

中国电机工程学会
高压测量及试验技术年会

论文报告

名称: 冲击电压测量

1000千伏屏蔽型电阻分压器
误差特性测量及设计

审核: 蔚华民

负责人: 蔡伯儒

参加人: 贺玉生 王 都

张定国 杨济三

第一机械工业部高压电器研究所

一九六五年十月

内 容 提 要

本报告谈及用方波响应法测量屏蔽型电阻分压器误差特性，内容共分四部份：

一、方波响应的理论部份：通过这部份的简明分析，明确方波响应法的物理概念，了解分压器误差特性是由其组成参数来决定。

二、试验部份：这一部份主要包括着一定陡度方波的产生、测量和被试分压器的方波响应、误差特性以及球极伏秒特性测量等一系列实际试验工作和测量方法。

三、1000伏屏蔽型电阻分压器设计部份：这一部份主要是提出设计分压器时参数的正确选择和结构考虑等问题。

四、结论。

一、方波响应的理论部份

根据目前世界各国和 IEC 标准规定：冲击电压测量系统误差特性的确定，一般说采用如下三种试验方法来进行：

- (1) 方波响应法。
- (2) 频率响应法。
- (3) 比较测量法。

从各高压试验室进行这方面工作所截文献资料来看，按第一种方法进行的工作最多。这是因为这种方法具有与分压器在进行冲击电压测量工作状况可直接比拟的关系，另外，这种方法的物理意义也较明确，特别是这种方法最适应于结构简便造价低廉的电压分压器误差特性的测量。关于方波响应法用于测量分压器误差特性的基本原理是：在分压器输入端加入一个方波，而将输出端的波形与输入端的方波进行比较，可以得出衡量分压器误差特性的基准量。这一部份的理论分析，仅是为了对报告后面部份的试验实测建立物理概念和指导实际工作的理论根据。

1. 冲击电压测量系统

包括高低压部份的冲击电压测量系统，一般原理线路图可用图 1 所表示的集中参数代

在图 1 虚线方框内示测量和示波器的测量系统，等效线路如图 2。

2. 方波响应的形成

如在图 2 输入端 a 加入的电压 $U_1(t)$ 为幅值为 1 的方波，则在输出端的电压 $U_0(t)$ [以 $U(t)$ 表

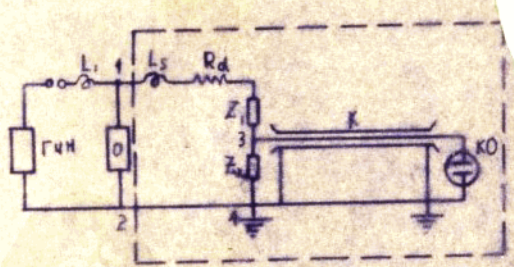
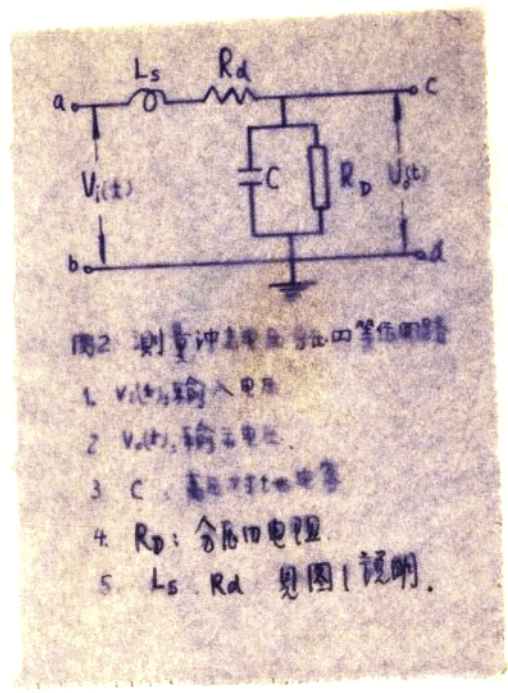


图 1 - 脉冲电压测量电路

1. ΓUH - 冲击电压发生器。
2. L_1 - 从冲击电压发生器到被试品连接电感。
3. L_2 - 从被试品到分压器串联电感。
4. 0 - 被试品。
5. R_d - 从被试品到分压器阻性电阻。
6. L_3, L_4 - 分压器高低压臂阻抗。
7. K - 高频测量电容。
8. KO - 高压示波口。

随时间 t 的变化将依
测量分压器的组成参数
 R_d L_s C 和 R_D 的不
同而具有如下四种形式
(参2)



(1) 过阻尼情况

$$U(t) \approx 1 - e^{-\beta t}$$

$$\approx 1 - e^{-\frac{t}{T}} \quad (1)$$

(2) 临界阻尼情况

$$U(t)$$

$$\approx 1 - e^{-\alpha t} - 2t e^{-\alpha t} \quad (2)$$

(3) 欠阻尼情况

$$U(t) = 1 - e^{-\alpha t} \sqrt{1 + \left(\frac{\alpha}{\omega_0}\right)^2} \cos(\omega_0 t - \varphi) \quad (3)$$

