



高电压技术教研室
HIGH VOLTAGE INSTITUTE

《高电压技术》

第十章 高电压试验技术

Section 4 冲击电压的产生与测量

汲胜昌 祝令瑜

2021年02-05月



目 录

§1

冲击电压的产生

- 1 冲击电压发生器功用及标准波形
- 2 冲击电压发生器的基本原理
- 3 冲击电压发生器放电回路分析
- 4 发生器的结构及元件
- 5 截断波的产生
- 6 产生操作波的方法





§1 冲击电压的产生——1 冲击电压发生器功用及标准波形

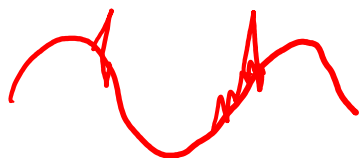
1.1 冲击电压发生器的功用

电力生产及运行领域

- 冲击电压发生器是一种产生脉冲波的高电压发生装置，用于研究电力设备遭受**大气过电压和操作过电压**时的绝缘性能，同时，冲击电压的破坏作用不仅决定于**幅值**，还与**波形陡度**有关，所以也用于研究某些电力设备的陡截断波绝缘性能。*纯阻类*
- 用于冲击耐压和放电试验

物理/脉冲功率领域

- 用于大功率电子束和离子束发生器；
- 二氧化碳激光器的电源装置；
- 高压纳秒脉冲功率发生器；
- 等等，应用领域广阔。





§1 冲击电压的产生——1 冲击电压发生器功用及标准波形

1.2 冲击电压的标准波形

雷电波：是一种非周期性脉冲，它的参数具有统计性。它的波前时间（0 ~ 幅值时间）为 $0.5 \sim 10\mu\text{s}$ 。半峰时间（0 → 幅值后又降到1/2幅值所需时间）约 $20 \sim 90\mu\text{s}$ 。IEC研究表明累积频率为50%的波头和波长分别为 **$1.0 \sim 1.5\mu\text{s}$** 和 **$40 \sim 50\mu\text{s}$** 。



操作波：在电力系统中存在**储能元件的电感与电容**，当正常操作或故障时，电路状态发生了改变，由此引起了振荡的过渡过程。持续时间比雷电**长得多**（几百~几千 μs ），**形状复杂**，且形状和持续时间随线路参数和长度**不同而有异**，国际上趋向于用一种**几百微秒波前和几千微秒波长的长脉冲**来代表它。



§1 冲击电压的产生——1 冲击电压发生器功用及标准波形

1.2 冲击电压的标准波形

标准波形： 保证所用波形的代表性、试验结果的重复性和可比性。

由**波头时间**、**波尾时间**、**峰值和极性**来表示。

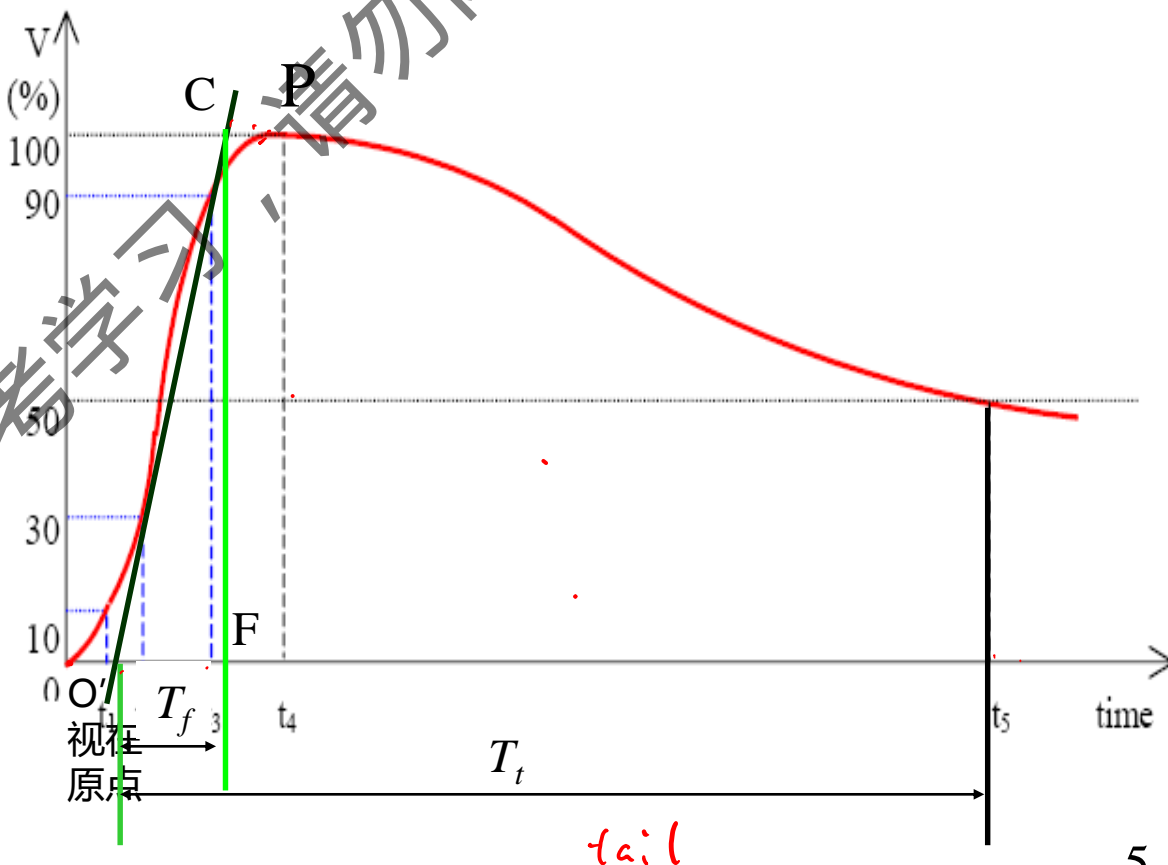
1. 雷电全波

表示： $\pm (T_f/T_t)\mu s$

IEC标准： $\pm (1.2/50)\mu s$

T_f : $1.2 \pm 30\% \mu s$,

T_t : $50 \pm 20\% \mu s$



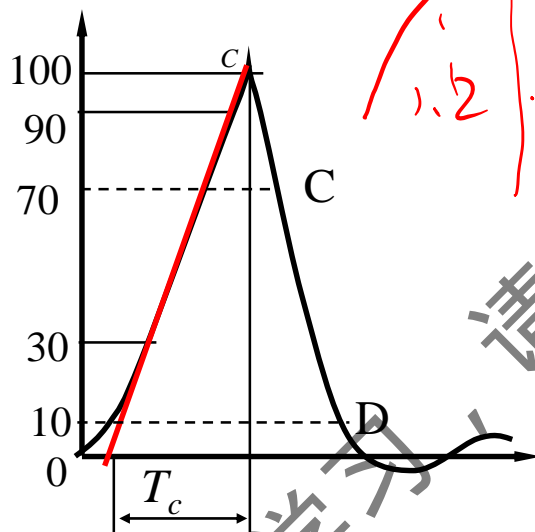


§1 冲击电压的产生——1 冲击电压发生器功用及标准波形

1.2 冲击电压的标准波形

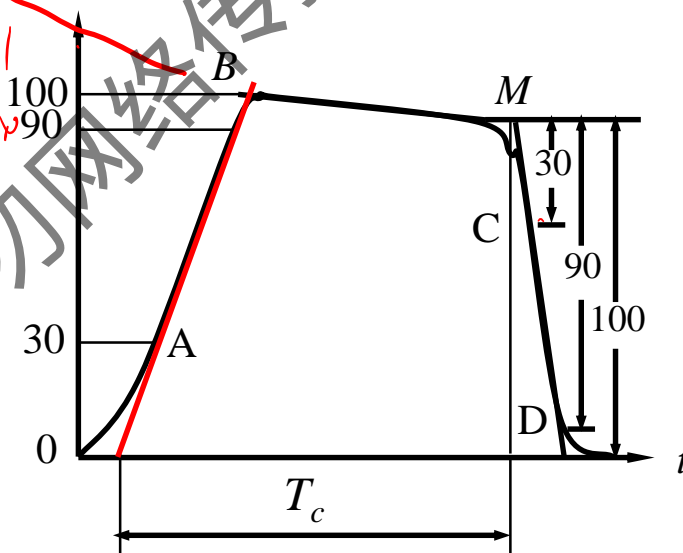
2. 雷电截波

$$\frac{dv}{dt}$$



波前截断

截断时间—— $T_c: 0.5 \sim 2.0 \mu s$



波尾截断

$T_c: 2 \sim 5 \mu s$

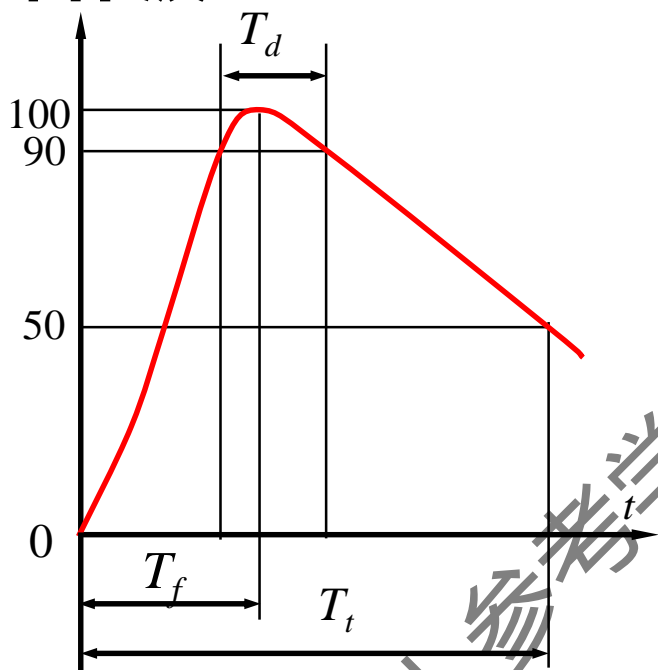
电压跌落的陡度=电压幅值/跌落时间,
其中跌落时间为C点和D点间时间间隔的1.67倍。



§1 冲击电压的产生——1 冲击电压发生器功用及标准波形

1.2 冲击电压的标准波形

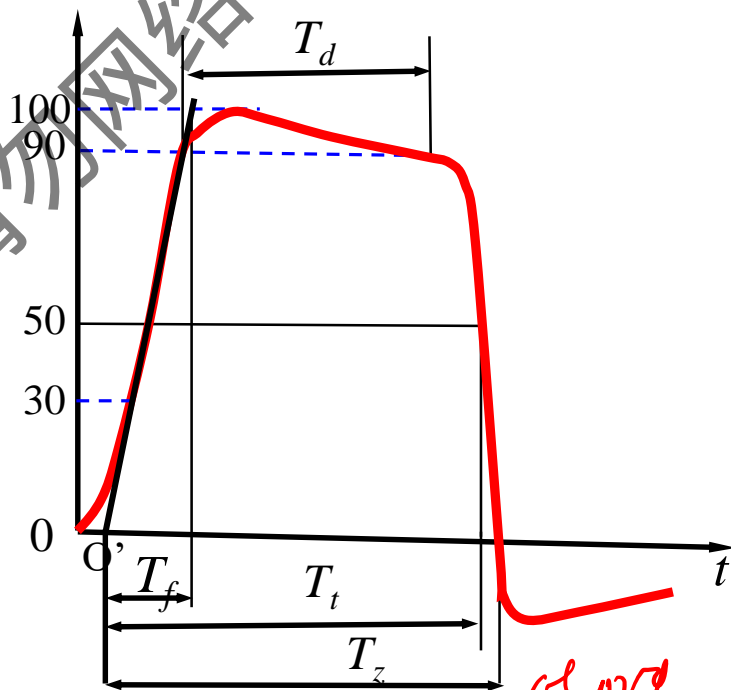
3. 操作波



表示: $\pm (T_f/T_t)\mu s$

IEC标准: $\pm (250/2500)\mu s$

T_f : $250 \pm 20\% \mu s$, T_t : $2500 \pm 60\% \mu s$



$U_n \geq 220kV$ 变压器及电抗器内绝缘的操作波

T_f : 至少为 $100\mu s$; 90%以上峰值时间 T_d : $\geq 200 \mu s$;

从视在原点到第一次过零点的时间 T_z : $\geq 500 \mu s$



§1 冲击电压的产生——1 冲击电压发生器功用及标准波形

1.3 冲击电压发生器额定电压与被试品标准电压关系

操作过电压波幅直接与系统有关，为标准电压的若干倍，雷电过电压的幅值与系统电压无直接关系，但由于线路的绝缘水平、接地电阻、保护设备的性能等原因，可能导致雷电压幅值随系统电压的升高而上升。

110kV, 220kV, 330kV, 500kV, 750kV, 1000kV
→ 超高压

试品标称电压 (kV)	35	110	220	330	500	750	1000
冲击发生器 额定电压 (MV)	0.4~0.6	0.8~1.5	1.5~2.7	2.4~3.6	2.7~4.2	3.6~6.0	≥4.8



