

关于单端反激式变压器的三个设计公式

Three design formulas of flyback transformer

摘要：对三个设计公式的不同表述形式，进行分析和必要的推导，弄清其关系及正确与否。

关键词：初级（临界）电感 磁芯气隙 初级绕组 设计公式

设计变压器离不开公式，有时发现几本著作的表述不完全一样。这就使一些刚入门的设计人员，无所适从，摸不着头脑。不同的表述，有的是所采用的参数不同，实际结果是一样的。但是，也有却是错的，不宜采用。

现在，就以本人手头的三本书中，关于开关电源单端反激式变压器的三个主要的设计公式：求初级（临界）电感、计算磁芯气隙和求初级绕组匝数，对它们的不同表述进行分析和必要的推导。

这三本书为：《电子变压器手册》、《现代高频开关电源实用技术》和《集成开关电源的设计制作调试与维修》。（以下分别简称为<手册>、<技术>和<制作>。）

第一组公式：求初级（临界）电感

$$L = \frac{[U_{p1n}U_{p2}]^2}{[U_{p1}+U_{p2}]^2} \times \frac{T \times 10^{-6}}{2P_o} \quad \text{① <手册>p.387.}$$

$$L = \frac{E^2 T o n^2 R L}{2V_o^2 T} = \frac{E^2 D^2 T}{2P_o} = \frac{E^2 T o n^2}{2P_o T} \quad \text{② <技术>p.76.}$$

$$L = \frac{V_i \delta \max}{I_p^2} = \frac{V_i T o n}{I_p} \quad \text{③ <制作>p.108.}$$

第二组公式：计算磁芯气隙

$$l_g = \frac{0.4\pi L_p I_p^2}{A_e \Delta B_m} \quad \text{④ <手册>p.388.}$$

$$l_g = \frac{0.4\pi N_p^2 A_e}{L_p \times 100} \frac{\mu c}{\mu r} \quad \text{⑤ <技术>p.75.}$$

$$l_g = 4\pi A_e \times \frac{N_p^2}{L_p \times 1000} - \frac{1}{AL} \quad \text{⑥ <技术>p.75.}$$

$$lg = \frac{0.4\pi L_p I_p^2}{Ae B_m^2} \times 10^2 \quad \text{⑦}<制作>p.109.$$

第三组公式：求初级绕组匝数

$$N_p = \frac{\Delta B_m t g}{0.4\pi I_p} \quad \text{⑧}<手册>p.389.$$

$$N_p = \frac{L_p I_p \times 10^2}{Ae(B_r - B_m)} \quad \text{⑨}<技术>p.77.$$

$$N_p = \frac{L_p I_p \times 10^2}{Ae \Delta B_m} \quad \text{⑩}<制作>p.109.$$

由于对各参数的单位进行了统一，上列各公式与原文相比作了一些变动。

各参数的单位如下：Up1、Up2、E、Vi、Vo-V，T-μs，P-W，B-Gs，RL-Ω，g-cm，Ip-A，AL--nH/N2，Lp-μH。

公式中参数关系有：n=E_{Ton}/Vo_{Toff}，E=Vi=Up1，Vo=Up2。其中 E、Vi、Up1 指输入直流电压减去电路压降。

公式计算均忽略了变压器效率。

现在，先对第一组公式进行分析和推导。

根据
$$I_p = \frac{V_i T_{on}}{L_p} = \frac{V_i \delta T}{L_p}$$
 可以得到：

$$L_p = \frac{V_i \delta T}{I_p} = \frac{V_i \delta}{I_p f} = \frac{V_i T_{on}}{I_p} \quad (1-1)$$

根据 $2P_o T = L_p I_p^2$ 可以得到：
$$L_p = \frac{2P_o T}{I_p^2}, \quad (1-2)$$

由 (1-1) 可知：

$$L_p I_p = V_i \delta T = V_i T_{on}, \quad (1-3)$$

由 (1-2) 和 (1-3) 可以得到：

$$I_p = \frac{L_p I_p^2}{L_p I_p} = \frac{2P_o T}{V_i \delta T} = \frac{2P_o}{V_i \delta}, \quad (1-4)$$

