

# 第 4 章 时间与频率的测量

## 4.1 概述

时间和频率是电子技术中两个重要的基本参量，其他许多电参量的测量方案、测量结果都与频率有着十分密切的关系，频率测量系统在通信、导航、空间科学、计量技术等领域有广泛的应用，因此频率的测量是相当重要的。目前，在电子测量中，时间和频率的测量精确度是最高的，在检测技术中，常常将一些非电量或其他电参量转换成频率进行测量。另外，在现代信息传输和处理中，在电磁波频谱资源利用的技术活动中，对频率源的准确度和稳定度提出了越来越高的要求，也大大促进了时间频率测量技术的发展。本章将重点介绍利用电子计数器测量频率、周期和时间间隔的测量方法。此外，还将扼要介绍一些其他测频方法。

### 1. 频率和周期的基本概念

频率定义为相同的现象在单位时间内重复出现的次数。周期则是指出现相同现象的最小时间间隔：

$$f = \frac{N}{T_s} \quad (4.1)$$

式中， $f$ ——频率；

$N$ ——相同的现象重复出现的次数；

$T_s$ ——单位时间。

所谓周期性现象，是指经过一段相等的时间间隔又出现相同状态的现象，在数学上可用一个周期函数来表示所谓的周期性现象：

$$F(t) = F(t + T) = F(t + nT) \quad (4.2)$$

式中， $f$ ——频率，用赫兹（Hz）表示；

$n$ ——正整数，相同的现象重复出现的次数；

$T$ ——周期过程的周期时间。

例如，正弦波是一种典型常见的周期性信号，可表示为：

$$F(t) = \sin(\omega t + \varphi) = \sin(\omega t + \varphi + 2n\pi)$$

对一个周期现象来说，周期和频率都是描述它的重要参数。周期与频率互为倒数关系，只要测出其中一个，便可取倒数而求得另一个，即

$$f = \frac{1}{T} \quad (4.3)$$

式中， $f$ ——频率，用赫兹（Hz）表示；

$T$ ——周期过程的周期时间。

如前所述，秒作为时间的基本单位，是以按规律重复出现的次数为基准确定的。所以

标准时间和标准频率溯源于同一标准，有了时间标准也就有了频率标准。若周期  $T$  的单位是秒，由式 (4.3) 可知频率的单位就是  $1/s$ ，用赫兹 (Hz) 表示。一般情况不用区分时间和频率标准，而统称为时频标准。

## 2. 时间与频率测量的特点

与其他各种物理测量比较，时间与频率测量具有以下特点。

(1) 时频测量具有动态性质。在时刻和时间间隔的测量中，时刻始终在变化，如上一次和下一次所比较的时间间隔已经是不同时刻的时间间隔，频率也是如此，因此在时频的测量中，必须重视信号源和时钟的稳定性及其他一些反映频率和相位随时间变化的技术指标。

(2) 测量精度高。在时频的计量中，由于采用了以“原子秒”和“原子时”定义的量子基准，使得频率测量精度远远高于其他物理量的测量精度。而且对于不同场合的频率测量，测量的精度要求虽然不同，我们都可以找到相应的各种等级的时频标准源。如石英晶体振荡器结构简单、使用方便，其精度在  $10^{-10}$  左右，能够满足大多数电子设备的需要，是一种常用的标准频率源；原子频标的精度可达  $10^{-13}$ ，广泛应用于航天、测控等频率精确度要求较高的区域。

利用时频测量精度高的特点，我们可将其他物理量转换为频率进行测量，使其测量精度得以提高。如数字电压表中双积分式 A/D 变换，就是将电压变成与之成比例的时间间隔进行测量。

(3) 测量范围广。信号可通过电磁波传播，极大地扩大了时间频率的比对和测量范围，例如，GPS 卫星导航系统，可以实现全球范围的、最高准确度的时频比对和测量。

(4) 频率信息的传输和处理比较容易。例如通过倍频、分频、混频和扫频等技术，可以对各种不同频段的频率实施灵活机动的测量。

## 3. 频率测量的基本方法

频率的测量方法按工作原理可分为直接法和比对法两大类。

(1) 直接法。直接法是指直接利用电路的某种频率响应特性来测量频率的方法。电桥法和谐振法是这类测量方法的典型代表。

直接法常常通过数学模型先求出频率表达式，然后利用频率与其他已知参数的关系测量频率。如谐振法测频，就是将被测信号加到谐振电路上，然后根据电路对信号发生谐振时频率与电路的参数关系  $f_x = 1/2\pi\sqrt{LC}$ ，由电路参数  $L$ 、 $C$  的值确定被测频率。

(2) 比对法。比对法是利用标准频率与被测频率进行比较来测量频率的，其测量准确度主要取决于标准频率的准确度，拍频法、外差法及计数器测频法是这类测量方法的典型代表。尤其利用电子计数器测量频率和时间，具有测量精度高、速度快、操作简单、可直接显示数字、便于与计算机结合实现测量过程自动化等优点，是目前最好的测频方法。