§1 冲击电压的产生——2 冲击电压发生器的基本原理

2.0 基本要求及原理思路

冲击电压发生器的两个基本要求：

① 输出高电压

几十万～几百万伏的电压；

② 电压具有一定波形。

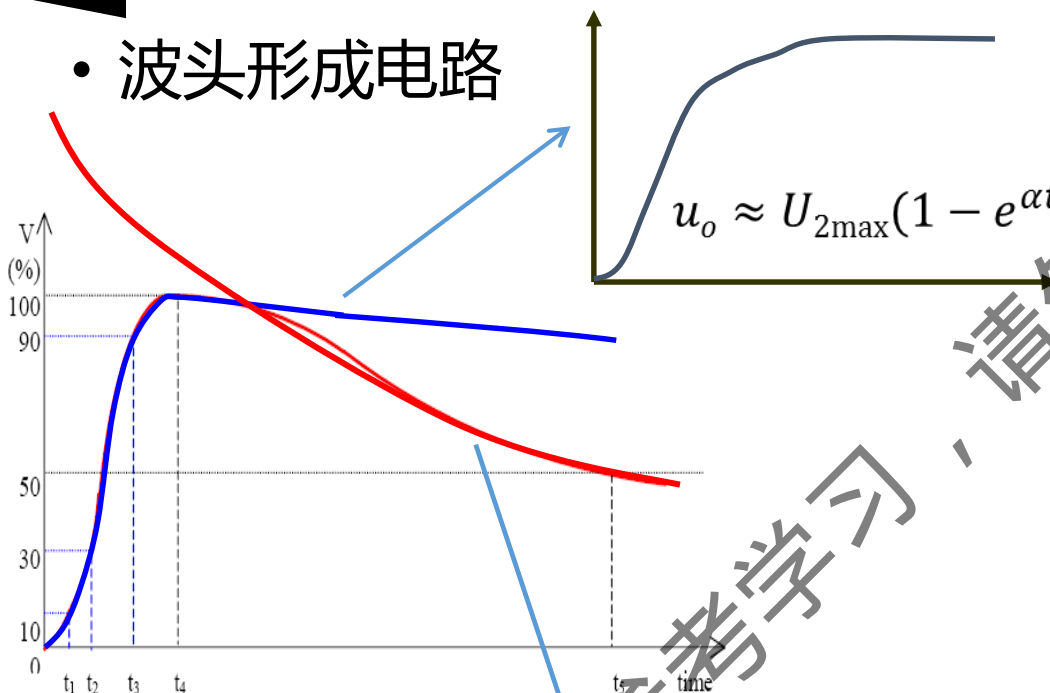
可产生雷电或操作冲击电压



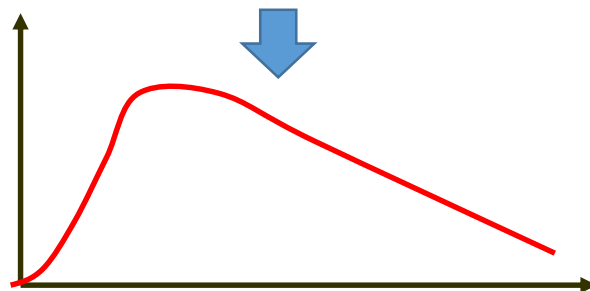
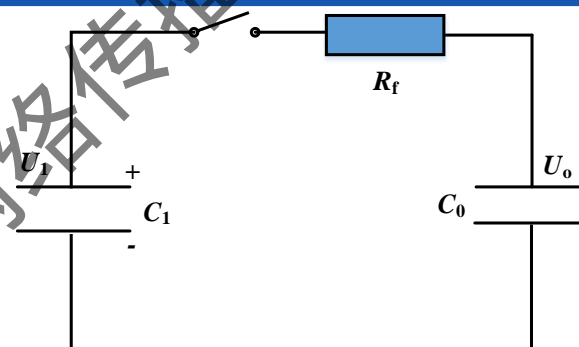
§1 冲击电压的产生——2 冲击电压发生器的基本原理

