

精密电容比较仪

中国计量科学研究院
电磁室 试验室
计标电容课题组

1974.12

前 言

本比较仪是为了计算电容基准器传递过渡而研制的。其基本考虑是为适应把名义值为 1 PF ，定义精度 1×10^{-6} 的计算电容基准器，在角频率为 $\omega = 10^4\text{ C/s}$ 下，过渡到名义值为 10 ， 10^2 ， 10^3 ， 10^4 PF 各工作基准电容器而设计的。单次传递综合误差要求 $\leq 2 \times 10^{-7}$ 。

一般情况下，本比较仪可对精密电容器进行高精度的比较测量。

本文 对比较仪有关技术内容给予概要的介绍。

目 录

前言

一、测量线路方案介绍	1
1、方案特点	1
2、测量线路原理电路图	2
二、比较仪的比率臂	4
1、比较仪比率的标定方法	4
2、标准分压器	6
3、比率臂用主分压器	16
4、比率臂比率调整与比率标定	17
5、比率臂比率的标定结果	20
6、比率臂的屏蔽保护	22
三、比较仪的微差补偿方法	22
四、比较仪的灵敏度	24
1、比较仪对平衡指示器灵敏度的要求	24
2、在指零仪输入端并接高Q电感, 提高等效信噪比	26
3、用“高一位定低一位法”提高灵敏度	29
五、测量引线的误差讨论与实验	31
1、引线误差的理论分析	31
2、测量引线误差实验	35
六、结论	37
结束语	37
参考资料	38

一、测量线路方案介绍

1. 方案特点：总体测量线路是一个四臂变压器电桥线路。对于比较仪的比率臂、被比较的两阻抗微差的平衡补偿方式及测量接入方式是测量线路方案需要给予介绍的具体内容。

(1) 采用“组合铁心”感应式比率臂：据所见国外同类比较仪中，均采用隔离式单铁心感应比率臂（称它“三绕组”式），为了降低输出阻抗，主分压器在工艺上都是花了工夫的，但由于外负载电流是直接流过比率绕组的，当被测电容较大时，仍有很可观的负载效应，限制了比率臂比率精度的提高。

本比较仪主分压器采用了带一个附加铁心的组合铁心线路（称为：“二、三绕组式”）。其比率绕组具有很高的等效输入阻抗和很低的输出阻抗，没有外负载效应，且制作工艺方便。

值得提出的是，对于比率臂比率的标定方法，本比较仪采用了比率臂与一个高精度的单挡标准分压器对检法。而国外多采用（ $n+1$ ）个（ n 为名义比率）低电容值的精密电容器轮换测量法。对检法较之电容器轮换法实验简便易行又可保证更高的标定精度。

(2) 微差补偿采用在平衡支路中注入电势的办法。（图1）据所见国外多采用注入电流的办法（图2）。图1可看作比率是可调的；图2可看作标准臂是可调的。

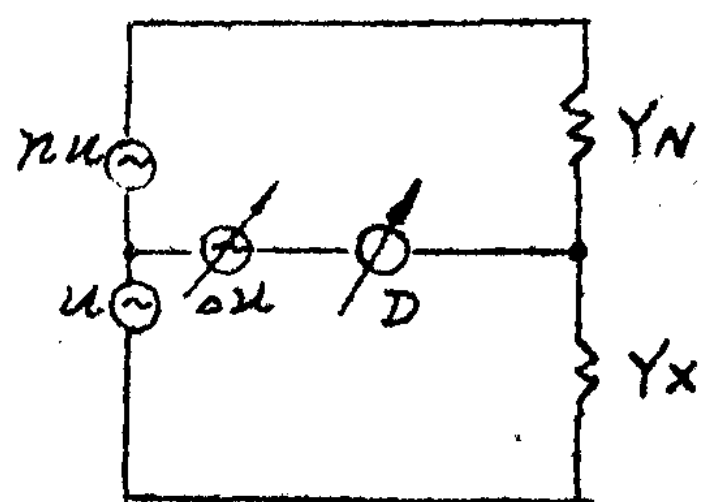


图 1

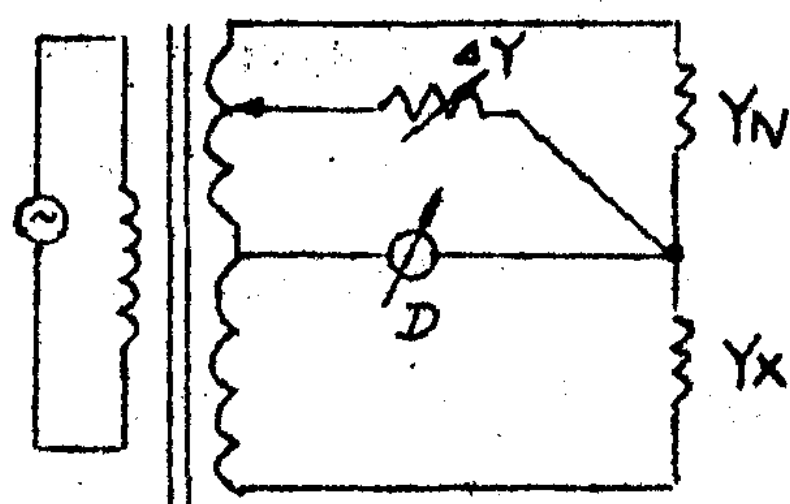


图 2

两种方式比较可指出：第一，图1方式可以回避了微小电容值的电容器加工与测试；第二，微差电势整个系统可以与测量回路做到电气上完全隔离，对于比率臂的比率没有负载效应。

(3) 被测比较两阻抗采用“二端”测量方式：“二端”测量（电容测量实际是“三端”）适用于高阻抗比较。对于低阻抗比较，由于引线和之间的跨线将带来很大误差，故低阻抗比较要求精度较高时，均采用“四端”测量方式。对于我们的基本测量对象，（保证预定精度）最大为 10^4 PF，在 $\omega = 10^4$ C/S 时，阻抗 $Z_C = 10^4 R$ 。如引线寄生电感为 L ，则附加误差为 $\omega^2 LC$ ，要求 $\omega^2 LC < 1 \times 10^{-7}$ 时，即要求 $L < 0.1$ MH，这个要求是较苛刻的，但我们可以采取某些措施，在较长引线下进行“二端”测量，仍可满足要求。（以后讨论引线误差时，将予以介绍）

