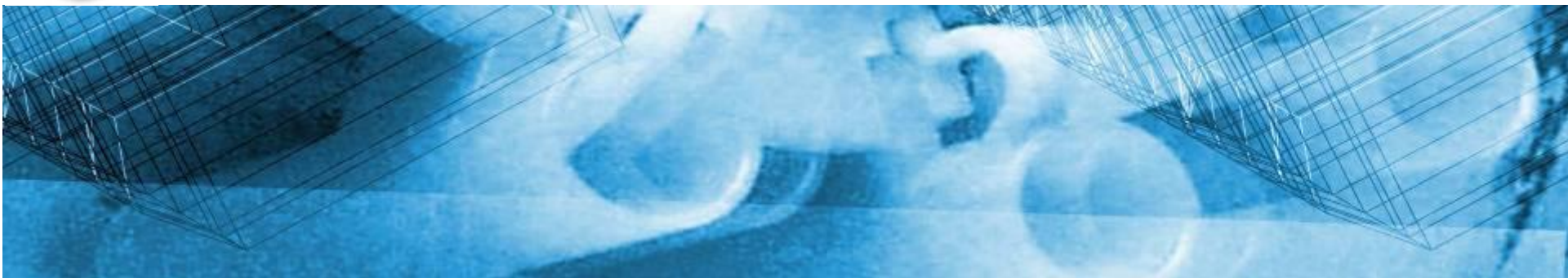




西南交通大学



电子测量技术

秦 娜

qinna@swjtu.cn

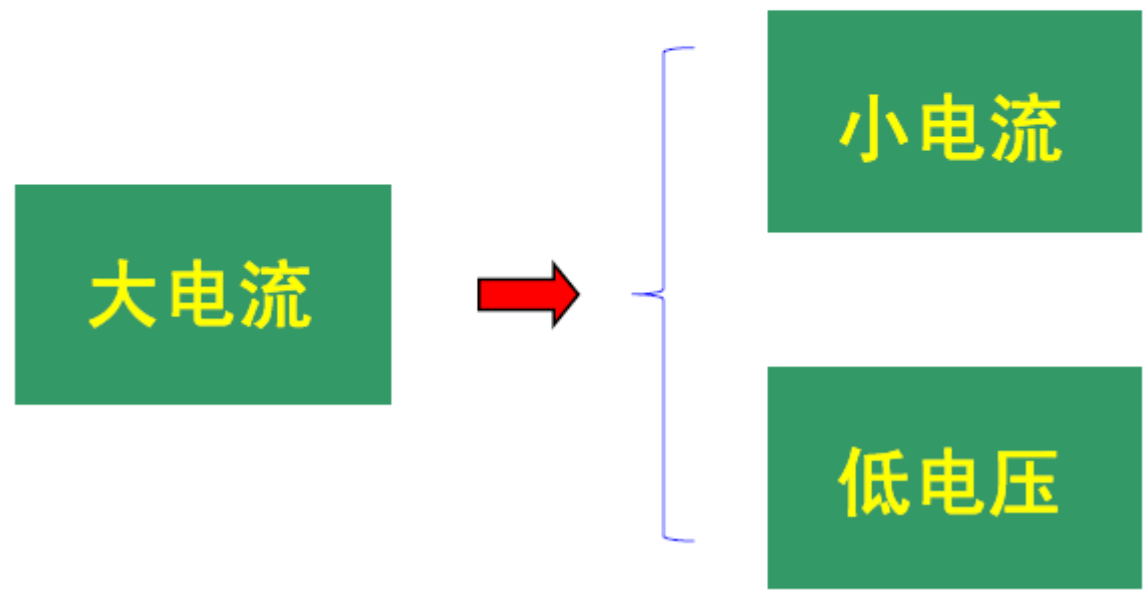
电气工程学院





3.2 大电流的测量

新教材P137



电流表
数字测量仪器





3.2 大电流的测量

■ 电磁式电流互感器

电力系统中常用的
传统的大电流测量

■ 罗哥夫斯基（Rogowski）线圈

有源的

■ 光学电流传感器

无源的

未来逐步
采用电子
式电流互
感器





3.2.1 电磁式电流互感器

Current Transformer

简称CT 或TA（代号），运用电磁感应原理将交流大电流变为小电流，相当于二次侧短路的升压（降流）变压器。



作用：

- （1）将交流大电流变为小电流
- （2）实现测量回路和被测回路的电气绝缘。





3.2.1 电磁式电流互感器



LZZW-10电磁式电流互感器



LVQB-110型、LVQB-220型
电磁式电流互感器

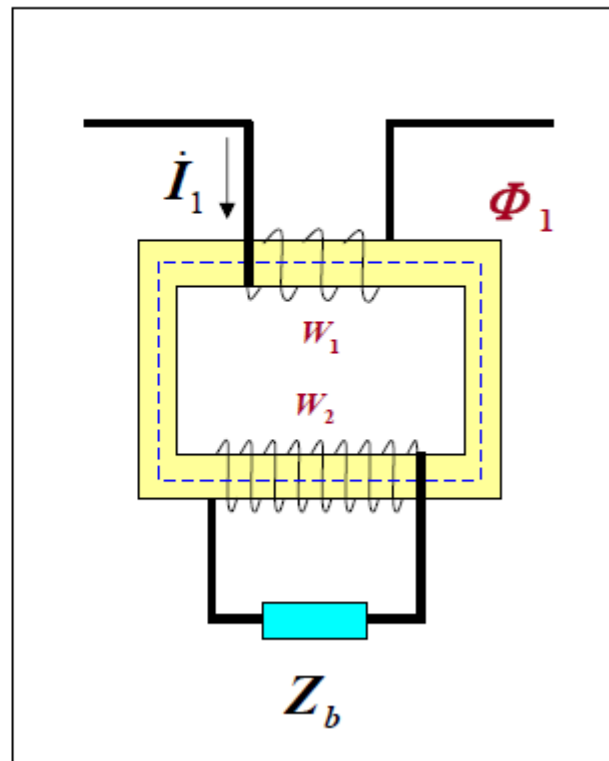




3.2.1 电磁式电流互感器

1. 工作原理

当电流互感器一次绕组接入被测电路，有交变电流流过时，产生与交变电流同频率的交变磁通 Φ_1 ，它穿过二次绕组，使之产生感应电动势。

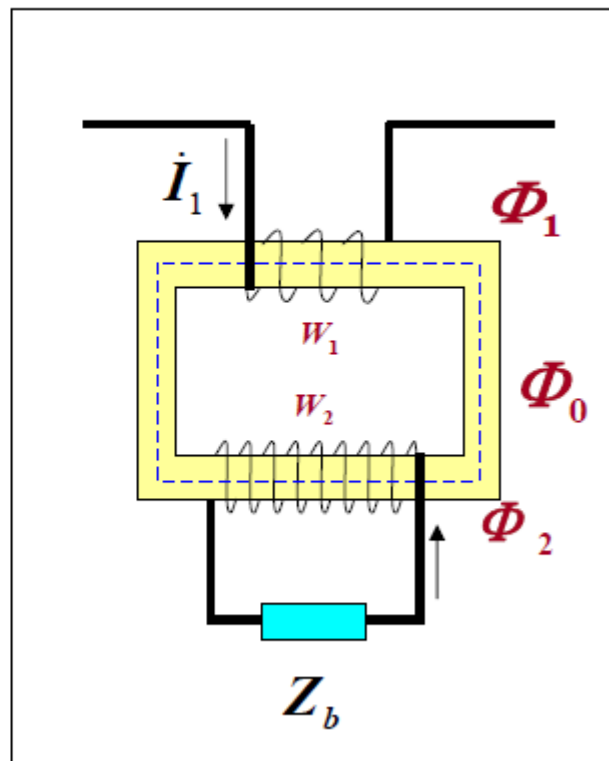




3.2.1 电磁式电流互感器

1. 工作原理

二次绕组为闭合回路时，则有电流流过，它又产生交变磁通 Φ_2 。 Φ_1 与 Φ_2 通过铁芯部分闭合的合成磁通为 Φ_0 ，由它感应的一次、二次绕组中的电动势分别为 e_1 、 e_2 。





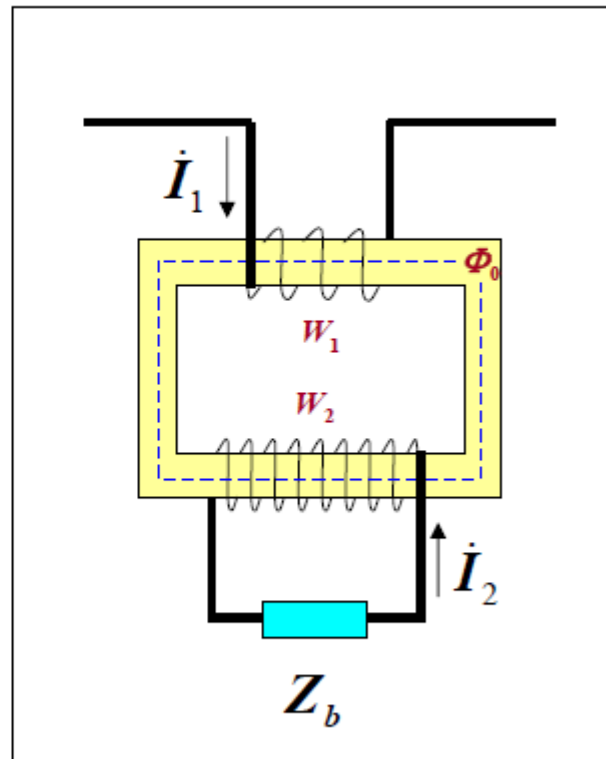
3.2.1 电磁式电流互感器

1. 工作原理

由 e_2 引起的电流为 i_2 。
 Φ_0 的作用为在电流变换过程中将一次绕组的能量传递到二次绕组。

理想情况下，根据能量守恒定律，有：

$$U_1 I_1 = E_2 I_2$$





由于在理想情况下

$$U_1 = E_1$$

因此

$$E_1 I_1 = E_2 I_2$$

又由于

绕组感应电动势

磁感应强度
最大值

铁芯截
面积

绕组匝数

$$\begin{aligned} E_1 &= 4.44 f B_m S W_1 \times 10^{-8} \text{ (V)} \\ E_2 &= 4.44 f B_m S W_2 \times 10^{-8} \text{ (V)} \end{aligned}$$

