



# 第四章

## 时间和频率的测量

4.1 概述

4.2 时间和频率测量技术简述

4.3 电子计数器

4.4 电子计数器测量频率

4.5 电子计数器测量时间



## 4.1 概述

---

- 时间和频率的基本概念
- 时间和频率基准
- 石英晶体振荡器



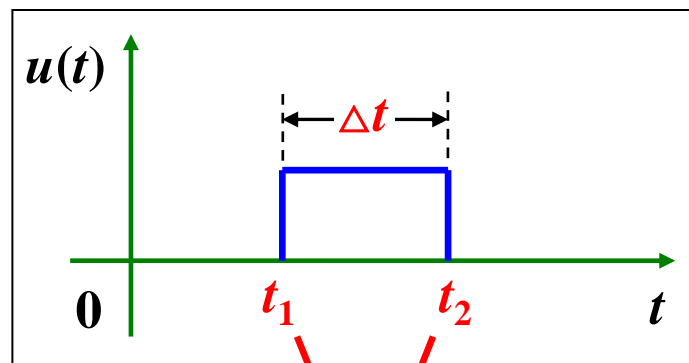
## 4.1.1 时间和频率的基本概念

### 1. 时间的定义

**基本单位：秒 (s)**

**两种概念** { **时刻**  
**时间间隔**

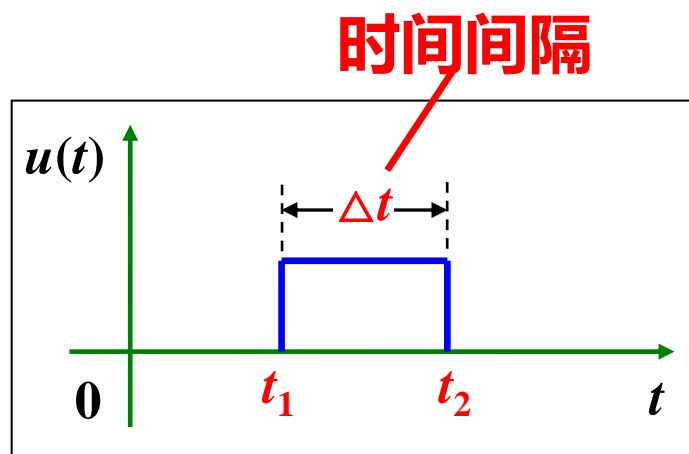
**“时刻”与“时间间隔”，二者的测量方法不同。**



时刻

## ■ 时刻

是指连续流逝的时间中的一个时点，表示某时间或现象何时发生。



## ■ 时间间隔

是指两个时刻之间的间隔，表示某一事件或现象持续多久。

## 2. 周期 (T)

周期现象是指以相等时间间隔重复发生的任何现象。

周期是指周期现象出现一次所经历的时间。

基本单位：秒 (s)



时间和相位关系密切，一个周期的时间间隔对应的相位差为360度，相位的变化可以利用测量时间的方法测量。

### 3. 频率的定义及划分

#### (1) 定义

单位时间内周期性变化或振荡的次数。

$$f = N/T$$

振荡次数

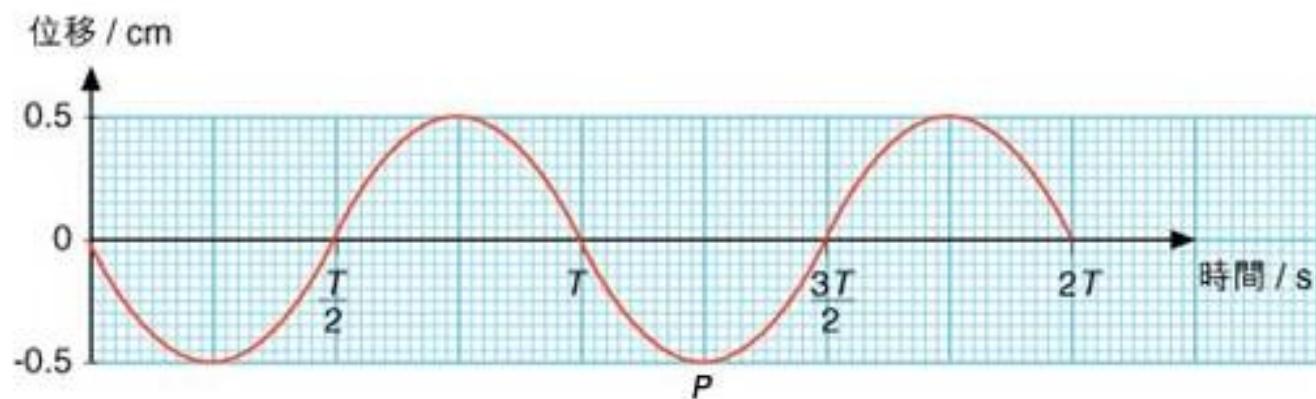
$N$ 次振动所需的时间

基本单位：赫兹 (Hz)



## (2) 频率与周期的关系

$$f \cdot T = 1$$



### (3) 频率划分

国际规定：

段号	频段名称	频段范围	波段名称
1	甚低频 (VLF)	3 ~ 30 (KHz)	甚长波
2	低频 (LF)	30 ~ 300 (KHz)	长波
3	中频 (MF)	300 ~ 3000 (KHz)	中波
4	高频 (HF)	3 ~ 30 (MHz)	短波
5	甚高频 (VHF)	30 ~ 300 (MHz)	米波
6	特高频 (UHF)	300 ~ 3000 (MHz)	分米波
7	超高频 (SHF)	3 ~ 30 (GHz)	厘米波
8	极高频 (EHF)	30 ~ 300 (GHz)	毫米波
9	至高频	300 ~ 3000 (GHz)	丝米波



### (3) 频率划分

电子技术:

- ◆ 音频频率范围 (20Hz~20KHz)

低频段 (30—150HZ) ;

中低频 (150—500HZ) ;

中高频段 (500—5000HZ) ;

高频段 (5000—20kHz) 。



### (3) 频率划分

电子技术:

- ◆ 音频频率范围 (20Hz~20KHz)
- ◆ 视频 (20Hz~10MHz)
- ◆ 射频 (300KHz ~ 300GHz)

可以辐射到空间的电磁频率，是一种高频交流变化电磁波的简称。

## (1) 宏观计时标准

### ① 世界时(UT)

地球自转

### ② 历书时(ET)

地球公转

$\pm 1 \times 10^{-9}$

以**1900年**回归年的 $1/31556925.9747$   
作为**历书秒**。

## (2) 微观计时基准

(原子时)

$\pm 5 \times 10^{-14}$

定义**铯133** ( $\text{Cs}^{133}$ ) 原子基态在二个超精细能级之间跃迁所对应的9192631770个周期的持续时间为1秒。

## (1) 宏观计时标准

① 世界时(UT)

地球自转

② 历书时(ET)

地球公转

$\pm 1 \times 10^{-9}$

(2) 微观计时基准

(原子时)

