

# UTC 超级变压器一瞥与 胆机变压器的快捷设计 (下)

廖海成

绕制任何一个变压器较“理论变压器”之难点在于,它既要有理论支持又要有工艺保证。如果你的设计导致工艺既复杂又难看,你的产品是难登大雅之堂的,而产品的质量最终也是难有保证的。考察“29t/层”及 $N_1^1=69t$ 。为实现高保真,至少应将 $N_1^1$ 分三段夹于一次侧的段间,那么每段仅为23t,还未能排满一层,每层剩有6t的空档,就浪费了。可否同时增加一、二次侧的匝数以充分利用窗口又使工艺可控呢?这就有必要知道铁心窗口按你初始设计来使用时是合适、余量太多还是亏欠太多,即牵扯到“复核窗口”问题。翻遍所有谈“复核”的文章,皆忽略了“层间绝缘厚度与占层数较多、最多的漆包线线径之比值”这一重要参数,因而最终导致过于粗放难以操作。我们知道,因功率变压器所用铜线之截面为圆

形,每两匝之间会留有如图8的两个空档,白占了铁心窗口的一部分面积。此外便是骨架厚度及绝缘材料厚度所占去的另一部分面积,这两部分面积加起来相当可观,导致实际被铜线利用的窗口面积大为“缩水”。对这“缩水”面积若估测得过于不足会造成线包插不进之恶果;而若估测得过高,则会出现大量放空之浪费(对输出牛来说本来可以增加匝数延伸低频下限却丧失了机会)。所以非常有必要对“缩水”估测提高精准度。通过大量的实践与反复思考总结,笔者终于发现若引入“层间绝缘厚度与占层数较多、最多的漆包线线径之比值”这一重要参数,可以大大提升估测“缩水”,也即估测



图 8 线间空档

窗口可资利用的百分比的精确度。为了说明问题,笔者制作了表12、表13,提供了“利用不含漆皮的铜线截面积总和”及“利用漆包线最大外径与绝缘材料、骨架厚度之总和”来复核窗口的两种办法。可以看出,当“层间绝缘厚度与占层数较多、最多的漆包线径之比值” $\delta$ 趋大时,窗口的利用率就趋小。因为此时绝缘材料的厚度影响会凸现出来,其所占窗口分量已足够大,由“铜线截面可利用面积=窗口总面积-每相邻两匝之间总占空面积-所有绝缘材料截面积”,以及“铜线可利用厚度=窗宽-绝缘材料总厚度”,不难证明此时窗口能被铜线有效利用的分量必然小得多。

利用表12可迅速得出估测结果,利用表13准确度更高一些,但要查漆包线规格表据每cm可绕匝数算出每层实际可绕匝数(即

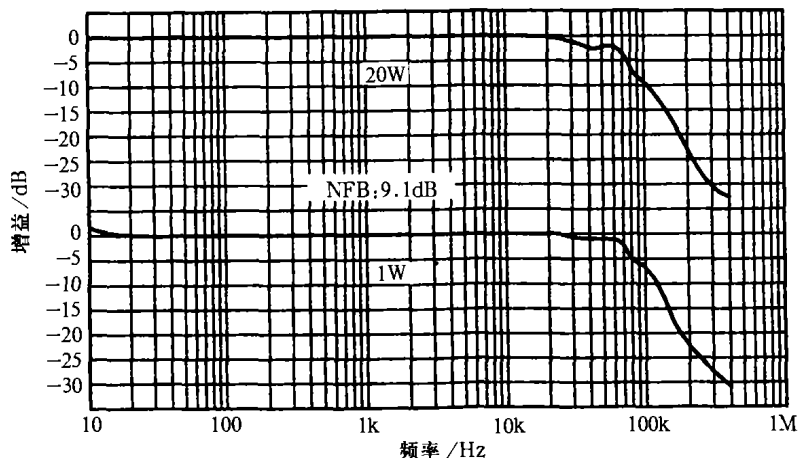


图 2 某功放频率响应特性图

功放中的频率响应范围是指该功放对高低频信号的放大能力,通常反映出放大器增益变化的不均匀度,并以dB表示。

在某功放频率响应特性图中,当输出功率为1W时,从低频段10Hz至高频段60kHz范围内,其放大器的增益变化为 $\pm 1.5\text{dB}$ 。

当输出功率为20W时,从低频段10Hz至高频段40kHz范围内,放大器的增益变化为 $-2.5\text{dB}$ 。

表 12 利用不含漆皮的铜线截面积  $S_{\text{总}} \leq k \cdot S_{\text{窗}}$  (绕得下) 来复核窗口是否绕得下的参数表 ( $S_{\text{总}} > k \cdot S_{\text{窗}}$  就绕不下)

