

功率电感 AP 法公式的推导过程 (Rev1.1)

AP 公式的出发点是将防止磁芯饱和的电磁约束和防止线圈过热的 thermal 约束结合起来: 电磁约束 (安培定律), 磁芯不饱和, 需要足够的磁芯截面积 A_e ; 热约束 (窗口面积), 线圈不过热, 需要足够窗口面积 A_w 容纳铜线。将这两个约束的方程联立, 即可推导出 $A_e \times A_w$ 的表达式。

步骤一: 基于防止饱和的电磁约束 (与匝数 N 相关)

根据电感的基本公式, 其存储的能量与电流和磁通密度有关:

$$\frac{1}{2}LI^2 = \frac{1}{2}(N\phi)I = \frac{1}{2}N(BA_e)I$$

- L : 电感量 (H)
- I : 电流 (A), 这里我们先使用峰值电流 I_{pk} (防止饱和的关键)
- N : 匝数
- ϕ : 磁通 (Wb)
- B : 磁通密度 (T), 这里我们使用最大允许磁密 B_{max}
- A_e : 磁芯有效截面积 (m^2)

由上式可以推导出电感量的表达式:

$$NA_e = \frac{LI_{pk}}{B_{max}} \text{ (方程 1)}$$

这个方程表明, 要处理 LI_{pk} 乘积而不饱和, 需要 N 和 A_e 的乘积足够大。

步骤二: 基于防止过热的热约束 (也与匝数 N 相关)

线圈的发热主要由其铜损引起, 铜损与电流密度 J 直接相关。

绕组的总铜截面积为:

$$A_{Cu} = N \cdot A_{wire}$$

其中 A_{wire} 是单根导线的截面积。根据电流密度定义 $J = I_{rms}/A_{wire}$ ，可以得到

$$A_{cu} = N \cdot \frac{I_{rms}}{J} \text{ (方程 2)}$$

这些铜线必须被容纳在磁芯的窗口面积 A_w 内。由于存在绝缘层、空隙等因素，我们引入窗口利用系数 K_u （通常为 **0.2~0.4**）得到第二个关键方程（热约束方程）：

$$K_u \cdot A_w = N \cdot \frac{I_{rms}}{J} \text{ (方程 2)}$$

步骤三：联立方程求解 AP

我们将方程 (2) 代入方程 (1)，即用方程 (2) 的 N 替换掉方程 (1) 中的 N ，将 A_e 和 A_w 放在左边，得到最终的 **AP** 公式：

$$A_e \cdot A_w = AP = \frac{L \cdot I_{pk} \cdot I_{rms}}{B_{max} \cdot K_u \cdot J}$$

单位说明：

上面公式的单位都是国际单位制，算得的 AP 是 m^4 。在工程上，我们更常用 cm^4 。为此，公式右边需要乘以 10^4 （因为 $1m^4 = 10^8cm^4$ ，但由于单位换算中 J 也常被用 A/cm^2 ，最终系数简化为 10^4 。所以实践中看到的公式常为：

$$AP = \left(\frac{L \cdot I_{pk} \cdot I_{rms}}{B_{max} \cdot K_u \cdot J} \right) \times 10^4 \text{ (单位: } cm^4)$$

Ku: 铁氧体变压器磁芯绕制取 **0.4~0.5**，铁粉芯磁环绕制取 **0.2~0.4**

J: 自然冷却取 **300~400A/cm²**，导热胶冷却或风冷取 **400~600 A/cm²**

Bmax: 铁氧体取 **0.2~0.3T**，铁粉芯可取 **0.5~1.0** 具体要查手册