

# 开关电源变压器磁心气隙量公式的辨析计算

## The Clarification and Analysis Calculation of Core Gap Flux Formula for Switching Power Transformer

绵阳开元磁性材料有限公司 张忠仕 汪伟 陈文 李卫 (四川绵阳 621000)

摘要: 本文对变压器磁心气隙量的各种计算公式进行分析讨论,追踪它们的来源,判别它们的正确性和实用性。

关键词: 磁路定律; 磁阻; 有效磁路长度; 有效磁导率。

中图分类号: TM4 文献标识码: B 文章编号: 1606-7517 (2007) 06-05-112

### 1 引言

在开关电源变压器的设计中,初级电感量 $L_1$ 是个非常重要的参数。当磁心选定后, $L_1$ 与初级绕组的匝数 $N_1$ 的平方成正比,另外还与磁心的磁导率 $\mu$ 成正比,当被定下来以后, $L_1$ 就决定于磁心的磁导率了。在初级电流从零开始上升的过程中,磁心材料的振幅磁导率 $\mu_a$ 和可逆磁导率 $\mu_r$ 都随着安匝数的升高而有较大的变化,这就造成 $L_1$ 的不稳定。为此,开关电源变压器磁心需开一定的气隙来承受较大的安匝数。也就是说,磁心被开一定的气隙后,在一定的安匝数范围内,磁心的有效可逆磁导率,增量磁导率和振幅磁导率都趋于起始磁导率了,不再随着初级电流的升高而变化。 $L_1$ 也稳定,初级电流的上升速度也就稳定了。另外,磁心开气隙后的有效磁导率 $\mu_e$ 比磁心材料的磁导率有所降低,气隙越大,有效磁导率越低。 $\mu_e$ 过低需要初级绕组匝数 $N_1$ 增大,造成线包体积增大。当 $L_1$ 、 $N_1$ 及磁心 $A_e$ 和 $l_e$ 定下来后, $\mu_e$ 就是个定值,不可随意改变了。开气隙的直接要求就是要把磁心的有效磁导率 $\mu_e$ 降到设定的值。

到底气隙量该开多大可以得到设定的 $\mu_e$ 值呢?各种资料,众说纷纭,给出的有关气隙量的计算公式也是五花八门,使读者无所适从。本文对现已广为流传的众多计算气隙量的公式进行分析讨论,试图判断它们的正确与否。由于很多资料习惯于突然给出计算气隙量的公式,既没推导

过程,又没注明来源,我们也就无法弄清最初是何人给出的,也只能根据公式本身分析它的正确与否。

### 2 关于诸资料给出的气隙量计算公式

文献[1]给出两个计算公式:

$$l_g = \frac{l_e(\mu - \mu_e)}{\mu\mu_e} \quad (1)$$

式中, $l_e$ ——磁心的有效磁路长度。

$\mu$ ——磁心材料的起始磁导率。

$\mu_e$ ——开气隙后要求的磁心有效磁导率。

$$l_g = 4\pi A_e \left[ \frac{N_1^2}{L_1 \times 10^9} - \frac{1}{A_L} \right] \quad (\text{cm}) \quad (2)$$

式中: $L_1$ ——初级绕组的电感量(H)

$A_L$ ——磁心无气隙时的电感因数(nH/N<sup>2</sup>)

$A_e$ ——磁心的有效截面积(cm<sup>2</sup>)

文献[2]收集有四个计算公式是:

$$l_g = \frac{0.4\pi L_p I_p^2}{A_e \Delta B_m} \quad (3)$$

$$l_g = \frac{0.4\pi N_p^2 A_e}{L_p \times 100} - \frac{l_c}{\mu_r} \quad (4)$$

$$l_g = 4\pi A_e \left( \frac{N_p^2}{L_p \times 10000} - \frac{1}{A_L} \right) \quad (5)$$

$$l_g = \frac{0.4\pi L_p I_p^2}{A_e B_m^2} \times 10^2 \quad (6)$$

式中单位为: B(Gs),  $l_g(\text{cm})$ ,  $I_p(\text{A})$ ,  $A_L(\text{nH/N}^2)$ ,  $L_p(\mu\text{H})$ ,  $A_e(\text{cm}^2)$

文献 [ 3 ] 给出的计算公式为:

$$l_g = \frac{0.4\pi L_{p1} I_{p1}^2}{\Delta B_m^2 S_e} \quad (\text{cm}) \quad (7)$$