主导线径(最多层数所用线径或两主要线径的平均值, mm)	主导漆包线层间绝缘纸厚度(单张, mm)	绝缘纸厚度与线径之比值 $\delta$ (主要参数)	绕得下应符合 $S_{\text{总}} \leq k \cdot S_{\text{窗}}$ , $k$ 值如下( $S_{\text{总}}$ 为裸线截面积总和, $S_{\text{窗}}$ 为铁心窗口面积, 均为 $\text{mm}^2$ )	骨架厚度约为 0.43mm 下	骨架厚度约为 0.8mm 下	骨架厚度为 1 或 $2 \times 0.4$ 下	牛型举例(133 片号当然适用)(窗口面积 = 窗宽 $\times$ 窗高)	备 注
0.8 ~ 0.53 均值 0.67	0.08	0.119 均值				0.3 ~ 0.308	50W $\times$ 2 功放电源牛	厚度偏向用线
0.31	0.08	0.258			0.258		Z11-114 铁心输出牛	含 4 层粗线绕组
0.22	0.05	0.227	0.27				Z11-96 铁心推动牛	均为同一 $\phi$ 0.22mm 线径
0.15	0.05	0.333	0.21				Z11-96、 Z11-76 铁心级间牛	同为 $\phi$ 0.15mm 线或含少量 $\phi$ 0.22mm 线径

使用说明: (1) 穿入骨架的芯子对应舌宽的尺寸为舌宽 + 0.5mm; (2) 线包绕完后连芯子夹以木板上台钳压 12 小时消去膨胀应力; (3) 决定  $k$  值时, 先算出绝缘纸厚度与线径比值  $\delta$ ,  $\delta$  值越小则  $k$  值越大, 再参看牛型酌定。

表 13 利用漆包线最大外径与绝缘材料、骨架厚度之总和  $c$  来复核窗口

主导线径或两主要线径(层数多者)的平均值(mm)	主导漆包线层间绝缘纸厚度(mm)	绝缘纸厚度与主导漆包线径之比值 $\delta$	窗口宽 $C$ (mm)	窗口高 $h$ (mm)	线包入窗的总厚度 (mm)	骨架、绝缘材料、最大线径总厚度 $c$ (mm)	$c/C$ 值	片号及牛型举例
0.8 及 0.53 均值 0.67	0.08	0.119 均值	19	57	18.2	16.754	0.8818	Z11-114 电源牛
0.31	0.08	0.258	19	57	18	16.142	0.854	Z11-114 输出牛
0.15	0.05	0.333	12.5	38	11.3	10.554	0.8443	Z11-76 级间牛
0.22	0.05	0.277	16	48	15.2	13.12	0.82	Z11-96 推动牛

使用说明: (1) 本表适用于骨架芯子宽度比铁心舌宽多 0.5mm 之情形, 若超出 0.5mm, 应将超出部分计入“骨架、绝缘材料、最大线径总厚度  $c$ ”项内; (2) 参看牛型与线径, 若总厚“ $c$ ”与窗宽“ $C$ ”的比值不大于表中  $c/C$  值, 窗口就可容下所有绕组(线包完工后均要连芯子一起夹以木板上台钳加压 12 小时消除膨胀应力)。若骨架芯子加工过于粗糙, 可将  $c/C$  值取少 2% (如 0.8818 改小为 0.86 等), 而若线包完工后不加压直接用, 则“窗口宽  $C$ ”要预先去掉 1~2mm, 然后将总厚  $c$  除以这预先去掉 1~2mm 后的可用窗宽, 再套用表中  $c/C$  值方为有效, 显然此时窗口浪费太多了; (3) 使用本表之前需据初步设计对各绕组预分层; (4) 若要快速决定, 由表所列比较, 显然, 推动牛、级间牛  $c/C$  值取 0.81 是放心的, 而输出牛与电源牛取 0.84 也是放心的(电源牛可略超出 0.84 即可)。

线包边缘要预留好空档), 再预分层(不管该层绕了多少匝, 均作“一层”计算), 最后按层数累计漆包线“最大外径”、绝缘材料厚度及骨架厚度等, 再参看“牛型”及“绝缘纸厚度与主导漆包线径之比值  $\delta$ ”, 决定所参照的  $c/C$  值。如遇电源变压器之类, 应取一次侧线径与高压绕组线径的平均值, 因两者均占有相当多层数。若先用表 12 速估, 再用表 13 细核, 该

