

铜损随输出功率 P_o 的平方与常数 K_c 的乘积增加, 即

$$P_{Co} = K_c P_o^2 \quad (6-3)$$

这可重写为

$$P_z = P_{Fe} + K_c P_o^2 \quad (6-4)$$

因为

$$P_u = P_o + P_z \quad (6-5)$$

所以, 效率可以表达为

$$\eta = \frac{P_o}{P_o + P_z} \quad (6-6)$$

接着, 把式 (6-4) 代入式 (6-6), 给出

$$\eta = \frac{P_o}{P_o + P_{Fe} + K_c P_o^2} = \frac{P_o}{P_{Fe} + P_o + K_c P_o^2} \quad (6-7)$$

对 P_o 求导

$$\frac{d\eta}{dP_o} = \frac{P_{Fe} + P_o + K_c P_o^2 - P_o (1 + 2K_c P_o)}{(P_{Fe} + P_o + K_c P_o^2)^2} \quad (6-8)$$

为求最大值, 令式 (6-8) 等于 0, 则

$$\frac{P_{Fe} + P_o + K_c P_o^2 - P_o (1 + 2K_c P_o)}{(P_{Fe} + P_o + K_c P_o^2)^2} = 0 \quad (6-9)$$

$$-P_o (1 + 2K_c P_o) + (P_{Fe} + P_o + K_c P_o^2) = 0 \quad (6-10)$$

$$-P_o - 2K_c P_o^2 + P_{Fe} + P_o + K_c P_o^2 = 0 \quad (6-11)$$

因此

$$P_{Fe} = K_c P_o^2 = P_{Co} \quad (6-12)$$

由辐射和对流产生的变压器损耗

变压器绕组的温升不可能完全精确地预计, 尽管在文献中对它的计算叙述了很多方法。一个对于开放的磁心和绕组结构比较准确的方法是建立在可以把磁心和绕组的损失集中在一起这样一个假定的基础上, 即

$$P_z = P_{Co} + P_{Fe} \quad (W) \quad (6-13)$$

并假定热能被均匀地消耗在全部磁心和绕组装配件的表面。当一个物体的温度升高到它周围环境温度以上的时候, 将发生通过热辐射的热传递, 以波的形式发射辐射能量。根据斯蒂芬-玻尔兹曼 (Stefan-Boltzmann) 定律 (见参考文献 1), 这个热传递可以表达为

$$W_r = K_r \epsilon (T_1 - T_1) \quad (6-14)$$

● 原文有误。原文式 (6-7) 中 P_o 前的系数为 K , 但式 (6-4) 中 P_o 前的系数为 K_c , 故此处译文改为 K_c 。同理, 直至式 (6-12) 相应的地方皆应改为 K_c 。

式中： W_s 为表面上每平方厘米的功率损失， W/cm^2 ； $K_r = 5.7(10^{-12})W/(cm^2/K^4)$ ； ϵ 为发射系数； T_2 为发热物体的温度， K (开尔文)； T_1 为周围即环境温度， K (开尔文)。

当一个物体比周围的介质（通常是空气）热时，将发生通过对流的热传递。与热物体接触的空气层通过传导扩散被加热且吸收其热量使温度升高，接下去较冷的层替换温度已升高的层，以此顺序被加热和温度升高。只要物体周围的空气或其他介质的温度较低，这个热传递就一直继续下去。通过对流的热传递可用数学式表达如下

$$W_c = K_c F \theta^\eta \sqrt{P} \quad (6-15)$$

式中： W_c 为每平方厘米的功率损失， W/cm^2 ； $K_c = 2.17 \times 10^{-4}$ ； F 为空气摩擦系数（垂直的表面为 1）； θ 为温升， $^\circ C$ ； P 为相对大气压（在海平面上为 1）； η 为指数值，其范围为 1.0~1.25，取决于正在被冷却表面的形状和位置。

由式 (6-13) 和式 (6-15) 可把由垂直（直立）的平表面耗散的总热能表达为

$$W = 5.70 \times 10^{-12} \epsilon (T_2^4 - T_1^4) + 1.4 \times 10^{-3} F \theta^{1.25} \sqrt{P} \quad (6-16)$$

温升与表面积 A_s 耗散的关系

不同功率损失水平的可预知温升如图 6-2 所示。它是基于式 (6-16)，依靠从 Blume 的著作（1938，见参考文献 1）中的资料得到的。具体条件是物体处于海平面，环境温