得

$$I_1 W_1 = I_2 W_2$$





理想电流互感器

$$I_1 W_1 = I_2 W_2$$

重要公式



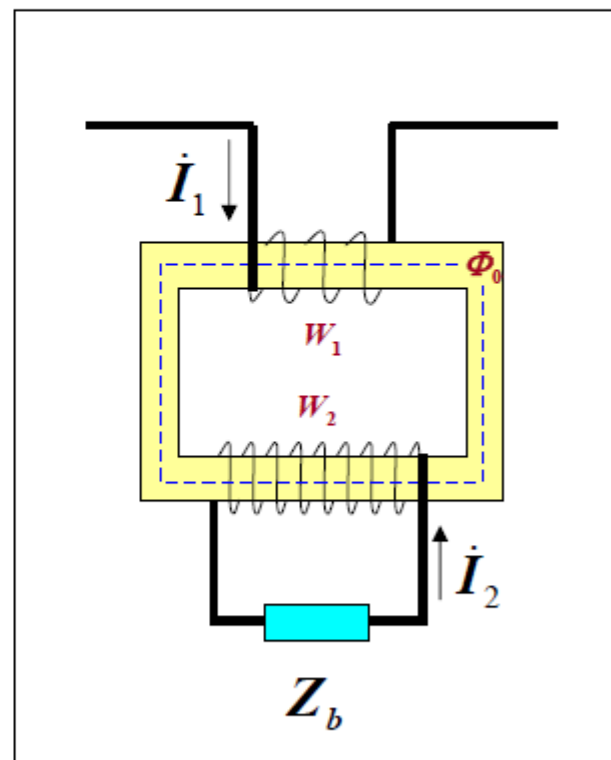
一次安匝数等于二次安匝数。

常数 $\frac{I_1}{I_2} = \frac{W_2}{W_1}$ 额定电流比
(额定变比)

理想电流互感器的电流大小和它的绕组匝数成反比。

额定电流比 $K_I = \frac{W_2}{W_1}$

$$I_1 = K_I I_2$$





实际情况下，如果测得二次侧的电流为 I_2 ，
则被测电流：

$$I_1 = KI_2$$

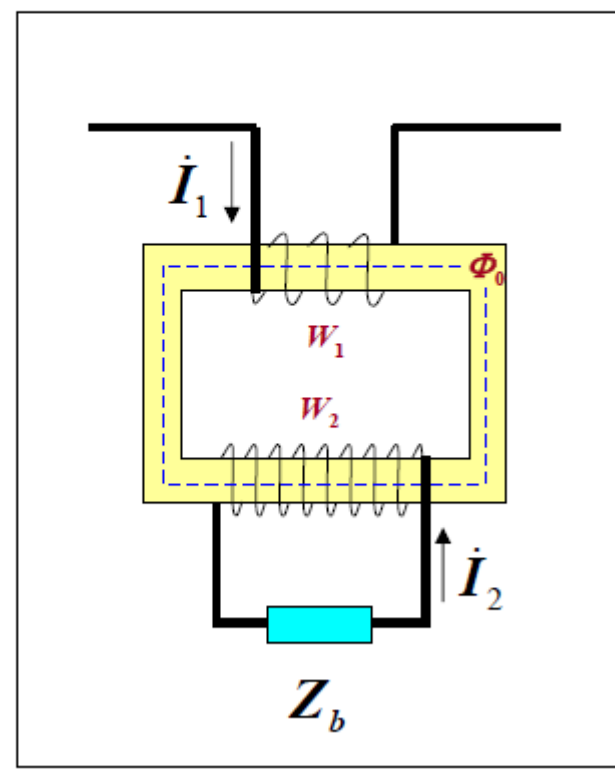
实际电流比

额定电流比

若

$$I_1 = K_I I_2$$

则测量结果存在系统
误差，需要修正或补偿。





2. 主要技术参数

(1) 额定电流比

$$K_I = \frac{100}{5}$$

指一次额定电流与二次额定电流之比。

一次额定电流

$$K_I = \frac{I_{1N}}{I_{2N}} = \frac{W_2}{W_1}$$

二次额定电流

一般用不约分的分数形式表示。





■ 额定电流

指电流互感器可以**长期运行**，不会因发热而损坏的电流。

一次额定电流

允许通过电流互感器**一次绕组**的用电负荷电流。

二次额定电流

允许通过电流互感器**二次绕组**的一次感应电流。





按国家标准规定，电力系统用的电流互感器一次额定电流为5~25000A，精密级电流互感器为0.1~50000A。

二次额定电流有1A和5A两类。

当负载电流超过额定电流时，称为**过载**。电流互感器长期过载运行，会烧坏绕组或降低绝缘物的寿命。





(2) 准确度等级

根据电流互感器在额定工作条件下所产生的**变比误差**规定准确度等级。国产电流互感器的准确度等级有0.01、0.02、0.05、0.1、0.2、0.5、1、3、10级。

9个等级

0.1级以上电流互感器主要用于实验室进行精密测量或作为标准检验低准确度等级的电流互感器。0.2级和0.5级的电流互感器通常用来连接电气测量仪表。3级及以下等级的电流互感器主要连接某些继电保护装置和控制设备。





(2) 准确度等级

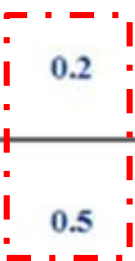
同一级别的电流互感器，一次电流大小不同时，比差和角差的允许范围不同。

准确度等级	一次电流为额定电流的百分数(%)	误差限值		二次负载为额定负载的百分比数(%)
		比值差(±%)	相角差 (')	
0.1	5	0.4	15	25~100
	10	0.25	10	
	20	0.20	8	
	100	0.10	5	
	120	0.10	5	
0.2	10	0.5	20	25~100
	20	0.35	15	
	100~120	0.20	10	
0.5	10	1.0	60	25~100
	20	0.75	45	
	100~120	0.50	30	
1	10	2.0	120	25~100
	20	1.5	90	
	100~120	1.0	60	
3	50~120	3.0	未规定	50~100

实验室精密测量；
校验仪表



连接电气
测量仪表



继电保护装置；
控制设备





(2) 准确度等级

■ 比差

也称为比值误差，它等于实际的二次电流与折算到二次侧的一次电流之间的差值，与折算到二次侧的一次电流的比值，以百分数表示。

额定电流比

$$f_I = \frac{I_2 - I_1 / K_I}{I_1 / K_I} \times 100(\%) = \frac{K_I I_2 - I_1}{I_1} \times 100(\%)$$

$$K_I = \frac{W_2}{W_1}$$

$$f_I = \frac{I_2 W_2 - I_1 W_1}{I_1 W_1} \times 100(\%)$$





(2) 准确度等级

■ 比差

由于 $I_1 = KI_2$

额定电流比

所以

$$f_I = \frac{K_I - K}{K} \times 100(\%)$$

比差

实际电流比

当额定电流比 **大于** 实际电流比，比差为 **正**；
反之，比差为负。





(2) 准确度等级

■ 比差

为了计算上的方便，比差也可以表示为：

$$f_I = \frac{I_2 W_2 - I_1 W_1}{I_1 W_1} \times 100(\%)$$





■ 角差

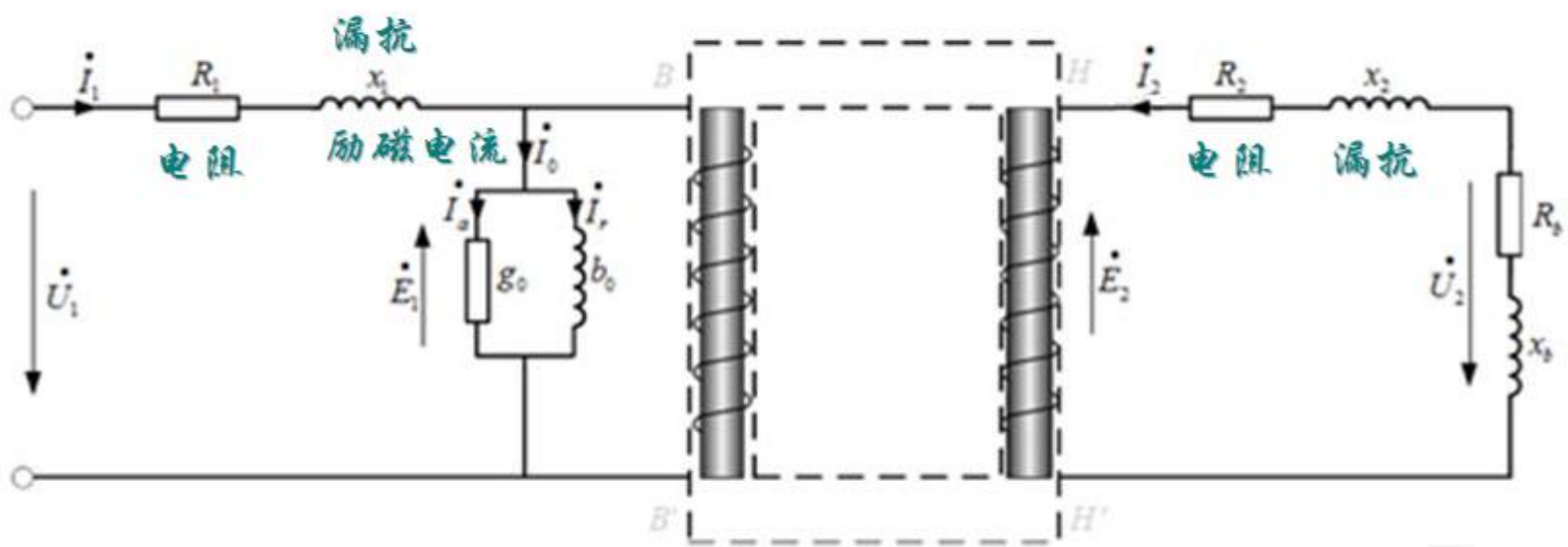
也称为相角误差，它是旋转 180° 后的二次电流相量与一次电流相量之间的相位差。

