

低频变压器设计

(E)

××0.052.003

E	××0.052.003	P1/16	P121-138
实例1/2	××4.731.I90/01~02	P1/5	P140-152
3	××4.731.004(1W双频带录音机)	P1/7	
4	××4.731.D90/06	P1/1	
E	××0.052.003+实例1-4	1-30	P121-152

编著：姚文生 2006年1月 上饶

摘要:本文通过对低频变压器的一般分析,着重介绍了最常碰到的电阻性负载的低频变压器的具体设计方法,并有具体例子加以说明。

低频变压器是接在低频放大器的输入端,输出端或级间的偶合元件,由于低频变压器在线路所处的位置不同,故又有输入变压器,输出变压器,级间变压器之分,其常见的工作频段是50赫到20000赫。

利用变压器偶合比较阻容偶合有其独特之处,可以利用它来变换电压,以致改变电压增益,便于阻抗匹配,所需屏极电源较低,同时,适用推挽功率输出,而没有倒相关系。其不足之处是频响比较不均匀,其漏磁场对线路有干扰,同时体积大而重,成本较高。对低频变压器的基本要求是最有利的阻抗匹配,大的电压增益及输出功率,在整个通频带内,失真小,外界的杂音干扰小等。

一、频率特性(纯电阻负载)

众所周知,与发生器和负载连接的低频变压器的一般等效电路如图 I 所示。低频域下,由于分布参数($L_s \cdot C'_{TP}$)影响很小,可以忽略它的影响其等效电路如图 I_a所示。在频率不太高时,分布参数仍可忽略不计,同时在中频时,初级线圈感抗 $X_{L1} = \omega L_1$ 已相当大,因此并联支路 L_1 可以看作是开路的情况,图 I_b是中频时简化等效电路。高频下,并联支路 L_1 可以看作开路,而漏感的影响则不能忽略,因此,可以得到如图 I_c所示的高频域的简化等效电路。

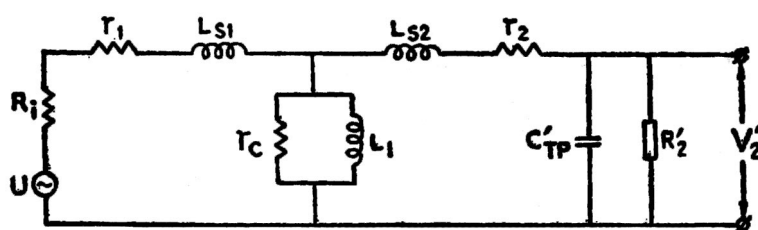


图 I 连接发生器和负载的低频变压器的一般等效电路

实际上, 电阻性负载的低频变压器, 其电容的影响(C'_{TP})是可以忽略的, 而且电源内阻抗为纯电阻 R_i 。

变压器电阻性负载的判断条件是: $R_2 \leq \frac{1}{3\omega'_B C'_{TP}} = \frac{1}{20f_B C'_{TP}}$

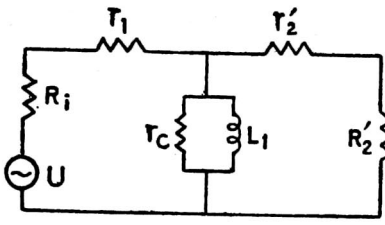


图 I_a 低频域等效电路

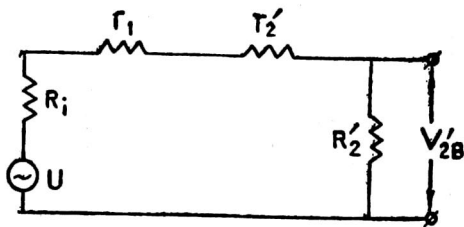


图 I_B 中频域等效电路

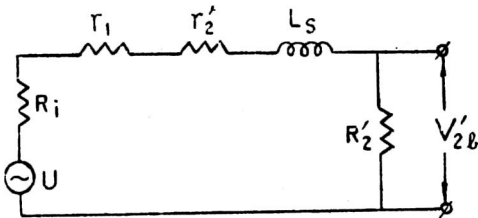


图 I_c 高频域等效电路

R_i —电源内电阻

r_e —变压器铁芯损耗的等效电阻

r_1 —变压器初级线圈的电组

L_1 —变压器初级线圈的电感

L_{s1} —变压器初级线圈的漏感

r'_2 —折算到初级的变压器次级线圈的电阻, 且 $r'_2 = \frac{1}{n^2} R_2$

L'_{s2} —折算到初级的变压器次级线圈的漏感, 且 $L'_{s2} = \frac{1}{n^2} L_{s2}$

C'_{TP} —折算到初级的变压器的固有电容, 且 $C'_{TP} = n^2 C_{TP}$

R'_2 —折算到初级的变压器负载电阻, 且 $R'_2 = \frac{1}{n^2} R_2$

图 I_c 中, $L_s = L_{s1} + L'_{s2} = L_{s1} + \frac{1}{n^2} L_{s2}$ 这里匝比为 $n = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2}$

(一) 低频域(图 I_a)

将图 I_a 等效电路改变表示方法, 如图 II_a II_b 所示

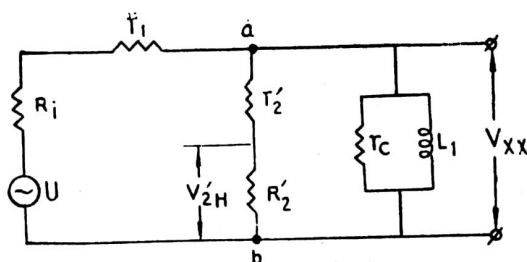


图 II a

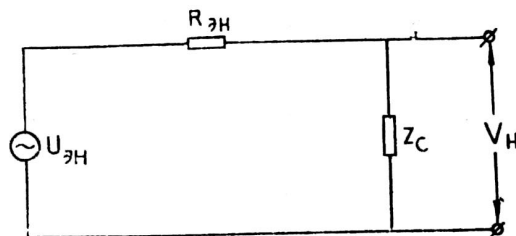


图 II b

从图 II_a 得知, ab 端开路电流, 开路电压为

$$I_{k0} = \frac{U}{R_i + r_1 + r'_2 + R'_2} \quad U_{xx} = \frac{U}{R_i + r_1 + r'_2 + R'_2} (r'_2 + R'_2)$$

∴ 等效的电源内阻为:

$$R_{\text{эH}} = \frac{U(r'_2 + R'_2)}{R_i + r_1 + r'_2 + R'_2} \Big/ \frac{U(r'_2 + R'_2)}{R_i + r_1 + r'_2 + R'_2} = \frac{(R_i + r_1)(r'_2 + R'_2)}{R_i + r_1 + r'_2 + R'_2}$$

令输入阻抗(亦即为电子管的板极负载):

$$R_{a\sim} = r_1 + r'_2 + R'_2 \quad \text{则 } R_{\text{эH}} = \frac{(R_i + r_1)(r'_2 + R'_2)}{R_i + r_1 + r'_2 + R'_2} \quad (1)$$

∴ 图 II_b 与图 II_a 是等效的, 则有

$$U_{\text{эH}} = U_{\text{эH}} + U_{\text{эH}} = U_{\text{эH}} - j U_{\text{эH}} \quad (2)$$

$$\text{相对的放大系数为 } y = \frac{U_{\text{эH}}}{U_{\text{эH}}} = \frac{U_{\text{эH}} \times Z_c / U_{\text{эH}}}{U_{\text{эH}}} = \frac{Z_c}{U_{\text{эH}}} \quad (3)$$

$$\therefore \text{相对的失真系数为 } M = \frac{U_{\text{эH}}}{U_{\text{эH}}} = 1 + \frac{U_{\text{эH}}}{U_{\text{эH}}} \quad (4)$$

将(2)代入(4)得

$$M = 1 + R_{\text{эH}} \left(\frac{U_{\text{эH}}}{U_{\text{эH}}} - j \frac{U_{\text{эH}}}{U_{\text{эH}}} \right) = (1 + R_{\text{эH}}) - j R_{\text{эH}}$$

则低频失真系数的模为

$$|M_H| = \sqrt{\left(1 + \frac{R_{\text{эH}}}{r_c}\right)^2 + \left(\frac{R_{\text{эH}}}{\omega L_1}\right)^2} = \sqrt{\left(1 + \frac{R_{\text{эH}}}{\omega L_1 Q_c}\right)^2 + \left(\frac{R_{\text{эH}}}{\omega L_1}\right)^2}$$

式中: $Q_c =$

$\text{Error!} = \text{ctg} \psi_c$, 为铁芯的质量因数, 它在数值上, 等于变压器开路电流的损耗角的

余切。在小磁密和低频率的条件下, 低频变压器中所用磁性材料的 Q_c 值远大于1。

在工作频带中 Error! 的比值很小, 因此, Error! 的比值更小, 小到常常可以忽略不计, 故

$$|M_H| = \sqrt{\left(1 + \frac{R_{gH}}{\omega L_1}\right)^2} = \sqrt{1 + \left(\frac{0.159 R_{gH}}{f \bullet L_1}\right)^2} \quad (5)$$

根据最低的工作频率 f_H 时的频率失真系数 M_H , 从(5)可得到变压器

初级线圈所必需的最低电感的计算式:

$$L_1 = \frac{R_{gH}}{\omega_H \sqrt{M_H^2 - 1}} = \frac{0.159 R_{gH}}{f_H \sqrt{M_H^2 - 1}} \quad (6)$$

这里需作 $M_H = 10^{\frac{M_{db}}{20}}$ 换算, 再代入之。

(二)中频域

从图 I_b 得知, 中频时负载上的电压为:

$$V'_{20} = \text{Error!} \times R'_2 = \text{Error!} \times U$$

∴中频时的失真系数为

$$M_o = \text{Error!} = \text{Error!} \quad (7)$$

(三)高频域

从图 I_c 得知, 高频时负载上的电压:

$$U'_{20} = \text{Error!} \times R'_2$$

∴高频失真系数为

$$M_B = \frac{V'_{20}}{V_{2b}} = \frac{R'_2}{R_i + R_{a \sim}} \times U / \text{Error!} \times R'_2 = 1 + j \text{Error!}$$