将 (1-4) 代入 (1-1):

$$L_p = \frac{V_i \delta T \times V_i \delta}{2P_o} = \frac{V_i^2 \delta^2 T}{2P_o}, \quad (1-5)$$

用 E、D 取代 V_i 、 δ 即为公式②右端。

将 $P_o = V_o^2 / RL$ 代入 (1-5) 于是有:

$$L_p = \frac{V_i^2 \delta^2 TRL}{2V_o^2}$$

分子分母均乘以 T 得到:

$$L_p = \frac{V_i^2 \delta^2 T^2 RL}{2V_o^2 T} = \frac{V_i^2 T_{on}^2 RL}{2V_o^2 T} \quad (1-6)$$

用 E 取代 V_i 即为公式②中部。

比较①、②两式，可以发现，只要证明

$$\frac{[Up1nUp2]}{[Up1 + Up2]} = ED$$

就说明两公式一致。

$Up1$ 、 $Up2$ 分别用 E、 V_o 代替。将 $n = E_{Ton} / V_o T_{off}$ 代入:

$$\begin{aligned} \frac{[Up1nUp2]}{[Up1 + Up2]} &= \frac{E V_o T_{on}}{V_o T_{off}} \times \frac{V_o T_{off}}{E V_o (T_{off} + T_{on})} \\ &= \frac{E T_{on}}{T_{off} + T_{on}} = \frac{E T_{on}}{T} = ED \end{aligned}$$

第二组公式中，可以明显看出④与⑦两式中，必有一个是错的。分子一样而分母中一为 ΔB_m ，一为 B_m 。

在②式的括号中：

$$\frac{Np^2}{Lp \times 1000} \quad \frac{1}{AL}$$

与 两者是有区别的。否则两者相减就等于 0。

AL 是指磁心无气隙时的电感系数，而 Lp 则为有气隙时的电感值。

磁心开气隙后的磁路有效长度 $l_e = l_c + \mu_r l_g$ (2-1)

l_c 磁心磁路长度， μ_r 相对磁导率。

将 (2-1) 移项后，可以得到：

$\mu_r l_g = l_e - l_c$ 再移项后，可以得到

$$l_g = \frac{l_e}{\mu_r} - \frac{l_c}{\mu_r}$$

, (2-2)

$$\frac{L}{N^2} = \frac{\mu_0 \mu_r A e}{l_e}$$

, (2-3)

将 (2-3) 移项后，可以得到：

$$\frac{l_e}{\mu_r} = \frac{\mu_0 A e N^2}{L}$$

, (2-4)

将 (2-4) 代入 (2-2) 后, 可以得到:

$$lg = \frac{\mu_0 Ae N^2}{L} - \frac{lc}{\mu r} \quad (2-5)$$

μ_0 用 0.4 取代, 不考虑系数此式与③式完全一致。

(2-3) 为有气隙时的电感系数的公式。于是有无气隙时的电感系数的公式:

$$AL = \frac{\mu_0 \mu r Ae}{lc} \quad (2-6)$$

将 (2-6) 移项后, 可以得到:

$$\frac{lc}{\mu r} = \frac{\mu_0 Ae}{AL} \quad (2-7)$$

将 (2-4) 与 (2-7) 代入 (2-2) 有:

$$lg = \frac{\mu_0 Ae N^2}{L} - \frac{\mu_0 Ae}{AL}$$

提出公共因子 $\mu_0 Ae$,

$$lg = \mu_0 Ae \times \left(\frac{N^2}{L} - \frac{1}{AL} \right) \quad (2-8)$$

μ_0 用 0.4 取代, 不考虑系数此式与⑥式完全一致。

$$B_m = \mu_0 \mu_r H = \mu_0 \mu_r NI / e, \quad (2-9)$$

$$\frac{\mu_0 \mu_r NI}{e} = \frac{LI}{AeN}$$

将

代入 (2-9) 后, 可以得到:

$$B_m = \frac{LI}{AeN}, \quad (2-10)$$

将 (2-9) 与 (2-10) 相乘, 得到

$$B_m^2 = \frac{\mu_0 \mu_r NI}{e} \times \frac{LI}{NAe} = \frac{\mu_0 LI^2}{Ae} - \frac{\mu_r}{e}, \quad (2-11)$$

