

(利用面积乘法)

计算例: **M1022** (暂定名)

1. 该电感使用在开关电源的滤波电路, 设计指标如下:

- (1) 电感: $L_o = 1.7 \mu H \pm 20\%$ (at 1kHz /1Vr)
- (2) $L_f = 1.7 \mu H \pm 20\%$ (at 200kHz /1Vr)
- (3) 直流电流: $I_{dc} = 20 A$
- (4) 交流电流: $\Delta I = I_{ac} = 4 A_{p-p}$
- (5) 交流频率: $f = 200000 Hz$
- (6) 温升: $\Delta t \approx 50 ^\circ C$ (参考)
- (7) 铁心材料: 26
- (8) 铁心结构: 环形
- (9) 磁通密度: $B_m = 0.4 T$ (预选值)

2. 设计步骤和计算:

(1) 传递能力:

计算式: $P_e = L * I^2 / 2 (W-s)$

计算: $I = I + \Delta I / 2 = 20 + 4 / 2 = 22.0 (A)$

$P_e = (1.7 * 10^{-6} * 22^2) / 2 = 0.000411 (W-s)$

(2) 面积乘积:

计算式:

$$A_p = \left[\frac{2 * P_e * 10^4}{B_m * K_u * K_j} \right]^x \text{ cm}^4$$

$K_u = 0.45$ (窗口利用系数)

$K_j = 590$ (粉末铁心结构常数 50°C时)

$x = 1.14$ (粉末铁心结构常数 $x=1.14$)

计算:

$$A_p = \left[\frac{2 * 0.000411 * 10^4}{0.4 * 0.45 * 590} \right]^{1.14} = 0.0542 \text{ cm}^4$$

(3) 选择铁心:

T50-26

内径: $ID = 0.770 \text{ cm}$

外径: $OD = 1.270 \text{ cm}$

高度: $H_t = 0.483 \text{ cm}$

导磁率: $\mu_o = 75.0$

电感系数: $AL = 33.0$

截面积: $A_c = 0.112 \text{ cm}^2$

磁路长度: $MPL = 3.190 \text{ cm}$

体积: $V = 0.358 \text{ cm}^3$

密度: $d = 7.000 \text{ g/cm}^3$

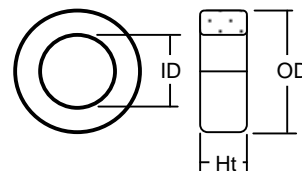
铁心质量: $W_{tfe} = 2.506 \text{ g}$

窗口面积: $W_a = 0.4654 \text{ cm}^2$

面积积: $A_p = 0.0521 \text{ cm}^4$

粉末铁心结构常数

$K_j(25^\circ C)$	403
$K_j(50^\circ C)$	590
x	1.14
y	-0.12



(4) 计算电流密度:

计算式: $J = K_j * A_p^y$

$y = -0.12$ (参看: 粉末铁心结构常数, $y = -0.12$)

计算: $J = 590 * 0.0521^{-0.12} = 841.01 A/cm^2$

(5) 计算需要的导线:

5-1 导线截面积:

计算式:
$$A_{wb} = \frac{I_{dc} + \Delta I / 2}{J} \text{ cm}^2$$

计算:
$$A_{wb} = \frac{20 + 4 / 2}{841.01} = 0.0262 \text{ cm}^2$$

5-2 导线选择:

线径: $\Phi d = 1.80 \text{ mm}$ [$\Phi d = (A_{wd} * 100 / \pi)^{0.5} * 2 = 1.825 \text{ mm}$]

截面积: $A_{wb} = 0.0254 \text{ cm}^2 = 2.5434 \text{ mm}^2$

种类: PEW

电阻: $\Omega / m = 0.007007 \text{ [Max]}$

带绝缘外径: 1.914 mm (日本天满

带绝缘截面积: $A_w = 0.0288 \text{ cm}^2$ 电线数据)