(4) 无阻尼情况

$$U(t) = 1 - \cos \omega_0' t \quad (4)$$

上式中

$$\alpha = \frac{1}{2} \left[\frac{R_d}{L_s} + \frac{1}{R_D C} \right] = \frac{2}{T_0} \quad (5)$$

$$T_0 = \frac{4}{\left[\frac{R_d}{L_s} + \frac{1}{R_D C} \right]} \quad (6)$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{R_d + R_D}{R_D} \frac{1}{L_s C}} \quad (7)$$

$$\varphi = \text{tg}^{-1} \left(\frac{\alpha}{\omega} \right) \quad (8)$$

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} \quad (9)$$

$$\omega_0' = \frac{1}{\sqrt{L_s C}} \quad (10)$$

$$P_2 = \alpha - \sqrt{\alpha^2 - \omega_0'^2} \quad (11)$$

式 (1), (2), (3) 和 (4) 其物理概念是表示出幅值为 1 的方波经过测量分压器传输后的波形畸变程度, 被称为方波响应。

3. 方波响应时间常数

经过分压器传输后的方波畸变程度大小可用下式定积分来衡量

$$T = \int_0^{\infty} [1 - f(t)] dt \quad (12)$$

式 (12) 的 T 实际上是代表着幅值等于 1 的方波与方波响应曲线间所围的面积, 被称为方波响应时间常数。它是分压器参数的函数, 以集中参数表示的各种情况的响应时间常数列于表 1, (参 2) 表 1

分压器类型	方波响应时间常数 T (微秒)			
	过阻尼情况	临界阻尼情况	欠阻尼情况	无阻尼情况
屏蔽型电阻分压器 或阻容混合式分压器	$\frac{L_s + R_d R_0 C}{R_d + R_0}$	$2R_0 C$ $(2 + R_0 \sqrt{\frac{C}{L_s}})$	$(R_d \frac{R_0}{R_0 + R_d} + \frac{L_s}{R_0 + R_d})$	~

4. 分压器方波响应时间常数与其进行测量时的误差关系

一般认为: 分压器用来测量冲击电压标准全波, 所形成的误差可以忽略不计。严重的是测量上升陡削、截断时间在 0.5

微秒以内的截波，这种波形可用图 3 的斜角截波来表示。为分析方便起见，图 3 实线表示的斜角截波可视为由图 4 (a) (b) (c) 三个图形合成。如以图 3 实线所表示的截断式斜角波

$$U_i(t) = at \quad (13)$$

施加到分压器方波响应该时间常数 T 为已知的图 2 输入端时，若该分压器的方波响应如呈现像式 (11) 所示的过阻尼情况，则输出端电压波形为

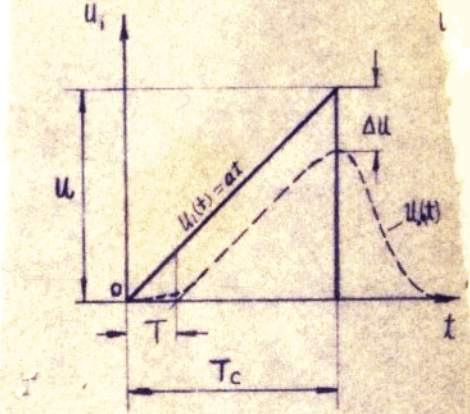


图 3. 在 T_c 截断的斜角波。

$$U_o(t) = at \left[1 - \frac{T}{T_c} (1 - e^{-\frac{t}{T}}) \right] \quad t < T_c \quad (14)$$

$$U_o(t) = at e^{-\frac{t}{T}} + aT_c \left(1 - \frac{T}{T_c} \right) e^{-\frac{t-T_c}{T}} \quad t > T_c \quad (15)$$

