

〔苏〕B.П.安德列耶夫等著

电力拖动基础

下 册

机 械 工 业 出 版 社

目 录

第五章 电动机容量的选择	1
5-1 选择电动机容量的根据	1
5-2 电动机的发热和冷却	4
5-3 发热时间常数	8
5-4 电机温升的确定	12
5-5 电力拖动运转状态的分类	13
5-6 长期运转状态下电动机容量的选择	14
5-7 用平均损耗法计算长期运转于变化负载下的电动机容量	16
5-8 电动机的损耗与效率的确定	19
5-9 用等效电流法确定电动机的容量	20
5-10 等效转矩法	24
5-11 等效功率法	26
5-12 短期运转电动机容量的选择	27
5-13 重复短期运转电动机容量的选择	30
5-14 重复短期运转状态下鼠笼式电动机每小时的容许接通次数	32
第六章 电力拖动的负载图	39
6-1 拖动装置和工作机的负载图	39
6-2 电动机的预选	39
6-3 负载图的简单绘制	41
6-4 在尖峰负载下,具有直线律机械特性的电力拖动的负载图	44
6-5 最佳机电时间常数及拖动装置——工作机系统的转动惯量的选择	47
6-6 在有规律的尖峰负载时拖动装置的计算	49
6-7 具有液体自动限流器的拖动装置	53
6-8 具有接触器式自动限流器的拖动装置	56
第七章 电力拖动的速度调节	59
7-1 对可调拖动装置的要求	59
7-2 电力拖动调速调节方法的分类	61
7-3 他激直流电动机的速度调节	62
7-4 串激直流电动机的速度调节	65
7-5 用改变加在直流电动机电枢上的电压来调节速度	67
7-6 顺接-逆接系统	67
7-7 发电机-电动机系统	69
7-8 电机放大机	70
7-9 多绕组可激磁机	72
7-10 自激电机放大机	74
7-11 两级自激电机放大机	81
7-12 交磁电机放大机	82
7-13 交磁电机放大机的接线图	87
7-14 离子电力拖动	95
7-15 离子电力拖动的机械特性	97

7-16	离子拖动的功率因数	101
7-17	离子电力拖动的反馈	102
7-18	离子电力拖动的技术经济指标	103
7-19	离子电力拖动的应用范围	105
7-20	交流电动机的速度调节	105
7-21	用改变转子电路中有有效电阻的方法调节异步电动机的速度	106
7-22	用改变定子电路感抗的方法调节速度	107
7-23	用换接绕组改变极对数的方法调节异步电动机的速度	109
7-24	鼠笼式异步电动机转速的脉冲调节	112
7-25	改变供电电网的频率来调节异步电动机的速度	115
7-26	具有整流子电机的异步电动机串级装置	119
7-27	异步电动机与直流电机的串级	123
7-28	具有电动机-发电机变流机组的异步电动机和直流电机串级	126
7-29	具有离子变流器的异步电动机和直流电机串级	128
7-30	具有从定子方面激磁的补偿式整流子电机的异步电动机串级联接 (謝尔比烏斯串级)	129
7-31	串级装置应用的展望	131
第八章 电动机的同步旋转		132
8-1	电动机的同轴运转	132
8-2	同步旋转系统	133
8-3	带有辅助同步机的同步旋转系统	135
8-4	带有辅助异步电机的同步旋转系统	136
8-5	借助于在转子电路接入公用变阻器的方法使异步电动机同步旋转	143
8-6	用单相线路使同步旋转系统预先整步, 同步旋转系统中的过渡过程	149
8-7	直流和交流整流子电动机的同步运行	151
8-8	具有迴轉定子的异步电动机的双电动机拖动装置	152
8-9	轉角远距离傳遞系統	153
第九章 带有自动调节的电力拖动		158
9-1	调节器在生产机械拖动中的应用	158
9-2	调节系统的结构	159
9-3	调节器的基本工作原理	160
9-4	电压和速度调节器的例子	165
9-5	协调旋转系统	168
9-6	按发电机-电动机系统接线的多电动机拖动在用改变电动机激磁电流来維持 所需速度比时的工作特点	171
9-7	调节器作用于电动机电枢上电压的协调旋转系统	174
9-8	卷繞帶材时拉力的自动调节	175
9-9	带有自动调节的电力拖动工作的分析	178
9-10	随动拖动的概念	180
9-11	随动拖动的动力学基础	182
第十章 电力拖动设计的主要任务和拖动型式的选择		186
10-1	电力拖动设计的程序	186
10-2	电流种类与拖动型式的选择	190
10-3	不可调交流电动机型式的选择	192
参考文献		196

第五章 电动机容量的选择

5-1 选择电动机容量的根据

电力拖动只有在正确地选择电动机容量的条件下才能可靠而经济地运转。电动机的容量必须严格地根据预期的负载以及电动机的运转状态来选择。工业中电力拖动的广泛使用以及工作机的各种各样的工作条件和要求,使得电动机容量的选择变得十分复杂。

配置容量过大的电动机是不恰当的。这样会不适当地增大电动机的尺寸、重量和初期投资,恶化力能指标,也就是电动机以较低的效率运转,而在采用异步电动机的情况下,还会以低功率因数运转,这又给车间和工厂电力网的运行增加困难。若配置的容量比需要的容量小,则不可避免地会引起电机某些部分及其绕组的温度升高超过容许值,从而可能使电机很快地损坏。

即使电动机的容量选择得恰当,在运行时也常常会出现比其额定容量大得多的短时冲击负载。幸而这种过载的作用时间很短,还不致引起显著的发热。但是,在每一种型式电动机中都存在着一些电气方面的因素,这些因素即使在超过一定限度的短时过载下,也会使正常工作遭受严重的破坏。

在选择电动机容量时,必须从两个基本因素出发,即瞬时过载和发热。

按过载选择电动机的容量就在于根据下述条件来确定额定转矩:

$$M_{nom} = \frac{M_{max}}{\lambda_m}, \quad (5-1)$$

式中 M_{max} ——工作机所要求的最大过载转矩;