每米概算重量: 22.9 g/m

(6) 可绕匝数:

6-1 铁心有效窗口面积:

计算式: $W_{a_eff} = W_a * S_3$ [$S_3 = 0.75$ 典型数据]

计算: $W_{a_eff} = 0.4654 * 0.75 = 0.3491 \text{ cm}^2$

6-2 可绕匝数:

计算式: $N = W_{a_eff} * S_2 / A_w$ (匝) [$S_2 = 0.6$ 典型数据]

计算: $N = 0.3491 * 0.6 / 0.0288 = 7.28 \text{ Ts}$

(7) 实际绕线匝数:

计算式: $N_{coil} = (L_o / AL)^{0.5}$

计算: $N_{coil} = (1.7 * 10^{-9} / (33 * 10^{-12}))^{0.5} = 7.18 \text{ Ts}$

取整: $N = 7.0 \text{ Ts}$

(8) 初始电感量验算:

$$\begin{aligned} L_o &= N^2 * AL \\ &= 7 * 7 * 33 \\ &= 1.62 \text{ } \mu\text{H} \end{aligned}$$

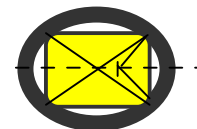
(9) 绕组电阻的计算:

9-1 绕组的平均匝长:

$$\begin{aligned} MLT &= 3.14 * ((A_c / H_t + \Phi d / 2) * ATAN(A_c / H_t^2) + H_t * ATAN(H_t^2 / A_c)) \\ &= 2.156 \text{ cm} \end{aligned}$$

9-2 绕组的线长:

$$\begin{aligned} L_{coil} &= MLP * N \\ &= 2.156 * 7 \\ &= 0.15 \text{ m} \end{aligned}$$



9-3 绕组电阻:

$$\begin{aligned} R_{dc} &= L_{coil} * \Omega / m \\ &= 0.15 * 0.007007 \\ &= 0.001057 \text{ } \Omega \end{aligned}$$

(10) 铜损的计算:

10-1 直流铜损计算:

$$\begin{aligned}
 P_{dc} &= (I_{dc})^2 \cdot R_{dc} \\
 &= 20^2 \cdot 0.001057 \\
 &= 0.423 \quad \text{W}
 \end{aligned}$$

10-2 交流铜损计算:

绕组导线的高频趋肤深度:

$$\begin{aligned}
 df &= 6.61 / f^{0.5} \quad \text{cm} \\
 &= 6.61 / (200000)^{0.5} \\
 &= 0.0148 \quad \text{cm}
 \end{aligned}$$

绕组导线的等效高频电阻(200kHz时):

$$\begin{aligned}
 R_{ac} &= \Omega / \text{m} \cdot L_{coil} \cdot A_{wb} / A_{ac} \\
 A_{ac} &= \pi \cdot ((\Phi d / 2)^2 - ((\Phi d / 2) - 10 \cdot df)^2) \quad (\text{mm}^2) \\
 &= 0.0035 \quad \Omega \quad [\text{高频时导线的有效载流面积}]
 \end{aligned}$$

交流铜损计算:

$$\begin{aligned}
 P_{ac} &= I_{ac}^2 \cdot R_{ac} \\
 &= 4^2 \cdot 0.0035 \\
 &= 0.056 \quad \text{W}
 \end{aligned}$$

10-3 绕组铜损:

$$\begin{aligned}
 P_{cu} &= P_{dc} + P_{ac} \\
 &= 0.479 \quad \text{W}
 \end{aligned}$$

(11) 工作磁通密度的计算:

计算式:

$$B_{ac} = \frac{0.4 \cdot \pi \cdot N \cdot (\Delta I / 2) \cdot \mu \cdot 10^{-4}}{MPL} \quad (\text{T})$$

计算:

$$\begin{aligned}
 B_{ac} &= (0.4 \cdot 3.14 \cdot 7 \cdot (4/2) \cdot 75 \cdot 10^{-4}) / 3.19 \\
 &= 0.041 \quad \text{T}
 \end{aligned}$$

