

第 23 篇 常用电机、电器及其他

主要撰稿 刘福祐 陈子皋 曹兰珍

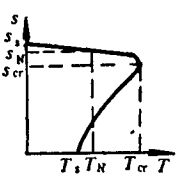
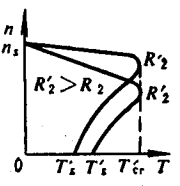
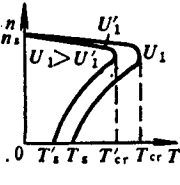
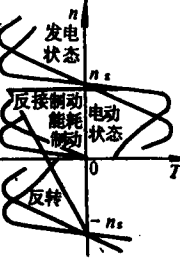
审 稿 史习先 王德夫

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 23-1-1

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 机	$P=m_1 U_1 I_1 \cos \varphi$	P ——输入功率, kW		(1) 笼型电动机 简单、耐用、可靠、易维护、价格低、特性硬, 但起动和调速性能差, 轻载时功率因数低。一般无调速要求的机械广泛采用。在可变频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。	
	$T=\frac{m_1}{\omega_s} \cdot \frac{U_1^2 r_2' s}{(r_1 s+r_2')^2+s^2 x_k^2}$	m_1 ——相数			
	$s_{cr}=\pm \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2+x_k^2}}$	U_1 ——定子相电压, V			
	$x_k=x_1+x_2'$	I_1 ——定子相电流, A		(2) 绕线式电动机 因有滑环, 比笼型电动机维护较麻烦, 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, 但它起动转矩大, 起动时功率因数高, 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, 起动次数多的机械, 如提升机、起重机及轧钢机械等。	
	$T_{cr}=\pm \frac{m_1 U_1^2}{2 \times \omega_s (\sqrt{r_1^2+x_k^2} \pm r_1)}$	$\cos \varphi$ ——功率因数			
	$T=\frac{2 T_{cr} (1+q)}{\frac{s}{s_{cr}}+\frac{s_{cr}}{s}+2 q}$	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			
	$\lambda_T=\frac{T_{cr}}{T_N}$	r_2' ——折算到定子侧的转子相电阻, Ω			
	$T_N=\frac{m_1}{\omega_s} \cdot \frac{U_1^2 r_2'}{(r_1+r_2')^2+x_k^2}$	x_1 ——定子电抗, Ω			
		x_2' ——折算到定子侧的转子电抗, Ω		不同转子电阻 ($U_1=\text{常数}$) 不同电源电压 ($R_2=\text{常数}$) 各种运行状态	
	$s=\frac{\omega_s-\omega}{\omega_s}$	x_k ——短路电抗, Ω			
	$\omega_s=\frac{2 \pi n_s}{60}$	s ——转差率			
动 机	$n_s=\frac{60 f_1}{p}$	s_N ——额定转差率			
	$q=\frac{r_1}{\sqrt{r_1^2+x_k^2}}$	s_{cr} ——临界转差率			

类 型	特 性 公 式	符 号	特 性 曲 线	性 能
交 流 电 动 机	大电机的r_1很小, 可以忽略, 则 $s_{cr} \approx \frac{r_2'}{x_k}$ $T_{cr} \approx \frac{m_1 U_1^2}{2\omega_s x_k}$ $T \approx \frac{2T_{cr}}{\frac{s}{s_{cr}} + \frac{s_{cr}}{s}}$ $T_s \approx \frac{m_1}{\omega_s} \cdot \frac{U_1^2 r_2'}{r_2'^2 + x_k^2}$	λ_T——转矩过载倍数 T_N——额定转矩, N·m T_{cr}——临界转矩, N·m T_s——起动转矩, N·m ω——角速度, rad/s ω_s——同步角速度, rad/s n_s——同步转速, r/min f_1——供电频率, Hz p——磁极对数 q——系数	不同极数 不同供电频率 (当 $\frac{U_1}{f_1} = \text{常数}$)	
同 步 电 动 机	$n_s = \frac{60 f_1}{p}$ $T_s = \frac{9.55 m_1 U_1 E_0}{n_s x_s} \sin \theta$ $T_{max} = \frac{9.55 m_1 U_1 E_0}{n_s x_s}$	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	$E = K_e \phi n = C_e n$ $K_e = \frac{pN}{60a}$ $T = K_m \phi I_a = C_m I_a$ $K_m = \frac{K_e}{1.03}$ $n = \frac{U - I_a(R_a + R)}{K_e \phi}$ $n_s = \frac{U}{K_e \phi}$ $n = \frac{U}{K_e \phi} - \frac{R_a + R}{K_e K_m \phi^2} T$ $T_N = 9550 \frac{P_N}{n_N}$	E——反电势, V ϕ——磁通, Wb K_e——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	他励电动机改变电枢回路附加电阻 他励电动机改变电枢端电压	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起动转矩大、过载能力大、特性软, 适用于电力牵引机械和起重机等 复励电动机的起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, 适用于起动转矩很大、负载具有强烈变化的设备

