



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 5 冲击电流的产生与测量

汲胜昌 祝令瑜

2021年02-05月



Part I 冲击电流的产生

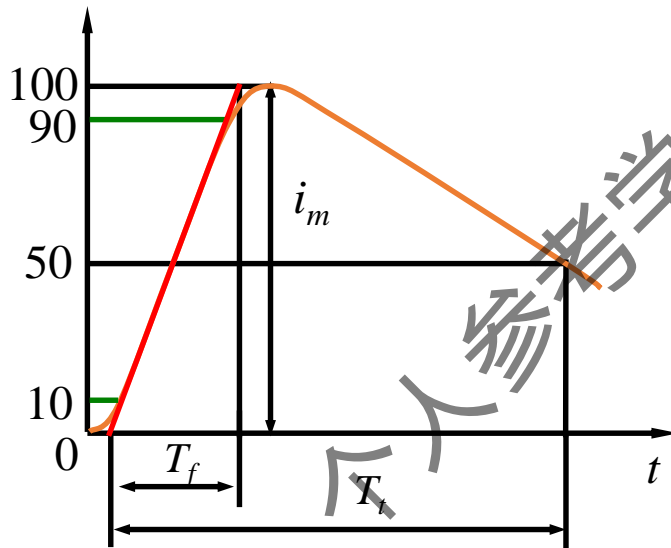
1 概述

用途: 大电流、热、力。核物理、加速器、激光、脉冲功率

波形定义

指数波

表示: $\pm (T_f/T_t)\mu s$



IEC标准

$(8/20) \mu s$

$(1/20) \mu s$

$(4/10) \mu s$

$(10/350) \mu s$

$(10/1000) \mu s$

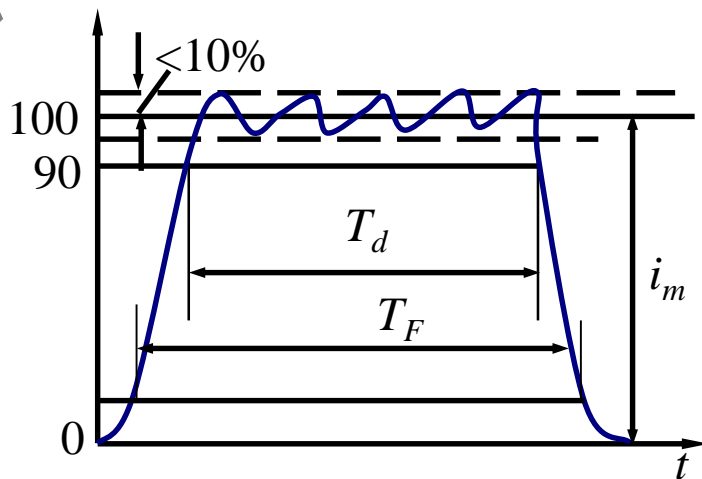
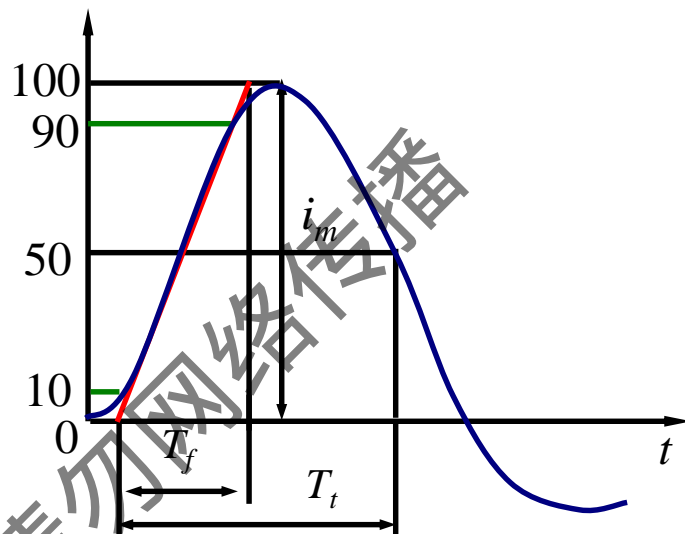