与“四端”测量相比，“二端”测量线路简单。而且在计算电容进行过渡时，各标准电容器需放在单独的恒温箱中，“二端”测量方式在实验操作上是有很大方便之处的。

顺便说明一下，按比较仪的基本任务，即计算电容过渡，只需 10:1 一个名义比率。但是考虑到实用上的灵活余地，同时增设了 1:1，2:1，5:1 三个比率。

2. 测量线路原理电路图：图3中

T_1 ——主分压器。为“二三绕组”方式。

T_2 ——补偿电势注入变压器。

$R_1 C_1, R_2 C_2$ ——辅助平衡支路。

D_1 ——主平衡指零仪。

D_2 ——辅助平衡指零仪。

U ——电源。

微差补偿电势部份，包括：

- ① 同相分量由三位和五位分压器供给。
- ② 直角分量由另一个三位和五位分压器，和 $\pi/2$ 移相的运算放大器提供。

C_N —— 标准电容器。

C_x —— 被测电容器。

二、比较仪的比率臂

1. 比较仪比率的标定方法：比率检定方法是本比较仪比率臂比率精度保证的基础。

(1) 基本方法：前面方案讨论中所介绍的“对检法”就是比率的基本标定方法。“对检法”首要的是先要具备一个高精度的单档标准分压器，而这个标准分压器高精度的标定是依赖于本室的感应分压器复数比率校验装置而实现的。（该装置校验精度，折算到分压器输出端优于 3×10^{-8} ）。

标准分压器与比率臂对检，即标定了比率臂比率。

(2) 辅助方法：对于比较仪的 $1:1$ 这个比率还以“电容器轮换法”进行了标定，做为基本方法的补充。

具体方法是运用两个放于恒温箱中的同名义值同类电容（ 10PF ）进行交换比对测量。见图4，

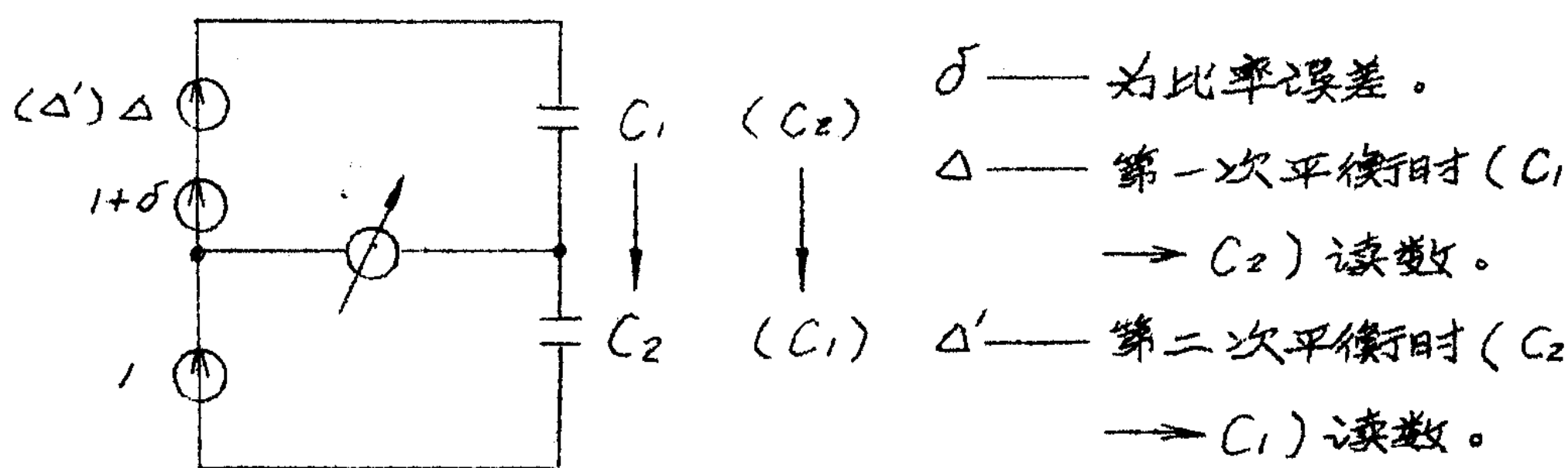


图4

列出两次平衡方程

$$\begin{cases} (1 + \delta + \Delta) C_1 = 1 \cdot C_2 \\ (1 + \delta + \Delta') C_2 = 1 \cdot C_1 \end{cases}$$