若旋转 180° 后的二次电流相量超前于一次电流相量时，角差为正值，反之角差为负值。



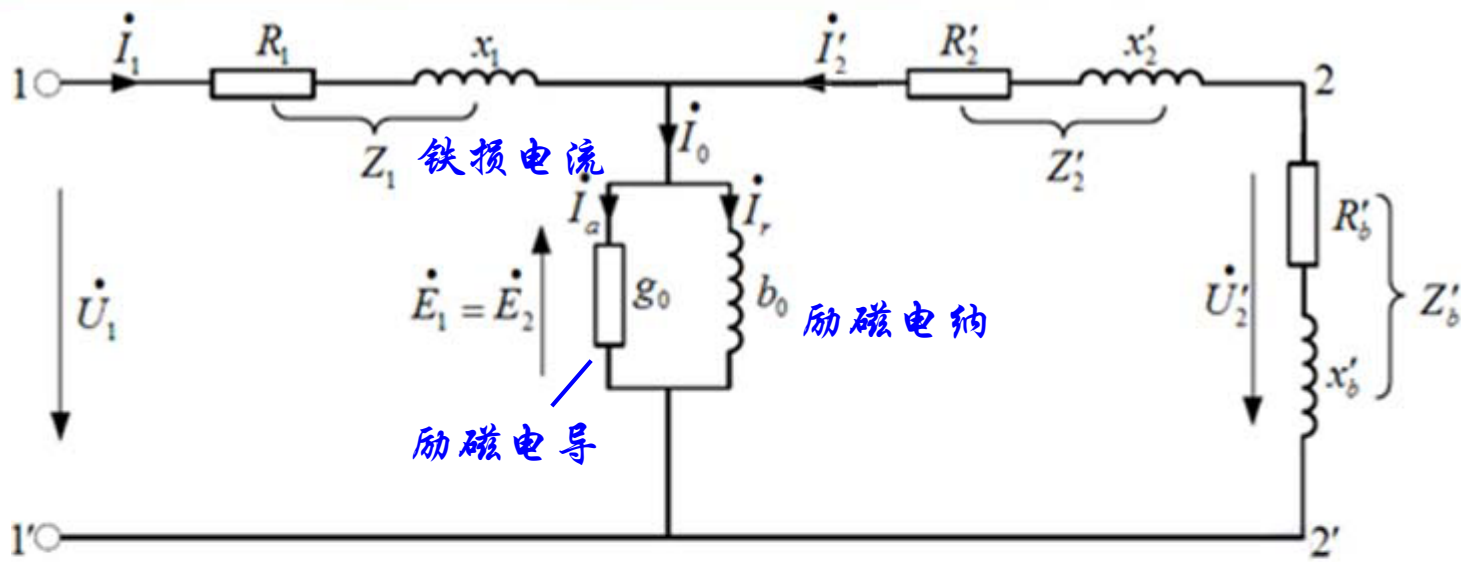


等值电路:



把电阻、漏抗、励磁电流和铁芯损耗移至绕组外面的电流互感器等值电路图





电流互感器T形等值电路

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_1 + \dot{I}_2' &= \dot{I}_0 \\ \dot{I}_2' &= K_I \dot{I}_2 \end{aligned} \right\} \begin{aligned} \dot{I}_1 &= \dot{I}_0 - K_I \dot{I}_2 \end{aligned}$$

励磁电流





理想情况下（励磁电流为零）：

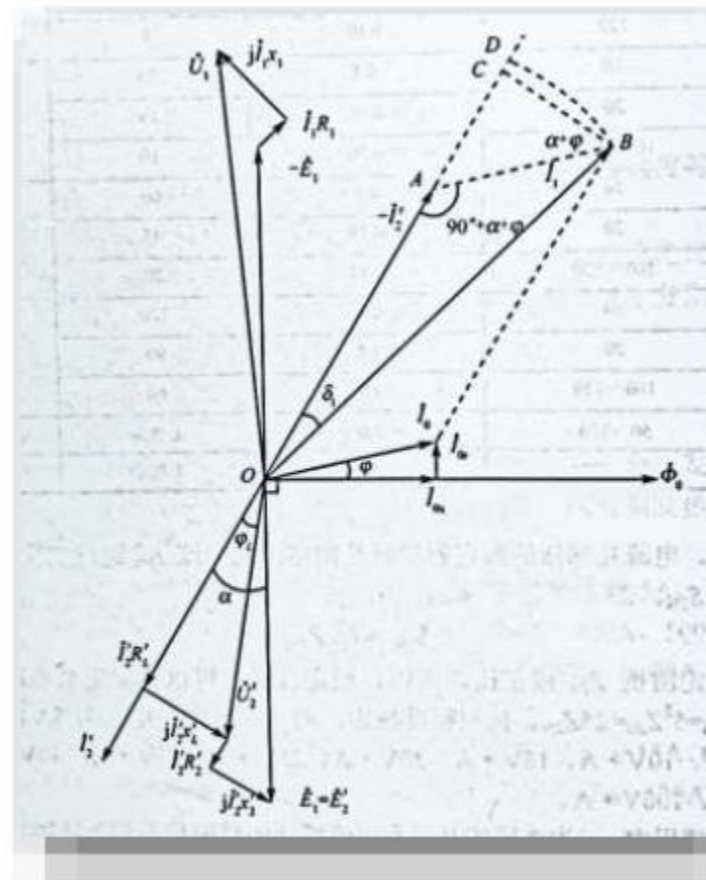
$$\dot{I}_1 = -\dot{I}'_2 = -K_I \dot{I}_2$$

$$f_I = \frac{K_I I_2 - I_1}{I_1} \times 100\% = 0$$

实际情况下：

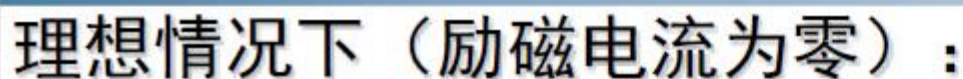
$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 - \dot{I}'_2 = \dot{I}_0 - K_I \dot{I}_2$$

$$f_I = \frac{K_I I_2 - I_1}{I_1} \times 100\% \neq 0$$



向量图

存在比差



$$\phi_1 = \phi_2 + 180^\circ$$

$$\delta_I = (\phi_2 + 180^\circ) - \phi_1 = 0$$

实际情况下:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 - \dot{I}'_2 = \dot{I}_0 - K_I \dot{I}_2$$

$$\phi_1 \neq \phi_2 + 180^\circ$$

$$\delta_I = (\phi_2 + 180^\circ) - \phi_1 \neq 0$$



存在角差



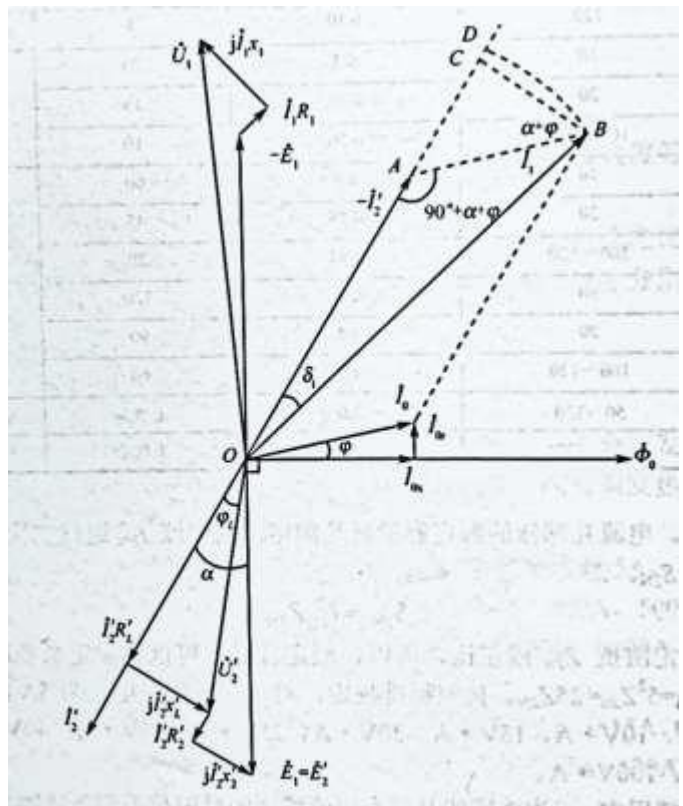
比差 励磁电流 与负荷功率因数角 φ_b 大小有关

$$f_I = -\frac{I_0}{I_1} \sin(\varphi + \alpha) \times 100(\%)$$

角差 损耗角

$$\delta_I = \frac{I_0}{I_1} \cos(\alpha + \varphi) \times 3438(')$$

电流互感器的比差和角差与励磁电流的大小、负荷功率因数角及损耗角的大小有关。





(3) 额定容量

是指二次额定电流通过二次额定负载时所消耗的**视在功率 (VA)**。

$$S_{2N} = I_{2N}^2 Z_{2N}$$

若 $I_{2N}=5A$

额定容量也可以用**额定负载阻抗**表示。

$$S_{2N} = 5^2 Z_{2N} = 25 Z_{2N}$$

按照标准规定，对于二次额定电流为5A的电流互感器，额定容量有5VA、10VA、15VA、20VA、25VA、30VA、40VA、50VA、60VA、80VA、100VA。





(3) 额定容量

电流互感器在使用中，二次连接线及仪表电流线圈的总阻抗不超过铭牌上规定的额定容量时，才能保证它的准确度。





(4) 额定电压

是指一次绕组长期**对地**能够承受的最大电压（有效值），它应不低于所接线路的额定相电压。

电流互感器的额定电压不是加在一次绕组两端的电压，因而，电流互感器的额定电压只是说明电流互感器的**绝缘强度**，与电流互感器额定容量**没有任何关系**。





(4) 额定电压

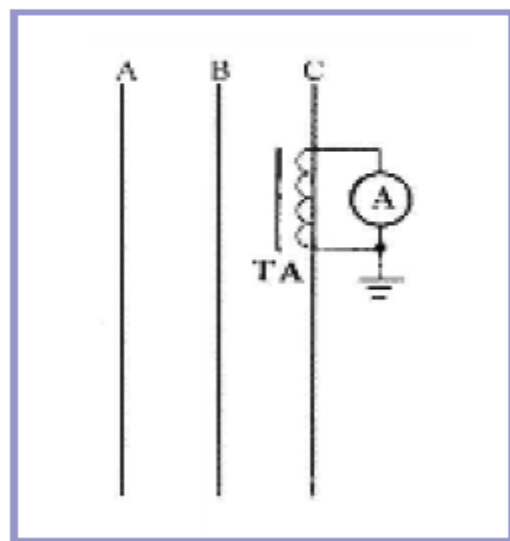
电流互感器的额定电压有0.4kV、6kV、10kV、35kV、66kV、110kV、220kV、330kV、500kV、1000kV等几种电压等级，通常标在电流互感器型号后面。