λ_m ——转矩过载系数。

当按过载选择容量时,也常取电动机的电流作为原始值,在这种情况下可求得:

$$I_{nom} = \frac{I_{max}}{\lambda_I}. \quad (5-2)$$

直流电动机的过载能力受整流条件的限制。直流电机中产生火花的原因是整流元件内感生的合成电动势,就是说

$$e = e_p - e_k \pm e_m, \quad (5-3)$$

式中 e_p ——整流元件的电抗电动势;

e_k ——附加极磁通所建立的换向电动势;

e_m ——主极磁通变化时所感生的变压器电动势。

整流子上产生的火花是从外表判別整流过程是否良好的标志。在电动机有不同的转速时,如果乘积 $nI_a = \text{const}$ 保持不变,则可以近似地认为整流子上产生的火花是相同的。

МП 型直流起重电动机的转矩过载能力为:

	在额定速度时	在起动时
串激	4.0	5.0
复激	3.5	4.5
他激	2.5	3.0

长期运转状态电动机的转矩过载能力为：

	在额定速度时	在起动时
ΠH 型电动机	2.5	2.5
轧钢电动机	2.5	2.5

直流电动机的电流过载能力可用下列数据表征：

电动机型号	在起动时	在额定速度时	在两倍速度时
MTI	3.6	3.0	1.5
ΠH	2.5	2.5	2.0
轧钢电动机	2.5	2.5	2.0

必须指出，在串激和复激电动机中，由于串激绕组的作用使磁通增大，所以其转矩过载能力总是比电流过载能力大，就是说，

$$\lambda_M > \lambda_I$$

式中 $\lambda_M = \frac{M_{max}}{M_{nom}}$ 和 $\lambda_I = \frac{I_{max}}{I_{nom}}$ 。

异步电动机的过载能力受临界转矩 M_k 值的限制。根据苏联国家标准 ГОСТ 185-47，起重用和冶金用三相交流异步电动机最大转矩对额定转矩之比的倍数应该是：

	功率在 10 千瓦以下	功率在 10 千瓦以上
绕线式电动机	2.5	2.8
鼠笼式电动机	2.5	2.8

一般工业用的长期运转状态的三相异步电动机，其最大转矩倍数，应不低于：

滑环式电动机——1.80；

鼠笼式电动机——1.65。

必须记住，异步电动机的起动转矩和临界转矩与网路电压的平方成正比。考虑到网路电压可能降低到 $0.9 U_{nom}$ ，在计算时必须取上述过载能力的 0.8 倍。

同步电动机的瞬时过载能力通常为 2.5~3.0。依靠电动机的强迫激磁，其过载能力可提高到 3.5 甚至到 4.0。

三相整流子电动机的过载能力在很大程度上取决于整定转速和整流条件，可平均地取为 $\lambda_M = 1.5 \sim 2.0$ 。

制造电动机所使用的绝缘材料，既决定着电动机的经济技术性能，又在很大程度上决定着电动机运转的可靠性。由于用作绕组绝缘的绝缘材料之耐热性能相当低，所以电动机的额定容量受发热的限制。从技术经济方面考虑，要求在正常运行条件下绝缘寿命大约为 15~20 年。在电机制造业中使用的绝缘材料，根据苏联国家标准 ГОСТ 183-41 按耐热性能分为五级：A、B、BC、CB 和 C。

A 级绝缘：用油或制造漆包线所用的瓷漆浸透或浸在油或瓷漆中的棉纱、丝、纸及其他类似的有机材料。这一级绝缘的长期许可的极限温度为 105° 。

B 级绝缘：含有胶合物的云母和石棉的制成品。其极限温度为 130° 。

BC 级绝缘：塗有耐热漆的云母、石棉及玻璃丝织物的制成品。其极限温度比 B 级高

● 我国现行的绝缘等级分为七级即：Y、A、E、B、F、H 和 C。——译者

15°, 即 145°。

CB級絕緣：不用“A”級絕緣材料的塗有耐熱漆的云母、玻璃絲及石棉的制成品。根據製造CB級絕緣所用絕緣漆的耐熱性能提高的程度，CB級絕緣的極限溫度容許比B級相應地提高。

C級絕緣：不用膠合物的云母和玻璃絲織物、瓷、玻璃、石英及其類似的材料。這一級絕緣材料的極限溫度沒有規定。

由於周圍媒質的溫度變化很大，電動機的工作條件也是大不相同的。為統一起見，蘇聯國家標準ГОСТ 183-41建議電動機的額定數據以周圍空氣溫度+35°為依據。對於這一假定的冷卻空氣的溫度，蘇聯國家標準ГОСТ 183-41規定了A級絕緣和B級絕緣高於周圍媒質溫度的極限允許溫升之值。

絕緣溫度的測定結果與其測量方法有很大的關係。為了測量絕緣的溫度，目前採用下述幾種方法：溫度計法，電阻法，探溫計法。當採用電阻法時，發熱是按繞組的直流電阻的變化來確定的。

表5-1 當冷卻空氣的標準溫度為+35°時的允許溫升限度（以°C計）

電 機 的 部 件	A 級 絕 緣		B 級 絕 緣	
	溫度計法	電 阻 法	溫度計法	電 阻 法
a) 低於5000千伏安的異步機和交流異步電動機的繞組	60	65	75	85
b) 直流電動機和用直流激磁的交流電動機的激磁繞組（多層的）	—	—	—	—
c) 與整流子相連接的電樞繞組	—	—	—	—
a) 單排激磁繞組	70	70	95	95
b) 激磁繞組和異步電動機轉子的條狀繞組，每槽內各條數不多於二	—	70	—	95
具有若干層的低電阻激磁繞組以及補償繞組	65	65	85	85