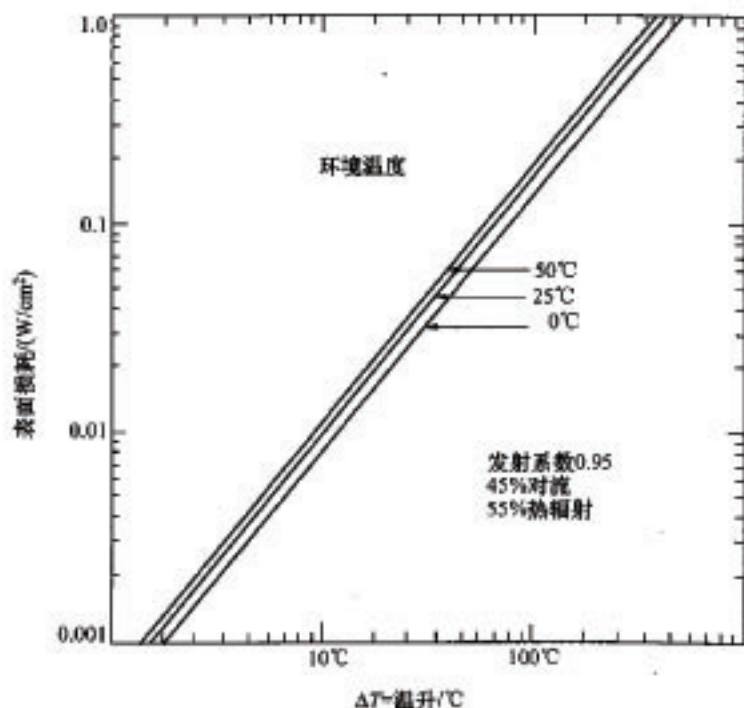


图 6-2 温升与表面热耗散的关系

[引自 L. F. Blume, *Transformers Engineering*, (变压器工程) Wiley, New York, 1938, Figure 7.]

度为 25℃, 表面热发射系数为 0.95, 热传递由 55% 的热辐射和 45% 的对流组成。功率损失(热耗散)用瓦特/总表面的每平方米来表示。由水平表面的上边通过对流耗散的热能大约比由垂直表面通过对流耗散的热能多 15%~20%。由水平表面下边耗散的热能取决于面积和热导率。

热耗散所要求的表面积 A_1

耗散热能(以单位面积所消耗的瓦特数表示)所要求的有效表面积为

$$A_1 = \frac{P_z}{\psi} \quad (\text{cm}^2) \quad (6-17)$$

式中: ψ 为功率密度, 即从变压器的表面每平方米所耗散的平均功率; P_z 为总的功率损耗, 即被耗散的总功率。

变压器的表面积 A_1 可能与变压器的面积积有关系。图 6-3 中所示的对数直线关系是根据第 3 章中的数据画出的。这个表面积 A_1 与面积积 A_p 关系的推导见第 5 章。

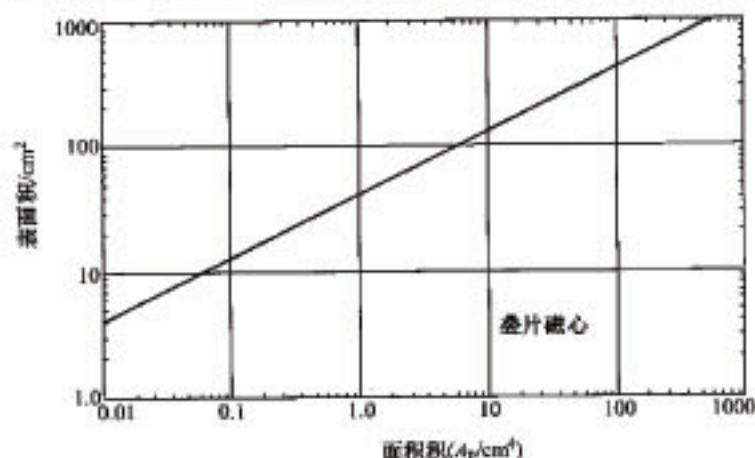


图 6-3 表面积 A_1 与面积积 A_p 的关系

由这个表面积可以引申出下面的关系

$$A_1 = K_s A_p^{0.5} = \frac{P_z}{\psi} \quad (\text{cm}^2) \quad (6-18)$$

由图 6-2[●] 得出

$$\psi = 0.03 \quad (\text{W/cm}^2, \text{ 在 } 25^\circ\text{C})$$

$$\psi = 0.07 \quad (\text{W/cm}^2, \text{ 在 } 50^\circ\text{C})$$

以℃为单位的温升 T_r 公式为

$$T_r = 450\psi^{0.526} \quad (^\circ\text{C}) \quad (6-19)$$

● 此处原文为“由图 6-3 (And from Figure 6-3), 但根据上下文, 这里应为图 6-2。”