## 4.2 电子计数器及其应用

### 4.2.1 电子计数器面板及按键示意图

在时频测量仪器中，通常把数字式测量频率和时间的仪器称为电子计数器或通用计数

器。电子计数器的面板和主要的控制按键如图 4.1 所示。

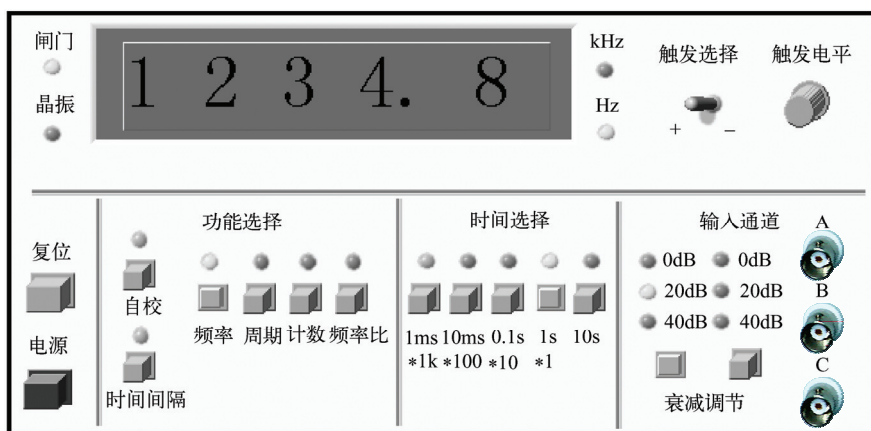


图 4.1 电子计数器的面板和主要控键图

- (1) 功能选择：有 6 个键，分别选择测量频率、测量周期、完成计数、测量频率比、测量时间间隔和自校功能。
- (2) 时间选择：测量频率时，用于选择闸门时间；测量周期时，用于选择周期倍乘。
- (3) 输入通道：具有 A、B、C 三个通道，其中 A、B 通道可对输入信号进行衰减。
- (4) 触发选择：用于选择触发方式。置“+”时，为上升沿触发；置“-”时，为下降沿触发。
- (5) 触发电平：可连续调节触发电平。
- (6) 数码显示器：用于测量值显示，小数点自动定位。

## 4.2.2 电子计数器的主要电路技术

电子计数器一般由输入通道、计数器、逻辑控制、显示器及驱动等电路构成。

### 1. 输入通道

电子计数器一般设置 2~3 个输入通道，记做 A、B、C。A 通道用于测频、自校；B 通道用于测量周期；B、C 通道合起来测时间间隔；A、B 通道合起来测频率比。

A 通道是主通道，频带较宽；B、C 通道是简易通道。A 通道的基本框图如图 4.2 所示，它包括衰减器、放大器、整形器。由于电子计数器的输入信号是多种多样的，有脉冲波、三角波、正弦波、方波等，幅度有大有小，这些波形最后都要转换成计数脉冲。而电子

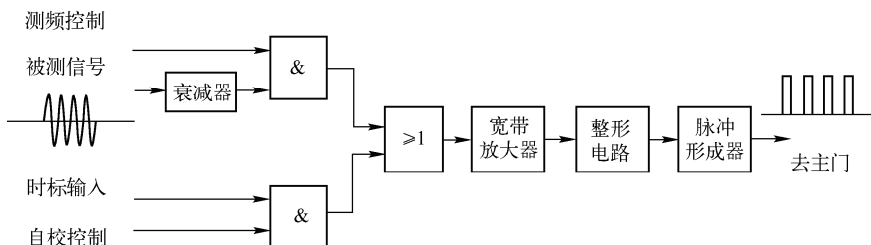


图 4.2 A 通道的基本框图

计数器对计数脉冲的幅度、波形都有一定的要求，所以对被测信号要先进行加工，使其波形和幅度标准化，再进行计数。此外，输入信号可以是被测信号，也可以是自校信号，所以 A 通道一般具有信号选择功能。

A 通道的频率特性决定电子计数器的工作频率范围，因此，在 A 通道中一般都设置了高频补偿电路，使其具有宽带和平坦的响应曲线。

## 2. 计数器

计数器由触发器构成。在数字仪表中，最常用的是按 8421 编码的十进制计数器，来了 10 个脉冲就产生 1 个进位。目前计数器都已集成化，在使用时可当做一个逻辑部件使用。

## 3. 显示与驱动电路

电子计数器以数字方式显示出被测量，目前常用的有 LED 显示器和 LCD 显示器。LED 为数码显示，其优点是工作电压低、能与 COMS、TTL 电路兼容，发光亮度高、响应快、寿命长。LCD 为液晶显示，其突出优点是供电电压低和微功耗，是各类显示器中功耗最低的；同时 LCD 制造工艺简单、体积小而薄，特别适用于小型数字仪表中。

## 4. 逻辑控制电路

逻辑控制电路是由门电路和触发器组成的时序逻辑电路。它产生各种指令信号，如闸门脉冲、闭锁脉冲、显示脉冲、复零脉冲、记忆脉冲等，这些指令控制整机各单元电路的工作，使整机按一定的工作程序完成测量任务。有些控制信号可由其他电路控制，也可手动控制，如时基的选择可通过面板开关进行选择。

### 4.2.3 电子计数器测量频率

#### 1. 测频的基本原理

电子计数器测频是严格按照频率的定义进行的。它在某个已知的标准时间间隔  $T_s$  内，测出被测信号重复的次数  $N$ ，然后由公式  $f = N/T_s$  计算出频率。测量的原理框图如图 4.3 所示。

