



高电压技术

屠幼萍

 +80795842, 13691145432

 typ@ncepu.edu.cn



华北电力大学
North China Electric Power University

高电压与电磁兼容技术研究所
High Voltage & Electromagnetic Compatibility Laboratory





第11讲 高电压试验设备

- 交流高电压试验设备
- 直流高电压试验设备
- 冲击电压试验设备
- 冲击电流实验设备

一、交流高电压试验设备

试验变压器与电力变压器区别与联系

试验变压器与电力变压器的运行条件不同：

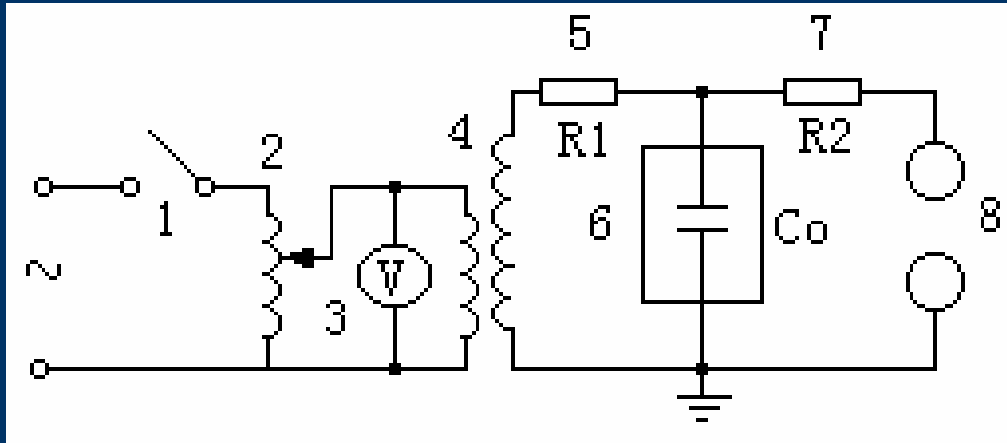
	试验变压器	电力变压器
负荷性质	容性	感性
容量	小	大
时间	短	长
温度	低	高
安全系数	小 (1.1)	大 (绝缘配合)

一、交流高电压试验设备

- 工频高电压试验变压器
- 高压串联谐振试验设备
- 串级高压试验变压器

工频高电压试验变压器

工频高电压试验的基本线路



- 1-电源开关； 2-调压器； 3-电压表；
4-试验变压器； 5-变压器保护电阻；
6-试品； 7-测量铜球保护电阻；
8-测量铜球

试验电流：

$$I_s = \omega C U \times 10^{-9} \text{ A (有效值)}$$

所需的试验容量：

$$P_s = \omega C U^2 \times 10^{-9} \text{ kVA}$$

U ：试验电压kV(有效值)

C ：试品的电容量 pF

国产试验变压器的额定电压和额定容量

额定电压 kV	5	10	25	35	50	100	150	250	300	500	750	1000	1500	2250	
额定容量 kVA	3	3	3	3	5	10	25	250	300	300	750	1000	750	2250	
	5	5	5	5	10	25	50	500	1200	500	1500	2000	1500	9000	
	10	10	10	10	25	50	100	1000		1000	3000				
		25	25	25	50	100	150			1500					
			50	50	100	200	300								
				100	250	250									
				150	500	400									
				200	750										

常见的试品电容量

试品名称	电容值 (pF)
线路绝缘子	<50
高压套管	5 ~ 600
高压断路器 电流互感器 电磁式电压互感器	100 ~ 1000
电容式电压互感器	3000 ~ 5000
电力变压器	1000 ~ 15000
电力电缆 (每米)	150 ~ 400
SF ₆ 绝缘的GIS	1000 ~ 10000

选用试验变压器额定电压及容量实例

某二次变电所需对大修后的一台35 kV/10 kV / 3200 kVA的电力变压器进行高压绕组对低压绕组和铁芯、铁外壳（后两者良好接地）进行工频耐压试验，已用电桥测出其高压绕组对低压绕组和地之间的电容量为5870pF，请选择一台合适的高压试验变压器

试验： 工频耐压试验

试品： 35kV/10kV/3200kVA的电力变压器

试品电容： 5870 pF

原则：所需的试验变压器额定电压 U_N ，应不低于试验电压 U 。试验变压器的额定容量 P_N 应这样来选择：

$$P_N \geq I_s U_N$$

题解：查阅有关规程（见第5章的交流耐压试验）可知，此时变压器应施加的**试验电压应为72 kV**

加压时，试验变压器高压绕组流过的**电流有效值为：**

$$\begin{aligned} I_s &= \omega C U \times 10^{-9} \text{ A} \\ &= 2\pi f C U \times 10^{-9} \\ &= 314 \times 5870 \times 72 \times 10^{-9} \\ &= 0.133 \text{ A} \end{aligned}$$

所需的试验容量：

$$\begin{aligned} P_s &= I_s U \text{ kVA} \\ &= 0.133 \text{ A} \times 72 \text{ kV} \\ &= 9.58 \text{ kVA} \end{aligned}$$

据前表所示，试验变压器的额定电压选100 kV

注意：试验变压器的**额定容量不能选择10kVA的**，因为此容量的变压器高压绕组最大只能流过0.1A，应选择100kV/25kVA的试验变压器以满足左边原则。即

$$25 \text{ kVA} > 13.3 \text{ kVA}$$

高压串联谐振试验设备

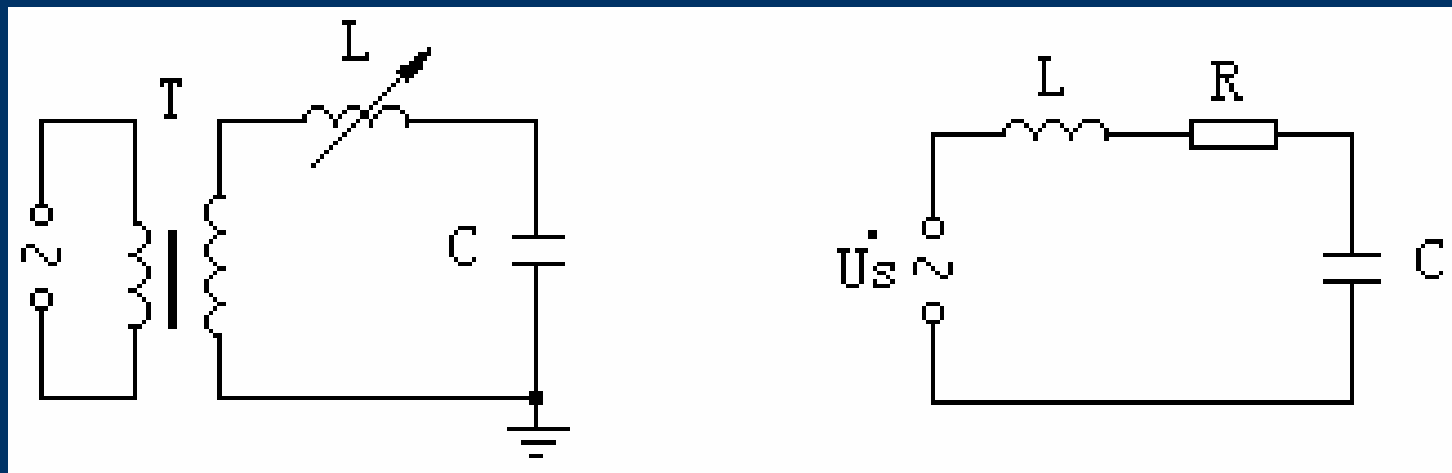
对于特大的电容的试品，如电缆厂中的成卷高压电缆的耐压试验，以及特大容量发电机的耐压试验等，常用串联谐振装置来满足试验的要求