式中单位:  $S_e(\text{cm}^2)$ ,  $L_{p1}(\text{H})$ ,  $I_{p1}(\text{A})$ ,  $B_m(\text{T})$

文献 [ 4 ] 在331页给出:

$$l_g = \frac{\mu_r N_p^2 A_e}{L_p} \quad (8)$$

式中单位:  $l_g(\text{mm})$ ,  $A_e(\text{mm}^2)$ ,  $\mu_r(4 \times 10^{-7})$ ,  $L_p(\text{mH})$

在337页又给出一个公式为:

$$l_g = \frac{0.4\pi L_p I_{PK}^2}{A_e \Delta B^2} \times 10^8 \quad (9)$$

式中单位:  $l_g(\text{mm})$ ,  $A_e(\text{cm}^2)$ , B(Gs),  $L_p(\text{H})$ ,  $I_{PK}(\text{A})$ 。

文献 [ 5 ] 给出的计算公式为:

$$l_g = \frac{0.4\pi N_p^2 A_e \times 10^{-8}}{L_p} \quad (\text{cm}) \quad (10)$$

式中单位:  $A_e(\text{cm}^2)$ ,  $L_p(\text{H})$ 。

以上公式中,  $A_e$ 和 $S_e$ 为磁心的有效截面积,  $l_e$ 和 $l_c$ 为有效磁路长度,  $L_p$ 和 $L_{p1}$ 为开关电源变压器的初级绕组电感量,  $I_p$ 、 $I_{p1}$ 和 $I_{PK}$ 都代表初级电流的峰值,  $B_m$ 和  $B_m$ 为磁心的工作磁通密度峰值,  $A_L$ 为磁心不开气隙时的电感因数,  $\mu$ 为磁心材料的磁导率,  $N_1$ 和 $N_p$ 为初级绕组匝数。

### 3 对气隙量计算公式的推导和分析

由于气隙量的计算公式繁多, 我们不能武断的说出谁是谁非, 只有通过理论推导, 才能分辨出某个计算公式的正确与否。下面我们从磁路定律出发, 推出气隙定律, 从气隙定律导出气隙量的计算公式。

为了简便起见, 在推导过程中所涉及到的各物理量的单位, 除特殊说明外, 均采用国际单位制中的基本单位。

根据闭合磁路的磁路定律:

$$\phi = \frac{\varepsilon_m}{r_m} \quad (11)$$

式中,  $\phi$ 为磁心截面上的磁通量。

磁通势  $\varepsilon_m = NI$   $N$ 为匝数,  $I$ 为电流

$$\text{磁阻 } r_m = l_e / \mu_0 \mu A_e \quad (12)$$

在(12)式中, 如果磁心各段都是由一种材料组成的,  $\mu$ 即为该材料的磁导率。如果磁心各段是由两种或两种以上磁导率不同的材料组成,  $\mu$ 就由磁心的有效磁导率  $\mu_e$ 取代。磁心开气隙后, 把气隙看成是相对磁导率等于1的特殊磁性材料, 所以把磁心开气隙后的磁导率也称为有效磁导率  $\mu_e$ 。

另外需强调指出, 具有闭合磁路的磁心常数 $C_1$ 、 $C_2$ 及其有效磁路参数 $A_e$ 、 $l_e$ 和 $V_e$ , 它们是由磁心的大小和形状决定的结构参数, 与磁心的材料参数 $\mu$ 或 $B_m$ 等无关。所以磁心开个小气隙后只能使磁路的磁阻增加。而不会使磁心的有效磁路长度变化。

设磁心是由磁导率为 $\mu$ 的同一种材料组成, 磁心的有效磁路长度为 $l_e$ , 有效截面积为 $A_e$ , 开的气隙量为 $l_g$ , 开气隙后磁心剩余部分的磁路长度为 $l_c$ , 磁心开气隙处的截面积为 $A_B$ 。于是根据磁路定律可以写出开气隙后磁路的总磁阻 $r_m$ :

$$r_m = \frac{l_c}{\mu_0 \mu A_e} + \frac{l_g}{\mu_0 A_B} = \frac{l_c A_B + \mu l_g A_e}{\mu_0 \mu A_e A_B} \quad (13)$$