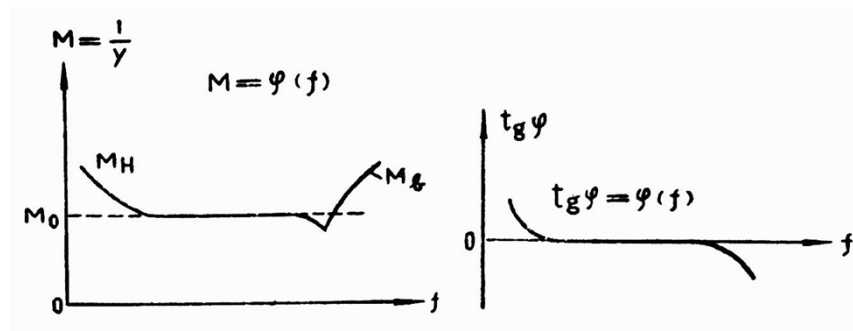
取其模数

$$|M_B| = \sqrt{1 + \left(\frac{\omega B L_S}{R_i + R_{a \sim}}\right)^2} = \sqrt{1 + \left(\frac{6.28 f_B \bullet L_S}{R_i + R_{a \sim}}\right)^2} \quad (8)$$

可见, 影响高频特性的主要是漏感, 由(8)式可得, 满足一定的高频

失真系数 M_b 的漏感为 $L_S = \sqrt{M_b^2 - 1}$ (9)

从(5)、(7)、(8)式, 可见频率特性如图Ⅲ_a所示低频时, 随 $f \downarrow$, 而 $M_H \uparrow$, 与频率无关高频时, 亦随 $f \uparrow$, 而 M_b 同样 \uparrow , 从(6), (9)式, 可见, 增大初级电感量 L_1 减少漏感 L_S 可以展宽频带, 这可通过初级匝数 W_1 和改变绕组结构形式来达到。输出电压和信号电源电势之间的相位移与频率的关系曲线



图Ⅲa 频率特性曲线

图Ⅲb 相位特性曲线

如图Ⅲ_b所示($\therefore -\text{tg} \psi_H = \text{tg} \psi_B$)

由于在电声仪器中, 相位失真关系不大, \therefore 在这类仪器中的低频变压器, 其相位特性常常不考虑。而非线性失真通常是用谐波系数 γ 来表征。当在系统的输入端加入正弦电势时, 谐波系数是由高次谐波的电流或电压的有效值与基频电流或电压的有效值之比来确定:

$$\gamma = \sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots} = \sqrt{\frac{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \dots}{U_1}}$$

二、绕组电阻 r_1, r'_2 的计算

(一)初、次级电阻的最佳比 $b =$

高频时, L_1 支路的并联阻抗很大, 相当开路, 这时铁芯中的磁密也降到很低的数值, \therefore 铁芯损耗实际上可以不考虑, 故低频变压器的损耗可看为只是铜耗, 则

$$P = P_M = I_1^2 r_1 + I_2^2 r_2$$

(10)

令初、次级绕组每匝长度相等 $l_{01} = l_{02} = l_0$, 则初、次级电阻为

$$r_1 = \rho_0 \frac{l_1}{S_{M1}} \quad r_2 = \rho_0 \frac{l_2}{S_{M2}} \quad (11)$$

这里: W_1, S_{M1} 与 W_2, S_{M2} 为初、次级绕组匝数和导线截面积,

ρ_0 为绕组导线的电阻率 \therefore 导线体积为 导线总体积为

$$V_1 = S_{M1} \cdot l_1 W_1 \quad V_2 = S_{M2} \cdot l_2 W_2 \quad V_0 = V_1 + V_2$$

$$\therefore r_1 = \rho_0 \frac{l_1^2 W_1^2}{V_1} \quad r_2 = \rho_0 \frac{l_2^2 W_2^2}{V_2}$$

故电阻的最佳比, 即为体积比

$$b = \frac{r'_2}{r_1} = \frac{r_2}{n^2 r_1} = \frac{(\rho_0 \frac{l_2^2 W_2^2}{V_2})}{\rho_0 \frac{l_1^2 W_1^2}{V_1}} = \frac{V_1}{n^2 V_2} \quad (12)$$

利用 $n = \frac{W_1}{W_2} = \frac{V_1}{V_2}$ 关系, 代入(10)式, 则

$$\begin{aligned} P_M &= I_1^2 r_1 + I_2^2 r_2 = n^2 \cdot I_2^2 \left(\rho_0 \frac{l_1^2 W_1^2}{V_1} \right) \\ &= I_2^2 \rho_0 l_1^2 W_1^2 \left(\frac{V_1}{V_2} + \frac{V_1}{V_2} \right) = I_2^2 \rho_0 l_1^2 W_1^2 \left(\frac{V_0}{V_0 + V_2 - V_2} \right) \end{aligned} \quad (13)$$

对(13)式, 求微商, 并令微商等于零

$\frac{dP_M}{dV_2} = 0$ 即可求得功率损耗最小时, 所需的最佳材料的体积即为总体积的一半

$$U_2 = \frac{V_2}{V_0 + V_2 - V_2} U_0 \quad \therefore U_1 = U_0 - U_2 = \frac{V_0 + V_2 - V_2}{V_0 + V_2 - V_2} U_0$$

\therefore 电阻最佳比 $b = \frac{r_2}{r_1} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_0 + V_2 - V_2}{V_0 + V_2 - V_2} = 1$

(14)

这表明使功率损耗最小而获得最高的效率时, 则必须使初级线圈的等值电

阻等于折算到初级的变压器次级线圈的电阻, 即 $r_1 = r'_2$

(二) 初、次级电阻 $r_1 \cdot r'_2$ 的计算

根据中频等值电路(图 I bb), 从 ab 端向左看, 输入匹配良好时, 则有

$$R_i = R_{BX} = r_1 + r'_2 + R'_2 = R_{a\sim}$$

这时, 输入功率, 输出功率为

$$P_1 = I^2 (r_1 + r'_2 + R'_2) \quad P_2 = I^2 R'_2$$

式中: $I = \frac{U}{R_i}$

\therefore 效率为

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{R'_2}{r_1 + r'_2 + R'_2} = \frac{R'_2}{R_{a\sim}}$$

考虑获得最高效率的最佳比 $b = \frac{r_2}{r_1} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_0 + V_2 - V_2}{V_0 + V_2 - V_2} = 1$

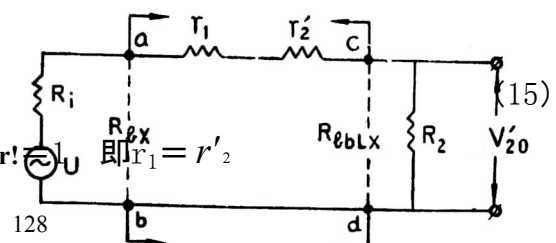


图 I bb

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{2r_1}{R'_2}} \quad (16)$$

∴在甲类工作时, 根据(16)、(15)式, 可得初、次级电阻为

$$r_1 = r'_2 = R'_2 \eta = 0.5R_{a\sim}(1-\eta) \quad (17)$$

$$r_2 = R_2 \eta \quad (18)$$

对作功率输出的乙类推挽工作的变压器, 则有(单臂)

$$r_{1n} = \eta r_1 = 0.586 R'_2 (\eta) = 0.586 R_{a\sim}(1-\eta) \quad (19)$$

$$r_2 = 0.414 R_2 (\eta) \quad (20)$$

三、变换系数的确定

(一)在给定一定的输入阻抗时;

从图I_{bb}不难看出, 阻性负载变压器的输入阻抗在中频域等于从ab端

往右的电路的电阻:

$$R_{BX} = R_{a\sim} = r_1 + r'_2 + R'_2 = \eta R_{a\sim} = \eta R_{BX}$$

∴很容易求得变换系数

$$n = \sqrt{\frac{R_2}{\eta \cdot R_{a\sim}}} \quad (21)$$

(二)在给定一定的输出阻抗时

从图I_{bb}亦不难看出, 输出阻抗等于从CD端往左的电阻

$$\therefore R_{b\sim X} = R_2$$

$$\text{则 } R'_2 = \eta R_{BX} = \eta R_{BX} = R_i + r_1 + r'_2$$

$$\therefore R_{b\sim X} = n^2 (R_i + r_1 + r'_2) = n^2 (R_i + 2r_1)$$

$$= n^2 \cdot R_i + n^2 [R'_2 (\eta)]^*$$

$$= n^2 \cdot R_i + R_2 (\eta)$$

※这是假定按甲类工作状态计算。

$$\therefore \text{变换系数为 } n = \sqrt{\frac{(R_{b\sim X} + R_2) \eta - R_2}{\eta \cdot R_i}} = \sqrt{\frac{(2\eta - 1)R_2}{\eta \cdot R_i}} \quad (22)$$

(三)一般情况下, 同时使输入端与输出端全匹配, 是很难办到的, 只有当

1. 变压器输出端负载是三极管时, 且负荷系数 $\gamma = \eta = 2$ 时;

2. 没有铜耗 $P_M=0$ 即 $r_1=r_2=0$ 时

全匹配才是可能的。

四、低频变压器的结构计算

为了便于说明低频变压器的计算起见, 现以电源为电阻性, 负载为电阻性的变压器的计算程序及计算公式, 列成表格如下, 表中所引用公式均按甲类工作情况, 其他情况, 则于备注栏内注明。

(一)电参数计算

变压器的电参数计算是根据给定的工作线路参数, 包括电源及负载电阻, 输出功率, 工作频段, 频率失真系数, 电路的电流、电压及放大器的工作类型等来进行计算的。

计算顺序	项目名称	引用公式及数据	备 注
*1	效 率	按表1选择	有时已给定效率, 则不必按表1选择
*2	输入功率	$P = \text{Error!}$	
3	变 比	$(1) n = \sqrt{\frac{R_2}{\eta R_{a\sim}}}$ $(2) n = \sqrt{\frac{(2\eta-1)R_2}{\eta \bullet R_i}}$	(1) 按输入阻抗匹配情况计算 (2) 按输出阻抗匹配情况计算
*4	输入阻抗	$R_{BX} = R_{a\sim} = \text{Error!}$	最佳板极负载 $R_{a\sim}$ 和内阻 R_i 常常已给出或者查手册可得到
5	线圈电阻	$r_1 = 0.5 R_{a\sim} (1 - \eta)$ $r_2 = 0.5 R_2 (\text{Error!})$	L类工作的变压器: (单臂) $r_{1n} = 0.586 R_{a\sim n} (1 - \eta)$ $r_2 = 0.414 R_2 (\text{Error!})$
6	低频时等效电源内阻	$R_{\ominus H} = \text{Error!}$	当 $r_1 \leq R_i$ 时, 则简化为 $R_{\ominus H} = \text{Error!} = \frac{R_{a\sim} - r_1}{1 + \frac{R_{a\sim}}{R_i}}$
7	初级线圈电感量	$L_1 = \frac{0.159 R_{\ominus H}}{f_H \sqrt{M_H^2 - 1}}$	*假定: $\text{Error!} = 1\% \approx 0.01$
8	初级线圈允许的漏	$L_s \leq \text{Error!} \sqrt{M_B^2 - 1}$	