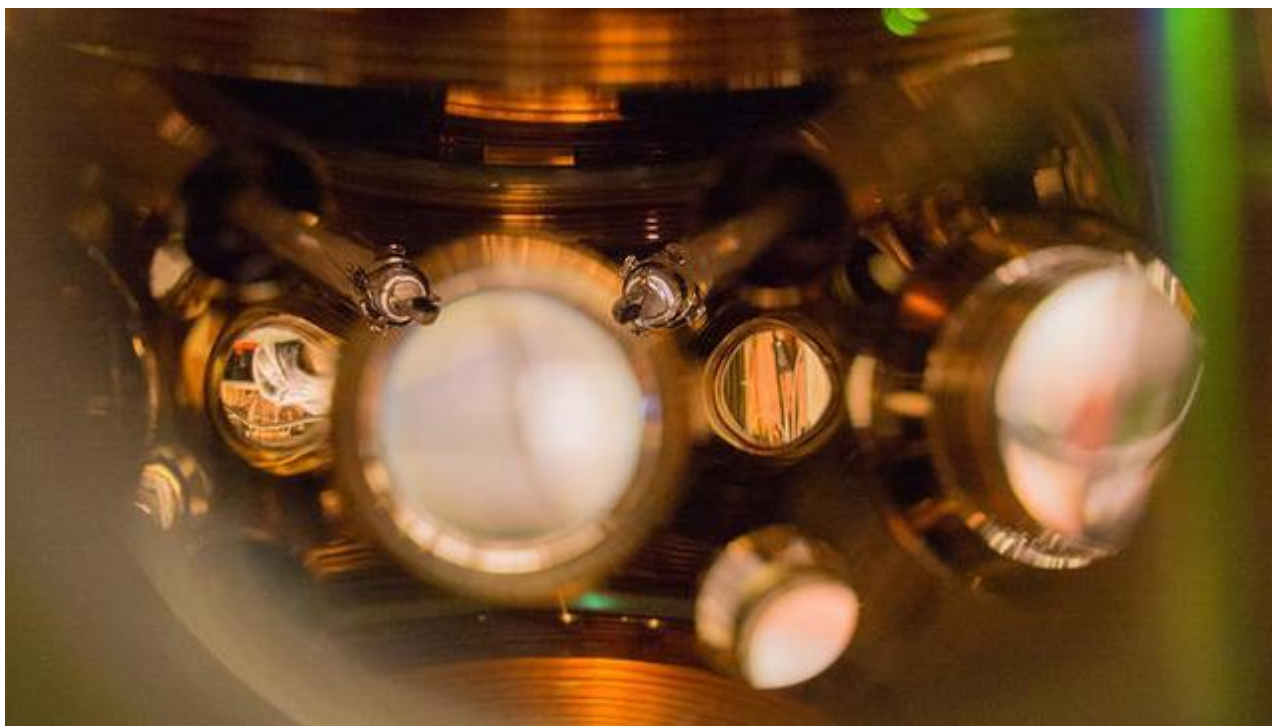
$\pm 5 \times 10^{-14}$

(3) 协调世界时 (UTC)

$\pm 2 \times 10^{-11}$

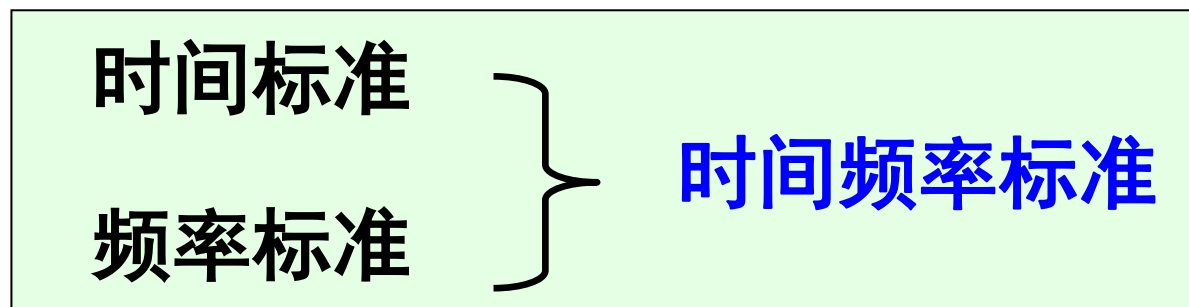
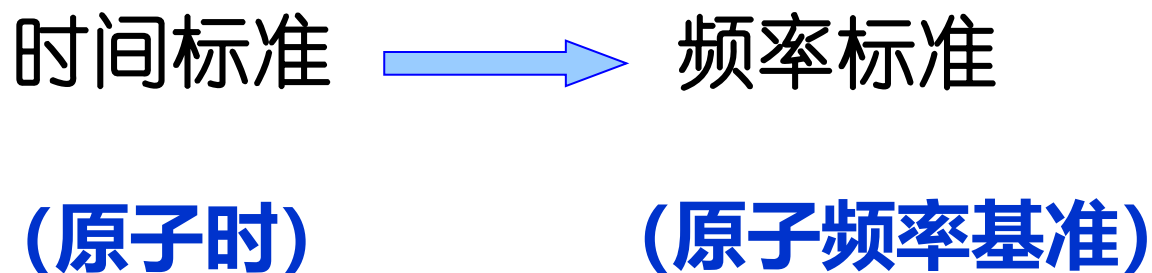
采用原子时修正天文时，是目前国际标准时间。

## 新型光晶格原子钟



精度达一千万亿分之一秒，能够检测精确到2厘米的海拔高度变化。

## 2. 频率标准







## 4.1.3 石英晶体振荡器

- ◆ 机械稳定性和热稳定性高;
- ◆ 振荡频率受外界因素的影响较小;
- ◆ 性能比较稳定;
- ◆ 结构简单, 制造、维护、使用方便,
- ◆ 其准确度也能满足大多数测量的需要

石英频率标准 (次级标准)

$10^{-10}$ 数量级



## 4.2 时间和频率测量

---

### 技术简述

- 直读法
- 比较法
- 计数法

## 4.2.1 直读法

直接利用电路的某种频率响应特性来测量频率值。

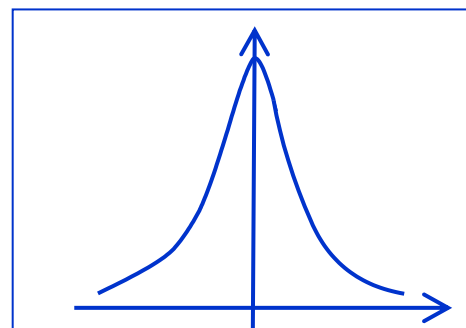
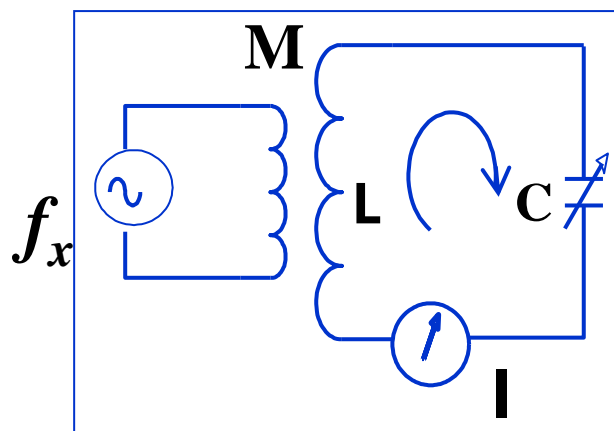
直读法简单，但精度低。

直读法 {  
◆ 谐振法  
◆ 电桥法  
◆ 频率—电压转换法

## ◆ 谐振法

0.25%~1%, 频率粗测

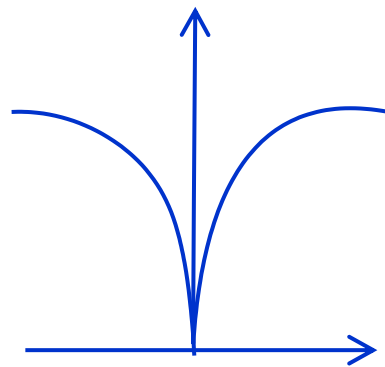
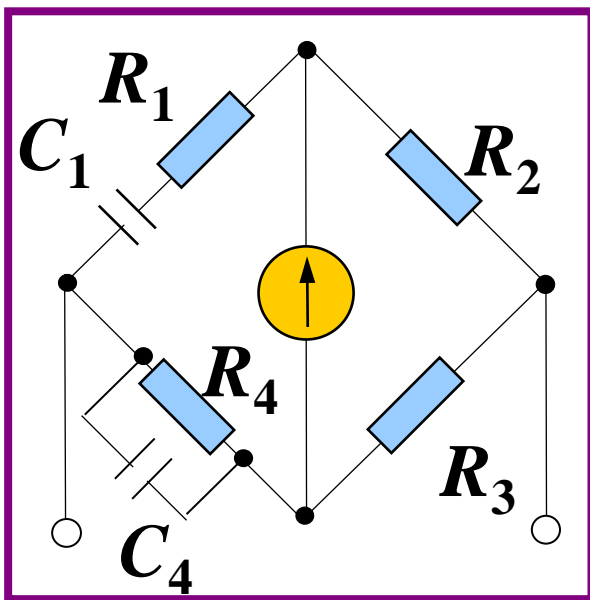
利用电感、电容和电阻串联或并联谐振回路的**谐振特性**。