由方程可得，

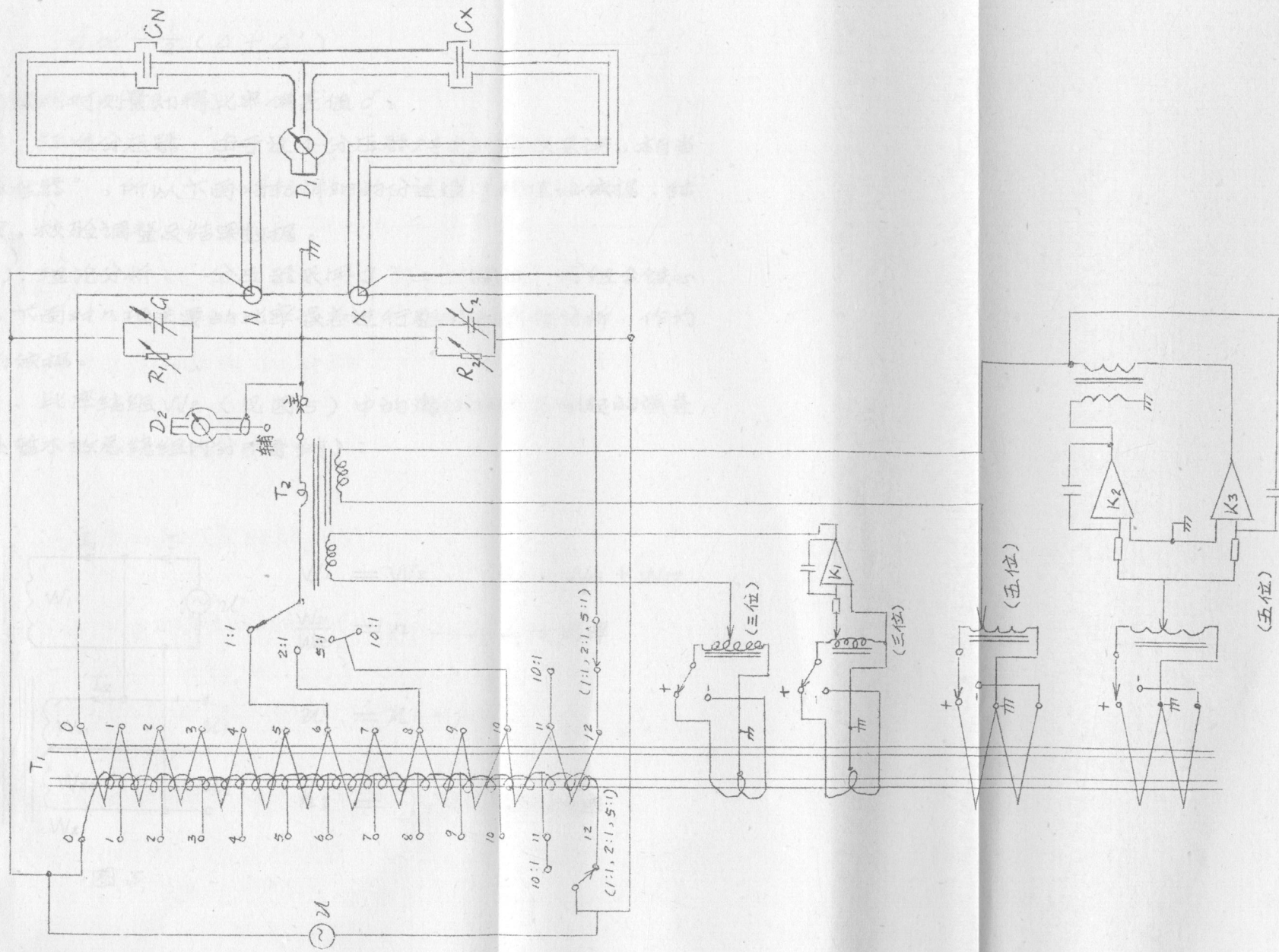


图 3

$$(1 + \delta + \Delta)(1 + \delta + \Delta') = 1$$

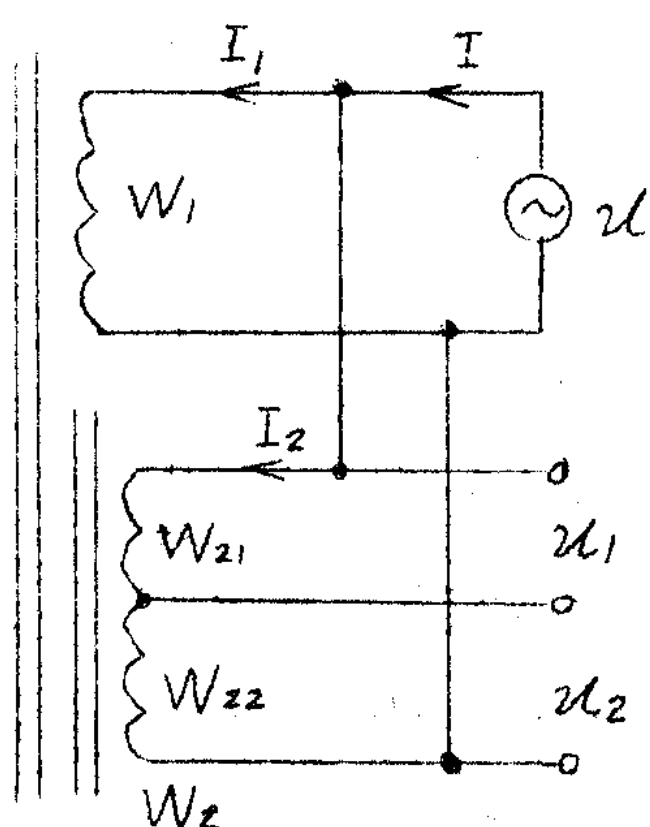
$$\delta \approx -\frac{1}{2}(\Delta + \Delta')$$