谐振条件: $\omega L = 1/\omega C$, 其中 $\omega = 2\pi f$, $f = 50 \text{ Hz}$

谐振时: 电流达到最大值 $I_M = U_s/R$

L及C上获得比电源电压高（通常高20倍）的电压

$$U_c = U_L = QU_s, \quad Q = \omega L / R = \sqrt{L/C} / R$$



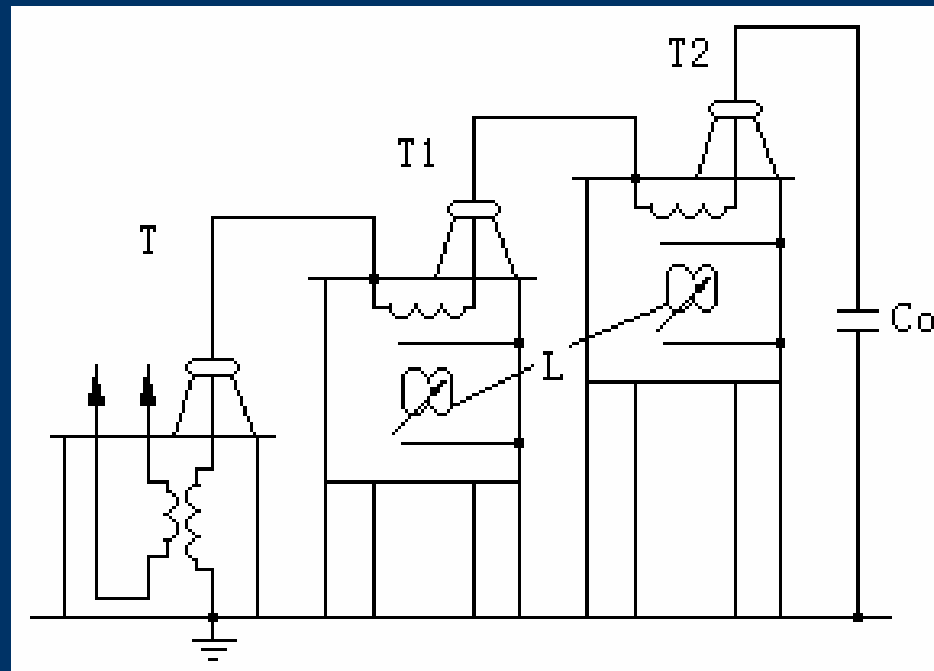
串联谐振的原理图

串联谐振装置的等值电路

串联高压试验变压器

单台试验变压器的额定电压一般不超过 $500\text{kV}\sim 750\text{kV}$

常用几个变压器串级的办法更高的输出电压



串级高压试验变压器

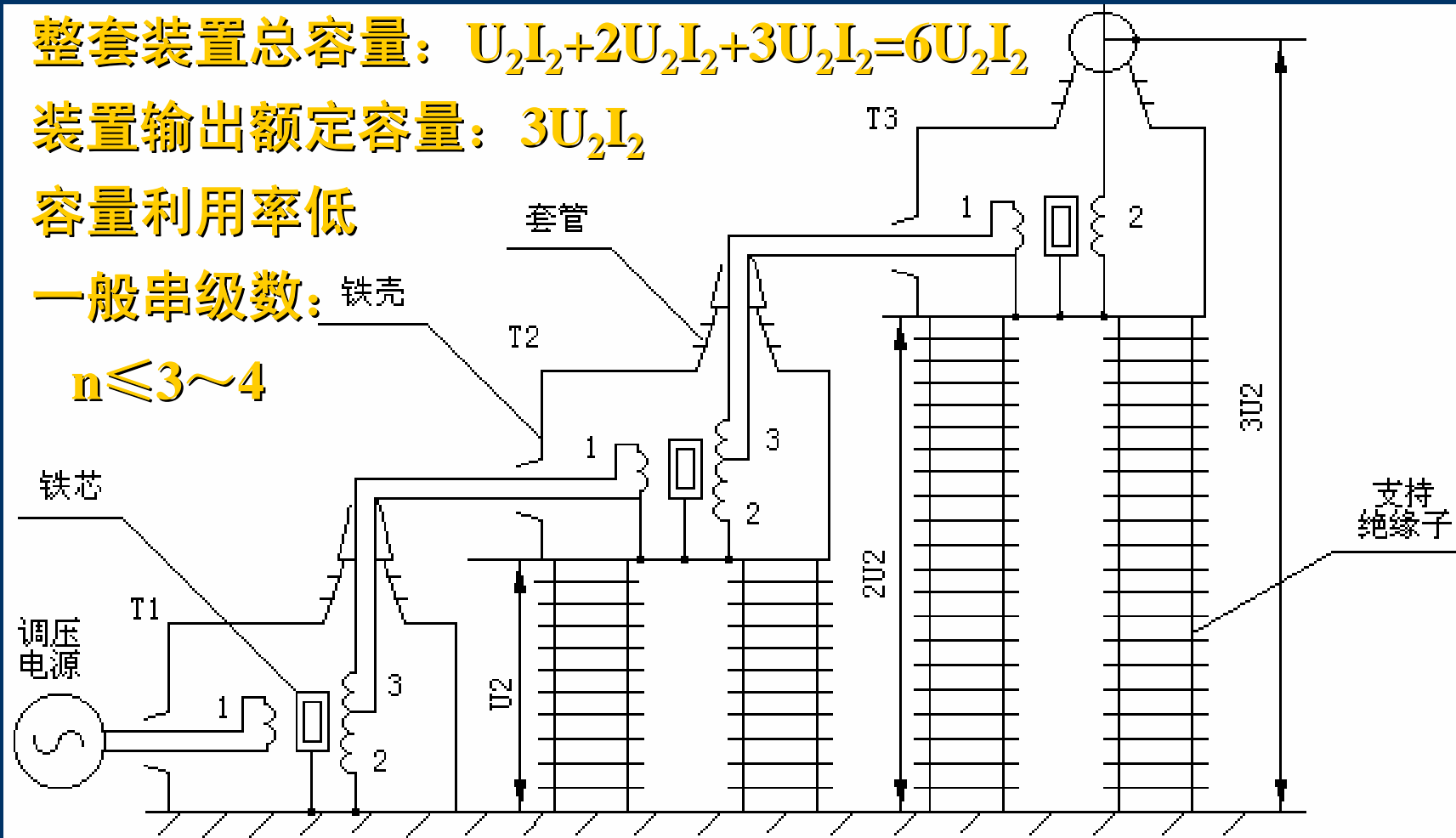
整套装置总容量： $U_2I_2+2U_2I_2+3U_2I_2=6U_2I_2$

装置输出额定容量： $3U_2I_2$

容量利用率低

一般串级数：

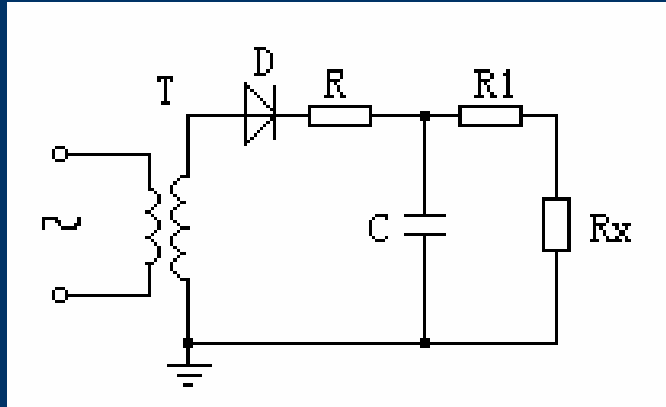
$$n \leq 3 \sim 4$$



三变压器组成的串级变压器示意图

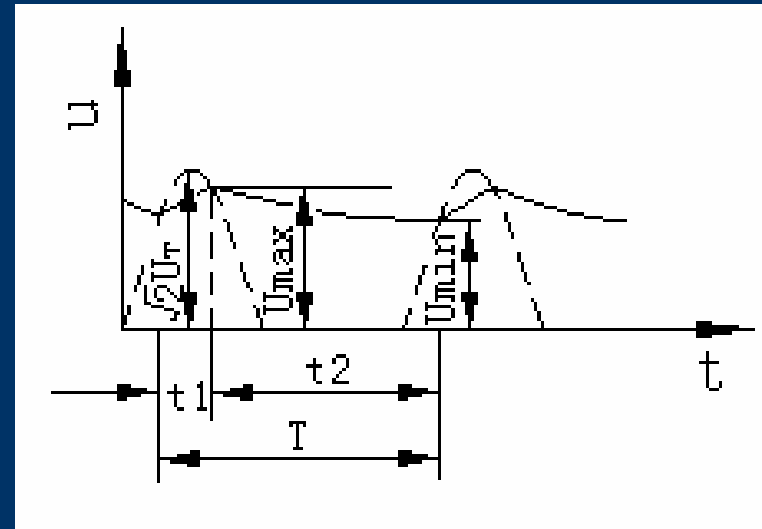
二、直流高电压试验设备

半波整流电路



T: 试验变压器 C: 滤波电容器
D: 高压硅堆; R: 保护电阻
Rx: 试品; R1: 限流电阻

半波整流电路输出电压波形



U_T : 变压器电压 (有效值)

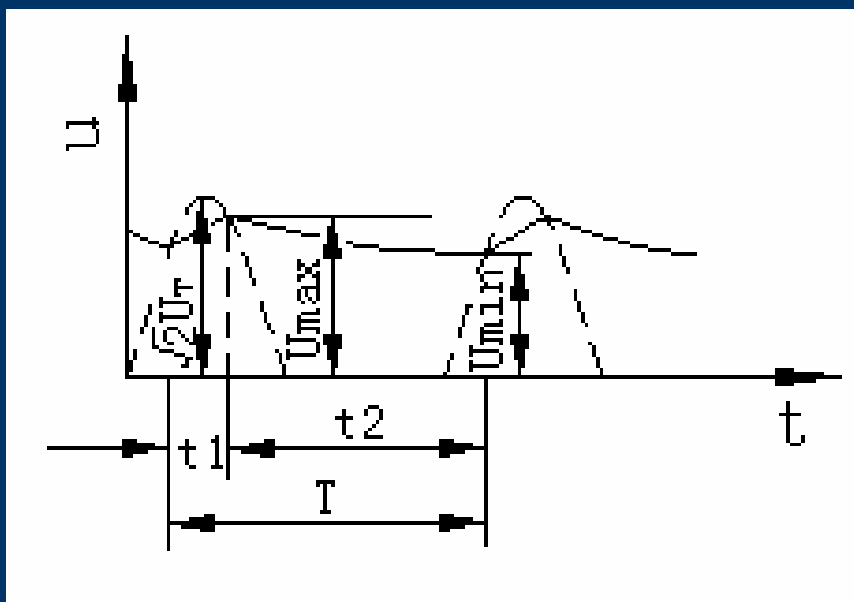
U_{max} : 电压最大值

U_{min} : 电压最小值

δU : 脉动幅值

$$\delta U = (U_{max} - U_{min})/2$$

半波整流电路输出电压波形



IEC和国家标准都规定

直流电压：算术平均值 U_d ，即

$$U_d \approx (U_{max} + U_{min}) / 2$$

纹波系数：电压的纹波系数

$$S = \delta U / U_d$$

直流电压的 S 不能大于3%

倍压直流与串级直流装置

Why?

倍压电路的工作原理

变压器输出电压峰值 $\sqrt{2}U_T$

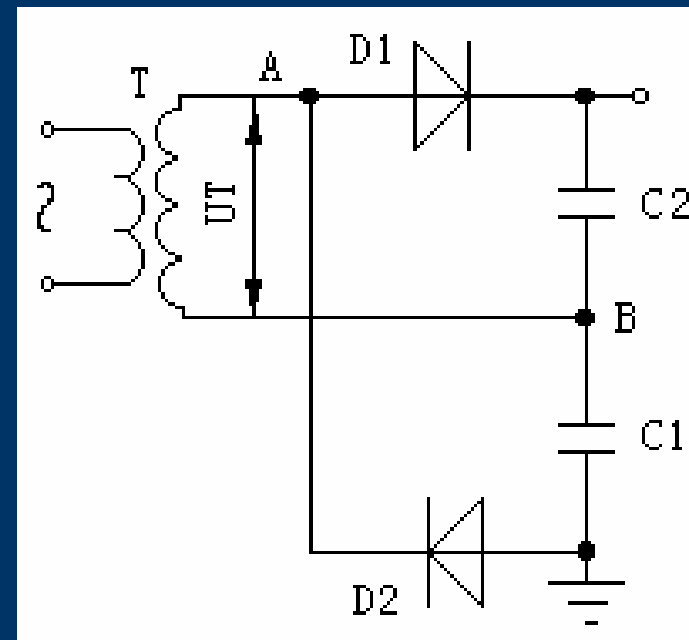
直流高压 $2\sqrt{2}U_T$

$$U_{C1} = U_{C2} = \sqrt{2} U_T$$

$$U_B = \sqrt{2} U_T$$

U_A 可达 $2\sqrt{2}U_T$

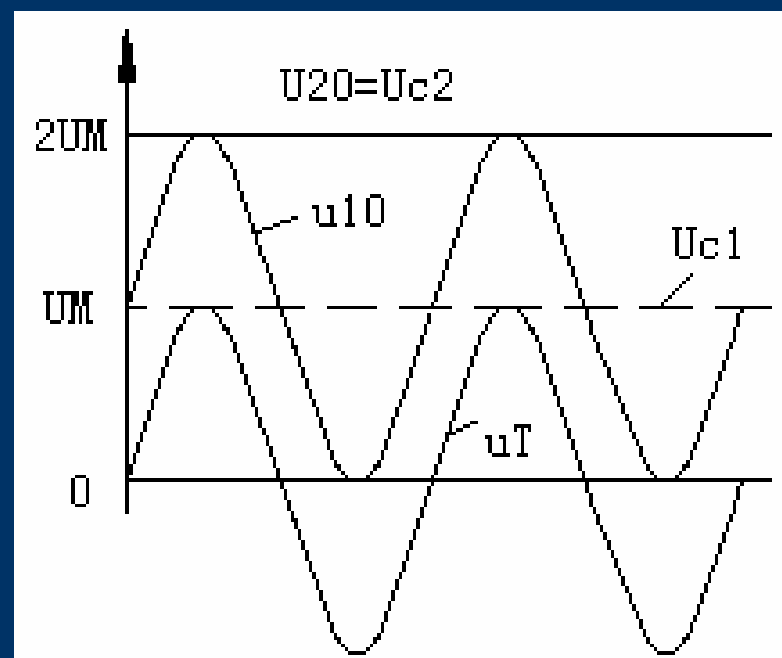
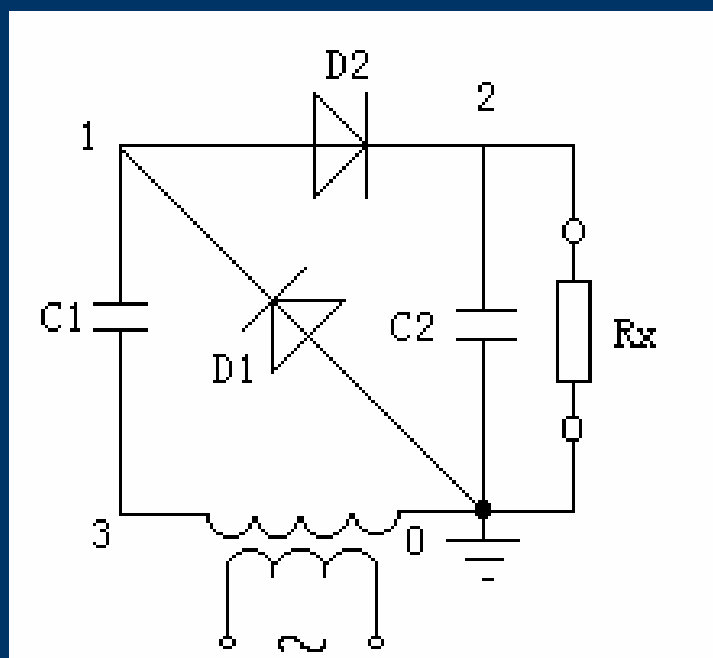
要求变压器绝缘水平高