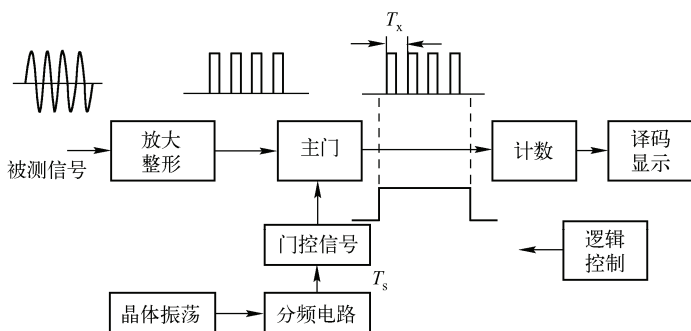


图 4.3 电子计数器测频原理框图

石英晶体振荡器产生高稳定的振荡信号，经分频后产生准确的时间间隔  $T_s$ ，用这个  $T_s$  作为门控信号去控制主门的开启时间。被测信号经过放大整形后，变成方波脉冲，在主门开

启时间  $T_s$  内通过主门，由计数器对通过主门的方波脉冲的个数进行计数，若在时间间隔  $T_s$  内计数值为  $N$ ，则被测信号的频率  $f = N/T_s$ ，由译码显示电路将测量结果显示出来。主要单元电路的工作原理如下。

(1) 输入单元电路。通常由放大、整形电路构成，它将输入频率为  $f_x$  的被测周期性信号放大、整形，变换成计数器能接受的计数脉冲信号，并加到闸门电路的输入端。

(2) 时基  $T_s$  产生电路。时基  $T_s$  产生电路包括石英晶体振荡器、分频器及时基选择电路，用于产生准确的时间间隔  $T_s$ 。晶体振荡器输出频率为  $f_c$ （周期为  $T_c$ ）的正弦信号，经分频、整形得到周期为  $T_s = nT_c$  的窄脉冲，此脉冲触发一个双稳（即门控）电路，从门控电路输出端得到宽度为  $T_s$  的宽脉冲信号。在实际的测量中，门控信号作为时间基准应非常准确，而且电路应简单，运算方便，因此分频后所得时间基准都是 10 的幂次方，如 1ms、10ms、0.1s、1s、10s 等，当改变闸门时间时，显示器上小数点移位也方便。如所用的闸门时间为 1s，计数器计得 42.478 个数，则被测频率为 42.478kHz，小数点定在第三位，当闸门时间变为 0.1s 时，计数值小了 10 倍，而被测频率没有变，所以小数点自动向右移一位，变成 42.478kHz。通过电路上的配合，实现小数点自动定位。

(3) 主门电路。主门电路通常由一个与门（或一个或门）构成。它进行时间或频率的量化比较，完成时间或频率的数字转换。

(4) 计数显示电路。计数显示电路包括多级十进制计数器、寄存器、译码器和数字显示器等，它对主门输出的脉冲个数进行计数，再用数字显示出来。

(5) 逻辑控制电路。逻辑控制电路包括门电路和触发器组成的时序逻辑电路。它产生各种控制信号，如寄存、显示、复位信号等，控制整机各单元电路的工作，使整机按一定的工作程序完成测量任务。

从以上讨论可知，电子计数器的测频原理实质上是以比较法为基础，它将被测信号的频率  $f_x$  和已知的时基信号频率  $f_s$  相比，将相比的结果以数字的形式显示出来。

## 2. 测频方法的误差分析

电子计数器测频是采用间接测量方式进行的，即在某个已知的标准时间间隔  $T_s$  内，测出被测信号重复的次数  $N$ ，然后由公式  $f = N/T_s$  计算出频率。根据误差合成理论，可求得测频的相对误差为：

$$\gamma_f = \frac{\partial \ln f}{\partial N} \Delta N + \frac{\partial \ln f}{\partial T_s} \Delta T_s = \frac{\partial (\ln N - \ln T_s)}{\partial N} \Delta N + \frac{\partial (\ln N - \ln T_s)}{\partial T_s} \Delta T_s = \frac{\Delta N}{N} - \frac{\Delta T_s}{T_s} \quad (4.4)$$

式中， $\gamma_f$  —— 频率测量的相对误差；

$\frac{\Delta N}{N}$  —— 计数的相对误差，也称量化误差；

$\frac{\Delta T_s}{T_s}$  —— 闸门开启时间的相对误差。

可见，电子计数器测频的相对误差由两部分组成。一是计数的相对误差，也叫量化误差；二是闸门开启时间的相对误差。按最坏结果考虑，频率测量的公式误差应是两种误差之和。

(1) 量化误差。利用电子计数器测量频率，测量的实质是在已知的时间  $T_s$  内累计脉冲个数，是一个量化过程。这种计数只能对整数个脉冲进行计数，它不可能测出半个脉冲，即

