

Design of active high power PFC

## 1. PFC 电感(L)计算公式

### 1.1 电路形式及输入数据

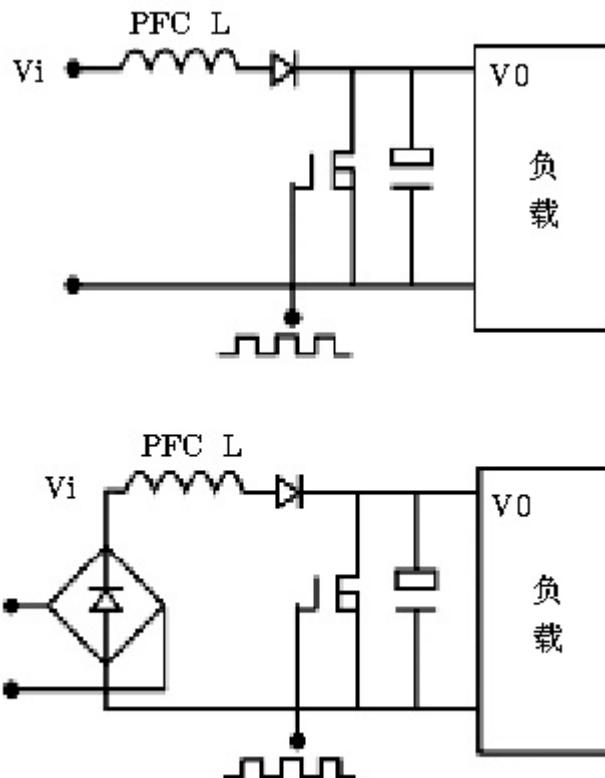


图 (1)

C 的基本电路形式如图 1，并定义电感输入端电压为  $V_i$ ，电感输出电压为  $V_{OUT}$  或记为  $V_0$ 。

假定：1/ PFC 输出功率  $POUT=2200\text{ w}$

2/ MOC 管开关频率  $FSW=50\text{Khz}$

3/ PFC 电感输出电压  $V_{OUT}=380V$  并简称  $V_o$

4/ PFC 电感最小输入电压  $V_{IN(mim)}=90V$  (有效值)

5/ PFC 电感最大输入电压为  $V_{IN(max)}=260V$  (有效值)

6/ 最大温升  $50^{\circ}C$

7/ 电感效率为  $\eta_1 = 99\%$

8/ 整个调节装置效率为  $\eta_2 = 95\%$

1.2 PFC 电感  $L$  及输入电流  $I_{in}$  的计算公式

1.2.1 电感基本表达式

根据电磁感应定律

$VL=L \times di/dt$ , 当  $S$  导通时  $Vi=VL=Ldi/dt$ ,

$L=Vi \times dt/di$  (1)

$Vi$  是整流桥正输出电压也是 PFC 输入端电压, 当  $S$  关闭时  $Vi=-L \times di/dt+V_0$ ,

$V_0$  是 PFC 输出端电压。

$L=(V_0-Vi) \times dt/di$  (2)

导通时  $dt=t_{ON}$  关闭时  $dt=t_{OFF}$

1.2.2 导出占空比  $D$  与  $Vi$  和  $V_0$  的关系

$\because$  式(1), (2)相等且  $\Delta i$  都一样, 得到:

$Vi \times t_{ON} = (V_0 - Vi) \times t_{OFF}$

$Vi \times t_{ON} + Vi \times t_{OFF} = V_0 \times t_{OFF}$  即  $Vi \times T = V_0 \times t_{OFF}$

$$t_{OFF}/T = V_i/V_o$$

$\because$  D 被定义为  $t_{ON}/T$

$$\text{则 } t_{OFF}/T = (T - t_{ON})/T = 1 - D$$

$$\therefore D = 1 - t_{OFF}/T = 1 - V_i/V_o \quad V_o = (V_o - V_i)/V_o$$

1.2.3 导出由 (PFC 输入端未经滤波的) 交流电压和 PFC 输出的直流电压所描述的电感表达式。

$$\because V_i = \sqrt{2} \times V_{in(AC)} \min; \quad T = 1/F$$

$$\text{由(1)知: } L = (V_i \times t_{ON}) / \Delta I = [V_i \times (D \times T)] / \Delta I$$

$$\text{又 } D = (V_o - V_i)/V_o, \text{ 得到}$$

$$L = [(V_i \times T) / \Delta I] \times D$$

$$= [(V_i \times T) / \Delta I] \times (V_o - V_i)/V_o$$

$$= [V_i \times (V_o - V_i)] / \Delta I \cdot F \cdot V_o$$

$$= [\sqrt{2} \times V_{in(AC)} \min \cdot (V_o - \sqrt{2} \times V_{in(AC)} \min)] / \Delta I \cdot F \cdot V_o$$

$$= [\sqrt{2} \times V_{in(AC)} \min \cdot (1 - \sqrt{2} \times V_{in(AC)} \min/V_o)] / \Delta I \cdot F \dots (3)$$