波形振荡

反极性振荡幅值 $<20\%$

方波

T_d :
500 μs
1000 μs
2000 μs
2000~3200 μs

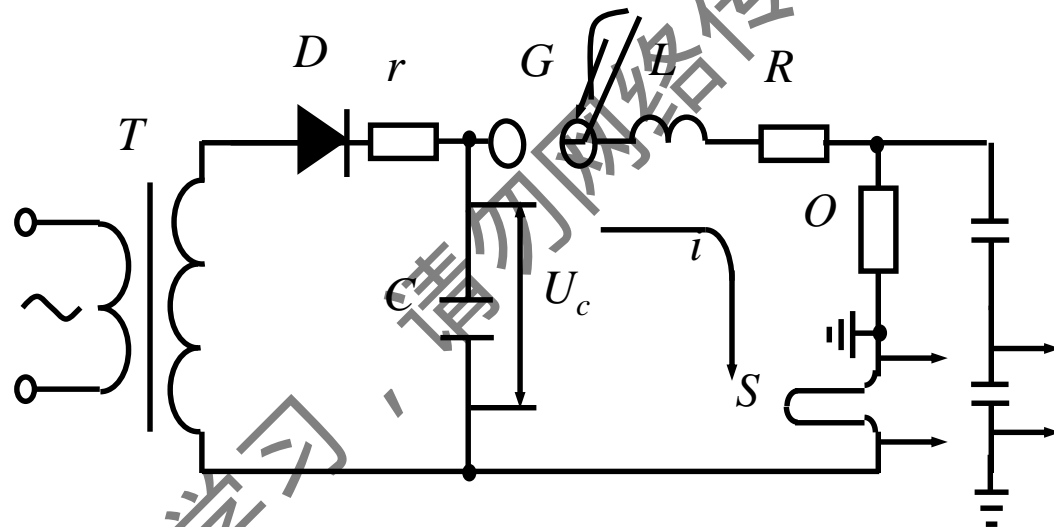




2 冲击电流发生器的基本原理

一、基本回路

工作原理：
电容器并联充电
然后并联放电



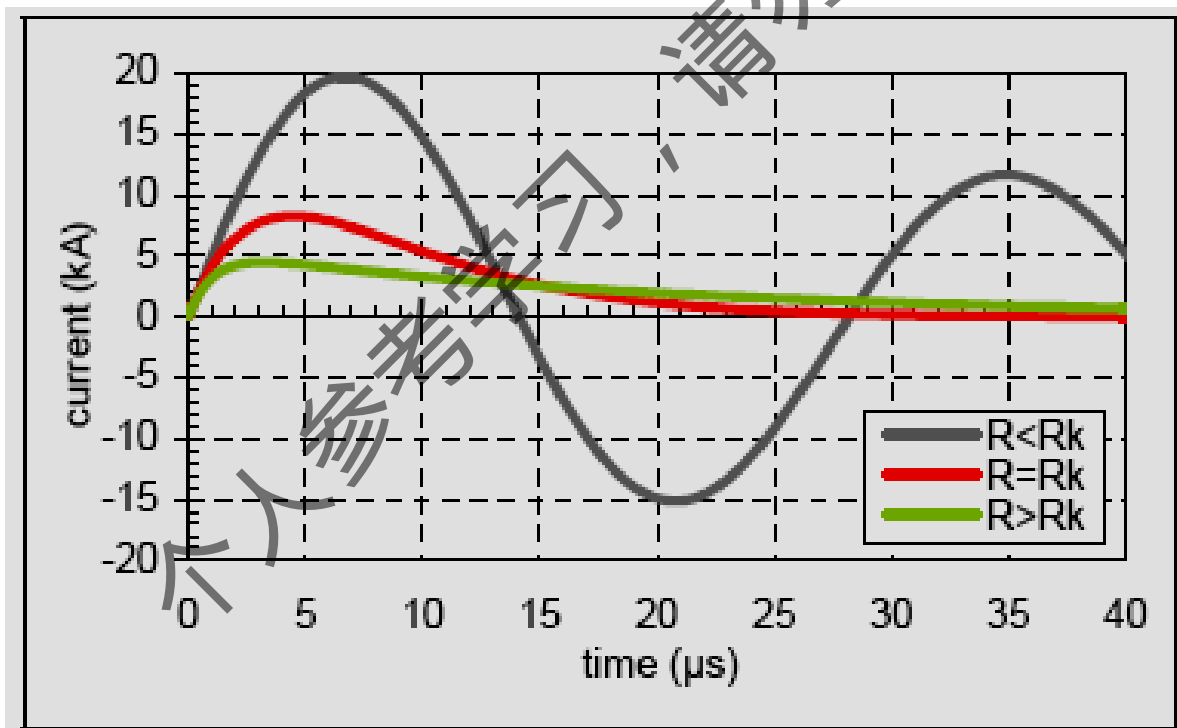
T: 充电变压器; D: 硅堆; G: 点火球隙; L: 总电感值;
R: 总电阻值; r: 保护电阻; O: 试品; S: 分流器