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, $N \cdot m$ T_l ——负载转矩, $N \cdot m$ P_N ——额定功率, kW C_e ——电机电势常数 C_m ——电机转矩常数	他励电动机改变励磁 (虚线为恒功率调速) 他励电动机各种运行状态	

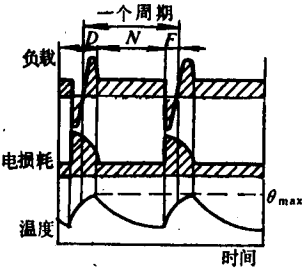
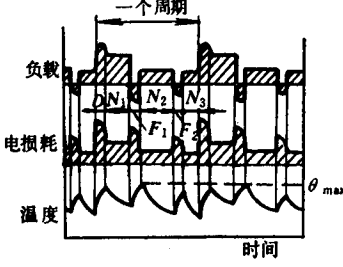
注: 式中“+”为电动状态, “-”为发电状态。

表 23-1-2

电机的定额及工作制

定额	工作制	负 载 图	负载持续率 FC	附 注
连 续	连续工作制 S_1			N ——在额定条件下运行时间 θ_{max} ——达到的最高温度
短 时	短时工作制 S_2			N ——在额定条件下运行时间 θ_{max} ——在工作周期中达到的最高温度 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
周 期 工 作	断续周期工作制 S3		$FC = \frac{N}{N+R} 100\%$	N ——在额定条件下运行时间; R ——停机和断能时间; D ——起动时间; θ_{max} ——在工作周期中达到的最高温度 S3的每一个周期时间为10min
	包括起动的断续周期工作制 S4		$FC = \frac{D+N}{D+N+R} 100\%$	
	包括电制动的断续周期工作制 S5		$FC = \frac{D+N+F}{D+N+F+R} 100\%$	N ——在额定条件下运行时间 D ——起动时间 F ——电制动时间 R ——停机和断能时间 V ——空载运行时间 θ_{max} ——在工作周期中达到的最高温度 S6的每一个周期时间为10min
	连续周期工作 S6		$FC = \frac{N}{N+V} \cdot 100\%$	

定额	工作制	负 载 图	负载持续率FC	附 注
周	包括周期制工作的连续工作制 S7		等于 1	N——在额定条件下运行时间 D——起动时间 F——电制动时间 $\theta_{\max}$ ——在工作周期中达到的最高温度
工	包括连续负载与周期工作制相应变制 S8		$FC_1 = \frac{D + N_1}{D + N_1 + F_1 + N_2 + F_2 + N_3} \cdot 100\%$ $FC_2 = \frac{F_1 + N_2}{D + N_1 + F_1 + N_2 + F_2 + N_3} \cdot 100\%$ $FC_3 = \frac{F_2 + N_3}{D + N_1 + F_1 + N_2 + F_2 + N_3} \cdot 100\%$	N_1, N_2, N_3 ——在额定条件下运行时间 F_1, F_2 ——电制动时间 D——加速时间 $\theta_{\max}$ ——在工作周期中达到的最高温度

注: 对S3、S4、S5、S6和S8工作制, 负载持续率为15%、25%、40%、60%。

对S4、S5、S7和S8工作制, 每小时等效起动次数优先采用150、300或600次。

表 23-1-3

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	$Qdt = C d\tau + A \tau dt$ 式中 Q——单位时间内电动机所产生的热量, kJ/s $Q = \Delta P$ ΔP——为电动机功率损耗, kW C——电动机热容量, 即使电动机温度升高 1°C 所需的热量, $\text{kJ}/^\circ\text{C}$ A——电动机的散热率, 即电动机与周围环境温度相差 1°C 时, 单位时间内电机散发到周围空气中的热量 $\text{kJ}/(\text{s} \cdot ^\circ\text{C})$ τ——电动机温升, $^\circ\text{C}$ 在 $t=0, \tau=0$ 的初始条件下: $\tau = \tau_{st} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right)$	$\tau_{st} = \frac{Q}{A}$ $T = \frac{C}{A}$ 式中 τ_{st}——电动机温升稳定值, $^\circ\text{C}$ T——电动机发热时间常数, s 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 Q 的大小主要取决于铜损 ($I^2 R$), 也即主要决定于负载的大小。 T 与电机的构造尺寸有关。小型电动机一般为0.5小时左右, 大型电动机一般为3~4小时。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