式中 F 单位 Hz, L 单位是亨利。若  $\times 10^{-6}$  就变成微亨 ( $\mu H$ )。

式(3) 就是临界电感的计算式。美国 Metglas 和南韩 YuYu 公司均使用该计算式计算临界电感。

1.2.4 输入电流表达式

$$\because P_{In \ max} = V_{In(rms)} \min \times I_{In(rms)} \ max$$

$$\therefore I_{In(rms)max} = P_{In max} / V_{In(rms)min} = P_{out max} / (V_{In(rms)min} \times \eta 2) \quad (4)$$

$$= 2200 / (90 \times 0.95) = 25.73 \text{ (A)}$$

$$\sqrt{2} \times I_{In(rms)max} = \sqrt{2} \times 25.73 = 36.38 \text{ (A)} \quad (5)$$

$$I_{in(pk)} = \sqrt{2} \times I_{In(rms)max} + \Delta I / 2 \quad (6)$$

## 2 设计程序

### 2.1 计算临界电感

由式(3)知要计算电感  $L$  必须知道  $\Delta I$ 。

#### a. 估算纹波电流 $\Delta I$

①先计算 PFC 电感总损耗功率(它包含铜损与铁损)，因为磁心损耗与频率  $F$  及磁感强度  $B$  的摆幅  $\Delta B$  有关而  $\Delta B$  又与电流摆幅  $\Delta I$  有关，所以从功率损耗来求  $\Delta I$ ，步骤是先求总损耗，接着求磁心损耗，再求  $\Delta B$ ，最后求  $\Delta I$ 。现在从 PFC 电感的功率损耗入手。

已知电感的效率  $\eta 1$  为 99% 即有  $1 - \eta 1 = 1\%$  被损耗掉，PFC 总的输出功率是  $P_{OUT}$ ，装置效率  $\eta 2$  为 95% 则输入功率为  $(P_{OUT} / \eta 1)$ ，于是电感的总损耗应为：

$$\begin{aligned} P_{tot} &= (1 - \eta 1) \times (P_{OUT} / \eta 1) = (1 - 0.99) \times (2200 / 0.95) \\ &= 23.16 \text{ W} \end{aligned}$$

②计算磁心损耗，对于大功率电感其理想(理论最佳)设计是使磁心损耗等于铜导线的损耗即：

$$P_{core} = P_{cu} = P_{tot} / 2 = 23.16 / 2 = 11.58 \text{ W}$$

③ 从总损耗角度临时选择一款磁心

在温升 $\Delta T=50^{\circ}\text{C}$ 的要求下从表 1 选一款磁心使其总损耗接近上述①中期望值 2

3.16W。

表(1)功率磁心总损耗与温度的关系(近似值)

磁心	SA( $\text{cm}^2$ )	20 $^{\circ}\text{C}$	25 $^{\circ}\text{C}$	30 $^{\circ}\text{C}$	35 $^{\circ}\text{C}$	40 $^{\circ}\text{C}$	45 $^{\circ}\text{C}$	50 $^{\circ}\text{C}$
AMCC6.3	103.4	3.8	4.9	6.1	7.4	8.7	10.0	11.3
AMCC8	115.9	4.2	5.5	6.9	8.3	9.7	11.2	12.7
AMCC10	132.1	4.8	6.3	7.8	9.4	11.0	12.7	14.5
AMCC16A	143.1	5.2	6.8	8.5	10.2	12.0	13.8	15.7
AMCC16B	160.3	5.8	7.6	9.5	11.4	13.4	15.5	17.6
AMCC20	172.5	6.3	8.2	10.2	12.3	14.4	16.6	18.9
AMCC25	202.2	7.4	9.6	12.0	14.4	16.9	19.5	22.2
AMCC32	215.0	7.9	10.3	12.8	15.4	18.1	20.8	23.7
AMCC40	230.0	8.4	11.0	13.6	16.4	19.3	22.2	25.2
AMCC50	303.5	11.1	14.5	18.0	21.7	25.4	29.3	33.2
AMCC63	321.0	11.7	15.3	19.0	22.9	26.9	31.0	35.1
AMCC80	356.0	13.0	17.0	21.1	25.4	29.8	34.3	39.0
AMCC100	373.0	13.6	17.8	22.1	26.6	31.3	36.0	41.0
AMCC125	464.0	16.9	22.1	27.5	33.1	38.9	44.8	51.0
AMCC160	485.0	17.7	23.1	28.8	34.6	40.6	46.8	53.0
AMCC200	526.0	19.2	25.1	31.2	37.5	44.0	51.0	57.0
AMCC250	592.0	21.6	28.2	35.1	42.3	49.6	57.1	65.0
AMCC320	707.0	25.8	33.7	41.9	50.5	59.2	68.2	77.5
AMCC400	780.0	28.4	37.2	46.3	55.7	65.4	75.3	85.5
AMCC500	854.5	31.2	40.7	50.7	61.0	71.6	82.5	93.6
AMCC630	934.0	34.1	44.5	55.4	66.7	78.3	90.2	102.0
AMCC800A	1013.0	36.9	48.3	60.1	72.3	84.9	97.8	111.0
AMCC800B	1171.0	42.7	55.8	69.5	83.6	98.1	113.0	128.0
AMCC1000	1292.0	47.1	61.6	76.6	92.2	108.3	124.7	142.0