两次比对测量即得比率偏差值 δ 。

2. 标准分压器：由于这个分压器对于比较仪来讲，相当于“基准器”，所以下面将较详细的分压器设计的理论依据、结构参数、校验调整及结果数据。

(1) 理论分析：分压器采用了“二三绕组”式组合铁心线路。下面对几项主要的比率误差进行粗略的定性分析，作为设计的依据。

A. 比率绕组 W_2 （见图 5）中的激磁电流 I_2 引起的误差（此处暂不考虑绕组内分路导线）：



$$W_1 = W_2, \quad W_2 = W_{21} + W_{22}$$

$$\frac{W_{21}}{W_{22}} = n \quad \text{—— 名义比率}$$

$$U = U_1 + U_2$$

$$k_I = \frac{U_1}{U_2} \quad \text{—— 实际比率}$$

图 5

为了求出 W_2 绕组的激磁电流 I_2 ，画出等效电路图 6，

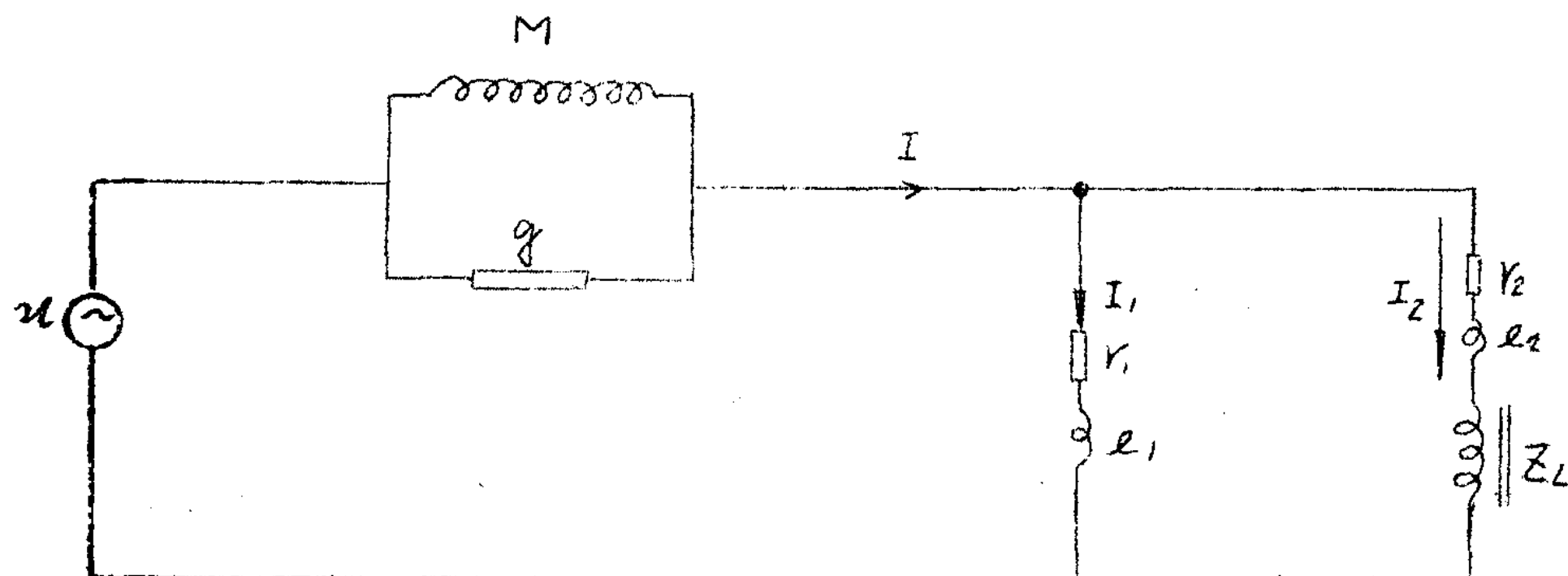


图 6

$(g + \frac{1}{j\omega M})$ ——— 绕组 W_1 与 W_2 间互导纳。

M ——— W_1 绕组等效铁心电感。

g ——— W_1 绕组等效铁心电导。

$r_1 (r_2)$ ——— $W_1 (W_2)$ 绕组铜线电阻。

$l_1 (l_2)$ ——— $W_1 (W_2)$ 绕组相对 $W_2 (W_1)$ 的漏感。

Z_L ——— W_2 绕组由附加铁心引起的等效阻抗。

$$Z_L = r_L + j\omega L \approx j\omega L$$

由等效线路可求得，

$$I_2 \approx u \left[-\frac{1}{\omega L} \left(\frac{r_1}{\omega M} + g\omega l_1 \right) + j \frac{1}{\omega L} \left(\frac{l_1}{M} + g r_1 \right) \right]$$

推算一下 I_2 流过 W_2 时引起的比率误差 γ_I ，

$$\text{设} \begin{cases} Y_2 = Y_{21} + Y_{22} \\ L_2 = L_{21} + L_{22} \end{cases}$$

显然，仅当

$$\begin{cases} \Delta Y_2 = Y_{21} - n Y_{22} \neq 0 \\ \Delta L_2 = L_{21} - n L_{22} \neq 0 \end{cases}$$

I_2 流过 W_2 才引起比率误差 $Y_2 \neq 0$ ， $k_I = n(1 + Y_I)$

$$Y_I = (\Delta Y_2 + j\omega \Delta L_2) I_2 / n U_2$$

代入 I_2 ，经整理后得

$$Y_I \approx (1 + \frac{1}{n}) \left\{ \left[-\frac{\Delta Y_2}{\omega L} \left(\frac{Y_1}{\omega M} + g\omega l_1 \right) - \frac{\Delta L_2}{L} \left(\frac{l_1}{M} + g\mu \right) \right] \right. \\ \left. + j \left[\frac{\Delta L_2}{\omega L} \left(\frac{l_1}{M} + g\mu \right) - \frac{\Delta Y_2}{L} \left(\frac{Y_1}{\omega M} + g\omega l_1 \right) \right] \right\}$$

