

开关电源磁性元件磁心选择的计算-AP 值法

The Choice of Magnetic Core Used in the Switching power supply by the AP Value

南京电子技术研究所 顾公兵 沈传宏 沈坚 (南京 210013)

摘要: 通过理论分析和算例,介绍了选择开关电源磁性元件磁心的一种算法-AP 值法。使用该方法,可以合理选取开关电源磁性元件磁心,优化了开关变压器和谐振电感等开关电源磁性元件的设计。

关键词: 开关电源;磁性元件;磁心;AP 值

中图分类号: TM4

文献标识码: B

文章编号: 1606-7517 (2006) 05-05-123

1 前言

开关电源以其体积小,重量轻,效率高,控制灵活可靠等优点成为现代广泛应用的电力变换装置。开关电源磁性元件,如开关变压器和谐振电感等,是开关电源的核心组成部分之一。设计合理、可靠的磁性元件,是设计性能优良的开关电源的基础。

所谓合理、可靠的磁性元件,就是在满足元件功能的情况下,能够长期安全工作,温升在允许的范围内,而且体积小,重量轻,材料节省。磁性元件设计的关键,是选取合理的磁心。因为磁性元件的主要部分就是磁心和线圈,一旦磁心确定,线圈也就基本确定了。只有选取了适当的磁心,才能设计出合理、可靠的磁性元件。

选取磁心的算法有多种,如查表法^[1]、磁心结构常数法(Y 值法)^[2]等。而 AP 法是理论比较严密,磁心参数查找比较便利的一种方法。

2 选择开关电源磁性元件磁心的材料、结构和必备的计算参数

2.1 材料

变压器磁心选用高磁导率软磁材料制造,以减少磁滞损耗与磁心体积,提高励磁效率。几种常用磁心材料的磁导率和适用频率范围可以用图 1^[3]粗略描述。

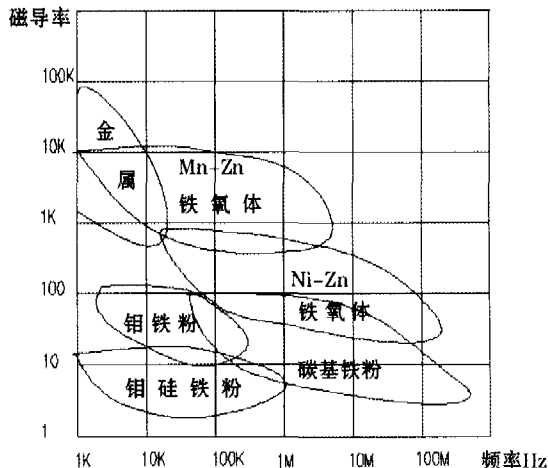


图 1 常用磁心材料的磁导率和适用频率范围

从图中可以看出,适用于开关电源工作频率段的磁心材料主要有铁氧体、铁粉磁心等。其中,尤以 Mn-Zn 铁氧体综合特性最好,因此使用最广泛。

2.2 铁氧体磁心结构和应用

铁氧体磁心已经形成系列标准结构与尺寸,规格品种繁多,常用的铁氧体磁心结构和形状有 EE 型、ETD (EC) 型、EI 型、U 型、罐型、环型等,外形结构如图 2。