从表 1 中可选取 AMCC-25 这一款，它在 $\Delta T=50^{\circ}\text{C}$ 时总损耗为 22W 更接近 23.16

W

④计算该磁心材料单位重量(kg)的损耗

表2

序号	型号 AMCC	a	b	C	D	e	r	Al	Ae	M	Vol	Wa	WaAe
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm <sup>2</sup> )	(g)	(cm <sup>3</sup> )	(cm <sup>2</sup> )	(cm <sup>4</sup> )	
1	6.3	10 ± 0.5	11	33	20 ± 0.5	30 ± 1	53 ± 2	13.1	1.59	150	20.9	3.6	5.8
2	8	11 ± 0.8	13	30	20 ± 0.5	35 ± 1	52 ± 2	13.2	1.79	170	23.7	3.9	7.0
3	10	11 ± 0.8	13	40	20 ± 0.5	35 ± 1	62 ± 2	15.4	1.81	200	27.9	5.2	9.4
4	16A	11 ± 0.8	13	40	25 ± 0.5	35 ± 1	62 ± 2	15.1	2.31	250	34.8	5.2	12.0
5	16B	11 ± 0.8	13	50	25 ± 0.5	35 ± 1	72 ± 2	16.9	2.31	280	38.0	6.5	15.0
6	20	11 ± 0.8	13	50	30 ± 0.5	35 ± 1	72 ± 2	17.5	2.71	340	47.4	6.5	17.6
7	25	13 ± 0.8	15	56	25 ± 0.5	41 ± 1	82 ± 2	19.6	2.70	380	52.9	8.4	22.7
8	32	13 ± 0.8	15	56	30 ± 0.5	41 ± 1	82 ± 2	20	3.20	450	64.1	8.4	26.9
9	40	13 ± 0.8	15	56	35 ± 0.5	41 ± 1	82 ± 2	19.9	3.71	530	73.8	8.4	31.2
10	50	16 ± 1	20	70	25 ± 0.5	52 ± 1	102 ± 3	24.9	3.80	590	82.2	14.0	46.2
11	63	16 ± 1	20	70	30 ± 0.5	52 ± 1	102 ± 3	25.3	3.91	710	98.9	14.0	54.7
12	80	16 ± 1	20	70	40 ± 1	52 ± 1	102 ± 3	25.4	5.21	950	132	14.0	72.9
13	100	16 ± 1	20	70	45 ± 1	52 ± 1	102 ± 3	25	5.91	1060	148	14.0	82.7
14	125	19 ± 1	25	83	35 ± 1	63 ± 1	121 ± 3	30.2	5.40	1170	163	20.8	112
15	160	19 ± 1	25	83	40 ± 1	63 ± 1	121 ± 3	28.5	6.50	1330	185	20.8	135
16	200	19 ± 1	25	83	50 ± 1	63 ± 1	121 ± 3	29.8	7.81	1670	233	20.8	162
17	250	19 ± 1	25	90	60 ± 1	63 ± 1	128 ± 3	31.4	9.31	2100	292	22.5	210
18	320	22 ± 1	35	85	50 ± 1	79 ± 1	129 ± 4	32.5	9.30	2170	302	29.8	277
19	400	22 ± 1	35	85	65 ± 1	79 ± 1	129 ± 4	33.6	11.7	2820	393	29.8	348
20	500	25 ± 1	40	85	55 ± 1	90 ± 1	135 ± 4	35.6	11.3	2900	404	34.0	386
21	690	25 ± 1	40	85	70 ± 1	90 ± 1	135 ± 4	35.6	14.4	3670	511	34.0	488
22	800A	25 ± 1	40	85	85 ± 1.5	90 ± 1	135 ± 4	35.6	17.4	4450	620	34.0	592
23	800B	30 ± 1	40	96	85 ± 1.5	100 ± 1	155 ± 4	39.3	21.0	5930	826	38.0	799
24	1000	30 ± 1	40	105	85 ± 1.5	105 ± 1	171 ± 4	42.7	23	7060	983	42.0	967

注: Al = 平均磁路长度 Ae = 核心净(纯)截面积

因为总损耗已算出为 23.16W, 且理想状态下磁心损耗为总损耗的 1/2, 即 11.58W, 上面选中的那款磁心净重从表 2 中查得为 380g(0.38kg), 因此该磁心材料单位重量损耗为:

$$P = (P_{\text{tot}}/2)/W_t(\text{净重}) = 23.16/2/0.38 = 30.47 \text{W/kg}$$

⑤求  $\Delta B$

在已知的开关频率  $F (=50\text{kHz})$  情况下, 求磁心损耗  $P$  对应的磁感应强度  $B$  的振幅  $\Delta B$ 。因为损耗与频率成正比, 在频率一定时与磁滞迴线面积成正比, 面积又与磁感应强度  $B$  成比例, 每公斤损耗的计算公式如下: (F 单位: KHz)

$$P = 6.5 \times F \times 1.51 \times B_a \times 1.74 \text{ (W/kg)}$$

$$\text{则 } B_a = [P / (6.5 \times F \times 1.51)] / 1.74 \text{ (Tesla)}$$

$$\Delta B = 2 \times B_a = 2 \times [30.47 / (6.5 \times 501.51)] / 1.74$$

$$= 2 \times 81.5 \text{ (mT)} = 0.163 \text{ (T)}$$

#### ⑥估算纹波电流 $\Delta I$

式(5)已算得峰值电流为 36.38(A), 假定此电流相当磁心在 B 等于 1.4(T) 时发生。

工作时只发生  $\Delta B$  ( $= 0.163 \text{ T}$ ) 的摆幅, 所以摆幅电流也只有峰值电流的  $0.163 / 1.4$ , 则纹波电流

$$\Delta I = (0.163 / 1.4) \times 36.38$$

$$= \Delta B / B [ \sqrt{2} (P_{out}) / (\eta \sqrt{2} \times V_{in} \text{ (rms)} \text{ min}) ]$$