易见，为了使 $Y_I \downarrow$ ，设计时应考虑到，

增大 M ， L —— 即当 $\frac{W_1}{W_2}$ 一定时，用高 M 铁心。

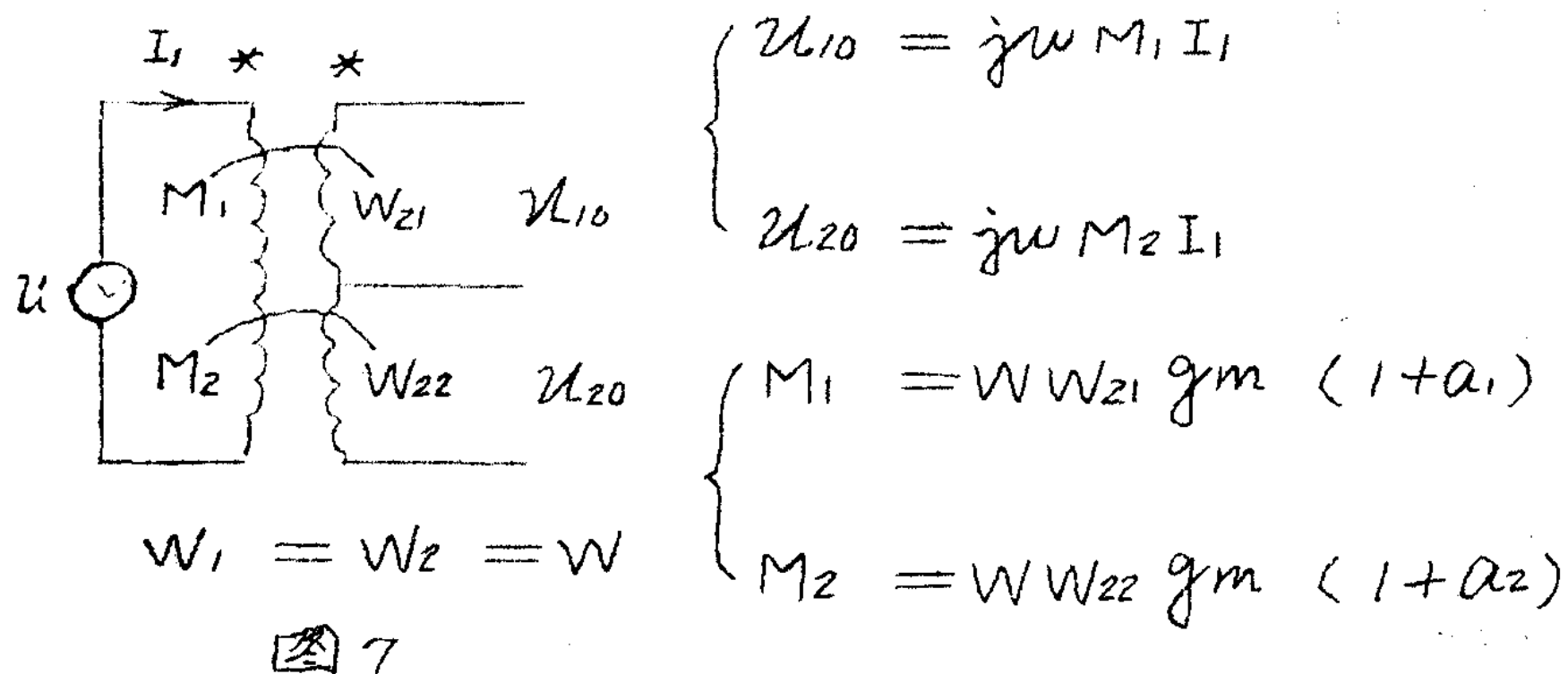
减小 l_1 —— 采用环形铁心， W_1 均匀排绕提高无定向性。

减小 Y_1 —— W_1 绕组尽量用较粗铜线。

减小 ΔY_2 和 ΔL_2 —— W_2 绕组采用分段绞绕。

实际上，当采用环形高 M 坡莫合金作铁心，同时按上述原则安排工艺，工作频率在几 kHz 以上， Y_I 不难做到小于 1×10^{-8} ，这在一般情况下，是完全满足要求的。

B、漏磁系数引起的比率误差 Y_M ：主要是指 W_1 绕组对 W_{21} 和 W_{22} 耦合系数不等。



g_m —— 铁心回路磁导

a —— 漏磁系数

$$\text{则, } \frac{\mathcal{U}_{10}}{\mathcal{U}_{20}} = \frac{M_1}{M_2} = \frac{W_{21}}{W_{22}} \frac{1+a_1}{1+a_2} \approx n_0 (1+a-a_2) = n(1+Y_M)$$

$$\therefore Y_M = a_1 - a_2$$

说明为减小 Y_M , 尽量要减小 $(a_1 - a_2)$, 前述增强 W_1 的无定向性和 W_2 绞绕办法都有利于 $(a_1 - a_2) \downarrow$ 。我们主要措施是把附加铁心兼做 W_1 和 W_2 之间的磁屏蔽。