	感		
9	漏感系数	$\delta = \text{Error!}$	检查变压器结构的可能性当 $\delta = 0.007 - 0.015$ 时, 变压器结构最简单
*10	初级线圈的时间常数	$\tau = \text{Error!}$	

*不是必须计算的项目(下同)

(二)铁心结构计算

通常根据标准形式铁芯来确定铁芯尺寸的。

计算顺序	项目名称	引用公式及数据	备 注
11	铁芯的时间常数	$\tau_c \geq 2\tau_1$	乙类工作时, $\tau_c \geq 1.707\tau_1$
12	铁芯材料的选择		根据最轻重量, 最小体积和最低价格及变压器的功率来确定
13	导磁系数	(1) 无直流时, 取材料的起始导磁率 μ_0 (2) 有直流磁化时, 根据 $L I_0^2 - \mu_{0H}$ 曲线, 查得最佳气隙时的起始有效导磁系数 $\mu_{0\Delta H}$ (图一)	$\mu_{0\Delta H}$ 为暂定值 匝数计算后修正
14	铁芯选择	根据结构常数 $A = \text{Error!}$ 选择	μ 按不同情况而定, 从铁芯数据表中可得到 I_c, S_M, S_c, I_0
15	非磁性气隙长	$I_z = \text{Error!}$	Z值由 $(\alpha\omega_0) - Z$ 曲线查得(图二)
16	最大磁感应密度	$B_M = \text{Error!} \sqrt{\frac{P_{I_0}}{S_M \cdot (1 - \eta)}}$	

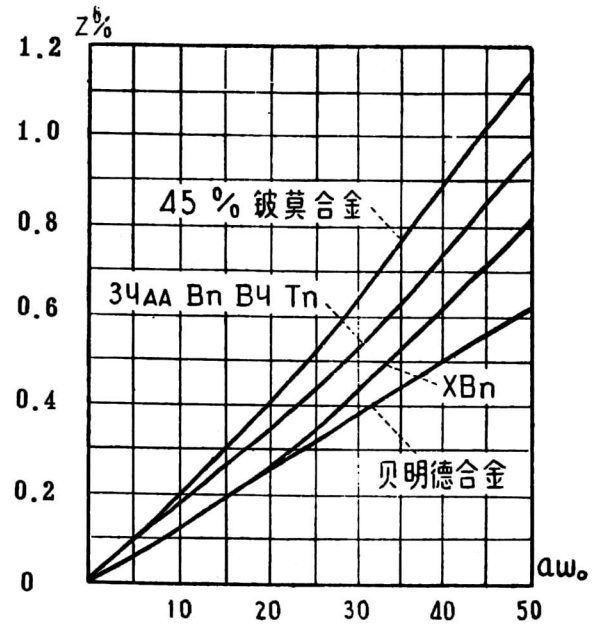
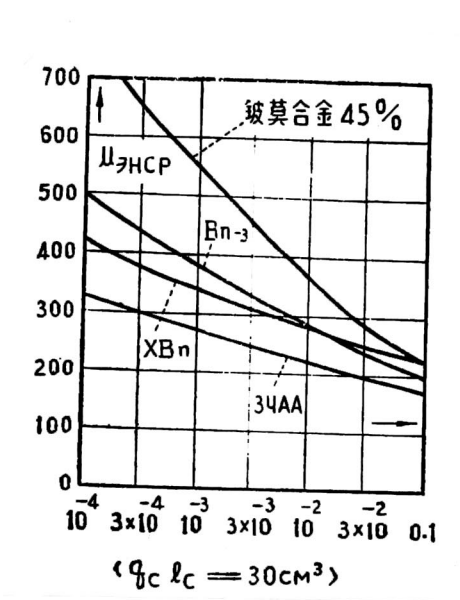
(三)线圈结构计算

计算顺序	项目名称	引用公式及数据	备 注
17	初级线圈匝数	$W_1 = 8920 \sqrt{\frac{L_1 \cdot I_c}{\eta \cdot S_c}}$	μ 按“13”选择
18	直流磁压力	$\alpha W_0 = \text{Error!}$	

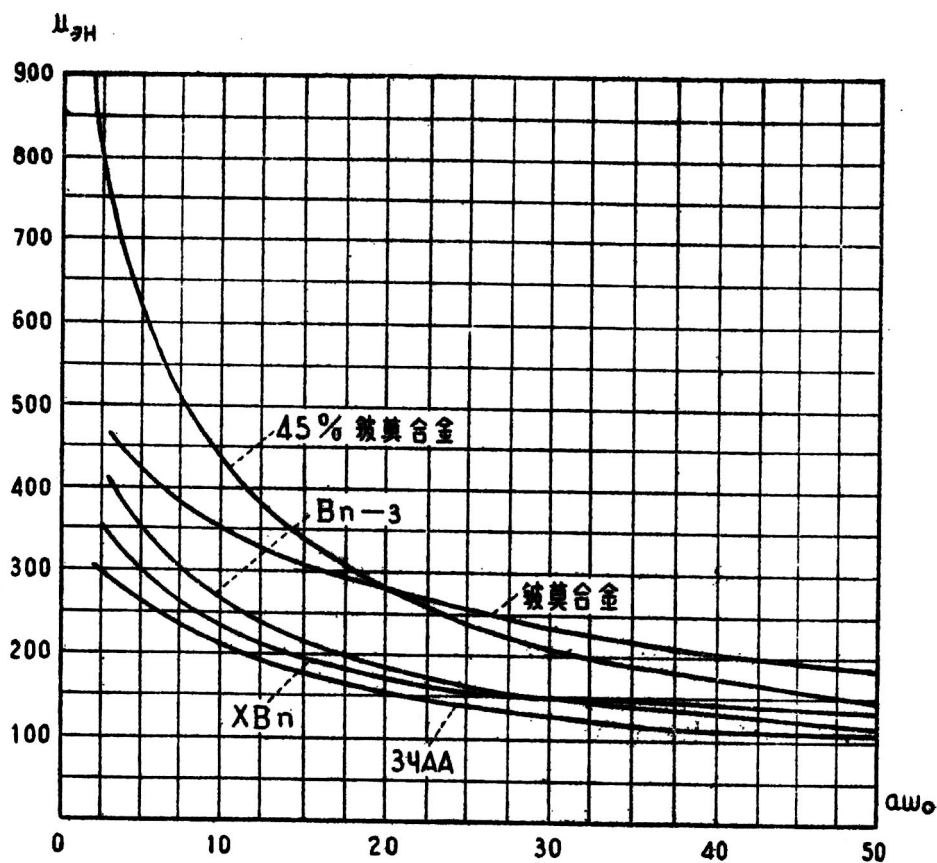
19	初级线圈正确匝数	$W_1 = 8920 \sqrt{\frac{L_1 \cdot I_c}{\eta_{SH} \cdot S_c}}$	μ_{oH} 由 $(\alpha W_0) - \mu_{oH}$ 曲线查得 (图三)
20	次级线圈匝数	$W_2 = n W_1$	
21	线圈导线长度	$I_1 = I_0 \cdot W_1 \times 10^{-3}; I_2 = I_0 \cdot W_2 \times 10^{-3}$	
22	导线线径	$d_1 = 0.15 \sqrt{\frac{I_1}{r_1}}; d_2 = 0.15 \sqrt{\frac{I_2}{r_2}}$	
23	(1) 线圈绝缘选择。 (2) 线圈配置计算。 (3) 考核铁心窗口余量。与一般电源变压器计算相同。		
24	考核阻抗匹配情况	$R_{a\sim} = r_1 + r'_2 + R'_2$	与要求的 $R_{a\sim}$ 比较, 误差在 $\pm 15\%$ 内, 即可保证一定的输出功率

(四) 计算图表

变 压 器 的 种 类 和 功 率	效 率	
	连续工作	继续工作
1W以下的小功率输入, 级间变压器	0.6—0.75	0.6—0.75
1W以下的输出变压器	0.7—0.80	0.6—0.75
功率1—10瓦的输出变压器	0.75—0.85	0.7—0.8
功率10—100瓦输出变压器	0.84—0.93	0.75—0.85
功率100—1000瓦输出变压器	0.92—0.96	0.8—0.85



(图一) 几种材料的 $\mu_{\text{eff}}-LI^2_0$ 曲线 (图二) 在 B_m 很小时, 最佳空隙曲线($l_z=\text{Error!}$)



(图三) 最佳气隙时, 等效起始导磁率的平均曲线

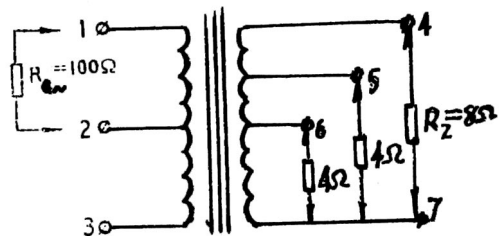
五、具体计算例子

输出变压器××S4. 731. C90/03

(一) 任务:

1. 输出功率: 总发 $P_{4-7}=2\text{W}$, 总收 $P_{5-7}=1.5\text{W}$, 单收 $P_{6-7}=1.2\text{W}$ 。

2. 甲L类推挽工作, 更近于L类工作, 有 $I_C=30\text{mA}$ 的直流。



3. $R_{4-7}=8\Omega$ (接扬声器), $P_{5-7}=4\Omega$, 总机输出设计按 8Ω 进行, 这时电路工作状态在1-2端呈现 100Ω 的阻抗, 效率 $\eta=0.8$, $R_{6-7}=4\Omega$, 这时在1-2端呈现 150Ω 的阻抗, 效率 $\eta=0.8$

4. 工作频段 $\Delta f=300-4000$ 赫, 并要求:

(1) ∵晶体管的输出阻抗 Z_{BbX} 比负载阻抗大得多, ∴晶体管的 Z_{BbX} 可以忽略,

∴计算时, 对 L_5 不作要求, 即对高频响应不作要求; 2) $M_H=M_B=\pm 0.5\text{db}$

5. 用途: 为××课题的总机发送, 总机接收, 单机接收的输出变压器。

(二) 计算:

$$1. \text{变比: } n_{1n} = \sqrt{\frac{R_{2n}}{\eta \cdot R_{a \sim n}}} = \sqrt{\frac{8}{0.8 \times 100}} = 0.316 \quad n_1 = 0.16$$

$$n_{2n} = \sqrt{\frac{4}{0.8 \times 100}} = 0.224 \quad n_2 = 0.112$$

$$n_{3n} = \sqrt{\frac{4}{0.8 \times 150}} = 0.183 \quad n_3 = 0.091$$

$$2. \text{电阻 (1) } r_{1n} = 0.586 R_{a \sim n} (1 - \eta) = 0.586 \times 100 (1 - 0.8) = 11.75 \quad r_1 = 23.5 \quad (\Omega)$$

$$(2) r_{1n} = 0.586 \times 150 \times (1 - 0.8) = 17.6; \quad r_1 = 35.2 \quad (\Omega)$$

$$(3) r_{4-7} = 0.414 R_2 (\text{Error!}) = 0.414 \times 8 \times \text{Error!} = 0.828 \quad (\Omega)$$

$$r_{5-7} = r_{6-7} = 0.414 \times 4 \times \text{Error!} = 0.414$$

3. 等效电源内阻 R_{Hn} 与初级电感 L_1

∴晶体管的输出阻抗 Z_{BbX} 很大, 即 $R_i \geq r_1$ 则

$$(1) R_{\text{Hn}} = \frac{R_{a \sim n} - r_{1n}}{1 + \frac{R_{a \sim n}^*}{R_i}} = \text{Error!} = 88 \quad (\Omega)$$

$$L_{1n} = \frac{0.159 \times 88}{300 \sqrt{1.06^2 - 1}} = 0.135 \quad L_1 = 4 \times 0.135 = 0.54 \quad (\text{h})$$

$$(2) R_{\text{Hn}} = \frac{R_{a \sim n} - r_{1n}}{1 + \frac{R_{a \sim n}^*}{R_i}} = 150 - 17.6 / 1 + 0.01 \text{Error!} = 130$$

(Ω)

$$L_{1n} = \frac{0.159 \times 130}{300 \sqrt{1.06^2 - 1}} = 0.2 \quad L_1 = 4 \times 0.2 = 0.8 \quad (\text{h})$$

$$\therefore M_H = \text{Error!} = 1.06 \quad \text{且假定 } \text{Error!} = 0.01$$

按第(2)种情况选铁芯, 则结构常数为

$$A_2 = 7.3 \times 10^{-5}$$

查铁芯表NE0.666.000, 采用E10×10铁芯计算, 得铁芯有关数据:

$$S_C = 0.9 \text{ cm}^2; I_C = 8.5 \text{ cm}; S_M = 0.625 \text{ cm}^2; I_O = 7.5 \text{ cm};$$

4. 匝数:

$$W_{1-2} = 8920 \sqrt{\frac{L_{1n} \times I_c}{\mu \times S_c}} = 8920 \sqrt{\frac{0.135 \times 8.5}{450 \times 0.9}} = 480 \quad (\text{t})$$

$$\text{这里 } \mu = 450 \quad (\text{At/cm})$$

查表 μ 下降不大, 仍取 $\mu = 450$ 进行计算

$$W_{1-3} = 2 \times 480 \quad W_{4-7} = 0.316 \times 480 = 150 \quad (\text{匝})$$

$$W_{5-7} = 0.224 \times 480 = 108 \quad W_{6-7} = 0.183 \times 480 = 88$$

5. 导线长:

$$I_{1-3} = 7.5 \times 2 \times 480 \times 10^{-2} = 73.5 \quad (\text{M})$$

$$I_{4-7} = 7.5 \times 150 \times 10^{-2} = 11 \quad I_{4-5} = 7.5 \times 42 \times 10^{-2} = 3.2$$

$$I_{5-7} = 7.5 \times 108 \times 10^{-2} = 8.1 \quad I_{5-6} = 7.5 \times 20 \times 10^{-2} = 1.5$$

$$I_{6-7} = 7.5 \times 88 \times 10^{-2} = 6.6$$

6. 线径:

$$d_{1-3} = 0.15 \sqrt{\frac{I_{1-3}}{r_1}} = 0.15 \sqrt{\frac{73.5}{23.5}} = 0.258$$

(m/m)

$$d_{4-5} = 0.15 \sqrt{\frac{3.2}{(0.828 - 0.44)}} = 0.424$$

$$d_{5-7} = 0.15 \sqrt{\frac{8.1}{0.414}} = 0.665 \quad d_{6-7} = d_{5-7}$$

$$\text{选标准线径: } d_{1-3} = 0.25 (0.275) \text{ m/m}; \quad \rho_{1-3} = 357 \quad (\Omega/\text{km})$$

$$d_{4-5} = 0.41 (0.45); \quad \rho_{4-5} = 133.3$$

$$d_{5-7} = 0.64 (0.69); \quad \rho_{5-7} = 54.5$$

7. 每层匝数:

$$n_{1-3} = \text{Error!} = 35 \quad \text{*双股并绕} \quad (\text{匝/层})$$

$$n_{4-5} = \text{Error!} = 42 \quad n_{6-7} = \text{Error!} = 27$$

8. 层数:

$$N_{1-3} = \text{Error!} = 14; \quad N_{4-5} = \text{Error!} = 1; \quad N_{5-7} = \text{Error!} = 4 \quad (\text{层})$$

9. 线包厚与骨架, 绝缘物厚:

$$A_{1-3} = 14 \times 0.275 \times 1.05 + 13 \times 0.01 = 4.05 + 0.13 = 4.18 \quad (\text{m/m})$$

$$A_{4-5} = 0.45$$

$$A_{5-7} = 4 \times 0.69 \times 1.08 + 3 \times 0.022 = 2.98 + 0.066 = 3.05$$

$$\sum(\beta_r + \beta_{ji}) = 1 + 2 \times 0.05 + 2 \times 0.05 + 2 \times 0.12 = 1.44$$

10. 线包总厚与窗口余量

$$(1) A_k = \sum A_i + \sum(\beta_r + \beta_{ji}) = 8.06 + 1.44 = 9.5 \quad (\text{m/m})$$

$$(2) \beta_0 = 10 - (9.5 + 0.2) = 0.3 \quad \text{所选铁芯可以容下}$$

11. 从底筒到绕组中部的距离

$$R_{1-3} = 2 \times 0.05 + \text{Error!} = 2.2 \quad (\text{m/m})$$

$$R_{4-5} = 4.3 + 2 \times 0.05 + \text{Error!} = 4.62$$

$$R_{5-7} = (44.62 + \text{Error!}) + \text{Error!} = 6.37$$

12. 平均匝长

$$I_{01-3} = 2 \{ (10 + 10) + 4 \times (1 + 0.25) \} + 6.28 \times 2.2 = 58 + 13.8 = 71.8 \quad (\text{m/m})$$

$$I_{04-5} - 5 = 58 + 6.28 \times 4.62 = 58 + 29 = 87$$

$$I_{05-7} - 5 = 58 + 6.28 \times 6.37 = 58 + 40 = 98$$

13. 导线长

$$I_{1-3} = 71.8 \times 2 \times 480 \times 10^{-3} = 2 \times 34.4 \quad (\text{m})$$

$$I_{4-5} = 87 \times 42 \times 10^{-3} = 3.65$$

$$I_{5-6} = 98 \times 20 \times 10^{-3} = 2.00$$

$$I_{6-7} = 98 \times 88 \times 10^{-3} = 8.6$$

14. 绕组电阻(20°C)

$$r_{1-3} = 2 \times 34.4 \times 357 \times 10^{-3} = 2 \times 12.3 \quad (\Omega)$$

$$r_{4-5} = 3.65 \times 133 \times 10^{-3} = 0.48$$

$$r_{5-6}=2.00 \times 54.5 \times 10^{-3}=0.109$$

$$r_{6-7}=8.6 \times 54.5 \times 10^{-3}=0.47$$

15. 考核阻抗匹配情况:

$$R_{a-n}=12.3+ \text{Error!}+ \text{Error!}=12.3+10.7+80=103\Omega$$

$$R_{a-(5-7)}=12.3+ \text{Error!}=12.3+10.6+80=102.9 \quad (\Omega)$$

以上两式:与要求的100Ω很接近

$$R_{a-(6-7)}=12.3+ \text{Error!}+ \text{Error!}=12.3+14.2+121=147.5 \quad (\Omega)$$

故以上计算可以。 (与要求的150Ω很接近)

16. 附测试数据

(1)静态参数:

设 计 要 求	计 算 值	实 测 值
$r_{1-3}=2 \times 11.75\Omega$	$r_{1-3}=2 \times 12.3\Omega$	$r_{1-3}=2 \times 10.5\Omega$
$r_{4-5}=0.414$	$\tau_{4-5}=0.48$	$r_{4-5}=0.49$
$\tau_{5-7}=0.414$	$r_{5-7}=0.58$	$r_{5-7}=0.51$
$r_{4-7}=0.828$	$r_{4-7}=1.07$	$r_{4-7}=1.00$
$L_{1-2}=$	$L_{1-2}=0.2h$	$L_{1-3}=0.3h$

(2)频响与波形

三号台晶体放大器中三个变压器××.731.C90/01;××.731.C90/02,

××.731.C90/03同时联试结果为

$\Delta f(C)$	100	200	300	1000	4000
$\Delta M(db)$	-2.1	-2.0	-1.7	-0	-0.7
波形:	微有失真	好	好	好	好
谐波 $V_{2f}=MV$ $V_{3f}=31MV$ $V_{4f}=23.6MV$					

(3)测试仪表:

振荡器1014型;声谱仪:2112;双线示波器:1025A;蓄电平;扬声器

(4)测试条件:

环境温度为 21.5°C , 输出变压器 $\times\times 4.731$, C90/03, 初级1—3端并联了一个电容 $C=0.1\mu\text{f}$

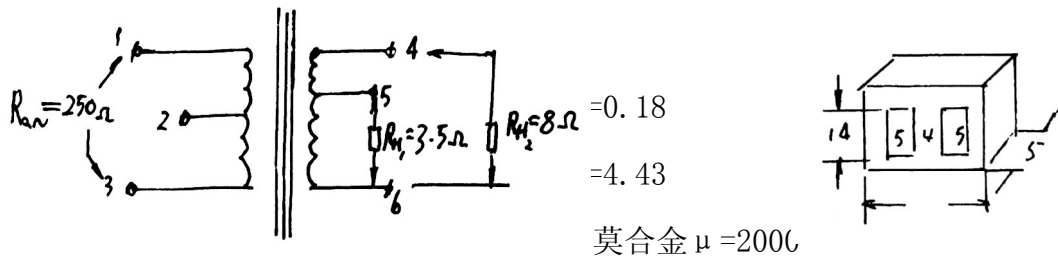
六、结束语

目前电视机等电子设备之低频变压器、铁芯材料也完全可以用铁氧体锰锌软磁材料制作, 近年来已十分普及, 材料参数略作变化, 其他类同。

七、参考文献

- | | |
|----------------------------------|----------------|
| 1. 低频变压器设计, | 苏Г. С. 采金编 |
| 2. 电感器件(下册) | 西安无线电工业学校编 |
| 3. ТрансФормАторы Малой МоЩНОСтu | Р • Х • ЪальЯн |