放电回路

RLC回路

$$\text{令 } R_k = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$$





若 $\alpha = (R/2)\sqrt{C/L}$

1. $\alpha < 1$ ($R < R_k$) 时, 振荡型电流波

$$i_s(t) = \frac{U}{\sqrt{1-\alpha^2}} \sqrt{\frac{C}{L}} \exp[-\alpha(t/\sqrt{LC})] \sin\left(\sqrt{1-\alpha^2} \frac{t}{\sqrt{LC}}\right)$$

令 $di_s(t)/dt=0$

$$t_m = \frac{\sqrt{LC}}{\sqrt{1-\alpha^2}} \tan^{-1}\left(\frac{\sqrt{1-\alpha^2}}{\alpha}\right) = \frac{\sqrt{LC}}{\sqrt{1-\alpha^2}} \sin^{-1}\left(\sqrt{1-\alpha^2}\right)$$

$$i_{sm} = U \sqrt{\frac{C}{L}} \varepsilon^{-\frac{\alpha}{\sqrt{1-\alpha^2}} \tan^{-1}\left(\frac{\sqrt{1-\alpha^2}}{\alpha}\right)}$$



2. $\alpha=1$ ($R=R_k$) 时, 临界阻尼下非振荡型电流波

$$i_s(t) = \frac{Ut}{L} \exp[-t/\sqrt{LC}] \quad t_m = \sqrt{LC} \quad i_{sm} = U \sqrt{\frac{C}{L}} e^{-1}$$

3. $\alpha>1$ ($R>R_k$) 时, 非振荡型电流波

$$i_s(t) = \frac{V}{\sqrt{\alpha^2 - 1}} \sqrt{\frac{C}{L}} \exp\left[-\alpha \frac{t}{\sqrt{LC}}\right] \sinh\left(\sqrt{\alpha^2 - 1} \frac{t}{\sqrt{LC}}\right)$$

$$t_m = \frac{\sqrt{LC}}{\sqrt{\alpha^2 - 1}} \operatorname{arctanh}\left(\frac{\sqrt{\alpha^2 - 1}}{\alpha}\right)$$

$$i_{sm} = U \sqrt{\frac{C}{L}} \exp\left[-(\alpha / \sqrt{\alpha^2 - 1}) \operatorname{arctanh}(\sqrt{\alpha^2 - 1} / \alpha)\right]$$



不管电流波形振荡与否，电流可表示为

$$i_m = U \sqrt{\frac{C}{L}} f(\alpha) = \frac{U}{R} \cdot 2\alpha \cdot f(\alpha) = \sqrt{\frac{2W}{L}} f(\alpha)$$