$$= 4.23 \text{ (APK-PK)} \quad (7)$$

#### ⑦最后由式(3)计算临界电感,

$$L = [ \sqrt{2} \times V_{in} \text{ (AC) min} \cdot (1 - \sqrt{2} \times V_{in} \text{ (AC) min} / V_0) ] / \Delta I \cdot F$$

$$= [ \sqrt{2} \times 90 \times (1 - \sqrt{2} \times 90 / 380) ] / 4.23 \times 50000$$

$$= 0.000399788 \text{ (H)}$$

$$= 400 \text{ (} \mu \text{ H)}$$

## 2.2 选择磁心(由电感的储能选择磁心大小)

由临界电感和最大峰值电流计算电感储能, 而电感储能又与磁心截面和窗口面积的乘积有关, 因此用电感储能来选择磁心。

从能量角度选择磁心是因为  $W_a \times A_e$  带有功的量纲, 各个器件生产厂家的产品均有面积乘积  $W_a A_e$  这项指标的标识, 单位是  $\text{Cm}^4$ 。

由  $L \times I = \Psi = N\Phi = N \times (B_m \times A_e)$  推演得到

$$L \times I \times I = L \times I^2 = N \times (B_m \times A_e) \times I \quad (8)$$

另外又知  $W_a \times K_m = (I/J) \times N$ ,

$$\therefore W_a \times K_m \times J = N \times I$$

将  $N \times I = W_a \times K_m \times J$  代入 (8) 式得到

$$L \times I^2 = W_a \times K_m \times J \times (B_m \times A_e), \quad W_a A_e = L \times I^2 / K_m \times J \times B_m.$$

又电感能量为  $(1/2) \times (L I^2)$ , 命其为  $E$ , 则  $L I^2 = 2E$

$$\therefore W_a A_e = L \times I^2 / K_m \times J \times B_m = 2E / B_m \cdot J \cdot K_m$$

计算时  $W_a$  及  $A_e$  应化成  $\text{m}^2$ ,  $J$  ( $\text{A/mm}^2$ ) 应化成  $\text{A/Cm}^2$  则

$$W_a \times 10^{-4} \times A_e \times 10^{-4} = 2E / (B_m \cdot (J/10^{-4}) \cdot K_m) \quad (\text{Cm}^4)$$

$$W_a A_e = 2E \times 10^4 / B_m \cdot J \cdot K_m \quad (\text{Cm}^4) \quad (9)$$

$L$  为 (5) 式算出的临界电感  $400 \mu \text{H}$ 。 $I$  为最大输入峰值电流已由 (6) 给出, 其中  $\Delta$

$I$  由 (7) 式给出, 算式如下

$$I_{\text{in (pk)}} = \sqrt{2} \times I_{\text{in (rms) max}} + \Delta I/2 = 36.38 + 4.23/2$$

$$= 38.5 \text{ (A)}$$

$$2E = L \times I^2 = 400 \times 10^{-6} \times 38.5^2 = 0.592 \text{ (焦耳)}$$

( $L$  单位为亨,  $I$  的单位为安)

$B_m = 1.4 \text{ (T)}$   $J = 5 \text{ (A/mm}^2)$ 、合  $500 \text{ (A/Cm}^2)$ 、 $K_m$  取  $0.4$  则:

$$W_a A_e = 0.59 \times 10^4 / (1.4 \times 500 \times 0.4)$$

$$= 21.17 \text{ Cm}^4$$

查表 2 得到 AMCC-25 这一款磁心的  $W_a A_e = 22.7 \text{ (Cm}^4)$  符合计算要求, 该磁心可入

选。该磁心各种参数如下：

$$a=1.3 \text{ cm} \quad A_1=19.6 \text{ cm}$$

$$b=1.5 \text{ cm} \quad A_e=2.7 \text{ cm}^2$$

$$C=5.6 \text{ cm} \quad W_t=0.38 \text{ kg}$$

$$D=2.5 \text{ cm} \quad W_a A_e=22.7 \text{ cm}^4$$

$$E=4.1 \text{ cm} \quad S_A=202.2 \text{ cm}^2 \quad (S_A \text{ 是与空气接})$$

$$F=8.2 \text{ cm} \quad \text{触的对流面积})$$

## 2.3 计算绕线匝数

前面已讨论过： $L \times I = \Psi = N \times \Phi$ ，而  $\Phi = B_m \times A_e$

$$\therefore L \times I = N \times B_m \times A_e; \text{ 将 } A_e \text{ 由 } \text{cm}^2 \text{ 化成 } \text{m}^2 \text{ 后, 则 } N = L \times I / B_m \times A_e \times 10^{-4} = L \times I \times 10^4 \quad (10)$$

$L$  是临界电感， $I$  是最大峰值电流

$$\text{则 } N = (400 \times 10^{-6}) \times (38.5) \times (104) / (1.4 \times 2.7) = 41 \text{ (匝)}$$