是双保险了。

为了照顾并联推挽, 查表后初定  $\phi$  0.31mm 为一次侧线径。二次侧已定为  $2 \times 0.8$ , 那么据前第 7、8 项算出的初步匝数, 不含漆皮的铜线截面积  $S_{\text{总}}$  应为

$$S_{\text{总}} = (69 \times 2) \times 0.5027 + 1808 \times 0.07548 = 205.79 \quad (1)$$

$$\text{查表 12 选 } k \text{ 值为 } 0.258, \text{ 则 } k \cdot S_{\text{窗}} = 0.258 \times (19 \times 57) = 279.41 \quad (2)$$

比较(1)、(2)式,  $S_{\text{总}}$  小于  $kS_{\text{窗}}$  太多了, 窗口浪费太大, 而改用舌宽为 32mm、窗口为 16mm  $\times$  48mm 的 96 号片又容不下所有绕组, 那么要增加一、二次侧匝数了。仍然采用反推法, 不过要灵活一些了: 使用  $\phi$  0.8mm 双线并绕时每层可绕 29 匝, 三层为 87 匝, 为兼顾 P-P 3k 下的并联推挽, 将二次侧升为四段, 每段一层, 作 P-P 5.5k 使用时将一、二段并联

后再与三、四段串联,匝数仍为87匝;作P-P 3k使用时,全部串联为116匝。

(10) P-P 5.5k时一次侧总匝数

$$\text{从 } N_1/N_2=(Z_1 \eta / Z_2)^{1/2}=[(5500 \times 0.9) / 8]^{1/2}=24.87$$

得  $N_1=24.87$ ,  $N_2=24.87 \times 87=2164$  匝。

考虑到50W输出时  $\eta$  要略小于0.9,故针对50W再作补偿,即一次侧减少1%的匝数,故  $N_{1\text{实}}=2142$  匝。

(11) P-P 3k时一次侧总匝数

再看P-P 3k 并联推挽合适否。

$$N_1/N_2=[(Z_1 \eta) / Z_2]^{1/2}=[(3000 \times 0.9) / 8]^{1/2}=18.4$$

故  $N_1=18.4$ ,  $N_2=18.4 \times 116=2134$  匝 (P-P 3k)。

(12) 一次侧总匝数取值

2142与2134相比仅多8匝,8匝对2000多匝来说影响极微,可略去,取  $N_1=2134$  匝。

(13) 核算窗口面积

利用表12速核之,知  $S_{\text{总}}$  仍略小于  $k \cdot S_{\text{窗}}$ ,初步放心。

(14) 利用表13细核并对绕组试安排

窗宽57mm减去1mm窗口未来绝缘厚度,再减去中间隔带2mm,一次侧左右分段交叉,故每半实有27mm,再减去每半每层始末估留共5mm,故每半各层最终以22mm可绕宽度计算。查表理论上每cm可绕28.6匝( $\phi 0.31\text{mm}$ 线),那么分两半后每层按理可绕63匝,然据实绕还因种种原因达不到63匝。试将一次侧分两半左右各分5段排布,层数分别为4-4-4-3层,二次侧依上述分为4段每段一层,夹于一次侧

段与段之间。最后利用表13细核之,仍合,实绕时照顾排线,将  $N_1$  最终匝数定为2136匝,绕组分段及绝缘厚度见图9所示,二次侧各段首尾接至端子板刚巧方便了串并联。

(15) 试算电感

一次侧应有电感

$$L_1=Z_1/(\pi f_{\text{低}})=5500/(3.14 \times 20)=87.6\text{H} \cdots \cdots (\text{P-P } 5.5\text{k})$$

$$L_1'=Z_1'/(\pi f_{\text{低}})=3000/(3.14 \times 20)=47.8\text{H} \cdots \cdots (\text{P-P } 3\text{k})$$