调节可变电容器C使回路发生谐振，此时回路电流达到最大(高频电压表指示)，则  $f_x = f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ 。

## ◆ 电桥法 0.5%~1%, 10KHz以下的音频

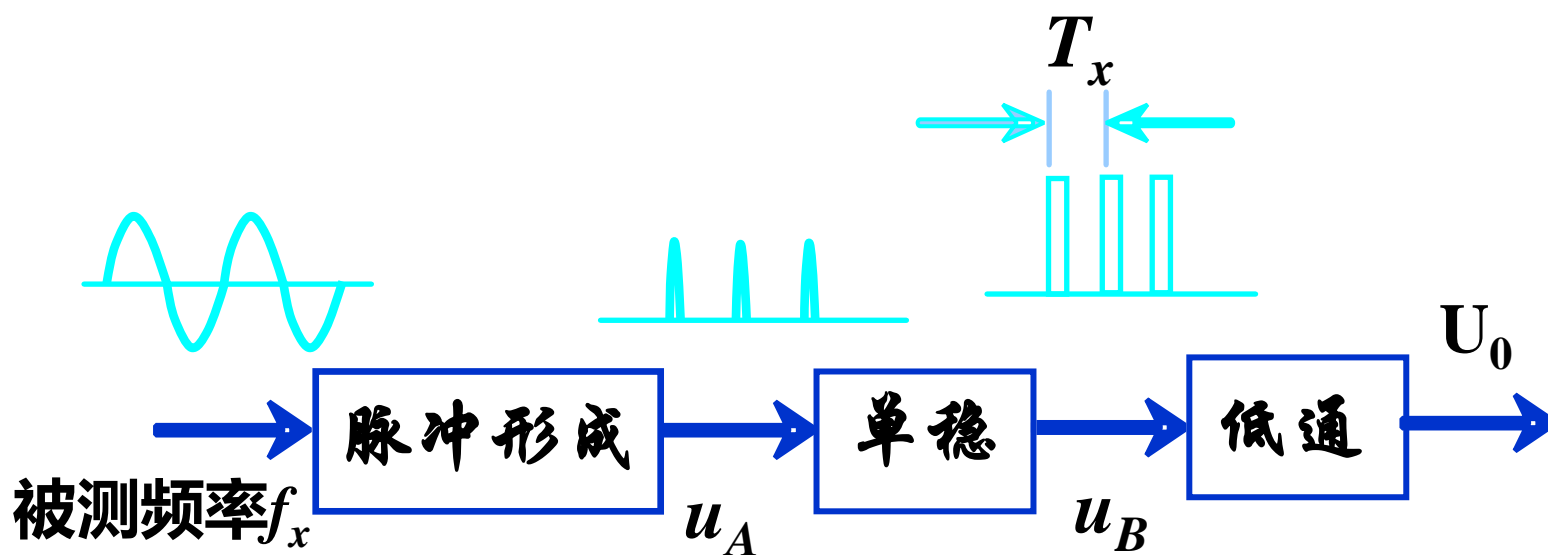
利用电桥的平衡条件与被测信号频率有关的特性。



$$f = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{R_1 R_4 C_1 C_4}}$$

# ◆ 频率—电压转换法 10%, < 几MHz, 连续监视。

频率转换为电压（电流），用以频率刻度的电压表或电流表测量。



## 4.2.2 比较法

将被测频率与**标准频率**进行比较来测量频率的方法。

比较法准确度较高。

比较法 {  
    ◆ 拍频法  
    ◆ 差频法  
    ◆ 示波法

## ◆ 拍频法

0.1~1Hz,适用音频。

将被测正弦信号与**标准频率**的正弦信号经**线性**元件直接进行**叠加**,由指示器(耳机或示波器)指示。

当标准信号频率与被测信号频率**逐渐接近**时,  
耳机:

两个**高低不同**的音调 → 近于**单一**音调

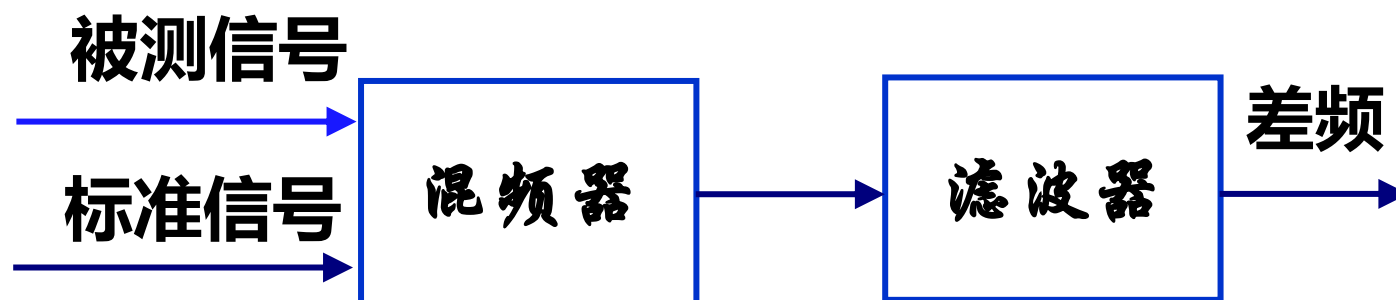
示波器

: 波形幅度趋于一**条直线**。



## ◆ 差频法 $10^{-5}$ ,灵敏度高, 适用微弱信号

利用**非线性**器件和标准信号对被测信号进行**差频**变换来实现频率测量。








调节标准信号频率, 当耳机中**听不到**声音时, 被测频率等于标准信号频率。

## ◆ 示波法

## 李沙育图形法

将  $f_x$  和  $f_s$  分别接到示波器X轴和Y轴 (X-Y图  
示方式) , 当  $f_x = f_s$  时显示为斜线(或椭圆或圆)

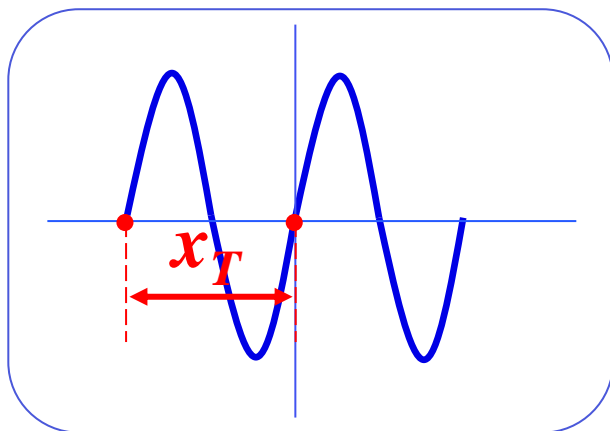
。

$\theta$ $f_x/f_s$	$0^\circ$	$45^\circ$	$90^\circ$	$135^\circ$	$180^\circ$
1:1					

## ◆ 示波法

## 示波器内扫描法

直接根据显示波形由X通道扫描速率得到周期，进而得到频率。



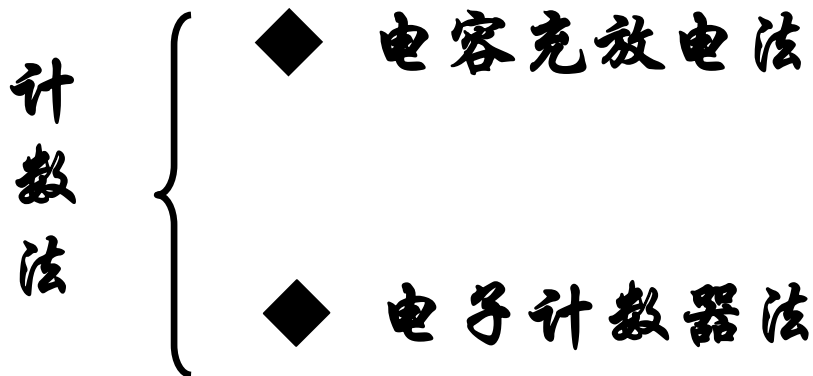
$$T = D_t \cdot x_T$$

$$\Rightarrow f = \frac{1}{T}$$



## 4.2.3计数法

本质上属于比较法。



### ◆ 电容充放电法

利用电子电路控制电容器**充、放电的次数**，再用磁电式仪表测量充、放电的**电流大小**，从而指示出被测信号**频率值**。

### ◆ 电子计数器法

用电子计数器显示**单位时间内**通过被测信号的**周期个数**来实现频率的测量。



- ◆ 各种测量方法有着不同的实现原理，其复杂程度不同。
- ◆ 各种测量方法有着不同的测量准确度和适用的频率范围。
- ◆ 电子计数器法是时间、频率测量的主要方法，是本章的重点。