电机的绝缘等级与允许温升	电机的绝缘等级决定于所采用的绝缘材料的耐热等级。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、频繁起动的电机, 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 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见表23-1-4。电机轴承允许温升: 滚动轴承为95℃, 滑动轴承为80℃ 电动机名牌标示的额定功率, 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
--------------	--

表 23-1-4 中小电机的温升限值 (空气冷却) (GB755—81) K

项 号	电机的部件	绝 缘 等 级											
		E 级			B 级			F 级			H 级		
		温度 计法	电 阻 法	检 温 计 法	温度 计法	电 阻 法	检 温 计 法	温度 计法	电 阻 法	检 温 计 法	温度 计法	电 阻 法	检 温 计 法
1	交流绕组 电枢绕组 除第2、3项外的 直流励磁的磁场绕组	65	75	75	70	80	80	85	100	100	105	125	125
2	隐极式同步电机的 单排磁场绕组	—	—	—	—	90	—	—	110	—	—	—	—
3	补偿绕组 多层低电阻磁场绕 组	75	75	—	80	80	—	100	100	—	125	125	—
	单层绕组	80	80	—	90	90	—	110	110	—	135	135	—
4	与绕组接触的铁心 及其他部件	75	—	—	80	—	—	100	—	—	125	—	—
5	换向器或集电环	70	—	—	80	—	—	90	—	—	100	—	—

注: 温升限值是相对标准环境温度的温升, 国标规定标准环境温度为40℃。

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起动、制动、反转、调速等要求, 选择电动机类型。
 - (2) 根据负载转矩、速度变化范围和起动频繁程度等要求, 考虑电动机的温升限制、过载能力和起动转矩, 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, 选择电动机的结构形式。
 - (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、运行和维修费用和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23-1-1框图进行。

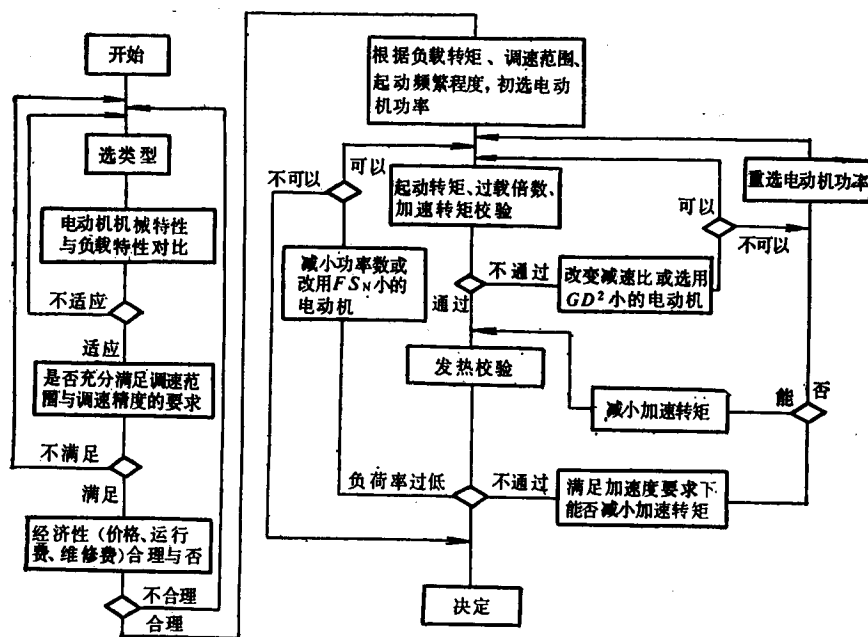


图 23-1-1

2.3 电动机类型选择

表 23-1-5

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机械变速的交流异步电动机
无调速要求的机械	负载平稳, 对起动、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), 或起动条件沉重时	大中功率		采用绕线型电动机
		小功率, 经过载能力及起动条件校验通过的		采用高转差率电动机
		单纯因起动条件沉重的机械	经起动条件校验通过	采用双笼型或深槽型电动机
			若起动校验通不过, 或起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, 如采用交流电动机在发热、起动、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
		需起动转矩大的机械(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)以及无频繁起动、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 23-1-6