## 2.4 计算所需气隙

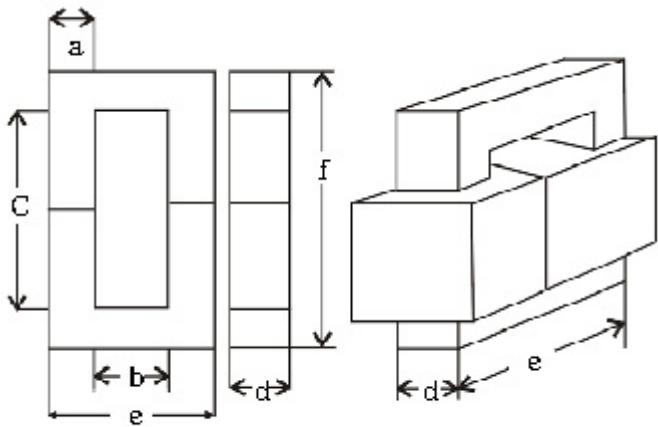
带气隙的电感计算公式：

$$L = (0.4 \pi N^2 A_e (10^{-8})) / (A_g + A_1 / \Delta \mu) \quad (11)$$

式中  $A_g$  为气隙长度， $A_1$  为磁心无气隙时的有效(平均)磁路长度， $\Delta \mu$  为工作在磁滞回线某点的磁导率增量，并取定  $\Delta \mu = 1000$ 。

$$\text{由上式得到 } (A_g + A_1 / \Delta \mu) = 0.4 \pi N^2 A_e (10^{-8}) / L$$

$$\therefore L_g = [0.4 \pi N^2 A_e (10^{-8}) / L] - (A_1 / \Delta \mu) \quad (12)$$



图(2)

当我们已知  $L$ ， $Ae$ ，和  $A1$  便可求出气隙长度  $Lg$  了，但我们仍使用初始给定参数来求  $Lg$ ，由求匝数  $N$  的第(10)式  $N=L \times I \times 104 / B_m \times Ae$  得到  $N \times Ae / L = I \times 104 / B_m$ ，将等式右边部分代入(12)中得到：

$$Lg = [0.4 \pi NI (10^{-4}) / B_m] - (A1 / \Delta \mu) \quad (13)$$

式中  $I$  为(6)式所表达的最大峰电流  $I_{In}(Pk)$ ，等于  $38.5(A)$ 。 $B_m=1.4(T)$ ， $A1=19.6(Cm)$ ， $\Delta \mu = 1000$ ，最后得到：

$$\begin{aligned} Lg &= [0.4 \times \pi \times 41 \times 38.5 \times 10^{-4}] / 1.4 - (19.6 / 1000) \\ &= 0.14 - 0.016 = 0.14 - 0.02 \\ &= 0.12 \text{ (Cm)} \end{aligned}$$

不过此  $Lg$  指的是气隙总长度，如果是 U 形磁心则每边气隙长度为  $LR=Lg/2=0.12/2=0.06 \text{ (Cm)}$

## 2.5 修正绕线匝数 $N$

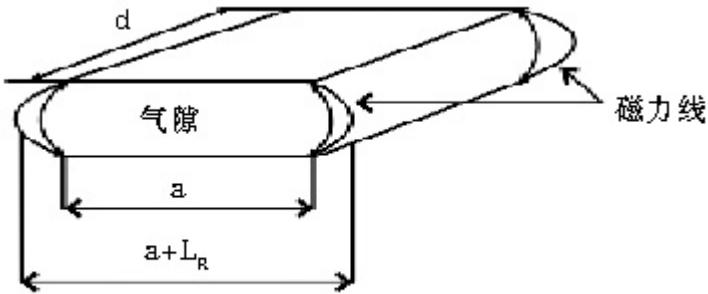


图 (3)

在 2.3 计算过的匝数  $N (=41)$  是没有气隙时的值, 但是加了气隙后, 磁通有扩散现象, 气隙使导磁面增大, 气隙有效长度缩短(即磁力线有扩散现象)即产生漏磁通使原来的截面积扩大, 原来截面积是  $a \times d$ , 扩大后的截面积为  $(a+LR) \times (d+LR)$ 。扩大后与扩大前面积之比为:

$$\begin{aligned} F &= [(a+LR) \times (d+LR)] / (a \times d) \\ &= [(1.3+0.06) \times (2.5+0.06)] / (1.3 \times 2.5) \\ &= 1.07 \end{aligned}$$

$$\text{公式(11): } L = (0.4 \pi N^2 A_e (10^{-8})) / (A_g + A_l / \Delta \mu)$$

$$\text{则有: } L(A_g + A_l / \Delta \mu) = 0.4 \pi N^2 A_e (10^{-8})$$

$$\begin{aligned} N^2 &= [L(A_g + A_l / \Delta \mu)] / 0.4 \pi A_e (10^{-8}) \\ &= [L(A_g + A_l / \Delta \mu)] \times 108 / 0.4 \pi A_e \\ N &= \sqrt{[L(A_g + A_l / \Delta \mu)] \times 108 / 0.4 \pi A_e} \end{aligned}$$

不过式中有效截面  $A_e$  要扩大成  $1.07 \times A_e$ , 最后得到匝数修正公式为:

$$N = \sqrt{[L(A_g + A_l / \Delta \mu)] \times 108 / (0.4 \pi A_e \times 1.07)} \quad (14)$$

修正后的匝数

$$N = \sqrt{[400 \times 10^{-6} (0.12 + 19.6/1000) \times 108 / (0.4 \pi \times 2.7 \times 1.07)]} = 39 \text{ 匝}$$

## 2.6 计算导线损耗

①计算导线的截面积及导线单位长度的电阻。



图(4)