量化的最小单位是数码的一个字。同时主门的开启时刻与计数脉冲到来时刻是随机、不相干的。因此，即使在相同的主门开启时间  $T_s$  内，计数器对同样的脉冲串计数时，所得的计数值可能不同。例如，某一确定的闸门时间  $T_s$  等于 7.4 个计数脉冲周期，对编号为 1~8 的脉冲串进行计数，由于计数器只能对整数个脉冲进行计数，则实际测量结果可能为 7，也可能为 8，如图 4.4 所示。在图 4.4 (a) 中，闸门在编号为 1 的脉冲通过后开启，则读数为 7，相对于真值 7.4 舍去了 0.4；而在图 4.4 (b) 中，闸门在编号为 1 的脉冲到来时刻同时开启，读数为 8，相对于真值多了 0.6，即把尾数凑成了整数。这种测量误差是所有数字式仪器所固有的，是量化过程带来的误差。量化误差的极限范围是  $\pm 1$  个字，无论计数值是多少，量化误差的最大值都是  $\pm 1$  一个字，也就是说量化误差的绝对误差  $\Delta N \leq \pm 1$ ，所以有时又把这种误差称为“ $\pm 1$  个字误差”，简称“ $\pm 1$  误差”。

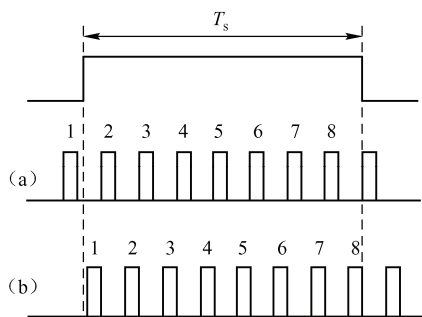


图 4.4 量化误差示意图

量化误差的相对值为：

$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{\pm 1}{N} = \pm \frac{1}{f_x \cdot T_s} \quad (4.5)$$

式中， $\frac{\Delta N}{N}$ ——量化误差的相对值，即计数的相对误差；

$f_x$ ——被测信号的频率；

$T_s$ ——选定的主门开启时间。

由式 (4.5) 可以看出：被测值的读数  $N$  不同时，对量化误差的影响是不同的，增大  $N$  能够减小量化误差。也就是说，当被测信号频率一定时，主门开启时间越长，量化的相对误差就越小；当主门开启时间一定时，提高被测信号的频率，也可减小量化误差的影响。

**例 4.1** 被测信号的频率  $f_{x1}=100\text{Hz}$ 、 $f_{x2}=1000\text{Hz}$ ，闸门时间分别设定为 1s、10s，试分别计算量化误差。

**解：**① 若  $f_{x1}=100\text{Hz}$ 、 $T=1\text{s}$ ，则量化误差的相对值为：

$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{\pm 1}{N} = \pm \frac{1}{f_x \cdot T_s} = \pm \frac{1}{100 \times 1} = \pm 1\%$$

② 若  $f_{x2}=1000\text{Hz}$ 、 $T=1\text{s}$ ，则量化误差的相对值为：

$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{\pm 1}{N} = \pm \frac{1}{f_x \cdot T_s} = \pm \frac{1}{1000 \times 1} = \pm 0.1\%$$

由①、②的计算结果可以看出，同样的闸门时间，频率越高，测量越准确。

③ 若  $f_{x1}=100\text{Hz}$ 、 $T=10\text{s}$ ，则量化误差的相对值为：

$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{\pm 1}{N} = \pm \frac{1}{f_x \cdot T_s} = \pm \frac{1}{100 \times 10} = \pm 0.1\%$$

由①、③的计算结果可以看出，输入同样的频率，选取的闸门时间越长，测量结果的量化误差越小。

④ 若  $f_{x2}=1000\text{Hz}$ 、 $T=10\text{s}$ ，则量化误差的相对值为：

$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{\pm 1}{N} = \pm \frac{1}{f_x \cdot T_s} = \pm \frac{1}{1000 \times 10} = \pm 0.01\%$$

由④的计算结果可以看出,提高被测信号的频率,或增大主门开启时间,都可降低量化误差的影响。

(2) 闸门开启时间的误差。如前所述,电子计数器测频的相对误差由两部分组成,一是计数的量化误差,二是闸门开启时间的相对误差。而闸门时间准确与否,取决于石英晶体振荡器的频率稳定度、准确度,也取决于分频电路和开关的速度及其稳定性。在尽量排除了电路和闸门开关速度的影响后,闸门开启时间的误差主要由晶振的频率误差引起。设晶振频率为 $f_c$ (周期为 $T_c$ )、分频系数为常数 $k$ ,则

$$T_s = \frac{1}{f_s} = \frac{k}{f_c} \quad (4.6)$$

式中, $k$ ——分频系数;

$f_c$ ——标准频率。

由第2章式(2.14)可求得闸门时间的相对误差为:

$$\frac{\Delta T_s}{T_s} = \frac{\partial \ln T_s}{\partial k} \Delta k + \frac{\partial \ln T_s}{\partial f_c} \Delta f_c = \frac{\partial (\ln k - \ln f_c)}{\partial k} \Delta k + \frac{\partial (\ln k - \ln f_c)}{\partial f_c} \Delta f_c = -\frac{\Delta f_c}{f_c} \quad (4.7)$$

式中, $\frac{\Delta T_s}{T_s}$ ——闸门时间的相对误差;