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 激	串 激
1	✓		✓					②	✓	①		
2	✓			✓				✓				
3	✓				✓			✓			✓	✓
4		✓			✓						✓	
5		✓					✓		✓			
6		✓				✓			③		✓	⑤
7	✓					✓		③④	③		✓	✓

注: 圆圈内数字含义:

- ① 对于小功率机械, 或起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 需要起动转矩大的机械(如电车、牵引机车等)采用串励直流电动机。

表 23-1-7 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
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
	位势性 $P_l \propto n$ $T_l \propto n^0 $		起重、提升机械
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

2.4 电动机电压和转速的选择

表 23-1-8 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		110 220 440 600~870	0.25~110 0.25~320 1.0~500 500~4600
		笼 型	绕 线 型		
380	3~320	0.37~320	0.6~320		
3000	250~2200	90~2500	75~3200		
6000	250~10000	200~5000	200~5000		
10000	1000~10900	—	—		
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, 电动机电压应作经济比较后确定, 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。若采用改变激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，并减小噪音，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。

要求快速频繁起、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 $J_D \cdot n_N^2$ 值）为最小时，能获得起动、制动最快的效果。在空载（或负载很小可以忽略）情况下起制动时，为达到快速的目的，按下式考虑最为合理：

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

即所谓最佳传动比为

$$i_1 \approx \sqrt{\frac{J_m}{J_D}}$$

- 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 ——机械轴转速， r/min ；
 i_1 ——最佳传动比。

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，起动能力和发热。

表 23-1-9 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，随着调速范围和起动频繁程度的提高，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）

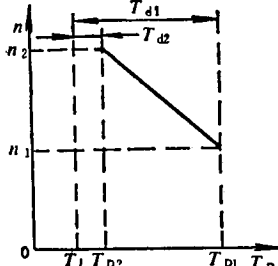
The figure shows two graphs sharing a common time axis (t). The top graph is the torque load curve $T_D=f(t)$, which is a piecewise constant function with levels T_s , T_n , T_b , and T_l . The bottom graph is the speed curve $n_D=f(t)$, which shows the motor's speed profile corresponding to the torque levels. Key time intervals t_s , t_{st} , t_b , and t_0 are marked on the time axis.

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		公 式	符 号
功 率	一般旋转运动的机械	$P = \frac{T_D n_D}{9550}$	P ——电动机功率，kW
		$P = \frac{T_D \omega_D}{1000}$	T_D ——电动机转矩，N·m
		$\omega_D = \frac{\pi n_D}{30}$	n_D ——电动机转速，r/min
			ω_D ——电动机角速度，rad/s