磁心窗口绕了  $N$  匝线, 每匝的截面积的计算是这样: 选定磁心的窗口截面为  $b \times c$ , 且认定此面积只有一部分用来绕线, 通常为 0.4, 用  $K$  来表示, 称为有用系数, 可以用绕线的几何面积是  $K \times (b \times c)$ 。设每条导线的截面积为  $A_X$ ,  $N$  条导线总截面积是  $N \times A_X$ , 此称物理面积, 它应等于几何面积, 则有  $K \times (b \times c) = N \times A_X$  那么导线截面积:

$$A_X = K \times (b \times c) / N \quad (15)$$

$$A_X = 0.4 \times (5.6 \times 1.5) / 39 = 0.086 \text{ cm}^2$$

②导线单位长度的电阻

铜导线在不同温度时电阻率(Resistivity) [导体单位长度(1m)单位面积(1mm<sup>2</sup>)的电阻, 单位为  $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ], 计算公式如下:

$$\rho = 1.724 [1 + 0.0042(T - 20)] \quad (10-6) \quad \Omega \cdot \text{cm} \quad (16)$$

温度  $T = \text{环境温度} + \text{温升}$ , 例如工作的环境温为 30°C, 温升为 50°C, 则  $T = 80^\circ\text{C}$ , 代入(16)式得到

$$\rho = 2.16 \times 10^{-6} \quad \Omega \cdot \text{cm} = 2.16 \mu \Omega \cdot \text{cm}$$

那么该导线(其截面积为  $A_X = bck/N = 0.068 \text{ cm}^2$ )单位长度的电阻为

$$R_{unit} = \rho / Ax = 2.16 \text{ N/bck } \mu \Omega - \text{Cm}$$

$$= 2.16 \times 10^{-6} \times 39 / (1.5 \times 5.6 \times 0.4)$$

$$= 25 \times 10^{-6} \Omega - \text{Cm}$$

$$= 25 \mu \Omega - \text{Cm}$$

3 计算导线的铜损  $P_{cu}$ 。

步骤是计算 1/ 线包中每圈的平均长度、2/ 总长度、3/ 再算总电阻、4/ 最后计算功率。

1/ 估算线包每圈平均长度，右图是线包截面示意图，深色为磁心横截面  $a \times d$  浅色为导线所占面积。

每匝平均长度近似(略偏大)值为

$$MTL = 2 \times [(0.5b + a + 0.5b) + (0.5b + d + 0.5b)]$$

$$= 2 \times [a + 2b + d]$$

$$= 2 \times [1.3 + 2 \times 1.5 + 2.5]$$

$$= 13.6 \text{ Cm}$$

2/ 导线总长度

$$N \times MTL = 39 \times 13.6 = 530.4 \text{ Cm}$$

3/ 总电阻

$$\Omega_{tot} = 25.0 \times 10^{-6} \times 530.4 = 13.25 \text{ m}\Omega$$

4/ 导线总损耗  $P_{cu} = I^2 \times R$

电流  $I$  已由 2.2 中(4) 算出为 25.73A 取为 26A，则  $P_{cu} = I^2 \times R = 26^2 \times 13.25 \times 10^{-3} = 8.96 \text{ W}$

## 2.7 计算带隙磁心的损耗

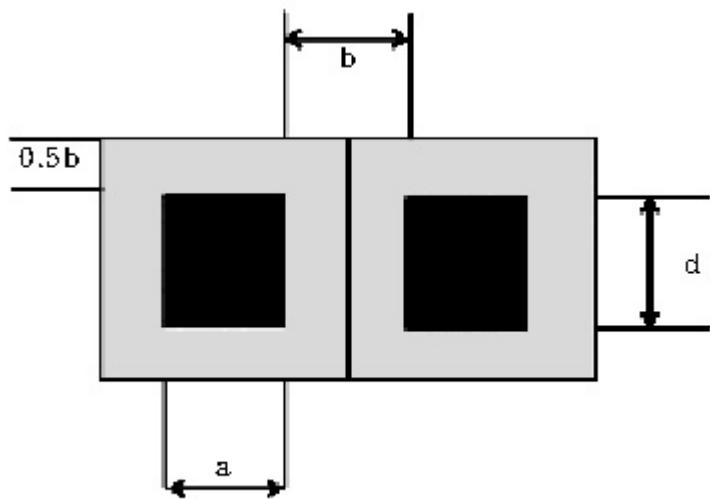


图 (5)

在 2.2 曾认定  $P_{core}$  为二分之一总损耗并算出  $\Delta B=0.163$ ，由磁心功率损耗公式  $P_{core}=6.5 \times f \times 1.51 \times B_{ac} \times 1.74$  可计算出损耗，但必须是带气隙磁心工作时的磁通摆幅  $B_{ac}$ 。

### ① 计算带气隙磁心工作时的磁通摆幅 $B_{ac}$

由 2.4 式(13)  $L_g = [0.4 \pi N I (10^{-4}) / B_m] - (A_1 / \Delta \mu)$  中，已知当  $\Delta \mu$  很大时  $A_1 / \Delta \mu$  趋向零，则  $L_g = [0.4 \pi N I (10^{-4}) / B_m]$ 。我们要计算  $B_{ac}$  摆幅时，式中  $I$  用电流摆幅  $\Delta I / 2$  代替， $\Delta I / 2$  已由式(7)算出为 4.23 A，而  $B_m$  即为  $B_{ac}$ 。那么：

$$\begin{aligned}
 B_{ac} &= 0.4 \pi N (\Delta I / 2) (10^{-4}) / L_g \\
 &= 0.4 \pi \times 39 \times (4.23 / 2) \times 10^{-4} / 0.12 \\
 &= 0.086 \text{ T} = 86 \text{ mT}
 \end{aligned}$$

