

第 22 篇 常用电机、 电器及电动（液）推杆

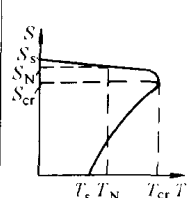
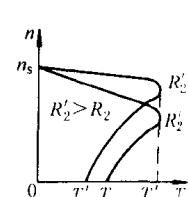
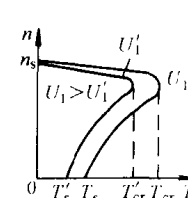
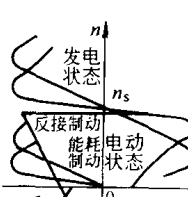
主要撰稿 刘福祐 史习先 陶兆荣
审 稿 王德夫 史习先 邹舜卿

第1章 常用电机

1 电动机的特性、工作状态及其发热与温升

表 22-1-1

电动机的机械特性

类型	特性公式	符 号	特性曲线	性 能	
交 流 电 动 机	$P = m_1 U_1 I_1 \cos\varphi$	P ——输入功率, kW	 <p>自然特性</p>	<p>(1) 笼型电动机 简单, 耐用, 可靠, 易维护, 价格低, 特性硬, 但启动和调速性能差, 轻载时功率因数低。一般在可调频率电源供电下可平滑调速。变极数多速电动机可分级变速调节, 但体积大, 价格较贵</p> <p>(2) 绕线式电动机 因有滑环, 比笼型电动机维护麻烦, 价格也稍贵, 转子串电阻的特性属软特性, 随负载转矩的增加, 电机转速显著下降, 但它启动转矩大, 启动时功率因数高, 且可进行小范围的速度调节, 控制设备简单, 故广泛用于各种生产机械, 尤其是电网容量小、启动次数多的机械, 如提升机、起重机及轧钢机械等</p>	
	$T = \frac{m_1}{\omega_s} \cdot \frac{U_1^2 r_2' s}{(r_1 s + r_2')^2 + s^2 x_k^2}$	m_1 ——相数			 <p>不同转子电阻 ($U_1 = \text{常数}$)</p>
	$s_{cr} = \pm \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}}$	U_1 ——定子相电压, V			
	$x_k = x_1 + x_2'$	I_1 ——定子相电流, A	 <p>不同电源电压 ($R_2 = \text{常数}$)</p>		
	$T_{cr} = \pm \frac{m_1 U_1^2}{2\omega_s (\sqrt{r_1^2 + x_k^2} \pm r_1)}$	$\cos\varphi$ ——功率因数			 <p>各种运行状态</p>
	$T = \frac{2T_{cr}(1+q)}{\frac{s}{s_{cr}} + \frac{s_{cr}}{s} + 2q}$	T ——电磁转矩, N·m			
	$s_{cr} = s_N (\lambda_T + \sqrt{\lambda_T^2 - 1})$	r_1 ——定子相电阻, Ω	<p>发电状态</p> <p>反接制动</p> <p>能耗制动</p> <p>电动状态</p> <p>反转</p>		
	$\lambda_T = \frac{T_{cr}}{T_N}$	r_2' ——折算到定子侧的转子相电阻, Ω			
	$T_s = \frac{m_1}{\omega_s} \cdot \frac{U_1^2 r_2'}{(r_1 + r_2')^2 + x_k^2}$	x_1 ——定子电抗, Ω	<p>反转</p>		
	$s = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s}$	x_2' ——折算到定子侧的转子电抗, Ω			
	$\omega_s = \frac{2\pi n_s}{60}$	x_k ——短路电抗, Ω	<p>各种运行状态</p>		
	$n_s = \frac{60f_1}{p}$	s ——转差率			
	$q = \frac{r_1}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}}$	s_N ——额定转差率	<p>各种运行状态</p>		
	大电机的 r_1 很小, 可以忽略, 则	s_{cr} ——临界转差率			
	$s_{cr} \approx \frac{r_2'}{x_k}$	λ_T ——转矩过载倍数	<p>各种运行状态</p>		
$T_{cr} \approx \frac{m_1 U_1^2}{2\omega_s x_k}$	T_N ——额定转矩, N·m				
	T_{cr} ——临界转矩, N·m	<p>各种运行状态</p>			
	T_s ——启动转矩, N·m				
	ω ——角速度, rad/s	<p>各种运行状态</p>			
	ω_s ——同步角速度, rad/s				
	n_s ——同步转速, r/min	<p>各种运行状态</p>			

类型	特性公式	符号	特性曲线	性能
交流电动机 异步电动机	$T \approx \frac{2T_{cr}}{\frac{s}{s_{cr}} + \frac{s_{cr}}{s}}$ $T_s \approx \frac{m_1}{\omega_s} \cdot \frac{U_1^2 r_2'}{r_2'^2 + x_k^2}$	f_1 —— 供电频率, Hz p —— 磁极对数 q —— 系数		
同步电动机	$n_s = \frac{60f_1}{p}$ $T_s = \frac{9.55m_1 U_1 E_0 \sin\theta}{n_s x_s}$ $T_{max} = \frac{9.55m_1 U_1 E_0}{n_s x_s}$	E_0 —— 空载电势, V θ —— 电势与电压的相角差 T_s —— 同步转矩, N·m x_s —— 同步电抗, Ω		负载转矩在允许限度内变化时, 其转速保持恒定, 功率因数可调节。价格贵, 一般只在不需调速的高压、低速、大容量的机械上采用, 能提高功率因数
直流电动机	$E = K_c \Phi n = C_e n$ $K_c = \frac{pN}{60a}$ $T = K_m \Phi I_a = C_m I_a$ $K_m = \frac{K_c}{1.03}$ $n = \frac{U - I_a (R_a + R)}{K_c \Phi}$ $n_s = \frac{U}{K_c \Phi}$ $n = \frac{U}{K_c \Phi} - \frac{R_a + R}{K_c K_m \Phi^2} T$ $T_N = 9550 \frac{P_N}{n_N}$	E —— 反电势, V Φ —— 磁通, Wb K_c —— 电机结构常数 K_m —— 电机结构常数 N —— 电枢绕组的导体总数 a —— 电枢绕组的支路对数 I_a —— 电枢电流, A U —— 电枢电压, V T —— 电磁转矩, N·m R_a —— 电枢电阻, Ω R —— 电枢回路附加电阻, Ω		调速性能好, 范围宽, 采用电子控制下, 能充分适应各种机械负载特性的需要, 但它的价格贵, 维护复杂, 且需直流电源, 因此只在交流电动机不能满足调速要求时才采用它。串励电动机的特点是启动转矩大、过载能力大、特性软, 适用于电力牵引机械和起重机等 复励电动机的启动转矩和过载能力比并励电动机大, 但调速范围稍窄。接成积复励时, 适用于启动转矩很大、负载具有强烈变化的设备