高压变压器不接地的直流倍压电路

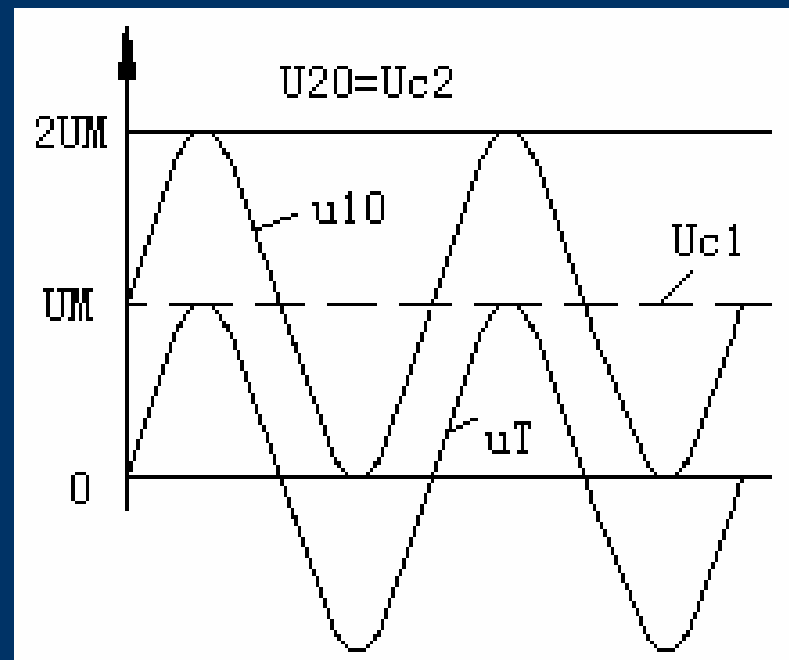
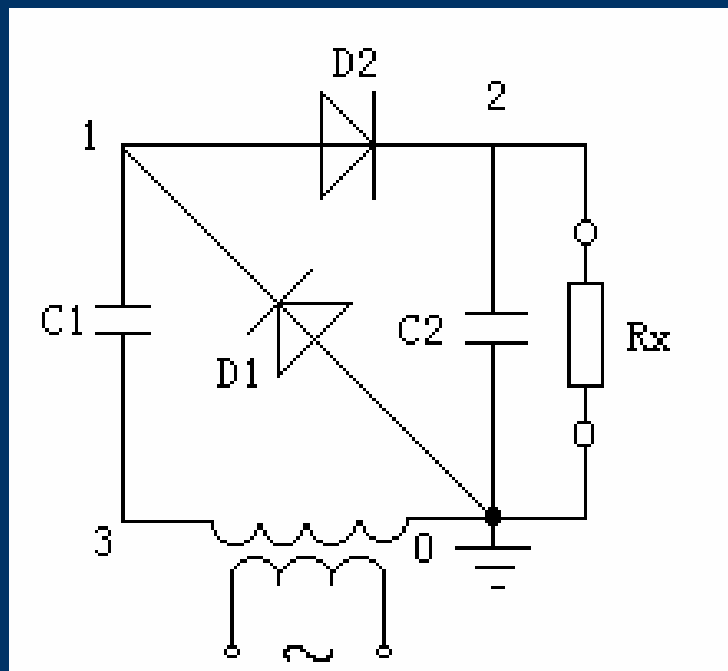
变压器一端接地的直流倍压电路

降低变压器的绝缘水平，可采用普通型变压器作为直流电源的变压器



变压器一端接地的直流倍压电路 倍压电路空载时的各点电位

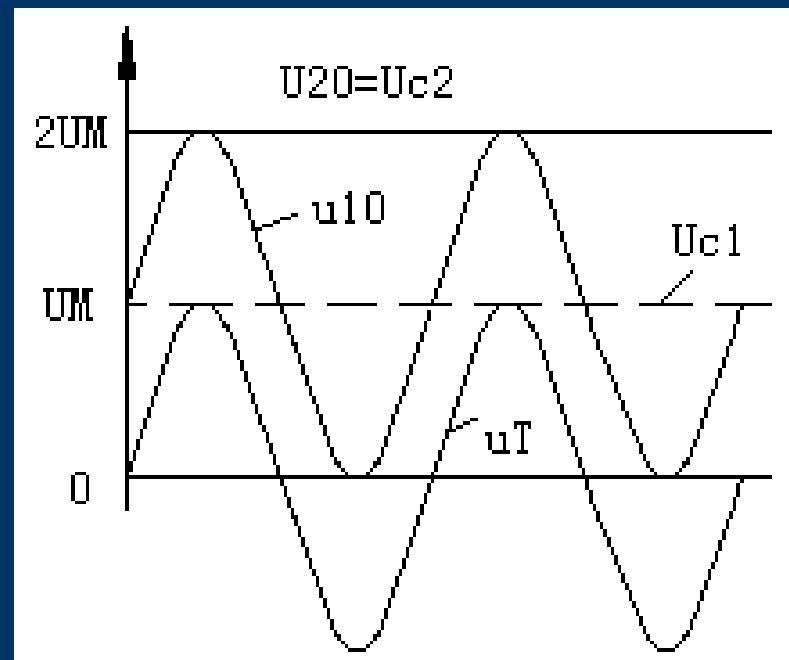
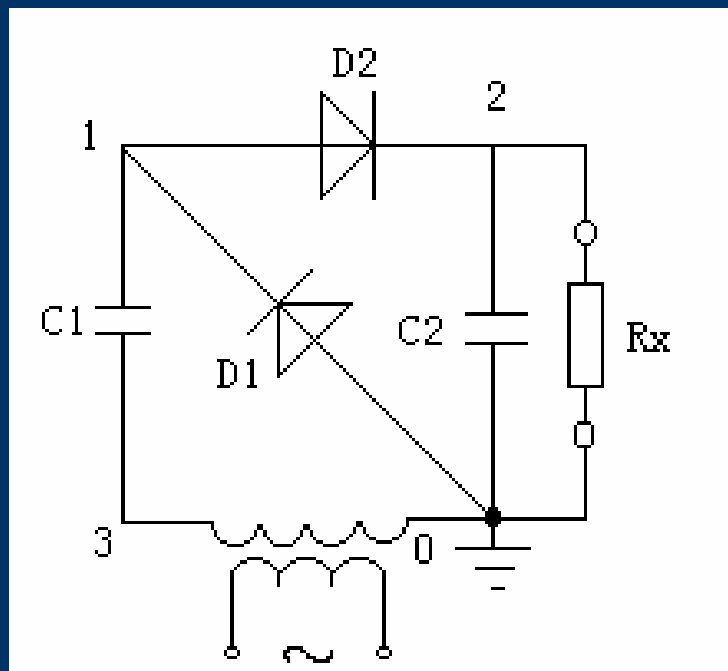
倍压过程： 当T的高压绕组的端点3相对于0点电压为负时，D1正向导通，使电容C1充电，充电稳定后点1相对于3建立起 U_M 的电压



变压器一端接地的直流倍压电路

倍压电路空载时的各点电位

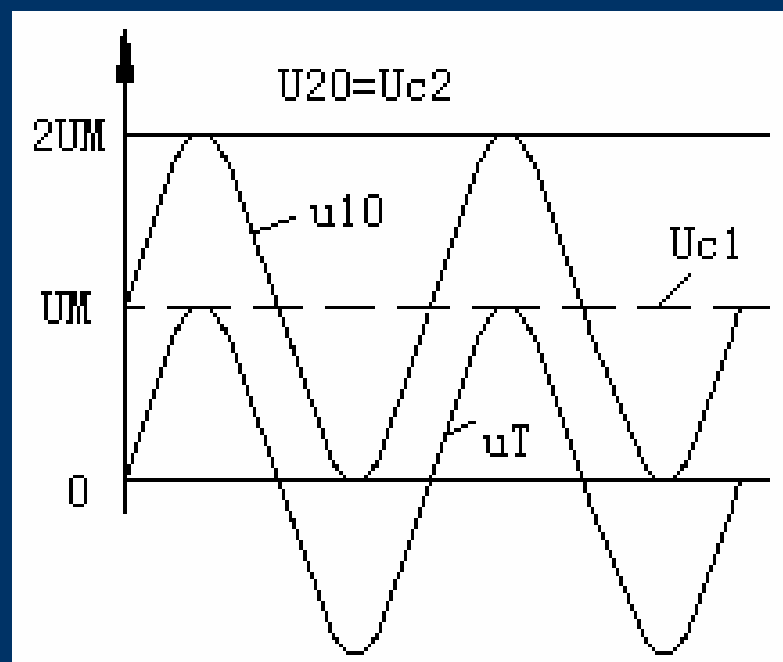
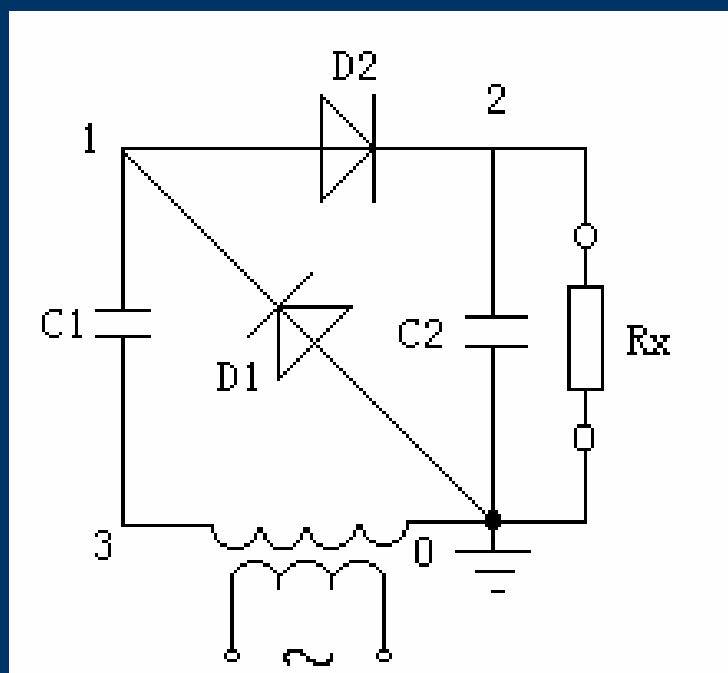
倍压过程： 当点1相对于0为正时，D1开始截止