1、



要求: $P_{BbIX}=250^{mw}$ $R_a=250 \Omega$ $R_{H1}=3.5 \Omega$ $R_{H2}=8 \Omega$

$$W_{1-3}=2 \times 210^t$$

1、取 $\eta=0.7$

$$2、n_1 = \sqrt{\frac{R_{H2}}{\eta \cdot R_a}} = \sqrt{\frac{8}{0.7 \times 250}} = \sqrt{0.0456} = 0.214$$

$$n_1 = \sqrt{\frac{3.5}{0.7 \times 250}} = \sqrt{0.02} = 0.142$$

$$3、r_{1n}=0.586R_{a \sim n}(1-\eta)=0.586 \times ()(1-0.7)=11 \quad r_{1-3}=2 \times 11=22 \quad \Omega$$

$$r_2=0.414R_2\left(\frac{1-\eta}{\eta}\right)=0.414 \times 8 \times 1.42 \quad r'_2=0.414 \times 3.5 \times 0.62 \quad \Omega$$

$$4、R_{\vartheta H} = \frac{R_{a \sim 2n} - r_{1n}}{1 + \frac{R_{an11}}{R_i}} = \frac{(\frac{1}{4}250) - 11}{1 + 0.01} = 53$$

$$L_{1n}=L_{1-2} = \frac{0.159R_{\vartheta H}}{f_H \sqrt{M_H^2 - 1}} = \frac{0.159 \times 53}{300 \sqrt{1.27^2 - 1}} = 0.036$$

$$\text{假定 } f=300c \quad M_H = 2^{db} = 10^{\frac{2}{20}} = 10^{0.1} = 1.27$$

$$L_{1-3}=4 \times 0.036=0.14$$

M_{db}	$10^{M_{db}/20}$	M_H
0.5db	$10^{0.025}$	1.06
2	$10^{0.1}$	1.27
4	$10^{0.2}$	1.60
6	$10^{0.3}$	1.995

Ω

h

h

$$5、A=====44 \times 10^{-7}$$

选E4×5（镀莫合金 $\mu=2000$ ）

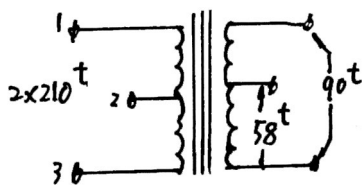
$$W_{1-2}=8920 \sqrt{\frac{L_{inlc}}{\mu S_c}} = 8920 \sqrt{\frac{0.036 \times 4.48}{2000 \times 0.18}} = 190^t$$

匝

$$\text{按原作定 } W_{1-2}=210^t \quad L_{1-2}=()^2 \times ()=0.044^h \quad t$$

$$n_1 = \quad W_{4-6} = [0.214 \times (2 \times 210)] = 90^t \quad \text{实取 } 86^t \quad \text{匝}$$

$$n_2 = \quad W_{5-6} = 0.142 \times 2 \times 210 = 59^t \quad \text{取 } 58^t \quad \text{匝}$$



$$n_1 = 0.205 (5:1)$$

$$n_2 = 0.138 (7.2:1)$$

$$L_m = 2 \times [(4+5) + 4 \times 1] + 2 \pi \times 2 = 3.8 \text{ (cm)}$$

$$6、l_{1-3} = 3.8 \times 2 \times 210 \times 10^{-2} = 16$$

$$l_{4-6} = 3.8 \times 90 \times 10^{-2} = 3.4$$

M

$$l_{5-6} = 3.8 \times 59 \times 10^{-2} = 2.23$$

$$(l_{4-5} = 1.17)$$

$$7、d_{1-3} = 0.15 \sqrt{\frac{16}{22}} = 0.13 \text{ (m/m)}$$

$$\text{选 } 0.11 (0.125)$$

$$\rho_1 = 1800$$

Ω /km

$$d_{5-6} = 0.15 \sqrt{\frac{2.23}{0.62}} = 0.28$$

$$0.25 (0.27)$$

$$\rho_2 = 360$$

$$d_{4-5} = 25 \sqrt{\frac{3.4 - 2.23}{1.42 - 0.6}} = 0.57$$

$$0.25 (0.27)$$

$$\rho_2 = 360$$

$$8、n_{1-3} = 80 \text{ (匝/层)}$$

$$N_{1-3} = 6 \text{ (层)}$$

$$n_{4-6} = 40$$

$$N_{4-6} = 3$$

$$\Sigma A_1 = 2.21$$

$$A_k = 3.4$$

$$\beta_o > 0$$

$$\text{m/m}$$

$$9、r_{1-3} = 2 \times 11$$

$$r_{4-5} = 0.4$$

$$r_{5-6} = 0.8$$

$$r_{4-6} = 1.2$$

Ω

$$10、R'_a \sim = 22 + + = 22 + = 22 + 228 = 250$$

Ω

$$R''_a \sim = 22 + + = 22 + 220 = 242$$

Ω

$$\text{修改线经: } d_{1-3} = 0.2 (0.23)$$

$$\rho = 558$$

$$r_{1-3} = 2 \times 2.04 \times 558 \times 10^{-3} = 2 \times 11.3 (\Omega)$$

$$d_{4-6} = 0.41 (0.45)$$

$$\rho = 133$$

$$r_{4-6} = 10 \times 133 \times 10^{-3} = 1.33 (\Omega)$$

$$r_{5-6} = 6.8 \times 133 \times 10^{-3} = 0.9$$

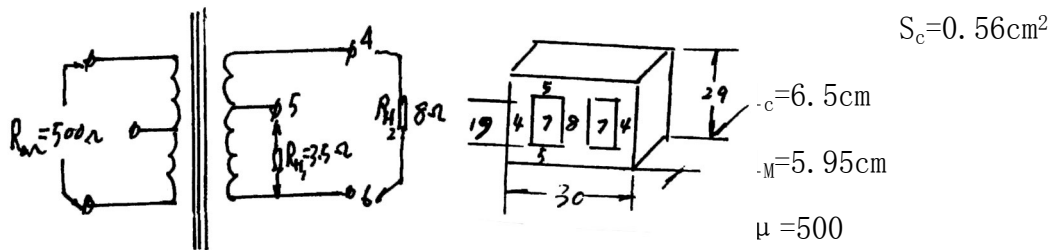
$$R'_a \sim = 23 + () \times 10^2 = 23 + 225 = 248 \Omega \quad r_1 = 23 \quad r'_2 = () \times 10^2 = 47 \quad \Omega$$

$$R''_a \sim = 23 + () \times 10^2 = 23 + 233 = 256$$

$$r''_2 = 0.9 \times 10^2 / 1.89 = 47 \quad \Omega$$

$r_1 \neq r'_2 \quad \therefore$ 功率输出不是最大。

2、



1、 $P = 250 \text{ mW}$ $\eta = 0.7$

$$\eta' = \frac{R_{H2}}{\eta R_{a \sim}} = \sqrt{\frac{8}{0.7 \times 500}} = 0.151; \quad \eta'' = \sqrt{\frac{3.5}{0.7 \times 500}} = 0.1$$

3、 $r_{1-n} = 0.586 R_{a \sim} (1 - \eta) = 0.586 \times () (1 - 0.7) = 22$ $r_{1-3} = 2 \times 22$ Ω

4、 $r'_{12} = 0.414 R_H () = 0.414 \times 8 \times = 1.42$ Ω

$r''_{12} = 0.414 R_H () = 0.414 \times 3.5 \times = 0.62$ Ω

5、 $R_{\text{Hn}} = \frac{R_{a \sim 2n} - r'_{1n}}{1 + \frac{R_{a \sim n}}{R_{a \sim n}}} = \frac{(\frac{1}{4} 500) - 22}{1 + 0.01} = 118$ Ω

$L_{1n} = \frac{0.159 R_{Hn}}{f_H \sqrt{M_H^2 - 1}} = \frac{0.159 \times 118}{300 \sqrt{1.06^2 - 1}} = 0.045 \times 2 = -0.09$ $M_H = 0.5 \text{ db} = 1.06$ h

6、 $W_{1-2} = 8920 \sqrt{\frac{L_{1n} c}{\mu \cdot S_c}} = 8920 \sqrt{\frac{0.090 \times 6.5}{500 \times 0.56}} = 290 \sqrt{2} \text{ (t)}$ 匝

$W_{4-6} = 2 \times 290 \times 0.151 = 87 \sqrt{2} \text{ t}$ $W_{5-6} = 2 \times 290 \times 0.10 = 58 \sqrt{2}$

7、 $l_{1-3} = 5.95 \times \sqrt{2} \times 290 \times 10^{-2} = 313 \sqrt{2}$ m

$l_{4-6} = 5.95 \times \sqrt{2} \times 87 \times 10^{-2} = 5.13 \sqrt{2}$ $l_{5-6} = 5.95 \times \sqrt{2} \times 58 \times 10^{-2} = 3.42 \sqrt{2}$

8、 $d_{1-3} = 0.15 \sqrt{\frac{31.3 \times 1.41}{44}} = 0.12 (0.145)$ $\rho = 1551 (\Omega / \text{km})$

$d_{4-6} = 0.15 \sqrt{\frac{5.13 \times 1.41}{1.42}} = 0.33 (0.37)$ $\rho = 205$

$d_{5-6} = 0.15 \sqrt{\frac{3.42 \times 1.41}{0.62}} = 0.354$

9、 $n_1 = 93 \rightarrow N_1 = 7 \rightarrow A_1 = 1.42$ $A_2 = 1.32$ $\Sigma A_i = 2.74$

$n_2 = 37 \rightarrow N_2 = 3 \rightarrow \Sigma \beta_{0I} + \beta_r = 1.4$ $\Sigma A_k = 4.14$ $\beta_0 = 2$