$U\sqrt{C/L}$ 一定 α 越小，即 R 越小 i_{sm} 越大

U/R 一定时， α 越大，
即 C 增大或 L 减小， $2\alpha f(\alpha)$ 增大 i_{sm} 增大

为了获得大电流

- ✚ 电容器残余电感小，可采用多个并联
- ✚ 回路引线尽可能短，引线的截面积尽可能大
- ✚ 回路各接点处的接触电阻要尽可能小
- ✚ 充电电压尽可能高，可采用多级充电形式。

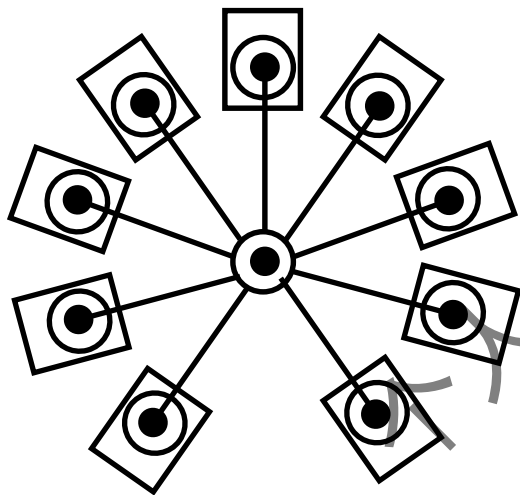


3 冲击电流发生器的结构

脉冲电容器

一、结构

环形排列





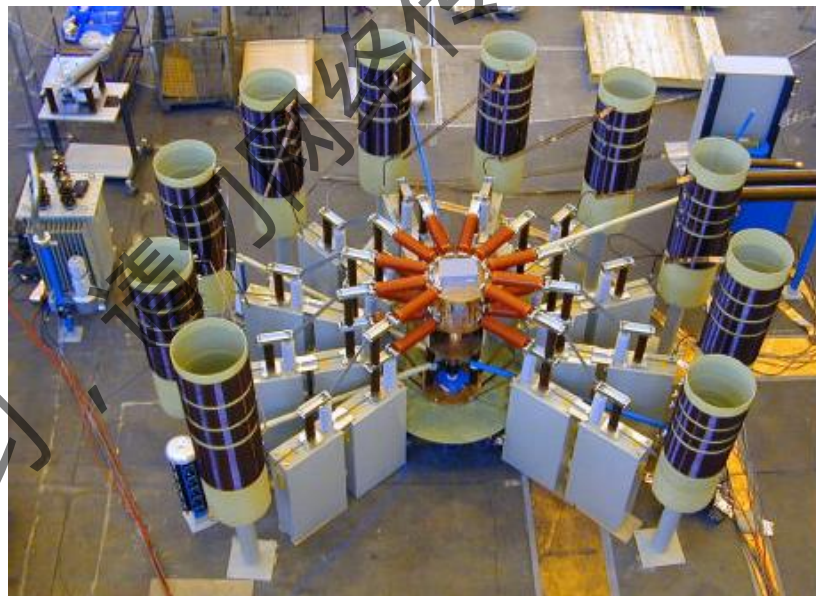
均匀排列；

电容器出线到设备中心的距离基本相等；

电流能够同时到达；