$\frac{\Delta f_c}{f_c}$ ——标准频率误差。

由式(4.7)可知,闸门时间相对误差在数值上与晶振频率的相对误差相等。

(3) 测频公式误差。将式(4.5)、式(4.7)代入式(4.4)得出测频的公式误差为

$$\gamma_f = \frac{\Delta f_x}{f_x} = \pm \frac{1}{f_x \cdot T_s} + \frac{\Delta f_c}{f_c}$$

由于 $\Delta f_c$ 的符号可正可负,若按最坏情况考虑,可得电子计数器测量频率的最大相对误差计算公式为:

$$\gamma_f = \frac{\Delta f_x}{f_x} = \pm \left( \frac{1}{f_x \cdot T_s} + \left| \frac{\Delta f_c}{f_c} \right| \right) \quad (4.8)$$

(4) 测频计数误差。前面讨论的是测频的系统误差,实际上输入信号受到噪声干扰,还会产生噪声干扰误差,这是一种随机误差,也称为计数误差。

计数误差是指在测量频率时,由于被测信号中的干扰噪声影响,使输入信号经触发器整形后,形成的计数脉冲发生错误而产生的误差,如图4.5(a)、(b)所示。

施密特触发器有两个门坎电平,在图4.5(a)中,无噪声干扰,正弦信号上升到上门坎电平时,触发器翻转,其输出从低电平跳变到高电平,电路进入一个稳态;当正弦信号下降到下门坎电平时,触发器翻转,其输出从高电平跳变到低电平,电路进入另一个稳态。输出脉冲的重复周期 $T_{x2}$ 等于输入的被测正弦信号的周期 $T_{x1}$ ,脉冲宽度为一定值。图(b)中,被测信号上叠加了较大的噪声干扰,由于被测信号多次达到比较电平,用于整形的施密特触发器将多次触发,即产生额外的触发,如 $T_{x3}$ 中的起始部分就包含了一个脉冲,此时, $T_{x3} \neq T_{x1}$ ,计数器就会产生额外的计数。由图可以看出,计数误差与被测信号的信噪比有关,信噪比越高,施密特触

发器被误触发的可能性越小，则计数误差越小。为了消除噪声干扰引起的计数误差，可将信号通道的增益调小，这样叠加在信号上的噪声幅度也同时减小，从而减少了额外的触发。另外，正确选择触发电平，避免波动最频繁点，也可消除噪声干扰引起的计数误差。

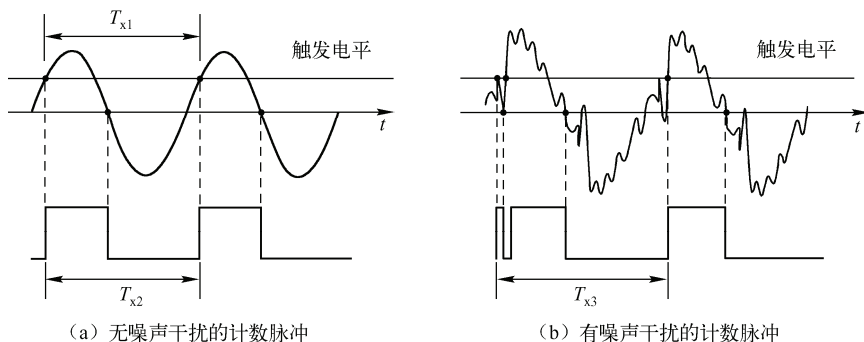


图 4.5 噪声干扰引起的计数误差

(5) 结论。客观上，任何测量都存在测量误差。我们进行误差分析的目的，就是要找出引起测量误差的主要原因，从而采取有效的措施，减小测量误差，提高测量的准确度。通过以上分析可知，利用电子计数器测量频率时要提高频率测量的准确度（减小测量误差）可采取如下措施：

- ① 选择准确度和稳定度高的晶振作为时标信号发生器，以减小闸门时间误差。
- ② 在不使计数器产生溢出的前提下，加大分频器的分频系数  $k$ ，扩大主门的开启时间  $T_s$ ，以减小量化误差的影响。
- ③ 当被测信号频率较低时，用测频方法测得的频率误差较大，应选用其他方法进行测量。
- ④ 对随机的计数误差，可通过提高信噪比或调小通道增益来减小误差程度。

## 4.2.4 电子计数器测量周期

### 1. 测量周期的基本原理

周期是频率的倒数，因此周期测量与频率测量采用的时标和时基信号正好相反。电子计数器测量周期的原理框图如图 4.6 所示。电路构成与测频电路类似，包括输入整形电路，时标、时基产生电路，主门电路，计数显示及逻辑控制电路等。