变压器一端接地的直流倍压电路

倍压电路空载时的各点电位

倍压过程： 在点1相对于2为正时D2导通。充电稳定时，由于点3相对于0的最高电压可达 $+U_M$ ，点1相对于3已充有 $+U_M$ 电压，所以点1的对地电压最高可达 $+2U_M$ ，此时D2导通，最终可使C2充上 $2U_M$ 的电压

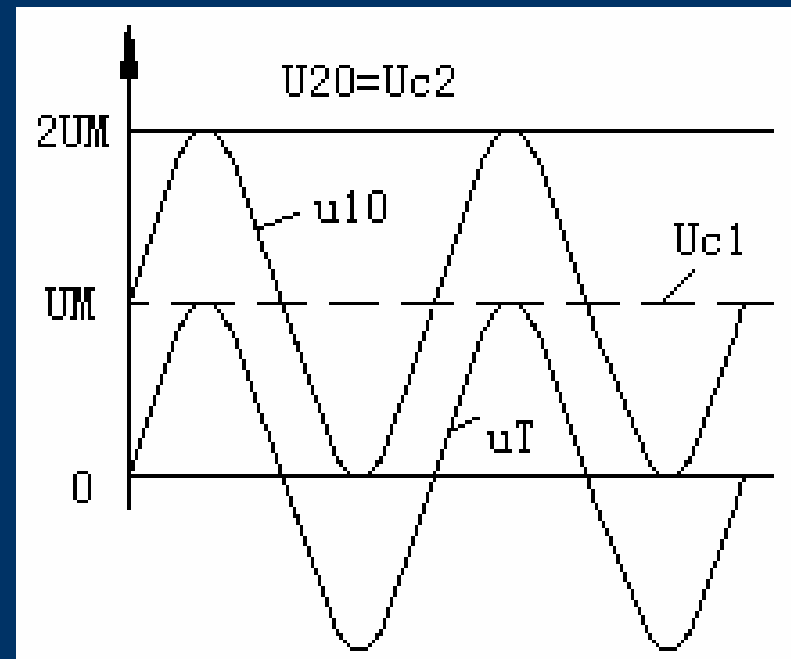
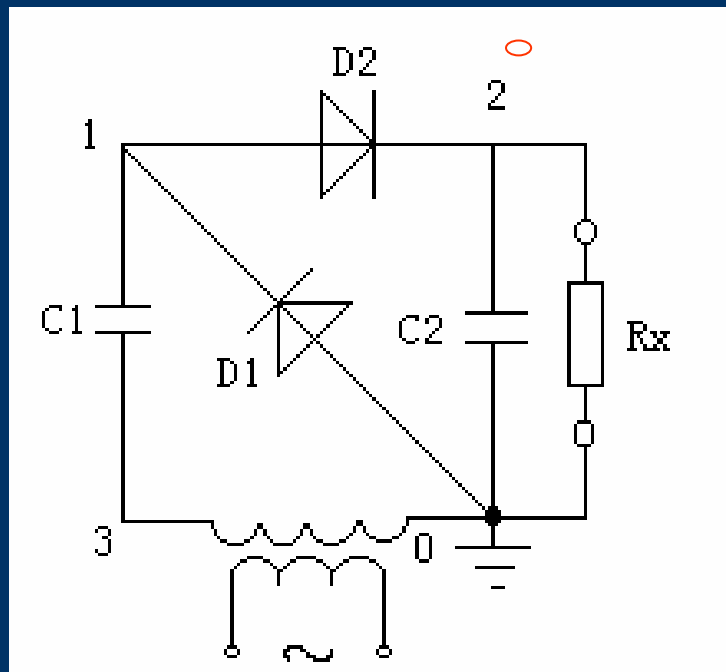


变压器一端接地的直流倍压电路 倍压电路空载时的各点电位

Why?

脉动系数

与半波整流一样



变压器一端接地的直流倍压电路 倍压电路空载时的各点电位

串级直流装置

概念： 倍压电路的积木式的迭加

电压脉动幅值：

$$\delta U \approx [n(n+1)I_d] / (4fC)$$

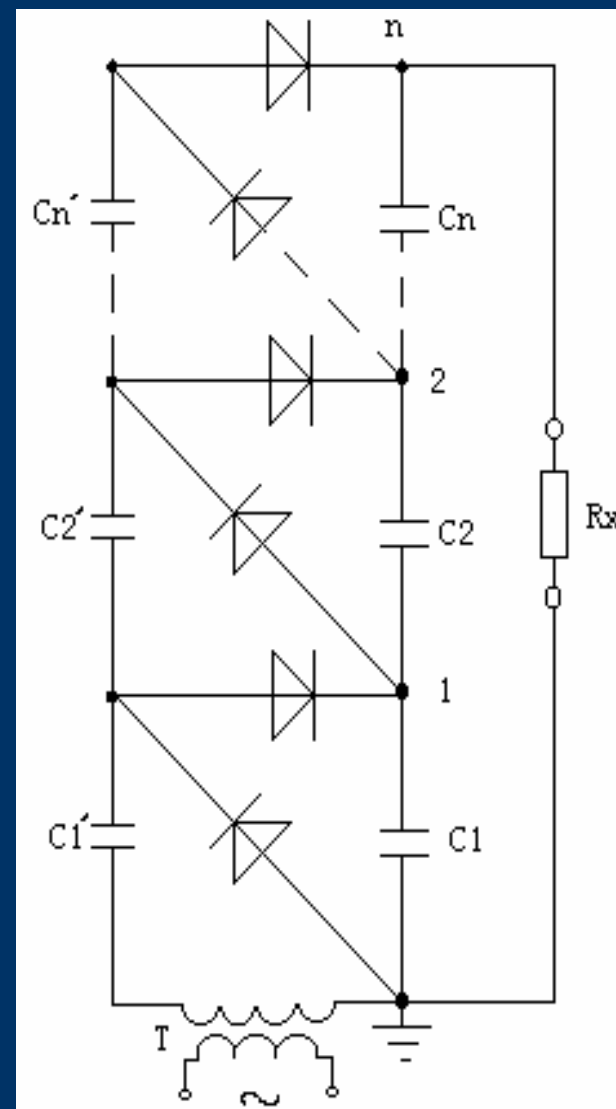
δU 随级数 n 的平方倍关系上升

压降：

$$\Delta U = [(8n^3 + 3n^2 + n)I_d] / (12fC)$$

ΔU 随级数 n 的立方倍关系上升

当级数 n 超过一定值时，再增加 n 将无助于输出电压的增加，而元件数量和整个结构高度却会随 n 而正比上升，这一点在设计时应予注意



直流高压串级发生器

三、冲击电压试验设备

➤ 冲击电压发生器的基本原理

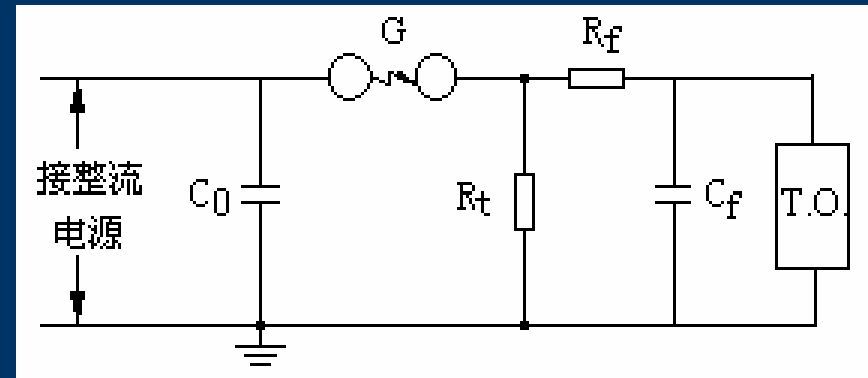
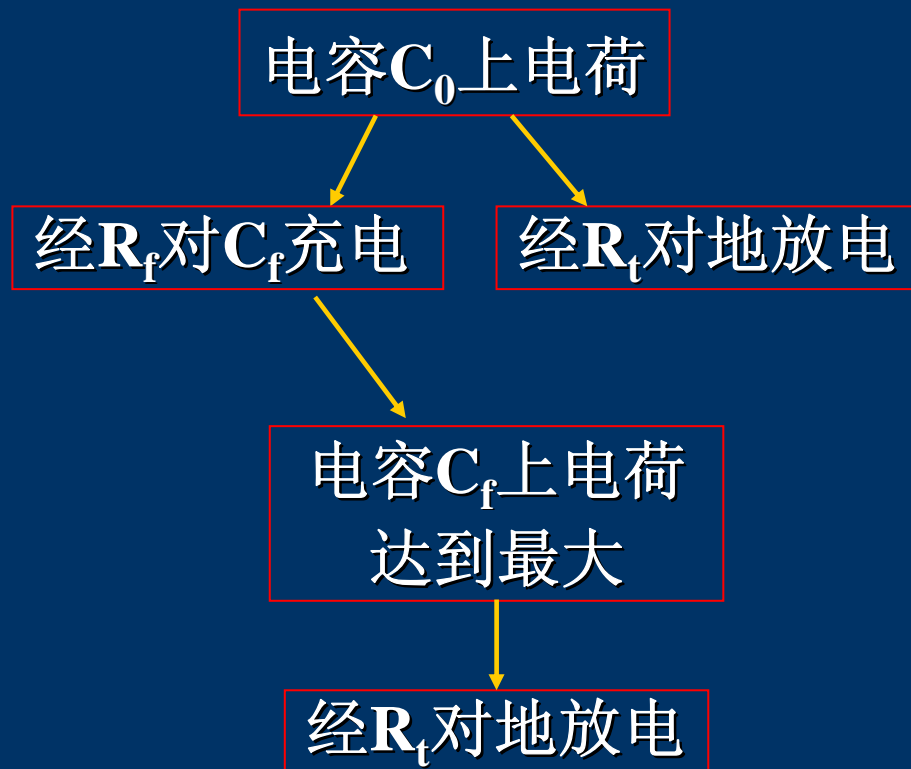
概念：冲击电压发生器由一组**并联**的储能高压电容器，自直流高压源**充电**几十秒钟后，通过**铜球**突然经电阻**串联放电**，在试品上形成陡峭上升前沿的冲击电压波形。冲击波持续时间以微秒计，电压峰值一般为几十kV至几MV