对大设备不方便；

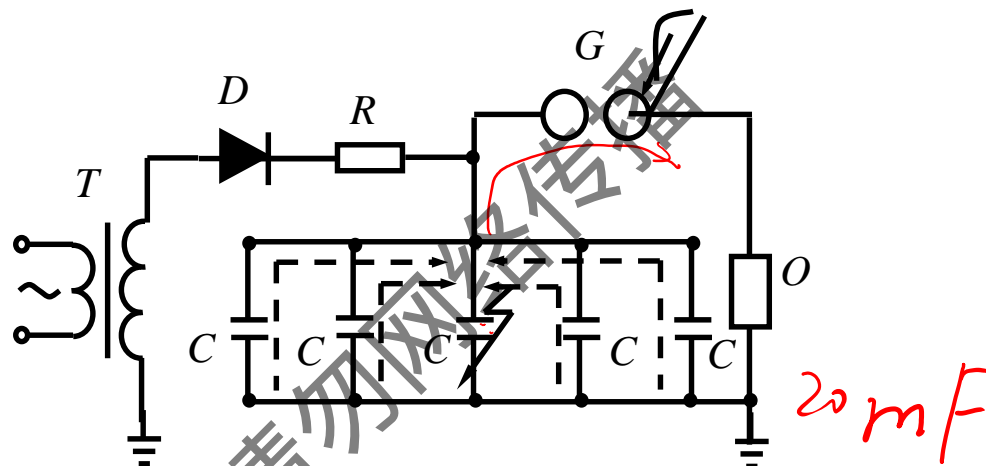
当其中一个电容损坏时，其余电容会
会为其放电，易发生爆炸。





二、电容器的保护

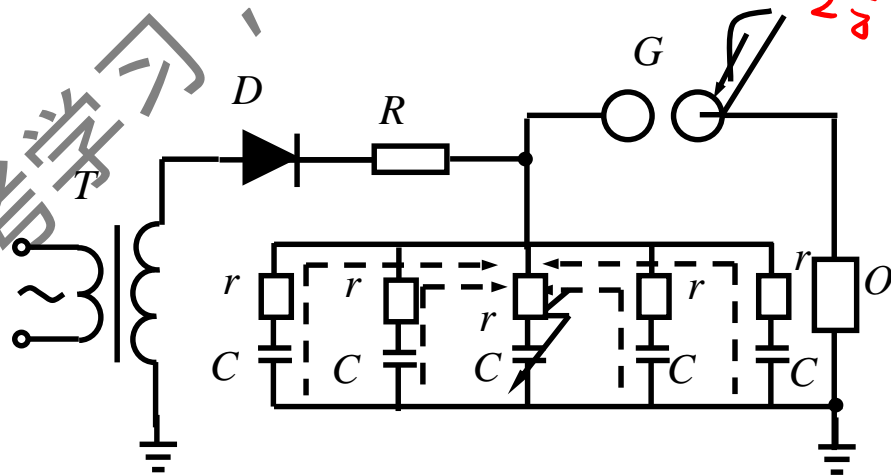
电容器损坏



电容器保护

串接小电阻

$$r=1\sim 2\Omega$$



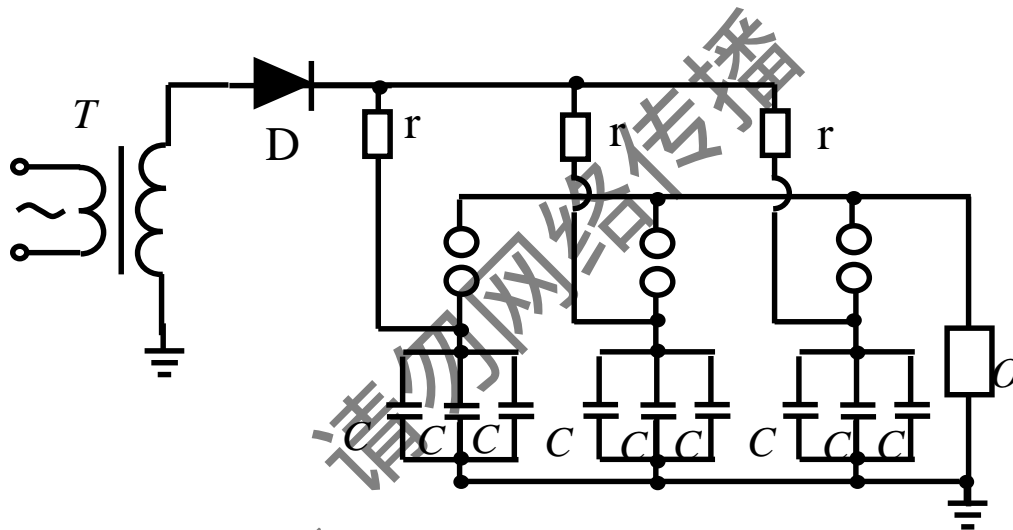
$$20\text{ mF}$$
$$\frac{1}{2}CU^2$$



➤ 电容器分组

球隙隔离

引燃、同步困难





Part II 冲击电流的测量

1 概述

一、测量要求

- 测量内容：幅值、波形
- 要求：幅值测量的不确定度3%以内