续表

类型	特性公式	符 号	特性曲线	性 能
直 流 电 动 机		T_N ——额定转矩, N·m T_l ——负载转矩, N·m P_N ——额定功率, kW C_e ——电机电势常数 C_m ——电机转矩常数	<p>他励电动机改变励磁 (虚线为恒功率调速)</p> <p>他励电动机各种运行状态</p>	

表 22-1-2 电机的定额及工作制 (GB 755—2000)

定额	工作制	负 载 图	负载持续率 FC	附 注
连 续	连续工作制 S1			P ——负载 P_v ——电气损耗 T ——在额定条件下运行时间 θ ——温度 θ_{max} ——达到的最高温度 t ——时间
短 时	短时工作制 S2			P ——负载 P_v ——电气损耗 Δt_p ——恒定负载运行时间 θ ——温度 θ_{max} ——在工作周期中达到的最高温度 t ——时间 短时定额时限优先采用 10、30、60 或 90min

定额	工作制	负载图	负载持续率 FC	附注
	断续周期工作制 S3		$FC = \frac{\Delta t_P}{T_C} \times 100\%$	<p>P、P_v、θ、t——同前（下同）</p> <p>T_C——负载周期</p> <p>Δt_P——恒定负载运行时间</p> <p>Δt_R——停机和断能时间</p> <p>θ_{max}——在工作周期中达到的最高温度</p>
周 期 工 作	包括启动的断续 S4		$FC = \frac{\Delta t_D + \Delta t_P}{T_C} \times 100\%$	<p>T_C——负载周期</p> <p>Δt_D——启动/加速时间</p> <p>Δt_P——恒定负载运行时间</p> <p>Δt_R——停机和断能时间</p> <p>θ_{max}——在工作周期中达到的最高温度</p>
	包括电制动的断续 S5		$FC = \frac{\Delta t_P}{T_C} \times 100\%$	<p>T_C——负载周期</p> <p>Δt_P——恒定负载运行时间</p> <p>Δt_D——启动/加速时间</p> <p>Δt_F——电制动时间</p> <p>Δt_R——停机和断能时间</p> <p>θ_{max}——在工作周期中达到的最高温度</p>
	连续周期工作制 S6		$FC = \frac{\Delta t_P}{T_C} \times 100\%$	<p>θ_{max}——在工作周期中达到的最高温度</p>

续表

定额	工作制	负载图	负载持续率 FC	附注
周期工作	包括周期制工作的连续制 S7		$FC = 1$	T_C ——负载周期 Δt_P ——恒定负载运行时间 Δt_D ——启动/加速时间 Δt_F ——电制动时间 θ_{max} ——在工作周期中达到的最高温度
	包括的连续周期工作制 S8		$FC_1 = \frac{\Delta t_D + \Delta t_{P1}}{T_C} \times 100\%$ $FC_2 = \frac{\Delta t_{F1} + \Delta t_{P2}}{T_C} \times 100\%$ $FC_3 = \frac{\Delta t_{F2} + \Delta t_{P3}}{T_C} \times 100\%$	T_C ——负载周期 Δt_{P1} 、 Δt_{P2} 、 Δt_{P3} ——在额定条件下运行时间 Δt_{F1} 、 Δt_{F2} ——电制动时间 Δt_D ——启动/加速时间 θ_{max} ——在工作周期中达到的最高温度

注：周期工作制 (S3~S8)，除非另有规定，工作周期的持续时间为 10min，负载持续率应为下列数值之一：15%，25%，40%，60%。

表 22-1-3

电动机的发热与温升

损耗与发热	电动机运行过程中有能量损耗，可分为固定损耗和可变损耗。固定损耗包括铁损及机械损耗，与负载无关，一般型电动机此项数值较小；可变损耗主要是铜损，它与电枢电流的平方成比例。损耗导致发热	
电机的温升	发热达到热平衡时电机温度与环境温度之差称电动机的温升	
电动机的热平衡方程式	$Qdt = Cdr + A\tau dt$ <p>式中 Q——单位时间内电动机所产生的热量，kJ/s</p> $Q = \Delta P$ <p>ΔP——电动机功率损耗，kW</p> <p>C——电动机热容量，即使电动机温度升高 1℃所需的热量，kJ/℃</p> <p>A——电动机的散热率，即电动机与周围环境温度相差 1℃时，单位时间内电机散发到周围空气中的热量，kJ/(s·℃)</p> <p>τ——电动机温升，℃</p> <p>在 $t=0$、$\tau=0$ 的初始条件下：</p> $\tau = \tau_{st} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$	$\tau_{st} = \frac{Q}{A}$ $T = \frac{C}{A}$ <p>式中 τ_{st}——电动机温升稳定值，℃</p> <p>T——电动机发热时间常数，s</p> <p>可以看出，温升按指数规律随时间的增加而逐渐趋于稳定值</p> <p>Q 的大小主要取决于铜损 (I^2R)，也即主要取决于负载的大小。T 与电机的构造尺寸有关。小型电动机一般为 0.5h 左右，大型电动机一般为 3~4h。电机的冷却时间常数为发热时间常数的 2~3 倍，采用强迫通风时，两者相等</p>

