

# 甚低频宽频带高保真度 变压器级的研制

任 芳 海

(长春物理所)

## 前 言

任务提出：《太阳磁场望远镜》电视接收系统，需将摄像机拾取的视频信号模拟量转换成数字量后送入计算机，数字电路部分提出要把数字地与模拟地隔离开，为此在视频输出与采样保持两电路中间加一变压器作级间耦合，从而构成一变压器级。

总的电气要求：信号峰值4伏，带宽为5Hz~60KHz，频率畸变为 $\pm 1\text{dB}$ 。视频通道（变压器级以前部分）的频率特性在高、低频区均有些跌落，所以实际要求变压器级的频率畸变小于 $\pm 1\text{dB}$ ，才有可能满足总的频率特性要求。

查阅有关资料，发现因变压器的一些缺点，OCL、OTL电路的大量应用，多本晶体管电路根本不提变压器级，个别提到的也只是一两页提出作为收音机、录音机用的变压器耦合的经验公式；电子管变压器的许多书倒有叙述，但也都是作为变压器放大级，将变压器初级线圈串在电源与板极或集电极之间，作为负载，这样输出阻抗均都很高，为了满足低频特性要求，初级线圈电感量要很大，即使这样，也只能满足一些对频率特性要求不严的收音机和磁带录音机。不妨看以下事实：

变压器输出的收音机的频率下限为

袖珍式	500Hz
便携式	300Hz
台式	200Hz

而一台高保真度扩大机（变压器输出的）带宽也只有30Hz~15KHz，这时变压器已较大，还要用复杂的方法绕制，以解决因变压器大，线圈多，漏感大而影响的的高频特性。（当然也有喇叭的频响等问题，与讨论问题无关，这里就不提了）。

从以上可看出，当用较大变压器有满足低频特性要求的可能，但又使高频特性变坏。如何解决这个矛盾，将是我们所要研究的。

变压器级是用变压器作级间耦合元件，当信号经过变压器后将失掉直流成份，为此要在变压器后加一级“强迫箱位电路”，强迫所有黑色电平箱位到零伏上，强迫箱位电路输入阻抗很高约500K $\Omega$ ，所以可以把这一级电路等效为一个电阻记为 $R_2$ ， $R_2=500\text{K}\Omega$ ，强迫箱位电路不在这叙述。又因视频电路的输出信号峰值为4伏，采样保持电路要的是4伏，所以变压器的变换系数为1，即：



$$n = \frac{W_2}{W_1} = 1$$

到此为止，变压器级的后级电路及变压器的变比均可以定下，下面主要讨论变压器及前级电路。

### 〈一〉设计原理

首先找影响低频特性的因素，好从中找出最佳办法。

众所周知，变压器级在低频区的全等效电路如图一(a)

∵  $r_2' \ll R_2'$   $r_2'$ 可以忽略 ∴等效电路可简化为图一(b)，此时输出阻抗为：

$$R_o = \frac{(R_s + r_1) R_2'}{R_s + r_1 + R_2'}$$

又∵  $R_s + r_1 \ll R_2'$ ， $R_2'$ 又可忽略

$$\therefore R_o = R_s + r_1 \quad (1)$$

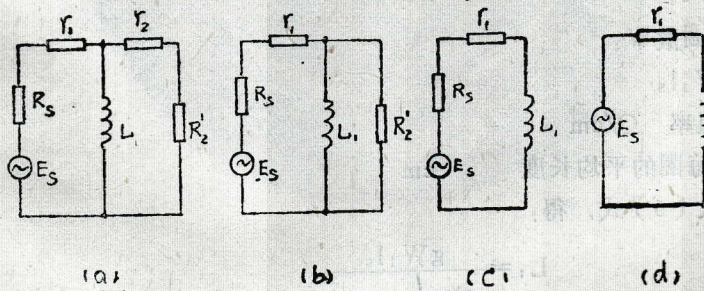
此时等效电路可进一步简化为图一(c)