用溫度計測量溫度甚為簡單，能給出足夠可靠的結果，但不能測量繞組內部發熱最厲害部分的溫度。探溫計法可以得到最準確的結果，但只能給出其埋設地點的溫度值。

在表5-1中列出了蘇聯國家標準ГОСТ 183-41所規定的採用不同測量方法時絕緣材料允許溫升的數據。

這樣看來，絕緣的最大允許溫度 θ_{us} 確定為最大允許溫升和周圍媒質溫度之和：

$$\theta_{us} = \theta_0 + \tau_{us},$$

式中 θ_0 ——周圍媒質的溫度；

τ_{us} ——絕緣的最大容許溫升。

經驗證明，絕緣的工作溫度即

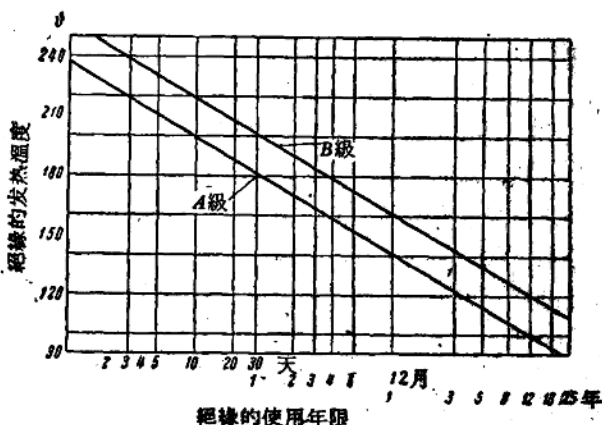


圖5-1 電動機的A級和B級絕緣的壽命與其溫度的關係

使略微超过极限容许值也会大大地缩短绝缘的寿命。

图 5-1 示出了电机的 A 级和 B 级绝缘的寿命与温度之间的关系。譬如对 A 级绝缘来说，绝缘的温度从 95° 升高到 105°，则寿命从 15 年缩减到 8 年，就是说大约缩短了一半。

5-2 电动机的发热和冷却

为了保证电动机的正常运行，就必须了解其绝缘工作时的热状态。

要考虑电机中热过程的所有现象是极其困难的，其原因主要是制造电机所用的材料（硅钢片、铜、绝缘材料）的性质各不相同，工作条件（旋转部分和固定部分）不一样，电机各部分之间的热交换过程也很复杂。

电机在工作过程中必不可免地要产生损耗，使电机个别部分发热，同时引起热交换过程。因此在研究电机的发热过程时，必须把它看成是由几个相互间有热交换的均匀体所组成的系统。

例如，异步电动机就应当看成是由四个物体所组成的系统，亦即用绝缘隔开的定子铜和定子钢、转子铜和转子钢以及冷却媒质。在这样的假设条件下，电动机的热过程甚至在损耗不变时也必须用极其复杂的微分方程来描述。在负载变化的情况下，解微分方程的困难会大大地增加，而且实际上不可能进行计算。

比较简单的情况是两个物体的发热。在这种情况下把定子和转子的发热看成是互不相关的。每一部件的发热都可看成是由于相应损耗的作用而在铜和钢之间进行的热交换过程。但是，即使这样很近似地去研究这个过程，也需要知道大量的结构参数和计算参数，例如定子绕组端部的散热率、定子铜与钢之间通过槽绝缘的散热率以及其他一系列的参数。这些数据在电机的产品目录中是找不到的，因此，实际上电力拖动的设计人员不可能采用，更不用说从事于电力拖动运行的工程技术人员了。为了校核计算而需要确定电动机在一定负载下的发热情况时，可采用比较简单而粗略的计算方法。

为了使问题简单起见，可以不必研究实际电机的发热，而代之以研究导热率为无穷大的均匀体的发热。单位时间内传给整个物体的热量决定于损耗，就是说，

$$P = P \frac{1 - \eta}{\eta}, \quad (5-4)$$

式中 P ——电机轴上的有效功率；

η ——电机在给定负载下的效率。

当热量传给物体时，它的温度开始上升。受热体的温度一超过周围媒质的温度，它就开始散热，从而使其温度的增长开始缓慢下来。当物体的温度增高时，散到周围媒质的热量随之增多。在物体的某一温度下，当传给物体的热量与它所散出的热量相等时，便达到热平衡。在这种情况下，物体的温度就不再升高了，而稳定在一定的水平上（常数）。如果物体的温度高于周围媒质的温度，则物体将把所储积的热量传给周围媒质，这时它的温度将要降低。

让我们来比较详细地研究一下物体的发热过程。物体散热的方式有三种：即辐射、对流和传导。辐射散热量与物体和媒质的绝对温差的四次方成比例，对流散热量与物体和媒质的温差的 1.25 次方成比例，而传导散热量则与物体和媒质的温差成正比。

由于电机内部的发热温度不高，所以辐射散热量很小，通常可以忽略不计。绝大部分热量是通过对流和传导而散出的，因此为了简单起见，以后即认为散热量与温差成正比。

根据上面对发热过程的叙述，热平衡条件可写为：

$$Qdt = C d\tau + A\tau dt, \quad (5-5)$$

式中 Q ——单位时间内传给物体的热量，以卡/秒或焦耳/秒计；

C ——物体的热容量，也就是物体温度升高 1°C 所需之热量，以卡/度或焦耳/度计；

A ——物体的散热率，也就是当物体与媒质温度相差 1°C 时每秒钟物体表面所散出的热量，其量纲为卡/秒度或焦耳/秒度；

τ ——物体对周围媒质温度的温升。

将表达式 (5-5) 积分，则得：

$$t = -\frac{C}{A} \ln(Q - A\tau) + K. \quad (5-6)$$

积分常数可以由初始条件求得：当 $t = 0$ 时 $\tau = \tau_{\text{нач}}$

$$0 = -\frac{C}{A} \ln(Q - A\tau_{\text{нач}}) + K$$

或

$$K = \frac{C}{A} \ln(Q - A\tau_{\text{нач}}).$$

将积分常数值代入 (5-6) 式，将有：

$$t = \frac{C}{A} \ln \frac{Q - A\tau_{\text{нач}}}{Q - A\tau}. \quad (5-7)$$

电机热容量与散热率之比用 Θ 表示，并称之为热常数或发热时间常数，就是说，

$$\Theta = \frac{C}{A}. \quad (5-8)$$

将 Θ 代入表达式 (5-7)，于是，

$$t = \Theta \ln \frac{Q - A\tau_{\text{нач}}}{Q - A\tau}$$

或

$$e^{-\frac{t}{\Theta}} = \frac{Q - A\tau}{Q - A\tau_{\text{нач}}},$$

由此，

$$\tau = \frac{Q}{A} \left(1 - e^{-\frac{t}{\Theta}} \right) + \tau_{\text{нач}} e^{-\frac{t}{\Theta}}. \quad (5-9)$$