(12) 铁损计算:

12-1 单位铁损的计算式:

$$W/\text{kg} = k \cdot f^x \cdot B_{ac}^y$$

$$\begin{aligned}
 k &= 0.144 \quad [-26\# \text{铁粉}] \\
 x &= 1.12 \quad [-26\# \text{铁粉}] \\
 y &= 2.01 \quad [-26\# \text{铁粉}]
 \end{aligned}$$

单位铁损:

$$\begin{aligned}
 W/\text{kg} &= 0.144 \cdot (200000)^{1.12} \cdot (0.041)^{2.01} \\
 &= 206.280 \quad (\text{W/kg}) \\
 &= 0.206 \quad \text{W/g}
 \end{aligned}$$

12-2 铁损计算:

$$\begin{aligned}
 P_{fe} &= \text{mW/g} \cdot W_{tfe} \\
 &= 0.206 \cdot 2.506 \\
 &= 0.517 \quad \text{W}
 \end{aligned}$$

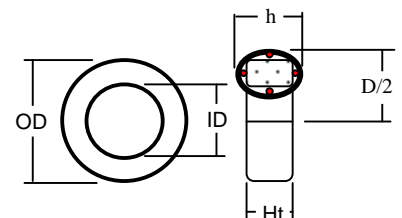
(13) 总损耗:

$$\begin{aligned}
 P_{\Sigma} &= P_{cu} + P_{fe} \\
 &= 0.451 + 0.517 \\
 &= 0.996 \quad \text{W}
 \end{aligned}$$

(14) 单位表面耗散功率:

$$\text{绕组外径: } D = OD + 3 \cdot \Phi d = 1.81 \quad \text{cm}$$

$$\text{绕组宽度: } h = Ht + 3 \cdot \Phi d = 1.023 \quad \text{cm}$$



表面积:
$$W_a = 2 * \pi * (D)^2 / 4 + \pi * D * h - 2 * \pi * ID^2 / 4 * (1 - S_3)$$

$$= 10.72 \quad \text{cm}^2$$

单位表面耗散功率:

$$\Psi = P_{\Sigma} / W_a$$

$$= 0.996 / 10.7$$

$$= 0.093 \quad \text{W/cm}^2$$

(15) 预计温升概算:

(说明: 在无风的环境中, 按55%的辐射和45%的对流组合方式进行散热)

环境20°C: $\Delta T_{20} = 58.52 \quad ^\circ\text{C}$

环境30°C: $\Delta T_{30} = 56.90 \quad ^\circ\text{C}$

环境40°C: $\Delta T_{40} = 55.35 \quad ^\circ\text{C}$

环境50°C: $\Delta T_{50} = 53.88 \quad ^\circ\text{C}$

(16) 铁心上的直流偏置磁场强度和线圈的电感量:

16-1 铁心上的直流偏置磁场强度:

计算式:
$$H_{dc} = \frac{0.4 * \pi * N * (I_{dc} + \Delta I / 2)}{MPL}$$

计算:
$$H_{dc} = (0.4 * 3.14 * 7 * (20 + 4 / 2)) / 3.19$$

$$= 60.63 \quad \text{Oe}$$

16-2 在此偏置下线圈的电感量:

查-26#铁粉磁材在直流60(Oe)偏置时的初始导磁率的百分数约为60%左右, 此时线圈的电感量约为:

$$L_g = L_o * 60\%$$

$$\approx 0.97 \quad \mu\text{H}$$

(17) 无负荷时1kHz/1Vr; 200kHz/1Vr的电感量 (Lo):