2.0 基本要求及原理思路

• 波头形成电路

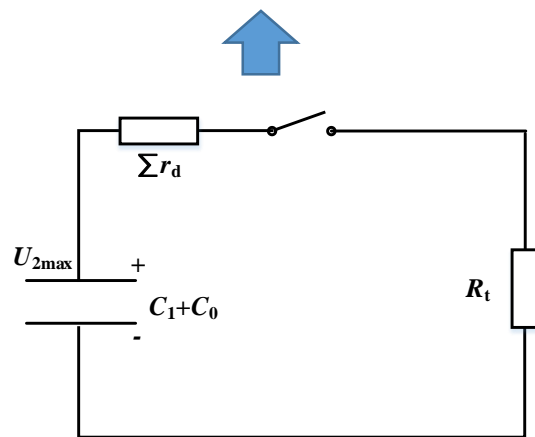


$$u_o \approx U_{2\max}(1 - e^{-\alpha t})$$



• 波尾形成电路

$$u_o = U_{2\max} e^{-\beta t}$$



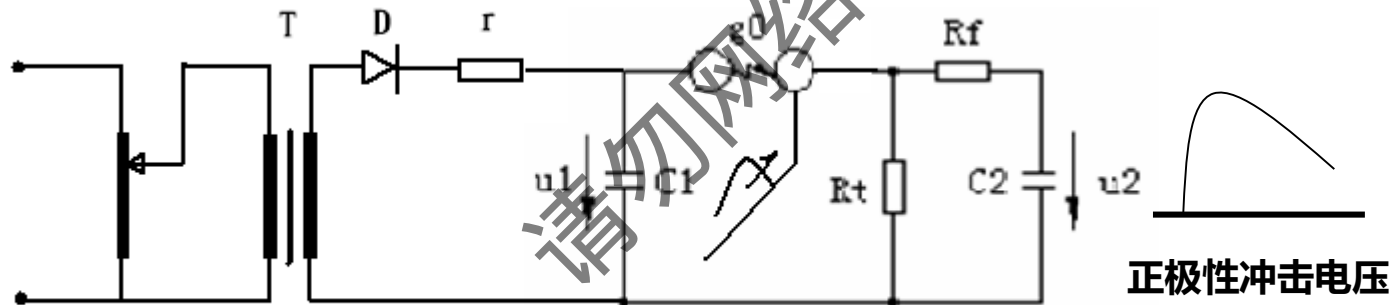


§1 冲击电压的产生——2 冲击电压发生器的基本原理

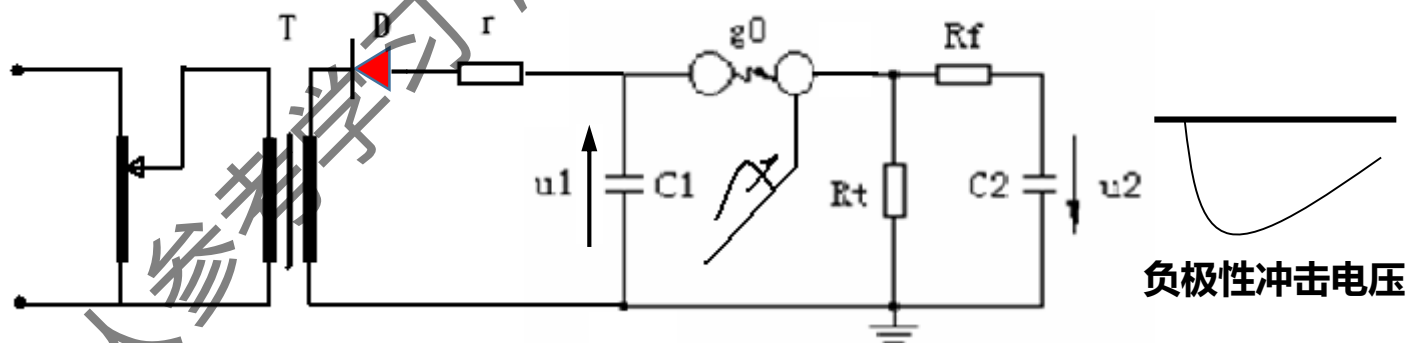
2.0 基本要求及原理思路

单级冲击电压发生器回路

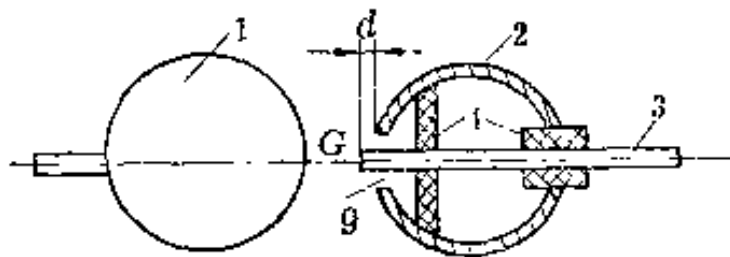
回路1



回路2



由于受到硅堆和电容器额定电压的限制，单级冲击电压发生器的最高电压不超过200~300kV。



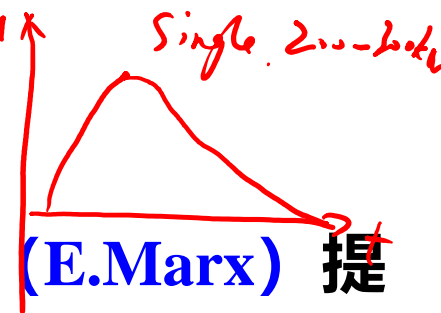


§1 冲击电压的产生——2 冲击电压发生器的基本原理

2.1 冲击电压发生器的基本回路

实际应用的多级冲击电压发生器回路

当前所使用的冲击电压发生器由德国人E.马克思 (E.Marx) 提出，为此他于1923年获得专利，被称为Marx回路。



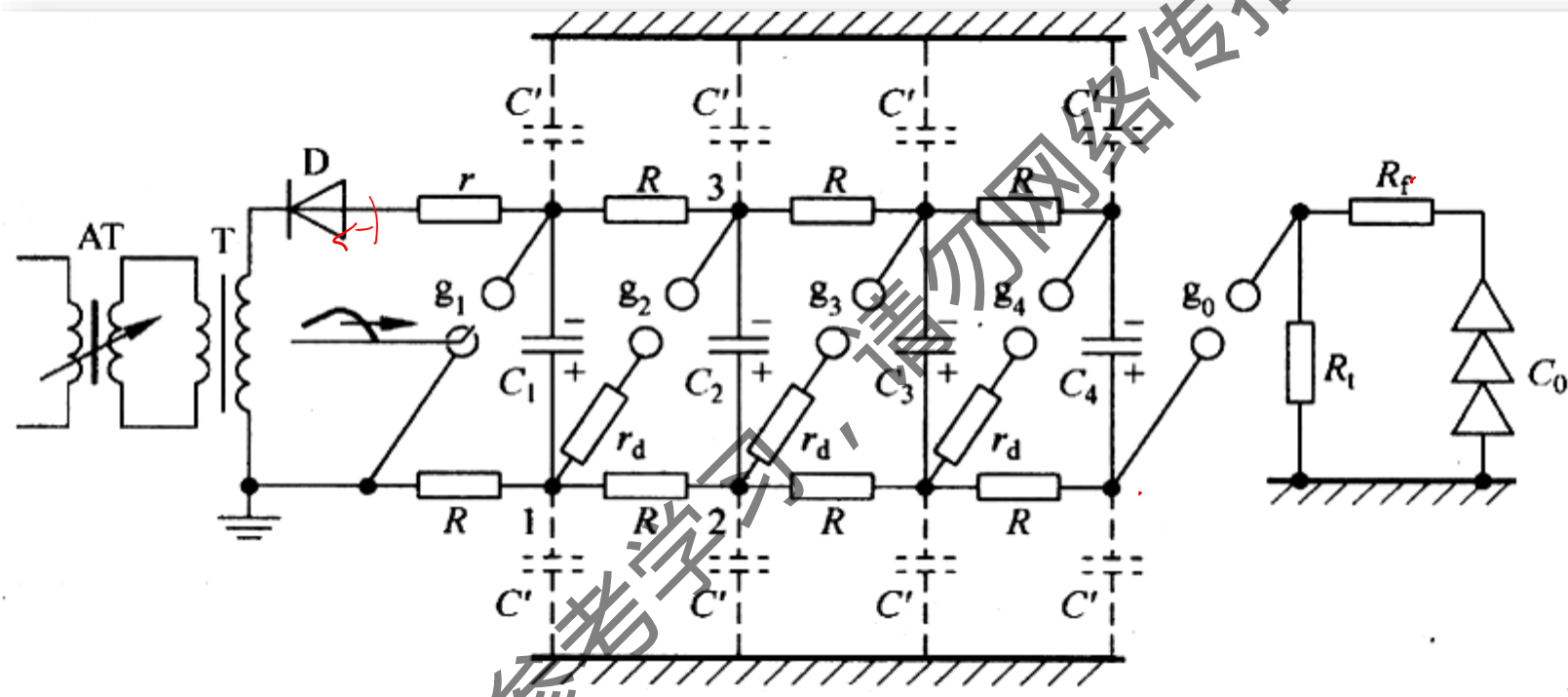
由Marx发明的冲击电压发生器是一种非常适用、得到广泛推广的冲击发生器。

1PMHVC



§1 冲击电压的产生——2 冲击电压发生器的基本原理

2.1 冲击电压发生器的基本回路



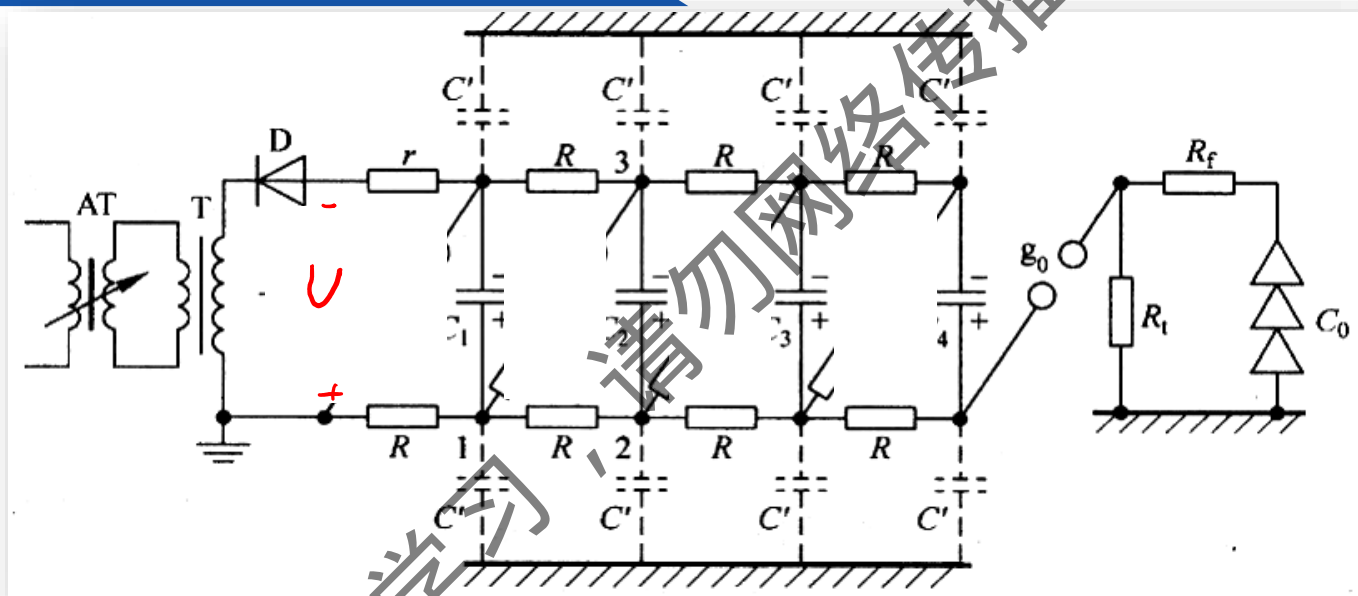
AT—调压器；T—试验变压器； r —保护电阻； R —充电电阻； $C_1 \sim C_4$ —主电容； r_d —阻尼电阻； C' —对地杂散电容； g_1 —点火球隙； $g_2 \sim g_4$ —中间球隙； g_0 —隔离球隙； R_t —波尾电阻； R_f —波头电阻； C_0 —被试品及测量设备等的电容（即后续的 C_2 ）



§1 冲击电压的产生——2 冲击电压发生器的基本原理

2.1 冲击电压发生器的基本回路

2.1.1 并联充电



通过硅堆D，使 $C_1 \sim C_4$ 均充电到 $-U$ ；

$g_1 \sim g_4$ 球隙上电位差也为 U ， g_0 上无电压；

调节 $g_1 \sim g_4$ 球隙距离，使其放电电压大于 U ；

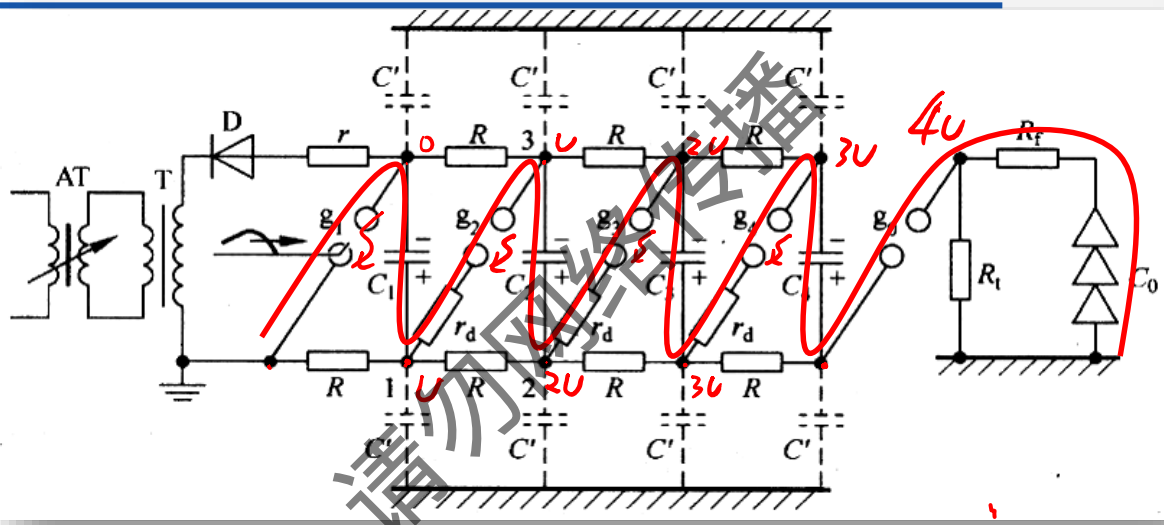
这是一个稳定的并联充电状态。



§1 冲击电压的产生——2 冲击电压发生器的基本原理

2.1 冲击电压发生器的

2.1.2 串联放电



1. 当给点火球隙的针级送去脉冲电压，引起点火球隙 g_1 放电，于是 C_1 的上极板经 g_1 接地；点1电位由0变为 U ；
2. C_1 、 C_2 有电阻 R 隔离， R 较大，在 g_1 放电瞬间，点2点3电位不可能突然改变，点3仍为 $-U$ 。
3. g_2 上的电位差实上升为 $2U$ ， g_2 放电，点3变为 U ，则点2电位为 $2U$ 。
4. 同理， g_3 、 g_4 也跟着放电；隔离球隙 g_0 也放电，这时输出电压为 $C_1 \sim C_4$ 上电压的总和，即 $4U$ 。

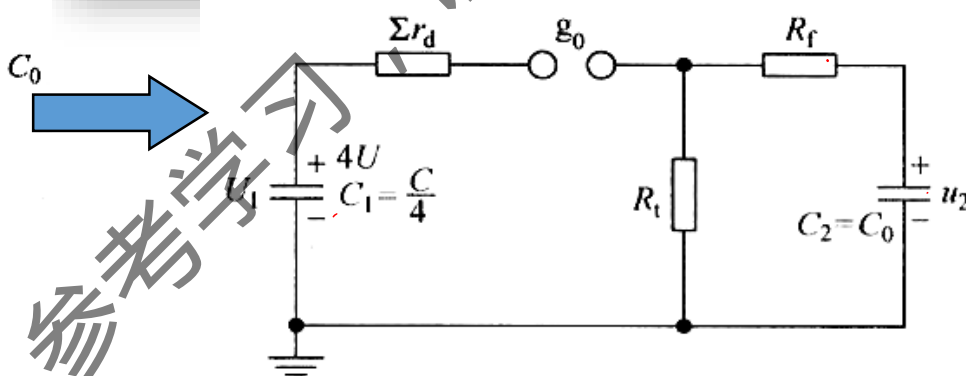
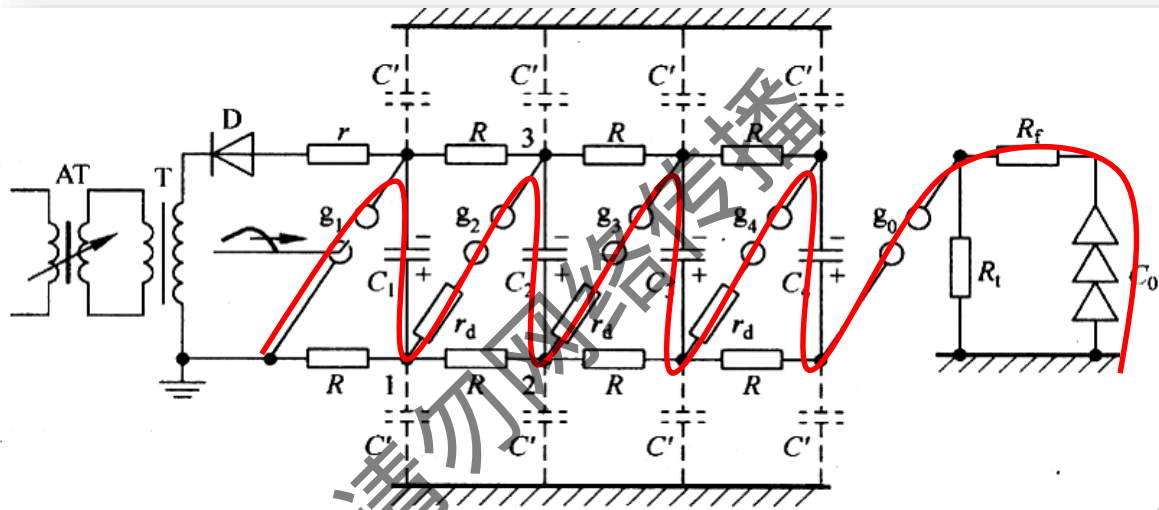
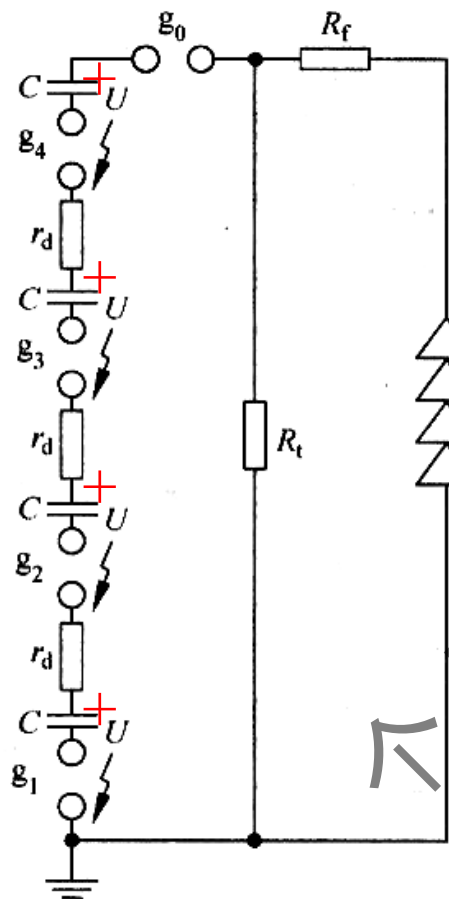
通过一组球隙逐次顺利完成串联放电过程。