所得之关系 (图 5-2) 表明，在发热过程开始，就是说当 $t = 0$ 时，物体的初始温升为 $\tau = \tau_{\text{нач}}$

经过无限长的时间后，就是说当 $t = \infty$ 时，温升便达到某一稳定值：

$$\tau_{\text{ст}} = \frac{Q}{A}. \quad (5-10)$$

利用稳定温升的概念，可使表达式 (5-9) 具有如下的形式：

$$\tau = \tau_{\text{ст}} \left(1 - e^{-\frac{t}{\Theta}} \right) + \tau_{\text{нач}} e^{-\frac{t}{\Theta}} \quad (5-11)$$

或

$$\tau = \tau_y + (\tau_{\text{нач}} - \tau_y) e^{-\frac{t}{\Theta}} \quad (5-12)$$

如果在开始的瞬間物体对周围媒质的温升为 $\tau_{\text{нач}} = 0$ ，则发热方程具有较为简单的形式：

$$\tau = \frac{Q}{A} \left(1 - e^{-\frac{t}{\Theta}} \right) = \tau_y \left(1 - e^{-\frac{t}{\Theta}} \right) \quad (5-13)$$

表达式 (5-10) 表明，物体的稳定温升仅取决于物体中所发出的热量及其散热率，而与物体的热容量完全无关。由此可见，当散热率保持不变时，稳定温升将正比于传给物体的热量。

另一方面，如改善物体的散热（改善物体的通风条件），我们即可相应地降低其温升。

关系式 (5-10) 可以使我们在电机设计中寻求更合理地使用材料的基本途径。正确计算出来的电机，在额定负载下其绝缘应该具有最大的允许温升，就是说，

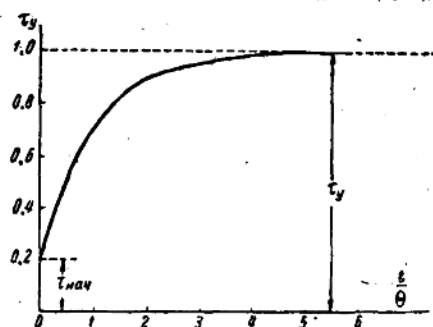


图5-2 在长期运转状态下电动机的发热曲线

$$\tau_{y, \text{ном}} = \frac{Q_{\text{ном}}}{A}, \quad (5-14)$$

将额定状态下的损耗值代以额定功率、效率以及物体的散热率，并对 $P_{\text{ном}}$ 求解，则得：

$$P_{\text{ном}} = \frac{\eta_{\text{ном}}}{1 - \eta_{\text{ном}}} A \tau_{y, \text{ном}} \quad (5-15)$$

表达式 (5-15) 表明，为了能从既定尺寸的电机获得最大的功率，就必须具有最高的效率。在这种情况下损耗最小。电动机的冷却越强烈以及冷却表面越大则其功率越大。为了这一目的，现在广泛地采用通风机改善电动机的表面冷却。为了增大电动机的冷却表面，通常把电动机的外壳制成带肋条的。此外，提高绝缘的耐热性也是提高电动机额定功率的方法之一。

由公式 (5-15) 可得出结论：在尺寸相同的情况下，开启式电机的功率较封闭式电机的大，因为在开启式电机中，通过电机内部的空气使其得到良好的冷却，而在封闭式电机中，空气只能对电机极小的外表面进行冷却。

上面已经指出，物体对周围媒质的温升 (5-11) 经过 $t = \infty$ 的时间即可达到稳定值。但是，实际上稳定温升早在时间等于 $4 \sim 5 \Theta$ 时即已达到。

如欲按公式 (5-13) 进行各种近似计算，采用图 5-3 中所示的诺谟图是很方便的。只要给出 Θ 和 t 值，经过这两点作直线与第三条垂线相交，便很容易求得以物体稳定温升为基值的标么温升。借助上述诺谟图还可求解其他问题。

让我们进一步分析表达式 (5-12)。物体的温升

$$\tau = \tau_y + (\tau_{\text{нач}} - \tau_y) e^{-\frac{t}{\Theta}},$$

是三部分之和。这三者的关系决定着过程的特征。若傳給物体的热量为 Q ，而与之相应的稳定温升为 τ_y ，則当 $\tau_y > \tau_{nav}$ 时，物体的发热将达到温度 τ_y 。

如果傳給物体的热量较少，也就是当 $\tau_{nav} > \tau_y > 0$ 时，則温升将从 τ_{nav} 降低到 τ_y 。

如果没有热量傳給物体，則 $Q = 0$ 且 $\tau_y = 0$ 。这时的温升

$$\tau = \tau_{nav} e^{-\frac{t}{\theta}} \quad (5-16)$$

并按指数規律下降。由于物体对周围媒质具有初始温升， $\tau_{nav} > 0$ 且 $Q = 0$ ，所以物体散出热量，也就是冷却。

显然，热交换过程一直要进行到物体温度与周围媒质温度相同为止。

上面所討論的各种情况示于图5-4。其中曲线 τ_1 对应于发热情况，曲线 τ_2 对应于减载时的冷却情况，而 τ_3 則是冷却到周围媒质温度时的情况。这样看来，根据 τ_{nav} 和 τ_y 的数值，热过程可能具有上述特征中的任何一种情况。