## 4.3 电子计数器

---

- 发展概述

- 分类

- 性能指标

- 组成



多功能计数器



频率计

函数发生器/计数器



2004/01/01





## 5.4 频率的测量

---

- 电子计数器的测频原理
- 电子计数器测频的最大允许误差分析
- 电子计数器测量频率比

## 4.4.1 电子计数器的测频原理

### 1. 测频原理

电子计数器按照频率的定义实现频率测量。

频率是指单位时间内周期现象重复出现的次数。

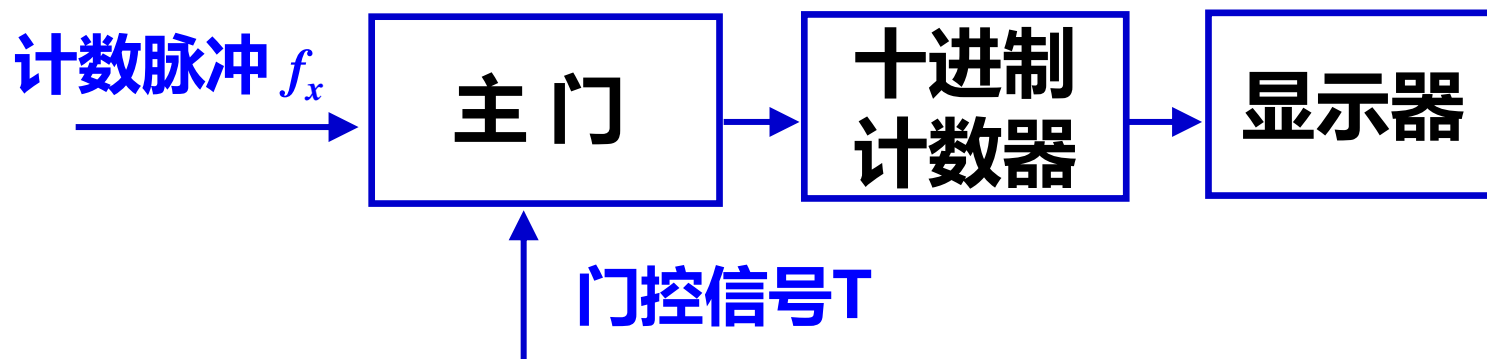
$$f = N/T$$

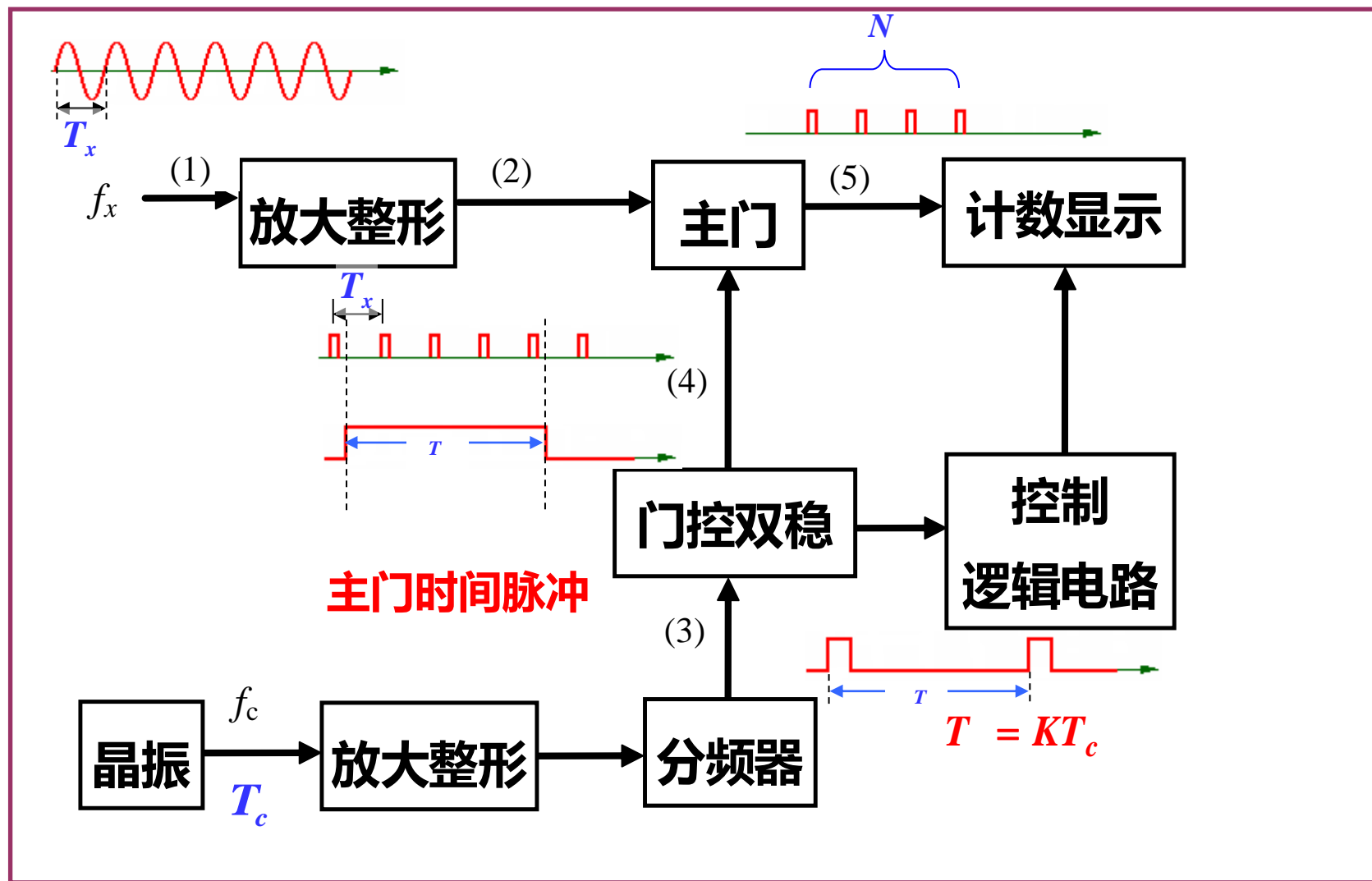
重复出现的次数

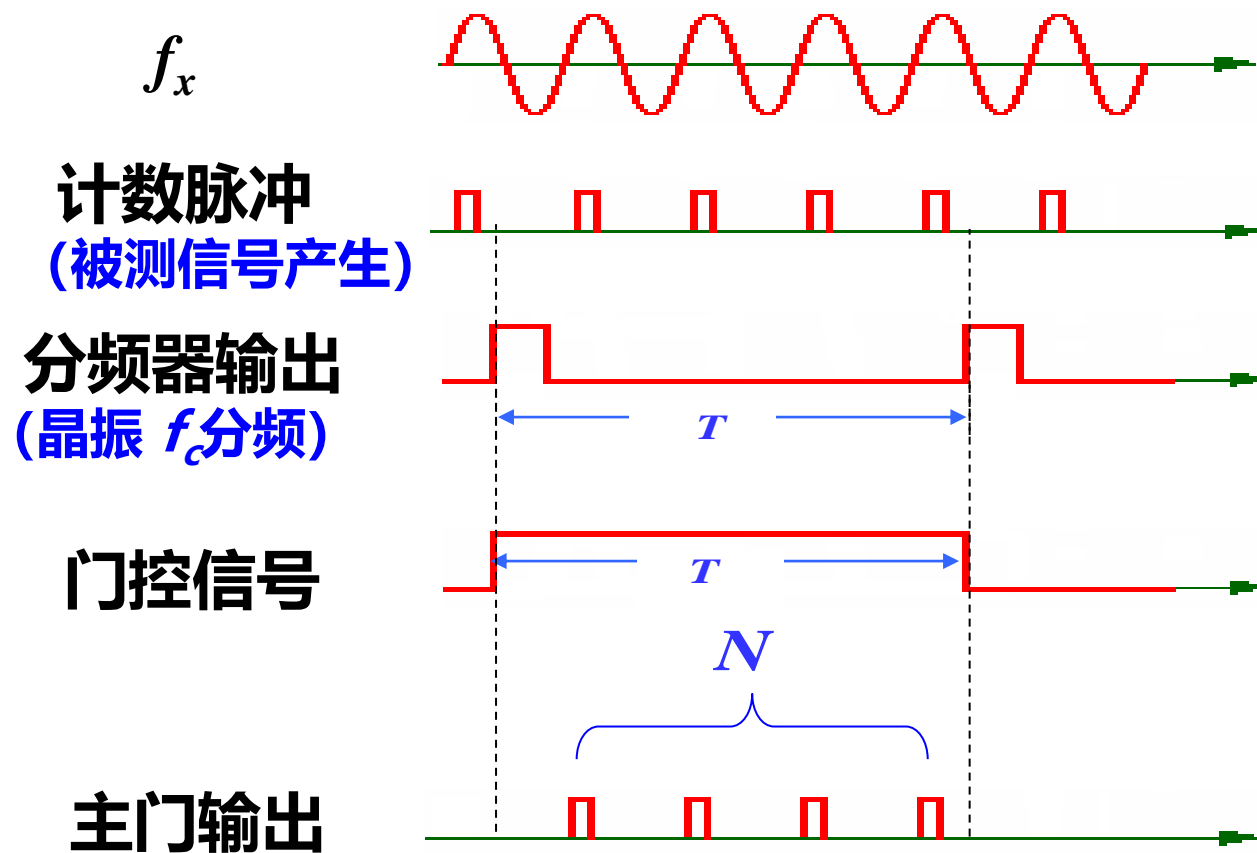
$N$ 次重复所需的时间

## ◆ 测量原理

实际上，测量频率就是把**被测频率  $f_x$**  作为计数用脉冲，对**标准时间  $T$**  进行量化。







$$T = NT_x = N / f_x$$

$$f_x = \frac{N}{\textcircled{T}} = \frac{N}{K\textcircled{T_c}}$$

主门时间                      分频系数                      晶振周期

为便于测量和显示，计数器通常为十进制计数器，多档主门时间设定为10的幂次方，这样可直接显示计数结果N，并通过移动小数点和单位的配合，就可得到被测频率。

有一台6位电子计数器（频率计），单位为KHz，  
设被测频率  $f_x = 100 \text{ KHz}$ 。

$$N = T f_x$$

**主门时间**

$$T = 1\text{s}$$

$$T = 0.1\text{s}$$

$$T = 10\text{ms}$$

**显示器**

100.000 KHz

0100.00 KHz

00100.0 KHz

十进制  
计数值

自动定位  
小数点

**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。



## 4.4.2 电子计数器测频的最大允许误差分析

因为 
$$f_x = \frac{N}{T}$$

所以 
$$\frac{\Delta f_x}{f_x} = \frac{\Delta N}{N} - \frac{\Delta T}{T}$$

按绝对值合成法，考虑最坏情况，则测量频率的最大允许相对误差为：

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

**主门时间  
相对误差**

**量化相对误差**



# 1. 量化相对误差 $\frac{\Delta N}{N}$

## ■ 量化误差 ( $\pm 1$ 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。

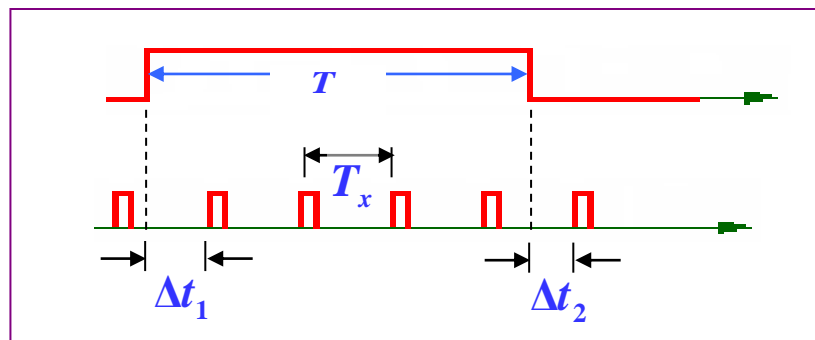