从图一(c)可写出变压器低频特性方程：

$$K_l = \frac{K_o}{1 + \sqrt{\frac{R_s + r_1}{W_l + L_1}}} \quad (2)$$

式中： $K_l$ 、 $K_o$ 分别为前级电路在低频区和中频区的电压放大倍数；

$W_l$  下限角频率。



图一 变压器低频区等效电路

图中： $E_s$  前级电路输出信号电压值；

$R_s$  前级电路输出电阻；

$L_1$  变压器初级线圈的电感量；

$r_1$  初级绕线电阻；

$r_2'$  次级线圈折合到初级的绕线电阻

$$r_2' = r_2 / n^2 = r_2;$$

$R_2'$  次级电路输入电阻折合到初级的电阻值  $R_2' = R_2 / n^2 = R_2.$

(2) 式又可写成畸变系数表达式



$$M_1 = \sqrt{1 + \left(\frac{R_s + r_1}{W_1 L_1}\right)^2} \quad (3)$$

前从(3)式解出 $L_1$ , 得:

$$L_1 = \frac{R_s + r_1}{W_1 \sqrt{M_1^2 - 1}} \quad (4)$$

现在分析一下: 作为变压器放大器,  $\because R_s$ 很大, 通常 $r_1$ 可忽略, 低频特性由 $R_s$ 决, 要求 $L_1$ 很大, 从而漏感大, 高频特性变坏, 所以以前各书中介绍的经验公式不能用, 要找新的路子。

假如, 只作为隔离用不需要放大, 使 $R_s \rightarrow 0\Omega$  (这在有运算放大器的今天很易达到) 情况就要变化。这时

$$R_o \doteq r_1$$

等效电路进一步可简化为图一(d)。

则(4)可变为:

$$L_1 = \frac{r_1}{W_1 \sqrt{M_1^2 - 1}} \quad (5)$$

$\because r_1$ 是初级线圈绕线电阻, 阻值很小。

$\therefore$ 在满足 $M$ 情况下,  $L_1$ 必将也很小, 给绕制线圈带来方便,  $L_1$ 小初级线圈圈数可少, 漏感小, 高频特性也可提高。理论分析甚低频高保真变压器级可以实现。

## (二) 变压器的绕制

变比已定:  $n=1$ 。

再求初级绕线圈数 $W_1$ 。

$$\because r_1 = g W_1 l_s$$

式中:  $g$  绕线电阻率  $\Omega/\text{cm}$

$l_s$  绕线线圈每圈的平均长度  $\text{cm}$

将(6)式代入(5)式, 得:

$$L_1 = \frac{g W_1 l_s}{W \sqrt{M_1^2 - 1}} \quad (7)$$

又从电子学公式可知, (变压器无间隙)

$$L_1 = \frac{0.4\pi\mu W_1^2 S_o}{l_c 10^8} \quad (8)$$

式中:  $l_c$  铁芯中磁力线平均长度  $\text{cm}$ ;

$S_o$  铁芯有效截面积, 占空系数取0.85。

从(7)式与(8)式可解出 $W_1$ , 得:

$$W_1 = \frac{10^8 l_c l_c g}{0.4\pi\mu S_o W_1 \sqrt{M_1^2 - 1}} \quad (9)$$



经选择采用一种舌宽为1.75cm的优质矽钢片，当叠厚为2cm时：

$$l_c = 13.75\text{cm}, \quad l_s = 11.5\text{cm},$$

$$S_0 = 1.75 \times 2 \times 0.85 = 2.975\text{cm}^2, \quad \mu \text{取} 800,$$

$$\text{线圈线径取 } \phi = 0.21\text{mm},$$

$$g = 506 \times 10^5 \Omega/\text{cm}, \quad M_1 = 1.12, \quad W_1 = 2\pi \times 5 = 10\pi,$$

将上列数据代入(9)式，得：

$$W_1 = \frac{10^8 \times 13.75 \times 11.5 \times 506 \times 10^{-5}}{0.4\pi \times 800 \times 2.975 \times 10\pi \sqrt{1.12^2 - 1}} = 1688 \text{ (圈)}$$