§1 冲击电压的产生——2 冲击电压发生器的基本原理

2.1 冲击电压发生器的

2.1.3 等效电路



原理可概述为：电容**并联充电**，**串联放电**，而串联放电的实现是靠一组球隙击穿来达到的。

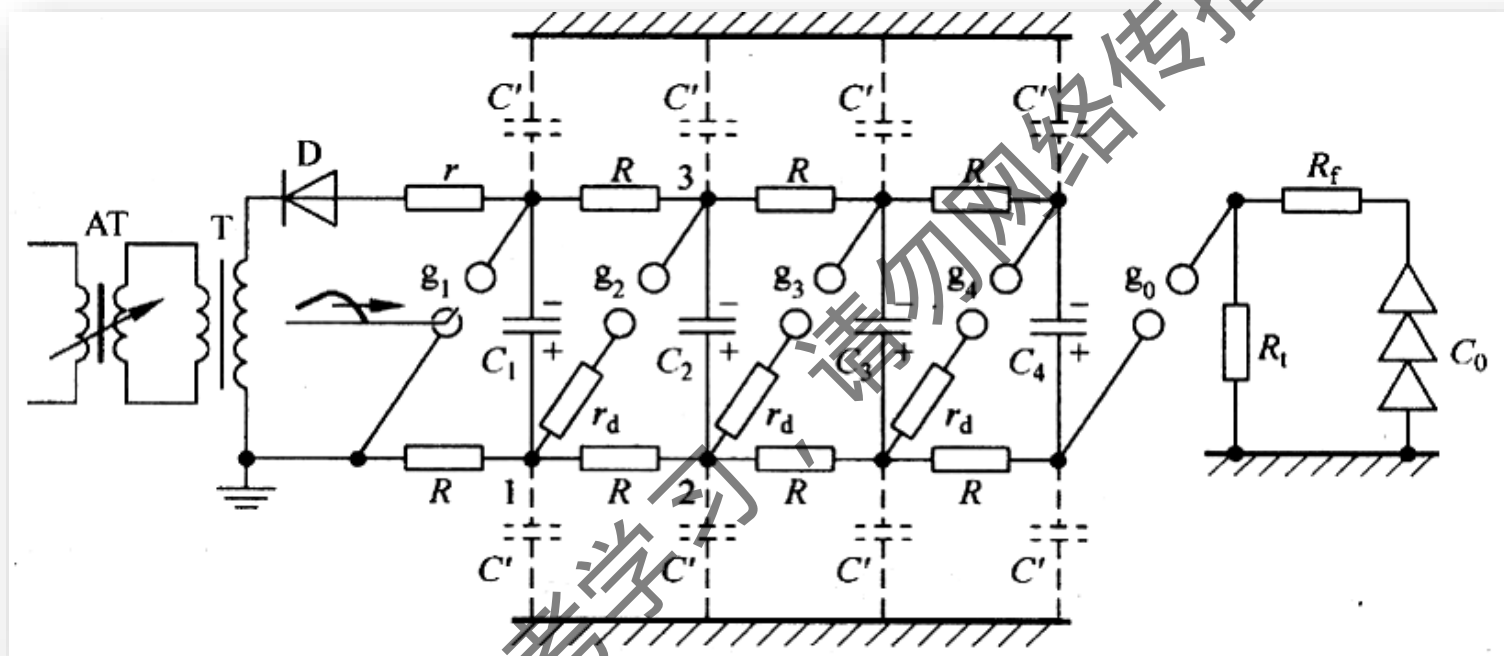
R_f 与波头时间有关，称波头电阻；

R_t 与波尾时间有关，称波尾电阻；



§1 冲击电压的产生——2 冲击电压发生器的基本原理

2.1 冲击电压发生器的基本回路



在球隙放电时， g_1 不放电其它球隙都不放电，一旦 g_1 放电，则其它球隙顺序逐个放电，满足此条件，称球隙同步好，否则同步不好。

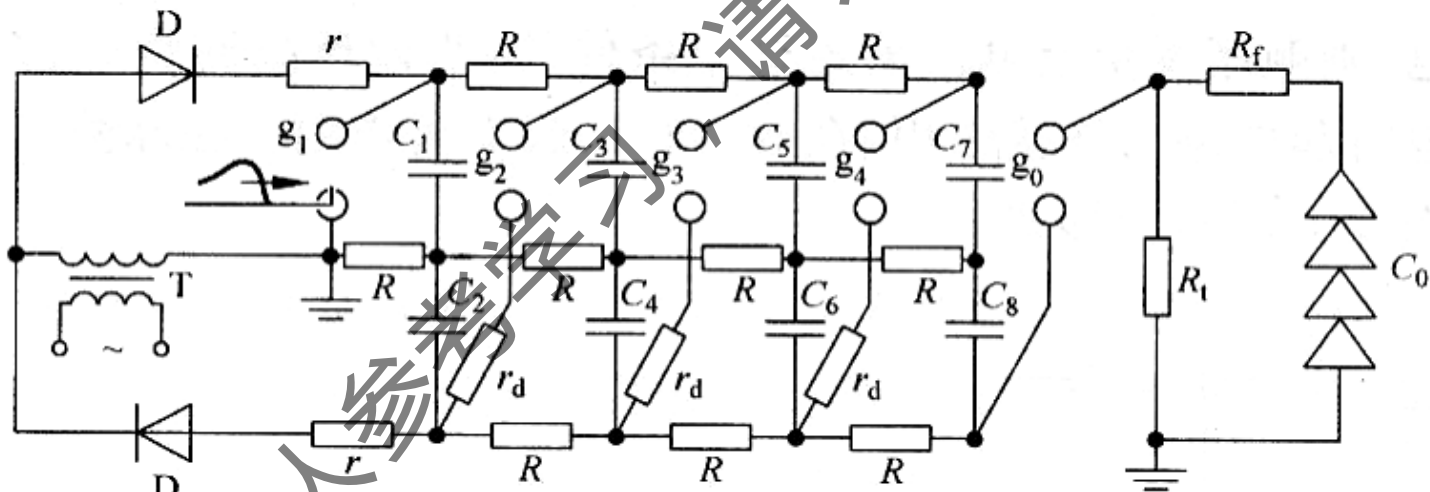


§1 冲击电压的产生——2 冲击电压发生器的基本原理

2.2 双边充电的冲击电压发生器

要提高冲击电压发生器的输出电压有三种途径：

- 1、提高**充电电压**，但受电容器额定电压的限制；
- 2、**增加级数**，但级数多了会给同步带来困难。

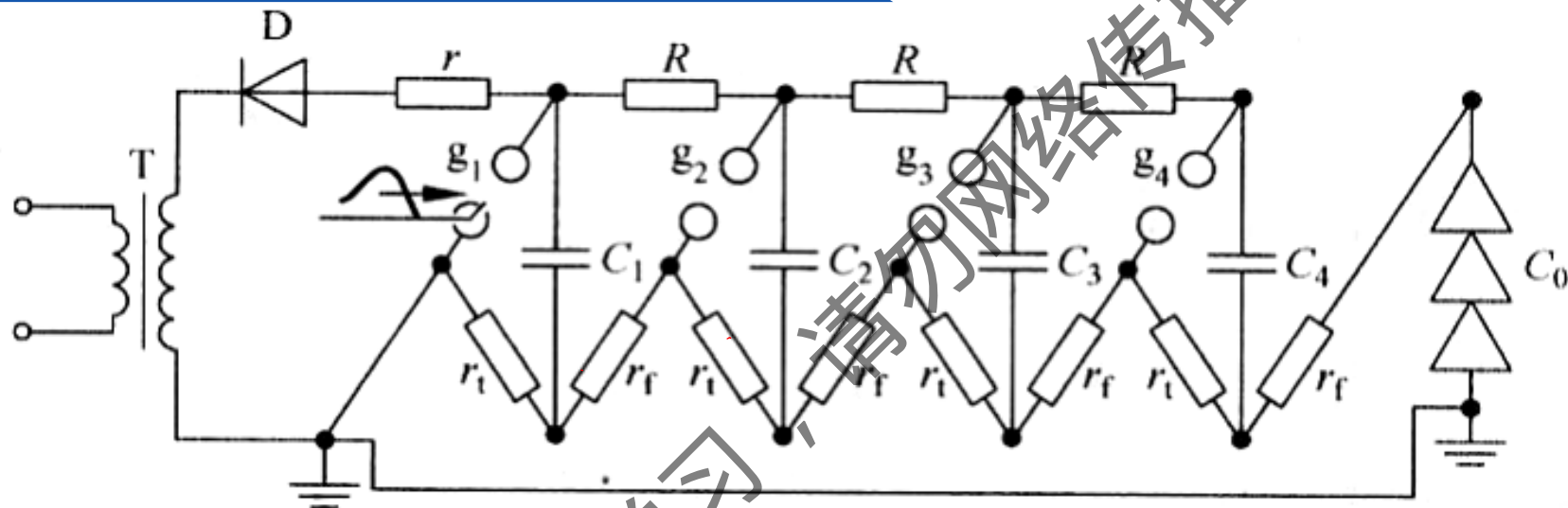


- 3、**双边充电回路**在不增加级数，在相同充电电压下，输出电压增加一倍。



§1 冲击电压的产生——2 冲击电压发生器的基本原理

2.3 冲击电压发生器的高效回路

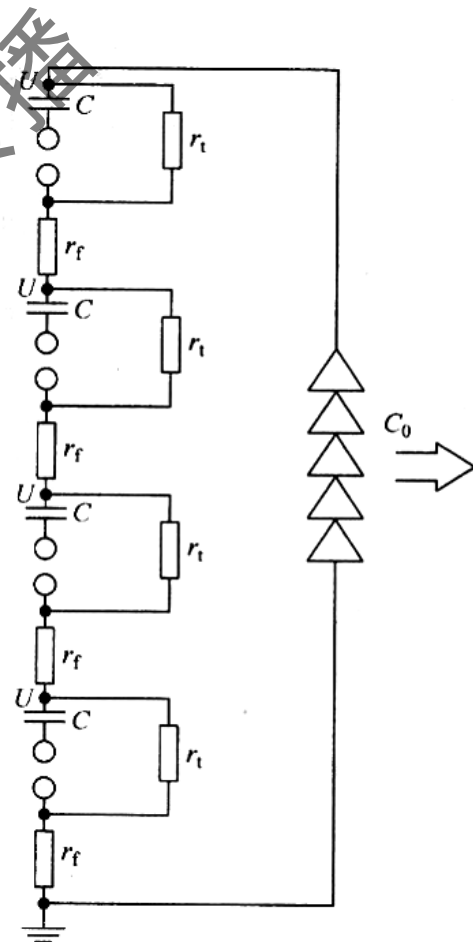
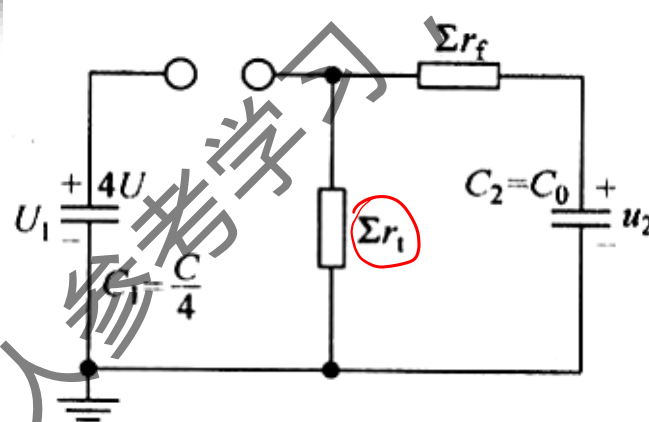
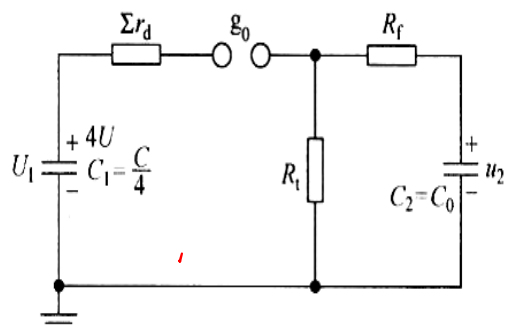
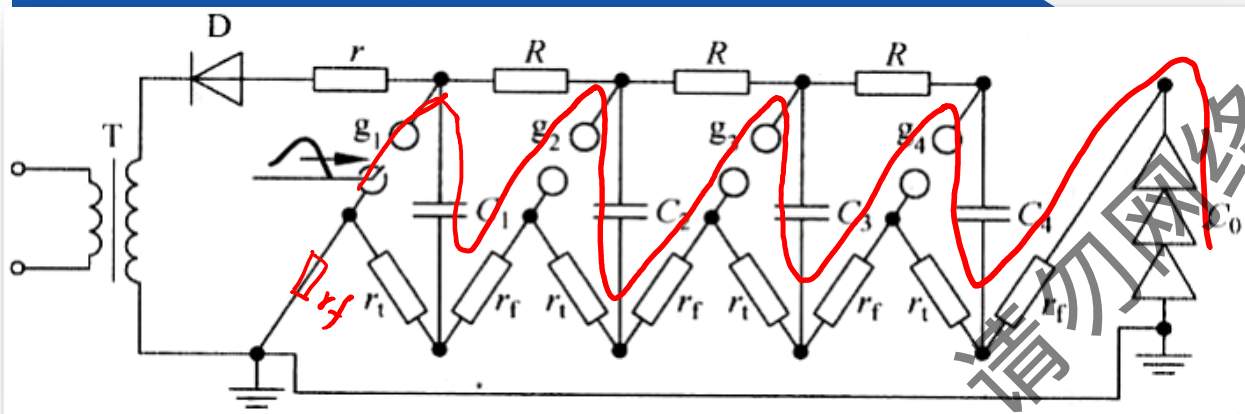


只有一边有 R ，另一边由 r_f 、 r_t 兼作充电电阻， r_f 、 r_t 分散在各级内，无专门的 r_d ，也无 g_0 （隔离球隙），其充电原理与前述相同，串联放电后的回路不同。



§1 冲击电压的产生——2 冲击电压发生器的基本原理

2.3 冲击电压发生器的高效回路

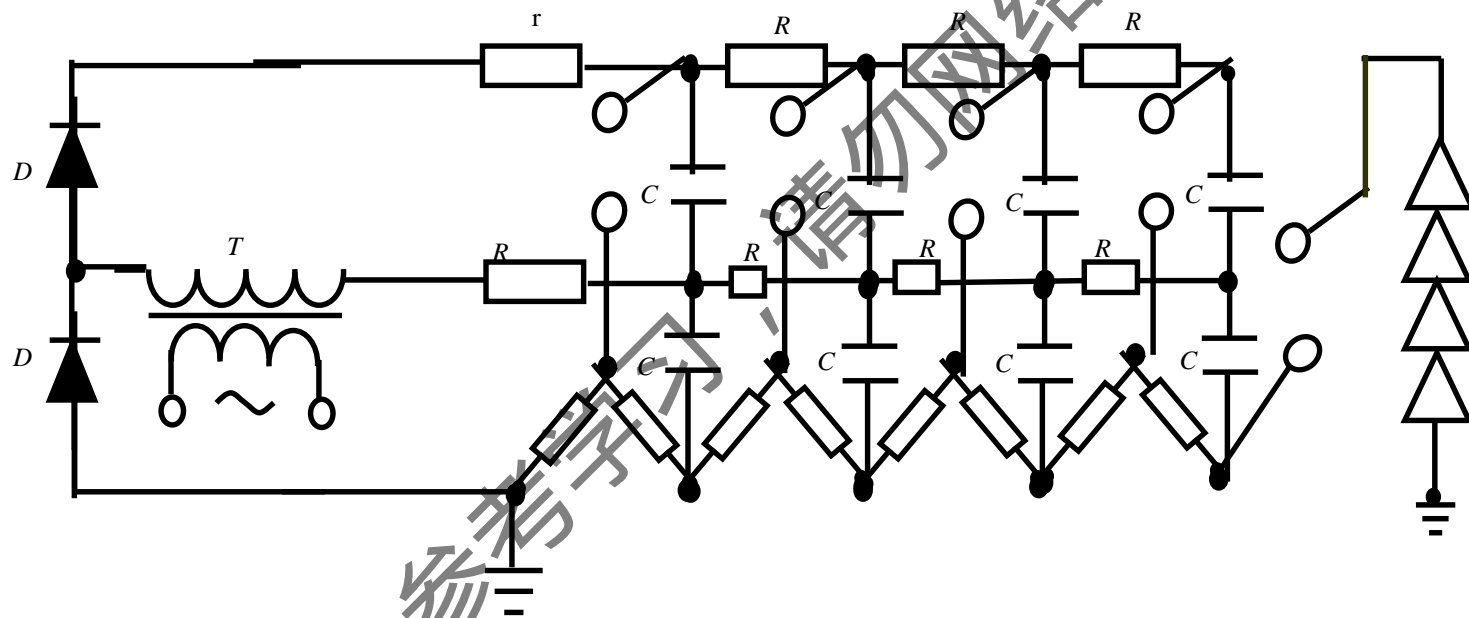


没有了专门阻尼电阻 r_d , C_1 上电压全部加到 r_t 上, (不象前述有分压)
所以输出电压较高, 称为高效率回路 (同时 r_f 也同样阻尼了振荡)