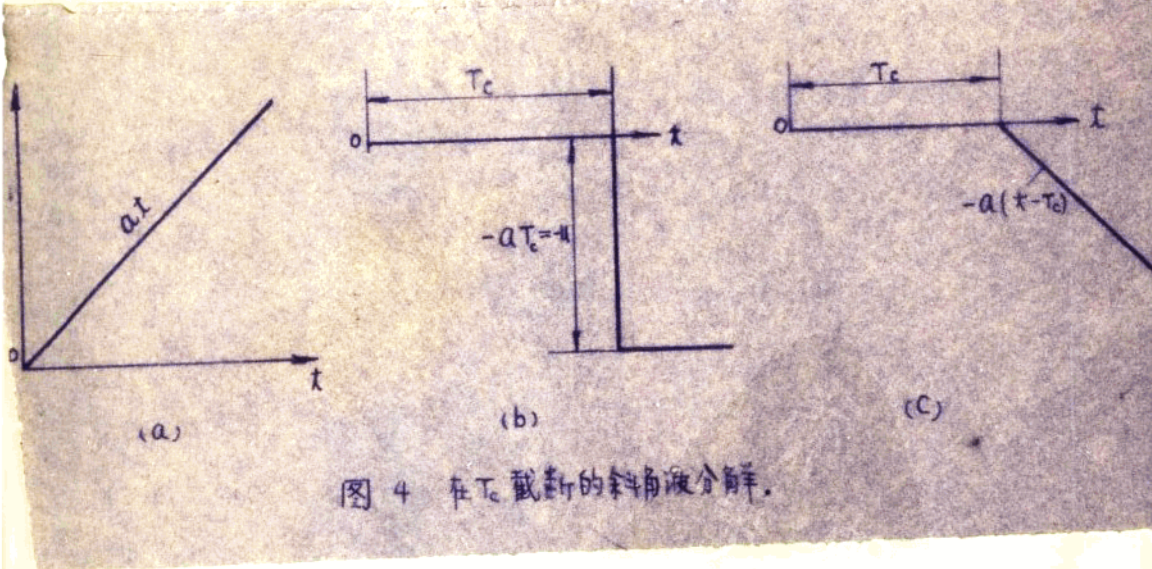


图 4 在 T_c 截断的斜角波分解。

$U_o(t)$ 见图 3 虚线所示。当 $t = T_c$ 时，输入的斜角波截断，此

时

$$U_i(T_c) = aT_c \quad (16)$$

$$U_o(T_c) = aT_c \left[1 - \frac{T}{T_c} (1 - e^{-\frac{T_c}{T}}) \right] \quad (17)$$

一般 $T_c \gg T$ 所以式 (17) 可近似等于

$$U_o(T_c) \approx aT_c \left[1 - \frac{T}{T_c} \right] \quad (18)$$

由式 (16) 和式 (18) 可得

$$\Delta U \% = \frac{U_i(T_c) - U_o(T_c)}{U_i(T_c)} \times 100 = \frac{T}{T_c} 100\% \quad (19)$$

式 (19) 清楚地告诉了我们一个很有实际意义的概念: 即分压器用来测量上升式斜角截波时, 其幅值误差与分压器的方波响应时间常数 T 成正比, 而与截断时间 T_c 成反比。另外从图 3 的输出电压 $U_o(t)$ 波形亦可明显看出其畸变程度亦随方波响应的时间常数 T 的加大而增加。

二. 试验部份

总的试验条件:

(1) 为保证高压分压器具有恒定不变的工作特性, 示波器的电源由电子稳压器供给。

(2) 为保证电容为元件充电电压每次相等和球隙放电工作稳定性, 控制方波发生器每半分钟动作一次。

(3) 为减少被测波形畸变和振荡、测量现象的电压都是直接引到示波管现象板, 不经一点引线。

(4) 所有示波图经放大 30 倍来观测其幅值、时间与波形。

(5) 示波图时间标度的振荡波频率经晶体差频率核测。

计

1. 上升式方波发生器

用试验方法求取被测分压器的方波响应和响应时间常数, 首

先要具有上升或下降很陡的方法。

用来测量分压器误差特性的上升式方波发生器原理线路图如

图 5 所示。

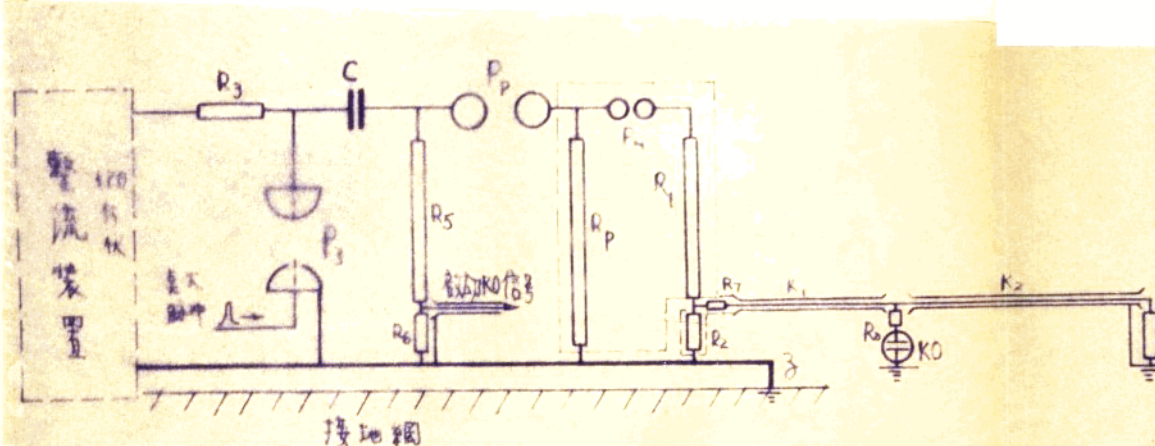


图5 上升式方波发生器回路接线图

- | | |
|--|---|
| 1. R_3 : 充电保护电阻 | 2. C: 主电容 由两个 $1\mu F$ 串联而成, 总电容为 $0.02\mu F$ |
| 3. 方波脉冲 (具体见图 8) | 4. R_1 : 小电压高压臂电阻 (具体指详见图 7) 1492 欧 |
| 5. R_2 : 小电压低压臂电阻 由 4 个 27 欧 $\frac{1}{4}$ 瓦的碳膜电阻并联而成, 实测总电阻 | |
| 6. R_4 : 电阻末端匹配电阻 91 欧 $\frac{1}{4}$ 瓦 碳膜电阻 | 7. R_5, R_6 : 脉冲 K0 信号分压电阻 |
| 8. R_7 : 电阻首端匹配电阻 75 欧 $\frac{1}{4}$ 瓦 碳膜电阻 | 9. R_p : 初始脉冲放电电阻 |
| 10. R_0 : 现象板电阻 1 瓦 200 欧 碳膜电阻 | |
| 11. K_1, K_2 : 传输电键 型号 PK-2 $Z=90-95$ 欧, 其长度分别为 10 米, 50 米 | |
| 12. P_3 : 真空球隙 ($\phi 50$) | 13. P_4 : 隔离球 ($\phi 50$) |
| 14. P_4 : 油间隙 铜珠的直径为 $\phi 20$ 间隙为 $0.54mm$ | 15. K0: KO-20 高压示波口 |
| 16. 子: $\phi 10$ 空心铜杆接地干球 | |

高压示波器在快速扫描 (0.4×10^6 米/秒) 工作情况下, 要实现被测现象到达示波器时间与示波器起动作时间准确同步是很困难的事, 利用测量标准全波时的同步控制方法已失效, 采用其

他同步方法同步率亦很低。经过一系列同步方法试验后，我们才找到利用一对 $\phi 50$ 公厘球的时延来控制示波器起劢与被测现象同步。即图 5 R_p 球间隙除用作使方波上升速度初始陡化和隔离外，改变间隙大小即可用以调节示波器起劢与被测现象的准确同步。采用这种控制方法同步率基本上可达 100%。最大同步分散性仅达 100 毫微秒。

上升式方波各元件组合结构布置见图 6。

测量方波的小分压器高压臂电阻 R_1 是采用 $\phi 0.112$ 公厘每米 108 欧姆镍铬丝绕在 $\phi 19$ 公厘直径胶木管上，镍铬丝共绕两层，两层之间垫以 2×12 微米电容器纸绝缘，为了消除电感，内外两层镍铬丝反向缠绕，线匝间距 0.45 公厘，绕在胶木管上高为 203 公厘，为避免电阻沿面放电，将绕制的分压器电阻再放入盛有变压器油的胶木管内，分压器高压臂电阻绕制的结构如图 7 所示。为减小低压臂电感，小分压器的低压臂电阻采用碳膜电阻。

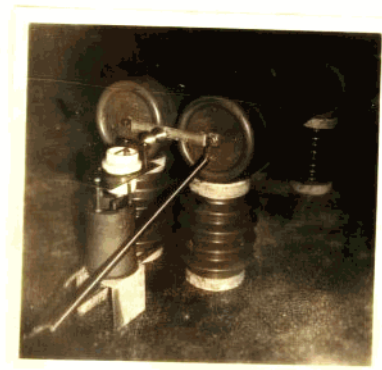


图 6 上升式方波各元件组合布置图

在试验过程中，曾用水电阻和浸入变压器油内的金属膜及碳膜电阻做测量方波的小分压器高压臂电阻，但用水电阻测出的方波振荡较严重且阻值很不稳定，而金属膜和碳膜电阻由于我们未获得较大容量的电阻，因此亦未采用。

图 5 中的放电电阻 R_p 采用与 R_1 同样方法绕制，结构尺寸亦相仿，只是电阻值较低，为 988 欧姆。

該电阻由 $\phi 2$ mm 線繞線双层
反繞而成，層間用兩層電容紙絕緣，
每層的層間距離為 0.45 mm。
實際电阻， $1492\ \Omega$ (17°C)