(11)式可写成

$$\varepsilon_m = \phi r_m \quad \text{即} \quad NI = \phi r_m \quad (14)$$

设 $A_B = KA_e$ , 并把 $l_c = l_e - l_g$ 代入(13)式可得:

$$r_m = \frac{l_e [1 + \frac{l_g}{l_e} (\frac{\mu}{K} - 1)]}{\mu_0 \mu A_e} \quad (15)$$

把(15)式代入(14)式得到

$$NI = \phi \times \frac{l_e [1 + \frac{l_g}{l_e} (\mu / K - 1)]}{\mu_0 \mu A_e} \quad (16)$$

设开气隙后磁心的有效磁导率为 $\mu_e$ , 磁路定律写成:

$$NI = \phi \frac{l_e}{\mu_0 \mu_e A_e} \quad (17)$$

由(17)式与(16)式相比较可导出:

$$\mu_e = \frac{\mu}{1 + \frac{l_g}{K l_e} (\mu - K)} \quad (18)$$

(18)式表示出磁心开气隙后的有效磁导率 $\mu_e$ 与磁心材料的磁导率 $\mu$ 之间的关系。如果磁导率 $\mu \gg K$ , 开气隙处的磁心截面积 $A_B$ 又非常接近磁心的有效截面积 $A_e$ , 使 $K \approx 1$ , (18)式可写成:

$$\mu_e = \frac{\mu}{1 + \frac{l_g}{l_e} \mu} \quad (19)$$

(19)式即为经常使用的气隙定律

在实际应用中，一般情况下  $\mu - K$  这个条件是能满足的，所以(18)式中的  $(\mu - K)$  用  $\mu$  取代，再解出  $l_g$ ：

$$l_g = \frac{l_e(\mu - \mu_e)K}{\mu\mu_e} \quad (20)$$

(20)式适用于各段磁路横截面积差别比较大的磁心气隙量计算。如果磁路各段截面积非常接近，K可当作1处理，于是从(19)式解出：

$$l_g = \frac{l_e(\mu - \mu_e)}{\mu\mu_e} \quad (21)$$

(21)式即为(1)式。

根据磁导率的计算公式

$$\mu = \frac{Ll_e \times 10^7}{4\pi N^2 A_e} \quad L \text{ 为开气隙之前的电感量}$$

$$\mu_e = \frac{L_e l_e \times 10^7}{4\pi N^2 A_e} \quad L_e \text{ 为开气隙后的电感量}$$

把  $\mu$  和  $\mu_e$  代入(21)式，并把  $A_e$  的单位化为  $\text{cm}^2$ ， $l_e$  的单位用  $\text{cm}$ ， $L_e$  的单位用  $\text{H}$ ，电感因数的单位用  $\text{nH}/\text{N}^2$ ，整理后就得到

$$l_g = 4\pi A_e \left( \frac{N^2}{L_e \times 10^9} - \frac{1}{A_L} \right) \quad (22)$$

(22)式就是(2)式，(22)式中的  $L_e$  单位若改为  $\mu\text{H}$ ，(22)式就应改写成(5)式。

在  $l_e$  的单位用  $\text{cm}$ ， $A_e$  单位用  $\text{cm}^2$ ，电感单位用  $\text{nH}$  的条件下磁导率的计算公式为

$$\mu = \frac{Ll_e}{4\pi N^2 A_e} = \frac{l_e}{4\pi A_e} A_L$$

$$\text{所以 } \frac{1}{A_L} = \frac{l_e}{4\pi\mu A_e} \quad (23)$$

(22)式中的  $L_e$  若改用  $\text{nH}$ ，则(22)式可写成：

$$l_g = 4\pi A_e \left( \frac{N^2}{L_e} - \frac{1}{A_L} \right) = \frac{4\pi A_e N^2}{L_e} - \frac{4\pi A_e}{A_L} \quad (24)$$

把(23)式代入(24)式得

$$l_g = \frac{4\pi A_e N^2}{L_e} - \frac{l_e}{\mu} \quad (25)$$

若上式中的  $L_e$  改用

$$l_g = \frac{4\pi A_e N^2}{L_e \times 1000} - \frac{l_e}{\mu} \quad (26)$$

由(26)式与(4)式相比较，(4)式中的  $l_e$  若代表有效磁路长度，它实际上就是(26)式。

文献 [2] 在解释(4)式时，引入了一个磁心开气隙后磁路有效长度  $l_e$  的计算公式：

$$l_e = l_c + \mu_r l_g \quad (27)$$

式中： $l_c$  是磁心磁路长度。

$\mu_r$  是相对磁导率。

原作者从(27)式出发，最后证明说(4)式与(5)式是一致的。关于(27)式，文献[3]也给出一个同样的公式，并指出：如果在磁心通路中开一个气隙，将建立一个有气隙的磁路，它会改变磁路的有效长度。因为空气隙的磁导率为1，所以磁路长度  $L_e$  为：