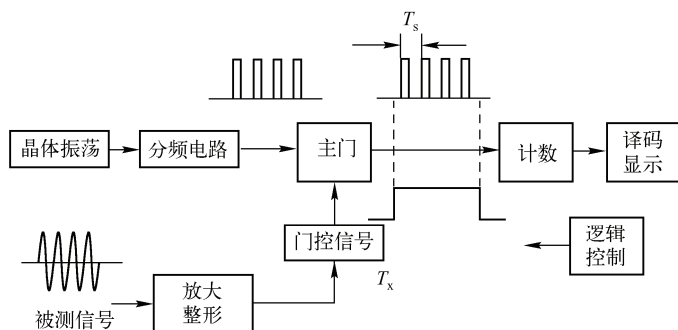


图 4.6 电子计数器测量周期的基本原理框图



测量周期时，被测信号放大整形为方波脉冲，形成时基，控制闸门，使主门开放的时间等于被测信号周期  $T_x$ ；晶体振荡器产生标准振荡信号  $f_c$ ，经  $k$  分频输出频率为  $f_s$ 、周期为  $T_s$  的时标脉冲；时标脉冲在主门开放时间进入计数器，计数器对通过主门的脉冲个数进行计数，若计数值为  $N$ ，则

$$T_x = NT_s \quad (4.9)$$

式中， $N$ ——通过主门的脉冲个数；

$T_x$ ——被测信号的周期；

$T_s$ ——标准晶振分频后形成的时标的周期。

$$f_s = \frac{f_c}{k}, \quad T_s = \frac{k}{f_c} \quad (4.10)$$

式中， $k$ ——分频系数；

$f_c$ ——标准晶振的振荡频率；

$f_s$ ——标准晶振分频后的频率；

$T_s$ ——标准晶振分频后形成的时标的周期。

从以上分析可知，计数器测量周期的基本原理与测频类似，也是一种比较测量方法，只不过它采用的时基和时标信号均与测频方法相反，它是用被测信号控制主门的开门，用标准时标脉冲进行计数的。

## 2. 测量周期方法的误差分析

(1) 公式误差。电子计数器测量周期也是采用间接测量方式进行的，即在未知的时间间隔  $T_x$  内，测出标准信号脉冲通过的个数  $N$ ，然后由公式  $T_x = NT_s$  计算出被测信号的周期频率。根据误差合成理论，可求得测量周期的相对误差为：

$$\gamma_T = \frac{\partial \ln T_x}{\partial N} \Delta N + \frac{\partial \ln T_x}{\partial T_s} \Delta T_s = \frac{\partial (\ln N + \ln T_s)}{\partial N} \Delta N + \frac{\partial (\ln N + \ln T_s)}{\partial T_s} \Delta T_s = \frac{\Delta N}{N} + \frac{\Delta T_s}{T_s} \quad (4.11)$$

与测量频率误差的分析类似，测量周期误差也由两项组成，一是量化误差，二是时标信号相对误差。将式 (4.10) 代入式 (4.9) 得：

$$N = \frac{T_x}{T_s} = \frac{T_x}{kT_c} = \frac{T_x f_c}{k}$$

而  $\Delta N = \pm 1$ ，所以

$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{\pm 1}{N} = \pm \frac{k}{T_x f_c}$$

$$\frac{\Delta T_s}{T_s} = \pm \frac{\Delta \frac{k}{f_c}}{\frac{k}{f_c}} = \pm \frac{\Delta f_c}{f_c}$$

按最坏结果考虑，周期测量总的系统误差应是两种误差之和：

$$\gamma_T = \pm \left( \frac{k}{T_x f_c} + \left| \frac{\Delta f_c}{f_c} \right| \right) \quad (4.12)$$

(2) 触发误差。前面讨论的是测量周期的系统误差，与测量频率类似，输入信号受到

噪声干扰,也会产生噪声干扰误差,这是一种随机误差,也称为触发误差。触发误差是指在测量周期时,由于输入信号受噪声影响,经触发器整形后形成的门控脉冲时间间隔与信号的周期产生了差异而形成的误差。

因为一般门电路采用过零触发,可以证明触发误差可按式(4.13)近似表示:

$$\frac{\Delta T_n}{T_x} = \pm \frac{1}{\sqrt{2\pi k}} \cdot \frac{V_n}{V_m} = \pm \frac{1}{\sqrt{2\pi k M}} \quad (4.13)$$

式中,  $k$ ——分频系数;

$\frac{\Delta T_n}{T_x}$ ——干扰信号引起的主门开启时间误差;

$M$ ——信噪比,其中  $M = \frac{V_m}{V_n}$ 。

(3) 结论。电子计数器测量周期的总误差可修正为下式:

$$\gamma_T = \frac{\Delta T_x}{T_x} = \pm \left( \frac{k}{T_x f_c} + \left| \frac{\Delta f_c}{f_c} \right| + \frac{1}{\sqrt{2\pi k M}} \right) \quad (4.14)$$

很明显,  $T_x$  越大(即被测频率越低),  $\pm 1$  误差对测量周期精确度影响越小。也就是说,当被测信号的频率较低时,采用测量周期法可提高测量的精度。

当  $T_c$  为一定值时,显示值  $N$  可直接表示出  $T_x$  的大小。如  $N=10000$ ,选择时标为  $10\mu s$ ,则  $T_x = NT_c = 10000 \times 10 = 100000\mu s$ ,如显示器以  $ms$  为单位,则从显示器上可读得  $100.000ms$ 。在实际的电子计数器中,  $T_c$  可以根据需要有若干种数值,用开关进行选择,显示器能自动显示被测周期的时间单位和小数点的位置。