1. 用兩層電容紙做成的絕緣層。
 2. 玻璃管。
 3. 內層电阻。
 4. 外層电阻。
- 代表順繞电阻線。
 - x 代表反繞电阻線。

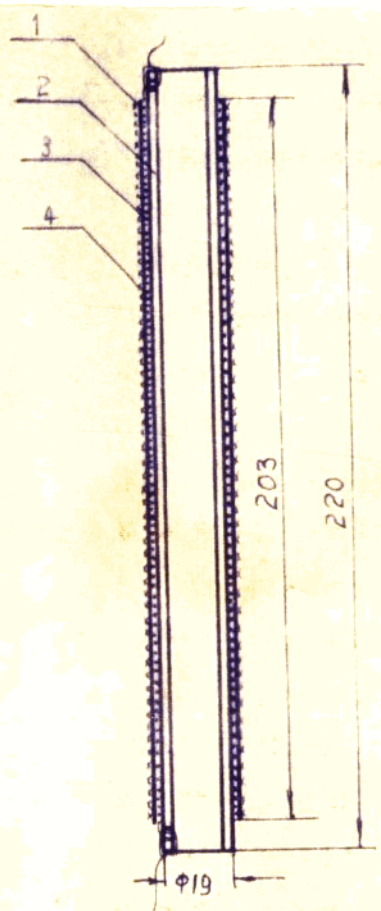
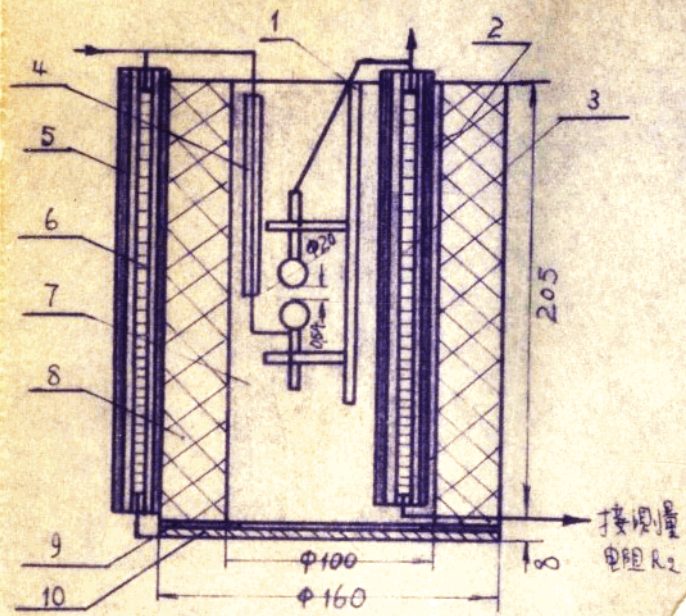


圖 7 測量方法用的小分压口高压臂电阻結構圖

油间隙是採用 $\phi 20$ 一對球固定于有機玻璃支架上，間距為
 0.54 公厘。油间隙與列置方波小分压器處压臂电阻一并置于感变
压器中的胶木管内，其組裝結構如圖 8 所示。



- 代表符号:
1. 有机玻璃架.
 2. 胶木管
 3. 电阻棒 R_1
 4. 绝纹胶木管.
 5. 胶木管.
 6. 电阻棒 R_p
 7. 变压四油.
 8. 胶木管
 9. 橡皮川
 10. 金属板

图 8 上升式方波发生器结构图

在考虑方波发生器主体结构布置时，要很好注意排列紧凑引线尽量短的原则，特别是象图 5 虚线方框内的那一部份。方波发生器的主接地干线应采用电导大电感小的导体为宜。低压测量回路绝缘外皮的接地引线亦应尽量短，且应焊接，接地点之选在主要放电电流所经的接地干线段之外。为消除高频感应所引起的被测波形畸变，测量的高频电线除其本身的屏蔽层很好接地外，再套以接地金属管加强屏蔽。到示波器和其他测量系统固定地电位的接地线亦采用屏蔽方式。利用这种线路和采用以上结构措施的方波发生器所获得的方波波形如图 9 所示，此方波的上升陡度为 9.75 毫微秒。