1) EE 型

特点:窗口大,散热好;结构规则,便于组合使用。缺点是电磁屏蔽性能差、干扰大。

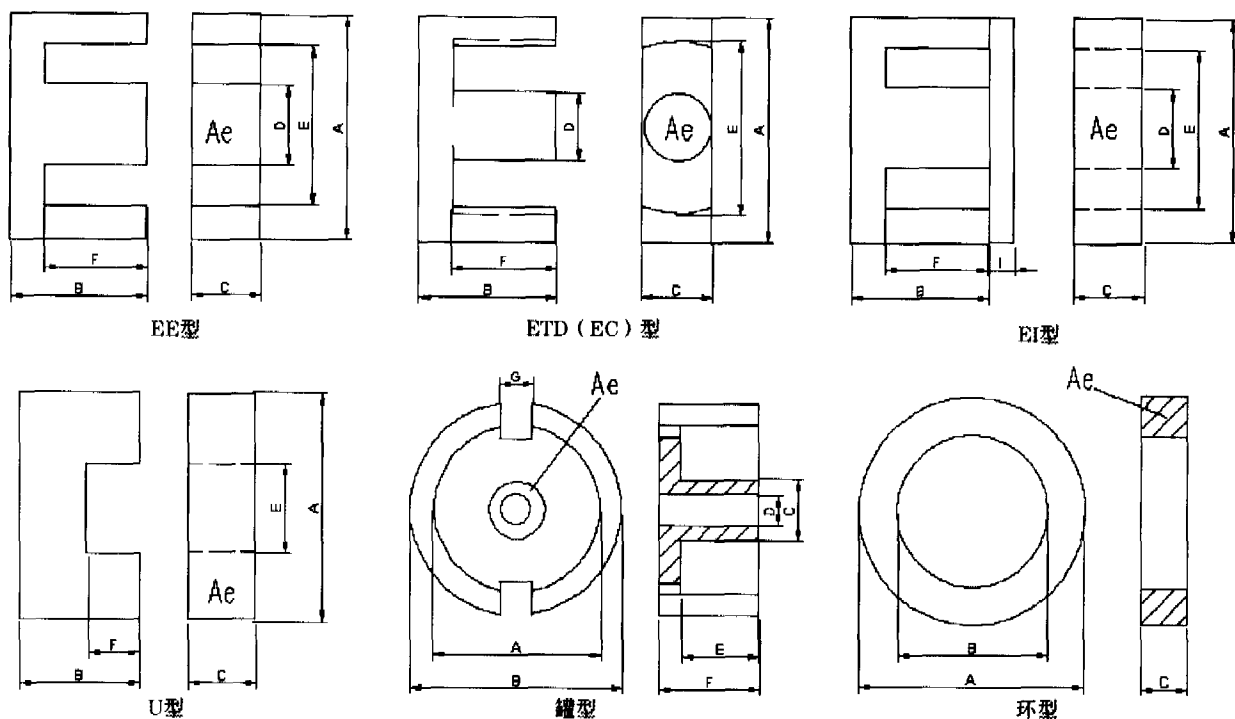


图2 常用的铁氧体磁心结构和形状

适用：较大功率开关电源变压器、电感，驱动变压器，脉冲变压器；

2) ETD (EC) 型

特点：窗口大，散热好；磁心截面积大，绕线匝数少，长度短，漏感小，铜损小。

适用：较大功率开关电源变压器、电感，扼流圈，更适合高频使用。

3) EI 型

特点：与EE相似。

适用：开关电源变压器，驱动变压器，脉冲变压器。

4) U 型磁心

特点：窗口面积大，适用于大功率型变压器或高压型变压器。

5) 罐形磁心

特点：结合面大，屏蔽好，漏感及分布电容小等。缺点是结构复杂，引线困难，窗口小。

适用：专门用于低损耗线圈设计的磁心，可以制作小功率、磁屏蔽要求高的变压器、电感等。

6) 环型

特点：闭合磁路，漏磁小。缺点是绕制困难。

适用：适于宽带或者脉冲变压器、驱动变压器、扼

流圈。

用于开关电源的变压器和谐振电感的磁心，最常用EE型、ETD (EC) 型等。

2.3 工作磁通密度B值^[2]。

设置合适的工作磁通密度B值，必须考虑二点：一是当输入电压最大时，必须确保磁心不能饱和。一旦饱和，线路内将会因过流引发开关器件和线包温升过高而烧坏。二是损耗产生的热量要满足设计要求。这就要求B值设置不能太高，否则磁心损耗增大，温升增高，而且还会造成激磁电流过大，波形畸变。

另一方面，磁性元件的功率P与磁通密度B和线圈电流密度J有关系：

$$P \propto B \cdot J \quad (2-1)$$

这说明，为了获得给定的输出功率，B或J选择的越大，则元件体积越小，重量越轻，成本越低。

这就要求，工作磁通密度B值的设置既不能过高，也不能过低，必须合理。选择工作磁通密度B值的计算公式：

$$B = K_B \cdot B_m \quad (2-2)$$

其中， K_B —磁感应强度系数； B_m —最大工作磁感应强度(T)。

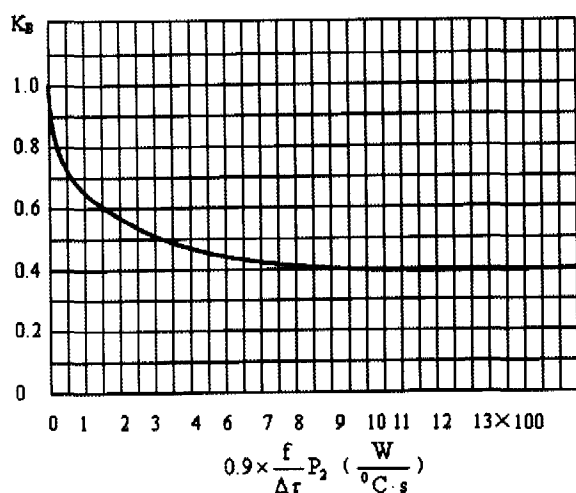


图3 磁感应强度系数 K_B 与功率 P 、工作频率 f 、平均温升 $\Delta\tau$ 的关系

磁感应强度系数 K_B 与功率 P 、工作频率 f 、平均温升 $\Delta\tau$ 的关系见图3:

不同磁性材料最大工作磁感应强度 B_m 通常可以查阅表1取值。

表1 磁性材料最大工作磁感应强度 B_m

磁性材料	Mn-Zn 铁氧体	IJ85-1 合金	C ₀ 基非晶态合金
B_m	0.3T	0.5T	0.6T

2.4 窗口占空系数 K_0

绕组铜导线截面积在磁心窗口面积中所占的比值称窗口占空系数 K_0 ，其数值取决于工作电压、导线粗细、绕制工艺等。一般低压开关电源变压器、电感磁心窗口占空系数取值范围 $K_0 = 0.2 \sim 0.4$ 。典型取值 $K_0 = 0.4$ 。根据具体设计条件适当取值，如果线圈采用多股线卷绕时，选取较小值。

3 AP 值法^[3]与算例

变压器传输功率 P_t 与工作频率 f 、最大磁通密度 B_m 、磁路有效截面积 A_e 等有关^[4]:

$$P_t = C \cdot f \cdot B_m \cdot A_e \cdot W_d \quad (3-1)$$

式中， C —变换器电路形式系数。

W_d —绕组设计参数，与电流密度 J 、窗口占空系数 K_0 、绕组截面积 A_N 等参数有关。

当确定了工作频率、电路形式、磁性材料以后， C 、

f 、 B_m 就确定了，传输功率 P_t 就只和磁路截面积 A_e 与绕组参数 W_d 有关。实际上 W_d 与磁心窗口面积 A_w 有关。

这说明，磁心的磁路截面积 A_e 和磁心窗口面积 A_w 的乘积对应于传输功率 P_t 。所谓 AP 值，即定义为： $AP = A_e \cdot A_w$ 。AP 值法是一种由传输功率或者储能计算出对应磁心 AP 值，进而确定磁心型号的方法。这一方法适用于开关电源磁性元件磁心选择的计算。

3.1 变压器设计 AP 值法公式推导

由变压器基本公式，感生电压：

$$U = K_f \cdot f \cdot N \cdot B \cdot A_e \quad (3-2)$$

式中， U —感生电压； f —工作频率； N —匝数； A_e —磁心有效截面积； B —工作磁通密度； K_f —波形系数。正弦波取值 4.44；方波取值 4。

由式(3-2)，线圈匝数：

$$N = \frac{U}{K_f f B A_e} \quad (3-3)$$

磁心窗口有效面积 $K_0 A_w$ 为初级、次级绕组占据的面积之和，即：

$$K_0 A_w = N_p A_p' + N_s A_s' \quad (3-4)$$

式中， K_0 —窗口占空系数； A_w —磁心窗口面积； N_p 、 N_s —初级、次级匝数； A_p' —初级绕组导线截面积； A_s' —次级绕组导线截面积。

导线截面积 A_p 与导线电流 I 以及电流密度 J 的关系：

$$A_p = \frac{I}{J} \quad (3-5)$$

把(3-3)、(3-5)代入(3-4)，得到

$$K_0 A_w = \frac{U_1}{K_f f B A_e} \cdot \frac{I_1}{J} + \frac{U_2}{K_f f B A_e} \cdot \frac{I_2}{J} = \frac{U_1 I_1 + U_2 I_2}{K_f f B A_e J} \quad (3-6)$$

等式两边同时乘以 A_e ，再除以 K_0 ，得到：

$$AP = A_e A_w = \frac{U_1 I_1 + U_2 I_2}{K_0 K_f f B J} \quad (3-7)$$

电流密度 J 的选择，直接影响到温升。而温升与变压器表面积和外形结构等有关。一般地说，表面积越大，温升越小。反映到与 AP 关系：

$$J = K_j \cdot AP^X \quad (3-8)$$

式中, K_j —电流密度比例系数; X —指数, 与磁心有关。

K_j 、 X 可以通过查阅磁心结构常数表获得。

综合(3-7)、(3-8), 得到变压器设计 AP 值计算公式:

$$AP = A_e A_w = \left(\frac{U_1 I_1 + U_2 I_2}{K_0 K_f K_j f B} \right)^{\frac{1}{1+X}} = \left(\frac{P_t}{K_0 K_f K_j f B} \right)^{\frac{1}{1+X}} \quad (3-9)$$