电机的绝缘等级与允许温升	<p>电机的绝缘等级决定于所采用的绝缘材料的耐热等级（热分级）。若电机的主要部件采用不同耐热等级的绝缘材料，则其绝缘等级按绝缘材料的最低耐热等级考核。一般用途的中小型电机常选用较低的耐热等级的绝缘材料，如 E 级、B 级；有特殊要求的如高温环境、频繁启动的电机，则采用较高耐热等级的绝缘材料。但有时为了提高电机的使用寿命与可靠性，往往也采用较高耐热等级的绝缘材料，但其温升按较低等级考核</p> <p>电机的允许温升决定于：(1) 电机的绝缘等级；(2) 电机的使用环境（如海拔和环境温度等）；(3) 电机各绕组的冷却方法；(4) 绕组温升的测量方法。中小电机各部件的温升限值及测量方法见表 22-1-4。电机轴承允许温升：滚动轴承为 95℃，滑动轴承为 80℃</p> <p>电动机铭牌标示的额定功率应理解为，当电动机在额定条件下长期运行时，因发热而升高的温度恰好达到制造厂所规定的允许温升（即额定温升）数值。电动机的选择与使用，都以不超过额定温升为原则</p>
--------------	--

表 22-1-4

空气间接冷却绕组的温升限值（GB 755—2000）

K

热 分 级		A			E			B			F			H		
		Th	R	ETD	Th	R	ETD	Th	R	ETD	Th	R	ETD	Th	R	ETD
测量方法		Th	R	ETD	Th	R	ETD	Th	R	ETD	Th	R	ETD	Th	R	ETD
项号	电机部件															
1a)	输出 5000kW（或 kVA）及以上电机的交流绕组	—	60	65 ^①	—	—	—	—	80	85 ^①	—	100	105 ^①	—	125	130 ^①
1b)	输出 200kW（或 kVA）以上但小于 5000kW（或 kVA）电机的交流绕组	—	60	65 ^①	—	75	—	—	80	90 ^①	—	105	110 ^①	—	125	130 ^①
1c)	项 1d) 或项 1e) 以外的输出为 200kW（或 kVA）及以下电机的交流绕组 ^②	—	60	—	—	75	—	—	80	—	—	105	—	—	125	—
1d)	额定输出小于 600W（或 VA）电机的交流绕组 ^②	—	65	—	—	75	—	—	85	—	—	110	—	—	130	—
1e)	无扇自冷式电机（IC410）的交流绕组和/或囊封式绕组 ^②	—	65	—	—	75	—	—	85	—	—	110	—	—	130	—
2	带换向器的电枢绕组	50	60	—	65	75	—	70	80	—	85	105	—	105	125	—
3	除项 4 外的交流和直流电机的磁场绕组	50	60	—	65	75	—	70	80	—	85	105	—	105	125	—
4a)	同步感应电动机以外的用直流励磁绕组嵌入槽中的圆柱形转子同步电机的磁场绕组	—	—	—	—	—	—	—	90	—	—	110	—	—	135	—
4b)	一层以上的直流电机静止磁场绕组	50	60	—	65	75	—	70	80	90	85	105	110	105	125	135
4c)	交流和直流电机单层低电阻磁场绕组以及一层以上的直流电机补偿绕组	60	60	—	75	75	—	80	80	—	100	100	—	125	125	—
4d)	表面裸露或仅涂清漆的交流和直流电机的单层绕组以及直流电机的单层补偿绕组 ^③	65	65	—	80	80	—	90	90	—	110	110	—	135	135	—

① 对高压交流绕组的修正可适用于这些项目，见 GB 755 表 8，项 4。

② 对 200kW（或 kVA）及以下，绝缘等级为 A、B、E 和 F 级的电机绕组，如用叠加法，温升限值可比电阻法高 5K。

③ 对于多层绕组，如下面各层均与循环的初级冷却介质接触，也包括在内。

注：Th 为温度计法；R 为电阻法；ETD 为埋置检温计法。

2 电动机的选择

2.1 选择电动机应综合考虑的问题

(1) 根据机械的负载性质和生产工艺对电动机的启动、制动、反转、调速等要求，选择电动机类型。

(2) 根据负载转矩、速度变化范围和启动频繁程度等要求，考虑电动机的温升限制、过载能力和启动转矩，选择电动机功率，并确定冷却通风方式。所选电动机功率应留有余量，负荷率一般取 0.8~0.9。过大的备用功率会使电机效率降低，对于感应电动机，其功率因数将变坏，并使按电动机最大转矩校验强度的生产机械造价提高。

(3) 根据使用场所的环境条件，如温度、湿度、灰尘、雨水、瓦斯以及腐蚀和易燃易爆气体等考虑必要的保护方式，选择电动机的结构型式。

(4) 根据企业的电网电压标准和对功率因数的要求，确定电动机的电压等级和类型。

(5) 根据生产机械的最高转速和对电力传动调速系统的过渡过程性能的要求，以及机械减速机构的复杂程度，选择电动机额定转速。

除此之外，选择电动机还必须符合节能要求，考虑运行可靠性、设备的供货情况、备品备件的通用性、安装检修的难易，以及产品价格、建设费用、运行和维修费用、生产过程中前后期电动机功率变化关系等各种因素。