$$l_e = l_i + \mu_l l_g \quad (28)$$

式中， $l_i$ ——磁性材料的磁路长度

$l_g$ ——空气隙的磁路长度

$\mu_l$ ——磁性材料的磁导率

原作者对(28)式的解释使人看不懂。有效磁路长度  $l_e$  原本是磁路的结构参数，它与磁路本身的材料参数无关，在(28)式中  $l_e$  与材料的磁导率  $\mu_l$  的关系非常之大，这使人非常难以理解。

关于(28)式或(27)式的最初来历，我们无法考证。既然有不少人在引用它，推广它，这就引起了我们对(27)式进行考察的兴趣，我们试图从理论上否定它。

我们根据磁路定律推出了开气隙后磁路的总磁阻  $r_m$  如(13)式所示。在(13)式中，如果气隙的截面积与磁心的有效截面积  $A_e$  相等，则(13)式变成：

$$r_m = \frac{l_c + \mu l_g}{\mu_0 \mu A_e} \quad (29)$$

不开气隙时的磁阻应为：

$$r_m = \frac{l_e}{\mu_0 \mu A_e} \quad (30)$$

比较(29)式和(30)式得出

$$l_e = l_c + \mu l_g \quad (31)$$

通过以上推导，好像证明了(27)式的正确性。其实不然，只是推演一下(27)式的来源。在(31)式的推导过程中犯了一个错误，即把开气隙前后的磁阻都用  $r_m$  代表，所以就由(29)式与(30)式相等得出(31)式。实际

上开气隙前后的磁阻是绝对不会相等的, 所以(29)式和(30)式也就不能相等, 得出的(31)式是绝对错了的。文献[2]能用(27)式推出(4)来, 其推导过程中是出了错误的。

现在考察(8)式的来历。对于(1)式, 当 $\mu - \mu_e$ 时可用 $\mu$ 代替 $(\mu - \mu_e)$ , 于是(1)式就可写成:

$$l_g = \frac{l_e}{\mu_e} \quad (32)$$

根据 $\mu_e$ 的计算公式

$$\mu_e = \frac{L_e l_e}{\mu_0 N^2 A_e} \quad (33)$$

把(33)式代入(32)式得到

$$l_g = \frac{\mu_0 N^2 A_e}{L_e} \quad (34)$$

(34)式是使用国际单位制的基础单位推导出来的。但是如果同时把式中 $l_e$ 的单位换成mm,  $A_e$ 换成 $\text{mm}^2$ ,  $L_e$ 换成mH, (34)式仍成立, 即变成了(8)式。

现在对(9)式进行考证。众所周知, 电感L通上电流I后, 电感器的储存能量为:

$$W_m = \frac{1}{2} L I^2 \quad (35)$$

磁介质被电流的磁场H磁化后, 磁介质中的磁能密度为 $1/2BH$ , 若均匀磁化, 磁介质的体积为V, 则电流I在磁介质中的总储能为

$$W_m = \frac{1}{2} B H V \quad (36)$$

对于闭合磁心, 内圈与外圈部分之磁路长度是不一样的, 考虑到这一误差, 磁心的尺寸使用有效参数, 磁场H也使用有效尺寸计算值。(36)式可写成:

$$W_m = \frac{1}{2} B H_e V_e \quad (37)$$

对于变压器磁心来说, 初级电流从0升到 $I_p$ , B同时从0升到 $B_m$ 时, 在初级绕组电感 $L_p$ 中储存的能量也就是磁心中储存的能量, 比较(35)与(37)式可得:

$$\frac{1}{2} L_p I_p^2 = \frac{1}{2} B_m H_e V_e \quad (38)$$

式中 $V_e$ 也可能由两种磁导率不同的材料构成, 空气隙也可以看成一种相对磁导率等于1的磁性材料。 $H_e$ 是由磁化电流 $I_p$ 产生的磁化场。 $H_e$ 与 $B_m$ 的关系是:

$$H_e = \frac{B_m}{\mu_0 \mu_e} \quad (39)$$

式中:  $\mu_0 = 4 \times 10^{-7}$  H/m

$\mu_e$ 是开气隙后磁心的有效磁导率。

把(39)式代入(38)式得:

$$\frac{1}{2} L_p I_p^2 = \frac{1}{2} \frac{B_m^2 A_e l_e}{\mu_0 \mu_e} \quad (40)$$