自通風电机在断电状态下，轉子或电樞静止不动而冷却时，空气的散热条件恶化，其

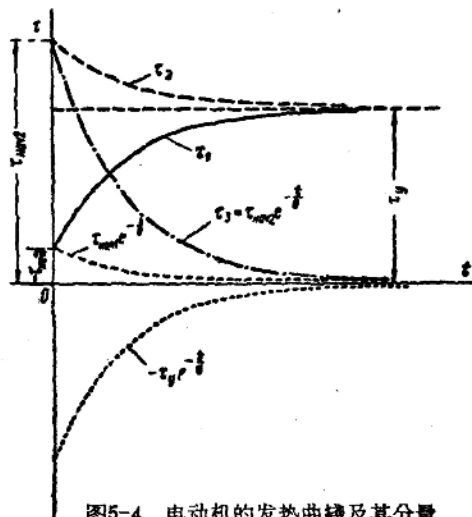
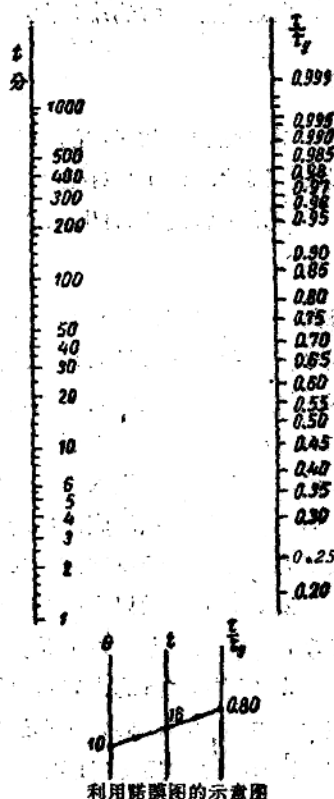


图5-4 电动机的发热曲线及其分量

图5-3 确定电动机温升的诺模图



利用诺模图的示意图

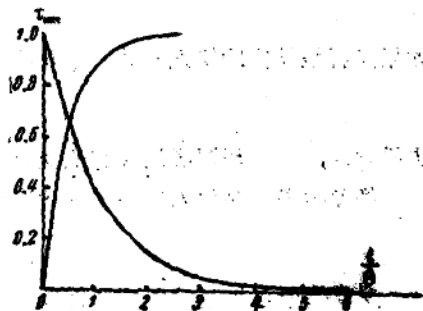


图5-5 电动机的冷却曲线

散熱率 A 比電機旋轉時發熱過程的為小。因此，冷卻時的發熱時間常數 $\Theta_c = \frac{C}{A}$ 將比發熱時的大，就是說 $\Theta_c > \Theta$ 。

電動機靜止時的冷卻曲線如圖 5-5 所示。為了進行比較，同一圖上也繪出了發熱曲線。

5-3 發熱時間常數

對發熱和冷卻過程的研究表明，這些過程進行的特徵在很大程度上取決於發熱時間常數 Θ 。因此，為了更好地了解這些過程就必須較為詳細地討論發熱時間常數。

利用上述發熱時間常數中各量的量綱則可求得：

$$\Theta = \frac{C}{A} = \left[\frac{\text{卡} \times \text{度} \times \text{秒}}{\text{度} \times \text{卡}} \right] = [\text{秒}], \quad (5-17)$$

就是說發熱時間常數具有時間的量綱。容量相同的電動機的發熱時間常數取決於電動機的尺寸。因此，具有較大尺寸的封閉式電動機的發熱時間常數將比開啟式或防護式電動機的大。發熱時間常數的表达式表明，其數值在很大程度上取決於電動機的通風條件。例如自通風電機由於其散熱強烈，因而發熱時間常數比較小；而封閉式電機散熱比較困難，因而發熱時間常數也就增大了。開啟式電機在轉速降低時通風條件變壞，因而使發熱時間常數增大。例如自通風的直流電動機當電樞不動時，其發熱時間常數便增大到 2~2.5 倍。一般工業用异步電動機在靜止狀態時，其發熱時間常數達到轉動時 Θ 值的 4~4.5 倍。

發熱時間常數只有在具有強迫通風的電機中才是不變的，因為，它的冷卻空氣的數量和冷卻的強度均與轉速無關。

發熱時間常數的確定可以根據對發熱方程 (5-13) 和冷卻方程 (5-16) 的研究而得出。在每一個方程中，假定過程的延續時間等於發熱時間常數，則可得電機的溫升為某一數值。因此，所謂發熱時間常數就是指電機散熱時溫升達到 0.632τ 值，或者冷卻時達到 $0.368 \tau_{\text{散}}$ 值所經歷之時間。

發熱時間常數的物理意義如下：當不向周圍媒質發散熱量時，電動機的溫升達到穩定值所經歷的時間即發熱時間常數。在這樣的條件下 $A = 0$ ，而發熱的基本方程式將具有如下形式：

$$Q dt = C d\tau. \quad (5-18)$$

如果過程是從冷的狀態開始，就是說當 $t = 0$ 、 $\tau = 0$ 時，上式的積分給出：

$$t = \frac{C}{Q} \tau. \quad (5-19)$$

這樣看來，當與周圍媒質沒有熱交換時，物體的溫升將按直線規律進行。

將穩定溫升值代入所得的表达式中，則得：

$$t = \frac{C}{Q} \cdot \frac{Q}{A} = \frac{C}{A} = \Theta.$$

通常是取電機最重要的部件（它能反映電機運轉時整個熱狀態）的發熱時間常數作為電機的發熱時間常數。對直流電機通常是取其電樞，而對异步或同步電動機則取其定子作為這樣的部件。

可以用計算的方法求得發熱時間常數，但不夠準確。

因此，通常用实验的方法来确定发热时间常数。为此，可根据电机发热的实验数据来绘制温升对时间的函数曲线 $\tau = f(t)$ ，并在此图中引一条相应于稳定温升 $\tau_y = \frac{\theta}{A}$ 的渐近线。由于在发热时间常数值很大时，需要很长的时间才能得到稳定温度，所以通常是用辅助作图求出渐近值 τ_y 。

为此，在 τ 和 t 的坐标系上作出用实验测得的曲线 $\tau = f(t)$ (图5-6 a)。在 t 轴上截取相等的线段 Δt ，并通过它们作垂线与曲线相交。过所得交点引水平直线，并将其延长到纵轴的左侧。在所引的这些水平直线上从纵轴向左取正比于 $\Delta \tau$ 的线段 ($\Delta \tau$ 是相应于 Δt 时间段内的温度增量)。通过 $k\Delta \tau$ 各段的终点所连的直线与纵轴的交点便给出了 τ_y 的数值。这可以从下面的讨论中看出来。