引入导磁率验算的结果,使用Z11铁心时一次侧电感已远远超出87.6H,实测时上述输出牛低频可达10Hz左右了,而使用国产D42片子时可达25Hz左右。

(16) 检查最大漏电感

最大漏电感不应大于一次侧电感的1%。实践证明,通常只要一次侧分两半、左右各3段,二次侧分两段夹于一次侧段与段之间,  $L_s < 1\%$  就容易解决了。为了追求更高的目标我们才增加分段。好奇的读者可用漏感  $L_s$  的验算公式细算之。

$$L_s=[(1.26 l_0 N_1^2) / (10^8 h \cdot m^2)](\delta + H/3)$$

式中  $l_0$  为一次侧平均匝长(cm),  $N_1$  为一次侧匝数,  $h$  为实际绕线宽度(mm),  $m$  为一次侧分段数,  $\delta$  为一次侧层间绝缘厚度(mm),  $H$  为一、二次侧线圈厚度之和(含层间绝缘材料,但不含骨架厚度及外包封厚度),单位cm。

$l_0=2 \times (\text{舌宽} + \text{叠厚} + 4 \times \text{骨架厚度}) + 3.14 \times \text{一次侧线包厚度}$  式中单位一律为cm。

(17) 决定线径

使用96号片时一次侧线径对应50W输出为 $\phi 0.23\text{mm}$ ,使用

114号片时起码在 $\phi 0.25\text{mm}$ 以上,故均不用考虑铜线电阻对  $\eta$  的影响。这样一来问题变得简单了,不用去验算铜线电阻了。

(18) 更干脆的“反推法”

我们在前面辛辛苦苦设计出那输出牛一次侧为2136匝(5.5k、3k)。二次侧为87匝(5.5k/8 $\Omega$ )、116匝(3k/8 $\Omega$ )。若用最利落的  $N_1/N_2=(Z_1/Z_2)^{1/2}$  一套,理论上分别为82与110匝,前者加6%即为87,后者加5.5%即为116匝。我们在前面提及表11的22款输出牛时曾提醒大家,连众多的正规厂家都在用那  $N_1/N_2=(Z_1/Z_2)^{1/2}$  来决定相应匝数,我们为什么不用?现代高保真输出牛为了延伸低频,就得求取一次侧的大电感,因而采用比额定截面大得多的铁心截面来绕制,因此不存在窗口过剩问题或担心一次侧匝数过多问题。二次侧匝数的确定,对于50W以下且使用96号片铁心者,将理论数加8%~11%的补偿匝数即可;而对于114、133号片同时又在一次侧使用了 $\phi 0.27\text{mm}$ 以上粗线的50W输出牛或50W以上输出牛,将理论数加该数的3%~6%左右的补偿匝数也就解决问题了,不用去管什么  $\eta$  了。

于是设计变得更简单易行:采用功率截面1.5倍以上的铁心截面→将二次侧分3~4段尽可能排满绕线面一试→由二次侧初定匝数反推一次侧匝数→用表12粗核窗口,合则用,相距太远则试加减匝数至合适为止→用表13细核窗口→微调一次侧或二次侧匝数,使二次侧补偿的匝数占理论数的百分比合乎前述范围(一次侧用线细者多补,反之则少补)。