时间测量的不确定度10%以内

二、测量方法

- 分流器+示波器
- 罗戈夫斯基线圈+示波器



2 分流器

一、分流器的性能

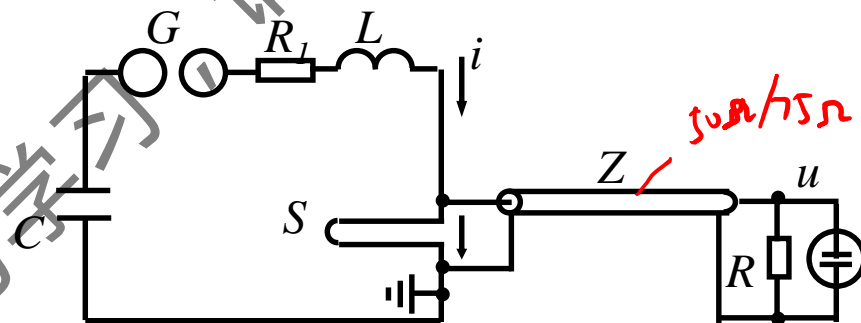
shunt

- 本质：低阻值的电阻器

$$R = \rho l / A$$

测量电阻两端的电压来反映冲击电流的大小

- 分流器的测量回路



$R_s \ll Z = R$ 时 $u(t) = R_s i(t)$

$R_s \ll Z$ 不满足, 但 $Z = R$ 时

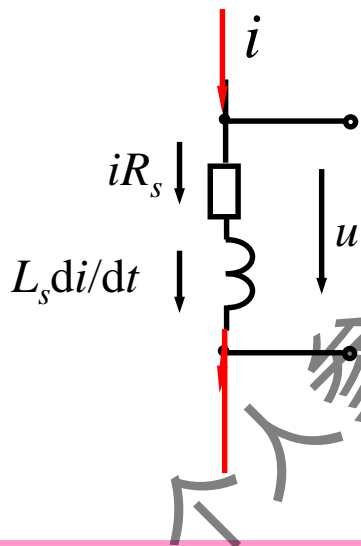
$$u(t) = (R_s // Z) i(t) = i(t) R_s \cdot Z / (R_s + Z)$$