电机在某一点 i 的发热将是：

$$\tau_i = \tau_y \left(1 - e^{-\frac{t_i}{\Theta}} \right), \quad (5-20)$$

而在相邻的 $i+1$ 点，

$$\tau_{i+1} = \tau_y \left(1 - e^{-\frac{t_i + \Delta t}{\Theta}} \right).$$

温度的增量

$$\Delta \tau = \tau_{i+1} - \tau_i = \tau_y e^{-\frac{t_i}{\Theta}} \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\Theta}} \right).$$

从方程式 (5-20) 得：

$$\tau_y - \tau_i = \tau_y e^{-\frac{t_i}{\Theta}}.$$

用 $\tau_y - \tau_i$ 代替前式中 $\tau_y e^{-\frac{t_i}{\Theta}}$ ，则在 $\Delta \tau$ 与 $\tau_y - \tau_i$ 的坐标系中得到通过坐标原点的直线方程

$$\Delta \tau = \alpha (\tau_y - \tau_i).$$

这里， $\alpha = 1 - e^{-\frac{\Delta t}{\Theta}} = \text{const}$ ，是角系数。坐标原点将是 τ_y 。

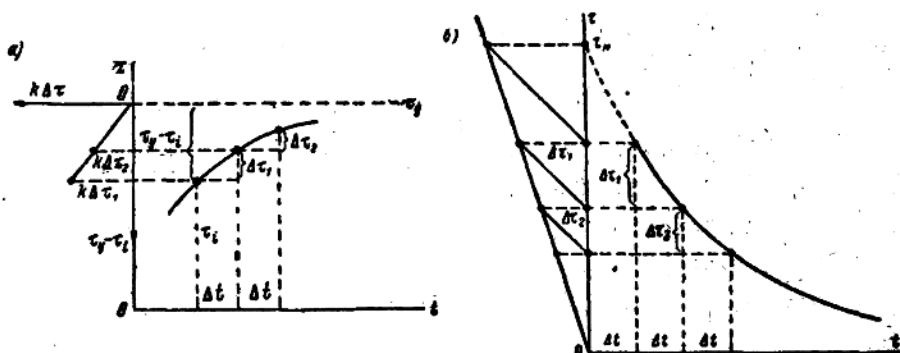


图5-6 用图解法确定电动机的稳定温升

由此得出结论：点 $k\Delta\tau_{n-1}$, $k\Delta\tau_{n-2}$ 等等均在同一直线上，因而就证明了上述确定稳定温升的方法是正确的。

冷却时初始温度 τ_n 的确定见图 5-6 所示。

作 $\tau_y = \text{const}$ 的直线并在发热曲线（图 5-7）的任一点作切线，将其延长与直线 $\tau_y = \text{const}$ 相交。由切线以及过切点所作垂线在 $\tau_y = \text{const}$ 直线上所截取的线段便给出了发热时间常数的数值。

过点 t_1 , τ_1 所作的发热曲线的切线方程将是：

$$\tau - \tau_1 = \frac{d\tau}{dt} (t - t_1).$$

在这种情况下，角系数的数值等于：

$$\frac{d\tau}{dt} = \frac{\tau_y}{\Theta} e^{-\frac{t_1}{\Theta}}.$$

将角系数的值代入切线方程，则得：

$$\tau - \tau_1 = \frac{\tau_y}{\Theta} e^{-\frac{t_1}{\Theta}} (t - t_1).$$

切线与渐近线 $\tau = \tau_y$ 的交点的横坐标 t_2 可由下面的表达式确定：

$$\tau_y - \tau_1 = \frac{\tau_y}{\Theta} e^{-\frac{t_1}{\Theta}} (t_2 - t_1),$$

由此

$$t_2 - t_1 = \Theta \frac{\tau_y - \tau_1}{\tau_y e^{-\frac{t_1}{\Theta}}}.$$

利用发热的基本方程很容易证明右边部分的分式等于 1，亦即：

$$\tau_y - \tau_1 = \tau_y e^{-\frac{t_1}{\Theta}}.$$

这样看来， $t_2 - t_1 = \Theta$ 。

图解法确定发热时间常数值如图 5-7 所示。如果在坐标原点引切线，则这一值的确定更为简单；这时切线在渐近线上所截取的线段就是发热时间常数。

在图 5-7 中也表明，当电动机的负载增加时，稳定温升也随之增高，但发热时间常数保持不变。

在同一类型的电机中，发热时间常数随着电机尺寸的增大而增大。利用发热时间常数的一般表达式 $\Theta = \frac{C}{A}$ 就很容易说明这一点。

电机的热容量 C 与它的体积或者线度的立方成正比地增长，而冷却表面的增大却与线度的平方成正比。

因此，作为一次近似可以认为发热时间常数

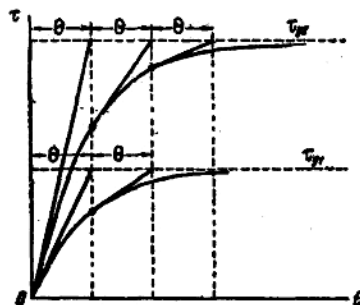


图5-7 发热时间常数的确定

的增大正比于电机的线度:

$$\Theta = \frac{C}{A} \equiv \frac{l^3}{l^2} = l. \quad (5-21)$$

在电动机的产品目录中并未列出发热时间常数的数值, 因此很难获得系统的数据。根据某些文献资料可以认为: 1) 电枢直径从 160 到 600 毫米的开启式直流电动机电枢的发热时间常数 $\Theta = 25 \sim 90$ 分钟; 2) 电枢直径从 100 到 400 毫米的起重-冶金用封闭式 MП 型直流电动机电枢的发热时间常数 $\Theta = 65 \sim 270$ 分钟; 3) 转子直径从 105 到 140 毫米的自通风鼠笼式异步电动机的发热时间常数 $\Theta = 11 \sim 22$ 分钟; 4) 开启式线绕型异步电动机的发热时间常数可近似地取与直流电动机电枢的一样。