触发误差与被测信号的信噪比有关,信噪比越高,触发误差越小,测量越准确。

## 4.2.5 电子计数器的累加计数和计时

累加计数是电子计数器最基本的功能,累加在一定时间内被测信号的脉冲个数,测量原理的框图如图 4.7 所示。被测信号从 A 通道输入,经放大整形为脉冲序列,即时标;门控双稳输出闸门信号,即时基;时基信号打开闸门,通过的时标由计数器计数并显示,显示结果  $N$  即为计数值。

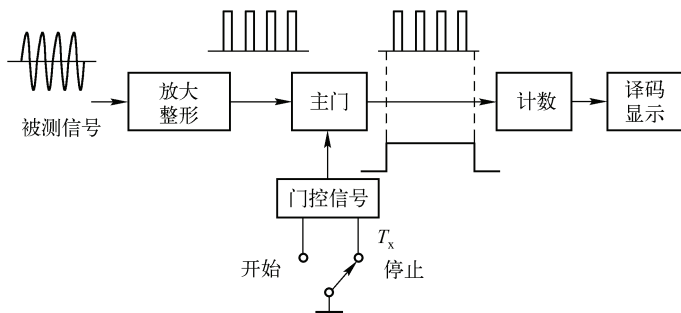


图 4.7 累加计数和计时的原理框图

由于在累加计数和计时中所选的测量时间往往较长,例如几个小时,因而对控制门的开关速度要求不高,主门的开、关除了本地手控外,也可以远程程控。

若 A 通道加入的是标准时钟信号，则计数器累计的是开门所经历的时间，这是计时的功能。电子计数器计时精确，可用于工业生产的定时控制。若时标为  $T_c$ ，计数器显示的值为  $N$ ，则计时值  $T=NT_c$ 。

## 4.2.6 电子计数器测量频率比

频率比是指两路信号源的频率的比值。测量原理框图如图 4.8 所示。选择频率高的信号加到 A 通道形成时标  $T_A$ ，频率低的信号加到 B 通道形成时基  $T_B$ ，在闸门时间  $T_B$  内对时标  $T_A$  进行计数，计数器显示的读数值  $N = \frac{T_B}{T_A} = \frac{f_A}{f_B}$  就是两信号的频率比。

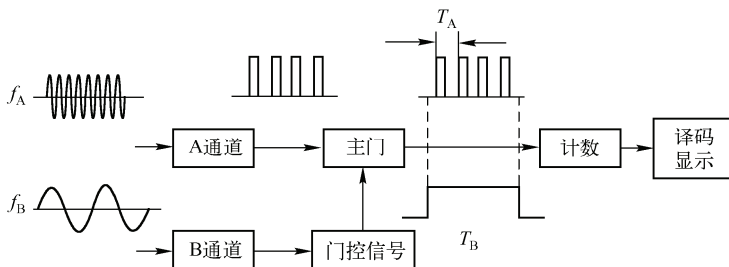


图 4.8 频率比测量的原理框图

## 4.2.7 电子计数器测量时间间隔

### 1. 测量时间间隔的基本原理

时间间隔的测量实际上也是测量信号的时间，因此与测量周期原理一样，其基本逻辑和测量周期类似。测量原理的框图如图 4.9 所示。

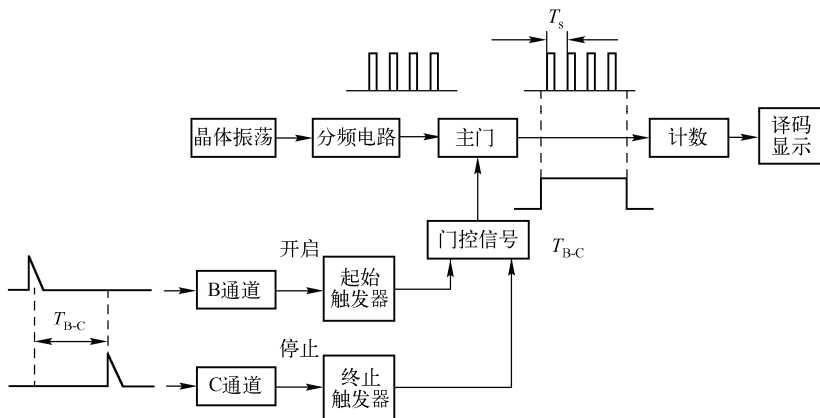


图 4.9 时间间隔测量的原理框图

输入通道 B 的信号作为起始信号，用来开启闸门；输入通道 C 的信号作为终止信号，用来关闭闸门。这样 B、C 两信号的时间间隔  $T_{B-C}$  决定了主门的开门时间，在开门时间  $T_{B-C}$  内对输入 A 通道的周期为  $T_s$  的时标进行计数，若计数值为  $N$ ，则

$$T_{B-C} = NT_s \quad (4.15)$$

式中,  $N$ ——计数器的计数值;

$T_{B-C}$ ——被测信号的时间间隔;

$T_s$ ——标准晶振分频后形成的时标的周期。

为了增加测量的灵活性, B、C 两个通道内分别备有极性选择和电平调节电路。通过触发极性和触发电平的选择, 可以选取两个输入信号的上升沿或下降沿上的某电平点, 作为时间间隔的起点和终点, 因而可以测量两个输入信号任意两点之间的时间间隔。