设  $T$  时间内计数值为  $N$ , 则

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

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

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

$$\left. \begin{array}{lll} \Delta t_1 = T_x & \Delta t_2 = 0 & \Delta N = 1 \\ \Delta t_1 = 0 & \Delta t_2 = T_x & \Delta N = -1 \end{array} \right\} \Rightarrow \Delta N = \pm 1$$



## ■ 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，被测信号的频率越高，量化相对误差就越小。



## 2. 主门时间误差（标准频率误差）

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频率的准确度决定。

设晶振频率为  $f_c$ ，分频系数为  $K$ ，则主门时间为：

$$\left. \begin{aligned} T &= KT_c = \frac{K}{f_c} \\ \Delta T &= -\frac{K}{f_c^2} \cdot \Delta f_c \end{aligned} \right\} \rightarrow \frac{\Delta T}{T} = -\frac{\Delta f_c}{f_c}$$

主门时间相对误差在**数值上**等于晶振输出**标准频率**的相对误差，只是**符号相反**。

### 3. 测频最大允许误差

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

#### 减小测频最大允许误差的方法：

■ 可通过提高晶振频率的准确度和稳定度减小主门时间误差，从而提高频率测量的准确度。

■ 可通过扩大主门时间T来减小(量化)误差，从而提高频率测量的准确度。

有一台6位电子计数器（频率计），单位为 KHz，主门时间设置为 1 s。

$f_x$	$N$	$\frac{\Delta N}{N} = \pm \frac{1}{N}$
$f_x = 100 \text{ KHz}$	100000	$\pm 1 \times 10^{-5}$
$f_x = 100 \text{ Hz}$	100	$\pm 1 \times 10^{-2}$
$f_x = 1 \text{ Hz}$	1	$\pm 1$