常用计算公式	名称	公式	符号
	离心式通风机	$P = \frac{KQH^*}{1000\eta\eta_c}$	P ——电动机功率, kW K ——余量系数 (见表23-1-11) 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** η_c ——传动效率, 直接传动时 $\eta_c=1$
	离心泵及活塞泵	$P = \frac{K\rho gQ(H+\Delta H)^*}{1000\eta\eta_c}$	P ——电动机功率, kW, K ——余量系数 (见表23-1-12) Q ——泵的出水量, m^3/s H ——水头 (扬程), m ΔH ——主管水头压力, m η ——泵的效率一般取0.6~0.84** 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, $g=9.81m/s^2$
	离心式压缩机	$P = \frac{Q}{1000\eta} \left(\frac{A_d + A_r}{2} \right)$	P ——电动机功率, kW Q ——压缩机的生产率, m^3/s A_d ——压缩1 m^3 空气至绝对压力 p_1 的等温功, J (见表23-1-10) A_r ——压缩1 m^3 空气至绝对压力 p_1 的绝热功, J (见表23-1-10) η_r ——压缩机总效率, 约为0.62~0.8
	直线运动机械	$P = \frac{Fv}{1000\eta}$	F ——作用力, N v ——运动速度, m/s η ——传动效率
式	运动物体的动能	$E = \frac{J\omega^2}{2} = \frac{GD^2n^2}{7150}$ $E = \frac{mv^2}{2}$	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 ——折算到电机轴上的飞轮矩, $N \cdot m^2$
	折算到电动机轴上的静阻负载转矩	$T_l = T_m \frac{1}{i\eta}, i = \frac{n_D}{n_m}$ $T_l = F \frac{v}{\omega_D} \cdot \frac{1}{\eta}$ $T_l = \frac{FR}{i\eta}$	T_l ——电动机轴上的静阻负载转矩, N·m T_m ——机械轴上的静阻转矩 (包括摩擦阻转矩), N·m R ——物体运动的旋转半径, m i ——传动比
	折算到电动机轴上的动态转矩	$T_d = T_D - T_l = J \frac{d\omega}{dt} = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt}$	n_m ——机械轴转速, r/min 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, $N \cdot m^2$
	折算到电动机轴上的转动惯量和飞轮矩	$J = J_m / i^2$ $GD^2 = GD_m^2 / i^2$ $GD^2 = 365 G_m v_m^2 / n_D^2$ $GD^2 = 4gJ$ $GD^2 = GD_D^2 + \frac{GD_{m1}^2}{i_1^2} + \frac{GD_{m2}^2}{i_2^2} + \dots + \frac{GD_{mn}^2}{i_n^2}$ $i_1 = \frac{n_D}{n_{m1}}, i_2 = \frac{n_D}{n_{m2}}, \dots, i_n = \frac{n_D}{n_{mn}}$	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 GD_D^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

名 称	公 式	符 号
电动机起、制动时间 (1) 动态转矩恒定下 起动(加速)时间 制动(减速)时间	$t_a = \frac{GD^2(n_2 - n_1)}{375T_d}$ $T_d = T_D - T_l$ $t_b = \frac{GD^2(n_1 - n_2)}{375(-T_d)}$ $-T_d = -(T_D + T_l)$	t_a ——起动(加速)时间, s t_b ——制动(减速)时间, s 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 s ——行程, m
(2) 动态转矩线性变化下的起动、制动时间	$t_a = \frac{GD^2(n_2 - n_1)}{375(T_{D1} - T_{D2})} \ln \frac{T_{D1} - T_l}{T_{D2} - T_l}$ $t_b = \frac{GD^2(n_2 - n_1)}{375(T_{D1} - T_{D2})} \ln \frac{T_{D1} + T_l}{T_{D2} + T_l}$	
(3) 动态转矩非恒定, 也非线性变化时的起动、制动时间	$t_a = \frac{GD^2}{375} \int_{n_1}^{n_2} \frac{dn}{T_d}$ $(T_d > 0 \text{ 时加速})$ $t_b = \frac{GD^2}{375} \int_{n_2}^{n_1} \frac{dn}{T_d}$ $(T_d < 0 \text{ 时减速})$	
动态转矩恒定时, 加减速过程电动机行程	$s = \frac{GD^2(n_2^2 - n_1^2)}{45000T_d}$	

注: 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23-1-11及表23-1-12。
2. ** 此数据为参考值, 实际数据以制造厂提供的为准。

表 23-1-10 A_d 、 A_t 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_t , J	42200	75500	127000	168000	201000	230000	256000	280000	301000	321000

表 23-1-11 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 23-1-12 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 23-1-13 电动机过载能力和平均起动转矩的校验

电动机短时允许转矩过载倍数 λ_T	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, 直流电动机是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_I 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
	笼型电动机	连续工作制(S1) (一般型)	≥ 1.65	
		断续周期性工作制(S3~S5) (冶金及起重用)	≥ 2.5	
	绕线电动机	连续工作制(S1) (一般型)	≥ 1.8	
		断续周期性工作制(S3~S5) (冶金及起重用)	≥ 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		