如前所述, 在 $\mu - \mu_e$ 的条件下(32)式成立, 把(32)式代入(40)式得

$$\frac{1}{2} L_p I_p^2 = \frac{1}{2} \frac{B_m^2 A_e l_e}{\mu_0} \times \frac{l_g}{l_e} = \frac{1}{2} \frac{B_m^2 A_e l_g}{\mu_0} \quad (41)$$

由(41)式可导出:

$$l_g = \frac{4\pi L_p I_p^2}{B_m^2 A_e} \times 10^{-7} \quad (42)$$

如果(42)式中,  $L_p$ 单位仍用H,  $I_p$ 单位仍用A,  $l_g$ 的单位换为cm,  $B_m$ 换用Gs,  $A_e$ 换用 $\text{cm}^2$ , (42)式可改写成

$$l_g = \frac{4\pi L_p I_p^2}{A_e B_m^2} \times 10^7 \quad (43)$$

(43)式就是(9)式。可见(9)式仍来源于(1)式近似的结果。

文献[4]推导(9)式时从气隙储能开始, 认为磁心开气隙后能量是储存在气隙中。于是认为气隙中的磁能密度乘以气隙的体积就等于初级电感 $L_p$ 储存的能量。我们认为, 说能量储存在气隙中是不正确的, 能量仍然应储存在包括气隙在内的整个磁心中, 气隙中的磁能密度仍然与磁性材料中的磁能密度相等, 应为 $\frac{1}{2} B_m H_e$ , 而不是 $\frac{1}{2} B_m H$

因为气隙中的磁场H它由两部分组成, 一部分是由安匝数NI直接产生的磁场 $H_e$ , 另一部分仍然是磁心的磁化强度M所引起的散磁场H。H是B的组成部分, 而不是电流I直接产生的磁场, 所有气隙中的磁能密度只能是 $\frac{1}{2} B H_e = \frac{1}{2} \frac{B_m^2}{\mu_0 \mu_e}$ , 而不是 $\frac{1}{2} \frac{B_m^2}{\mu_0}$ 。从(41)式的推导过程中可以看到,  $l_e$ 与 $l_g$ 约掉后才得到(41)式右端, 虽然(41)式右端含有 $A_e l_e$ 因子恰好代表气隙体积, 但 $\frac{1}{2} \frac{B_m^2}{\mu_0}$ 不代表气隙中的磁能密度, 另外, 如果 $\frac{1}{2} \frac{B_m^2}{\mu_0}$ 真的代表气隙中的磁能密度, 那么(41)式就不是近似公式, 是个准确公式, 由(41)式导出的(42)式也应是个准确公式。事实上(42)式是在 $\mu - \mu_e$ 的条件下近似得来, 用它计算气隙与 $\mu$ 无关了。如果

(42) 式是绝对成立的, 我们就可以得出气隙量与磁心材料磁导率  $\mu$  绝对无关的错误结论。这就反证了磁心开气隙后能量储存在气隙中的结论是不正确的。

关于式(7), 与(9)式没有本质的差别, 只是  $B_m$  的单位用 T 而不是 Gs。

把(9)式中的  $L_p$  单位改用  $\mu H$ , (9)式就变成(6)式。

(3)式与(6)式相比较, 明显的错误是少了个  $10^2$  因子, 而且把  $B_m^2$  写成了  $B_m$ 。

把  $\mu_0 = 4 \times 10^{-7}$  代入(34)式, 就可得到(10)式。(10)式和(8)式可看作同一个公式。

在实际应用中, 有时线圈都已绕好密封, 匝数  $N$  也不知, 只指定用的磁心材料和型号, 要求开气隙, 把初级绕组的电感量降到指定值。这时可用下式计算气隙量:

$$l_g = \frac{l_e(L - L_e)}{\mu L_e} \quad (44)$$

式中:  $l_e$  为磁心的有效磁路长度。

$L_e$  为开气隙后要求的电感量。

$L$  为气隙量为零时的电感量。

$\mu$  为磁心材料的磁导率。

值得注意的一点是, 使用(2)、(5)和(44)式时, 式中的  $A_L$  和  $L$  应是无气隙时的电感因数和电感量, 当磁心是由两部分对在一起组成时, 测出的  $A_L$  或  $L$  值都比绝对无气隙时降低 30% 左右。如果计算  $l_g$  使用的是由两部分组成的磁心没开气隙时的  $A_L$  或  $L$ , 其计算值要比真正需要的  $l_g$  值偏小一些。