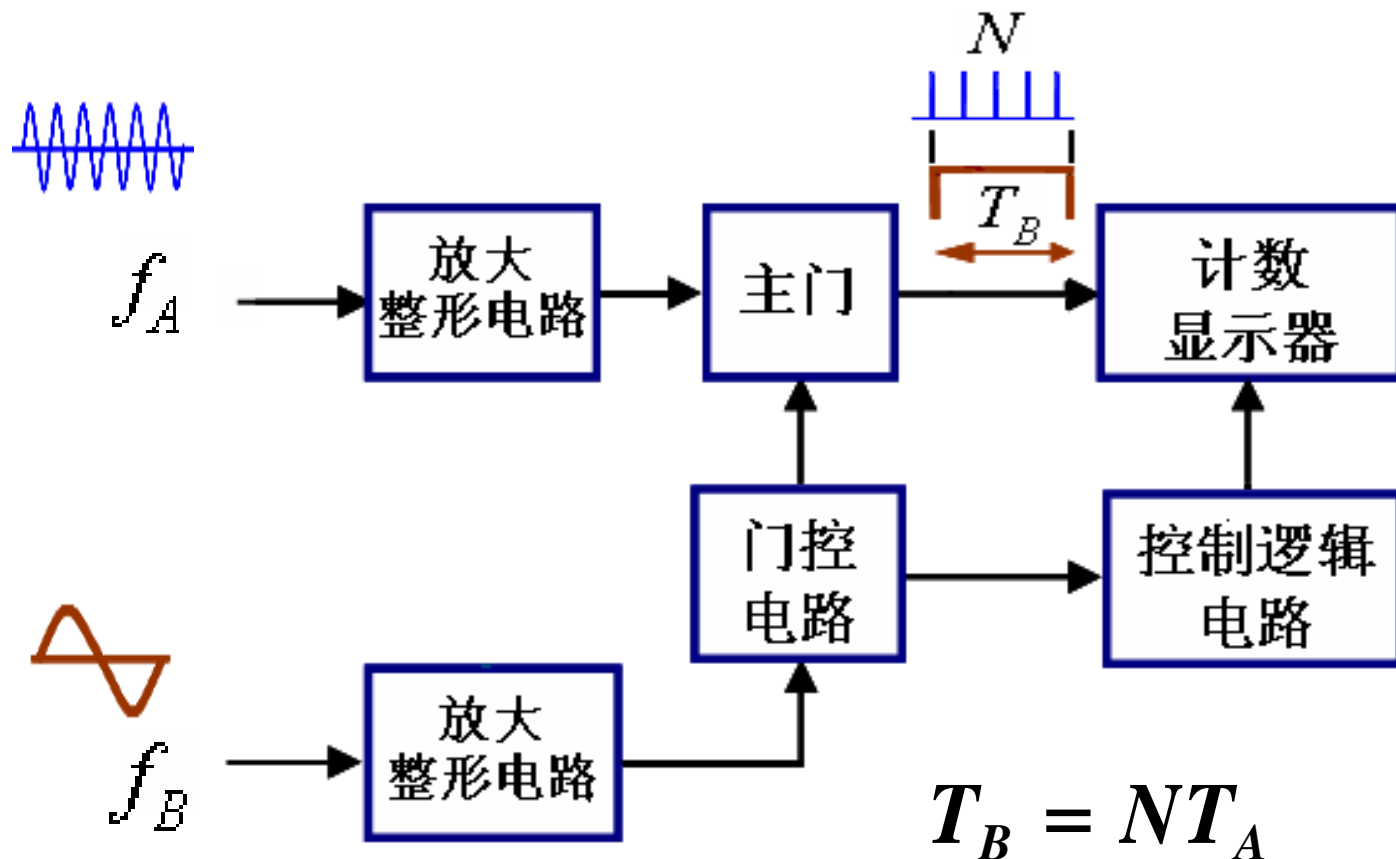
$$\frac{\Delta f_x}{f_x} = \pm \left( \frac{1}{Tf_x} + \left| \frac{\Delta f_c}{f_c} \right| \right)$$

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。



### 4.4.3 电子计数器测量频率比



两个信号的频率比为：

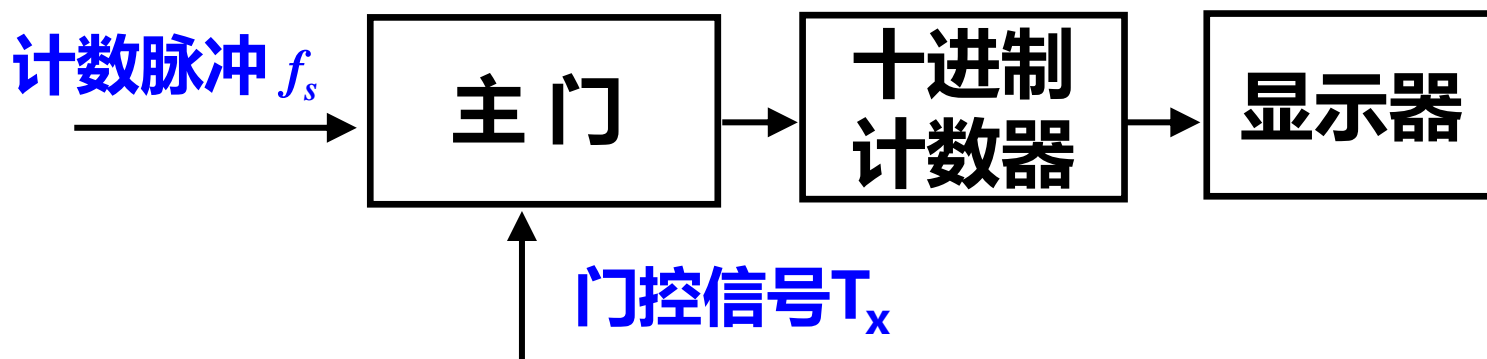
$$\frac{f_A}{f_B} = \frac{T_B}{T_A} = N$$