表 23-1-14

电动机发热校验等效法(均方根法)计算公式

负载状态	计 算 公 式	符 号	说 明												
周期性变化负载长期运行	等效电流法: $I_{rms} = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \dots + I_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}} \quad (A)$ 要求 $I_{rms} \leq I_N$ 三角形电流线段的等效值: $I_{rms} = \frac{I_b}{\sqrt{3}} \quad (A)$ 梯形电流线段的等效值: $I_{rms} = \sqrt{\frac{I_{t1}^2 + I_{t1} I_{t2} + I_{t2}^2}{3}} \quad (A)$ 等效转矩法: $T_{rms} = \sqrt{\frac{T_1^2 t_1 + T_2^2 t_2 + \dots + T_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}} \quad (N \cdot m)$ 要求 $T_{rms} \leq T_N$ 等效功率法: $P_{rms} = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + \dots + P_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}} \quad (kW)$ 要求 $P_{rms} \leq P_N$	$I_1, I_2, \dots, I_n$——电动机一个周期负载电流曲线近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 $I_{rms}, T_{rms}, P_{rms}$——等效电流、转矩、功率 I_N, T_N, P_N——电动机额定电流、转矩、功率 I_b——三角形电流曲线最高电流值, A I_{rms}——三角形电流曲线等效电流值, A I_{t1}, I_{t2}——梯形电流曲线两腰高之值, A I_{rms}——梯形电流曲线, 等效电流值, A	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 等效电流法适用于各种类型电动机发热校验 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。串励电动机不能应用 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												
重复短时负载断续运行	采用长期工作制电动机: $I_{rms} = \sqrt{\frac{\Sigma I_a^2 t_a + \Sigma I_{st}^2 t_{st} + \Sigma I_b^2 t_b}{C_a(\Sigma t_a + \Sigma t_b) + \Sigma t_{st} + C_\beta \Sigma t_0}} \quad (A)$ 要求 $I_{rms} \leq I_N$ $T_{rms} = \sqrt{\frac{\Sigma T_a^2 t_a + \Sigma T_{st}^2 t_{st} + \Sigma T_b^2 t_b}{C_a(\Sigma t_a + \Sigma t_b) + \Sigma t_{st} + C_\beta \Sigma t_0}} \quad (N \cdot m)$ 要求 $T_{rms} \leq T_N$ 采用断续工作制电动机: $I_{rms} = \sqrt{\frac{\Sigma I_a^2 t_a + \Sigma I_{st}^2 t_{st} + \Sigma I_b^2 t_b}{C_a(\Sigma t_a + \Sigma t_b) + \Sigma t_{st}}} \quad (A)$ 要求 $I_{rms} \leq I_{NFC}$ $T_{rms} = \sqrt{\frac{\Sigma T_a^2 t_a + \Sigma T_{st}^2 t_{st} + \Sigma T_b^2 t_b}{C_a(\Sigma t_a + \Sigma t_b) + \Sigma t_{st}}} \quad (N \cdot m)$ 要求 $T_{rms} \leq T_{NFC}$ 并且 $FC_S = FC_N$ 如 FC_S 与 FC_N 不等, 则选择相近的, 并要求 $I_{rmsN} \leq I_{NFC}$	I_a, I_{st}, I_b——在一个工作周期中各起动、稳定、制动段的电动机相应电流, A T_a, T_{st}, T_b——在一个工作周期中各起动、稳定、制动段的电动机相应转矩, N·m t_a, t_{st}, t_b, t_0——各起动、稳定、制动、停歇各段相应时间, s C_a——起动、制动过程中电机散热恶化系数 C_β——停转时电机散热恶化系数 $C_a = \frac{1 + C_\beta}{2}$ <table><tr><th colspan="2">C_β值</th></tr><tr><td>电机类型及冷却方式</td><td>C_β</td></tr><tr><td>开启式、防护式异步电动机</td><td>0.3</td></tr><tr><td>封闭式、自扇冷异步电动机</td><td>0.5</td></tr><tr><td>开启式、防护式直流电动机</td><td>0.5</td></tr><tr><td>封闭式、无扇自冷及强迫通风</td><td>1</td></tr></table>	C _β 值		电机类型及冷却方式	C _β	开启式、防护式异步电动机	0.3	封闭式、自扇冷异步电动机	0.5	开启式、防护式直流电动机	0.5	封闭式、无扇自冷及强迫通风	1	等效电流法适用于直流电动机。等效转矩法适用于不弱磁的直流电动机, 弱磁时需加修正 异步电动机起制动过程中, 转子频率增加, 铁耗增大, 仍以平均变耗代替平均总损耗时, 将有误差。误差大小随起动频繁程度而变, 越频繁的, 误差越大。故用等效法进行校验时, 需适当增大余量系数 笼型电动机起制动过程中以及空载、轻载运行时, 功率因数很低, 转矩不与电流成比例。故频繁起制动的笼型电动机采用等效转矩法校验时, 误差较大
C _β 值															
电机类型及冷却方式	C _β														
开启式、防护式异步电动机	0.3														
封闭式、自扇冷异步电动机	0.5														
开启式、防护式直流电动机	0.5														
封闭式、无扇自冷及强迫通风	1														