## 4 结论

(1)磁心气隙量计算公式的理论根据是磁路定律, 而不是气隙中储能的理论。

(2)当气隙的截面积  $A_B$  与磁心有效截面积  $A_e$  有明显差异时应使用(20)式计算气隙量。

(3)当开气隙处的磁心截面积  $A_B$  与磁心的有效截面积近似相等时, 可使用(1)、(2)、(4)、(5)或(44)式计算气隙量。

(4)当磁心磁导率  $\mu$  远大于开气隙后要求的有效磁导率  $\mu_e$  时, 才可使用(7)、(8)、(9)、(10)和(32)式计算气隙量。

## 5 实例计算比较

文献 [4] 在 333 页 “计算变压器的另一种方法” 中举一反激式变压器的设计实例。例中算出初级电流峰值

$I_{PK} = 1.44(A)$ , 初级电感  $L_p = 2.25(mH)$ , 磁心材料的工作磁通密度  $B_m$  设定为  $1950Gs$ , 变压器磁心选定为 EE42, 其  $A_e = 1.82cm$ ,  $l_e = 9.7cm$ 。原作者用(9)式计算磁心气隙量:

$$l_g = \frac{0.4\pi \times 2.25 \times 10^{-3} \times 1.44^2}{1.82 \times 1950^2} \times 10^8 = 0.085(cm)$$

$$\text{根据 } L = \frac{N\phi}{I} = \frac{NA_e B_m}{I} \quad \text{可导出}$$

$$N = \frac{LI}{A_e B_m} = \frac{L_p I_{PK}}{A_e B_m} = \frac{2.25 \times 10^{-3} \times 1.44}{1.82 \times 10^{-4} \times 0.195} = 91.3(Ts)$$

由计算可知, 该例中, 若保持工作  $B_m$  为  $0.195T$ , 必须把初级绕组匝数定为  $91.3Ts$ 。

根据匝数和初级电感可计算出开气隙后的有效磁导率  $\mu_e$ :

$$\mu_e = \frac{L_p I_e}{4\pi N^2 A_e} = \frac{2.25 \times 10^{-3} \times 9.7}{4\pi \times 91.3^2 \times 1.82} = 114.5$$

式中: 电感  $L_p$  的单位用  $nH$ , 有效磁路长度用  $cm$ , 有效截面积  $A_e$  用  $cm^2$ 。

通过对  $\mu_e$  的计算可知, 磁心材料的磁导率  $\mu$  必须大于  $114.5$  才行, 否则, 不开气隙  $L_p$  也达不到要求的  $2.25mH$ 。

假定磁心材料的磁导率  $\mu = 400$ , 磁路截面积是均匀的, 即  $A_B = A_e$ 。则可用(1)式计算气隙量:

$$l_g = \frac{l_e(\mu - \mu_e)}{\mu \mu_e} = \frac{9.7(400 - 114.5)}{400 \times 114.5} = 0.060(cm)$$

如果材料的磁导率  $\mu = 2500$ , 再把  $\mu$  代入(1)式计算气隙量  $l_g$ :

$$l_g = \frac{9.7(2500 - 114.5)}{2500 \times 114.5} = 0.081(cm)$$

通过以上计算  $l_g$  的值, 验证了公式(9)就是公式(1)的近似结果。

## 参考文献

- [1] 张忠仕, 陈文, 李卫. 单端反激变压器设计时选择磁心的方法 [J]. 国际电子变压器, 2005, (8): 123.
- [2] 黄永富. 关于单端反激式变压器的三个设计公式 [J]. 国际电子变压器, 2004, (3): 47.
- [3] 张乃国. 开关电源脉冲功率变压器的一种设计方法 [J]. 国际电子变压器, 2005, (6): 136.
- [4] 张占松, 蔡宣三. 开关电源的原理与设计 [M]. 1999: 331 与 337.
- [5] 吕利明, 肖建平. 高频开关电源单端反激变压器的原理与设计方法 [J]. 磁性材料及器件, 2006, 37(1): 38.