发明人：产生较高电压的冲击发生器多级回路，首先由德国人E.马克思（E.Marx）提出，为此他于1923年获得专利，被称为马克思回路

三、冲击电压试验设备

➤ 雷电冲击电压发生器的基本原理

主电容充电到 U_0 ，间隙G
点火击穿：

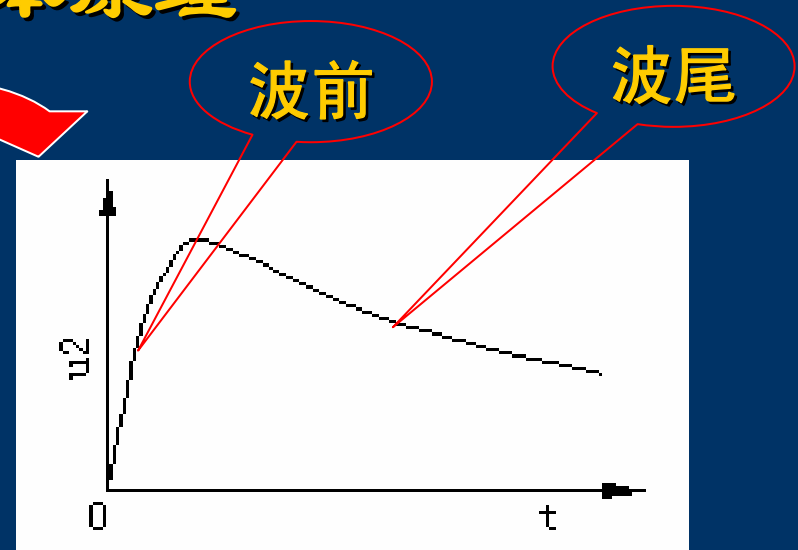
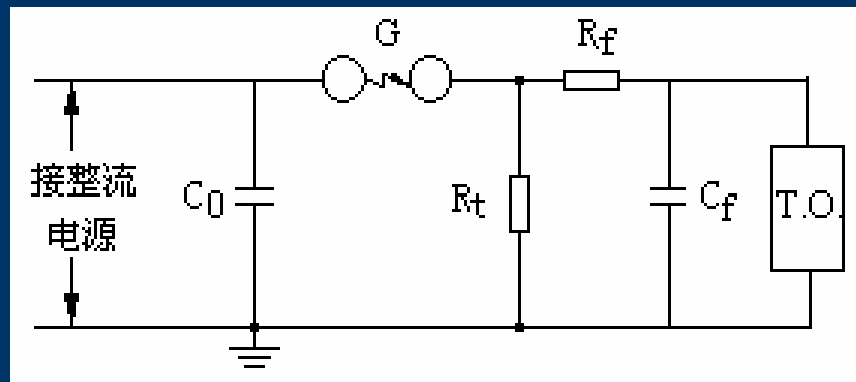


冲电压发生器原理电路图

- C_0 ：主电容
- R_f ：波前电阻
- G ：隔离间隙
- R_t ：波尾电阻
- C_f ：波前电容
- $T.O.$ ：被试品

三、冲击电压试验设备

➤ 雷电冲击电压发生器的基本原理



C_f 上电压 u_2 的波形

- 为使 C_f 上的电压接近于 C_0 的原始充电电压，应选择 $C_0 \gg C_f$
- 电压上升速度主要取决于 $R_f C_f$ 时间常数
- 电压下降速度主要取决于 $(C_0 + C_f) R_t$ 时间常数

$$R_t \gg R_f$$

多级冲击电压发生器

T: 供电高压变压器;

D: 整流用高压硅堆;

R_b: 保护电阻, 一般为几百千欧;

R_{ch}: 充电电阻, 一般为几十千欧;

C: 每级的主电容;

C_p: 每级相应点的对地杂散电容, 一般仅为几个皮法;

g₁: 点火球隙;

g₂~g₃: 中间球隙;

G₄: 输出球隙;

冲击电压发生器的基本回路

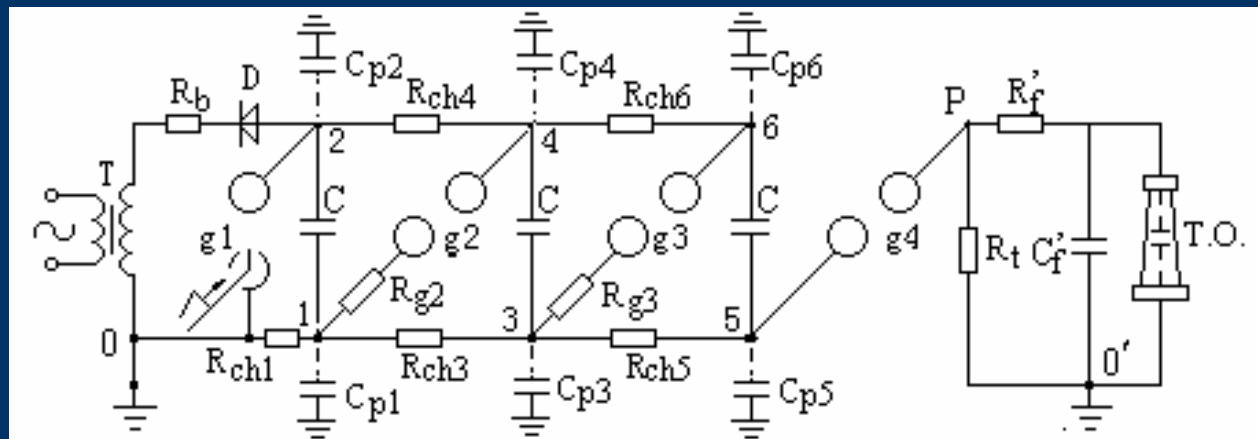
R_g: 每级的阻尼电阻;

R'_f: 外加的波前电阻;

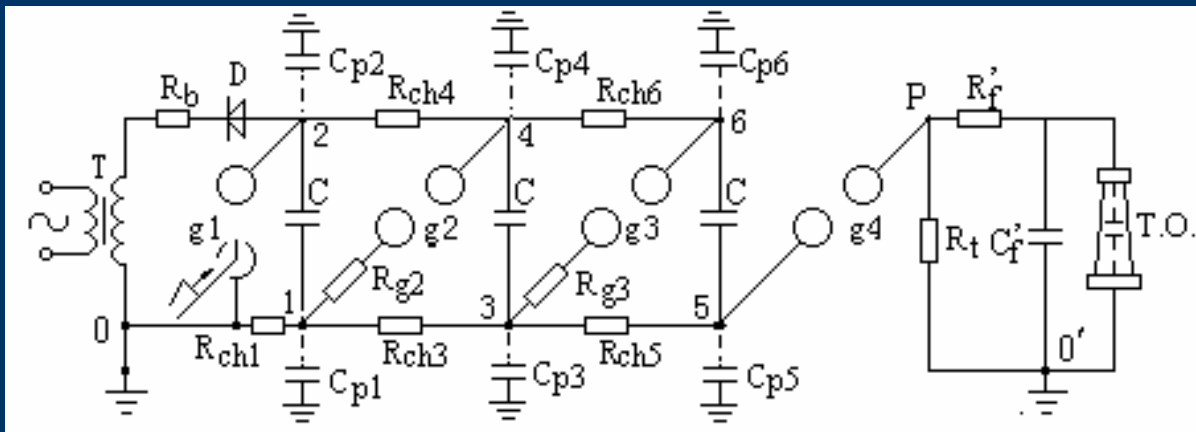
R_t: 波尾电阻

C'_f: 外加的波前电容

T.O.: 被试品



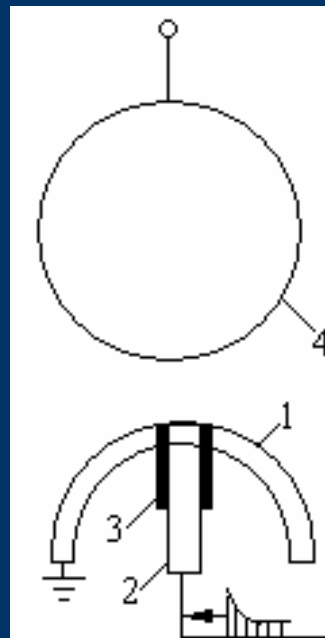
工作原理



主电容充电：主电容C通过整流源**并联充电到电压U**。各球隙事先调节到能耐压U值，若作用电压稍高于U，则各球隙便会击穿

点火球隙点火：在针极2上施加一点火脉冲，电压5~8kV，极性与上球充电电压极性相反，针极和接地球面之间产生一小火花，加强主间隙的场强，促使点火球隙 g_1 放电

- 1: 接地球极;
 - 2: 针极;
 - 3: 绝缘体
 - 4: 高压球极
- 点火球隙



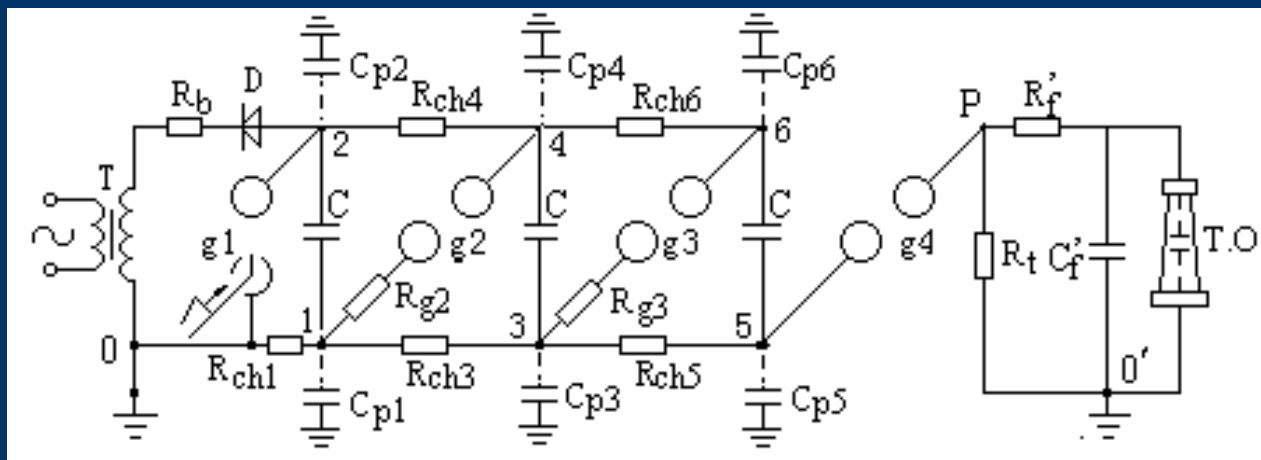
工作原理

点1电位抬高： g1放电后，点2从原先在充电下的 $-U$ 突变为零电位。而点1从原零电位变为 $+U$

间隙g2放电： 间隙g2两端作用了 $2U$ 的电位差（能承受一个 U ），所以g2在g1放电所造成的紫外线的照射下马上放电

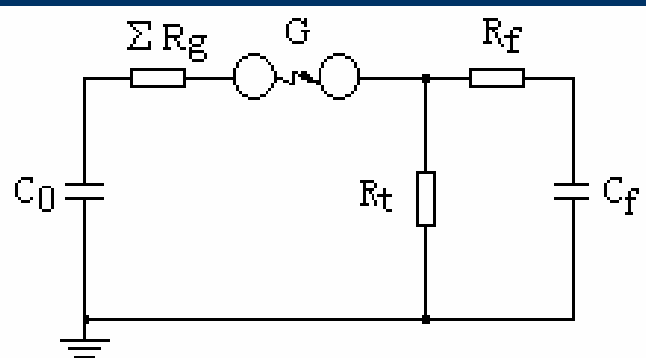
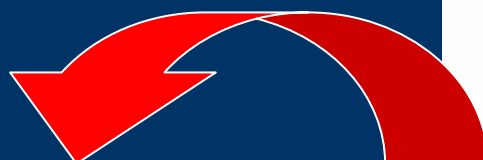
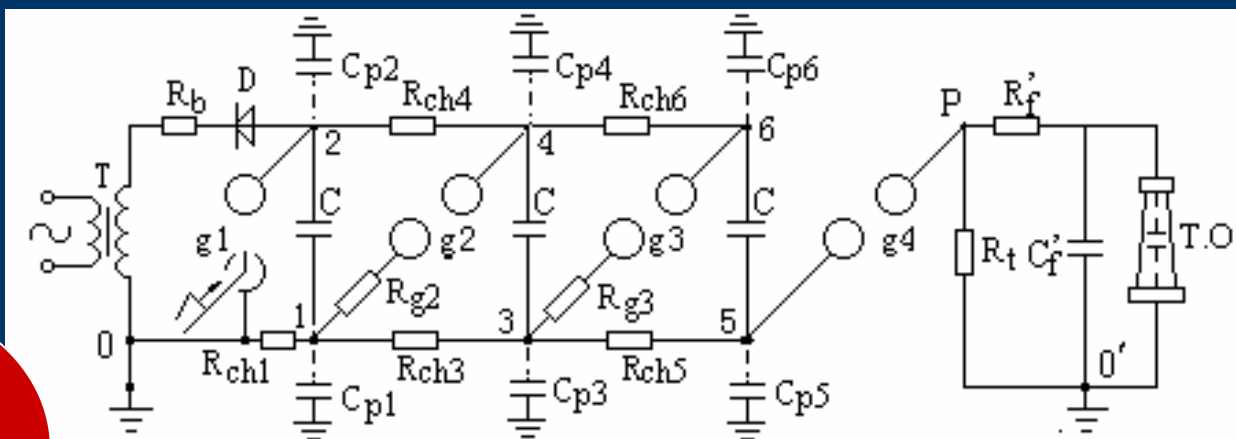
点3电位抬高g3放电： 点4的电位变为 $+U$ ，而点3从原零电位变为 $+2U$