式中, $P_t = U_1 I_1 + U_2 I_2$ 变压器视在功率 (计算功率)。

根据次级线路不同, 开关电源的变压器可以由输出功率 P_o 计算视在功率 P_t 。

$$1) \text{ 全桥整流输出: } P_t = P_o + \frac{P_o}{\eta} = P_o \left(1 + \frac{1}{\eta} \right) \quad (3-10)$$

$$2) \text{ 全波整流输出: } P_t = P_o \left(\sqrt{2} + \frac{1}{\eta} \right) \quad (3-11)$$

$$3) \text{ 推挽结构变换器: } P_t = \sqrt{2} \left(1 + \frac{1}{\eta} \right) P_o \quad (3-12)$$

3.2 电感器设计 AP 值公式推导

根据法拉第定律:

$$L \frac{di}{dt} = N \frac{d\Phi}{dt} = NB \frac{dA_e}{dt} \quad (3-13)$$

式中, L —电感量; N —电感匝数; B —磁心工作磁

通密度; $\frac{di}{dt}$ —电感线圈电流变化率; $\frac{d\Phi}{dt}$ —磁路磁通变化

率; $\frac{dA_e}{dt}$ —磁心有效面积变化率。

对式(3-13)积分, 得到:

$$LI = NBA_e \quad (3-14)$$

$$\text{匝数: } N = \frac{LI}{BA_e} \quad (3-15)$$

$$\text{磁动势: } IN = \frac{LI^2}{BA_e} \quad (3-16)$$

由式(3-5): $I = J \cdot A_p = J \frac{K_0 A_w}{N}$, 代入式(3-16), 有

$$IN = J \cdot K_0 A_w = \frac{LI^2}{B \cdot A_e} \quad (3-17)$$

整理, 得到:

$$AP = A_e A_w = \frac{LI^2}{J \cdot K_0 \cdot B} \quad (3-18)$$

同样地, 由式(3-8)、(3-18)得到电感器设计 AP 值计算公式:

$$AP = \left(\frac{LI^2}{K_0 \cdot K_j \cdot B} \right)^{\frac{1}{1+X}} \quad (3-19)$$

式中, LI^2 表征了电感的储能。电感储能 $E = \frac{1}{2} LI^2$ 。

3.3 磁心手册中参数 AP 值计算

上面计算的 AP 值, 是选择磁心的参考依据。由于磁心产品是标准系列化的, 磁心实际的 AP 值不一定与计算值一致, 选用磁心时, 磁心实际 AP 值应稍大于计算 AP 值。常用磁心面积 A_e 定义如图 2, 窗口面积 A_w 的定义如图 4。

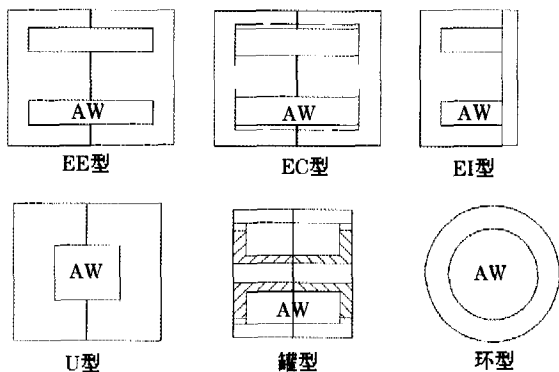


图 4 磁心窗口面积

通常, 磁心厂家不直接提供 AP 值, 通过查阅磁心厂家提供的选用手册, 可以获得磁心的几何参数。由几何参数计算 AP 值。例如, 查阅《南京新康达磁心选用手册》, 可以查到 EE55 铁芯 (外形结构及标注见图 2 中 EE 型), 几何参数为:

$A = 55.15$, $B = 27.5$, $C = 20.7$, $D = 17$, $E = 37.5$, $F = 18.8$, $A_e = 354$, $Le = 123$

一对 EE55 磁心的窗口面积: $A_w = (E-D) \times F = (37.5-17) \times 18.8 = 385.4 \text{ mm}^2$