2.2 电动机选择顺序

选择电动机的顺序，一般可参考图 22-1-1 框图进行。

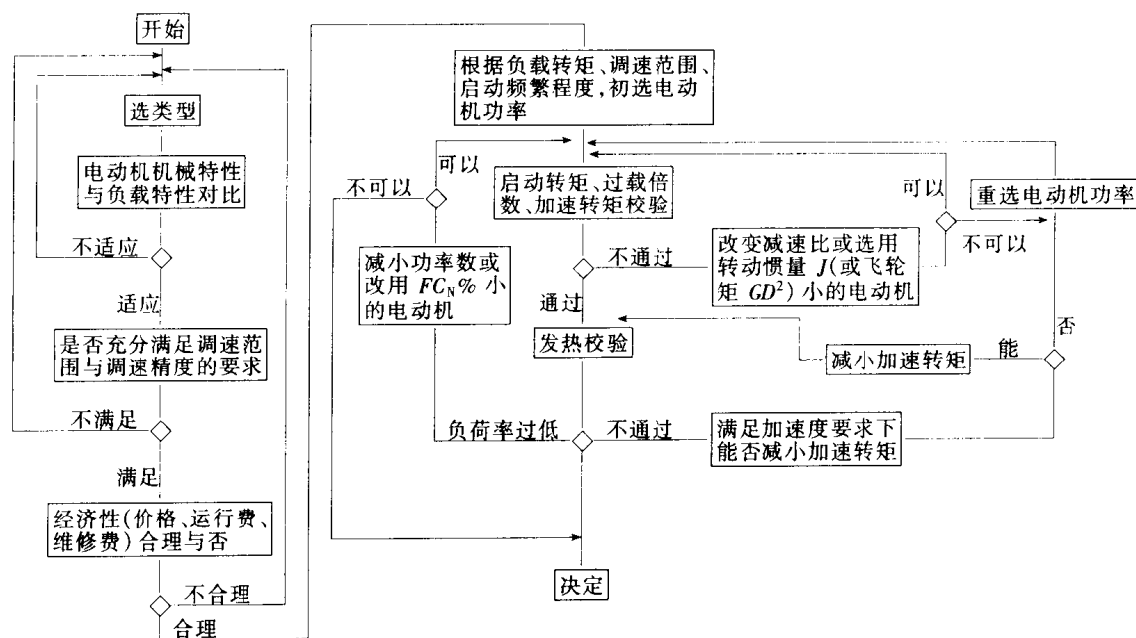


图 22-1-1

2.3 电动机类型选择

表 22-1-5

电动机类型选择

负载类别	选用电动机类型
恒转矩和通风机负载特性的机械	选用机械特性为硬特性的电动机较适宜
恒功率负载特性的机械	选用调励磁的变速直流电动机或带有机 械变速的交流异步电动机

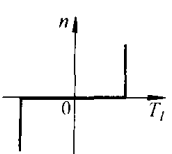
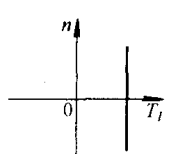
负 载 类 别			选用电动机类型	
无 调 速 要 求 的 机 械	负载平稳, 对启动、制动无特殊要求的长期运行的机械		小功率	选用普通笼型电动机
			大功率	采用同步电动机
	带周期性变动负载的机械(如带飞轮), 或启动条件沉重时	大中功率		采用绕线型电动机
		小功率, 经过载能力及启动条件校验通过的		采用高转差率电动机
		单纯因启动条件沉重的机械	经启动条件校验通过	采用双笼型或深槽型电动机
若启动校验通不过, 或启动时电网电压降过大	采用绕线型电动机			
某些断续运行的机械虽无调速要求, 但采用交流电动机在发热、启动、制动特性等方面不能满足要求或技术经济指标过低时			采用直流电动机	
需 调 速 的 机 械	只要求几种转速的小功率机械		采用变换定子极数的多速(双速、三速、四速)笼型电动机	
	对调速平滑程度要求不高, 且调速比不大时		采用绕线型电动机或电磁调速电动机	
	调速范围在 1:3 以上	需连续稳定平滑调速的机械		采用直流电动机或变频调速电动机
		需启动转矩大的机械(如电车、牵引机车)		采用直流串励电动机
	某些特殊场所(如要求防爆)又需平滑调速时		采用由变频电源供电的笼型电动机	
	某些要求调速范围不大(1:2左右)的大功率机械(如风机、水泵)以及无频繁启动、制动要求和无冲击性负载的机械		采用带有串级调速装置的绕线型电动机(可使电能回馈电网, 提高经济指标)	
要求调速范围很大, 且具有恒功率负载特性的机械			采用机械电气联合调速型式(可节省电动机装机容量)	

表 22-1-6 电动机类型选择参考表

序 号	负载性质		生产机械工作状态					选用电动机类型				
	平 稳	冲 击	长 期	短 时	断 续	调 速	飞 轮 储 能	异步电动机		同 步 电 动 机	直 流 电 动 机	
								笼 型	绕 线 型		他 励	串 励
1	✓		✓					②	✓	①		
2	✓			✓				✓				
3	✓				✓			✓			✓	✓
4		✓			✓						✓	
5		✓					✓		✓			
6		✓							③		✓	⑤
7	✓							③④	③		✓	✓

- ① 对于小功率机械, 或启动次数较多而电网容量不大易受冲击时, 不推荐采用同步电动机。
- ② 对于大中型机械, 当电网容量不大时, 不宜选用笼型电动机, 而选用绕线型电动机。
- ③ 异步电动机需带调速装置(一般为转子外接电阻方式, 还有采用滑差离合器、涡流制动器、串级或变频等方式)。
- ④ 指小功率机械只要求几级速度时, 采用多速笼型电动机。
- ⑤ 需要启动转矩大的机械(如电车、牵引机车等)采用串励直流电动机。

表 22-1-7 生产机械负载特性 $n = f(T_l)$ 的分类

负载类别	负载特性	基本特性图	机械举例	负载类别	负载特性	基本特性图	机械举例
恒转矩负载 反抗性	$T_l \propto n^0$ $T_l = \text{常数}$		刨削加工、外圆切削、金属压延、平移运动	恒转矩负载 位势性	$P_l \propto n$ $T_l \propto n^0 $		起重、提升机械

续表

负载类别	负载特性	基本特性图	机械举例	负载类别	负载特性	基本特性图	机械举例
通风机负载	$T_l \propto n^2$ (不计空载转矩下) $P_l \propto n^3$		风机、水泵、油泵	恒功率负载	$T_l \propto n^{-1}$ $P_l = \text{常数}$		恒张力卷取、端面车削加工

表 22-1-8 按环境条件选择电动机的类型

环境条件	要求的防护型式	可选用的电动机类型举例	环境条件	要求的防护型式	可选用的电动机类型举例	
正常环境条件	一般防护型	各类普通型电动机	有腐蚀性气体或游离物	化工防腐型或采用管道通风		
湿热带或潮湿场所	湿热带型	1. 湿热带型电动机 2. 普通型电动机加强防潮处理	有爆炸危险的场所 ^②	0级区域(0区)	隔爆型、防爆通风充气型	
干热带或高温车间	干热带型	1. 干热带型电动机 2. 采用高温升等级绝缘材料的电动机或外加管道通风		1级区域(1区)	任意防爆类型	
				2级区域(2区)	防护等级不低于IP43	
粉尘较多的场所	封闭型或管道通风型			10级区域(10区)	任意一级隔爆型、防爆通风充气型	YB、BJO3、JBR、1JB、JBJ等
户外、露天场所	气候防护型, 外壳防护等级不低于IP23 ^① , 接线盒应为IP54。封闭型电动机外壳防护等级应为IP54			11级区域(11区)	防护等级不低于IP44 ^③	
			H-1级	防护等级至少应为IP22 ^④		
户外, 有腐蚀性及爆炸性气体	户外、防腐、防爆型, 防护等级不低于IP54	YBDF-WF	H-2级	防护等级至少应为IP44		
			H-3级	防护等级至少应为IP44		
			水中	潜水型	YQS2、JQS、JQB、QY、JLB2、JQSY	