10、更改匝比与线经，可得匹配更好，功率输出更好的效果：

$$\textcircled{1} n_1' = 0.142$$

$$\textcircled{2} W_{4-6}' = 0.142 \times 2 \times 290 = 82^t$$

匝

$$n_2' = 0.095$$

$$W_{5-6}' = 0.095 \times 2 \times 290 = 55^t$$

$$W_{1-3} = 2 \times 290^t$$

$$\textcircled{3} d_{01} = 0.12 (0.145)$$

$$\textcircled{4} r_1 = 40.7$$

$$W_{4-6}' = 82^t$$

$$d_{4-6} = 0.41 (0.45)$$

$$r_2 = 0.42$$

$$r_2 = 1 - (0.65 - 0.42) = 0.78$$

Ω

$$W_{5-6}' = 55^t$$

$$d_{5-6} = 0.31 (0.35)$$

$$r_2' (\Omega) \times 10^2 = 46 (\Omega)$$

$$R_2' (\Omega) \times 10^2 = 39 (\Omega)$$

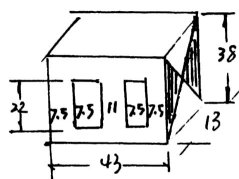
$$\textcircled{5} R_a' \sim 10.7 + (\Omega) \times 10^2 = 40.7 + 39 = 480$$

Ω

⑥另选铁芯计算

假定 $f = 300\text{c}$

$$M_H = 0.5^{\text{db}} = 1.06$$



$$S_c = 11 \times 13 \times 0.91 = 1.3 \text{ cm}^2$$

$$l_c = 8.38 \text{ CM} \quad l_M = 7.6 \text{ cm}$$

$$\textcircled{6}-1 \quad L_{1n} = \frac{0.159 R_{\text{eff}}}{F_H \sqrt{M_H^2 - 1}} = 0.159 \times 118 / 300 \sqrt{1.06^2 - 1} = 0.09 \quad L_1 = 4 \times 0.09 = 0.36 \quad \text{h}$$

$$\textcircled{6}-2 \quad W_{1-2} = 8920 \sqrt{\frac{L_{1n} \times l_c}{\mu \cdot S_c}} = 8926 \sqrt{\frac{0.09 \times 8.38}{500 \times 1.3}} = 300 \quad \text{匝}$$

$$W_{1-3} = 2 \times 300^t \quad W_{4-6} = 0.205 \times 2 \times 300 = 123 \quad W_{5-6} = 0.138 \times 2 \times 300 = 83 \quad \text{匝}$$

$$\textcircled{6}-3 \quad l_{1-3} = 7.6 \times 300 \times 10^{-2} = 45.6$$

M

$$l_{4-6} = 7.6 \times 123 \times 10^{-2} = 9.4$$

$$l_{5-6} = 7.6 \times 83 \times 10^{-2} = 6.3$$

$$\textcircled{6}-4 \quad d_{1-3} = 0.15 \sqrt{\frac{45}{22}} = 0.19 (0.22) \quad \rho = 618 \Omega / \text{km}$$

$$d_{4-6} = 0.15 \sqrt{\frac{6.3}{0.62}} = 0.48 (0.51)$$

$$d_{5-6} = 0.15 \sqrt{\frac{9.4 - 6.3}{1.42 - 0.6}} = 0.33 (0.37) \quad \rho = 205 \Omega / \text{km}$$

$$\textcircled{6}-5 \quad n_{1-3} = 75 \rightarrow N_{1-3} = 8 \quad A_{1-3} = 2.3$$

$$n_{4-6}==44 \quad \rightarrow \quad N_{4-6}=123/44 \quad A_{4-6}=1.3$$

$$\textcircled{6}\text{-}11 \quad \Sigma A_i=3.6 \quad \Sigma \beta_{02}+\beta_r=1.4 \quad \Sigma A_k=5 \quad \beta_o=7-5=2$$

$$m/m$$

$$\textcircled{6}\text{-}12 \quad R_{1-3}=1.25 \quad l_{M1-3}=67.9 \quad l_{1-3}=2\times 20\text{ (M)} \quad r_{1-2o}=2\times 20.4\times 618\times 10^{-3}=25.2=2\times 12.6$$

$$\Omega$$

$$r_{2-2o}=10\times 205\times 10^{-3}=2$$

$$R_{4-6}=3.2 \quad l_{M4-6}=80 \quad l_{4-6}=10 \quad R_{a\sim}=25.2+[\quad]=65$$

$$l_{4-5}=6.8 \quad R_{a\sim}=25.2+[\quad]=285$$

$$A_1=1.42 \quad A_2=1.32 \quad \Sigma A_i=2.74 \quad \Sigma A_k=4.14 \quad \beta_o=2 \quad m/m$$

$$11、R_{1-3}=0.81 \quad R_{4-6}=1.52+6.17+=2.33$$

$$12、l_{M1-3}=2[8+8+4\times 1]+6.28\times 0.8=45.1\text{ (mm)} \quad l_{M1-3}=26.3$$

$$M$$

$$l_{M4-6}=54.6 \quad l_{M1-3}=4.75$$

$$13、r_{1-3}=26.2\times 1551\times 10^{-3}=40.7$$

$$\Omega$$

$$r_{4-6}=4.75\times 205\times 10^{-3}=0.8 \quad r_{5-6}=3.15\times 205\times 10^{-3}=0.656$$

$$15、R'_a\sim=40.7+\quad=40.7+390=430.7 \quad \Omega$$

$$R''_a\sim=40.7+\quad=40.7+415=455$$

$$\text{改导线: } d_{4-6}=0.25\text{ (0.29)} \quad \rho=357\text{ }\Omega/\text{km}$$

$$r_{4-6}=1.7 \quad R'_a\sim=40.7+\quad=40.7+390=430.7 \quad \Omega$$

$$r_{5-6}=1.13 \quad R''_a\sim=40.7+=503.7$$

$$\text{考核}r_1\neq r'_2 \quad r'_2==75 \quad r''_2==113$$

$$\text{已匹配了, 但功率输出不是最大。}$$

更改匝比：

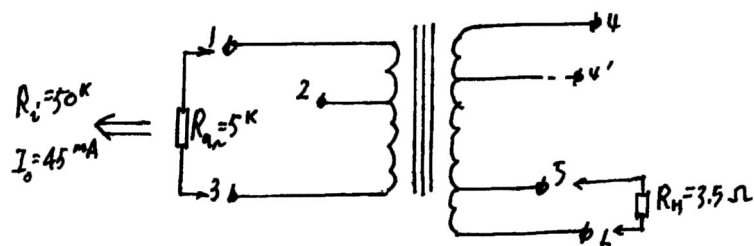
$$n_1=0.142 \quad R_{a\sim}=40.7=480 \quad \Omega$$

$$r_1=40.7 \quad r'_2==40 \text{ (} \Omega \text{)}$$

$$n_2=0.095 \quad R_{a\sim}=40.7\left(\frac{0.655+3.5}{0.95^2}\right)\times 10^2=503$$

$$r_1=40.7 \quad r'_2==73 \text{ (} \Omega \text{)}$$

实例3、



原机参数: $W_{1-3}=2 \times 1500t$ $W_{4-5}=492t$ $d_{04-5}=0.15$ $n_{4-5}=145$ (匝/层), $N_{4-5}=4$ (层)

$d_{01-3}=0.15$ $W_{4-6}=80t$ $d_{05-6}=0.56$ $N_{5-6}=2$ (层)

$n_1=$ $N_1=2 \times 12$ (层) $r_{1-3}=375 \Omega$, $r_{4-5}=65.3 \Omega$, $r_{5-6}=0.825 \Omega$, $L_{1-3}=16.5$ h

一、任务:

- 1、 $\Delta f=50 \sim 10000$ c/s $M_H=M_B=6$ db
- 2、 $Z_{1-3}: Z_{5-6}=5000:3.5$, $Z_{1-3}:Z_{4-5}=5000:R_X$ $R_X=?$
- 3、前级接6n1n, $R_i=50k \Omega$ 4、体积尽量小。
- 5、输出功率为1W, ($P=1W$ $\therefore V_m \geq 1.88V$)

二、核算:

- 1、 $n_1=0.0267$ 若满足 n_1 则有效率应取

$$\text{由 } n_1 = \sqrt{\frac{R_2}{\eta \cdot R_a}} \quad \eta = 1$$

故在 $P_2=1W$ 时, 要达到 $\eta=1$ 是不可能的, 暂以 $\eta=0.85$ 试算。

三、计算:

$$1、n_1 = \sqrt{\frac{3.5}{0.85 \times 5000}} = 0.028$$

$$2、r_{1-3} = 0.5 \times 5000 (1-0.85) = 375$$

$$r_{4-5} = r_1 \cdot n^2 = 0.5 R_2 () = 0.5 \times 3.5 \times () = 0.31$$

$$3、R_{\text{eff}} = \frac{5000 - 375}{1 + \frac{5000}{50000}} = 4200 (\Omega)$$

$$4、L_1 \geq \frac{0.159 \times R_{\text{eff}}}{f_H \sqrt{M_H^2 - 1}} = \frac{0.159 \times 42000}{50 \sqrt{1.995^2 - 1}} = 7.75^h \quad \text{按 } L_1=10^h \text{ 计算。}$$

5、计算最大漏感:

$$L_p \leq \sqrt{M_B^2 - 1} = \sqrt{1.995^2 - 1} = 1.51$$

6、漏感系数: $\sigma = 0.15$ 初级绕组采用分段绕, 漏感会好些。

7、初级时间常数: $\tau_1 = 0.0268$

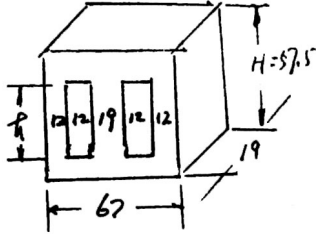
8、变压器时间常数: $\tau_c = 2 \tau_1 = 0.0536$

9、 $L_1 I_0^2 = 10 \times 0.045^2 = 2 \times 10^{-2}$ 查图 $\mu_{\text{FeH}} = 200$

10、结构常数 $A = 26.8 \times 10^{-5}$

选GEB19×19 (非标窄窗口铁芯)

$$A = 9.84 \times 10^{-5} \quad P_{50} = 10^{\text{VA}}$$



h=33.5	H=57.5
$S_c=3.29$	cm^2
$l_c=10.75$	cm
$g_0=1.0$	cm
$l_o=11$	cm
$G_c=0.39$	

$$11、W_{1-3} = 8920 \sqrt{\frac{10 \times 10.73}{200 \times 3.29}} = 3620^{\text{t}}$$

若考虑直流磁化引起 $\mu \downarrow$ 下降情况, 则必须 $\uparrow W_{1-3}$, 但根据以前计算结果, 与实际测试结果, 用本公式的电感量均偏大, 故这里仍按 $W_{1-3} = 2 \times 1810^{\text{t}}$ 计算 L 值。

$$W_{5-6} = 0.029 \times 3620 = 105^{\text{t}} \quad \approx 6.15 \quad \text{大略估计 } W_{4-5} = 6.15 \times 105 = 645$$