C, 绕组 W_2 段间及匝间寄生导纳引起的比率误差 Y_r : 这是工作频率较高时, 最重要的误差源, 通常称做“内负载效应”。

W_2 采用绞线绕制时, 主要是段间导纳起作用。匝间导纳的影响可忽略。段间导纳可折算到抽头间的集中导纳形式, 如图 8 所示

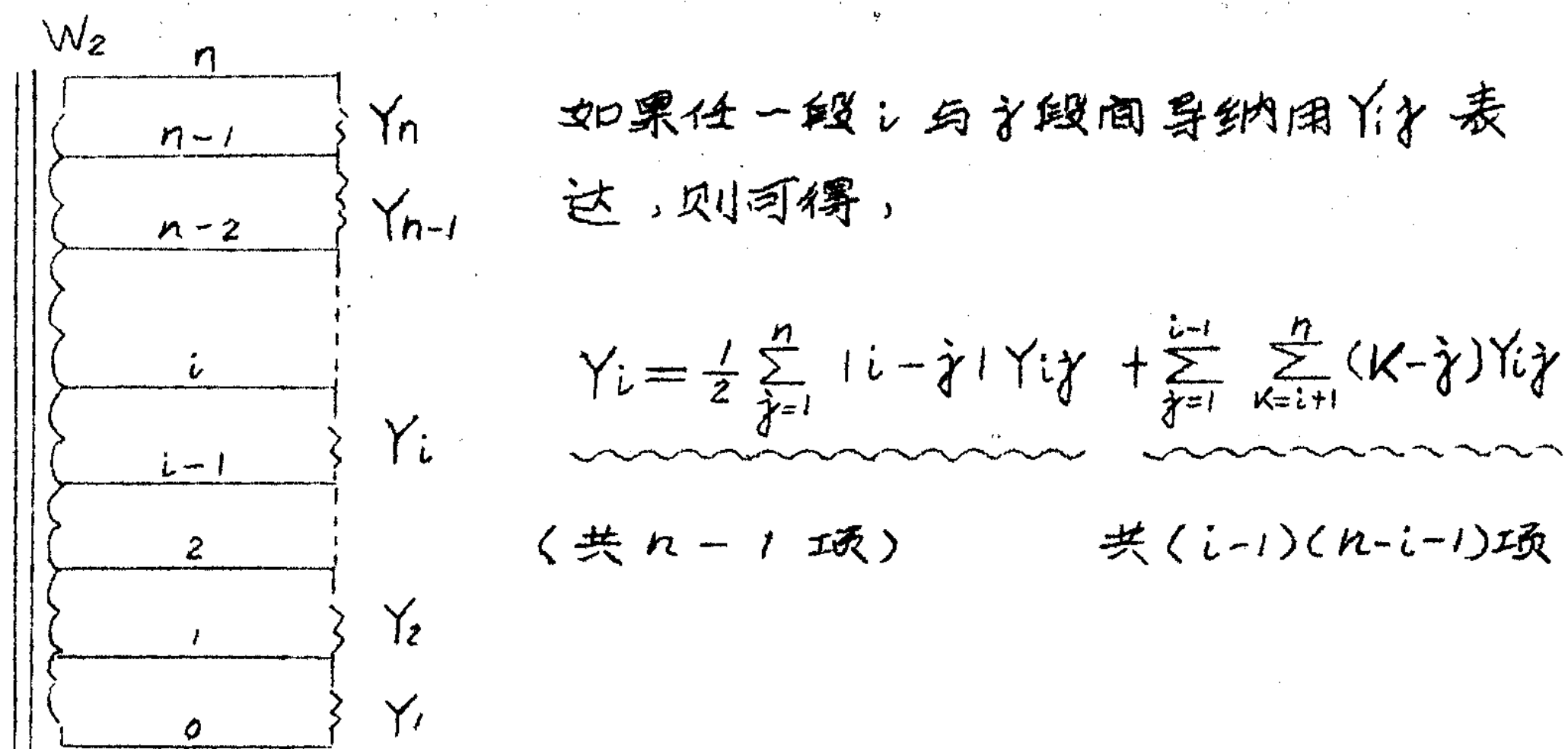


图 8

由前面分析可知, 如果不考虑内负载 Y_i 影响, 比率绕组 W_2 各段电压分布是足够均匀的。当 $Y_1 = Y_2 = \dots = Y_i = \dots = Y_n$ 时, 可认为内负载是不引起附加误差 Y_i 的。但未经调整的分压器 Y_i 分布是不等的。由 Y_i 表达式具体计算可得 Y_i 分布规律如图 9,

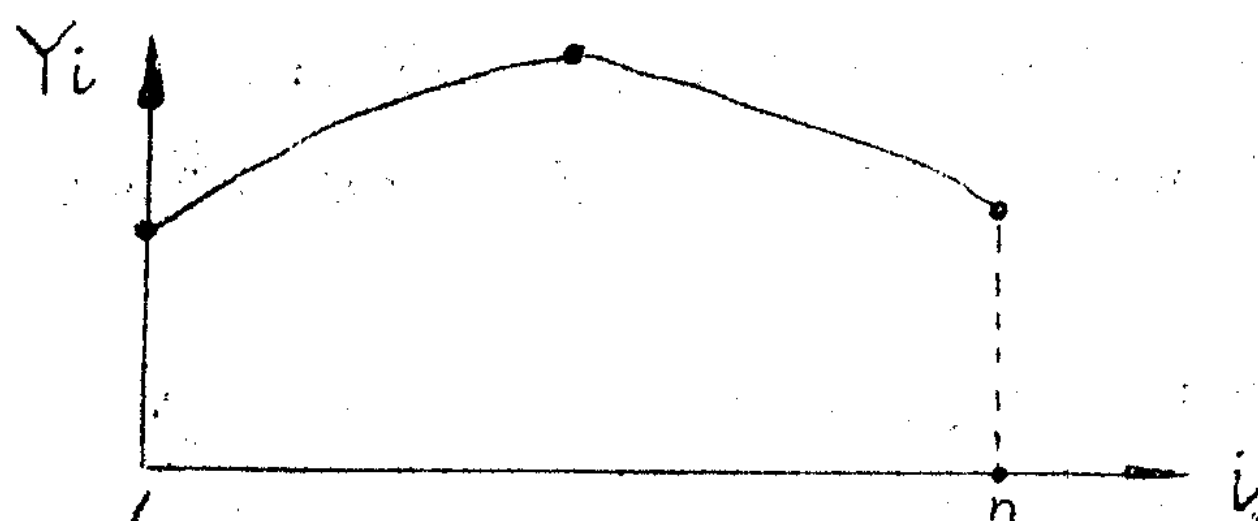


图 9

由于 W_2 绕组各段存在有限的输出阻抗, 这样就产生“内负载”误差效应。可以简单地估计内负载对 W_2 各段电压分布均匀性影响的上限。为此, 假定某段漏阻抗为 $(Y + j\omega L)$,

该段内负载为 $Y = g + j\omega C$ ，那么对该段电压相对影响为，

$$\begin{aligned}\Delta &= -(r + j\omega l)(g + j\omega C) \\ &= (\omega^2 l C - gr) - j(\omega Cr + \omega l g)\end{aligned}$$

当 W_2 采用漆包线绕时，通常分布电容的损耗正切 $\tan \delta \sim 10^{-2}$ 量级，而实际中 $Y \approx \omega l$ 。则

$$\Delta \approx \omega^2 l C - j\omega Cr$$

<例> 取 $C = 5000 \text{ PF}$ ， $r = 0.1 \Omega$ ， $\omega l = 0.02 \Omega$

$$\Delta \approx 1 \times 10^{-6} - j 5 \times 10^{-6}$$

由此例可见，内负载效应是严重的。故高精度分压器一定要加调整。

同时指出，由于绕组 W_2 段间分布导纳的存在，则在 W_2 两端间相对电源存在一个较大的等效导纳，因而在绕组 W_2 到电源间的引线上将流过较大的容性电流，在引线寄生阻抗上产生压降，这是比率误差的来源之一，这是要加以重视和采取措施解决的。