间隙g3放电： g3的瞬间压差达到 $3u$ ，立即击穿放电



工作原理

间隙g4: 跟着放电，各级电容器C串联起来，经各级阻尼电阻 R_g 向波尾电阻 R_t 放电，形成主放电回路，在被试品上形成冲击电压**波前**和**波尾**的过程



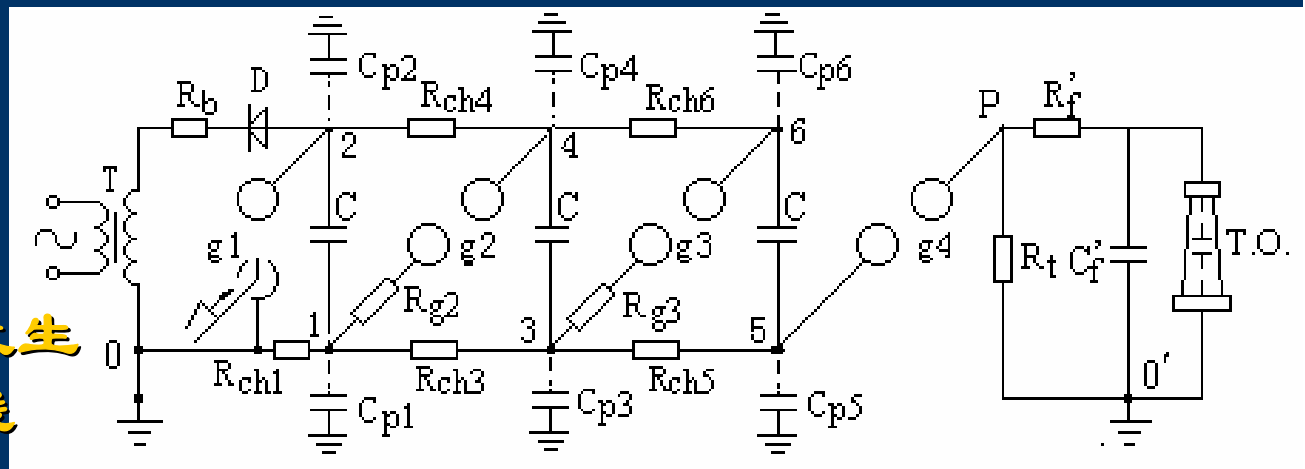
主放电回路

$0 \rightarrow g1 \rightarrow 2 \rightarrow 1 \rightarrow g2 \rightarrow 4 \rightarrow 3$
 $\uparrow \qquad \qquad \qquad \downarrow$
 $0' \leftarrow p \leftarrow g4 \leftarrow 5 \leftarrow 6 \leftarrow g3$

工作原理——概括

- “电容器并联充电，而后串联放电”
- 电阻 R_{ch} 的连接与隔离作用：在充电时起电路的连接作用；放电时则起隔离作用
- 电容并联串联转换方法：各电容由并联变成串联是靠一组球隙分别处于绝缘和放电来达到

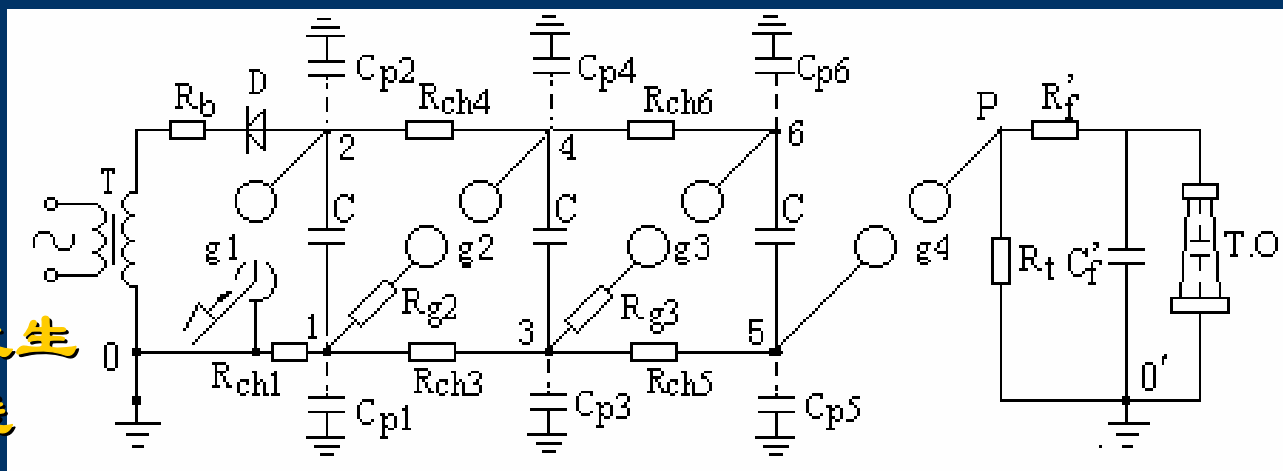
冲击电压发生器回路接线



工作原理——关键

杂散电容与同步：实际上因杂散电容 C_p 很小，所以各中间球隙，在放电前所作用到的过电压时间非常短促。为使诸球隙易于同步放电，在采用简单球隙的条件下，它们应排列成相互能够放电（紫外线）照射的状态

冲击电压发生器回路接线

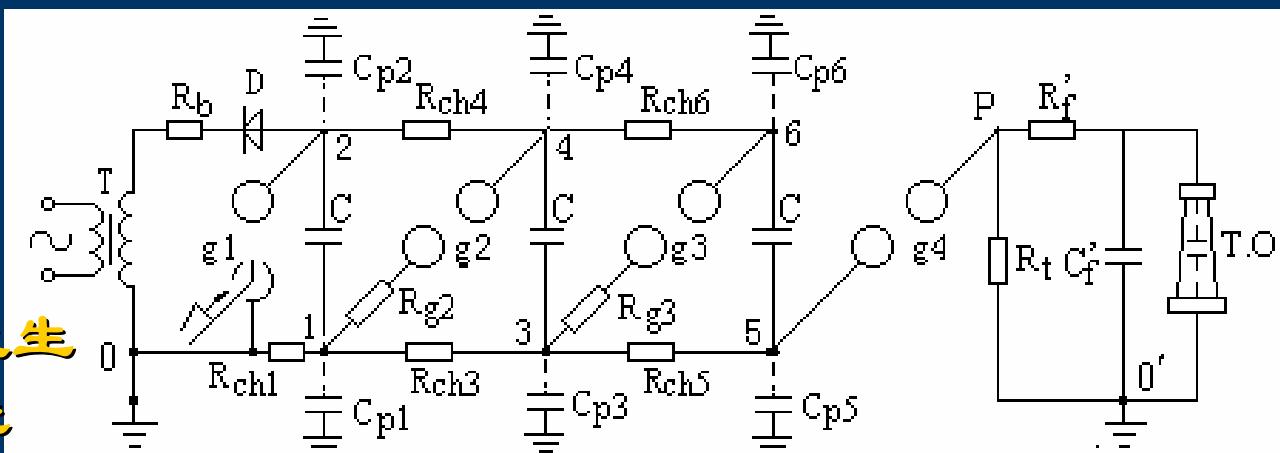


工作原理——效率

各级的放电回路：主电容 $C \rightarrow$ 充电 $R_{ch} \rightarrow$ 阻尼 $R_g \rightarrow$ 中间球隙 G ， R_{ch} 值足够大，放电速度远慢于主放电的速度，可忽略其影响

阻尼电阻 R_g ：主电容对各级 C_p 充电回路中存在寄生电感， C_p 值很小，可引起局部振荡，且叠加在总的输出波形上。**电阻 R_g 的接入消除局部振荡，但主放电电流在其上的压降使输出电压降低**