2.2 中用总损耗的二分之一估算  $B_{ac}$  为 81.5mT 与 86mT 接近。

### ② 计算磁心损耗

材料每 Kg 损耗值计算公式：

$$\begin{aligned} P_{kg} &= 6.5 \times f \ 1.51 \times B_{ac} 1.74 = 6.5 \times 501.51 \times 0.0861.74 \\ &= 6.5 \times 367.65 \times 0.013 = 33.45 \text{ W} \end{aligned}$$

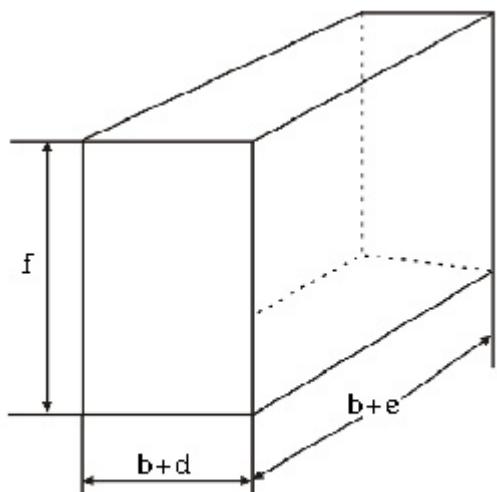
与 2.1 中估算的  $30.47\text{W}$  接近

磁心损耗为  $P_{core} = 33.45 \times WT = 33.45 \times 0.38 (\text{kg}) = 12.71 \text{ W}$

与 2.1 中估算的  $P_{core} = 11.58\text{W}$  接近

## 2.8 计算带隙磁心的温升

①计算整个 PFC 与空气进行热交换的表面积



图(6)

要计算温升首先必须计算整个 PFC (铁心和线圈的共同体) 与空气进行热交换的表面积是图(6)所示的六面体，此六面体六个面中每个面都含有线圈与空气，铁心与空气的接触面，六个面的面积之和便是 PFC 与空气进行热交换的面积，用符号  $SA$  (表面积) 表示。

$$\text{则 } SA = 2 \times f(b+d) + 2 \times (b+d)(b+e) + 2 \times f(b+e)$$

$$= 2 \times 8.2 \times (1.5 + 2.5) + 2 \times (1.5 + 2.5)(1.5 + 4.1) + 2 \times 8.2 \times (1.5 + 4.1) = 20$$

## 2.2 Cm2

② 计算近似的温升，公式如下：

$$\Delta T = (P_{tot}/SA) 0.833 \text{ (}^{\circ}\text{C)}$$

而总损耗  $P_{tot}=P_{core}+P_{cu}=8.96+12.71=21.67\text{W}$

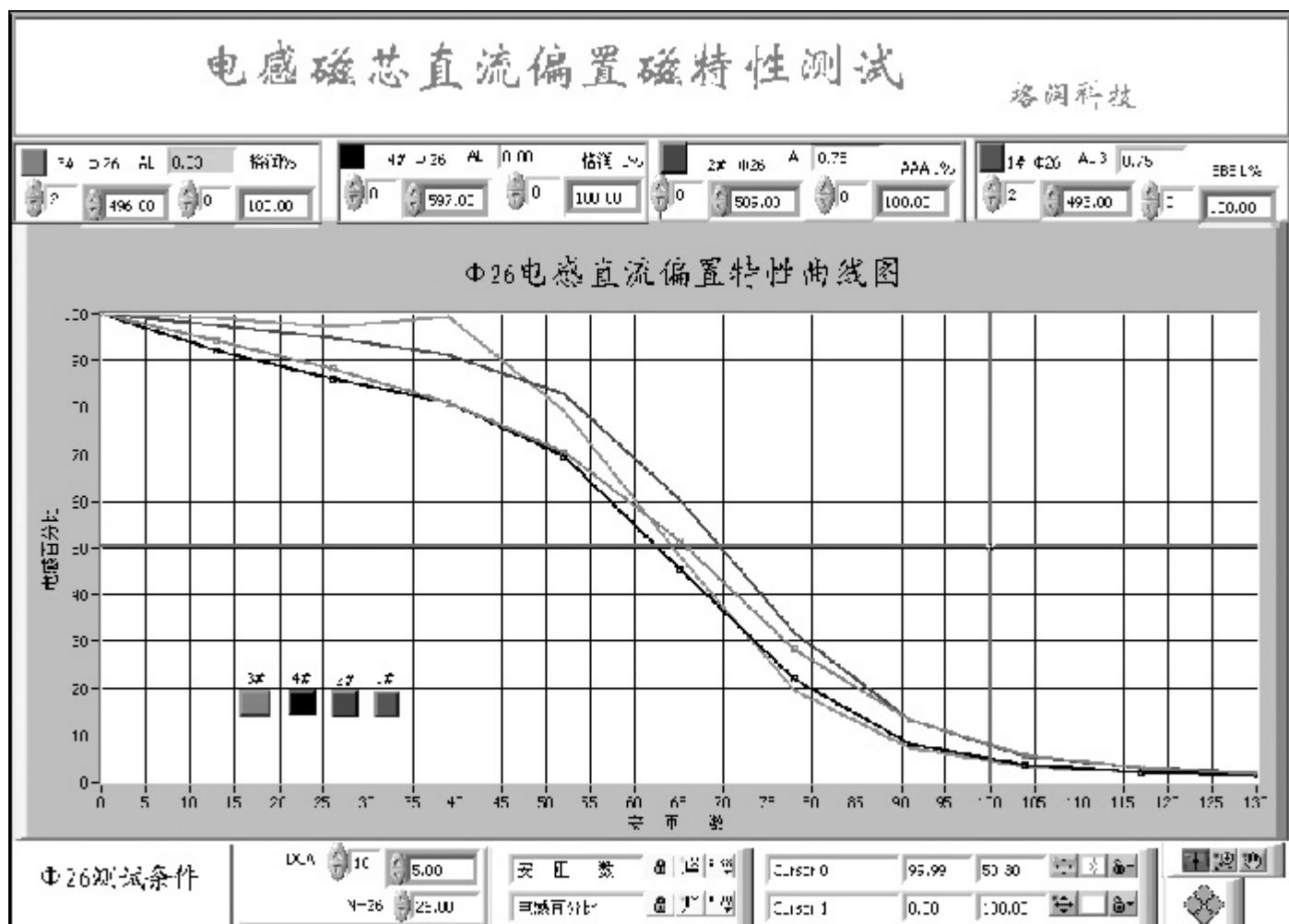
(与 2.1 估算的  $P_{tot}$  为  $21.16\text{W}$  接近)