标准分压器中，比率绕组是用自制同轴电缆线分段绕的。其芯线做为比率绕组 W_2 ，屏蔽做为等电位屏蔽绕组 W_2' 。之所以这样做有二个考虑，一是为了降低比率绕组的角差（后面将予说明原因），从而有利于使用“感应分压器复数比率校验装置”进行校验时保证比差校验精度（该装置补偿电势中直角分量移相误差较大）。同时由于 W_2 外面有了等电位屏蔽，使得 W_2 对外界泄漏就固定下来了，提高了比率的稳定性。

由于等电位屏蔽绕组 W_2' 存在内负载效应，将通过互感和漏导纳间接影响比率绕组 W_2 各段电压分配的均匀性。

W_2 和 W_2' 是同轴的，对应段间导纳是较大的，由于两个绕组对应点间不是严格等电位的，因而会产生漏电流，但是两绕组对应点间电位是十分接近的，所以此影响可忽略。

下面分析一下， W_2 和 W_2' 间通过互感的影响。因是同轴结构，而且芯屏向绝缘介质很薄，显然两绕组对应段间互感大于该段与其他段间互感。把 W_2 某段与 W_2' 对应段间互感和 W_2 某段与 W_2' 其他段间互感差值，近似用同一值表示，记作 δM 。 W_2' 绕组中各段流过的内负载电流，就会通过 δM 在 W_2 对应段上产生感应电势。由于 W_2' 各段内负载电流不同，所以在 W_2 各段上感应电势不等，即影响了 W_2 各段电压分布的均匀性。用图 10 等效电路估计一下影响量级，以第 i 段为例。

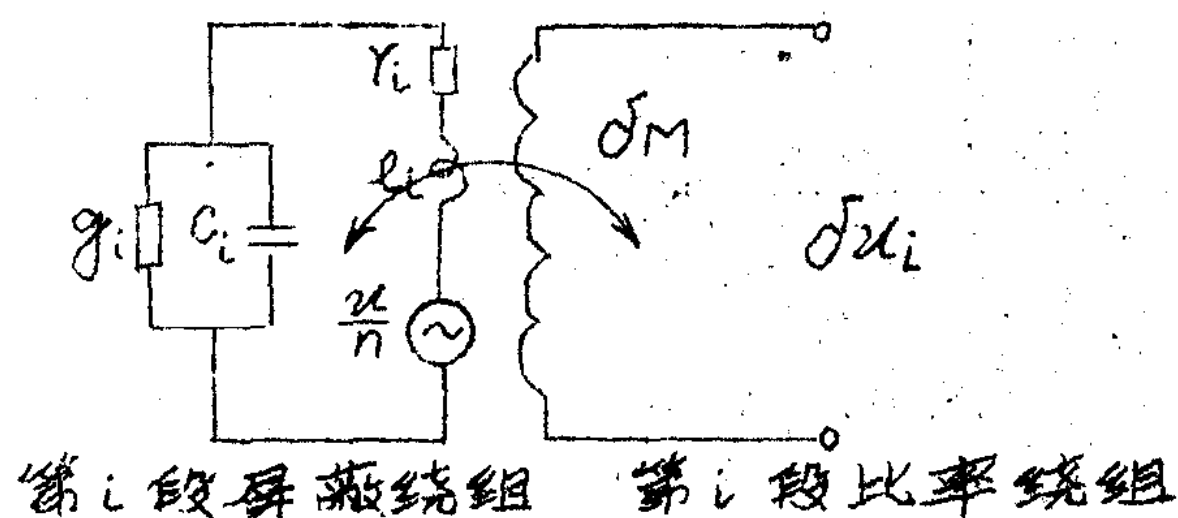


图 10

$$\delta u_i = j\omega \delta M (g_i + j\omega C_i) \frac{u}{n}$$

$$\Delta_i = \delta u_i / \frac{u}{n} = \underbrace{-\omega^2 \delta M C_i}_{\text{电容分量}} + \underbrace{j\omega \delta M g_i}_{\text{电导分量}}$$

由 Δ_i 表达式看到： W_2' 内负载导纳的电容分量 C_i 影响 W_2 绕组比率的比差，而电导分量 g_i 影响角差。在实用频带

内 $\omega C_i \gg g_i$ (约二个量级以上)。

<例>假定,

$$10 = 10^4, \quad \sigma_M = 0.5 \text{ MH}, \quad C_i = 10^3 \text{ PF}, \quad g_i = 10^{-2} \omega C_i$$

$$\Delta v \approx -5 \times 10^{-8} + \gamma 5 \times 10^{-10}$$

由分析和上例看到, 由于 W_2 外加等电位屏蔽绕组 W_2' , 使得比率的偏差大为改善, 不须再加调整了。而比率的比差分量, 可以人为地调整 W_2' 段的等效电容 C_i , 使之满足,