二、误差原因

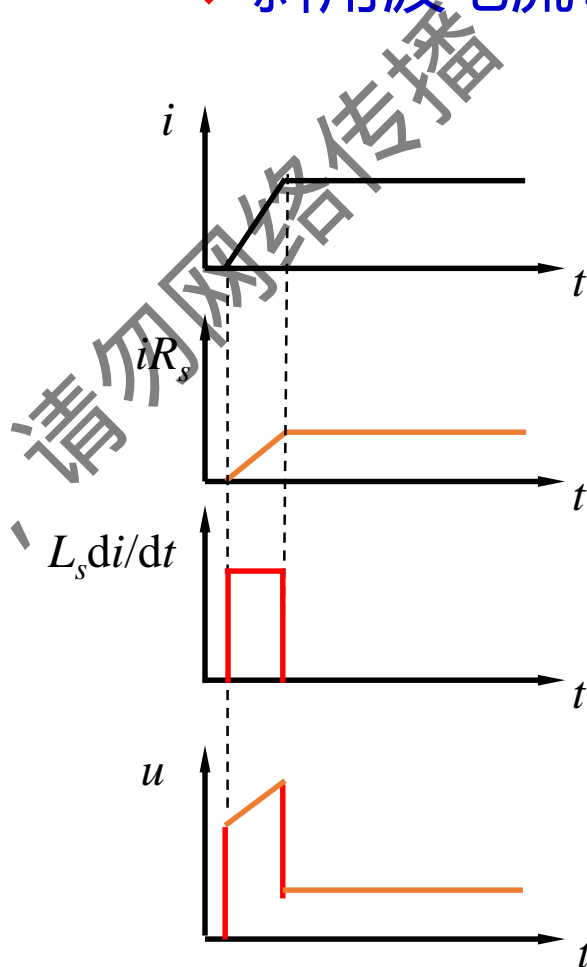
残余电感的影响

$$u(t) = R_s i(t) + L_s \frac{di(t)}{dt}$$



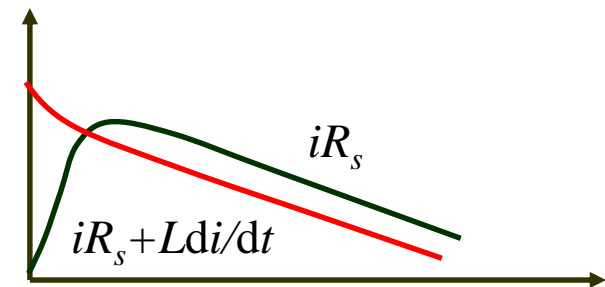
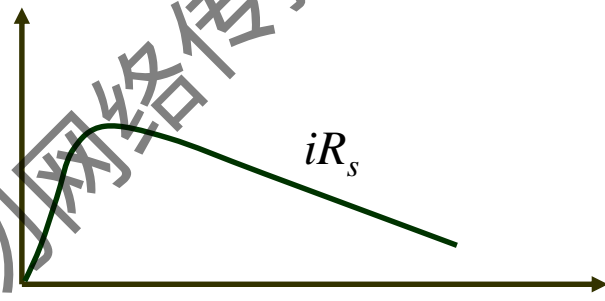
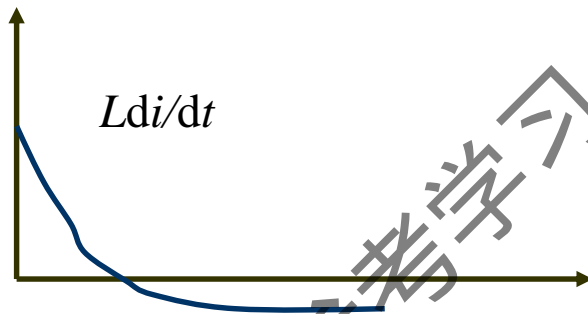
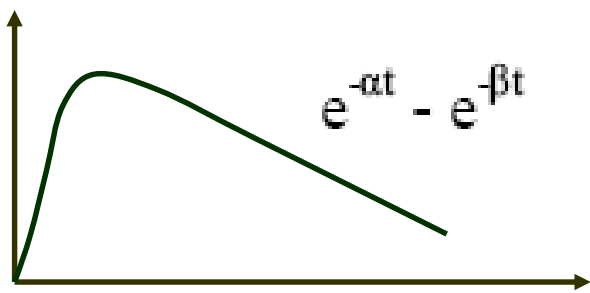
分流器存在残余电感时，
波形的前沿变短，出现过冲

❖ 斜角波电流：





❖ 双指数波电流:



波前、波尾减小

✚ 集肤效应

✚ 电压引线的感应电动势



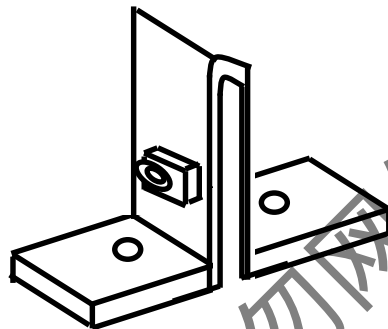
西安交通大学

XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

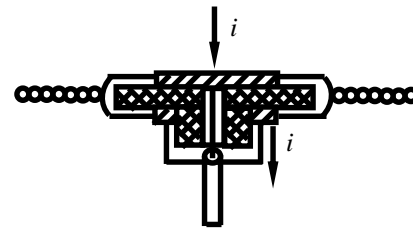
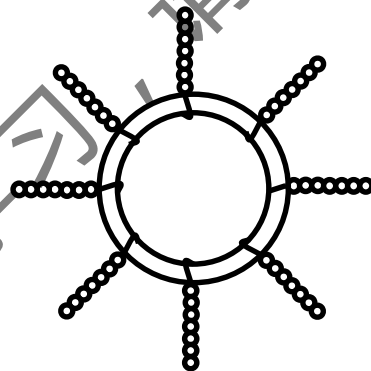
三、分流器的结构