负载状态	计 算 公 式	符 号	说 明
重复短时负载断续运行	$\text{或 } T_{\text{rmsN}} \leq T_{\text{NFC}}$ $\text{而 } I_{\text{rmsN}} = I_{\text{rms}} \sqrt{\frac{FC_s}{FC_N}} \quad (\text{A})$ $T_{\text{rmsN}} = T_{\text{rms}} \sqrt{\frac{FC_s}{FC_N}} \quad (\text{N} \cdot \text{m})$ $FC_s = \frac{\Sigma t_s + \Sigma t_{st} + \Sigma t_b}{\Sigma t_s + \Sigma t_{st} + \Sigma t_b + \Sigma t_0} \times 100\%$	FC_s ——电动机实际负载持续率 FC_N ——断续电动机额定负载持续率 $I_{\text{rmsN}}, T_{\text{rmsN}}$ ——折算到额定负载持续率下的等效电流、等效转矩 $I_{\text{NFC}}, T_{\text{NFC}}$ ——电动机在标准持续率下的额定电流、额定转矩	

表 23-1-15

电动机发热校验平均损耗法计算公式

计 算 公 式	符 号
电动机一个工作周期中的平均总损耗为 $\Delta P_{\text{av}} = \frac{\Sigma \Delta A_s + \Sigma \Delta A_{st} + \Sigma \Delta A_b + \Sigma \Delta A_0}{T} \quad (\text{W})$	T ——周期时间, s $T = \Sigma t_s + \Sigma t_{st} + \Sigma t_b + \Sigma t_0$ t_s, t_{st}, t_b, t_0 ——起动、平稳运行、制动、停转时间, s $\Delta A_s, \Delta A_{st}, \Delta A_b$ ——起动过程、平稳运行、制动过程中能量损耗, W·s ΔA_0 ——停歇时的能量损耗, W·s (系直流电动机的激磁损耗, 交流电动机无此项)
起动过程中的能量损耗为 $\Delta A_s \approx \left(\frac{GD^2 n_D^2}{7150} + \frac{T_l n_D t_s}{19} \right) \left(1 + \frac{r_1}{r_2'} \right) \quad (\text{W} \cdot \text{s})$ 起动时间为 $t_s = \frac{GD^2 n_D}{375(T_{st\text{av}} - T_l)} \quad (\text{s})$	GD^2 ——折算到电动机转子轴上的系统的总飞轮转矩, N·m ² n_D ——电动机工作转速, r/min r_1 ——电动机定子每相电阻, Ω r_2' ——折算到定子侧的转子每相电阻, Ω T_l ——静阻负载转矩, N·m $T_{st\text{av}}$ ——平均起动转矩, N·m
稳定运行过程中的能量损耗为 $\Delta A_{st} \approx \left[\Delta P_{1m} \left(\frac{I_{st}}{I_{N25}} \right)^2 + \Delta P_{2m} \left(\frac{T_{st}}{T_{N25}} \right)^2 + \Delta P_c \right] t_{st} \quad (\text{W} \cdot \text{s})$ 稳定运行电流为 $I_{st} = I_{N25} \left[I_0^* + (1 - I_0^*) \frac{T_{st}}{T_{N25}} \right] \quad (\text{A})$	$\Delta P_{1m}, \Delta P_{2m}$ —— $FC=25\%$ 时的电动机定子和转子损耗, W ΔP_c ——电动机固定损耗, W I_{N25}, T_{N25} —— $FC=25\%$ 时的电动机额定电流和额定转矩 t_{st} ——稳定运行的时间, s I_0, I_0^* ——电动机空载电流和空载电流标么值 $I_0^* = \frac{I_0}{I_{N25}}$
反接制动过程中的能量损耗为 $\Delta A_b = \left(\frac{3GD^2 n_1^2}{7150} - \frac{T_l n_1 t_b}{19} \right) \left(1 + \frac{r_1}{r_2'} \right) \quad (\text{W} \cdot \text{s})$ 反接制动时间为 $t_b \approx \frac{GD^2 n_1}{375(T_{b\text{av}} + T_l)} \quad (\text{s})$	n_1 ——开始制动时电动机转速, r/min $T_{b\text{av}}$ ——平均制动转矩, N·m