2. 截断式方波发生器

搞截断式方波发生器的目的是为了利用两种不同的方法产生出来的方波，用以测量同一被试分压器的方波响应时间常数，以资互相旁证其精确度与可靠性。

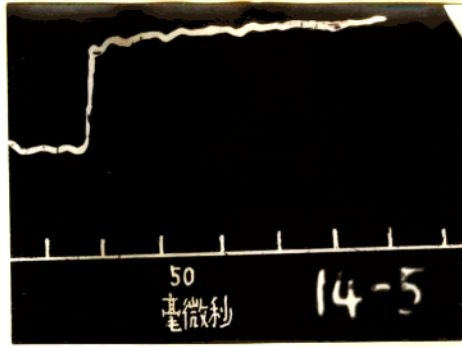


图9. 上升式方波方形

截断式方波发生器原理如图10所示。总体结构布置大致与上升式方波发生器相同。只是油阀器用在截断式时，要通过很大电流，会造成电流过大，使油容器和阀器损坏。因此在接

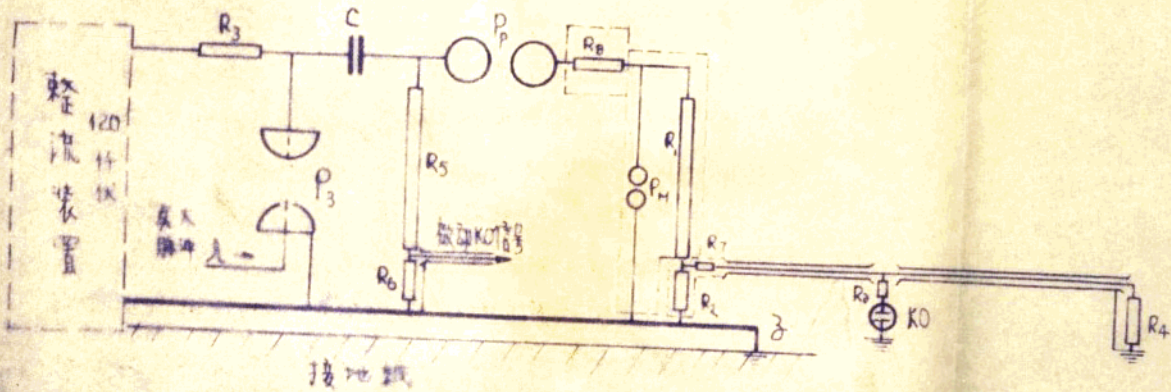
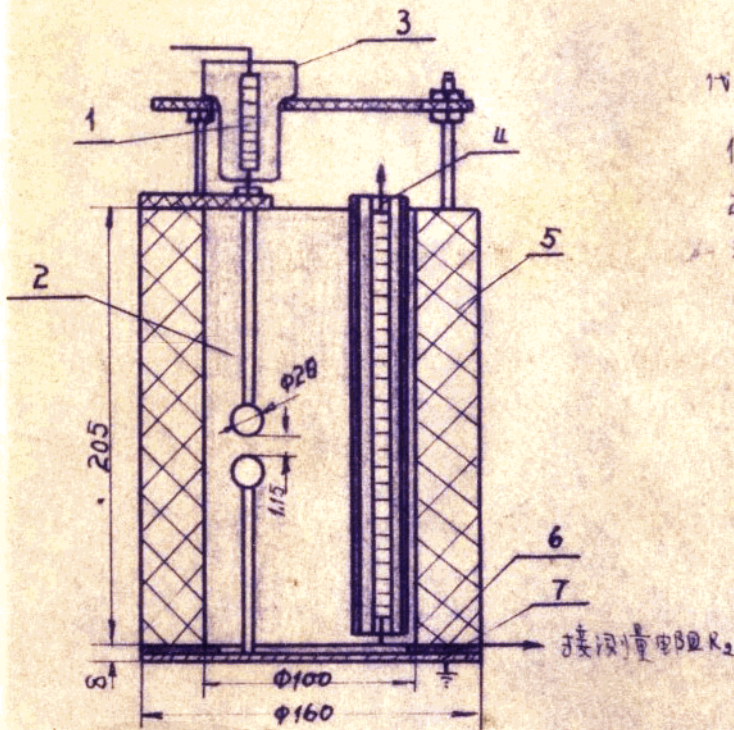


图10. 截断式方波发生器回路接线图

1. P_4 : 切断油阀器铜球阀器上升式插大，铜球直径 $\phi 20$
2. R_8 :
3. 接地线用上升式方波。

铜丝紧密双反方向绕在 $\phi 16$ 公厘直径胶木管上，在胶木管上缠绕高度 9 公分，为增加绝缘强度亦将其浸入变压器油内。包括限流电阻在内的截断装置如图 11 所示。截断式方波发生器放电时，即使串入限流电阻，还是有较大的电流流经主接地干线，因此在考虑截断式方波发生器主体结构布置时，低压测量回路安排接线长短、接地点长短以及接地点选择的要求较上升式方波更为严格。油筒内腔为 1.5 公厘，这一问题的取舍选择主要是考虑



1V 表符号：

1. 限流电阻 R_8 .
2. 绝缘变压器油.
3. 绝缘管口.
4. 电阻体 R_1 .
5. 胶木筒.
6. 橡皮圈.
7. 铜板.

图 11, 截断式方波发生器结构示意图.

升式方

波情况能等价地进行比较，图 10 中的实际参数值的运行和元件安排完全与图 5 相同。利用该线路所获测得的截断式方波之形

如图 12 所示，此方波的截断陡度为 7.8 毫微米。

开始时，曾尝试用压缩空气间隙代替油间隙，但因压缩空气气与压不稳定，造成压缩空气间隙截断时间不能固定，使示波器起劲与被测现象间的同步率非常低。另外，压缩空气间隙须用高强度气体容器，