1. 双股对折

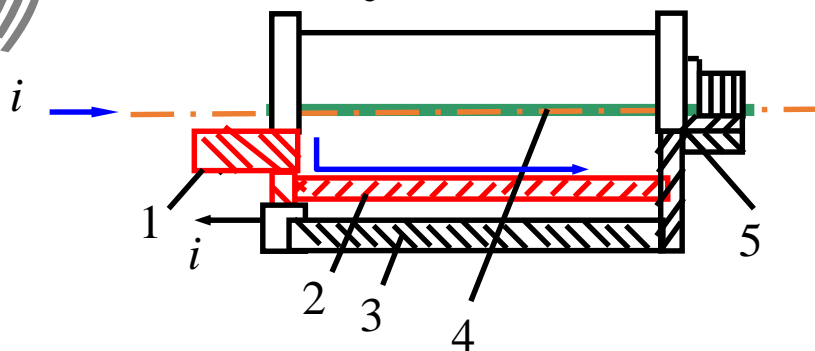
带状对折



辫状对折



2. 同轴管式





3 罗戈夫斯基线圈 Rogowski Coil

一、测量原理

空心互感器：原边为单根导线

$i_1(t)$ 交变，导线周围形成交变磁场 B

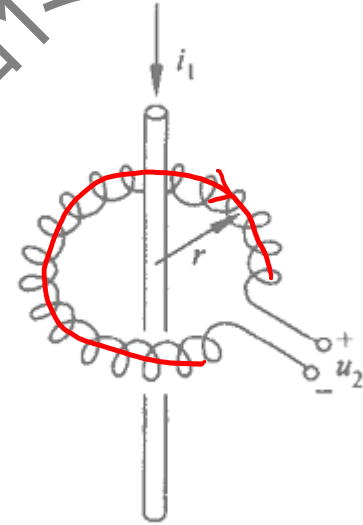
副边产生感应电动势 $u_2(t)$

若导线在线圈的中心，则

$$u_2(t) = M \frac{di_1(t)}{dt}$$

$$M = \frac{\mu A n}{l_m}$$

A : 截面积; n : 匝数; l_m : 线圈圆周; μ : 磁导率





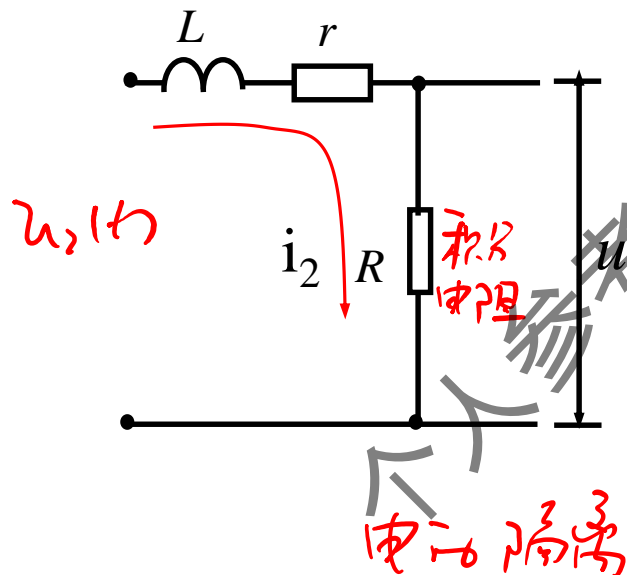
二、电流的测量

$u_2(t) \sim \frac{di_1(t)}{dt}$ 微分关系, 对 $di_1(t)/dt$ 积分, 得 $i_1(t)$

线圈输出端并联电阻

自积分

外积分 - 积分电路



$$i_1 = n i_2$$

$$R \ll \omega L + r$$

高频

HFCI