§1 冲击电压的产生——2 冲击电压发生器的基本原理

2.3 冲击电压发生器的双边高效回路：双边





§1 冲击电压的产生——2 冲击电压发生器的基本原理

2.4 冲击电压发生器的技术特征指标

➤ 发生器的标称电压

主电容额定电压与级数乘积，非最大输出电压，一般为几百到几千千伏；
600 kV, 1800 kV

➤ 发生器的标称能量

发生器主电容在标称电压下的总存储能量，一般为几十到几百千焦；
 $\frac{1}{2}CU^2$

➤ 发生器的效率

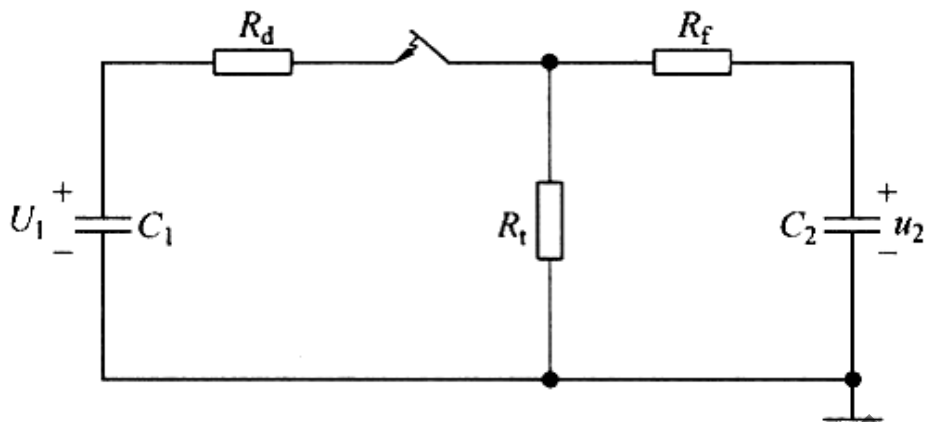
输出电压与各级充电电压总和之比。
峰值

标称电压

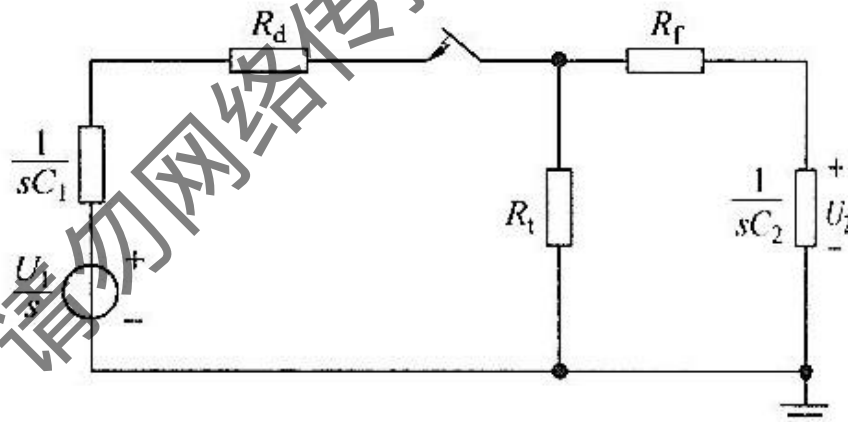


§1 冲击电压的产生——3冲击电压发生器放电回路分析

3.1 简化回路的近似分析



放电等效电路



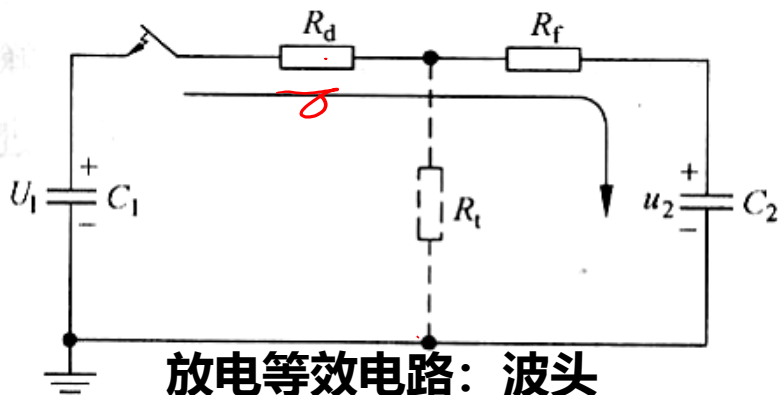
拉普拉斯运算电路

基本Marx回路及高效回路均有相同的等值回路，
只是各自的 R_d 、 R_f 、 R_t 取值不同，对高效回路 $R_d=0$ 。

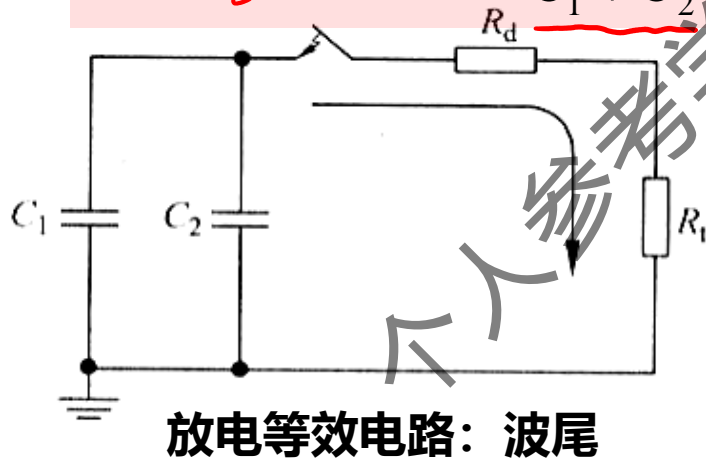


§1 冲击电压的产生——3冲击电压发生器放电回路分析

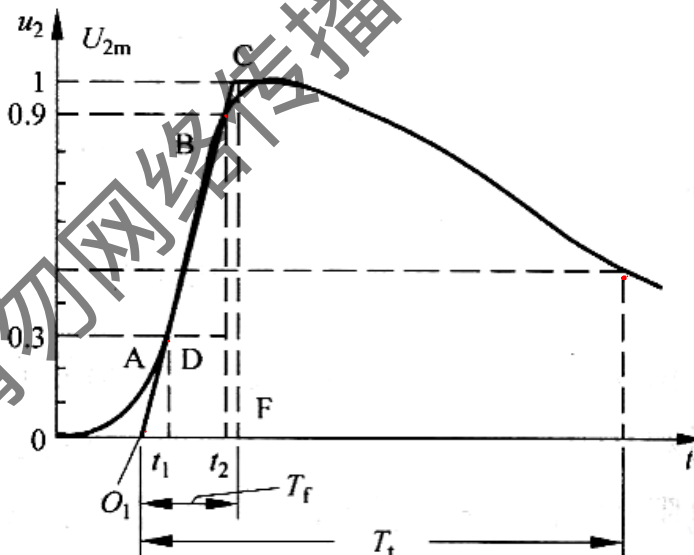
3.2 波头及波尾时间、效率



$$T_f = 3.24(R_f + R_d) \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$



$$T_t \approx 0.693(R_d + R_t)(C_1 + C_2)$$



回路效率： $\eta = \frac{R_t}{R_t + R_d} \cdot \frac{C_1}{C_1 + C_2}$

其中：高效回路 $R_d=0$

C_2 包括试品电容、发生器出口电容、测量设备电容以及调波电容等。

请简述Marx回路工作的基本原理；以及高效回路可以提升冲击电压器效率的原因。

个人参考学习，请勿网络传播

正常使用主观题需2.0以上版本雨课堂

作答



§1 冲击电压的产生——4冲击电压发生器的结构及元件

4 冲击电压发生器的结构及元件

元件的选择

电容：无感的脉冲电容器

波头、波尾电阻：影响波形和效率；

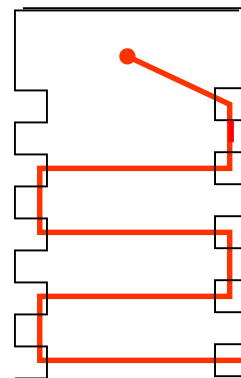
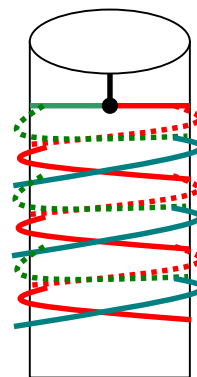
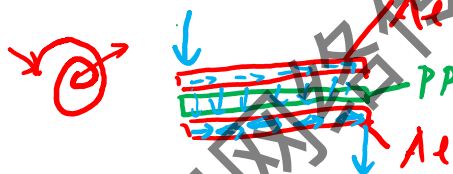
电阻丝无感绕法绕制而成

充电和保护电阻：镍铬丝绕制而成

放电球隙：方便调节球隙；

$d \approx 0.5D$ ，处于同一垂直面上；

防止出现电晕





§1 冲击电压的产生——4 冲击电压发生器的结构及元件

4 冲击电压发生器的结构及元件

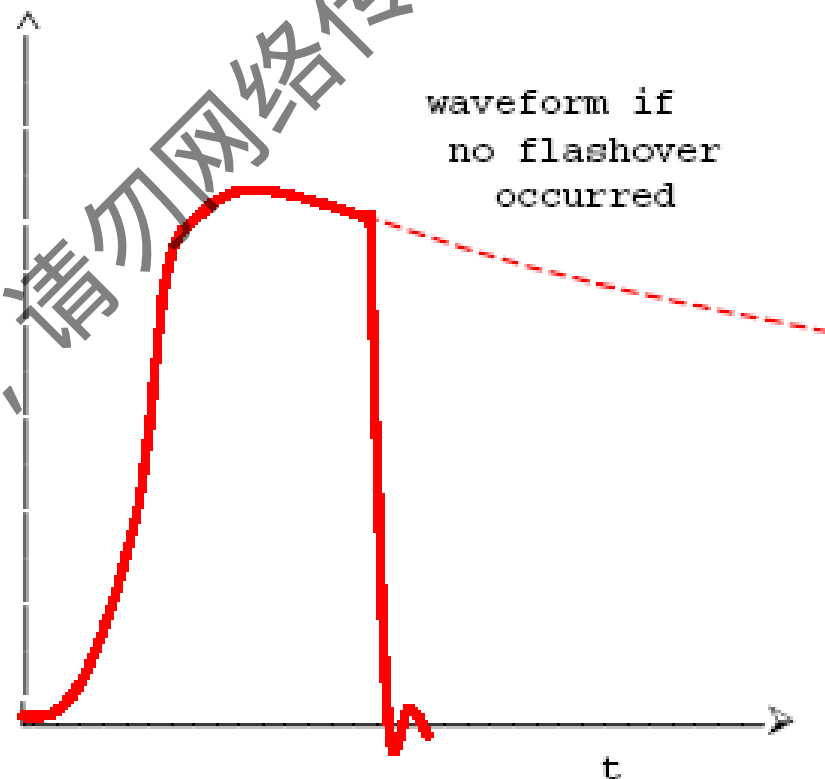
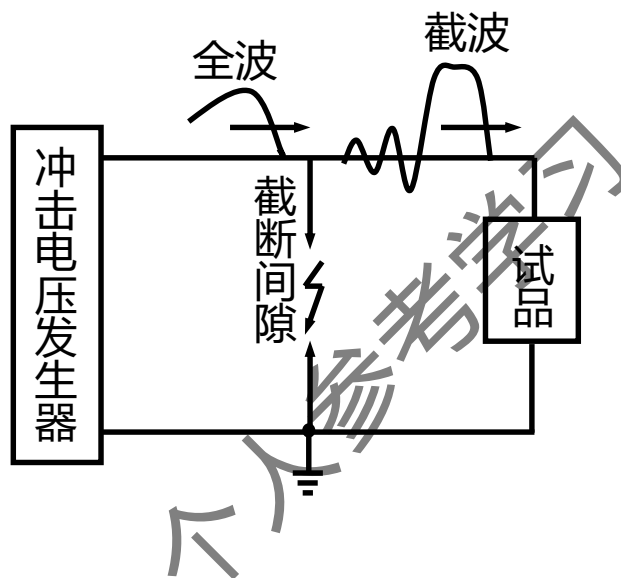