磁心 AP 值: $AP = A_e \times A_w = 3.54 \times 3.854 = 13.64 \text{ cm}^4$

3.4 结构核算

磁心选择后, 是否合适, 首先要进行结构核算。前

面说过,磁心选定以后,按照有关公式,可以计算出原、次级匝数、导线截面积,设计出线圈骨架。结构核算主要是验证所选磁心的窗口能否绕下线圈。如果绕不下,磁心选择失败,应该适当放大规格重新计算;如果窗口余量太宽,说明磁心余量过大,应该缩小规格重新核算。

3.5 温升核算

设计的磁性元件温升必须在要求范围之内。通过对磁心和线圈损耗的计算,计算温升,如果超过要求,应该适当增加导线截面积或者放大规格重新选取磁心,再次核算。

3.6 漏磁核算

对于电磁兼容要求较高的场所使用的电源,还要对磁性元件进行漏磁核算。

3.7 算例

设计一台开关电源变压器。电路形式:全桥;输出电路整流形式:全波;工作频率 $f = 40\text{kHz}$;输入交流电压 $U_1 = 220\text{V}$;输出电压 $U_0 = 5\text{V}$,电流 $I_0 = 100\text{A}$;最大占空比 $D = 0.4$;变压器效率 $\eta = 75\%$ 。工作环境温度: 25°C ,允许温升 25°C 。

设计步骤:

变压器次级采用中心抽头结构。

1) 变压器的计算功率:

$$P_t = P_0 \cdot \left(\sqrt{2} + \frac{1}{\eta} \right) = 5 \times 100 \times \left(\sqrt{2} + \frac{1}{0.75} \right) = 1374\text{W}$$

2) 确定工作磁感应强度:

$$0.9 \times \frac{f}{\Delta\tau} P_t = 0.9 \times \frac{40000}{25} \times 500 = 7.2 \times 10^5, \text{查图 3,}$$

$$K_B = 0.4, \text{所以, } B_w = K_B \cdot B_m = 0.4 \times 0.3 = 0.12\text{T}$$

3) 确定窗口占空系数:低压开关电源变压器,磁心窗口占空系数取 $K_0 = 0.25$

4) 计算 AP 值

方波,波形系数 $K_f = 4$ 。由于纹波频率较高,选用 Mn-Zn 铁氧体 LP3 铁心。查表 2,结构参数: $X = -0.12$, $K_f = 366$ 代入式(3-9)

$$AP = \left(\frac{P_t}{K_0 K_f K_j f B} \right)^{\frac{1}{1+X}} = \left(\frac{1374 \times 10^4}{0.25 \times 4 \times 366 \times 40000 \times 0.12} \right)^{\frac{1}{1-0.12}} = 10.35\text{cm}^4$$

查阅新康达磁心选用手册,可以选用一对 EE55 铁心。

$$AP = 13.64\text{cm}^4$$

5) 输入电压整流后按 340V 计算,初级匝数: N_1 取 56 匝。次级匝数: N_2 取 1 匝。

6) 次级绕组电流有效值: $I_2 = 67\text{A}$;初级绕组电流有效值: $I_1 = 1.58\text{A}$ 。

7) 导线截面积:初级 $A_p' = 0.6\text{mm}^2$;次级 $A_s' = 26.4\text{mm}^2$

8) 确定导线:考虑趋肤效应因素,初级导线选用 SQAJ $\Phi 0.29 \times 15$ 多股丝包线。有效面积 1.0mm^2 ,外部直径 1.2mm ;次级导线采用 $0.3\text{mm} \times 29\text{mm}$ 的 T2(M) 铜带,3 层并绕,截面积 26.1mm^2 。

9) 线圈厚度: $\delta_1 = 5.6\text{mm}$

10) 窗口余量:绕组线包与磁心边柱间距 1.5mm ,适当。

11) 温升低于 20°C ,符合要求。

4 结论

AP 法是理论比较严密,磁心参数查找便利的一种磁心选用方法。虽然由于材料、设计条件和要求的复杂性,不能保证一次选定而需要多次核算,但只要提出的设计要求和选取的参数合理,所选磁心还是比较容易通过核算的。对于设计经验不足的设计师,AP 法不失为一种比较好的方法。

参考文献

- [1] 赵修科 实用电源技术手册磁性元器件分册[M]. 沈阳,辽宁科学技术出版社,2002:113
- [2] 王全保 电子变压器手册[M]. 沈阳,辽宁科学技术出版社,2002:382-385
- [3] 张占松 开关电源的原理与设计[M]. 北京,电子工业出版社,2004:107,109,121
- [4] 王全保 实用电子变压器材料器件手册[M]. 沈阳,辽宁科学技术出版社,2003:273