将 (2-11) 移项后, 可以得到

$$\frac{e}{\mu_r} = \frac{\mu_0 LI^2}{Ae B_m^2}, \quad (2-12)$$

将 (2-12) 代入 (2-2) 有:

$$I_g = \frac{\mu_0 LI^2}{Ae B_m^2} - \frac{I_c}{\mu_r}, \quad (2-13)$$

$$\frac{Ic}{\mu r}$$

μ_0 用 0.4 取代，不考虑系数此式与⑦式相差一个。

实际上⑦式将它省略了。

最后结果是⑤、⑥、⑦三式是一致的。而④式则是错了。

第三组公式中，可以看出⑨与⑩两式，实际上是一致的。问题在于⑧同⑨、⑩是否相同。

将 (2--10) 移项后，可以得到：

$$N = \frac{LI}{AeBm}, \quad (3-1)$$

(3--1) 与⑨、⑩两式是一致的。

将 (2--9) 移项后，可以得到：

$$N = \frac{BmIe}{\mu_0 \mu r I}, \quad (3-2)$$

将 (2--2) 移项后，可以得到

$$\frac{Ie}{\mu r} = \frac{Ic}{\mu r} + Ig$$

将它代入 (3--2)

$$N = \frac{Bm}{\mu_0 I} \left(Ig + \frac{Ic}{\mu r} \right), \quad (3-3)$$

$$\frac{IC}{\mu F}$$

μ_o 用 0.4 取代, 不考虑系数此式与⑧式相差一个。

⑧式将它省略了。

由于 (2--9) = (2--10), 因此⑧、⑨、⑩三式是一致的。

从三组 10 个公式中, 推荐采用③、⑤、⑩。

设计举例: $P_o=100W$, $E=300V$, $\delta=0.4$, $f_{sw}=50kHz$, $T=20\mu s$, $V_o=20V$, $I_o=5A$ 。

1. 计算 L_{p2} :

$$L_{p2}=2P_oT=2 \times 100 \times 20=4000V\mu s。$$

2. 计算 L_{p1} :

$$L_{p1}=V_i T_{on} = (300-20) \times 0.4 \times 20=2240 V\mu s。$$

20V 为电路压降。

3. 计算 I_p :

$$I_p = \frac{L_p I_p^2}{L_p I_p} = \frac{4000}{2240} = 1.7857$$

A。

4. 计算 L_p :

$$L_p = \frac{V_i T_{on}}{I_p} = \frac{2240}{1.7857} = 1254.4 \mu$$

H。

5.选择磁心:

$$WaAe = \frac{99Po \times 10^4}{Bmfsw} = \frac{99 \times 100 \times 10000}{1500 \times 50000} = 1.32 \text{cm}^4$$

此公式适用条件: B_m -Gs, f_{sw} -Hz, J -400A/cm², δ -0.4, η -0.8。

请参考《国际电子变压器》2003.5.p.70.《高频变压器设计时选择磁芯的两种方法》。

EI35 磁心的 $WaAe$ 为 1.31cm⁴, 因此, 选用它就可以了。该磁心有: $A_e=1.01\text{cm}^2$, $l_c=6.71\text{cm}$, $\mu_r=2100$ 。

6. 求初级绕组匝数:

$$N_p = \frac{L_p I_p \times 10^2}{A_e \Delta B_m} = \frac{2240 \times 100}{1.01 \times 1500} = 147.85 \quad \text{取} 148$$

7.求磁芯气隙长度:

$$l_g = \frac{\mu_0 A_e N^2}{L \times 100} - \frac{l_c}{\mu_r} = \frac{0.4\pi \times 1.01 \times 148^2}{1254 \times 100} - \frac{6.71}{2100} = 0.2$$

8.求次级绕组匝数:

$$N_s = \frac{N_p (V_o + V_d) \times (1 - \delta)}{V_i \times \delta} = \frac{148 \times (20 + 1) \times (1 - 0.4)}{280 \times 0.4} = 16.65, \quad \text{取} 17$$

参考文献

[1]电子变压器手册

[2]现代高频开关电源实用技术

[3]集成开关电源的设计制作调试与维修

[4]高频变压器设计时选择磁芯的两种方法--《国际电子变压器》2003.5.p.70.