要求的表面积 A_s

一般，对变压器一般有两个在环境温度以上的允许温升，这两个温升如图 6-4 所示。图中所示为在环境温度以上的温升为 25°C 和 50°C 时所要求的表面积 A_s 与总损耗瓦数的关系。图中提供的数据被用来作为求解所需要的以 cm^2 为单位的变压器表面积的基础。

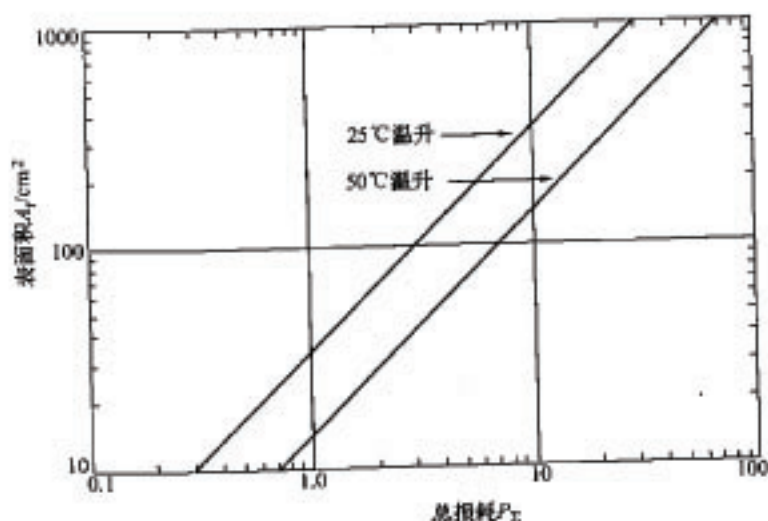


图 6-4 温升为 25°C 和 50°C 的表面积与总损耗的关系

如果变压器被看作是均质的，那么热能将均匀地遍布从磁心和绕组的安装表面上散发。图 6-5 给出了变压器达到最终温度的 63% 所需要的时间（即时间常数）的一个很好近似。一个典型变压器的温升如图 6-6 所示。

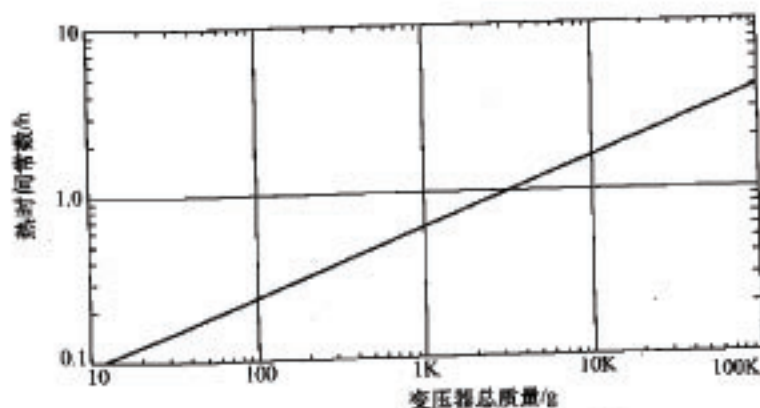


图 6-5 达到最终温度的 63% 所需要的时间

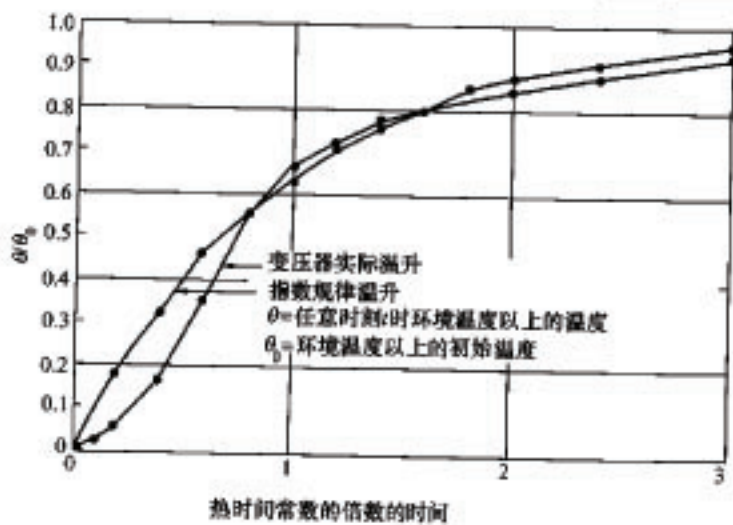


图 6-6 变压器温升的时间

凡... ..