雾的侵入。**保护型机壳**所有的入口都采取了保护措施防止直径超过12.7mm的物体进入电机。防溅性电机壳电机不受水滴及固体微粒冲击的影响,能够防止其冲击方向与垂直线之间在 100° 以内的水滴及固体微粒进入机壳内部。

大气保护-I型机壳是对于大型电动机的更高一级的保护型式。这种型式的电机被定义成是“一种所有的通风道都已进行特殊设计的开式电动机,因此可以把雨、雪、大气尘埃粒进入电机部分的数量减少到最低限度”(NEMA标准MG-1“电动机及发电机”)。所有的通风口都能限制19mm直径的异物进入,所采用的现代化的绝缘系统在绝大多数的室外应用中都取得了令人满意的结果。

大气保护-II型机壳在保护上提出更高的要求,并用于使用寿命更长的场合,对于大型电机可以推荐采用这种型式的机壳。在此装有高度隔绝的通风系统,空气必须至少转过3个 90° 的弯道后才能进入电机的工作部位(空气的最大速度为 3.05m/s (600ft/min)。这样,雨、雪以及由通风空气所携带的尘埃在通过电动机的机壳时都将被吹走而不会进入电动机。

全封闭型电机对于水汽、腐蚀性蒸汽、多尘埃及污垢等能提供最大限度的保护作用。在功率不超过 186.5kW (250hp)时我们通常宁愿选用有电扇冷却的全封闭型(TEFC)电动机,而不采用大气保护型。在此外部通风及内部通风用的空气是相互隔离的,除了由通气孔进入的少量空气外,外部通风用空气永远也不会进入到电动机内部通风道中。

TEFC电动机一般除了装有一台内部风扇保证空气在电动机内部进行循环外,还装有一台外部风扇强迫空气流过电动机机壳或热交换器。小功率电机[功率 2.238kW - 3hp]或更小时不需要装通风扇,这些无风扇的全封闭型电动机与TEFC机器相类似,只不过省略了一台风扇而已。在某些应用场合(例如变速拖动装置在低速运行时)必需采用分开的强迫通风,这些应用场合取决于外部通风的条件。在此有各种不同型式,包括**开式外界通风电机**、