MП 型直流电动机电枢的发热时间常数与其直径的函数关系如图 5-8 所示。

必须指出, 只有将电动机视为均匀固体, 电动机的温升才可能具有上述的按指数规律变化的特点。在实际的条件下, 发热过程的进行是比较复杂的。当电动机运转时, 铜损和铁损都要引起发热。但是由于绕组的质量较小而传热性较好, 所以其发热就比电动机铁的有效部分快得多, 因为铁的质量很大, 而铁损却比铜损小得多。由于铁的冷却面很大, 所以其发热总是比铜的发热慢一些。由于这样, 在铁与铜之间就存在着温度差, 从而引起长期的热交换。

从绕组方面传给铁的增加热量加快了铁的发热, 而铜的温度的升高则由于热量的散出而缓慢下来。因此绕组的发热曲线在开始时比指数曲线陡一些, 只是在稳定过程中才与指数曲线相重合, 最后, 实际上是平行于时间轴。

作为一个例子在图 5-9 中示出了容量为 15 千瓦、 $n_1 = 1500$ 转/分●的 MA-200 型异步电动机用实验方法而得到的定子绕组的发热曲线 1。为了进行比较, 在该图中还画出了发热时间常数为 $\Theta = 20$ 分钟的指数曲线 2。这样看来, 根据上述公式计算温升只能给出定性的图象。特别是在发热过程的开始差别很大。

“狄纳莫”工厂根据实验认为温升的计算曲线只是从发热开始的某一段时间之后才能

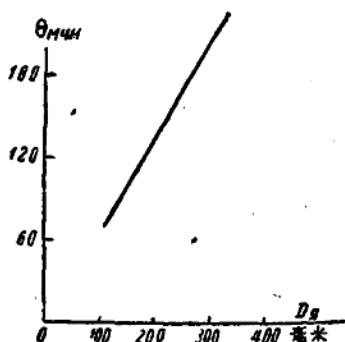


图5-8 MП型直流电动机电枢绕组的发热时间常数与其直径的关系

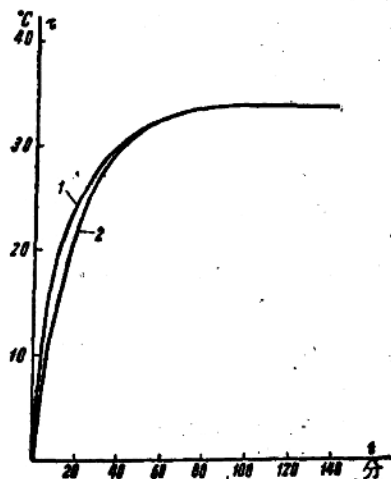


图5-9 异步电动机的温升实验曲线

● 原文为 n , 应为同步转速 n_1 。——译者

与实验曲线很好地重合。

5-4 电机温升的确定

上面关于电动机发热过程的研究表明,电动机可靠、长期和经济的运转,只有在这样的情况下才是可能的,即电机绝缘的工作温度一方面非常接近于该级绝缘所容许的最大值,另一方面它始终不超过规定的限度。绝缘温度过低,即说明电机欠载运转,因而也说明电机没有被充分利用。反之,绝缘过热将导致它迅速老化和损坏。因此,通常须要绘制电机的温升随时间变化的曲线并确定其最大值,然后校验电机的温升是否符合苏联国家标准 ГОСТ 的要求。

假若需要确定按周期运转的电动机温升的变化,其损耗如图 5-10 的曲线所示。已知电动机的发热时间常数 Θ 并给出了散热率 A 的数值。

假定电动机从冷的状态开始运转,就是说其初始温度等于周围媒质的温度。我们按下述公式逐段地进行计算:

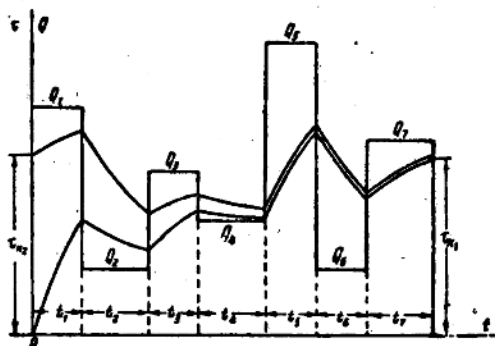


图 5-10 带周期性负载运转的电动机的发热曲线

$$\tau_{n1} = \frac{Q_1}{A} \left(1 - e^{-\frac{t_1}{\Theta}} \right) + \tau_{\text{нач.}i} e^{-\frac{t_1}{\Theta}} \quad (5-22)$$

将相应段之损耗 Q_i 、时间 t_i 以及该段初始温升值 $\tau_{\text{нач.}i}$ 代入上式,求得该段末了的温升 τ_{n1} 。

因为运转是从冷的状态开始,对于第一段则 $\tau_{\text{нач.}i} = 0$ 。而对于以后各段,其初始温升将是上一段末了的温升,就是说 $\tau_{\text{нач.}2} = \tau_{n1}$; $\tau_{\text{нач.}3} = \tau_{n2}$ 并依此类推。

利用各段末了温升值的序列数据,可以很容易得到用于确定具有多段负载图的一个周期最末一段的最终温升的表达式,其形式为:

$$\begin{aligned} \tau_n = \frac{1}{A} \left[Q_1 \left(1 - e^{-\frac{t_1}{\Theta}} \right) e^{-\frac{t_n - t_1}{\Theta}} + Q_2 \left(1 - e^{-\frac{t_2}{\Theta}} \right) e^{-\frac{t_n - (t_1 + t_2)}{\Theta}} \right. \\ \left. + \dots + Q_n \left(1 - e^{-\frac{t_n}{\Theta}} \right) e^{-\frac{0}{\Theta}} \right] \quad (5-23) \end{aligned}$$

作图应该一直进行到热状态达到稳定时为止,热状态稳定的标志是周期的初始温升和终止温升相等。这样所得温升稳定状态的曲线使我们有可能作出结论,最高温升是否符合苏联国家标准 (ГОСТ) 的规定。