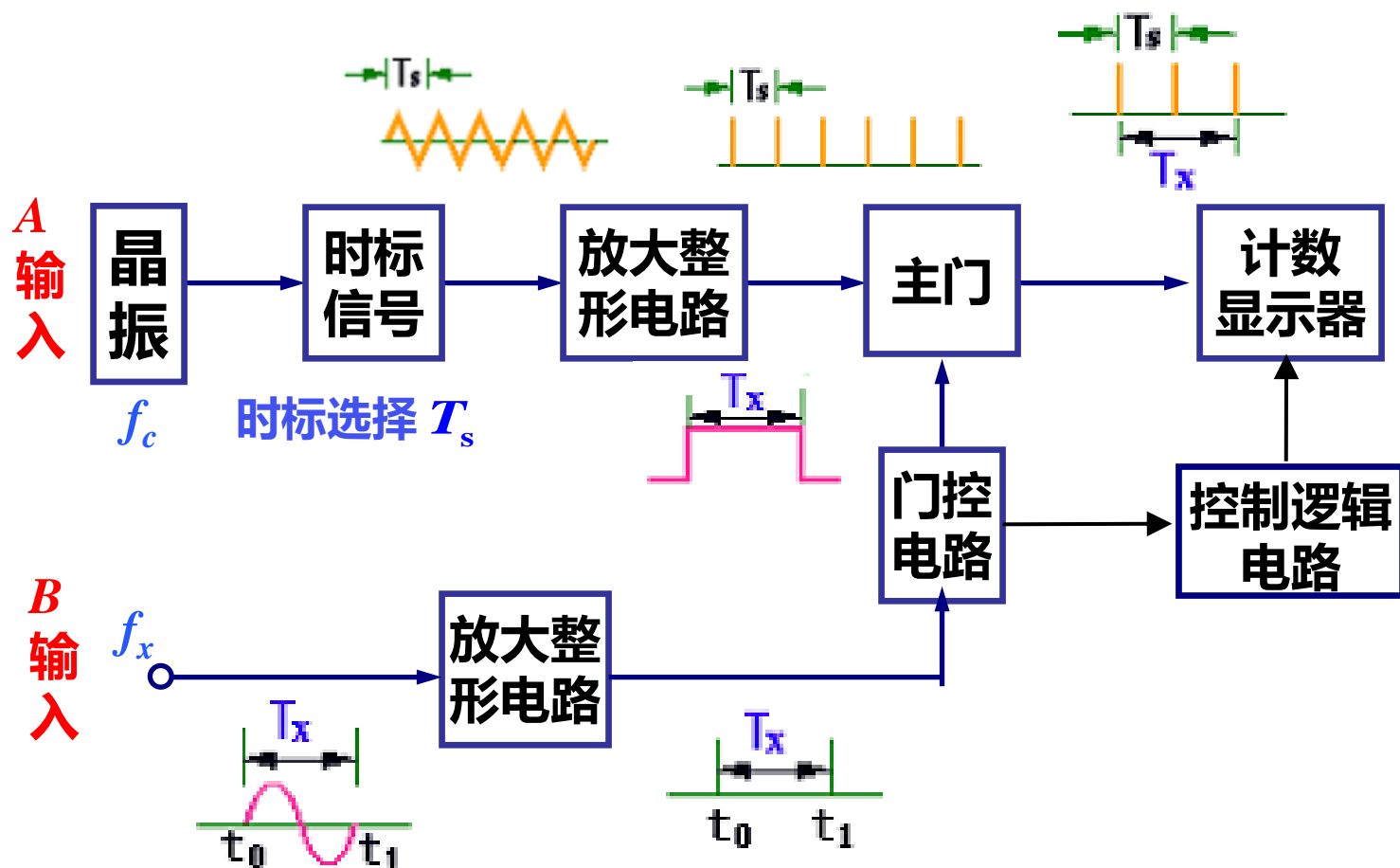
## 4.5 电子计数器测量时间

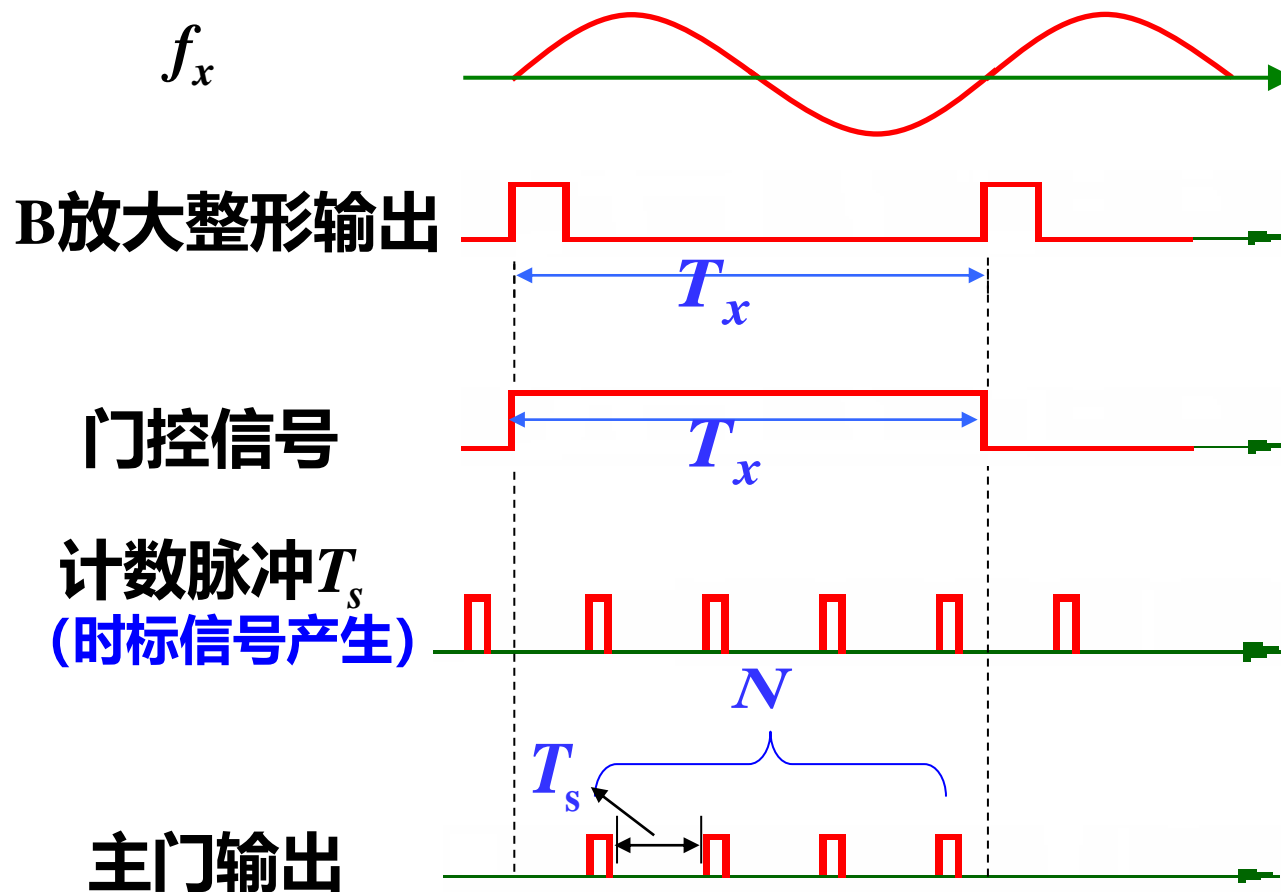
- 电子计数器的测周原理
- 电子计数器测周的最大允许误差分析
- 中界频率
- 时间间隔的测量

## 4.5.1 电子计数器的测周原理

实际上，测量周期就是把时标信号 $f_s$ 作为计数用脉冲，对**被测信号周期 $T_x$** 进行量化。







$$T_x = NT_s$$
$$= NKT_c$$

$$f_x = \frac{1}{T_x}$$

## 4.5.2 电子计数器测周的最大允许误差分析

$$T_x = NT_s \quad \Rightarrow \quad \frac{\Delta T_x}{T_x} = \pm \left( \frac{\Delta N}{N} + \frac{\Delta T_s}{T_s} \right)$$

由于主门信号由被测信号产生，测周误差还包括触发误差，则

量化相对误差

触发相对误差

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

时标信号相对误差

# 1. 量化相对误差

$$\Delta N = \pm 1$$

$$N = \frac{T_x}{T_s} = \frac{T_x}{KT_c} = T_x f_c / K$$

$$\frac{\Delta N}{N} = \pm \frac{K}{T_x f_c}$$

被测信号的周期**愈大**，量化误差对测周误差的影响**愈小**。

## 2. 时标信号相对误差 (标准频率相对误差)

$$T_s = KT_c$$
$$\Delta T_s = K \Delta T_c$$



$$\frac{\Delta T_s}{T_s} = \frac{\Delta T_c}{T_c}$$

$$T_c = \frac{1}{f_c}$$
$$\Delta T_c = -\frac{1}{f_c^2} \Delta f_c$$



$$\frac{\Delta T_c}{T_c} = -\frac{\Delta f_c}{f_c}$$

$$\frac{\Delta T_s}{T_s} = \frac{\Delta T_c}{T_c} = -\frac{\Delta f_c}{f_c}$$

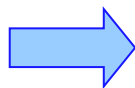


The figure shows a graph with two horizontal axes. The top axis is labeled  $U_B$  and the bottom axis is labeled  $U'_B$ . A yellow curve represents the normalized velocity  $U_B$ , with peaks labeled  $A'_1$ ,  $A_1$ , and  $A_2$ . A white step function represents the normalized temperature  $U'_B$ . The time interval  $T_x$  is marked by a double-headed arrow, and the time interval  $T'_x$  is marked by a red double-headed arrow. The time  $t_1$  is marked by a vertical dashed line. The difference  $\Delta T_1$  is indicated by a vertical arrow.

**极限情况下，开门起点将提前 $\Delta T_1$ ，关门的终点将延迟 $\Delta T_2$ ，或者相反。**

## 叠加的噪声幅值

$$\Delta T_{\text{N}} = \pm \sqrt{\Delta T_1^2 + \Delta T_2^2} = \pm \frac{U_{\text{N}} T_x}{\sqrt{2\pi} U_{\text{m}}}$$



$$\frac{\Delta T_N}{T_x} = \pm \frac{U_N}{\sqrt{2\pi} U_m}$$

## 4.测周的最大允许误差

$$\frac{\Delta N}{N} = \pm \frac{K}{T_x f_c}$$

$$\frac{\Delta T_s}{T_s} = -\frac{\Delta f_c}{f_c}$$

$$\frac{\Delta T_N}{T_x} = \pm \frac{U_N}{\sqrt{2\pi} U_m}$$

采用绝对值合成法，得：

$$\frac{\Delta T_x}{T_x} = \pm \left\{ \frac{K}{T_x f_c} + \left| \frac{\Delta f_c}{f_c} \right| + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \frac{U_N}{U_m} \right\}$$

$$\frac{\Delta T_x}{T_x} = \pm \left\{ \frac{K}{T_x f_c} + \left| \frac{\Delta f_c}{f_c} \right| + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \frac{U_N}{U_m} \right\}$$

减小测周最大允许误差的方法：

- 减小时标信号的周期  $T_s$ ，即减小  $K$  值。
- 提高晶振频率的准确度和稳定度。
- 利用周期倍乘法(将主门时间由  $T_x$  扩大为  $mT_x$ )。

$$\frac{\Delta T_x}{T_x} = \pm \left( \frac{KT_c}{mT_x} + \left| \frac{\Delta f_c}{f_c} \right| + \frac{1}{\sqrt{2m\pi}} \cdot \frac{U_N}{U_m} \right)$$