冲击电压发生器回路接线



➤ 等值电路

放电时，发生器的等值电路如图

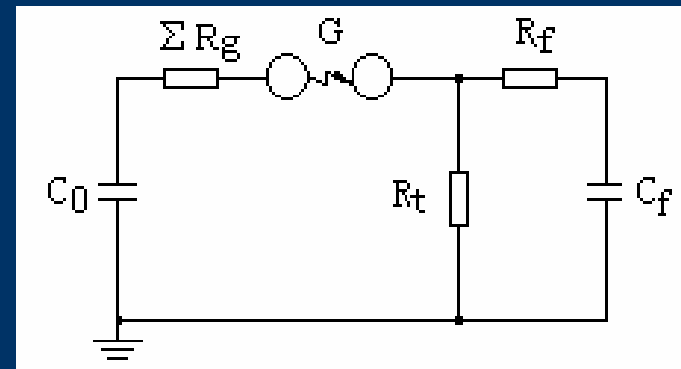
C_0 : 等值的主电容，三个电容 C 的串联值 $=C/3$

R_f : $=R'_f$

C_f : $=C'_f + C_{T.O.}$

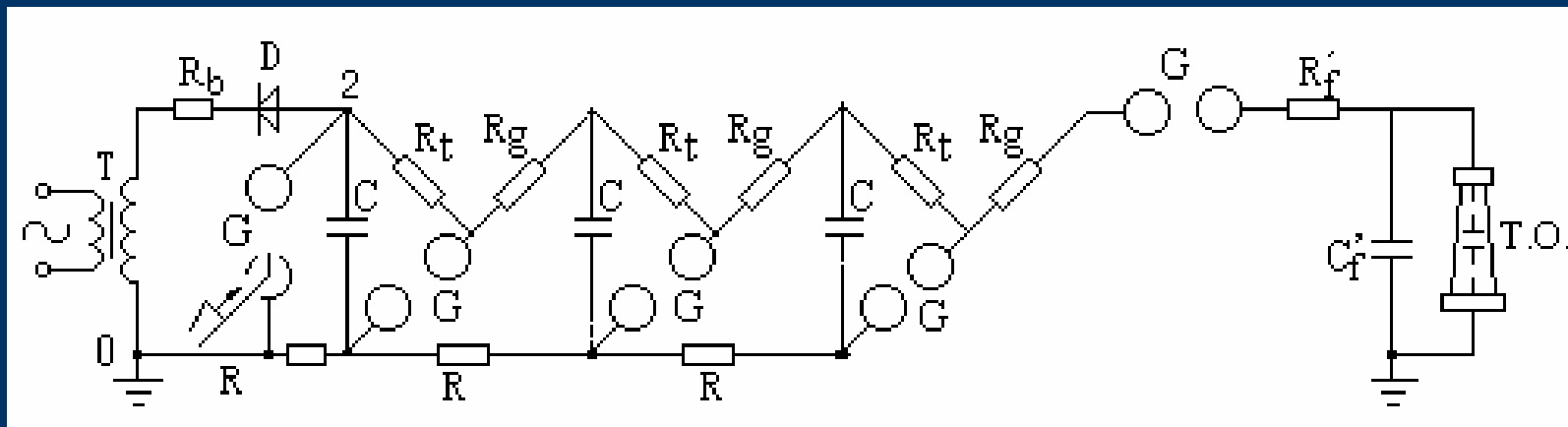
输出电压: $U_2 = 3U$

串联放电时的等值电路



级数为 n 级时：上述各参数的3替换为 n

➤ 高效率冲击电压发生器电路



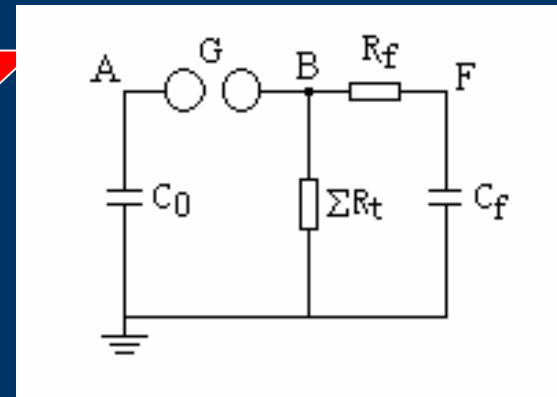
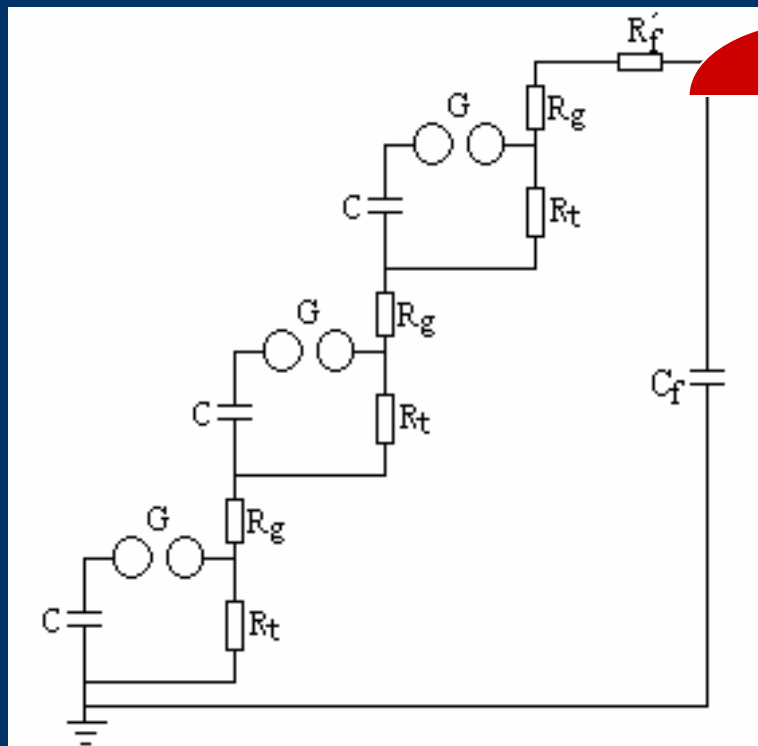
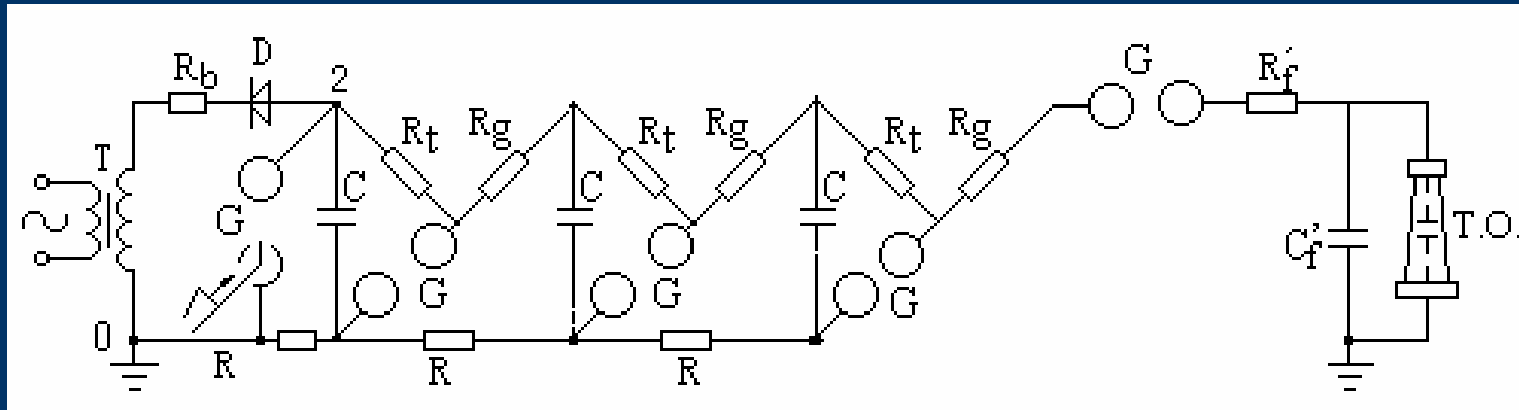
波尾电阻：分插到各级放电回路

主放电：分散在各级的 $C - G - R_t$ ，不经过 R_g

R_g ：只参与形成波前的过程，波前电阻 $(\sum R_g + R'_f) = R_f$

R_t ：波尾电阻，兼做一侧充电电阻

➤ 高效率冲击电压发生器电路



$$C_0 = C/n \quad R_f = \sum R_g + R'_f$$

$$C_f = C'_f + C_{T.O.}$$

➤ 冲击波形的近似计算

波前阶段: $R_t \gg R_f = (\sum R_g + R'_f)$
 $C_0 \gg C_f$

恒压源 U_0 对 C_f 波的充电:

$$u_f = U_0(1 - e^{-t/\tau_1})$$
$$\tau_1 = (\sum R_g + R'_f)$$

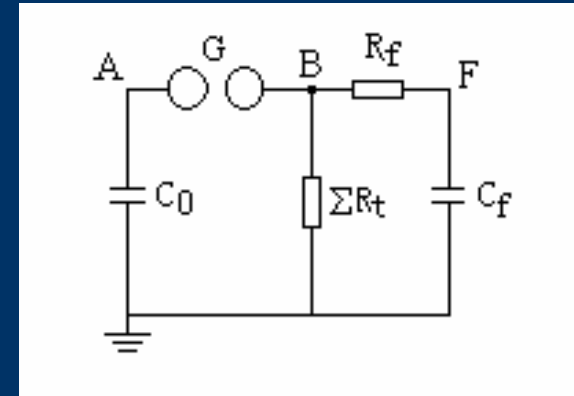
标准冲击波形的定义:

$$0.3U_0 = U_0(1 - e^{-t_1/\tau_1})$$

$$0.9U_0 = U_0(1 - e^{-t_2/\tau_1})$$

$$t_2 - t_1 = \tau_1 \ln 7$$

串联放电时的等值电路



$$C_0 = C/n$$

$$R_f = \sum R_g + R'_f$$

$$C_f = C'_f + C_{T.O.}$$

波前时间:

$$T_1 = 1.67(t_2 - t_1) = 3.24\tau_1$$
$$= 3.24(\sum R_g + R'_f)_{36}$$

➤ 冲击波形的近似计算

波尾阶段: $C_0 \gg C_f$

$$u_f \approx U_0 e^{-t/\tau_2} \approx U_m e^{-t/\tau_2}$$

$$\tau_2 = R_t (C_0 + C_f)$$

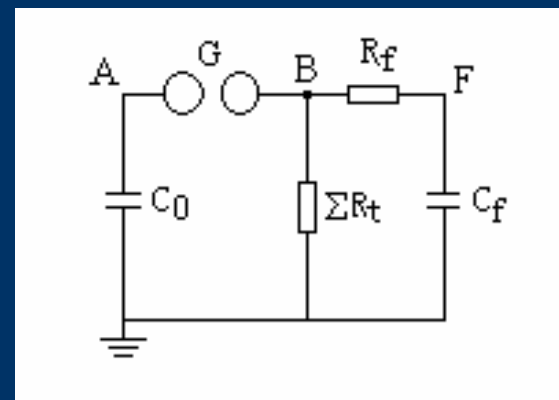
标准冲击波形的定义:

$$0.5U_m \approx U_m e^{-T_2/\tau_2}$$

半峰值时间:

$$\begin{aligned} T_2 &\approx \tau_2 \ln 2 \approx 0.7\tau_2 \\ &= 0.7R_t (C_0 + C_f) \end{aligned}$$

串联放电时的等值电路

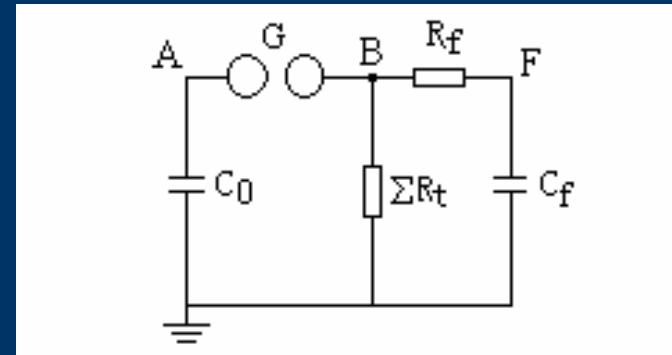
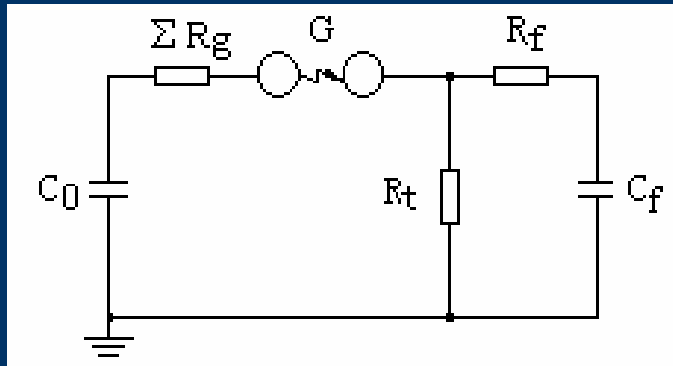


