

高频变压器 AP 公式的推导过程-VER1.1

1. AP 法的核心思想

AP 法的基本理念是：一个磁芯所能传输的功率，与其窗口面积和磁芯有效截面积的乘积成正比。有了 AP 值，就可以大致选择磁芯的尺寸大小了。

- 窗口面积 A_w ：决定了能绕下多少铜线（导体的截面积）。
- 磁芯有效截面积 A_e ：决定了磁通的能力，即磁芯能承受多大磁通密度而不饱和。

因此， $AP = A_e \times A_w$ 这个乘积，直观地反映了磁芯的“功率处理能力”。

2. 推导出发点：法拉第电磁感应定律

我们从变压器原边绕组开始。根据法拉第定律，绕组两端的电压 V 为：

$$V = N \cdot A_e \cdot \frac{dB}{dt}$$

其中：

- N ：绕组匝数
- A_e ：磁芯有效截面积 (m^2)
- $\frac{dB}{dt}$ ：磁通密度变化率 (T/s)

对于一个频率为 f (Hz)，最大磁通密度摆幅为 ΔB (T) 的周期性波形（如方波或正弦波），我们可以将导数近似为：

$$\frac{dB}{dt} \approx \frac{\Delta B}{T_{on}} = \frac{\Delta B}{(D/f)} = f \cdot \frac{\Delta B}{D}$$

其中：

- T_{on} : 一个周期内的导通时间 (s)
- D : 占空比 ($D = T_{on} \cdot f$)

将此式代入法拉第定律。对于原边电压 V_p ：

$$V_p = N_p \cdot A_e \cdot \frac{dB}{dt} \approx N_p \cdot A_e \cdot f \cdot \frac{\Delta B}{D}$$

整理后得到原边匝数 N_p 的表达式：

$$N_p = \frac{V_p \cdot D}{A_e \cdot f \cdot \Delta B} \quad (\text{公式 1})$$

这个公式是磁芯 A_e 与功率建立联系的桥梁。

3. 引入电流和铜损约束（窗口面积利用）

现在我们从电流和导线的角度考虑。变压器的总铜损与导线的电阻和电流有效值的平方有关。

a) 原边绕组的电流

设变压器原边电流有效值为 $I_{p,rms}$ 。对于方波，有效值 $I_{p,rms}$ 与平均值 $I_{p,avg}$ 关系简单。原边传输的视在功率 $P_{pri} = V_p \cdot I_{p,rms}$ 。

b) 导线截面积

原边绕组所需导线的总截面积 $A_{cu,p}$ 为：

$$A_{cu,p} = N_p \frac{I_{p,rms}}{J} = N_p \frac{P_{pri}}{V_p \cdot J}$$

其中 J 是电流密度 (A/m^2)。

c) 窗口面积分配

磁芯的窗口面积 A_w 需要容纳所有绕组（原边、副边等）的铜线、绝缘层和空隙。我们引入一个 **窗口利用系数** K_u ，它表示原边铜线实际占总窗口面积的比例（通常 $K_u \approx 0.3 - 0.4$ ）。

假设原边和副边绕组的“功率-面积”需求相似，我们可以认为原边绕组所占用的窗口面积 $A_{w,p}$ 与总窗口面积 A_w 和其功率占比成正比。一个简化的处理是，认为原边绕组占据了总可用窗口面积的一半，即：

$$A_{cu,p} = K_u * A_w$$

将这个关系代入上式：

$$K_u * A_w = N_p \frac{P_{pri}}{V_p * J} \quad (\text{公式 2})$$

4. 建立 AP 表达式

现在我们将公式 (1) 和公式 (2) 结合起来。

从公式 (1): $V_p = \frac{N_p \cdot A_e \cdot f \cdot \Delta B}{D}$

将 V_p 代入公式 (2):

$$K_u * A_w = N_p \frac{P_{pri}}{\left(\frac{N_p \cdot A_e \cdot f \cdot \Delta B}{D}\right) \cdot J}$$

整理得到:

$$K_u * A_w = \frac{P_{pri} \cdot D}{A_e \cdot f \cdot \Delta B \cdot J}$$

所以：

$$A_e \cdot A_w = \frac{P_{pri} \cdot D}{K_u \cdot f \cdot \Delta B \cdot J} \quad (\text{公式 3})$$

最终，经典的 **AP** 公式 被表示为：

$$AP = A_e \times A_w = \frac{P_{in} \times 10^4}{2 * K_u \cdot K_f \cdot f \cdot B_{max} \cdot J}$$

- **AP**：面积乘积， $A_e \times A_w$ (**cm⁴**)
- **Pin**：输入功率(**W**)
- **K_u**：窗口利用系数 (初级绕组占整个窗口面积的比例，建议取 0.3)
- **K_f**：波形系数: 正弦波: $K_f = 1.1$, 方波: $K_f = 1.0$
- **f**：工作频率 (**Hz**)
- **B_{max}**：最大工作磁通密度 (**T**)。铁氧体建议取 0.2~0.3T。铁粉芯取 1.0
- **J**：电流密度 (**A/cm²**)。根据温升选取，建议 300 ~ 400A/cm²。
- **10⁴**：单位转换系数 (当 A_e 和 A_w 从 m² 转换为 cm² 时， $1m^4 = 10^8cm^4$ ，但由于 J 用 A/cm²等，最终系数简化为 10⁴)。