## 测周的最大允许误差

$$\frac{\Delta T_x}{T_x} = \pm \left\{ \frac{K}{\underbrace{T_x}_{\text{大}} f_c} + \left| \frac{\Delta f_c}{f_c} \right| + \frac{1}{\sqrt{2}\pi} \cdot \frac{U_N}{U_m} \right\}$$

被测信号的周期愈大，测周误差愈小。

- ◆ 周期**较大**的信号，应采用**测周法**测量。
- ◆ 周期**较小**的信号，应采用**测频法**测量。

## 4.5.3 中界频率

测频法  $\frac{\Delta f_x}{f_x} = \pm \left( \frac{1}{T f_x} + \left| \frac{\Delta f_c}{f_c} \right| \right)$

可忽略

测周法  $\frac{\Delta T_x}{T_x} = \pm \left\{ \frac{K}{T_x f_c} + \left| \frac{\Delta f_c}{f_c} \right| + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \frac{U_N}{U_m} \right\}$

测周法  $\frac{\Delta T_x}{T_x} = \pm \left( \frac{K}{T_x f_c} + \left| \frac{\Delta f_c}{f_c} \right| \right)$

忽略触发误差,测频法和测周法测量频率的相对误差相等时的频率称为中界频率。

### 时标信号的最大频率

$$f_{x0} = \sqrt{f_{sf} \times f_{sT}}$$

### 时标信号的最小频率

- ◆ 当 $f_x$ 高于中界频率时,采用测频法测量频率;
- ◆ 当 $f_x$ 低于中界频率时,采用测周法测量频率。

**例：某电子计数器测频时主门的最大开启时间为1秒，测周时时标信号的最高频率为10MHz，若被测信号 $f_x = 1000\text{Hz}$ ，问应采用何种测量方法？**

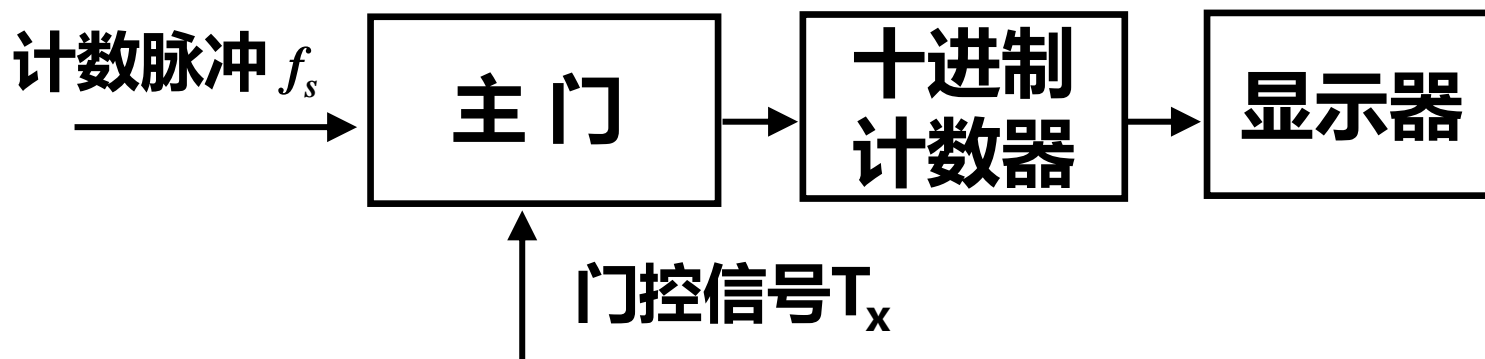
**解： 中界频率为**

$$f_{x0} = \sqrt{f_{sf} \times f_{sT}} = \sqrt{\frac{10 \times 10^6}{1}} = 3160 \text{ (Hz)}$$

**由于1000Hz低于中界频率，故应采用测周法以减小测量误差。**

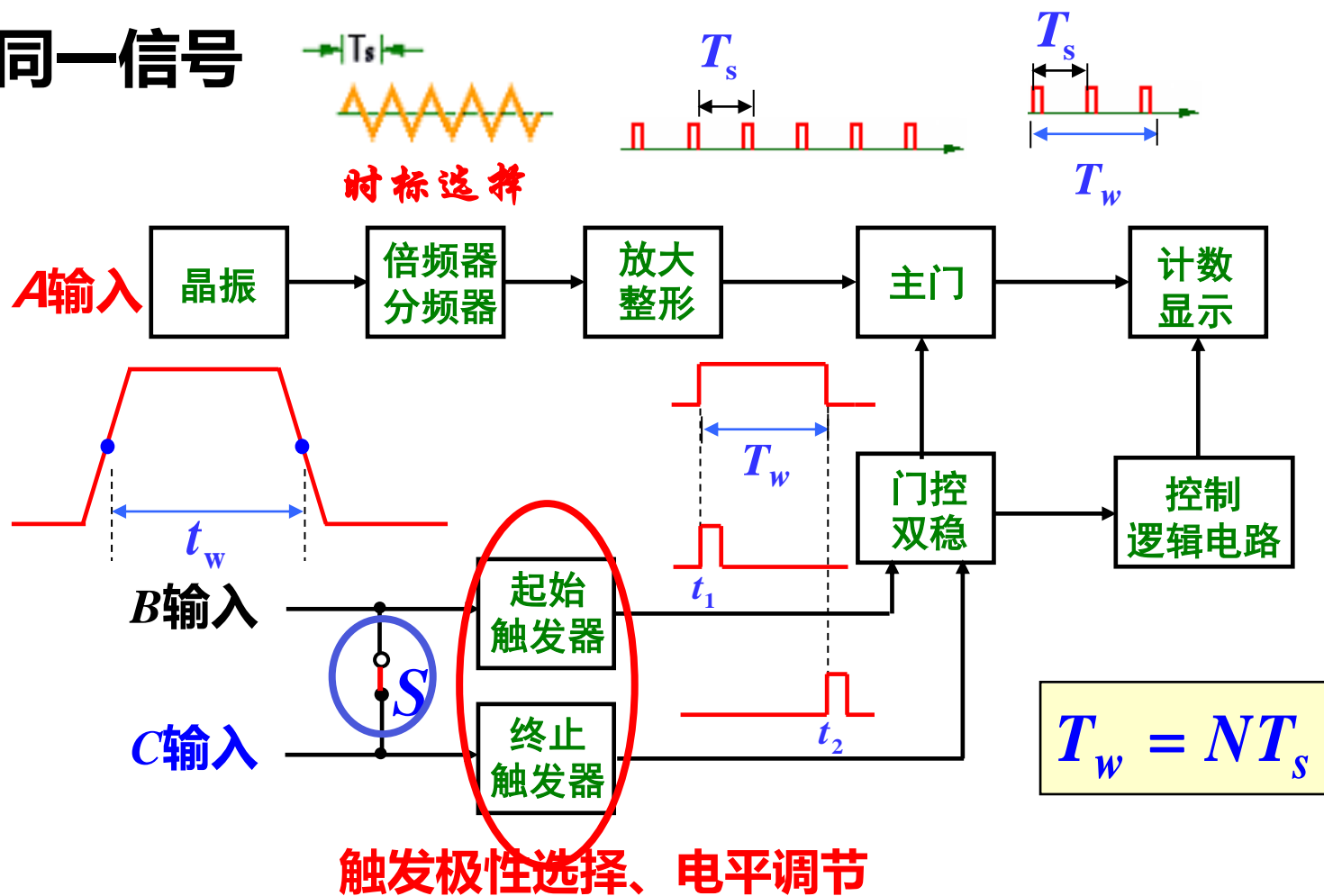
## 5.5.4 时间间隔的测量

实际上，测量时间间隔就是把时标信号  $f_s$  作为计数用脉冲，对被测时间间隔  $T_x$  进行量化。





# 1.同一信号



## 2. 不同信号