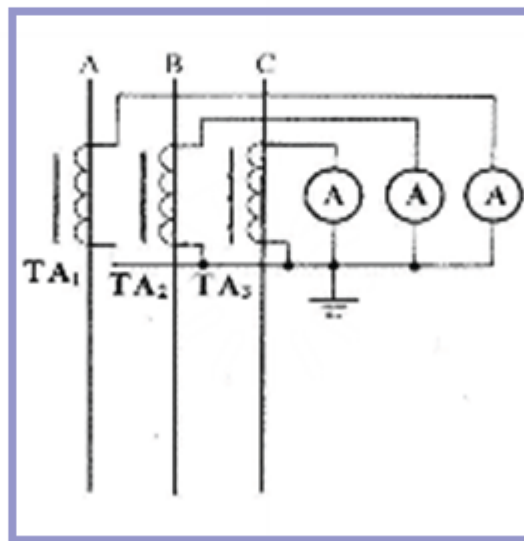


3. 电磁式电流互感器的安装及使用

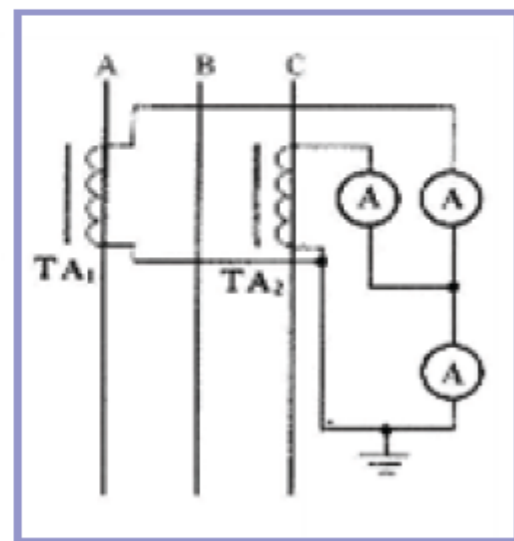
■ 安装



(a) 测量单相电流



(b) 测量三相电流



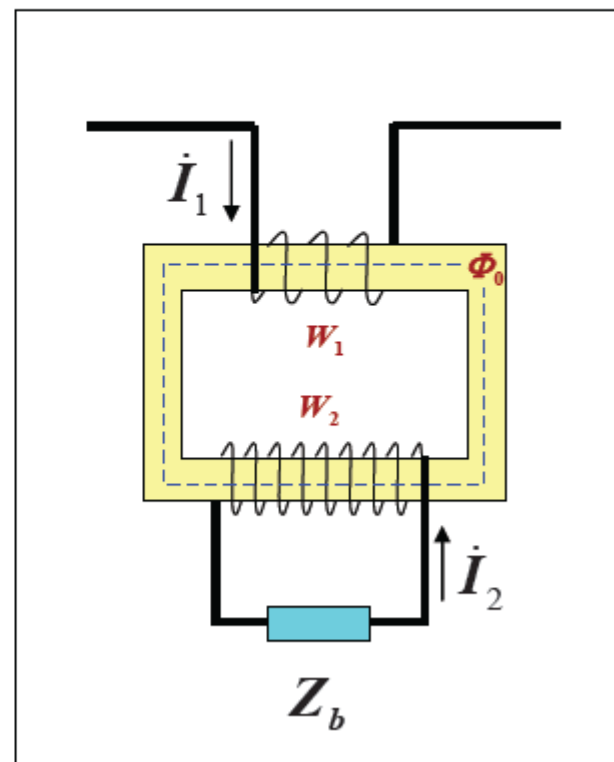
(c) 测量不平衡电流





■ 使用

★ 二次侧**严禁**开路





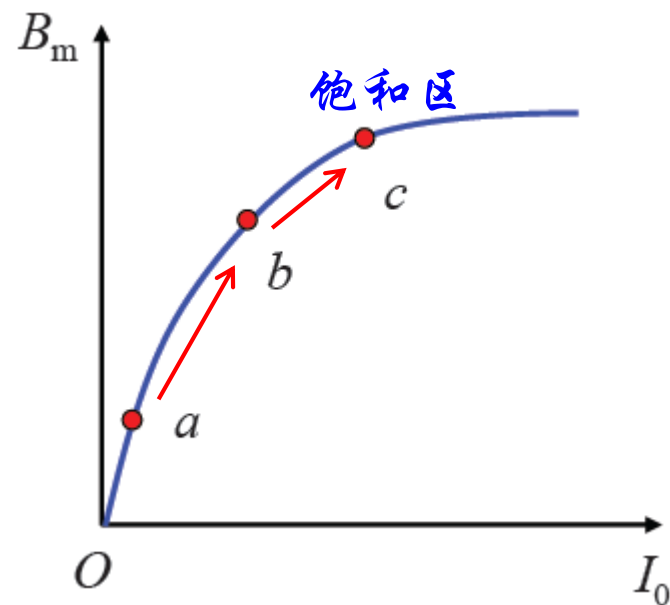
■ 使用

二次侧开路后，二次电流产生的去磁磁通消失，励磁电流**增大**，使电流互感器**饱和**，磁通**很高**。

产生的后果：

- (1) 二次侧将产生数千伏**高压**。
- (2) 铁芯损耗增加，产生高热，**损坏绝缘**
- (3) 铁芯中产生**剩磁**，电流互感器的比差和角差增大。

准确性大大降低



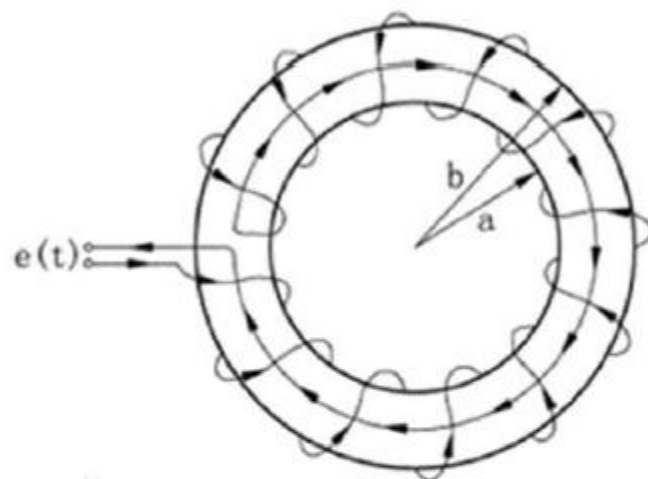
电流互感器铁芯的峰值磁密在磁化曲线中的位置





3.2.2 罗哥夫斯基 (Rogowski) 线圈

是目前主要应用
的电子式电流互感器



也称罗氏线圈、空芯线圈，是均匀密绕在**环形非磁性骨架**上的空芯螺线管，可以**直接套在**被测量的导体上来测量交流电流。

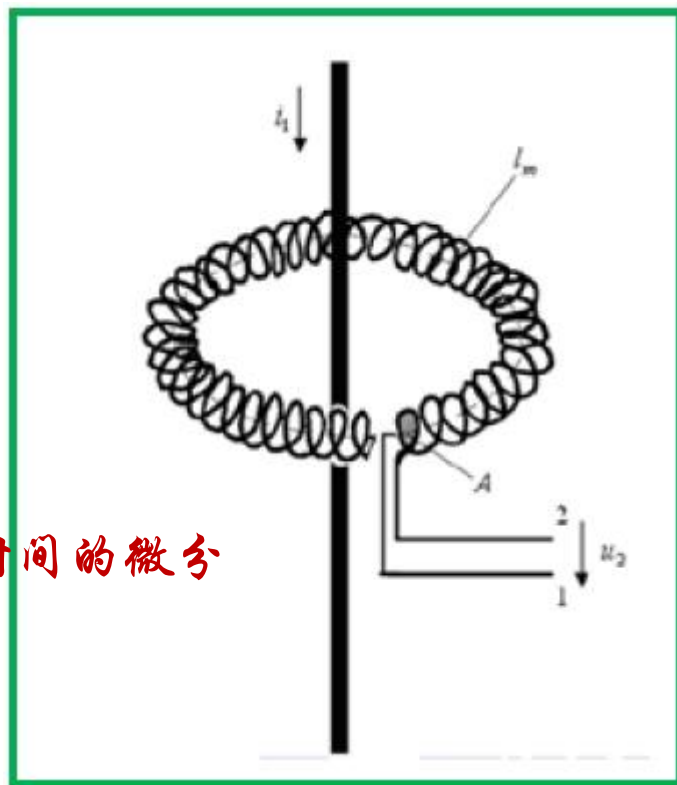




1. 基本原理

法拉第电磁感应定律
安培环路定律

导体中流过的被测交流电流会在周围产生一个交变的磁场，从而在线圈中感应出一个与电流变化成正比的交流电压。← 电流对时间的微分



罗哥夫斯基线圈

用专用积分器对交流电压进行积分，即可确定被测电流的大小。

考虑空心线圈
的互感系数





2. Rogowski 线圈的积分方法



小电阻自积分法

利用罗氏线圈与取样电阻
构成积分回路

外接电阻远小于罗氏线圈内阻抗

大电阻外积分法

把测量回路本身作为纯电阻网
络，外加了一个积分回路

外接电阻远大于罗氏线圈内阻抗

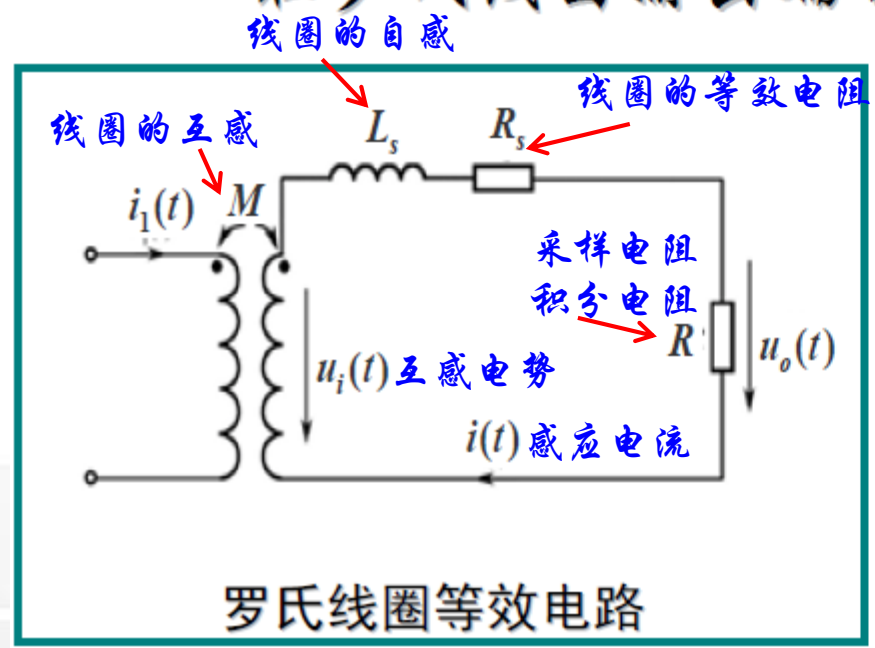




2. Rogowski 线圈的积分方法

(1) 小电阻自积分法

在罗氏线圈输出端并联一个小采样电阻。



回路方程:

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

$$M \frac{di_1(t)}{dt} = L_s \frac{di(t)}{dt} + R_s i(t) + u_o(t)$$



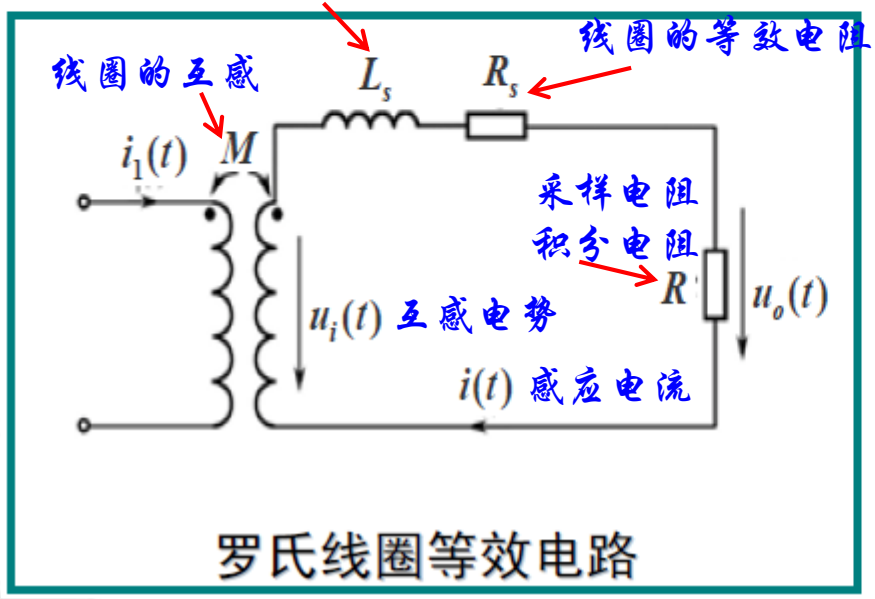


$$M \frac{di_1(t)}{dt} = L_s \frac{di(t)}{dt} + R_s i(t) + u_o(t)$$

当 $L_s \frac{di(t)}{dt} \gg R_s i(t) + u_o(t)$

即 $\omega L_s \gg R_s + R$

自积分条件



得 $M \frac{di_1(t)}{dt} = L_s \frac{di(t)}{dt}$

由于 $i(t) = \frac{u_o(t)}{R}$





$$M \frac{di_1(t)}{dt} = \frac{L_s}{R} \frac{du_o(t)}{dt}$$

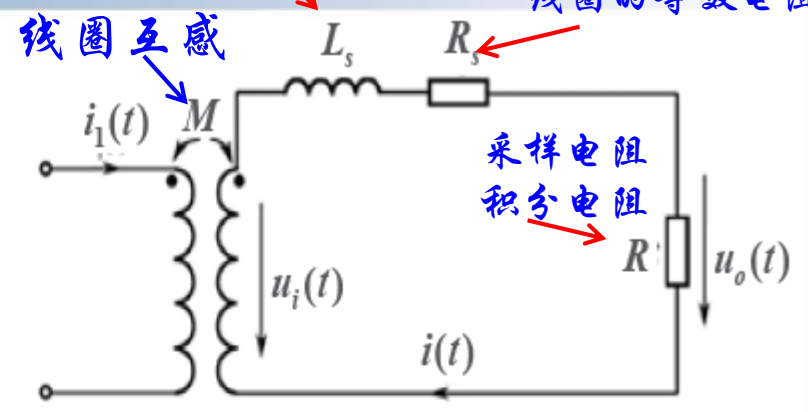
等式两端同时对 t 积分，得

$$i_1(t) = \frac{L_s}{MR} u_o(t)$$

被测电流

线圈的自感

线圈的等效电阻



罗氏线圈等效电路

$$\omega L_s \gg R_s + R$$

自积分条件

被测电流和输出电压成比例关系。

适合高频电流的测量。 100kHz以上





(2) 大电阻外积分法

外积分条件

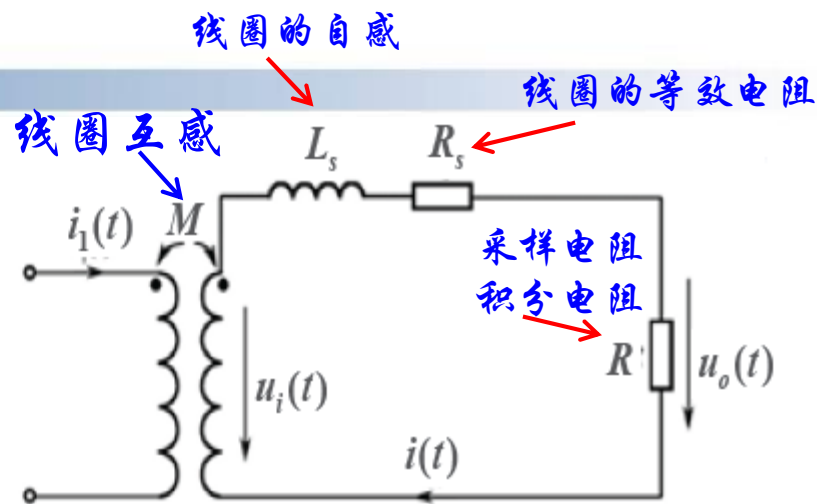
当 $R \gg \omega L_s + R_s$ 时,

罗氏线圈近似开路状态,

感应电势全部加
在采样电阻上

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

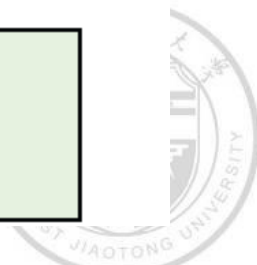
$$i_1(t) = \frac{1}{M} \int u_o(t) dt$$



罗氏线圈等效电路

适合工频电流
的测量。

被测电流和输出电压的积分成比例关系。
因此为了测量被测电流，需外接积分电路。





■ 外积分电路

比较适合中低频段的应用

有源积分电路

{ 模拟积分器：易饱和
数字积分器：暂态性能有限

性噪比较高，增益灵活，是普遍
采用的罗氏线圈的外积分电路。

软件数字积分器





总结：

罗氏线圈的两种应用方式

重要！



小电阻

线圈等效电阻

积分电阻

自积分方式

$$\omega L_s \gg R_s + R$$

适用于100kHz以上频率的场合

大电阻

外积分方式

$$R \gg \omega L_s + R_s$$

使用空心线圈实现对脉冲电流、

工频电流及谐波电流的测量。





3. Rogowski 线圈的主要特点

- 线性度好 不含磁饱和元件 系统输出与待测信号一直是线性的
- 测量范围大 系统的量程取决于最大击穿电压
量程从几毫安到几百千安
- 响应速度快、频响范围宽
频响范围： $0.1\text{Hz} \sim 1\text{MHz}$
- 一次侧和二次侧电流无相角差
- 互感器二次侧开路不会产生高电压
无二次开路危险





3.3 交流电气量的测量

■ 频率和周期的测量 重要!