中间再抽一头 $W_{4-5} = 492$

12、线圈导线长 (近似值)

$$l_{1-3} = L_0 \cdot W_{1-3} = 110 \times 3620^{\text{t}} \times 10^{-3} = 398 \text{ (M)}$$

$$l_{4-5} = 71 \quad l_{5-6} = 11.5$$

$$13、\text{线径: } d_{1-3} = 0.15 \sqrt{\frac{l_{1-3}}{r_{1-3}}} = 0.15 \sqrt{\frac{398}{375}} = 0.15 \quad \text{取 } 0.15 \text{ (0.17)} \quad \rho = 993 \text{ } \Omega / \text{km}$$

$$d_{4-5} = 0.15 \sqrt{\frac{71}{65.3}} = 0.15 \quad 0.15 \text{ (0.17)} \quad \rho = 993$$

$$d_{5-6} = 0.15 \sqrt{37} = 0.91 \quad 0.72 \text{ (0.78)} \quad \rho = 43$$

$$14、n_{1-3} = 152 \text{ (匝/层)} \quad N_{1-3} = 2 \times 12 \text{ 层}$$

$$n_{4-5} = 152 \quad N_{4-5} = 5, N_{4-5} = 4$$

$$n_{5-6} = \quad N_{5-6} = 3,$$

$$16、A_{1-2}=A_{23}=12 \times 0.17 \times 1.08 + 11 \times 0.011 = 2.34 \quad A_{5-6}=2.86 \quad A_{4-5}=0.96$$

m/m

$$17、\Sigma A_i = 2 \times 2.34 + 2.86 + 0.96 = 8.5$$

$$18/20、\Sigma \beta_{oi} + \beta'_r = 1.86 \quad \Sigma A_K = 10.35 \quad \beta_0 = 1.4$$

$$21、R_{1-2} = 1.27 \quad l_{M1-2} = 2[(19+19) + 4 \times 1.25] + 6.28 \times 1.27 = 86 + 7.98 = 93.98, \quad l_{1-2} = 170.5$$

M

$$R_{5-6} = 4.07 \quad l_{M5-6} = 111.6 \quad l_{5-6} = 11.7$$

$$R_{4-5} = 5.98 \quad l_{M4-5} = 123.6 / l_{M'} \quad l_{4-5} = 12 \quad *l_{4-5} = 79 / l' \quad l_{4-5} = 59$$

$$l_{M2-3} = 135.2 \text{ (初级绕组分两半, 第2半个绕组绕在最外层)} \quad l_{2-3} = 245$$

$$r_{1-2} = 170.5 \times 993 \times 10^{-3} = 169 \quad r_{1-3} = r_{1-2} + r_{2-3} = 412$$

Ω

$$r_{2-3} = 245 \times 993 \times 10^{-3} = 243 \quad r_{5-6} = 11.7 \times 43 \times 10^{-3} = 0.503 \quad \Omega$$

$$r_{4-5} = 79.5 \times 993 \times 10^{-3} = 78.7 \quad r'_{1-3} = 59 \times 993 \times 10^{-3} = 58.5 \quad \Omega$$

四、考核：

$$(1) R_{a-1} + r'_{1-2} + R'_{2-3} = 412 + 412 + 600 + 4200 = 5300 \approx 5000 \pm 10\% \quad \Omega$$

$$\text{要求值: } r_{1-3} = 375 \quad r_{5-6} = 0.31 \quad L_{1-3} = 8^h$$

$$\text{设计值: } r_{1-3} = 412 \quad r_{5-6} = 0.503 \quad L_{1-3} = 10^h$$

$$\text{实测值: } r_{1-3} = 103 + 227 = 386 \quad r_{5-6} = 0.54 \quad L_{1-3} = 14.3^h$$

$$V_{\sim} = 3.5V \quad I_0 = 45mA \quad L_{1-3} = 0.81 = 0.81 \times 14.3^h \quad r_{4-5} = 73.5 \quad r'_{4-5} = 54 \quad \Omega$$

频响：

$$\Delta f = \boxed{50} \quad 80 \quad 125 \quad 250 \quad 500 \quad \boxed{1kc} \quad 2kc \quad 4kc \quad 6kc \quad 8kc \quad \boxed{10kc} \quad 15kc \quad 20kc$$

$$N_{ab} = 12.5 \quad -14.2 \quad 15 \quad 15.4 \quad 15.6 \quad 15.6 \quad 15.6 \quad 15.6 \quad 15.6 \quad 15.7 \quad 15.7 \quad 16.4 \quad 15.5$$

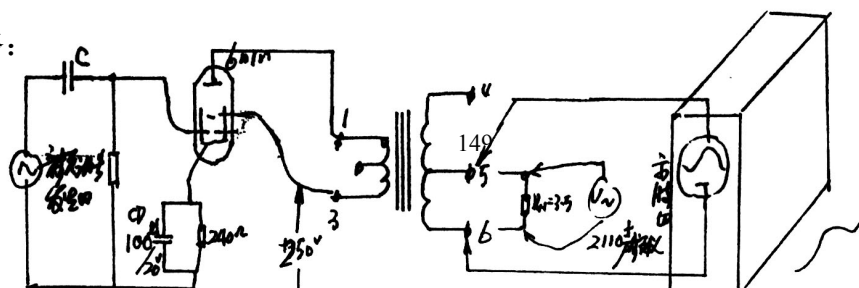
$$\Delta M_{db} = -3.1 \quad -1.4 \quad -0.6 \quad -0.2 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad +0.1 \quad +0.1 \quad +0.8 \quad -0.1$$

$$\text{波形: } V_m \geq 1.88V \text{ 开始削波} \quad V_m \geq 3.1V \text{ 开始削波} \quad V_m > 2.6V \text{ 开始削波}$$

$$\text{输出功率: } P = 1 \text{ (W)} \quad P = 3 \text{ (W)} \quad P = 2.13 \text{ (W)}$$

故此变压器全部指标满足要求，被采用。

测试线路：



B、另选铁芯计算： (A_{3T}4.731.004_(b))

①~④计算相同

5、 $L_1=8^h$ 计算

6、 $\sigma = 1.9$ 可以按一般绕法，分层绕则更好

7/8、 $\tau_1 = 8/375 = 0.0213$ $\tau_2 = 2 \tau_1 = 2 \times 0.0213 = 0.0426$

9、 $L_1 I_0^2 = 8 \times 0.045^2 = 8 \times 20.25 \times 10^{-4} = 1.625 \times 10^{-2}$ 查图 $\mu_{\text{H}} = 250$

10、 $A = 17 \times 10^{-5}$ 选E12×25铁芯 D310-0.35材料

$S_c = 2.79 \text{cm}^2$ $l_c = 10.02 \text{cm}$ $G_c = 0.23 \text{kg}$

11、 $W_{1-3} = 8920 \sqrt{\frac{8 \times 10.03}{250 \times 2.79}} = 3080^t$ $aW_o = 14$ (安匝/厘米)

其中 $\mu_{\text{H}} = 220$ 由图表查得

\therefore 正确值 $W_{1-3} = 8920 \sqrt{\frac{8 \times 10.03}{220 \times 2.74}} = 3280^t = 2 \times 1640^t$

$W_{5-6} = 0.029 \times 3280 = 95^t$ $W_{4-5} = 6.15 \times 95 = 585^t$ 中间抽头 $W'_{4-5} = 492^t$

12、 $d_{1-3} = 0.15 \sqrt{\frac{l_1}{r_1}} = 0.15$ 取 $d_{1-3} = 0.15 (0.18)$ $\rho_1 = 993^{\text{SL}}/\text{Km}$

$d_{4-5} = 0.15 \sqrt{\frac{l_{4-5}}{r_{4-5}}} = 0.15$ 取 $d_{1-3} = 0.15 (0.18)$ $\rho_1 = 993^{\text{SL}}/\text{Km}$

$d_{5-6} = 0.15 \sqrt{\frac{l_2}{r_2}} = 0.9$ $d_{5-6} = 0.64 (0.68)$ 54.5

13、 $\eta_{1-3} = 126$

14、 $N_{1-3} = 2 \times 2 \times 13$

$\eta_{4-5} = 126$

$N_{4-5} = 5$

$N'_{4-5} = 4$

$\eta_{5-6} = 34$

$N_{5-6} = 3$

$$15、A_{1-2}=2.66 \quad A_{1-3}=5.32$$

$$A_{5-6}=2.56 \quad A_{4-5}=1.17 \quad *A'_{4-5}=0.93$$

$$\Sigma A_i=9.05 \quad \Sigma \beta_i + \beta_r=1.86 \quad \Sigma A_K=10.9 \quad \beta_0=0.8$$

$$20、R_{1-2}=1.43 \quad 21、l_{m1-2}=93(m/m) \quad 22、l_{1-2}=152.8^{(M)} \quad 23、r_{1-2}=151.7(\Omega)$$

$$R_{5-6}=4.24 \quad l_{m5-6}=110 \quad l_{5-6}=10.5 \quad r_{5-6}=0.572$$

$$R_{4-5}=6.11 \quad l_{m4-5}=122 \quad (*L_{M4-5}=121.7) \quad l_{4-5}=71.6(*l_{4-5}=59.7) \quad r_{4-5}=71 \quad (*r_{4-5}=59)$$

$$R_{2-3}=8.22(\text{在最外边}) \quad L_{2-2}=135 \quad l_{2-3}=222 \quad r_{2-3}=220$$

$$R_{1-3}=151.7+220=371.7(\Omega)$$

21、考核匹配情况：

$$R_{an}=r_1+r'_2+R'_H=372+ \quad + \quad =5257 \text{与要求值接近} 5000 \pm 10\% \quad \text{匹配良好！}$$

$$\text{要求值：} r_{1-3}=375 \quad r_{5-6}=0.31 \quad L_{1-3}=7.7^h$$

$$\text{设计值：} r_{1-3}=372 \quad r_{5-6}=0.572 \quad L_{1-3}=8h$$

$$\text{实测值：} r_{1-3}=123+172=300 \quad r_{5-6}=0.55 \quad L_{1-3}=8.1^h \quad (L_{1-3}=0.81=0.81 \times 8.1^h)$$

$$r_{4-5}=56 \Omega \quad r_{4-5}=47 \Omega$$

$$\text{频响特性：} V_{8X}=4.2 \text{伏}$$

(一) 无气隙： $l_z=0$

$$\Delta f = \boxed{50} \quad 80 \quad 125 \quad 250 \quad 500 \quad \boxed{1kc} \quad 2 \quad 4 \sim \boxed{10} \quad 15 \quad 20 \quad 30kc$$