- ① IP的分级及定义详见 GB 4208—1993(外壳防护等级)。
- ② 爆炸和火灾危险场所的分级详见《爆炸和火灾危险场所电气设备装置设计技术规定》。
- ③ 电机正常发生火花部件(如集电环)应装在下列类型之一的罩子内: 任意一级隔爆型、防爆通风型、充气型以及防护等级为IP57的罩子。
- ④ 具有正常工作发生火花部件(如集电环)的电动机最低应为IP43。

2.4 电动机电压和转速的选择

表 22-1-9 电动机电压和功率范围

交流电动机				直流电动机	
电压/V	功率范围/kW			电压/V	功率范围/kW
	同步电动机	异步电动机			
		笼型	绕线型		
380	3 ~ 320	0.37 ~ 320	0.6 ~ 320	110	0.25 ~ 110
3000	250 ~ 2200	90 ~ 2500	75 ~ 3200	220	0.25 ~ 320
6000	250 ~ 10000	200 ~ 5000	200 ~ 5000	440	1.0 ~ 500
10000	1000 ~ 10900	—	—	600 ~ 870	500 ~ 4600

供电系统电压为 10kV 时:
 (1) 大功率同步电动机采用 10kV 直接供电为宜
 (2) 中等功率电动机视降压变压器而定。如用三线圈变压器, 则应采用 6kV 电动机; 如用双线圈变压器, 电动机电压应做经济比较后确定。若采用 10/3kV 与 10/6kV 变压器差别不大时, 宜用 6kV 电动机

供电系统电压为 6kV 时:
 (1) 大、中功率电动机均应采用 6kV 直接供电
 (2) 小功率电动机一般选用 380V 电压

直流电动机常用 220V, 随电动机功率的增大, 采用的电压等级也相应提高, 一般需经电动机、电缆、控制设备等各项投资的综合比较而确定

电动机的转速选择

电动机额定转速是根据生产机械的要求而选定的。在确定电动机额定转速时，必须考虑机械减速机构的传动比值，两者相互配合，经过技术、经济全面比较才能确定。通常，电动机转速不低于 500r/min，因为当功率一定时，电动机的转速愈低，则其尺寸愈大，价格愈贵，而且效率也较低，如选用高速电动机，势必加大机械减速机构的传动比，致使机械传动部分复杂起来。

对于一些不需调速的高、中速机械，如水泵、鼓风机、空气压缩机等，可选用相应转速的电动机不经机械减速机构直接传动。需要调速的机械，电动机的最高转速应与生产机械转速相适应。若采用改变励磁的直流变速电动机时，为充分利用电动机容量，应选好调磁调速的基速。又如某些轧钢机械、提升机等，工作速度较低，经常处于频繁地正、反转运行状态，为缩短正、反转过渡时间，提高生产效率，降低消耗，并减小噪声，节省投资，选择适当的低速电动机，采用无减速机的直接传动更为合理。

要求快速频繁启、制动的机械，通常是电动机的转动惯量与额定转速平方的乘积（即 $J_D n_N^2$ 值）为最小时，能获得启动、制动最快的效果。在空载（或负载很小可以忽略）情况下启、制动时，为达到快速的目的，按下式考虑最为合理：

$$J_D n_N^2 = J_m n_m^2$$

即所谓最佳传动比为：

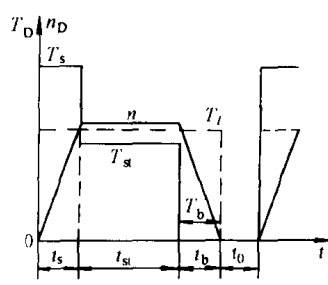
$$i_j \approx \sqrt{\frac{J_m}{J_D}}$$

- 式中 J_D ——电动机转子的转动惯量， $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ ；
 n_N ——电动机额定转速， r/min ；
 J_m ——生产机械在机械轴上的转动惯量， $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ ；
 n_m ——生产机械轴转速， r/min 。

2.5 电动机功率计算

计算电动机功率时，首先根据生产机械的负载功率初选电动机功率，再校核初选电动机的过载能力、启动能力和发热。

表 22-1-10 初选电动机功率

绘制负载图	首先算出（或通过实测及对比得出）生产机械静阻负载图 $T_D = f(t)$ 或 $P = f(t)$ ，然后根据本表公式初步计算电动机轴功率，根据计算功率并考虑一定的余量再初选电动机功率，随着调速范围和启动频繁程度的提高，余量系数也应随之加大 为了验算初选电动机是否合适，需要根据负载状态、生产机械的工艺参数和初选电动机的参数，根据本表公式计算电动机动态转矩和加减速时间，绘制电动机转矩负载图 $T_D = f(t)$ 或电流负载图 $I_D = f(t)$ ，功率负载图 $P = f(t)$ ，右图是转矩负载图		
	电动机转矩负载图 $T_D = f(t)$ 及速度图 $n_D = f(t)$		
常用计算公式	名称 一般旋转运动的机械	公式 $P = \frac{T_D n_D}{9550}$ $P = \frac{T_D \omega_D}{1000}$ $\omega_D = \frac{\pi n_D}{30}$	符号 P ——电动机功率，kW T_D ——电动机转矩， $\text{N}\cdot\text{m}$ n_D ——电动机转速， r/min ω_D ——电动机角速度， rad/s