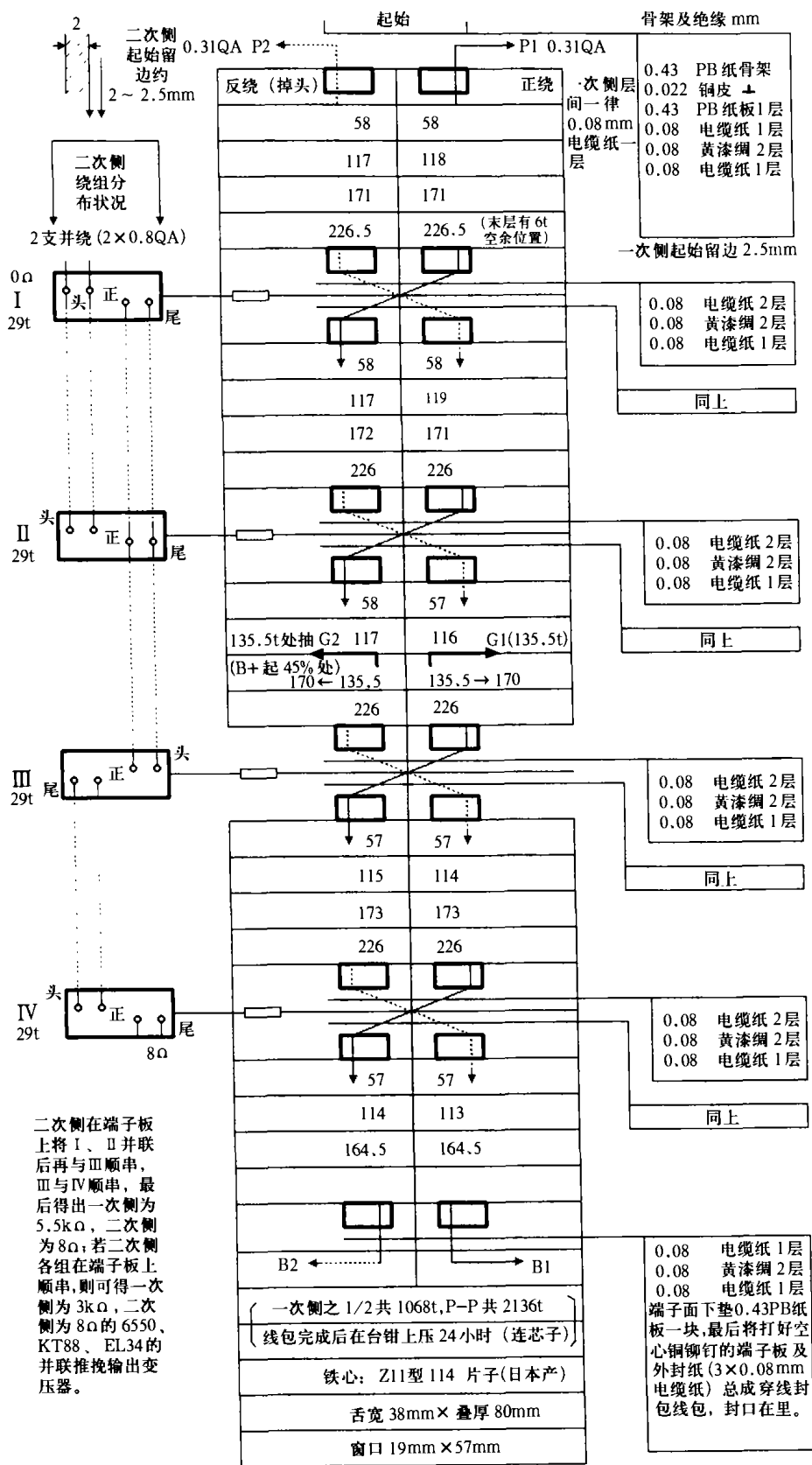


图 9 5.5k/3k 通用输出变压器绕制流程

### 八、铜线电阻复核问题

当担心铜线电阻  $r$  过大影响  $\eta$  时, 可用下述最大允许值复核公式复核 (一般不得超出计算值的 10%)。

$$\text{一次侧: } r_1 = Z_1 \times [(1 - \eta) / 2]$$

$$\text{二次侧: } r_2 = Z_2 \times [(1 - \eta) / 2\eta]$$

式中  $Z_1$  为一次侧阻抗,  $Z_2$  为二次侧阻抗,  $\eta$  为效率。

### 九、影响高保真的几个主要因素及应对办法

漏电感  $L_s$  (即不经过线包, 在铁心外面空气中自成闭合回路的漏磁通所产生的电感) 是高频 3kHz 以上失真的主因, 而一次侧电感不足则是低频 200Hz 以下失真的主因。由于漏电感及绕组分布电容的存在, 频率失真是不不可避免的, 我们的任务是使之减至最小。由上可知, 欲确保低频就要确保有足够的电感——使用优质铁心、增加匝数、加大铁心截面; 想保住高频就要减小漏感降低分布电容——在分段交叉、使用介电常数小的层间组间绝缘材料、适度控制一次侧匝数及铁心的体积、使用优质绝缘漆浸渍等工艺、材料上做文章。我们发现, 当中有些措施的实行会使低频高频之间产生顾此失彼的牵扯, 我们的智慧就在抓住主要矛盾, 采用改良的工艺去平衡它们。

### 十、变压器线包中各种材料所占铁心窗口宽度之百分比举例

初学者绕制线包时往往随意

超标使用材料,认为绝缘纸不就是一张纸,干吗要费神控制厚度, $\phi$  0.31mm 与  $\phi$  0.35mm 的漆包线何必计较,不就是小数点后第二位上差一点吗,何必那么认真。下面两例会使这些朋友了解线包是如何“出色工作”的(使用 Z11-114 铁心,窗口宽度为 19mm,所占的百分比即“占窗口宽度 19mm 的百分数”):