注意：公式中  $P_{tot}$  要以毫瓦 (mw) 表示

$$\therefore \Delta T = (P_{tot}/SA) 0.833 = (21670 \div 202.2) 0.833 = 49^{\circ}\text{C}$$

符合  $\Delta T=50^{\circ}\text{C}$  的设计要求

## 2.9 确定 PFC 电感直流偏置效果



电感磁心直流偏置特性参考图

做好的 PFC 电感将其进行直流偏置测试会得到：

如图 7 所示模样的曲线图, 实测结果是 39 匝、0 安、电感为  $375 \mu H$ , 加 38.5A 直流偏置电流后--即  $38.5 \times 39 = 1500$  安匝处查得电感已衰减了 85% 左右, 为  $32.0 \mu H$ , 也接近 2.1 中计算出的临界电感值  $400 \mu H$ 。

## 射 频 和 天 线 设 计 培 训 课 程 推 荐

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，致力并专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；我们于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com))，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

易迪拓培训课程列表：<http://www.edatop.com/peixun/rfe/129.html>



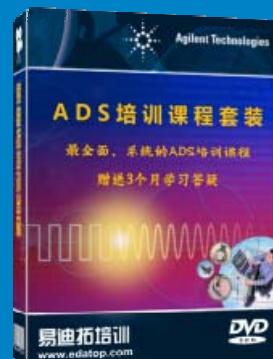
### 射频工程师养成培训课程套装

该套装精选了射频专业基础培训课程、射频仿真设计培训课程和射频电路测量培训课程三个类别共 30 门视频培训课程和 3 本图书教材；旨在引领学员全面学习一个射频工程师需要熟悉、理解和掌握的专业知识和研发设计能力。通过套装的学习，能够让学员完全达到和胜任一个合格的射频工程师的要求…

课程网址：<http://www.edatop.com/peixun/rfe/110.html>

### ADS 学习培训课程套装

该套装是迄今国内最全面、最权威的 ADS 培训教程，共包含 10 门 ADS 学习培训课程。课程是由具有多年 ADS 使用经验的微波射频与通信系统设计领域资深专家讲解，并多结合设计实例，由浅入深、详细而又全面地讲解了 ADS 在微波射频电路设计、通信系统设计和电磁仿真设计方面的内容。能让您在最短的时间内学会使用 ADS，迅速提升个人技术能力，把 ADS 真正应用到实际研发工作中去，成为 ADS 设计专家…



课程网址：<http://www.edatop.com/peixun/ads/13.html>



### HFSS 学习培训课程套装

该套课程套装包含了本站全部 HFSS 培训课程，是迄今国内最全面、最专业的 HFSS 培训教程套装，可以帮助您从零开始，全面深入学习 HFSS 的各项功能和在多个方面的工程应用。购买套装，更可超值赠送 3 个月免费学习答疑，随时解答您学习过程中遇到的棘手问题，让您的 HFSS 学习更加轻松顺畅…

课程网址：<http://www.edatop.com/peixun/hfss/11.html>

## CST 学习培训课程套装

该培训套装由易迪拓培训联合微波 EDA 网共同推出, 是最全面、系统、专业的 CST 微波工作室培训课程套装, 所有课程都由经验丰富的专家授课, 视频教学, 可以帮助您从零开始, 全面系统地学习 CST 微波工作的各项功能及其在微波射频、天线设计等领域的设计应用。且购买该套装, 还可超值赠送 3 个月免费学习答疑…



课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/24.html>



## HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书, 课程从基础讲起, 内容由浅入深, 理论介绍和实际操作讲解相结合, 全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程, 可以帮助您快速学习掌握如何使用 HFSS 设计天线, 让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

## 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程, 培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合, 全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作, 同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习, 可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…



详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验,
- ※ 一直致力并专注于微波射频和天线设计工程师的培养, 更了解该行业对人才的要求
- ※ 经验丰富的一线资深工程师讲授, 结合实际工程案例, 直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>