续表

常用 计算 公式	名称	公式	符号
	离心式通风机	$P = \frac{KQH^{(1)}}{1000\eta\eta_c}$	<p>P——电动机功率, kW K——余量系数 (见表 22-1-12) Q——空气耗量, m^3/s H——空气压力, Pa η——风机效率, 约为 0.4~0.75⁽²⁾ η_c——传动效率, 直接传动时 $\eta_c = 1$</p>
	离心泵及活 塞泵	$P = \frac{K\rho g Q(H + \Delta H)^{(1)}}{1000\eta\eta_c}$	<p>P——电动机功率, kW K——余量系数 (见表 22-1-13) Q——泵的出水量, m^3/s H——水头 (扬程), m ΔH——主管损失水头, m η——泵的效率, 一般取 0.6~0.84⁽²⁾ η_c——传动效率, 直接传动时 $\eta_c = 1$ ρ——液体的密度, kg/m^3, 对于水 $\rho = 1000kg/m^3$ g——重力加速度, $g = 9.81m/s^2$</p>
	离心式压缩 机	$P = \frac{Q}{1000\eta} \left(\frac{A_d + A_r}{2} \right)$	<p>P——电动机功率, kW Q——压缩机的生产率, m^3/s A_d——压缩 $1m^3$ 空气至绝对压力 p_1 的等温功, J (见表 22-1-11) A_r——压缩 $1m^3$ 空气至绝对压力 p_1 的绝热功, J (见表 22-1-11) η——压缩机总效率, 约为 0.62~0.8</p>
	直线运动机 械	$P = \frac{Fv}{1000\eta}$	<p>F——作用力, N v——运动速度, m/s η——传动效率</p>
运动物体的动能	$E = \frac{J\omega^2}{2} = \frac{GD^2 n^2}{7150}$ $E = \frac{mv_m^2}{2}$	<p>E——运动物体的动能, J m——物体的质量, kg J——折算到电机轴上的转动惯量, $kg \cdot m^2$ GD^2——折算到电机轴上的总飞轮矩, $N \cdot m^2$</p>	
折算到电动机轴 上的静阻负载转矩	$T_l = T_m \frac{1}{i\eta}, \quad i = \frac{n_D}{n_m}$ $T_l = F \frac{v_m}{\omega_D} \cdot \frac{1}{\eta}$ $T_l = \frac{FR}{i\eta}$	<p>T_l——电动机轴上的静阻负载转矩, $N \cdot m$ T_m——机械轴上的静阻转矩 (包括摩擦阻转矩), $N \cdot m$ R——物体运动的旋转半径, m i——传动比 n_m——机械轴转速, r/min</p>	
折算到电动机轴 上的动态转矩	$T_d = T_D - T_l = J \frac{d\omega}{dt} = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt}$	<p>J_m——机械轴上的转动惯量, $kg \cdot m^2$ GD_m^2——机械轴上的飞轮矩, $N \cdot m^2$</p>	
折算到电动机轴 上的转动惯量和飞 轮矩	$J = J_m / i^2$ $GD^2 = GD_m^2 / i^2$ $GD^2 = 365 G_m v_m^2 / n_D^2$ $GD^2 = 4gJ$ $GD^2 = GD_b^2 + \frac{GD_{m1}^2}{i_1^2} + \frac{GD_{m2}^2}{i_2^2} + \dots + \frac{GD_{mn}^2}{i_n^2}$ $i_1 = \frac{n_D}{n_{m1}}, \quad i_2 = \frac{n_D}{n_{m2}}, \quad \dots, \quad i_n = \frac{n_D}{n_{mn}}$	<p>g——重力加速度, m/s^2 G_m——直线运动物体的重力, N v_m——直线运动物体的速度, m/s ω_D——电动机角速度, rad/s GD_b^2——电动机转子飞轮矩, $N \cdot m^2$ $GD_1^2, GD_2^2, \dots, GD_n^2$——相应于转速 $n_{m1}, n_{m2}, \dots, n_{mn}$ 的轴上的飞轮矩 i_1, i_2, \dots, i_n——各轴对电动机轴的传动比</p>	

名称	公式	符号
电动机启、制动时间 (1) 动态转矩恒定下启动(加速)、制动(减速)时间	$t_s = \frac{GD^2 (n_2 - n_1)}{375 T_d}$ 加速时: $T_d = T_D - T_l$ $t_b = \frac{GD^2 (n_1 - n_2)}{375 (-T_d)}$ 减速时: $-T_d = -(T_D + T_l)$	t_s ——启动(加速)时间, s t_b ——制动(减速)时间, s v_0 ——初始速度, m/s a ——加(减)速度, m/s ² T_l ——静阻负载转矩, N·m T_D ——电动机转矩, N·m T_d ——动态(加减速)转矩, N·m
(2) 动态转矩线性变化下的启动、制动时间	$t_s = \frac{GD^2 (n_2 - n_1)}{375 (T_{D1} - T_{D2})} \ln \frac{T_{D1} - T_l}{T_{D2} - T_l}$ $t_b = \frac{GD^2 (n_2 - n_1)}{375 (T_{D1} - T_{D2})} \ln \frac{T_{D1} + T_l}{T_{D2} + T_l}$	s ——行程, m N ——电动机转过的转数
(3) 动态转矩非恒定也非线性变化时的启动、制动时间	$t_s = \frac{GD^2}{375} \int_{n_1}^{n_2} \frac{dn}{T_d}$ ($T_d > 0$ 时加速) $t_b = \frac{GD^2}{375} \int_{n_2}^{n_1} \frac{dn}{T_d}$ ($T_d < 0$ 时减速)	
行程 (1) 等变速直线运动时 (2) 动态转矩恒定时, 加减速过程电动机转过的转数	(1) $s = v_0 t_s + \frac{1}{2} a t_s^2$ (加速) $s = v_0 t_b - \frac{1}{2} a t_b^2$ (减速) (2) $N = \frac{GD^2 (n_2^2 - n_1^2)}{45000 T_d}$	

① 考虑偶然过载, 所选电动机功率应大于计算功率, 其容量附加值见表 22-1-12 及表 22-1-13。

② 此数据为参考值, 实际数据以制造厂提供的为准。

表 22-1-11 A_d 、 A_r 与终点压力 p_1 的关系

p_1 /MPa	0.15	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
A_d /J	39700	67700	108000	136000	158000	176000	191000	204000	216000	226000
A_r /J	42200	75500	127000	168000	201000	230000	256000	280000	301000	321000