■ 相位的测量 自学

■ 功率的测量 自学





3.3.1 频率和周期的测量

时间和频率的测量是目前测量
精度最高的测量，准确度可达 10^{-16}

各种传感器和测量
电路常将被测量变换为
周期或频率信号来进行
测量

GPS 全球定位系统

频率和周期从不同侧面描述周期现象，二者互为倒数。





3.3.1 频率和周期的测量

主要的测量方法

- 直读法

谐振法、电桥法、
频率—电压转换法

- 比较法

拍频法、差频法、
示波法

目前测量频率、
时间最好的方法

- 计数法

电容充放电法、
电子计数器法





3.3.1 频率和周期的测量

1. 频率的测量

(1) 电子计数法测量频率的原理

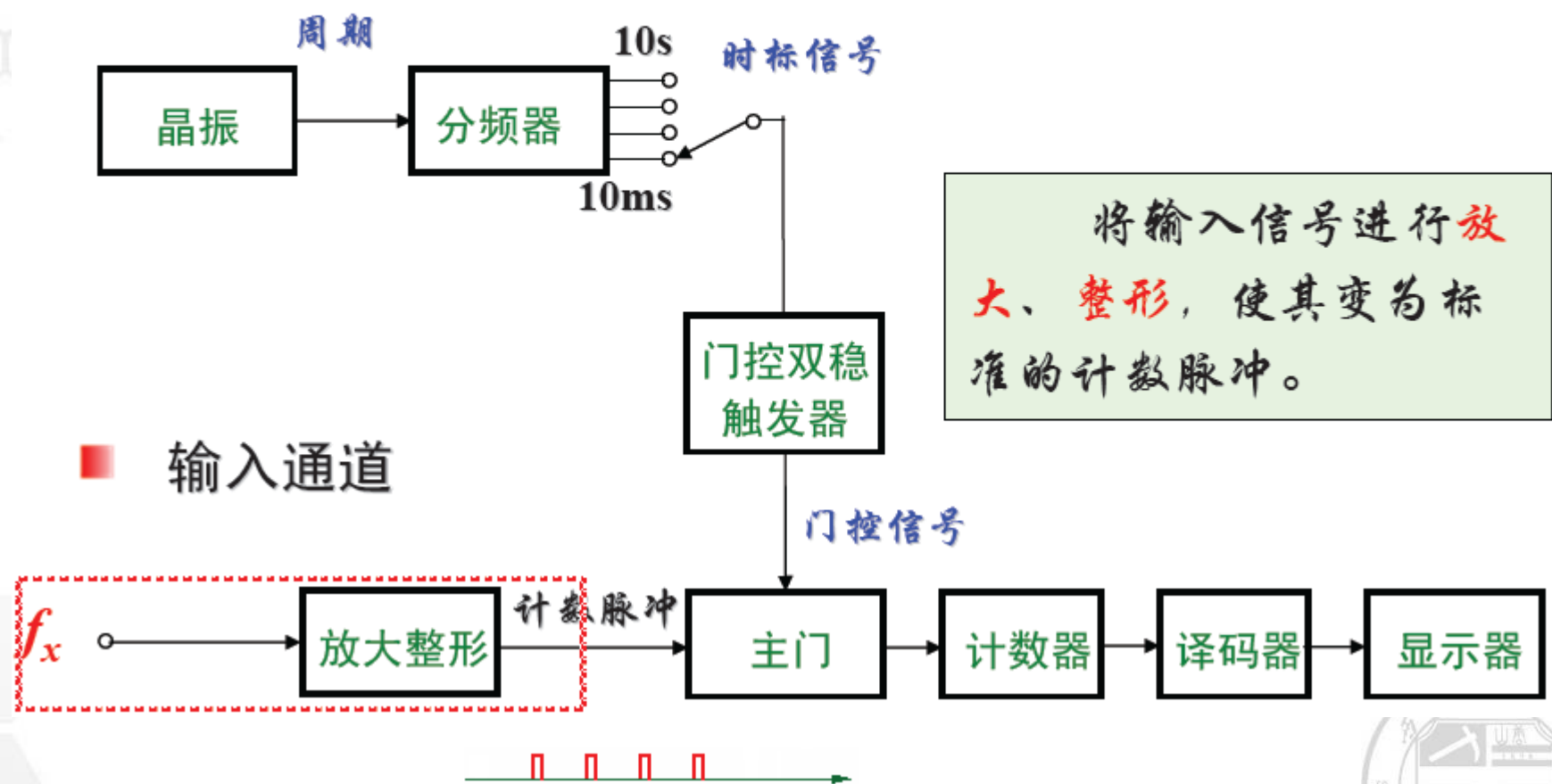
频率是指单位时间内被测信号重复出现的次数。

$$f_x = \frac{N}{T}$$



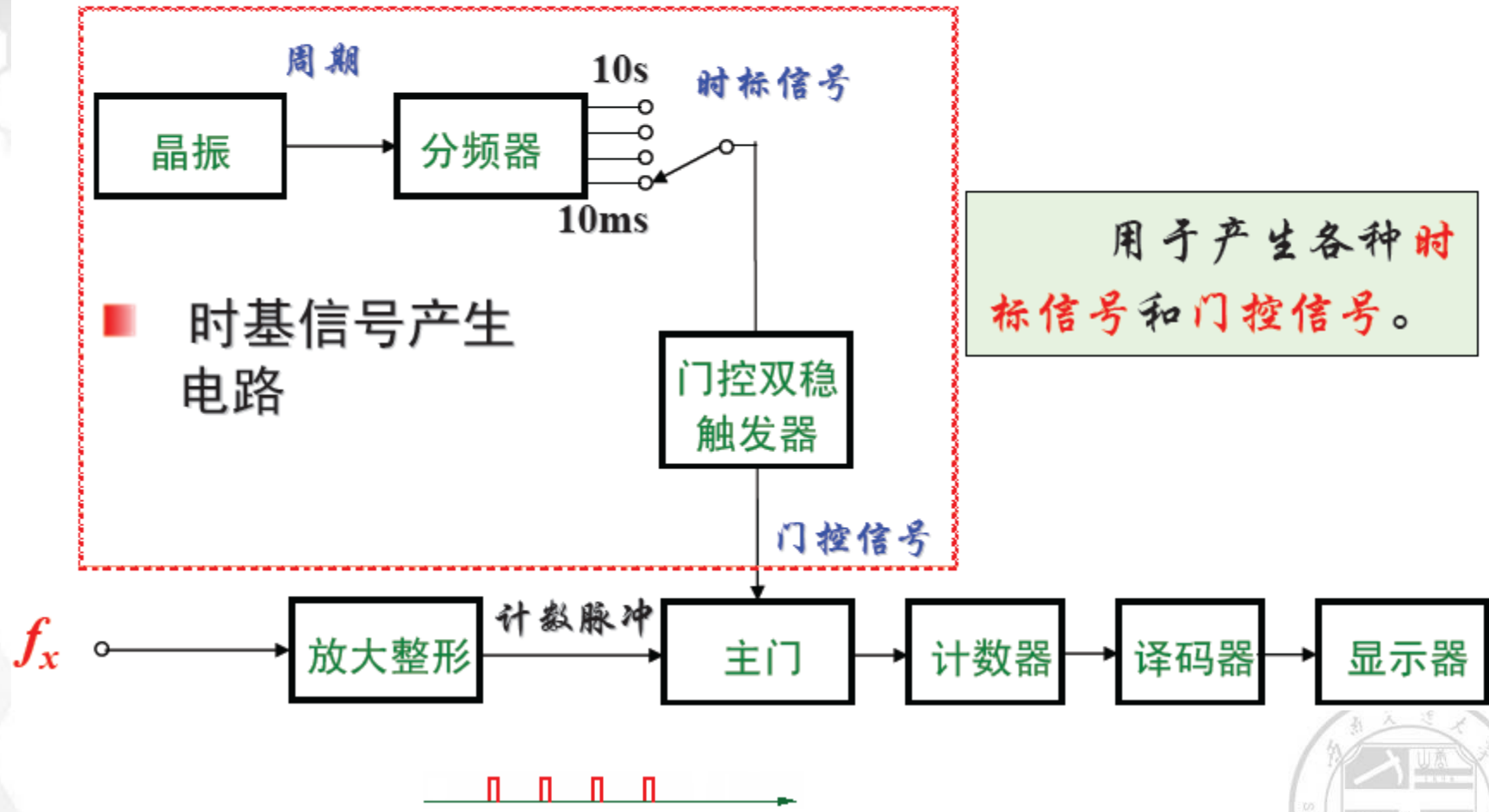


电子计数法测量频率的原理图



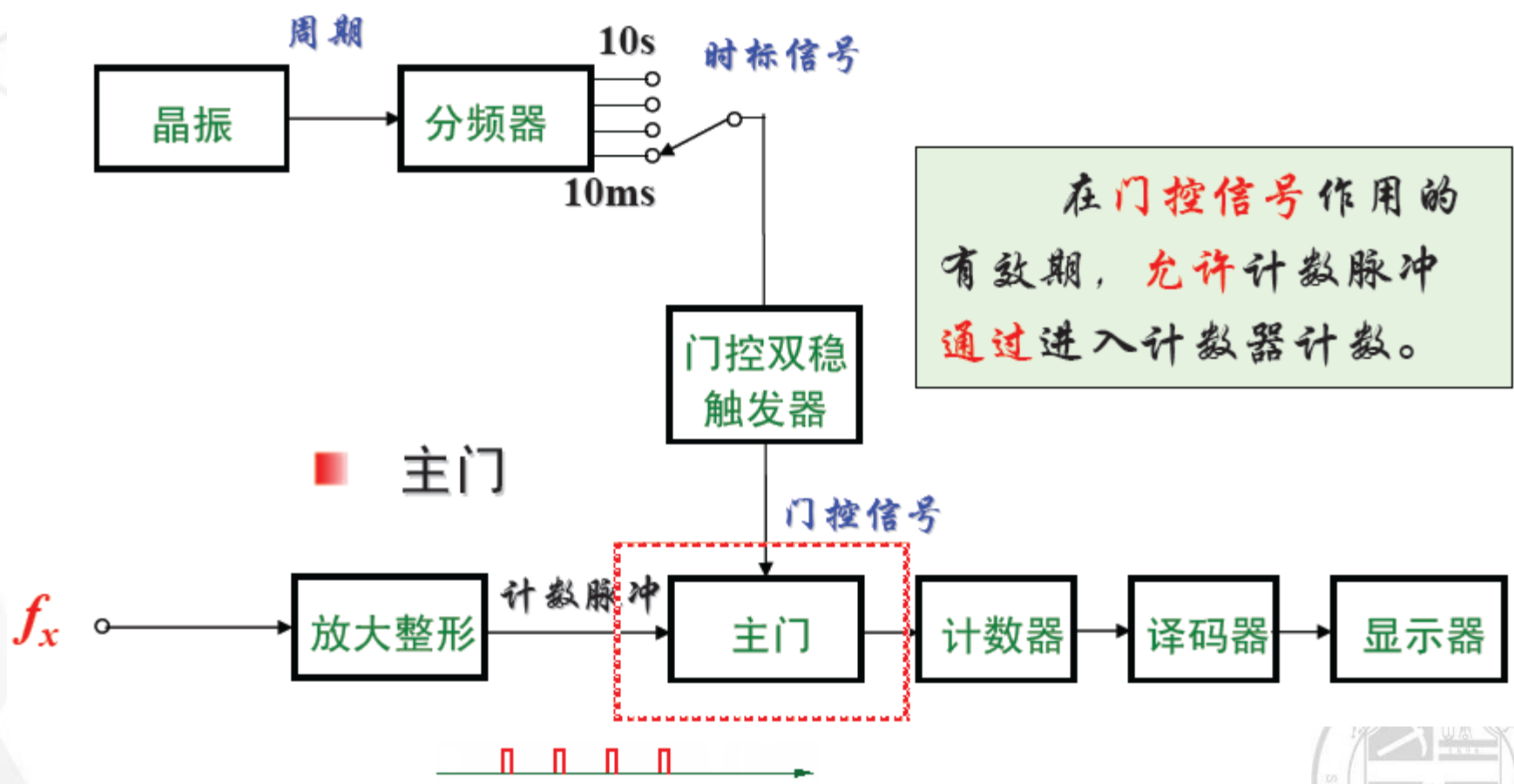


电子计数法测量频率的原理图



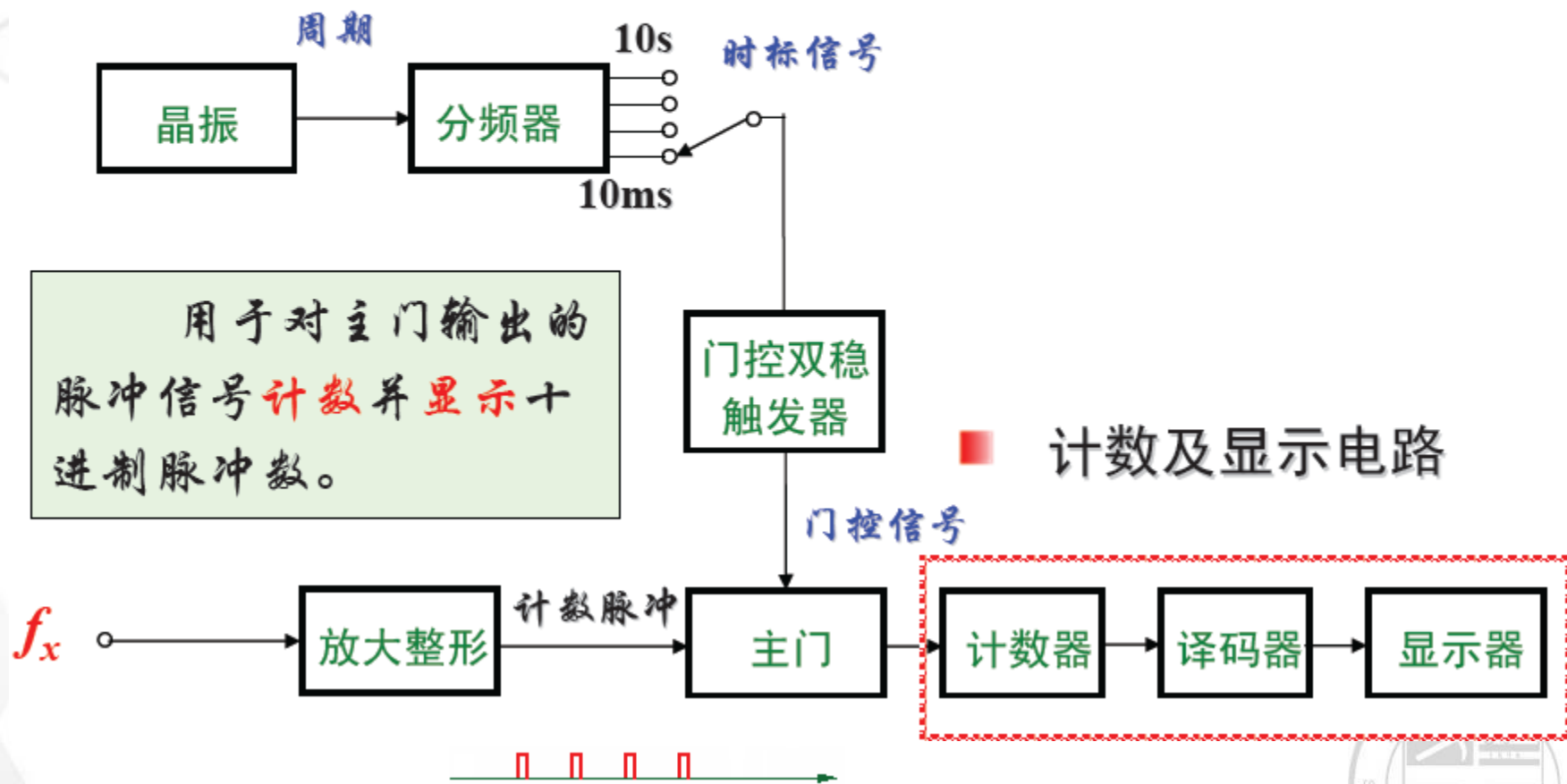


电子计数法测量频率的原理图



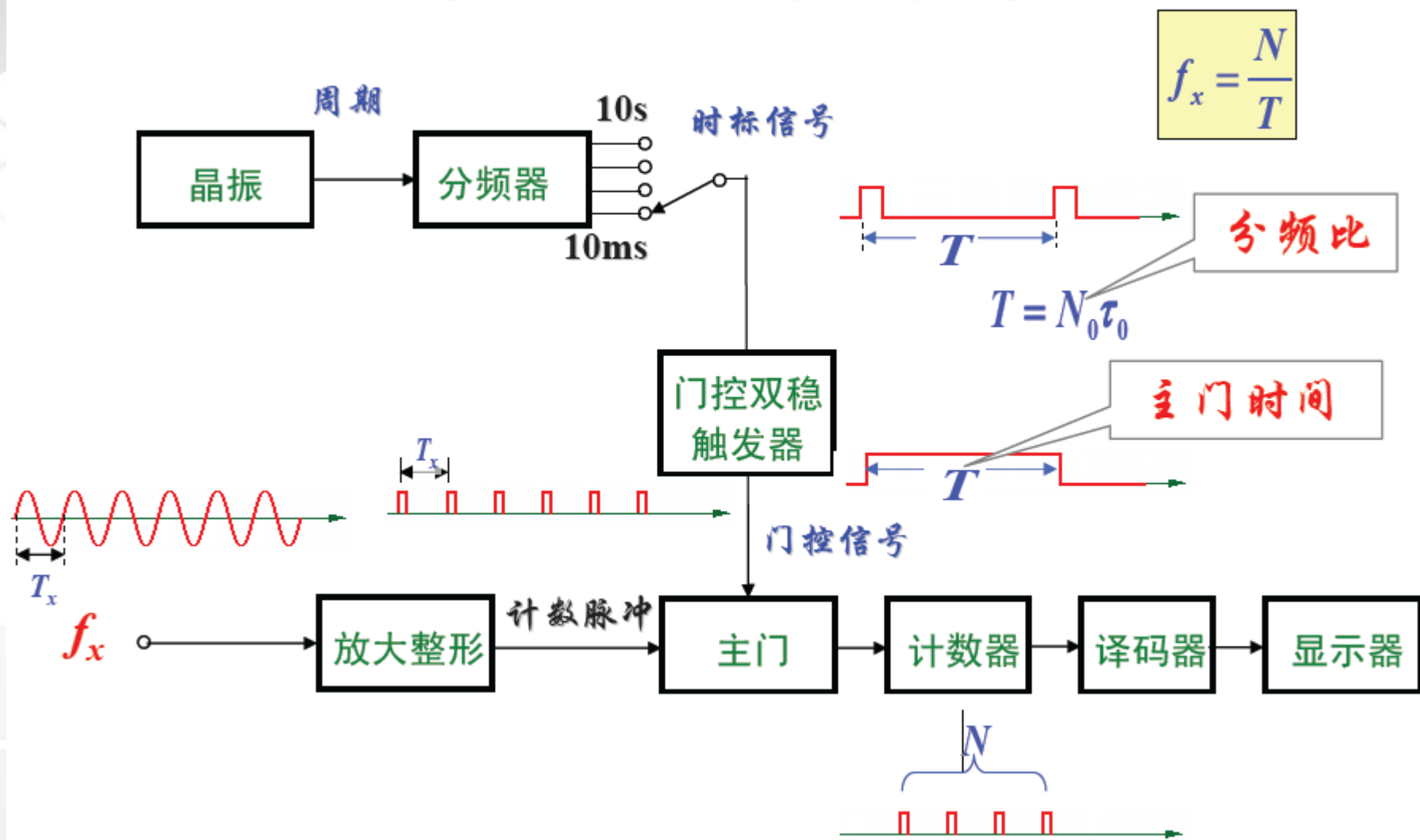


电子计数法测量频率的原理图





电子计数法测量频率的原理图





$$f_x = \frac{N}{T} = \frac{N}{N_0 \tau_0}$$

主门时间

晶振周期

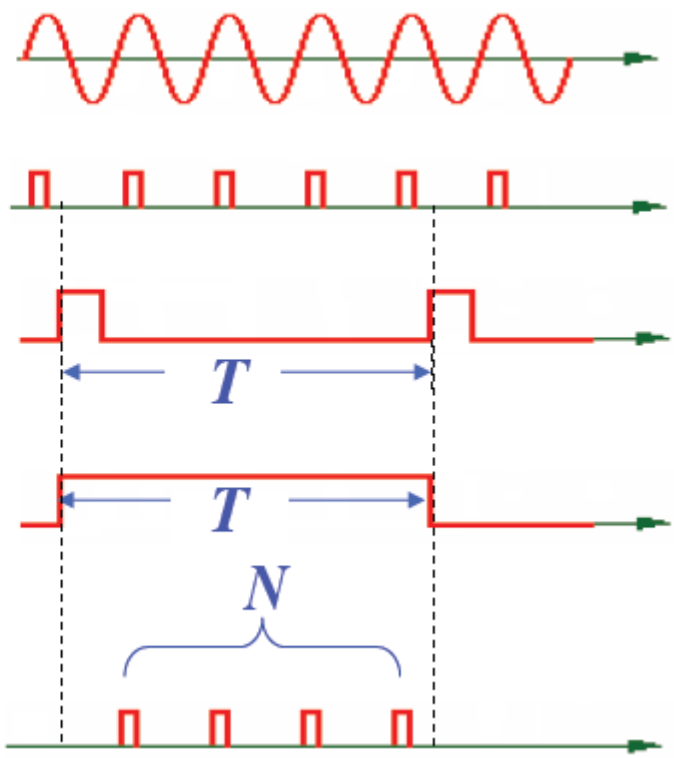
分频比

计数脉冲
(信号产生)

分频器输出
(晶振分频)

门控信号

主门输出



主门时间应如何选择?

$$f_x = \frac{N}{T}$$





主门时间对计数的影响

有一台可显示6位数的计数式频率计，单位为kHz，设 $f_x = 100\text{kHz}$ 。 $T_x = 10^{-5}\text{s}$

主门时间

$$T = 1\text{s} \quad N = 100000$$

$$T = 0.1\text{s} \quad N = 10000$$

$$T = 10\text{ms} \quad N = 1000$$

100.000 kHz

0100.00 kHz

00100.0 kHz

十进制
计数值

自动定位
小数点

计数值越小
误差越大

主门时间选择原则：在计数器**不产生溢出**的前提下，主门时间尽量取**大**一些。





(1) 电子计数法测量频率的最大允许 误差分析

测频的最大允许误差

量化相对误差

$$\frac{\Delta f_x}{f_x} = \pm \left(\left| \frac{\Delta N}{N} \right| + \left| \frac{\Delta T}{T} \right| \right)$$

主门时间
相对误差





(A) 量化相对误差 $\frac{\Delta N}{N}$

■ 量化误差 (± 1 误差)

测量频率时，在**相同**的主门时间内，计数器计数值**不一定**相同，这样产生的误差称为量化误差。