铁芯窗口为 $3.2 \times 0.9 = 2.88\text{cm}^2$ ，当线径为 $\phi = 0.21\text{mm}$ ，可绕40圈/cm，窗口内可绕 $40^2 \times 2.88 = 4608$  (圈)

考虑线圈间绝缘厚，实绕  $W_1 = 1718$ 圈，此时： $r_1 = 100\Omega$

将1718圈分成两段，即将两个859圈的线圈并联，这时 $r_1 = 100/4 = 25(\Omega)$ ，从(5)式可知在 $M_1$ 给定时 $L_1 \propto r_1$ ，并不影响低频特性。这样可用较少圈数，即可满足低频特性要求，又减少了漏磁，加上采用分段分层，两邻层正反绕制，高频性能也大大改善。

### (三) “零” 欧姆输出级

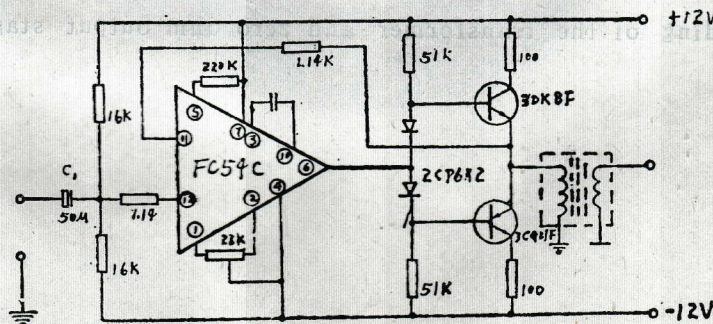
低阻抗输出级一般取射随级，本电路采用了互补式射级输出级，它由PNP和NPN晶体管组成推挽式射极输出电路，输出阻抗不随信号变化，效率较高，最大不失真跟随幅度(峰值)可达 $\pm 5$ 伏。

这个电路输出阻抗约为 $8\Omega$ ，测量方法为空载时量，输出电压为 $V_0$ ，当输出端接一电阻 $R_L$ (如 $R_L = 200\Omega$ )时，量输出电压为 $V_L$ ，则输出阻抗 $R_0^1$ 为

$$R_0^1 = R_L \frac{V_0 - V_L}{V_L} \quad (10)$$

条件为输出波形不失真。

将这个互补射随级作为运算放大器的输出级，组合后的运放再接成射随器，从而组成一“零”欧姆输出级，见图二。



图二 零欧姆输出级电路

其总的输出阻抗 $R_0$ 为

$$R_0 = \frac{R_0^1}{1 + K\beta}$$

本运放 $K > 10^5$ ，反馈系数 $\beta = 1$ ，则



$$R_o < \frac{8}{1 \times 10^5} = 8 \times 10^{-5} \Omega \rightarrow 0 \Omega$$

本变压器级实测在1Hz~90KHz带宽内基本可以不畸变地传递交流信号。与通道部分的予放、视放联接后，测总的频率特性，带宽为1Hz~90KHz，满足总体要求有余。

## DEVELOPMENT FOR THE TRANSFORMER GROUP WITH VERY-LOW FREQUENCY WIDE BAND-WIDTH AND HIGH-HIDELITY

Ren Fang-hai

(Chang Chun Institute of Physics)

### Abstract

This transformer group is used in STM's (Solar Magnetic Field Telescope) camera system, it is developed isolate analog earth from digital earth for the requirement of A/D conver. The transformer's design index is transmitting +5V (P.-P.) alternating signals within 5Hz-60KHz with frequency distortion smaller than  $\pm 1\text{db}$ . Actual measurements show ed it can do that within 1Hz-90KHz and satisfies the design index excessively. To make the low-frequency and high-frequency chacters be both good is usually very difficult, but we have made a clever circuit that can solve the contyadictory of good character at two frequencies. The paper shows the composition of tyansformer group, design principles, formular interence and calculation, and also presents the theory foudation of realizing thr group and practical equations. Paper also states the winding of the transformer and zero ohm output stage circuit for the group