表 22-1-12 离心风机电动机容量附加值

功率/kW	1.0 以下	1~2	2~5	> 5.0
附加值/%	100	50	25	15~10
K	2	1.5	1.25	1.15~1.1

表 22-1-13 离心泵电动机容量附加值

功率/kW	2.0 以下	2~5	5~50	50~100	100 以上
附加值/%	70	50~30	15~10	8~5	5
K	1.7	1.5~1.3	1.15~1.10	1.08~1.05	1.05

表 22-1-14 电动机过载能力和平均启动转矩的校验

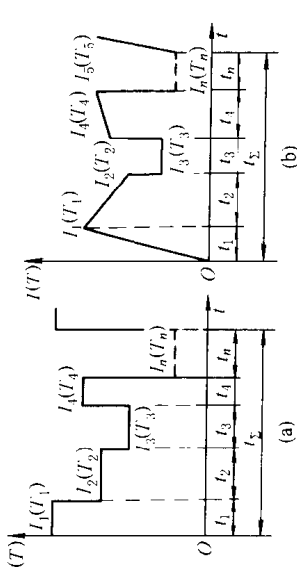
电动机类型	工作制	λ_T	电动机瞬时过载一般不会造成电动机过热, 故不考虑发热问题。交流电动机的瞬时过载能力受临界转矩的限制, 直流电动机则受换向器火花的限制 直流电动机允许过载能力常以允许的电流过载倍数 λ_1 来衡量。一般型直流电动机允许电流过载倍数为 1.5 倍。大中型直流电动机 (Z 型) 在接近额定转速下电流过载倍数为: 有补偿绕组的一般为 2.5 倍, 允许持续 15s; 无补偿绕组的一般为 1.5 倍, 允许持续 1min。转速超过额定值时, 电流过载倍数要相应下降
电动机短时允许转矩过载倍数 λ_T	笼型电动机	连续工作制 (S1) (一般型) 断续周期性工作制 (S3~S5) (冶金及起重用)	≥ 1.65 ≥ 2.5
	绕线电动机	连续工作制 (S1) (一般型) 断续周期性工作制 (S3~S5) (冶金及起重用)	≥ 1.8 ≥ 2.5
	直流电动机 (额定励磁下)	连续工作制 (S1) (一般型)	≥ 1.5
		断续周期性工作制 (S3~S5) (冶金及起重用)	≥ 2.5

电动机	过载能力	励磁方式	额定电压下			起动或转速 $n \leq 20\% n_N$			电动机过载倍数校验的公式为： 直流电动机 $I_{max} \leq k\lambda_1 I_N$ 异步电动机 $T_{max} \leq k k_u^2 \lambda_T T_N$ 同步电动机 $T_{max} \leq k\lambda_T T_N$ 式中 I_{max} ——瞬时最大负载电流，A T_{max} ——瞬时最大负载转矩，N·m λ_1 ——允许电流过载倍数 λ_T ——允许转矩过载倍数 I_N ——电动机额定电流，A T_N ——电动机额定转矩，N·m k_u ——电压波动系数，取 0.85 k ——余量系数。直流电动机取 0.9 ~ 0.95；交流电动机取 0.9 为了减少对电网冲击，断续工作制电动机通常不用到最大过载能力
			ZZY 系列	ZZJ 系列		ZZY 系列	ZZJ 系列		
			220V	220V	440V	220V	220V	440V	
断续周期工作制 (S3) 直流电动机 短时允许转矩过载倍数 λ_T (FC = 25%)	串励	4.0	4.0	3.2	5.0	5.0	4.0		
	复励	3.5	3.5	2.8	4.5	4.5	3.6		
	并励 (额定励磁)	3.0	2.7	2.2	3.0	3.0	2.4		
冶金起重型直流电动机 短时允许过载电流倍数 λ_i (FC = 25%)	励磁方式	自然冷却式过载电流倍数							
		220V			440V				
		ZZY	ZZJ	ZZJ					
	串励	3.0	3.2	2.55					
复励	2.8	3.0	2.4						
并励	2.6	2.8	2.25						
在额定电压及相应转速下，上述过载电流倍数能承受 1min，此时，换向器上允许有三级火花									
电动机	的平均启动转矩	电动机类型		平均启动转矩				异步电动机和同步电动机的异步启动，在启动过程中，其机械特性为非线性，加速转矩是一变量，因此平均启动转矩的计算，需取得电机制造厂给出的数据后才能确定。表中所列概略值，可供初步计算选用。表中系数较大者用于要求快速启动的场合 启动条件沉重的机械，需要进行启动转矩校验。如果交流电动机采用直接启动时，则按下式进行校验： $k_u^2 k_{min} T_N \geq k_s T_{is}$ 式中 T_N ——电动机额定转矩，N·m T_{is} ——启动时电动机轴上的静阻转矩，N·m k_u ——最小启动电压与额定电压之比，取 0.85 k_{min} ——电动机最小启动转矩与额定转矩之比 k_s ——保证启动有足够的加速系数。应根据启动加速时间的要求和电动机轴上的飞轮矩计算得来。如无明确要求，则取为 1.2 ~ 1.5	
		直流电动机		$T_{stav} = 1.3 \sim 1.4 T_N$					
		同步电动机		$T_{stav} = 0.5(T_s + T_{pi})$ $T_{stav} = (1.0 \sim 1.1) T_s$					
		笼型电动机		$T_{stav} = (0.45 \sim 0.5)(T_s + T_{cr})$ $T_{stav} = 0.9 T_s$					
		冶金起重型		$T_{stav} = 0.9 T_s$					
		冶金起重用绕线电动机		$T_{stav} = (1.0 \sim 2.0) T_{N.25}$					
T_{stav} ——平均启动转矩，N·m T_s ——堵转转矩，N·m ($s = 1$ 时) T_{pi} ——引入转矩，N·m T_{cr} ——最大转矩，N·m $T_{N.25}$ ——当 FC = 25% 时的额定转矩，N·m									