$$C_0 = C/n$$

$$R_f = \sum R_g + R'_f$$

$$C_f = C'_f + C_{T.O.}$$

➤ 发生器电压效率



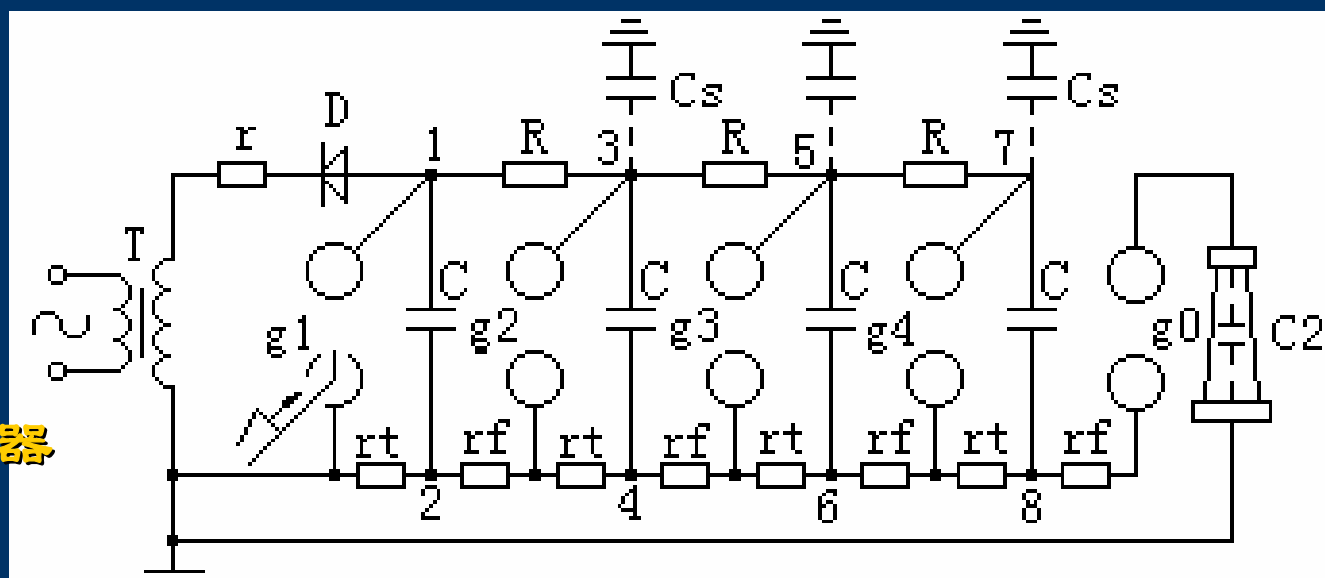
$$\eta = \frac{C_0}{C_0 + C_f} \times \frac{R_t}{R_t + \Sigma R_g}$$

$$\eta = \frac{C_0}{C_0 + C_f}$$

操作冲击电压发生器回路

接线图相同:

二者的区别: 当产生操作冲击电压时, 回路中各阻值至少要增加两个数量级



冲击电压发生器
高效回路接线

四、冲击大电流的产生

➤ 冲击大电流的应用

冲击短路试验：电力系统在运行中发生闪击事故时，不仅要遭受几百万伏冲击电压的侵袭，而且在事故点还将流过巨大的冲击电流，有时可达几十万安峰值。因此在高电压实验室中需要装置能产生巨大冲击电流的试验设备来研究雷闪电流对绝缘材料和结构以及防雷装置的热或电动力的破坏作用。冲击电流发生器就是用来产生人工雷闪电流的实验装置

四、冲击大电流的产生

➤ 冲击大电流的应用

脉冲功率技术：冲击大电流技术由于在电子及离子加速器、核聚变、微波、大功率放电激光方面的应用。近年来已经发展成一个独立的学科叫做脉冲功率技术（PPT—Pulsed Power Technology），后者要求产生的冲击电流可高达几十万安培甚至上百万安培。由此可以在负载上得到高达 10^9 瓦以上的瞬时功率，可应用于高温等离子体焦点装置中，产生温度达几千万度的高温等离子体

四、冲击大电流的产生

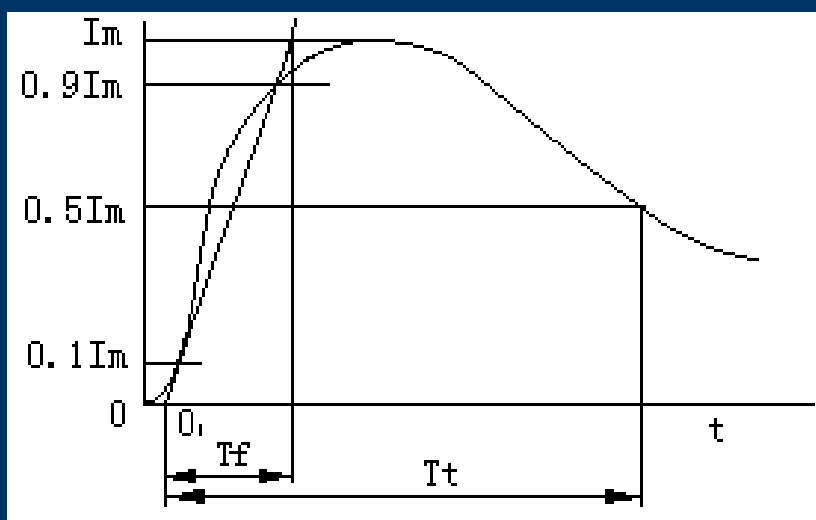
➤ 冲击大电流的应用

电火花振源：冲击大电流的声学效应，可以用来作电火花振源。在水中的放电可产生水击效应，用来加工成形或分碎以及海底探矿。还有以大电流产生强磁的应用

➤ 冲击电流波形

因应用场合的不同而有不同的要求。与电压工程相关的电工界所规定的标准冲击电流波形有两类

第一类波形： 电流从零值以较短的时间上升到峰值，然后以近似指数规律或强阻尼正弦波形下降到零。这种波形以视在波前时间 T_1 和视在半峰值时间 T_2 表示为 T_1/T_2 波。国家和国际IEC标准规定了四种该类冲击波，即 $1/20\mu\text{s}$ 、 $4/10\mu\text{s}$ 、 $8/20\mu\text{s}$ 和 $30/80\mu\text{s}$ 冲击电流波。标准所明确的波形画法如下图所示



**国家标准规定的冲击
电流波形的画法**

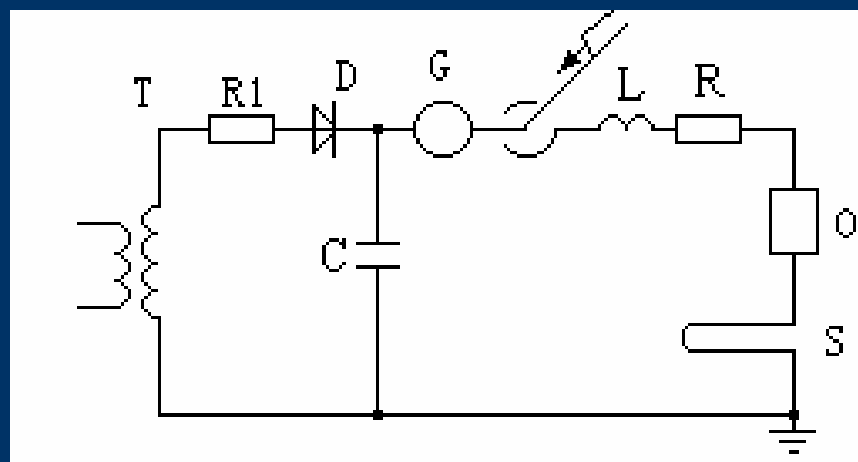
误差： 峰值和 T_1 、 T_2 的实测值和规定值之间容许的偏差各为 $\pm 10\%$ 。在冲击波峰值附近，允许小的过冲或振荡，但单个幅值不超过其峰值的 5%

第二类波形：规定的冲击电流波形近似为方波，用峰值持续时间 T_d 和总的持续时间 T_f 来表示。峰值持续时间规定等于500 μs ，1000 μs ，2000 μs ，或者2000与3200 μs 之间，要求在规定的容许偏差之内。 T_d 和 T_f 的定义请见有关标准

➤ 冲击电流发生器的基本原理与结构

大电容器储能产生冲击电流

工作原理基本上与冲击电压发生器相似。由一组高压大容量的电容器，先通过直流高压并联充电，充电时间为几十秒到几分钟，然后通过触发球隙的击穿，并联地对试品放电，从而在试品上流过冲击大电流

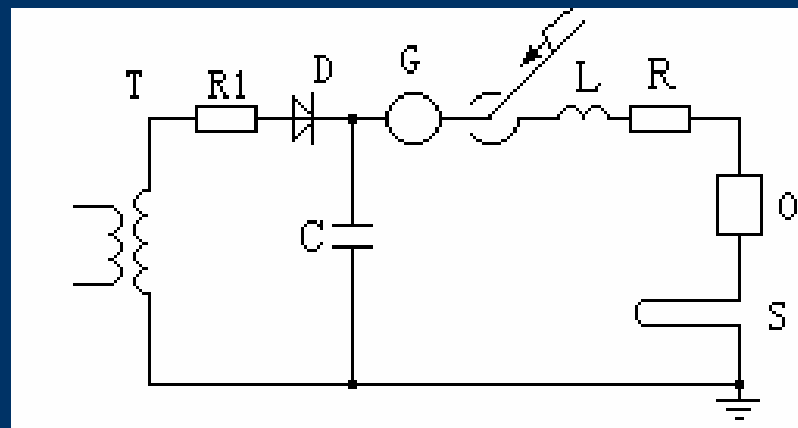


冲击电流发生器的充放电回路

C: 为多个并联电容器的电容

充电回路: 由高压试验变压器T、保护电阻 R_1 和高压硅堆D构成

放电回路: 由C和触发间隙G、电感L、电阻R、试品O及分流器S所构成

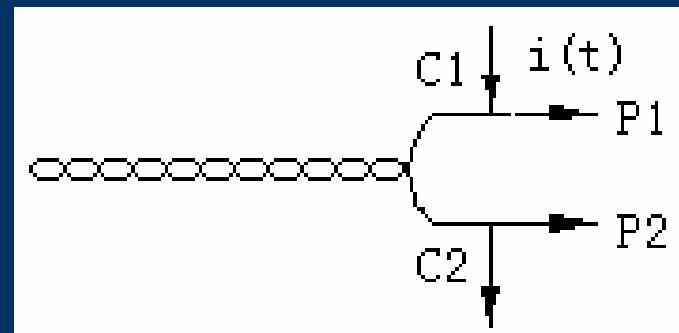


冲击电流发生器
的充放电回路

L及R: 电容器本身及连线、球隙放电火花、试品和分流器S的总电感及电阻效应，也包括了为调波而外加的电感及电阻值

分流器: 是一个无感低值电阻器，当电流流过它时，它两端送出电压信号，可作为测量电流的波形和峰值。最简单易制的一种分流器是绞线式对折分流器

绞线式对折分流器



罗哥夫斯基线圈

除分流器外还可以用一种特殊的空气芯电流互感器，叫做罗哥夫斯基线圈者来测量冲击电流

用它测量冲击电流的优点是不必直接接到大电流回路内，它与电流回路相绝缘。有利于避免测量回路受到地电位升高时的反击影响。但它的使用频宽一般比良好的分流器要窄，且不能传递直流分量

谢谢!

Q & A

屠幼萍



高电压与电磁兼容研究所



80795842 13691145432



typ@ncepu.edu.cn