如果电动机的发热是从某一初始温升 $\tau_{\text{нач}}$ 开始,则表达式 (5-23) 取得如下形式:

$$\begin{aligned} \tau_n = \frac{1}{A} \left[Q_1 \left(1 - e^{-\frac{t_1}{\Theta}} \right) e^{-\frac{t_n - t_1}{\Theta}} + Q_2 \left(1 - e^{-\frac{t_2}{\Theta}} \right) e^{-\frac{t_n - (t_1 + t_2)}{\Theta}} \right. \\ \left. + \dots + Q_n \left(1 - e^{-\frac{t_n}{\Theta}} \right) e^{-\frac{0}{\Theta}} + \tau_{\text{нач}} e^{-\frac{t_n}{\Theta}} \right] \quad (5-24) \end{aligned}$$

借助于指数函数的样板绘制发热曲线的图解法,可用来代替分析计算法。当利用图解

法时，应该适当地选择损耗的比例尺 μ_0 和电动机温升的比例尺 μ_r ，使得在某一比例尺下损耗曲线的座标能够表示温升 τ_r ，假定电动机以该段所表示的损耗值无限长地运转， τ_r 便是这时的温升。 τ_r 值在

$$\mu_r = \frac{\mu_0}{A}。$$

的条件下便能得到。

样板的制作和应用将在第六章中予以说明。不过用样板绘制发热曲线实际上是不采用的。

上述确定电动机容量选择得是否正确的方法，其实际意义不大。由于缺乏发热时间常数的准确数据而必须取其近似值，且发热时间常数取决于电机的通风条件，因而不能得到准确与可靠的计算。但上述方法对说明下面的内容却有着重要的意义。

5-5 电力拖动运转状态的分类

根据电力拖动运转的特性和持续时间，电力拖动的运转定为三种基本状态：

- 1) 长期的●，
- 2) 短期的，
- 3) 重复短期的●。

长期运转状态 如果电力拖动的运转持续时间是这样长，以致电动机各部分都达到稳定温度，则称这种运转状态为长期运转状态。

短期运转状态 如果运转期的持续时间不足以使电动机达到稳定温升，而随后的停歇时间又足够长，使电动机来得及冷却到周围媒质温度，则这种运转状态称为短期运转状态。对于短期运转状态，规定有下述三种标准持续时间：30、60和90分钟。

重复短期运转状态 当电动机的运转与停歇相互交替进行时，则这种运转状态称为重复短期运转状态。在这种情况下，电动机的运转持续时间是这样的短，以致电动机来不及达到稳定温度，而在随后停歇时间内又来不及冷却到周围媒质的温度。重复短期运转状态是用相对接通持续时间（俄文缩写为 $II B$ ）的数值来表征。相对接通持续时间应当理解为运转段的时间与整个工作周期时间之比：

$$II B = \frac{a}{a + b}，$$

或

$$II B \% = \frac{a}{a + b} \cdot 100\%。$$

式中 a ——运转期的持续时间；

b ——停歇持续时间。

相对接通持续时间统一规定为： $II B \% = 15\%$ ； 25% 和 40% 。一个周期的持续时间不应超过10分钟。

● 又称连续的，持续的。——译者

● 又称间歇的。——译者

上述各种运转状态的负载图和发热过程进行的特性如图 5-11 所示。

在上述各种运转状态下, 电动机的发热条件是各不相同的, 因此不仅需要确定容量的不同方法, 而且还应当对每一种运转状态采用专用的电动机。

由于这样, 电机制造工业生产了供长期、短期●和重复短期运转状态使用的电动机。

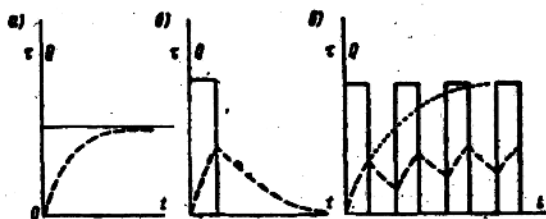


图5-11 电动机运转状态的分类:
а—长期的; б—短期的; в—重复短期的。

5-6 长期运转状态下电动机容量的选择

在这种状态下, 正确选择的电动机应能运转任意长的时间而其温升不超过容许的限度。

长期运转状态最简单的情况是电动机在轴上的负载保持恒定或变化很小的情况下长期运转。

作为在这种状态下运转的典型机械有: 水泵站中的离心泵, 通风机, 排烟机, 空气压缩机和运输设备。这些机械的负载状态是长期不变的。在此情况下, 启动状态对发热过程的影响将是极其微小的。

在此种情况下, 根据相应的工艺关系来确定所需的静功率, 并考虑到工作机械之间传动装置中的损耗, 从产品目录中选择容量相近的电动机。这样选择的电动机, 只要周围媒质温度不超过标准温度 35°C 就是合适的。当周围媒质的温度不同于标准温度时, 选择电动机容量则必须考虑这一情况。显然, 当周围媒质温度比较低时, 电动机在个别情况下可以承担大于其额定容量的负载。反之, 当周围媒质温度超过标准值时, 则必须考虑减轻电动机的负载, 使得绝缘的最高温升不超过其容许值。

上述这种情况发生在大型锅炉房排烟机的电力拖动中(在那里周围媒质的温度可能达到 $50\sim 60^{\circ}\text{C}$)以及加热炉的强迫通风机和其他类似的设备中。因此必须善于决定电动机额定容量在何种情况下需要改变。

假设电机对周围媒质温度的最终温升正比于电机的损耗, 以此作为下面计算的基础。

容量选择得正确的电动机, 在额定负载和标准的周围媒质温度下长期运转时, 其温升不应超过该级绝缘所容许的温升, 就是说

$$\tau_{\text{доп}} = \frac{1}{A} (q_{\text{ном}} + q_{\text{пер.ном}}), \quad (5-25)$$

式中 $q_{\text{ном}}$ ——电动机的不变损耗;

$q_{\text{пер.ном}}$ ——额定负载下电动机的可变损耗。

我们用 γ 来表示电动机的不变损耗对其可变损耗额定值之比, 就是说

$$\gamma = \frac{q_{\text{ном}}}{q_{\text{пер.ном}}}.$$

● 目前我国暂不生产这种电机。——译者