$$C_1 = C_2 = \dots = C_n$$

此时 W_2' 各段电压分配趋近相等, 从而使得 W_2 各段电压分配均衡。后面将要谈到, 标准分压器比差的调整即用这种方法。

(2) 结构与参数: 由图 11 所示,

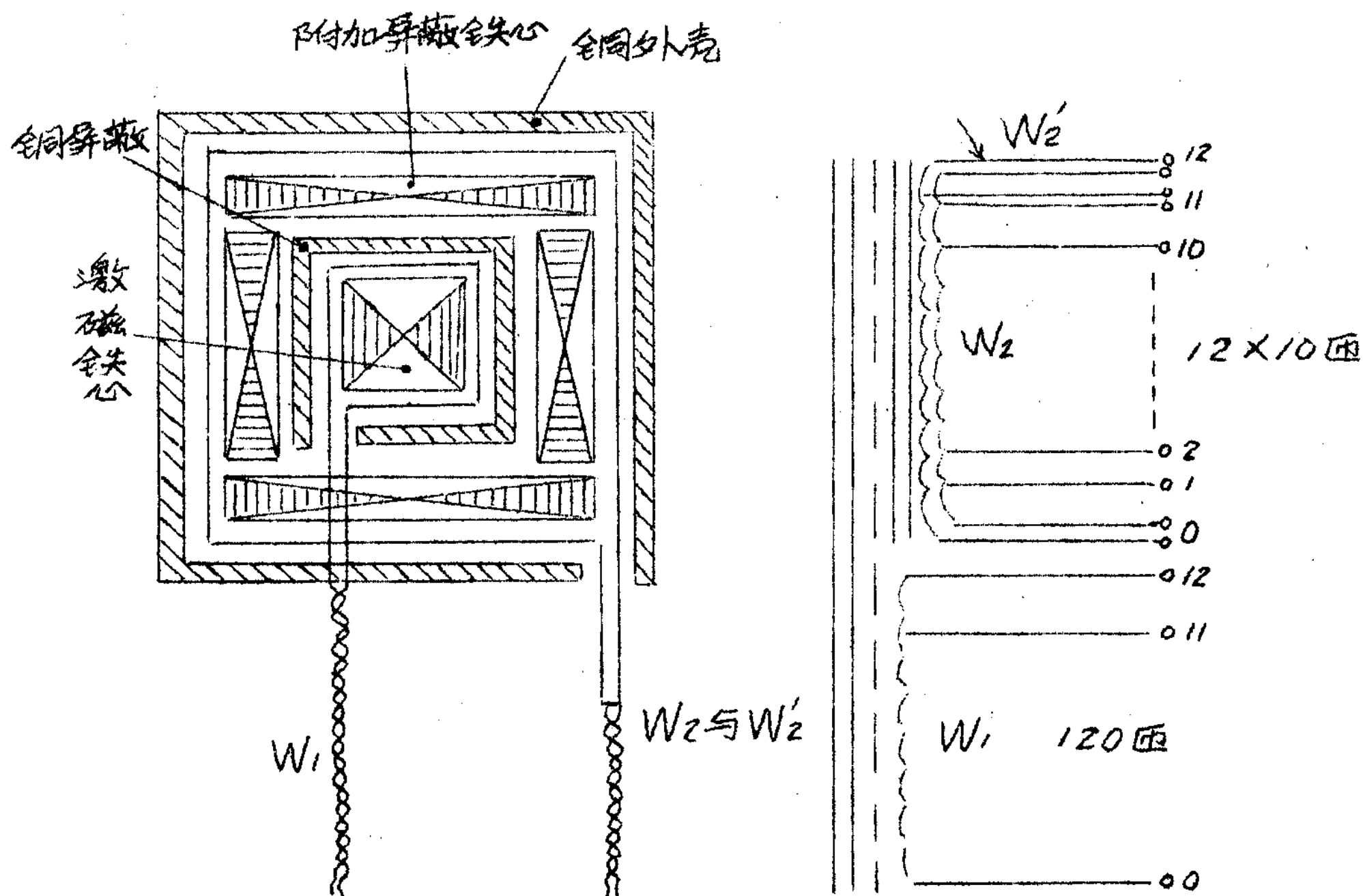


图 11 标准分压器

环形铁心材料是由厚 0.05 mm 的坡莫合金 (Ni 79MO4) 带迭成的。铁心截面 $40 \times 40 \text{ (mm)}^2$ ，圆环平均直径 120 mm。激励绕组 W_1 单层均匀排绕，绕组 W_2 (W_2') 作 12 段绞合在一起，将绞线均匀绕在双铁心环上。(10:1) 时取用 11 段，(5:1, 2:1, 1:1) 时取用 12 段。 W_2 与 W_2' 为同轴结构的芯与屏蔽。附加屏蔽铁心是在激励铁心和 W_1 之外，即做附加铁心又作磁屏蔽。

(3) 标准分压器的校验与调整：

标准分压器的校验是应用本室的“感应分压器复数比率校验装置”进行的。采用“参教法”校验。

调整方式如前面所指出的方法，即予先测出 W_2 绕组各段间直接导纳，而后折算出各段的等效 Y_{i0} 来，然后人为加并电容，使其各段 Y_i 相等。下面给出标准分压器实际折算后得到的 Y_i 电容分量 C_i 及人为加并的电容 C_i' ：

$C_1 = 1264 \text{ PF}$	$C_1' = 6000 \text{ PF}$	$C_7 = 7786 \text{ PF}$	$C_7' = 0 \text{ PF}$
$C_2 = 3472 \text{ ''}$	$C_2' = 4300 \text{ ''}$	$C_8 = 7422 \text{ ''}$	$C_8' = 400 \text{ ''}$
$C_3 = 5259 \text{ ''}$	$C_3' = 2500 \text{ ''}$	$C_9 = 6672 \text{ ''}$	$C_9' = 1100 \text{ ''}$
$C_4 = 6472 \text{ ''}$	$C_4' = 1300 \text{ ''}$	$C_{10} = 5511 \text{ ''}$	$C_{10}' = 2300 \text{ ''}$
$C_5 = 7293 \text{ ''}$	$C_5' = 500 \text{ ''}$	$C_{11} = 3674 \text{ ''}$	$C_{11}' = 4100 \text{ ''}$
$C_6 = 7751 \text{ ''}$	$C_6' = 0 \text{ ''}$	$C_{12} = 1323 \text{ ''}$	$C_{12}' = 5700 \text{ ''}$

$$\operatorname{tg} \delta_i \sim 1 \times 10^{-2},$$

$$\operatorname{tg} \delta_i' \sim 1 \times 10^{-4}$$