查-26#铁粉材在1.0kHz时的导磁率相对初始值没有变化, 此时(1kHz)线圈的电感量即

$$L_{1k} = L_o$$

$$= 1.62 \quad \mu\text{H}$$

查-26#铁粉磁材在200kHz时的导磁率约为68左右, 相对初始值的百分数约68/75≈90%, 此时线圈的电感量约为:

$$L_{200k} = L_o * 90\%$$

$$\approx 1.46 \quad \mu\text{H}$$

(18) 小结: **M1022**

铁心: T50-26

导线: $\Phi 1.80 \quad \text{mm}$ 线种: PEW 匝数: 7.0 Ts

电感量: $L_1 = 1.62 \quad \mu\text{H} / \text{at } 1.0\text{kHz} \quad [1.7 * 95\%]$

$L_2 = 1.46 \quad \mu\text{H} / \text{at } 200\text{kHz} \quad [1.7 * 85\%]$

$L_3 = 0.97 \quad \mu\text{H} / \text{在电路工作状态时的直流磁场偏置下}$

电流: $I_{dc} = 20.0 \text{ A} \quad \text{at DC}$

$I_{ac} = 4.0 \text{ A} \quad \text{at } 200\text{kHz}$

总损耗: 1.024 W 其中: 铁损≈ 0.517 W

铜损≈ 0.507 W

温升概算值:

环境20°C 58.5 °C [电感表面温度约78.5°C]

环境50°C 53.9 °C [电感表面温度约103.9°C]

(19) 资料:

19-1 USA Micrometals 铁粉末铁心 (节录):

型号	内径	截面面积	面积乘积	磁路长度	质量	导磁率	电感系数
	cm	cm ²	cm ⁴	cm	g	μ	AL
T30-26	0.384	0.065	0.008	1.83	0.8	75.0	33.0
T37-26	0.521	0.070	0.015	2.32	1.1	75.0	28.0
T44-26	0.582	0.107	0.028	2.67	2.0	75.0	36.0
T50-26	0.770	0.121	0.056	3.20	2.7	75.0	32.0
T68-26	0.940	0.196	0.136	4.24	5.7	75.0	42.0
T72-26	0.711	0.369	0.147	3.99	10.4	75.0	87.0

粉末铁心结构常数

Kj(25°C)	Kj(50°C)	x	y
403	590	1.14	-0.12

[变压器与电感设计手册 (中国电子变压器专业委员会内部参考资料)]

19-2 嘉成电子公司铁粉末铁心 (节录):

型号	内径	外径	高度	磁路长度	截面面积	体积	电感系数
	mm	mm	mm	cm	cm ²	cm ³	AL
T30-26	3.840	7.8	3.250	1.84	0.061	0.110	33.5
T37-26	5.210	9.53	3.250	2.31	0.064	0.147	28.5
T44-26	5.820	11.2	4.040	2.68	0.099	0.266	37.0
T50-26	7.700	12.7	4.830	3.19	0.112	0.358	33.0
T68-26	9.400	17.5	4.830	4.23	0.179	0.759	43.5
T72-26	7.110	18.3	6.600	4.01	0.349	1.400	90.0

19-3 26号铁粉材质铁损:

① USA Micrometals 公司提供的 μ=75, 26#铁粉末铁心铁损计算式:

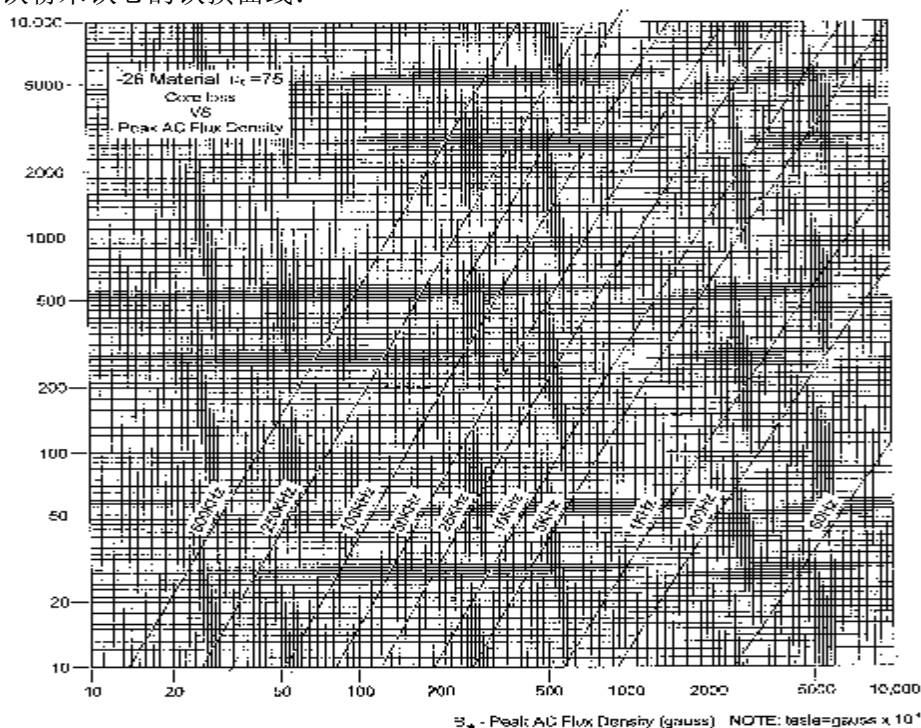
$$P = 0.144 * f^{1.12} * B_m^{2.01} \quad \text{W/kg}$$

f: 频率 Hz

B_m: 磁通密度 T

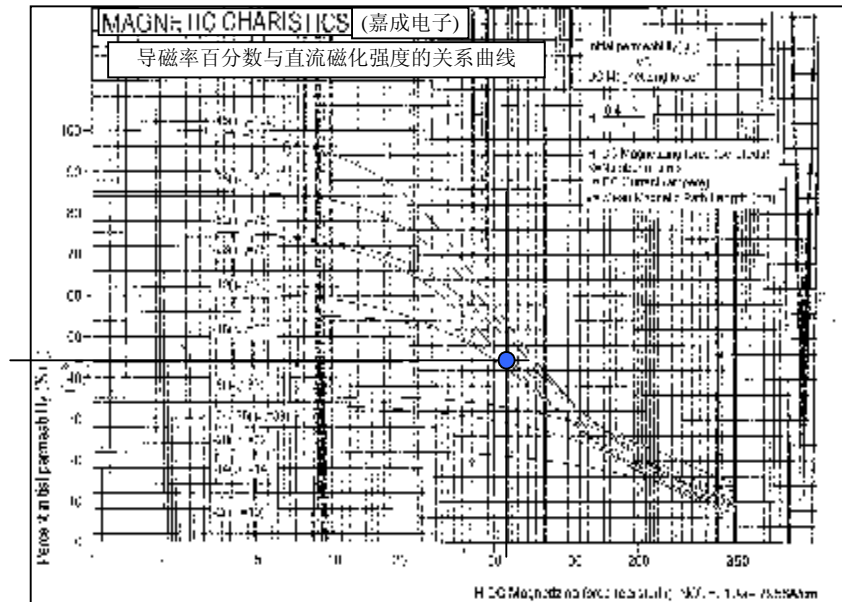
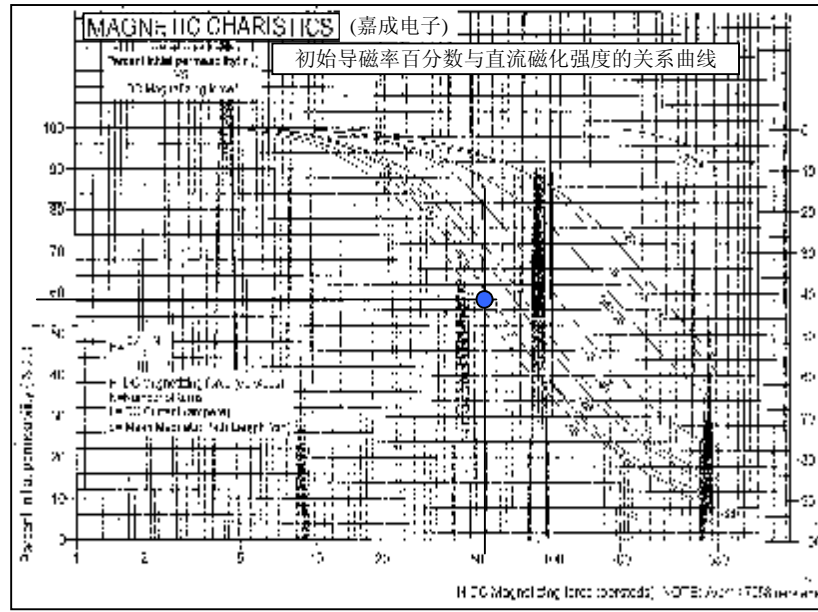
[变压器与电感设计手册 (中国电子变压器专业委员会内部参考资料)]