§1 冲击电压的产生——5截断波的产生

5 截断波的产生

一、产生原理



$$\frac{du}{dt}$$



§1 冲击电压的产生——5截断波的产生

5 截断波的产生

利用球隙自放电 *均匀的波形*

球隙放电时，放电发生在冲击电压的波峰或波前

对于： $\pm (1.2/50) \mu\text{s}$ $T_c \leq 1.2 \mu\text{s}$

改进的方法：

冲击电压发生器产生非标准波形， $T_f = 3 \mu\text{s}$

利用棒间隙的自放电 *不均匀的波形*

棒隙放电时，放电发生在冲击电压的波尾

对于： $\pm (1.2/50) \mu\text{s}$ $T_c: 2 \sim 5 \mu\text{s}$

缺点：放电分散性太大



§1 冲击电压的产生——5截断波的产生

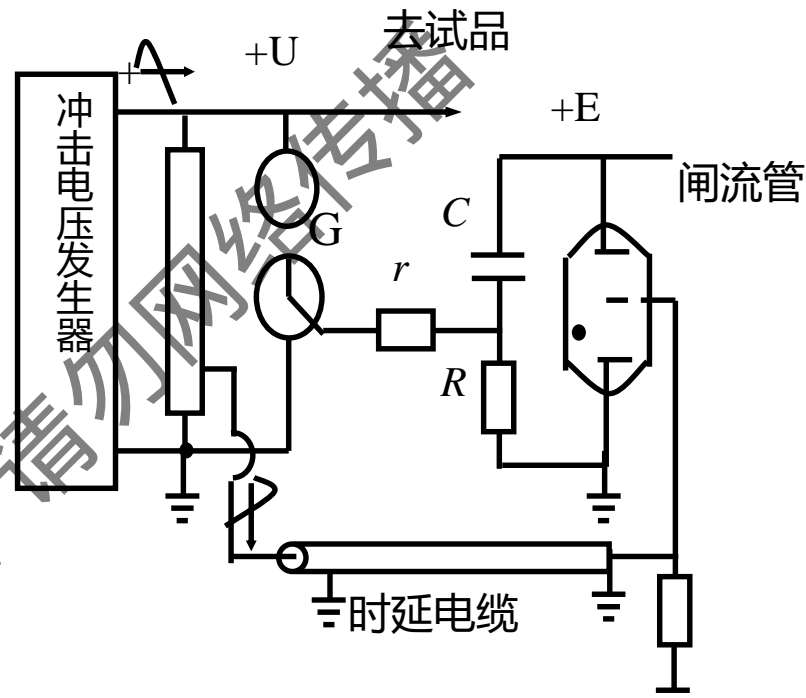
5 截断波的产生

可控球隙放电

用针孔的球间隙，靠向针孔处的脉冲电压来使球间隙放电，发生器不需另外调波，球隙放电可控截断发生在波头，波尾的任意部分。

1、截断时间的控制

截断时间由时延电缆、闸流管点燃、针孔间隙和主间隙截断时延组成，主要由时延电缆来控制，改变时延电缆长度就能控制截断点。



2、对主间隙的要求

主间隙距离/球径（直） $\geq 40\%$ 时，间隙放电时延将急剧上升，所以已知截断电压后，应要求间隙距离 \leq 球径的40%，截断电压越高，要求球径越大。但太大的球径，在经济制作上和实验室的布置，均不利。

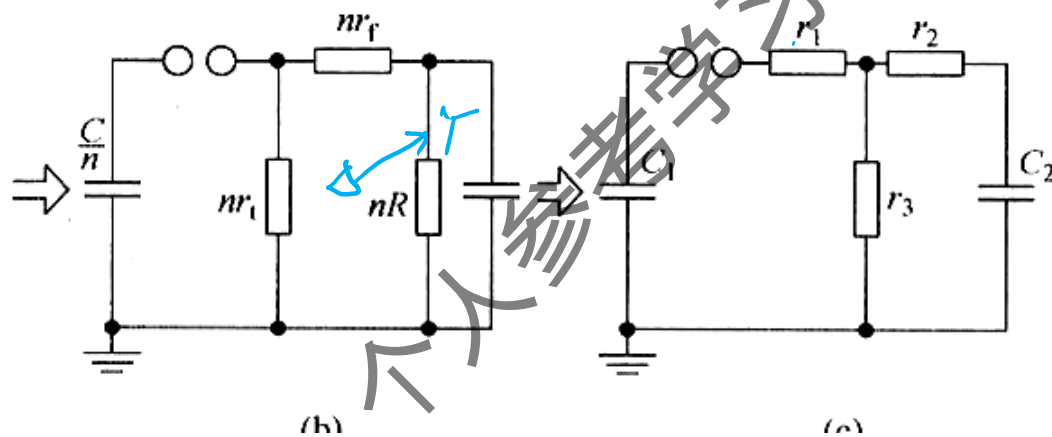


§1 冲击电压的产生——7 产生操作波的方法

6 产生操作波的方法

产生操作波的方法，一是用变压器来产生，二是用冲击电压发生器产生。

产生250/2500 μ s操作波，主电容、调波电容、波头、波尾电阻均增大，所以也要求充电电阻 R 增加，并且应注意考虑 R 对波形的影响。



$$\begin{aligned} r_1 &= \frac{nr_f r_t}{r_f + r_t + R} \\ r_2 &= \frac{nr_f R}{r_f + r_t + R} \\ r_3 &= \frac{nR r_t}{r_f + r_t + R} \end{aligned}$$

目 录

§2

冲击电压的测量

1

概述

2

球隙测量冲击电压的方法

3

冲击电压分压器





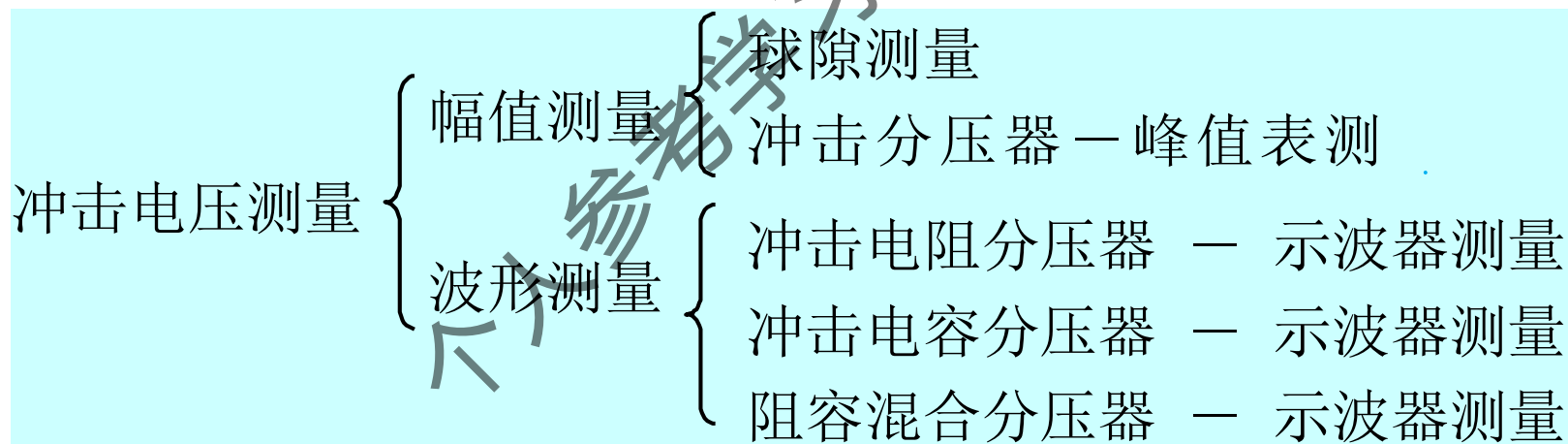
§2 冲击电压的测量——1 概述

1 概述

冲击电压 (Impulse voltage) : 雷电冲击或操作冲击, 均是单次快速变化过程, 不但要求测量系统具有良好的瞬态响应特性, 而且要求具有很高的记录速度。采样率 \rightarrow 采样率 10msps 倍速

测量交直流等慢过程的仪器和系统不一定适宜或根本不可能测量冲击电压。所以冲击波的测量将是一个全新的内容。

冲击电压的测量包括两个方面: 峰值测量和波形记录。



$\leq 50 \text{ kV}$

高压探头 — 示波器



§2 冲击电压的测量——1 概述

1 概述

测量不确定度要求：

标准全波、波尾截波， $1/5\mu\text{s}$ 短波，幅值误差 $\leq\pm 3\%$ ；

波头截波的幅值误差 $\leq\pm 5\%$ ；（ $T_c: 0.5\mu\text{s}\sim 2\mu\text{s}$ 时）

波尾截波的幅值误差 $\leq\pm 3\%$ ；（ $T_c > 2\mu\text{s}$ 时）

所有波头、波尾时间参数测量误差 $\leq\pm 10\%$ ；



§2 冲击电压的测量——2球隙测量冲击电压的方法

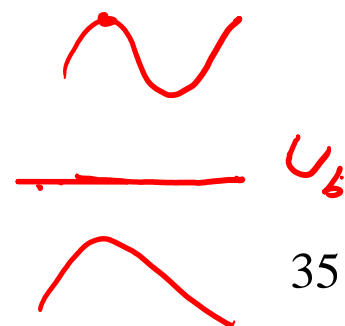
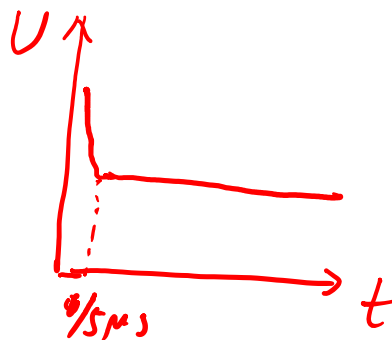
2.1 用球隙可以测量冲击电压幅值

幅值测量的不确定度： $\leq \pm 3\%$

50%放电电压：间隙放电具有一定的概率，一定距离的球间隙，一定电压作用下球间隙的放电概率为50%。

δ -标准差
 $U_{0.5\%} - 3\delta$

球隙为稍不均匀场，其伏秒特性基本为水平线，冲击比为1，所以可以用球隙测量交、直流幅值的数据作为测量 $1/5\mu s$ 短波、雷电标准全波至操作冲击波的数据（比 $1/5\mu s$ 更短波，伏秒曲线上翘，不适用）。且测量误差 $\leq \pm 3\%$ 。





§2 冲击电压的测量——2球隙测量冲击电压的方法

2.2 用球隙测冲击电压时如何减小分散性

影响分散性的因素：

- ① 球面尘污；
- ② 球隙空气游离不充分。

措施：

- ① 擦试干净和多次预放电。
- ② 采用人工照射方法使间隙中空气游离。



§2 冲击电压的测量——2球隙测量冲击电压的方法

2.3 球的保护电阻的作用

测交、直流时 R 很大，以保护球面和防振荡。

测冲击电压串保护电阻 R 的作用：

- ①降低电压截断速度；
- ②消除大直径球隙中的振荡。

对冲击， R 不宜太大，因为：

- ① **冲击时间短**，球面保护要求不高；
- ② 因冲击能量很高，所以放电前，球隙电流 $I=\omega CU$ 较大， **R 上压降亦大， R 太大，影响测量结果。**所以串 $R \leq 500\Omega$ ， $L < 30\mu H$ 防止过电压即可。



§2 冲击电压的测量——2球隙测量冲击电压的方法

2.4 球隙测冲击电压幅值为 $U_{50\%}$

球隙 $U_{50\%}$ 确定方法：

1、简单方法（10次测量法）

某一电压作用于球隙距离上，10次中有4、5、6次闪络（相应6、5、4次不闪络）均可认为该电压为 $U_{50\%}$ 。

2、多级法

- 以预期的50%放电电压的2%~3%作为电压级差，至少加四级电压；
- 每级电压施加10次，求得每级的近似放电概率 P （要求最低一级电压的放电概率接近于0，而最高一级电压的放电概率接近于100%）；
- 在正态概率纸上描点，通过线性拟合求得 $P=50\%$ 对应的 $U_{50\%}$ 。