量化误差的产生是**不可避免**的，是由于主门时间的开启时刻和被测计数脉冲的**随机**关系引起的。



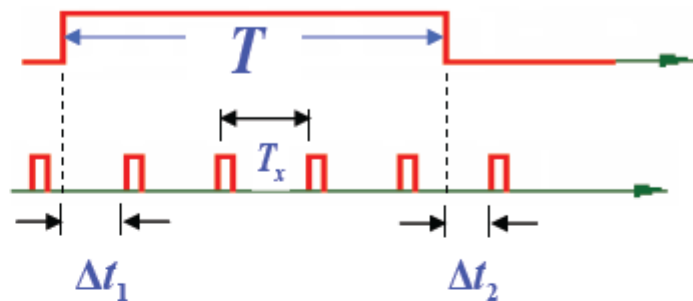


设 T 时间内计数值为 N , 则

$$T = \Delta t_1 + NT_x - \Delta t_2$$

$$= NT_x + \Delta t_1 - \Delta t_2$$

$$= \left[N + \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{T_x} \right] \cdot T_x \Rightarrow \Delta N = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{T_x}$$



$$\Delta t_1 = T_x \quad \Delta t_2 = 0 \quad \Delta N = 1$$

$$\Delta t_1 = 0 \quad \Delta t_2 = T_x \quad \Delta N = -1$$



$$\Delta N = \pm 1$$





■ 量化相对误差

$$\frac{\Delta N}{N} = \pm \frac{1}{N} = \pm \frac{1}{Tf_x}$$

■ 计数值 N 越大时，量化相对误差就越小。

■ 当 f_x 一定时，增大主门时间 T ，可以减小量化相对误差。

■ 主门时间一定，被测信号的频率愈高，量化相对误差就越小。

适合于测量
高频信号





(B) 主门时间相对误差 $\frac{\Delta T}{T}$

主门时间误差是指由于主门时间**不准**造成主门的启、闭时间或长或短，从而引起的测频误差。

主门时间误差大小主要由石英晶体振荡器输出信号的**频率准确度和稳定度**决定。





设晶振频率为 f_0 ，分频比为 N_0 ，则主门时间为：

$$\left. \begin{aligned} T &= \frac{N_0}{f_0} \\ \Delta T &= -\frac{N_0}{f_0^2} \cdot \Delta f_0 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{\Delta T}{T} = -\frac{\Delta f_0}{f_0}$$

标准频率
相对误差

主门时间相对误差在数值上等于晶振信号的标准频率相对误差，但符号相反。





(C) 最大允许误差

量化误差 主门时间相对误差

$$\frac{\Delta f_x}{f_x} = \pm \left(\left| \frac{\Delta N}{N} \right| + \left| \frac{\Delta T}{T} \right| \right) = \pm \left(\left| \pm \frac{1}{Tf_x} \right| + \left| -\frac{\Delta f_0}{f_0} \right| \right)$$



$$\frac{\Delta f_x}{f_x} = \pm \left(\frac{1}{Tf_x} + \left| \frac{\Delta f_0}{f_0} \right| \right)$$