表 22-1-15 连续工作制下电动机容量的校验

负载状态	计算公式	符 号	说 明
在基速以下工作	$P_N \geq P_L = \frac{T_L n_N}{9550} \quad (\text{kW})$	P_N ——电动机额定功率, kW P_L ——折算到电动机轴上的负载功率, kW T_L ——折算到电动机轴上的负载转矩, N·m n_N ——电动机额定转速, r/min n_{\max} ——电动机的最高工作转速, r/min T_{\min} ——电动机的最小启动转矩, N·m T_{\max} ——启动过程中可能出现的最大负载转矩, N·m	对启动条件沉重(静阻转矩大或带有较大的飞轮矩)而采用笼型异步电动机或同步电动机传动的场合,在初选电动机的额定功率和转速之后,还要分别校验启动过程中的最小启动转矩 T_{\min} 和允许的最大飞轮矩 GD_{\max}^2 , 以保证生产机械能顺利地启动和在启动过程中电动机不致过热
从基速向上调整	$P_N \geq P_L = \frac{T_L n_{\max}}{9550} \quad (\text{kW})$	K_s ——保证启动时有足够加速转矩的系数, 一般取 1.15 ~ 1.25 K_u ——电压波动系数, 即启动时电动机端电压与额定电压之比, 全电压启动时取 0.85 GD_M^2 ——电动机转子飞轮矩, N·m ² GD_{mec}^2 ——折算到电动机轴上的传动机械的最大飞轮矩, N·m ² GD_0^2 ——包括电动机在内的整个传动系统允许的最大飞轮矩, 折算到电动机轴上的数值, 由电动机资料中查取, N·m ² T_{av} ——电动机的平均启动转矩, N·m	
恒定负载	$T_{\text{Minin}} \geq \frac{T_{L\max} K_s}{K_u} \quad (\text{N} \cdot \text{m})$		
连续工作	$GD_{\text{sm}}^2 = GD_0^2 \left(1 - \frac{T_{L\max}}{T_{\text{av}} K_u} \right) - GD_M^2 \quad (\text{N} \cdot \text{m}^2)$		
校验启动过程最小转矩及最大飞轮矩	要求 $GD_{\text{sm}}^2 \geq GD_{\text{mec}}^2$ 若按上两项校验均能通过, 则所选电动机功率可以采用		
发热校验	(1) 等效电流法(见图 a) $I_{\text{ms}} = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \dots + I_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}} \quad (\text{A})$ 要求 $I_{\text{ms}} \leq I_N$ (2) 等效转矩法(见图 a) $T_{\text{ms}} = \sqrt{\frac{T_1^2 t_1 + T_2^2 t_2 + \dots + T_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}} \quad (\text{N} \cdot \text{m})$ 要求 $T_{\text{ms}} \leq T_N$	I_1, I_2, \dots, I_n ——电动机一个周期负载电流曲线近似似直线段的各个分段电流值, A T_1, T_2, \dots, T_n ——各分段转矩值, N·m P_1, P_2, \dots, P_n ——各分段功率值, kW t_1, t_2, \dots, t_n ——各分段负载持续时间, s $I_{\text{ms}}, T_{\text{ms}}, P_{\text{ms}}$ ——等效电流、转矩、功率	在这种工作制下, 电动机功率可先按等效(均方根)转矩或等效电流法, 算出一个周期内的等效转矩 T_{ms} 或等效电流 I_{ms} , 然后选取电动机的额定转矩 T_N 或额定电流 I_{N0} 。当负载波形是三角形或矩形时(图 b), 则应将每一个相应的时间间隔内的电流或转矩值换算成等效平均值后, 再用(1)或(2)的方法计算 I_{ms} 或 T_{ms}

续表

负载状态	计算公式	符 号	说 明
	<p>(3) 等效功率法</p> $P_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + \dots + P_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}} \quad (\text{kW})$ <p>要求 $P_{\text{rms}} \leq P_N$</p> <p>三角形电流线段的等效值(对应图 b 时间 t_1):</p> $I_{\text{jms}} = \sqrt{I^2/3} \quad (\text{A})$ $T_{\text{jms}} = \sqrt{T^2/3} \quad (\text{N}\cdot\text{m})$ <p>梯形电流线段的等效值(对应图 b 时间 t_2):</p> $I_{\text{rms}} = \sqrt{(I_1^2 + I_1 I_2 + I_2^2)/3} \quad (\text{A})$ $T_{\text{rms}} = \sqrt{(T_1^2 + T_1 T_2 + T_2^2)/3} \quad (\text{N}\cdot\text{m})$	<p>I_N, T_N, P_N——电动机额定电流、转矩、功率</p> <p>I_1——三角形电流曲线最高电流值, A</p> <p>T_1——三角形转矩曲线最高转矩值, N·m</p> <p>I_{jms}——三角形电流曲线等效电流值, A</p> <p>T_{jms}——三角形转矩曲线等效转矩值, N·m</p> <p>I_1, I_2——梯形电流曲线两腰高之值, A</p> <p>I_{rms}——梯形电流曲线等效电流值, A</p> <p>T_{rms}——梯形转矩曲线等效转矩值, N·m</p>	<p>等效法的条件是风损、铁损等与负载无关的损耗是不变的,而且数值较小,因此可以平均可变损耗代替平均总损耗</p> <p>等效电流法适用于各种类型电动机发热校验</p> <p>等效转矩法适用于转矩与电流成比例的情况。弱磁情况下需要修正。串励直流电动机不能应用</p> <p>等效功率法在额定电压和额定转速下,即功率与电流成比例时应用</p>
校验最大过载转矩	$T_N \geq T_{\text{Lmax}} / (0.9 K_u \lambda_T)$	<p>T_{Lmax}——最大负载转矩, N·m</p> <p>K_u——电网电压波动系数,一般同步机 $K_u = 0.85$; 直流机 $K_u = 1.0$; 异步电动机 $K_u = 0.72$</p> <p>λ_T——电动机转矩过载倍数,查电机资料</p> <p>0.9——考虑计算误差和参数波动而取的安全系数</p>	
校验启动过程的最小转矩及允许最大飞轮矩	<p>恒定负载连续工作制</p>		

变 动 负 载 连 续 周 期 工 作 制