§2 冲击电压的测量——2球隙测量冲击电压的方法

2.4 球隙测冲击电压幅值为 $U_{50\%}$

球隙 $U_{50\%}$ 确定方法：

3、升降法

- 估计 $U_{50\%}$ 大概为 U_i ，选择级差 $\Delta U = U_i \times (2 \sim 3) \%$ ，
- 施加 U_i 加于间隙，
 - 若未击穿，则下次施加电压应为 $U_i + \Delta U$ ；
 - 若击穿，则下次加压减少 $U_i - \Delta U$ 。
- 升降反复进行约20~40次。

$$U_{50\%} = \frac{\sum n_i U_i}{\sum n_i}$$

U_i —某一级电压值；

n_i —该级电压的加压次数；

$\sum n_i$ —总加压次数（20 ~ 40）。

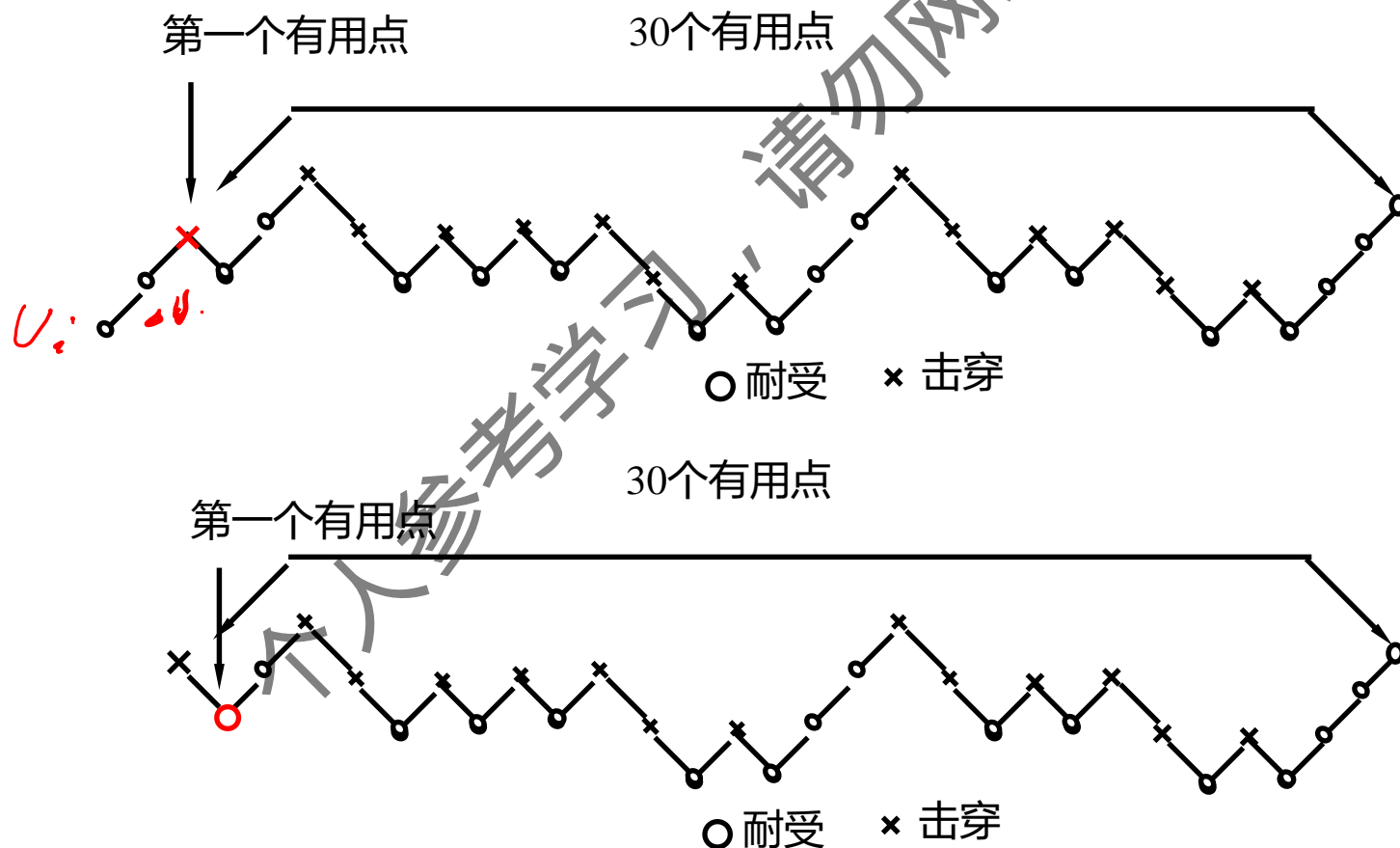


§2 冲击电压的测量——2球隙测量冲击电压的方法

2.4 球隙测冲击电压幅值为 $U_{50\%}$

球隙 $U_{50\%}$ 确定方法：

3、升降法示意图





§2 冲击电压的测量——3 冲击电压分压器

3.0 分压器的目的及线性要求

冲击电压分压器 — 示波器，可用于测量冲击电压的波形和幅值。

分压器的目的：

在电工设备的冲击电压试验中，一般示波器的输入能承受300V，而被测电压为几十万~几百万伏，所以分压器就是用于将高幅值的冲击电压线性缩小到几百伏以内，以供示波器测量。

线性的含义：

（在波形测量过程中），要求分压比准确，且为一常数**不随电压幅值高低和频率（波形）变动而改变**。这样理想的分压器称为无畸变分压器。在高压测量中不存在无畸变分压器，只是力争误差小一些，**IEC规定误差为 $\pm 1\%$** 。

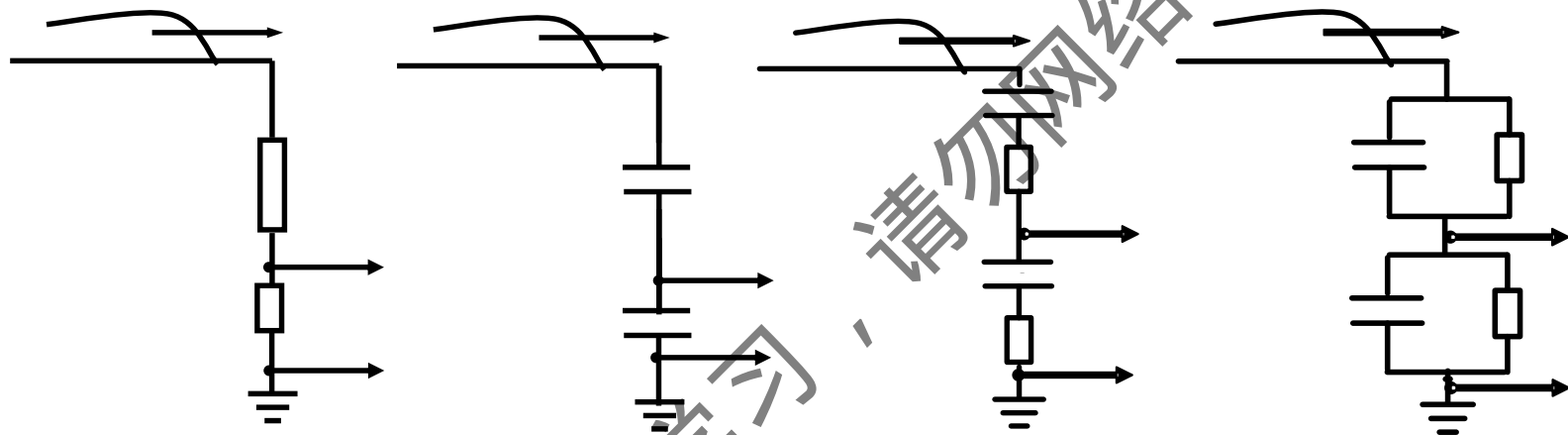
注：分压器误差为1%，但整个冲击试验中的测量误差，不但包括**分压器本体**，还有分压器和冲击电压发生器间的高压引线、分压器和示波器间的测量电缆等引起的误差。



§2 冲击电压的测量——3 冲击电压分压器

3.1 分压器种类及连接

电阻分压器、电容分压器、阻尼分压器（RC串）、阻容分压器（RC并）



雷电冲击电压测量：上述都可采用；

操作：主要采用电容分压器；

阻尼分压器：雷电、操作、交流

阻容：所有波形

还包括：信号电缆、高压引线、示波器、阻尼电阻

要求：波形不畸变，分压比准确、稳定

(响应特性好)

IEC标准 分压比 K : $\pm 1\%$

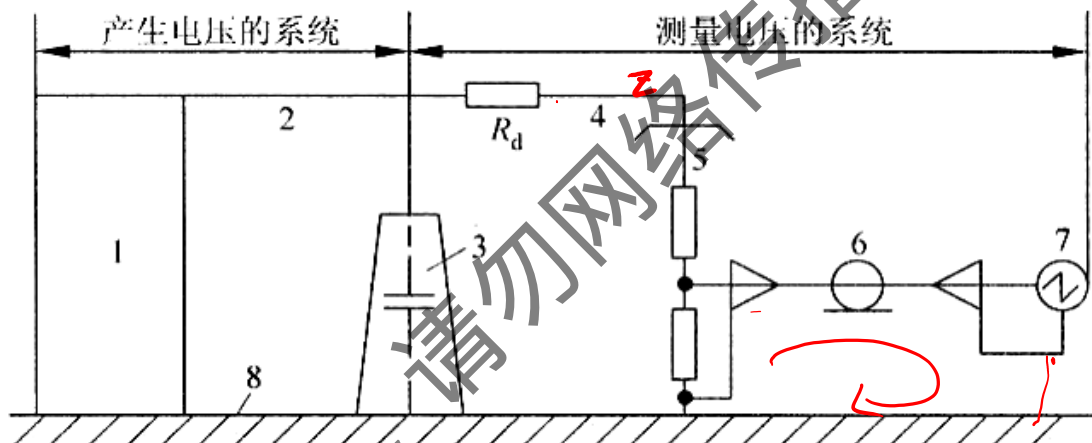
幅值: $\pm 3\%$

T_f, T_t : $\pm 10\%$



§2 冲击电压的测量——3 冲击电压分压器

3.1 分压器种类及连接



1——冲击发生器；2——接试品的引线；3——试品；4——接分压器的引线；
5——分压器；6——同轴电缆；7——记录仪器；8——接地回路

连接线的原则：

- ① 发生器先连线到试品，然后由试品连接到分压器；
- ② 为避免相互电场、磁场干扰，分压器与试品须相距一定距离。
- ③ 分压器和试品间须加阻尼电阻，并进行匹配，改善测量系统转换特性；
- ④ 用屏蔽电缆传输信号；（波纹管、编织层、双层屏蔽）
- ⑤ 测试系统的接地应良好（单端接地）。

波过程



§2 冲击电压的测量——3 冲击电压分压器

3.2 电阻分压器

1 电阻分压器特点

① 冲击电阻分压器是由电阻丝按无感绕法绕制的。

1 mH/m

为减小电感，在满足阻值要求下，线尽量短，所以用电阻率大，温度系数小的电阻丝，如：康铜丝、铜丝、镍铬丝、卡码丝。

② 为提高分压器性能，分压器电阻体常浸油。

可以减小无感绕法的匝距，减小残余电感，增大容量，提高电晕起始电压，从而缩小电阻体尺寸。

油：① 绝缘 ② 散热

③ 分压器阻值范围： $2 \text{ k}\Omega \leq R \leq 20 \text{ k}\Omega$ ，一般约 $10 \text{ k}\Omega$ 。

R 太小，增大了冲击发生器的负载。

1 mA

R 太大，亦使分压器性能变差（方波响应时间 $T \uparrow$ ）

④ 分压器一次试验允许温升 50°C

即每克电阻丝每次冲击时消耗能量 20 J ，所以应按此条件来选择分压器电阻丝的直径。

测量电压： $< 2 \text{ MV}$ 的雷电波

$$\int_0^{\infty} \frac{U(t)^2}{R} dt \quad 44$$



§2 冲击电压的测量——3 冲击电压分压器

3.2 电阻分压器

1 电阻分压器特点

- 雷电冲击下：

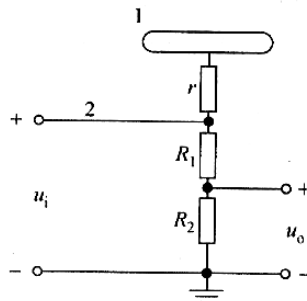
优点： 康铜丝（温度系数小）、卡玛丝（电阻系数高），**温度稳定性好、长期稳定性高；**

- 采用压缩型电阻分压器结构，**响应特性好。**

缺点： 1) 追求高响应，阻值就不会太高-----**负载影响；**

2) 发热： 可测雷电冲击、难以测操作冲击；

3) 考虑到引线的电感，而本体电阻比较小，为了防止振荡，需串联阻尼电阻。

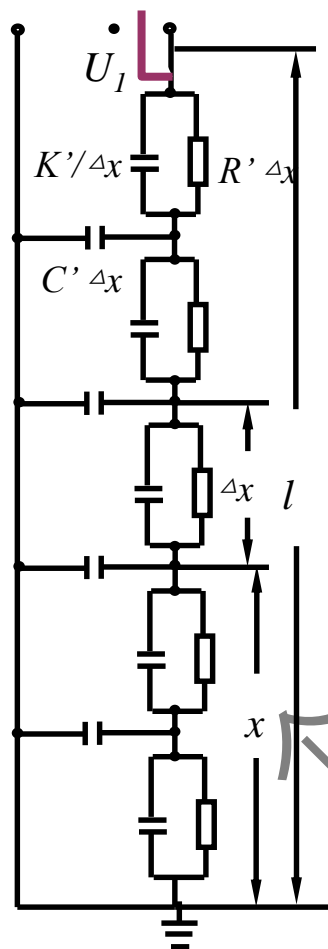




§2 冲击电压的测量——3 冲击电压分压器

3.2 电阻分压器

2 电阻分压器的响应特性

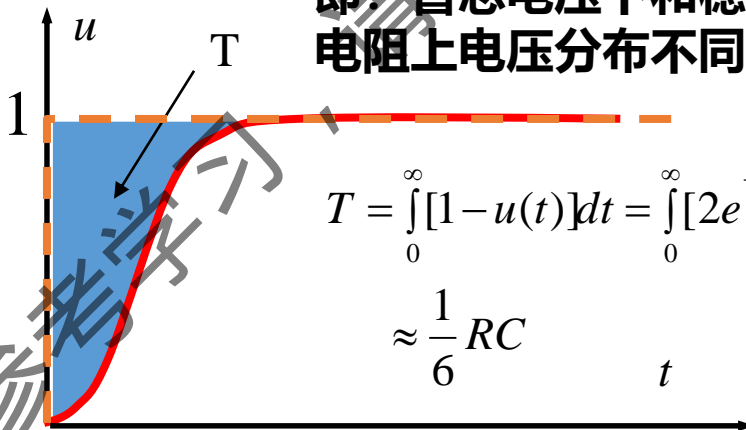


分压器的过渡过程

电压的上升沿：对地电容电流

➡ 电压沿电阻体分布不均

电压的波尾：电压按电阻分布
即：暂态电压下和稳态电压下
电阻上电压分布不同



欲减小方波响应时间，必须减小 RC 的值，分压器尺寸尽可能小（例如放在油中），以减小 C ；同时 R 也不宜过大（但太小会影响回路参数）。

此外，可以在高压端装屏蔽环补偿对地杂散电容，同时还可防止电晕。



§2 冲击电压的测量——3 冲击电压分压器

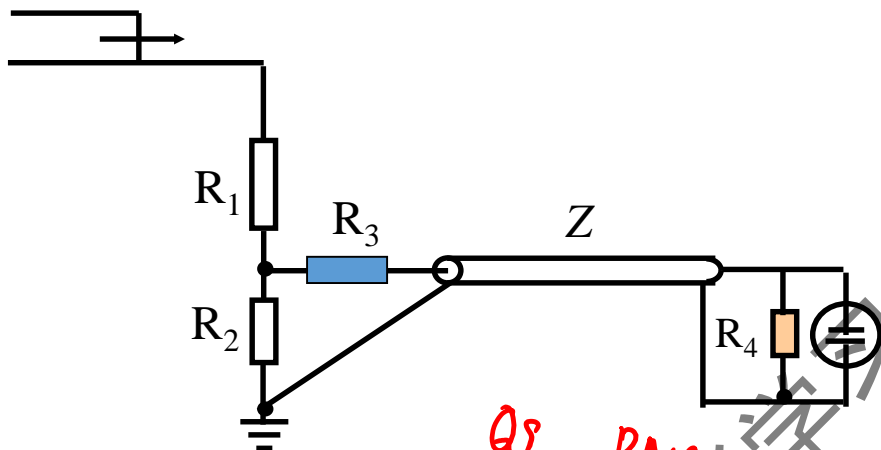
3.2 电阻分压器

3 电阻分压器的测量回路

首末端匹配:

$$R_3 + R_2 // R_1 = Z = R_4$$

此外, 电缆有衰减、畸变作用, 不宜太长



电缆末端: 示波器输入阻抗

电缆首端: $R_2 // R_1$

波在电缆中多次折反射

反射系数:
$$\beta = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$$

电缆的匹配: 至少一端匹配



§2 冲击电压的测量——3 冲击电压分压器

3.2 电阻分压器

3 电阻分压器的测量回路：电缆对分压比的影响

暂态和稳态下，电缆表现形式不同 暂态：波阻抗 Z

首末端匹配：

稳态：电容 C

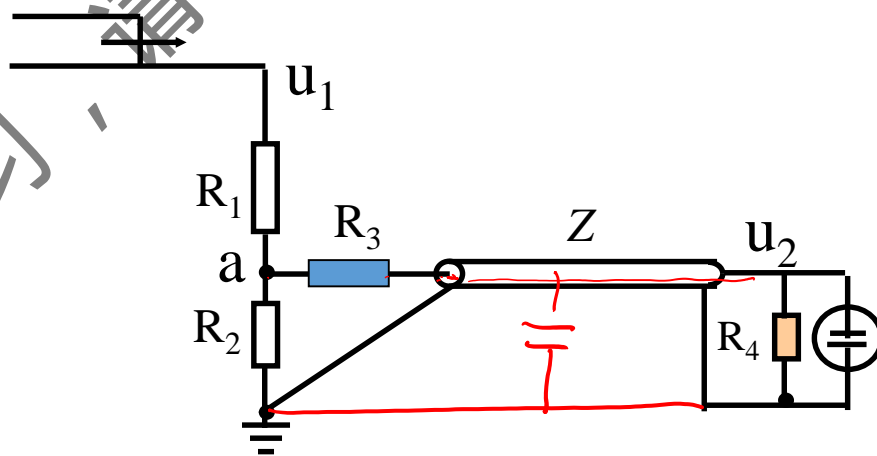
$$t=0^+ \quad u_a = \frac{R_2 \parallel (R_3 + Z)}{R_1 + R_2 \parallel (R_3 + Z)} u_1$$

$$u_2 = \frac{R_2 \parallel (R_3 + Z)}{R_1 + R_2 \parallel (R_3 + Z)} \cdot \frac{Z}{R_3 + Z} u_1$$

$$t=\infty \quad u_a = \frac{R_2 \parallel (R_3 + R_4)}{R_1 + R_2 \parallel (R_3 + R_4)} u_1$$

$$u_2 = \frac{R_2 \parallel (R_3 + R_4)}{R_1 + R_2 \parallel (R_3 + R_4)} \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4} u_1$$

$$K_{t=0} = K_{t=\infty} = \frac{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4) + R_1 R_2}{R_2 R_4} \approx \frac{2(R_1 + R_2)}{R_2} = 2k.$$



$$R_3 + R_2 = Z = R_4$$



§2 冲击电压的测量——3 冲击电压分压器

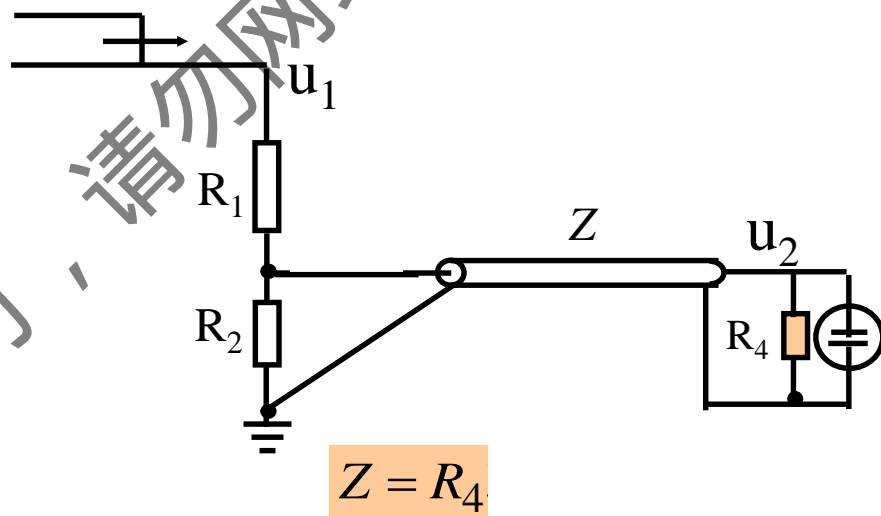
3.2 电阻分压器

3 电阻分压器的测量回路：电缆对分压比的影响

末端匹配：

$$t=0^+ \quad u_2 = \frac{R_2 // Z}{R_1 + R_2 // Z} u_1$$

$$t=\infty \quad u_2 = \frac{R_2 // R_4}{R_1 + R_2 // R_4} u_1$$



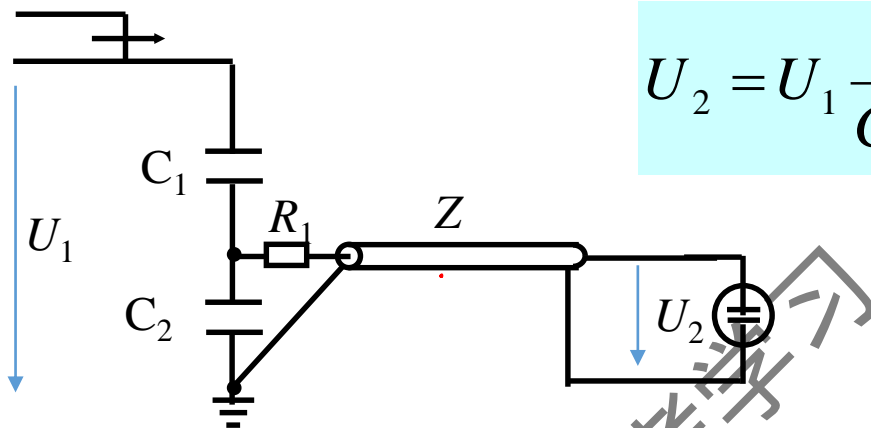
$$K_{t=0} = K_{t=\infty} = \frac{R_1(R_2 + R_4) + R_2 R_4}{R_2 R_4} \approx \frac{R_1 + R_2}{R_2}$$



§2 冲击电压的测量——3 冲击电压分压器

3.3 电容分压器

首端匹配 $R_1 = Z$



$$U_2 = U_1 \frac{C_1}{C_1 + C_2} \cdot \frac{Z}{Z + R_1} \cdot 2 \left(\frac{u_1}{u_2} \right)_{t=0} = \frac{C_1 + C_2}{C_1}$$

$$U_2 = U_1 \frac{C_1}{C_1 + C_2 + C_c}$$

$$\left(\frac{u_1}{u_2} \right)_{t=\infty} = \frac{C_1 + C_2 + C_c}{C_1}$$

$$k_0 \neq k_\infty$$

分压比误差:

$$\frac{U_{20} - U_{2\infty}}{U_{20}} \approx \frac{C_c}{C_2}$$

因为 C_c 太大, 首端匹配是行不通的



§2 冲击电压的测量——3 冲击电压分压器

3.3 电容分压器

末端电阻匹配也是不行的，原因在于波尾部分电压频率低（变化慢）， C_2 容抗大大增加，但如果并联一个小的匹配电阻，则改变了低压臂阻抗，使得测量失真。

双端匹配：RC串联作为末端匹配

$$u_a = \frac{C_1}{C_1 + C_2} U_1 \quad u_b = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \cdot \frac{Z}{R_1 + Z} U_1 = \frac{1}{2} u_a$$

$$u_c = u_b = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \cdot \frac{Z}{R_1 + Z} \cdot U_1 \cdot \frac{C_1}{C_1 + C_2} \cdot \frac{U_1}{2} \quad (\text{暂态})$$

$$u_c = \frac{C_1}{C_1 + C_2 + C_3 + C_k} \cdot U_1 \quad (\text{稳态})$$

$$K_{t=0} = \frac{2(C_1 + C_2)}{C_1}$$

$$K_{t=\infty} = \frac{C_1 + C_2 + C_3 + C_k}{C_1}$$

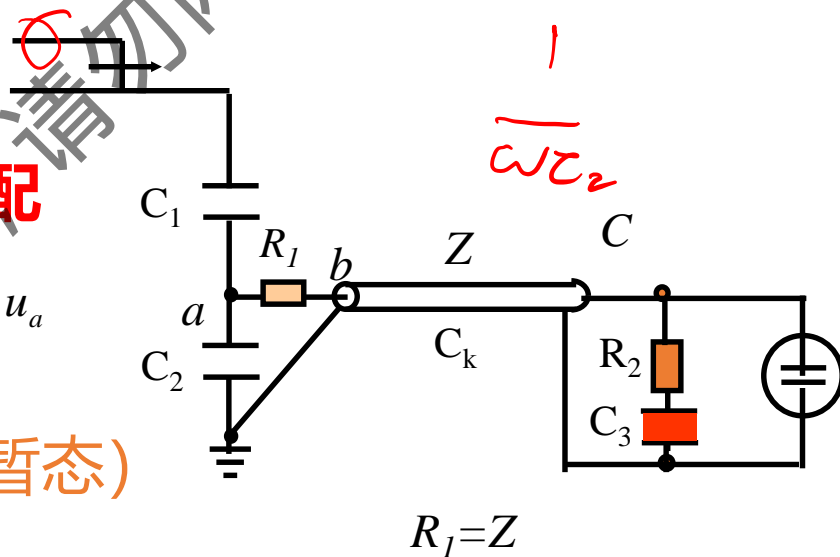
若： $C_1 + C_2 = C_3 + C_k$

$$K_{t=0} = K_{t=\infty}$$

双端匹配条件：

$$R_1 = Z = R_2$$

$$C_1 + C_2 = C_3 + C_k$$





§2 冲击电压的测量——3 冲击电压分压器

3.4 阻容并联分压器

暂态分布：按电容分布

稳态分布：按电阻分布

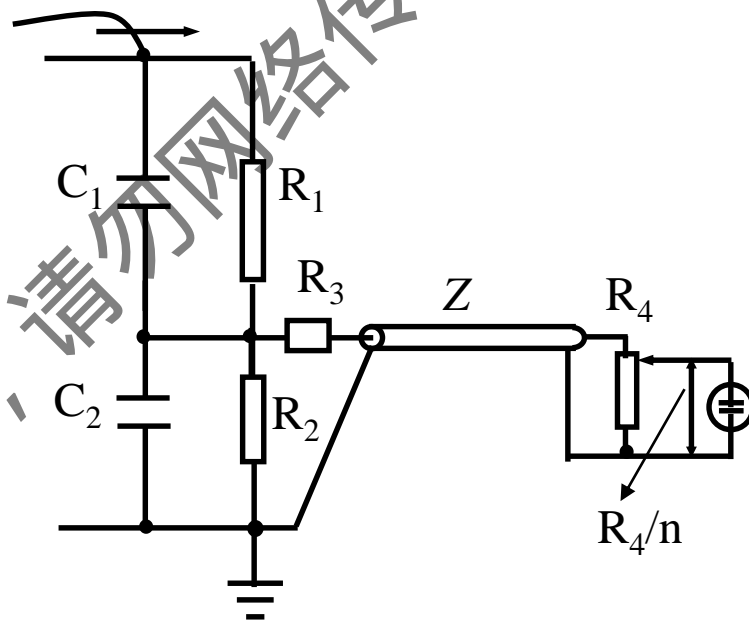
$$K_{t=0} = \frac{C_1 + C_2}{C_1} \cdot \frac{R_3 + Z}{Z}$$

$$K_{t=\infty} = \frac{R_1 + R'_2}{R'_2} \cdot \frac{R_3 + R_4}{R_4}$$

$$R'_2 = \frac{R_2(R_3 + R_4)}{R_2 + R_3 + R_4}$$

若： $K_{t=0} = K_{t=\infty}$

$$C_1 R_1 = C_2 R'_2$$



$$R_2 + R_3 = Z = R_4$$