低

被测信号频率
低时，不宜采用测频
法直接测量频率，而
应采用测周期的方法
间接测量频率。

减小最大允许误差的方法：

- 增大主门时间，提高晶振频率的准确度和稳定度。





2. 周期的测量

(1) 电子计数法测量周期的原理

时钟信号的周期

$$nT_x = N\tau$$

$$\tau = N_0\tau_0$$

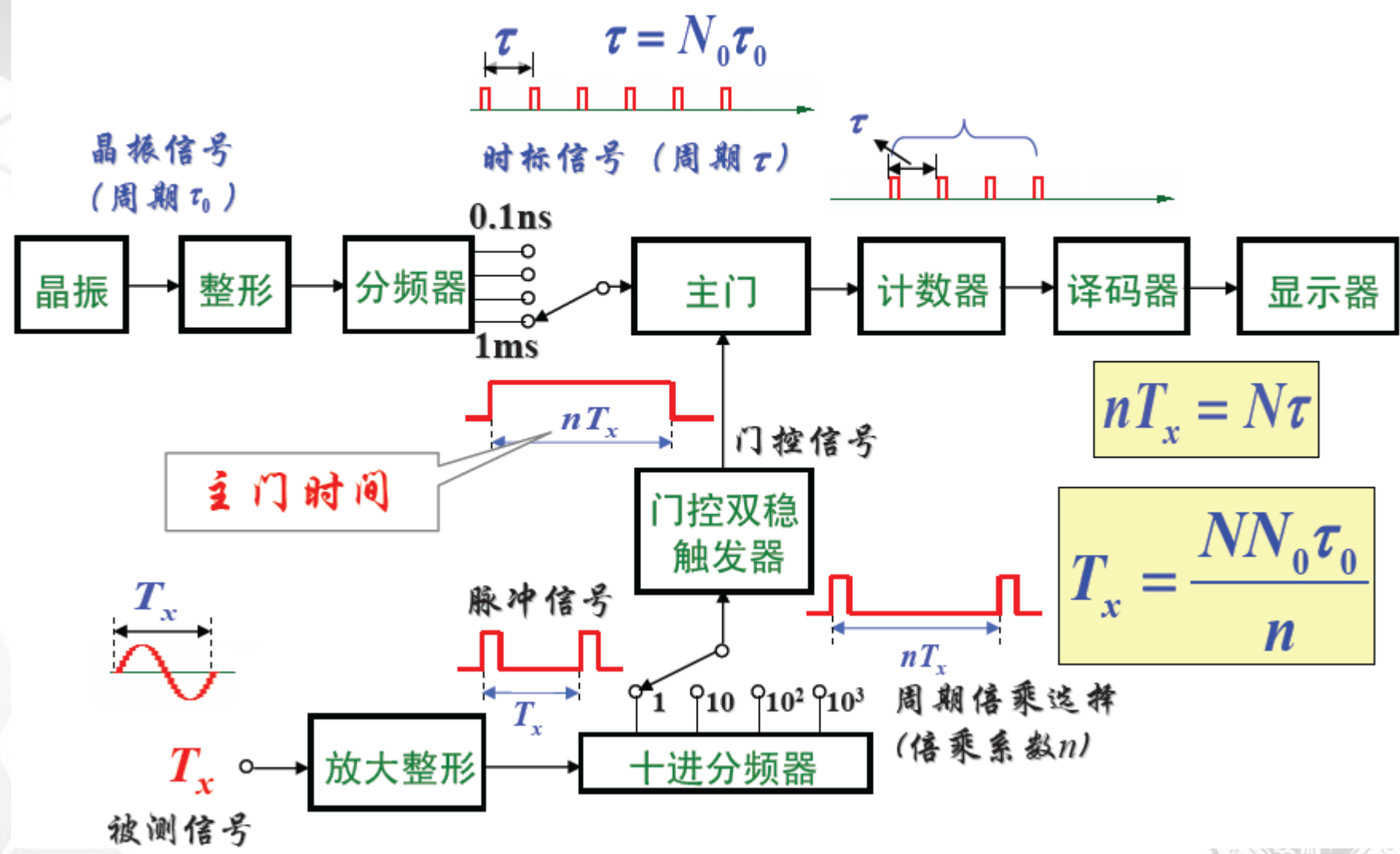
$$T_x = \frac{N\tau}{n}$$

倍乘
系数



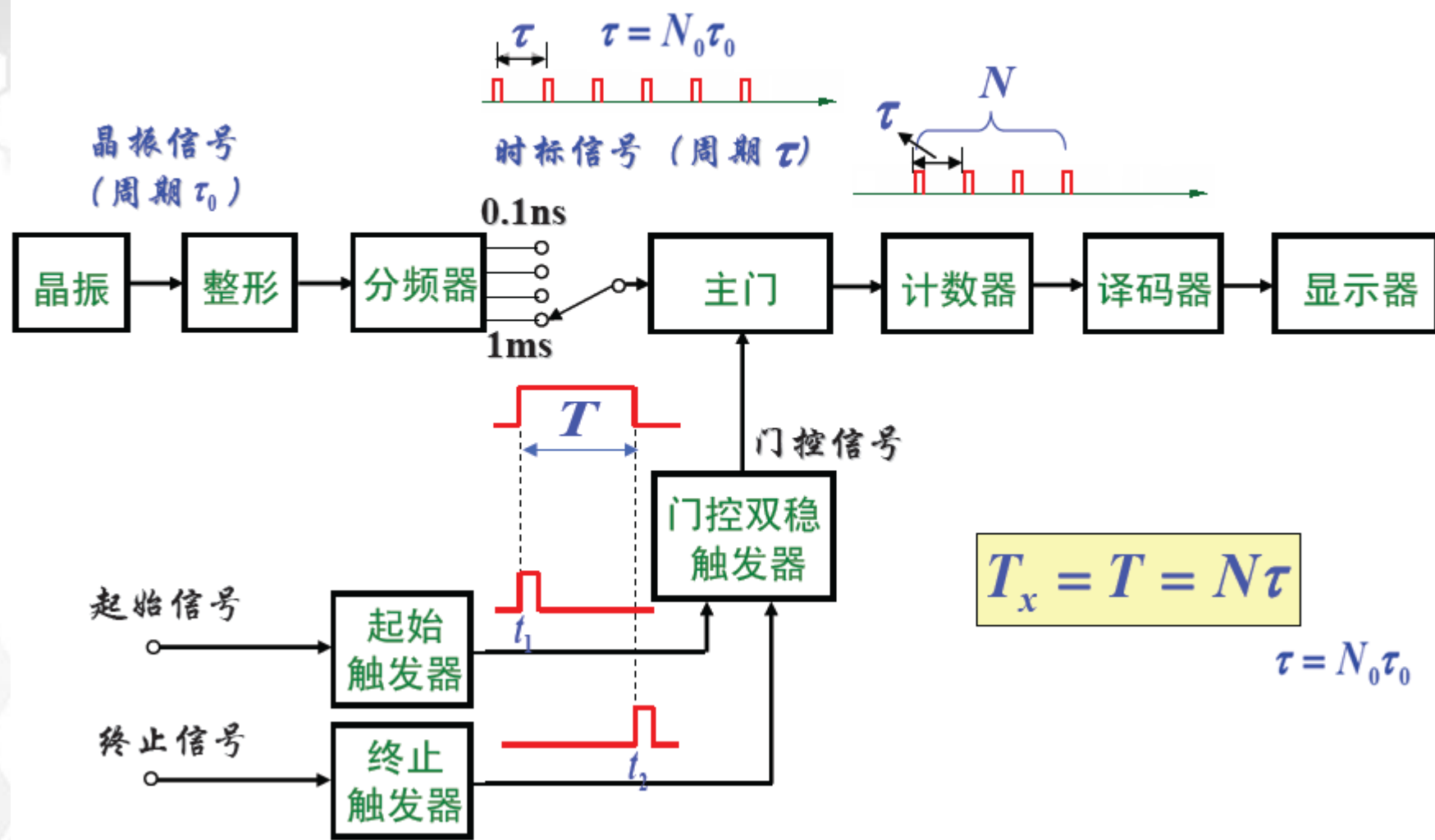


电子计数法测量周期的原理图





时间间隔的测量原理图





(2) 电子计数法测量周期的最大允许 误差分析

测周的最大允许误差

$$\tau = N_0 \tau_0$$

$$\frac{\Delta \tau}{\tau} = \frac{\Delta \tau_0}{\tau_0} = -\frac{\Delta f_0}{f_0}$$

标准频率
相对误差

量化相对误差

$$\frac{\Delta T_x}{T_x} = \pm \left(\left| \frac{\Delta N}{N} \right| + \left| \frac{\Delta \tau}{\tau} \right| \right)$$

时标信号
相对误差

$$N = \frac{nT_x}{\tau} = \frac{nT_x}{N_0 \tau_0} \quad \frac{\Delta N}{N} = \pm \frac{1}{N} \rightarrow \frac{\Delta N}{N} = \pm \frac{N_0 \tau_0}{nT_x}$$

触发误差





$$\frac{\Delta T_x}{T_x} = \pm \left(\frac{\tau}{nT_x} + \left| \frac{\Delta f_0}{f_0} \right| \right) = \pm \left(\frac{N_0 \tau_0}{nT_x} + \left| \frac{\Delta f_0}{f_0} \right| \right)$$



减小测周最大允许误差的方法：

- 减小时标信号的周期 τ ，即减小分频比 N_0 值。

选用高频的
时标信号

- 增大倍乘系数 n 。

增大主门
开启时间

- 提高晶振的频率准确度和稳定度。

注意

周期较大的信号，应采用测周法测量；
频率较大的信号，应采用测频法测量。





3. 中界频率

对于同一信号，当直接测量频率和直接测量周期的最大允许误差相等时的频率称为中界频率。





3. 中界频率

测频: $\frac{\Delta f_x}{f_x} = \pm \left(\frac{1}{Tf_x} + \left| \frac{\Delta f_0}{f_0} \right| \right)$

测周: $\frac{\Delta T_x}{T_x} = \pm \left(\frac{\tau}{nT_x} + \left| \frac{\Delta f_0}{f_0} \right| \right)$

在中界频率 f_c 处:

$$\frac{1}{Tf_c} = \frac{\tau}{nT_c} \quad \Rightarrow \quad f_c^2 = \frac{n}{\tau T}$$





3. 中界频率



测周时

$$f_c = \sqrt{\frac{n}{\tau T}}$$

倍乘系数

时标信号周期的最小值

时标信号周期的最大值

测频时

当被测频率高于中界频率时，应采用直接测频法测量频率；当被测频率低于中界频率时，应采用测周法测量频率。