例 1 LDS508 电源牛

①骨架厚 0.942mm, 占 4.96%

②漆包线共厚 11.37mm, 占 59.84%

③绝缘材料 4.02mm, 占 21.16%

例 2 LDS445 输出牛

①骨架(含加强绝缘)厚 1.208mm, 占 6.33%

②漆包线共厚 10.09mm, 占 53.11%

③层、组、外封绝缘 4.92mm, 占 25.89%

两例说明,当中任一项如突破了,铁心最终会插不进线包。

### 十一、为何 96、114、133 三种片型成为胆牛最流行的实用片型

96、114、133 三种片型之舌宽分别为 32mm、38mm、44mm,窗宽分别为 16、19、22mm,相邻两者均差 3mm,在胆牛设计中常用到叠厚为 50mm、60mm、70mm、80mm、90mm 者。当用到这五种叠厚时,有一个有趣的规律:某片型下、某叠厚下的截面积,与比它叠厚少 10mm 的相邻那个较大舌宽之片型的截面积相差均为 0.2 ~ 1cm<sup>2</sup> 之间的一个不大数字,而相邻两者的窗宽仅差 3mm,当设计中

发现舌宽较小即窗口较小的那种铁心窗口容不下所有绕组时,可方便向相邻的较大号铁心靠拢,此时较大号铁心叠厚只需减少 1cm 左右即可。

而“换芯”后并不会出现太多的放空。反之,当发现大号数的铁心出现过多空白窗口时可向相邻小号方向铁心靠拢。记住只要将“小号芯”增加 1cm 左右叠厚即可,而此时“小号芯”一般也不会紧到容不下原先绕组的地步。

例如 114 片型舌宽 3.8cm × 叠厚 7cm = 26.6cm<sup>2</sup>, 133 片型舌宽 4.4cm × 叠厚 6cm = 26.4cm<sup>2</sup>,两者仅差 0.2cm<sup>2</sup>,而一般设计时截面积  $S_{总}$  会起码稍大些的,所以只要 ± 1cm 叠厚而其他数据不用改动就可很好实现互换,最终变压器体积在变动前后也不会很大,给工艺控制带来很大方便。

### 十二、单管输出牛及扼流圈的空气隙计算与控制

如果选用仅能保证额定输出功率的普通铁心截面设计单管输出牛,忧虑甚多,不得不引入业余玩家头痛的一些术语理念。好在今天我们有经济实力选用优质宽裕截面铁心,所用线径也可合理加大。实践证明,只要不是苛求到无以复加的数十万元市值单管输出胆机,单管输出牛的快捷设计,仍然可以沿用前述方法,只是要注意因为要防止磁饱和而不得不留空气隙,相同截面下其电感会较推挽牛大大下降,所以要大大加大铁心截面来解决,在此,为了避免铁心尺寸过分膨胀引发的新问题,选用最上等的硅钢片只能是唯一的出路。

空气隙  $l_g = (N_1 I_1) / 800$ , 式中  $N_1$  为一次侧匝数或扼流圈匝数,  $I_1$  为屏流或通过扼流圈的总电流 A,  $l_g$  单位为 mm, 使用 EI 铁心时得出的结果还应除以 2。为了较精确控制气隙尺寸,可用绕线包所用的纸、膜等有厚度的绝缘材料单张或叠加凑足气隙尺寸厚度置入使用。

### 十三、关于 C 型铁心

C 型铁心之磁通走向与其晶格排列方向一致,虽为同种硅钢片, B 值却可比 EI 型取得较高,截面到一定数值后,同样截面下所能设计的功率竟可比 EI 型高出几倍,但据笔者实践此种铁心做输出牛比不上 EI 型,从国外大多数名机无一例外地选择了 EI 型也证明这一点,在此就不再赘述了,读者可参考有关书籍。

万事开头难,破除迷信、及早尝试,胆牛的设计就不难。敢于对胆牛小试牛刀,其他类型的变压器如机床变压器、收录机变压器、整流变压器、广播线路间变压器、互感器、电焊变压器、晶体管电路相关变压器、投影机变压器等就都一通百通了。当你有了第一只电源牛、第一只输出牛作参照后,你就取得了铁心窗口运用的经验,不要忘了将所有设计、绕制数据详尽记录在档。利用你汗水换来的这些参考数据,下次遇到不同线径或匝数段数时,你只要循迹加减,复核工作就变得简单而轻松。胆牛好坏最终靠耳朵验收。建议试制时在输出牛的二次侧多抽两个头(在原设计基础上加减 2 ~ 3 匝),以便微调试听得出特佳匝数。