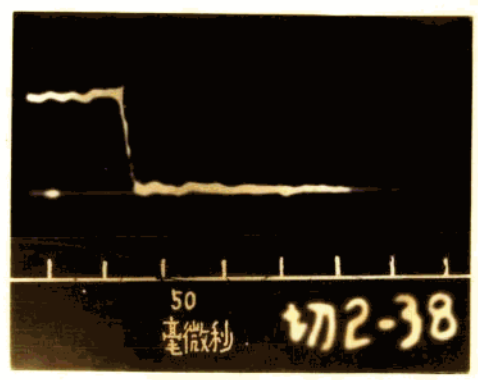


图 12 截断式方波波形

而限于我们仅有双断路器断口，用尺寸较大的高强度瓷套，回路布置难以做到紧凑和缩短引线，得出的波形振荡较大，因此，我们对压缩空气间隙方案未继续进行而改用油间隙方案。

3. 1000 仟伏屏蔽型电阻分压器误差特性测量：

(1) 用上升式方波检测：

我们搞上升式方波或截断式方波的目的用采测重组合杆设计制造的 1000 仟伏屏蔽型电阻分压器的误差特性。利用上升式方波

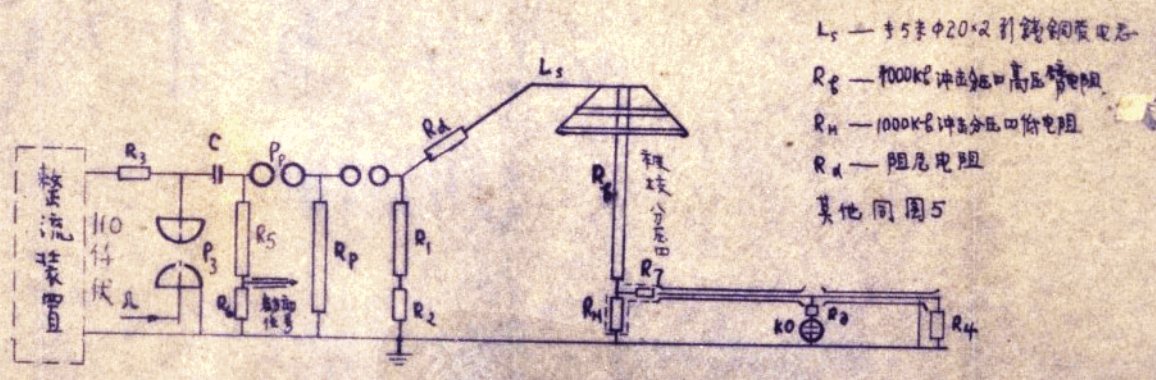


图 13 上升式方波检测分压器尾理接线图

核测分压器的原理线路如图 13 所示，具体布置如图 14。除被核测分压器外，回路中其余元件参数保持与上升式方波发生器回路完全相同条件。

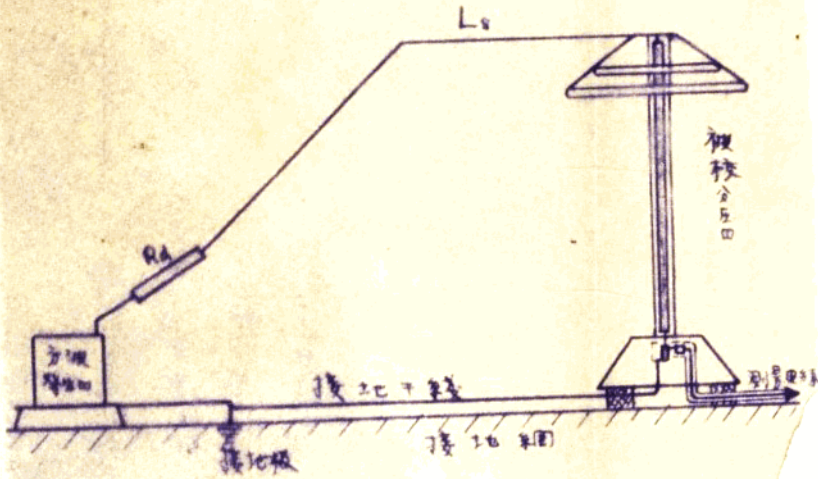
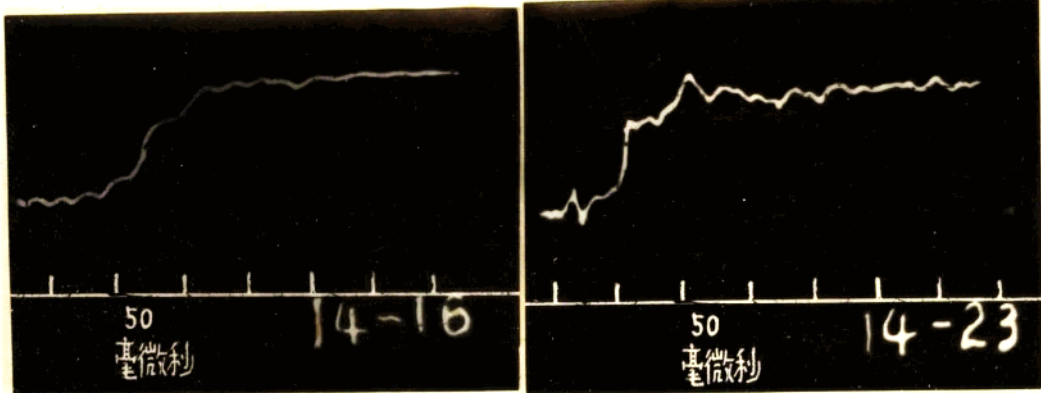


图 14 用方波校正冲击测量系统测试装置。

1. R_d ：可变阻尼电阻
2. L ：高压引线（ $\phi 20 \times 2$ 铜管）长度 5 米。

利用上升式方波核测分压器时得出的方波响应示波图如图 15



(a)

(b)