$$* \text{相对} M_{db}=7.2 \quad 10.6 \quad 12.8 \quad 14.6 \quad 15.2 \quad 15.4 \quad 15.6 \quad 15.6 \quad 15.5 \quad 15.7 \quad 15.5 \quad 11.8$$

$$\text{绝对} M_{db}=-8.2 \quad -4.8 \quad -2.6 \quad -0.8 \quad -0.2 \quad 0 \quad +0.2 \quad +0.2 \quad +0.1 \quad +0.3 \quad +0.1 \quad -3.6$$

$$\text{波形} \downarrow V_m \geq 1.8^v \text{开始削波} \quad V_m \downarrow \geq 3.4^v \text{开始削波} \quad V_m \downarrow \geq 2.45^v \text{开始削波}$$

$$\text{输出功率：} P=1^W \quad P=3.25^W \quad P=1.17^W$$

(二) 有气隙 $L_z=0.12\text{m/m}$

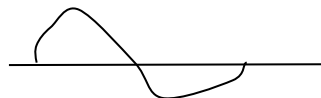
$$\Delta f = \boxed{50} \quad 80 \quad 125 \quad 250 \quad 500 \quad \boxed{f=1\text{kc}} \quad 2 \quad 4 \sim \boxed{10} \quad 15 \quad 20 \quad 25\text{kc} \quad 30\text{kc}$$

$$* \text{相对} M_{db} = 10 \quad 12.6 \quad 14.2 \quad 15.2 \quad 15.5 \quad 15.6 \quad 15.6 \quad 15.8 \quad 15.6 \quad 15.8 \quad 15.6 \quad 13.6$$

11.8

$$\text{绝对} M_{db} = -5.6 \quad -3 \quad -1.4 \quad -0.4 \quad -0.1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad +0.2 \quad 0 \quad -2 \quad -3.0 \quad -3.8$$

波形



$$V_m \geq 1.8^V \text{ 开始削波}$$

$$V_m \geq 3.1^V \text{ 开始削波} \quad V_m \geq 2.7^V \quad V_m \geq 1.9^V$$

$$P=1^W$$

$$P=2.7^W$$

$$P=2.06^W$$

$$P=1^W$$

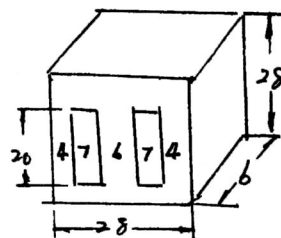
开始因车间将铁芯片装错（按电源变压器形式装叠），故低频响应不合格，后改

变装叠形式，留有气隙 $l_z=0.12\text{m/m}$ ，测得此时电感量为 $L=8.1^h$ ，整个频响特性

$$\Delta f=50 \sim 10\text{kc}, M_H=M_B \leq \pm 6\text{db}, \text{ 完全满足要求, 但低频段} M_H \text{ 比较} A_{3T} 4.731.00A(a)$$

(A) 方案要差些，这B方案体积虽然小一些，但主机设计师何先生仍选中A方案。

另用新材料 F_e-A_L 代替上述二种材料以缩小体积——试算！



$$\text{选} 6 \times 6 \text{ 铁芯} \quad S_c = 32.8\text{mm}^2 \quad l_o = 5.3\text{cm}$$

Fe-AL

$$\mu_o = 3760 \sim 2650$$

$$l_c = h + [h + 2b + \dots]$$

$$= 2 + [2 + 2 \times 0.7 + \dots] = 5.48$$

$$(y_1 = 0.6 \quad y_2 = \quad y_3 = 0.4)$$

$$12、W_{1-3} = 8920 \sqrt{\frac{Ll_c}{\mu S_c}} = 8920 \sqrt{\frac{10 \times 5.48}{3750 \times 0.328}} = 2020 \quad \text{取} W_{1-3} = 2000^t \quad \text{匝}$$

$$W_{5-6} = 0.029 \times 2000 = 58^t$$

$$W_{4-5} = 6.15 \times 58 = 356^t$$

$$13、l_{1-3} = 106 (\Omega) \quad l_{4-5} = 18.8 \quad l_{5-6} = 3.07 \quad \text{m/m}$$

$$14、d_{1-3} = 0.15 \sqrt{\frac{106}{375}} = 0.08 \quad \text{取} 0.08 (0.095) \quad \rho = 3487 \quad \Omega / \text{km}$$

$$d_{4-5} = 0.15 \sqrt{\frac{18.8}{63}} = 0.08 \quad \text{取} 0.08 (0.095) \quad \rho = 3487$$

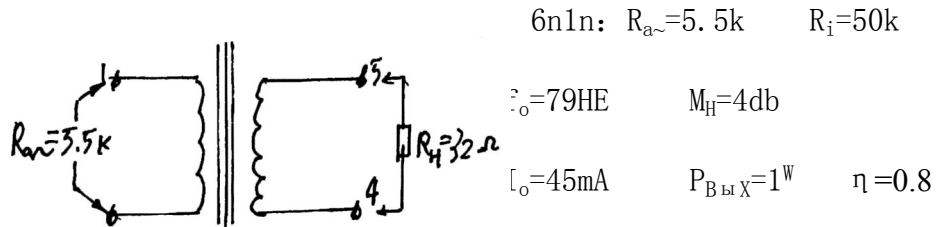
$d_{5-6}=0.15\sqrt{\frac{3.67}{0.31}}=0.476$ 取0.08(0.44) $\rho=115$										
15、 $n_{1-3}=145$ (匝/层) $N_{1-3}=14$ (层)										
$n_{4-5}=145$					$N_{4-5}=356/145=3$					
$n_{5-6}=31$					$N_{5-6}=2$					
16、 $A_{1-2}+A_{2-3}=2\times 0.77$					$A_{4-5}=0.322$			$A_{5-6}=1.11$		
m/m										
$\Sigma A_i=2.93$			$\Sigma \beta_{oi}+\beta_r=1.74$			$\Sigma A_k=4.71$		$\beta_o=2$		m/m
17、 $R_{1-2}=0.48$			$R_{5-6}=1.62$			$R_{4-5}=2.34$			$R_{2-3}=3.08$	
m/m										
18、 $l_{M1-2}=37$			$l_{M5-6}=44.2$			$l_{M4-5}=48.7$			$l_{M2-3}=53.3$	
m/m										
19、 $l_{1-2}=37$ (M)			$l_{5-6}=2.55$			$l_{4-5}=17.3$			$l_{2-3}=53.3$	
m										
20、 $r_{1-2}=129$			$r_{5-6}=0.293$			$r_{4-5}=60$			$r_{2-3}=186$	
Ω										
$r_{1-3}=129+186=315$ (Ω)					$r_{5-6}=0.292$ (Ω)					
21、考核 $R_a=315++=315+35.2+4200=4870$ 与要求值 $5000\Omega\pm 10\%$ 接近										
要求值： $r_{1-3}=375$ (Ω)			$r_{5-6}=0.31$			$L_{1-3}=10h$				
设计值： $r_{1-3}=315$			$r_{5-6}=0.293$			$L_{1-3}=10h$				
实测值： $r_{1-3}=300$			$r_{5-6}=$			$L_{1-3}=2h(?)$				
频响： $V_{BX}=4.2^V$ $f=1kc$ $V_{BOX}=1.15V$ $(P_{出}=6.4W$ $I_0=51^{mA})$										
$\Delta f=80$	206	500	1000	2000	4000	6k	8k	10k	15k	20k
$M_{db}=-9$	-1	7	11	14	14.7	15.3	15.5	15.6	15.5	15.5
$\Delta M=-23$	-15	-7	13	0	+0.7	+1.3	+1.5	+1.6	+1.6	+1.6

$V_M=$	0.11	0.25	0.57	1.15	1.8	1.9	1.92	2	2	2	1.95
$P_{\text{出}}=$	0.11	0.25	0.11	0.4	0.7	0.97	1.09	1.09	1.21	1.21	1.14

波形：

测试（30分）结束后，铁芯发热，可见，低频响应差，输出功率不够！原因是初级电压太小，实测：我怀疑此材料 $\mu_0=3750$ 测出结果有问题！故要求重测，重测结果发现 $\mu=1$ （大大出乎意料！！）同时材料在直流磁化，可能 μ 值下降仍然很大，这也使得 L_{1-3} 太少，结论：以 $E6 \times 6$ 代替 $GEB19 \times 19$ 是失败的， L_{1-3} 不够，造成低频响应太差！

4、



计算:

$$1、\eta = \sqrt{\frac{3.2}{0.8 \times 5500}} = 0.027$$

$$2、r_1 = 0.5 \times 5500 (1 - 0.8) = 550 \quad r_2 = 0.5 \times 3.2 (\quad) = 0.4 \quad \Omega$$

$$3、R_{\theta H} = \frac{5500 - 550}{1 + \left(\frac{5500}{50000}\right)} = 4450 \quad L_1 = \frac{5500 - 550}{1 + \left(\frac{5500}{50000}\right)} = 7.3 \quad M_H = 10 \quad = 10^{0.2} = 1.6 \quad \Omega$$

4、选E12×16铁芯 按 $L_1=8h$ 计算:

$$S_C = 1.75cm^2 \quad l_C = 10.03cm \quad G_C = 0.14kg$$

$$5、W_{1-2} = 8920 \sqrt{\frac{8 \times 10.03}{220 \times 1.75}} = 8920 \sqrt{0.208} = 4050 \quad W_{3-4} = 0.0271 \times 4050 = 110$$

匝

$$6、取d_{1-2} = 0.12 (0.14) \quad \rho_1 = 1551 \Omega / km$$

$$d_{3-4} = 0.77 (0.83) \quad \rho_2 = 37.6$$

$$7、n_1 = 162 \text{ (匝/层)} \quad n_2 = \quad \text{层}$$

$$8、N_1 = 22 \quad N_2 = 4$$

$$9、A_1 = 5 \quad A_2 = 4.08$$

(m/m)

$$10、\Sigma A_i = 9.08 \quad \Sigma B_r = 2.06 \quad \Sigma A_K = 11.14 \quad \beta_o = 0.5$$

$$14、R_{01} = 2.6 \quad L_{m1-2} = 82.4 \text{ (m/m)} \quad l_{1-2} = 333 \text{ (M)} \quad r_1 = 514$$

$$15、R_{02} = 7.62 \quad L_{m3-4} = 114 \quad l_{3-4} = 12.5 \quad r_2 = 0.47$$

16、考核： $R_{a\sim} = 514 + \dots = 514 + 645 + 4400 = 5560 = 5.5k$