② 嘉成电子提供的铁粉末铁心的铁损曲线:

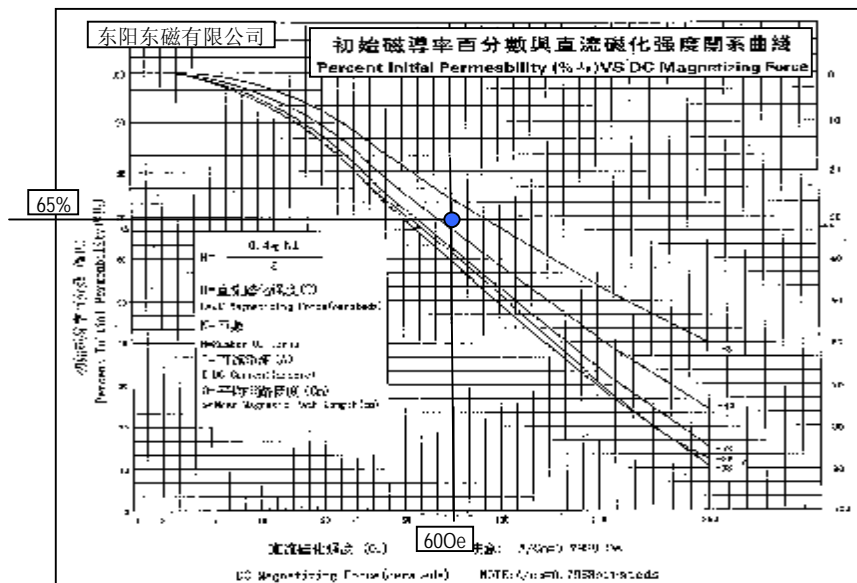


19-4 铁粉末铁心的导磁率和磁场强度的关系:

① 嘉成电子铁粉末铁心的导磁率和磁场强度的关系曲线:

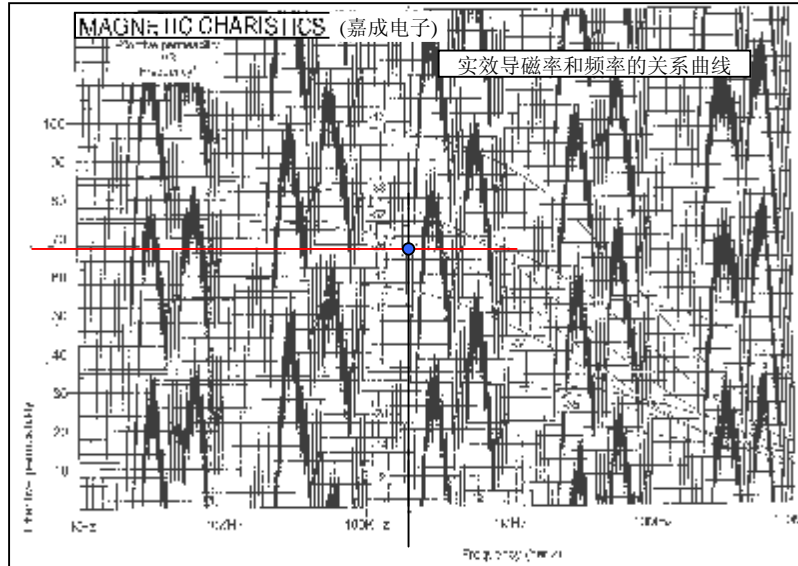


② 东阳东磁有限公司提供的铁粉末铁心的导磁率和磁场强度的关系曲线:



19-5 铁粉末铁心的导磁率和频率的关系:

嘉成电子提供的铁粉末铁心的导磁率和频率的关系曲线:



19-6 电感线圈表面温升的计算:

(以下内容为节录自中国电子学会2006年变压器和电感器件专业学术年会论文集中杜保明的文章)

假设热能是通过铁心或线圈绕组的暴露表面均匀消散的,当绕组或铁心的温度高于周围环境的空气温度时,热量就将通过热辐射的方式和热对流的方式向周围传递。

热辐射方式的散热能力为:

$$W_r = K_r \times \varepsilon \times (T_t^4 - T_o^4)$$

式中: W_r 表面的辐射散热能力 (W/cm²)

$$K_r = 5.70 \times 10^{-12}$$

ε 辐射系数, 一般情况下 $\varepsilon \approx 0.95$

T_t 物体表面绝对温度 (K)

T_o 周围环境的温度 (K)

热对流方式的散热能力为:

$$W_c = K_c \times F \times \Delta t^\eta \times P^{0.5}$$

式中: W_c 表面的对流散热能力 (W/cm²)

$$K_c = 2.17 \times 10^{-4}$$

F 相对空气摩擦系数, 垂直表面的 $F \approx 1.0$

Δt 物体表面温升 (K)

η 指数值, 1.0 ~ 1.25, 取决于表面形状和位置

P 相对大气压力 (海平面处 = 1, 低海拔处 ≈ 1.0)

总的散热能力为两种散热能力相加:

$$W_s = k_r \times W_r + k_c \times W_c$$

$$= k_r \times [K_r \times \varepsilon \times (T_t^4 - T_o^4)] + k_c \times [K_c \times F \times \Delta t^\eta \times P^{0.5}]$$

式中: k_r 辐射散热比率 k_c 对流散热比率

一般情况下, 对同一物体而言, 单位表面积需要发散的热功率按55%的热辐射和45%的热对流组合实现 (既 $W_s = 0.55 \times W_r + 0.45 \times W_c$), 当预知环境空气温度后, 可以得到如下的发热物体的温升概算式:

$$\Delta T = (0.55 \times \Delta r + 0.45 \times \Delta t) / 2$$

$$= (0.55 \times (((W_s + k_1) / (5.13 \times 10^{-12}))^{1/4} - k_2) + 0.45 \times (W_s / (2.7 \times 10^{-4}))) / 2 \quad [^\circ\text{C}]$$

式中: W_s 单位表面积需要耗散的热功率 (W/cm²)

k_1 和环境空气温度有关的系数 (见下表)

k_2 和环境空气温度有关的系数 (见下表)

表：不同环境空气温度时系数k1, k2的值：

环境温度℃	-10	0	20	30	40	50
k1	0.02454	0.02850	0.03781	0.04324	0.04924	0.05584
k2	263	273	293	303	313	323

19-7 铁粉末铁心的温度特性简介：

（节录自东阳东磁有限公司产品介绍）

铁粉磁心适用于-55℃~+125℃的温度范围。当磁心长时间处于较高的温度环境中，会导致电感和品质因数（Q）的永久性降低。这种特性的偏离程度取决于时间长短，温度高低，磁心大小，频率高低和磁通量密度大小等因素。

.....铁粉磁心外均涂有保护漆层，各种涂层在60Hz下的最小介质绝缘强度为600V。