(a) (b) (c) (d) 所示，这些示波图都是在分压器 带下屏蔽环 条件下测出的。

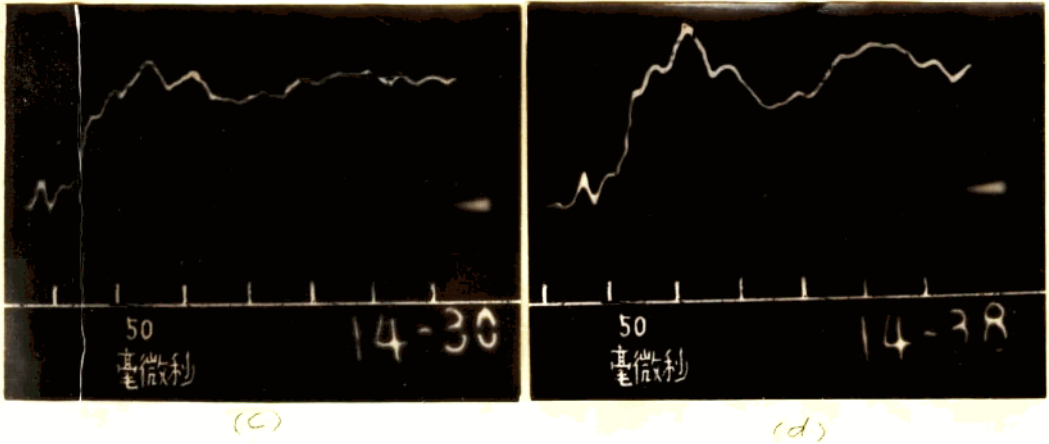
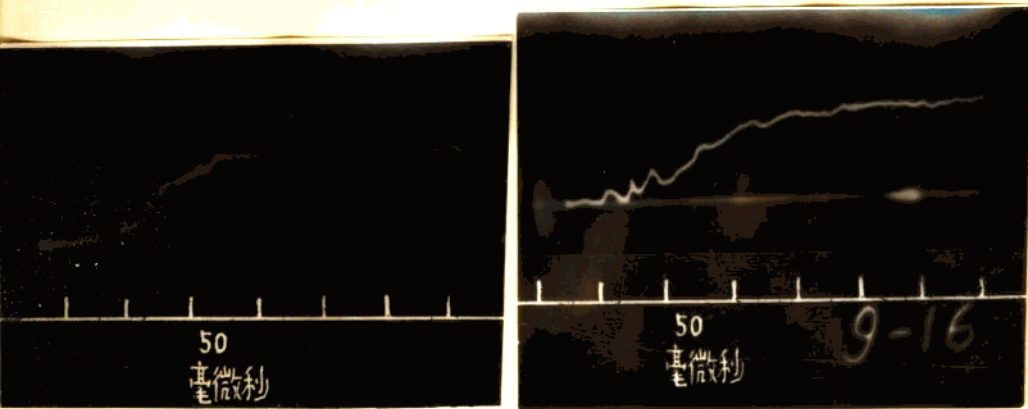


图 15 1000 伏屏蔽型电阻分压器在不同负载电阻值条件下的上升式方波响应示波图

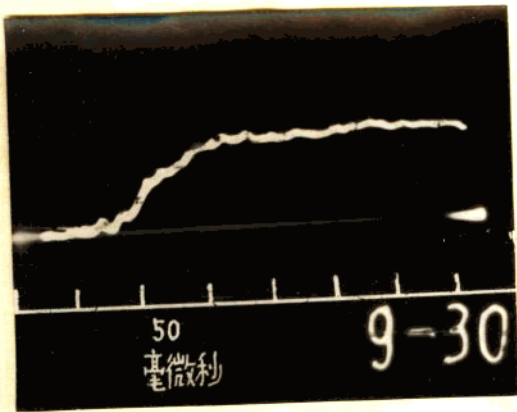
- (a) $R_d = 225 \Omega$ (b) $R_d = 150 \Omega$
(c) $R_d = 75 \Omega$ (d) $R_d = 0$

屏蔽型电阻分压器上下屏蔽环的设置与尺寸确定，一般都是将分压器模型置于电解槽中采用静电场等位线分布尽量均匀的办法，这种办法与分压器实际的工作条件并不全同，另外也由于我们还没有电解槽，因此，根据自己现有条件，用分压器的被测方波响应时间常数大小来确定屏蔽环的设置，图 16 (a) (b) (c) 示波图代表着有无上下屏蔽环时测出的方波响应。



(a)

(b)



(c)

图 16 1000伏屏蔽型电阻分压器有无上下屏蔽环时方波响应示波图

$R_d = 225$ 欧

(a) 有上下屏蔽环,

(b) 无上下屏蔽环,

(c) 有上屏蔽环无

下屏蔽。

(2) 用截断式方波检测

利用截断式方波检测分压器时的原理线路如图 17 所示, 图中除了增加限流电阻 R_f 和将电间隙 PM 布置成截断式外, 其余各元件数值和布置保持与图 13 条件全同。