

功率电感及变压器电磁损耗计算

(深圳谷润数字电源有限公司-2026-3-6 REV1.3)

•总损耗: 总损耗 = 线圈电阻的铜损 + 磁芯本体的磁损 (也叫铁损)

$$\text{铜损} = \text{直流铜损} + \text{交流铜损} = I_{rms} * I_{rms} * R_{dc} * Fr$$

括弧里的“1”是直流损耗, Fr 是交流/直流电阻比, 由 Dowell 曲线给出经验:

单股圆线直径 $d \leq 2\delta$ 时 $Fr \approx 1$, δ 是铜趋肤深度

多股利兹线或铜箔, 可把 Fr 降低到 1.1-1.3

若 $d > 2\delta$, $Fr \propto f$

快速估算:

100 kHz 时铜趋肤深度 $\delta \approx 0.2 \text{ mm}$;

若裸径 0.4 mm, 则 $Fr \approx 1.5-2$ 。

$$\text{磁损 (Core loss) } P_{core} = K * f^a * B^b * V_e$$

f 是频率, Bac 是磁感应强度的变化量, Ve 是磁芯有效体积

f 单位是 kHz, Bac 单位是 mT, Ve 单位是 cm³, Pcore 单位是 mW

K、a、b 是常数,

PC40 铁氧体磁芯, 典型值是 $K=2.4 \times 10^{-6}$ 、 $a=1.22$ 、 $b=2.55$

N87 铁氧体磁芯, 典型值是 $K=1.6 \times 10^{-6}$ 、 $a=1.25$ 、 $b=2.85$

铁硅铝 (黑或蓝环), 典型值是 $K=4.0 \times 10^{-6}$ 、 $a=1.6$ 、 $b=2.70$

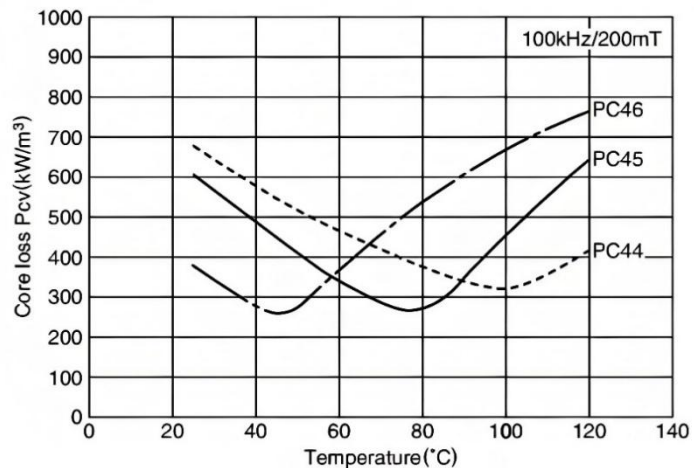
NPN 高磁通 (绿环), 典型值是 $K=8.0 \times 10^{-6}$ 、 $a=1.6$ 、 $b=2.50$

铁镍铝 MPP(灰环), 典型值是 $K=1.2 \times 10^{-6}$ 、 $a=1.4$ 、 $b=2.3$

铁粉 (黄白/红), 典型值是 $K=9 \times 10^{-6}$ 、 $a=1.75$ 、 $\beta=2.85$

注意: 1. 切勿依赖网络上的 Steinmetz 系数进行精确计算。务必以您所选用的具体磁芯型号的官方数据手册里的磁芯损耗曲线来校准 K、a、b 三个参数的取值, 手册中的损耗曲线才是唯一可信的依据。

2. 无论哪种磁芯材料, 影响损耗的最主要的因素是 dB, 因为损耗与 dB 的 2.5 次方成正比其次是工作频率, 然后才是材料本身。
3. 磁芯损耗随着温度升高而下降, 到一定温度后又上升, 如下图



举例：100 kHz Buck 电感， $L=47\ \mu\text{H}$ ，直流电流 3 A，纹波 0.6 App，
选 TDK EPCOS N87 铁氧体 ETD29 磁芯 $A_e=76\ \text{mm}^2$
 $V_e=5.5\ \text{cm}^3$
N87 参数： $K=1.6\times 10^{-6}$ ， $\alpha=1.25$ ， $\beta=2.85$

铜损计算：

- 用 0.5 mm 铜线，20 °C 时 $R_{dc} = 18\ \text{m}\Omega$ (实测)
- 趋肤深度 0.2 mm，线径 $\approx\delta$ ，取 $F_r \approx 1.2$
- $I_{\text{rms}} = \sqrt{I_{\text{dc}}^2 + \frac{(\Delta I/2)^2}{3}} = \sqrt{3^2 + 0.1} \approx 3.02\ \text{A}$
- $P_{\text{cu}} = (3.02)^2 \cdot 1.2 \cdot 0.018 = 0.196\ \text{W}$

磁损计算

- $B_{\text{ac}} = \frac{L \cdot \Delta I/2}{N \cdot A_e}$

先估匝数：取 $N = 30$ 匝

$$B_{\text{ac}} = \frac{47 \times 10^{-6} \times 0.3}{30 \times 76 \times 10^{-6}} \approx 0.062\ \text{T}$$

$$P_{\text{core}} = 1.6 \times 10^{-6} \times 100^{1.25} \times 62^{2.85} \times 5.5 = 405\ \text{mW} = 0.45\ \text{W}$$

总损耗=铜损+磁损=0.2+0.45=0.65W