## 2. 相位差的测量

相位差的测量通常是指两个同频率的信号之间的相位差的测量。相位差的测量是时间间隔测量的一个应用例子。如图 4.10 所示的相位差测量, 测量的是两个正弦波上两个相应点之间的时间间隔。

为易于观察, 将被测信号  $u_1$ 、 $u_2$  分别送入过零比较器, 当信号由负到正通过零点时, 产生一个脉冲。由于输入为  $u_1$ 、 $u_2$  两路信号, 产生两个脉冲,  $u_1$  领先于  $u_2$ , 将  $u_1$  产生的脉冲作为开门信号,  $u_2$

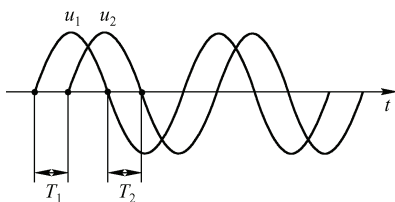


图 4.10 相位差的测量波形图

产生的脉冲作为关门信号, 开关门信号形成时间间隔为  $T_1$  的矩形脉冲作为时基信号。在开门时间  $T_1$  内对输入 A 通道的周期为  $T_s$  的时标进行计数, 若计数值为  $N$ , 则  $T_1 = NT_s$ , 由图 4.10 可知,  $u_1$  与  $u_2$  的相位差为  $\varphi$ :

$$\varphi = \frac{T_1}{T_x} \times 360^\circ = \frac{NT_s}{T_x} \times 360^\circ = \frac{Nf_x}{f_s} \times 360^\circ \quad (4.16)$$

式中,  $N$ ——计数器的计数值;

$T_x$ ——被测信号的周期;

$T_s$ ——标准晶振分频后形成的时标周期。

为了减小测量误差, 可利用两个通道的触发源选择开关, 第一次设置为“+”, 信号由负到正通过零点, 测得  $T_1$ ; 第二次设置为“-”, 信号由正到负通过零点, 测得  $T_2$ 。两次测量结果取平均值

$$T = \frac{T_1 + T_2}{2}$$

于是相位差为:

$$\varphi = \frac{T}{T_x} \times 360^\circ \quad (4.17)$$

式中,  $\varphi$ ——被测信号的相位差;

$T_x$ ——被测信号的周期;

$T$ ——正弦波上两个相应点之间时间间隔的平均值。

### 4.2.8 电子计数器的自校

在使用电子计数器测量前, 应对电子计数器进行自校检验, 一是检验电子计数器的逻

辑关系是否正常；二是检验电子计数器能否准确地进行定量测试。自校检验的框图如图 4.11 所示。

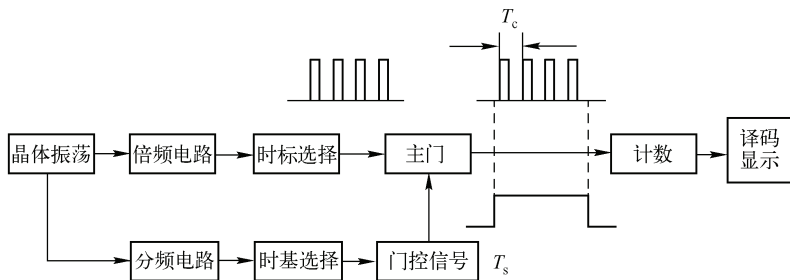


图 4.11 自校检验的框图

利用机内的晶体振荡器分频形成时基  $T_s$ ，倍频形成时标  $T_c$ ，因此，自校的实质是利用机内时基对机内时标进行计数。在电子计数器正常工作时，时基、时标都是已知的，因此，计数器显示的读数  $N = \frac{T_s}{T_c}$  也是确定的，由读数值便可判定电子计数器的工作是否正常。例如， $T_c=1\text{ns}$ 、 $T_s=1\text{s}$  时，正常显示的读数应为  $N=1000000000$ ，同时时基、时标均来自同一信号源，在理论上不存在  $\pm 1$  的量化误差。如果多次自校均能稳定地显示  $N=1000000000$ ，说明仪器工作正常。

### 4.2.9 提高测量准确度的方法

由电子计数器的测量原理可知，测量的误差主要来源于两个方面，即系统固有误差和噪声干扰误差。除了前面分析的减小测量误差的方法，在电路上还可采取一些措施，如多周期测量技术等。

#### 1. 中界频率的确定

通过上述分析已经知道，直接测频与测周法测频的相对误差是不一样的。被测信号频率  $f_x$  越高，用电子计数器测量频率误差越小；反之，被测信号频率  $f_x$  越低（周期  $T_x$  越大），用电子计数器测量周期误差越小。由于频率与周期互为倒数，实际上只要测出其中之一，另一个量用倒数运算很容易得到，所以为了提高测量精确度，人们自然会想到测高频信号的频率时，用测频的方法直接读取被测信号的频率；测低频信号的频率时，先通过测周期的方法测出被测信号的周期，再换算成频率。高、低频信号可以采用中界频率划分。

中界频率的定义为：电子计数器测量某信号的频率，若采用直接测频法和测周测频法的误差相等，则该信号的频率为中界频率  $f_0$ 。

忽略随机误差，根据中界频率的定义，令式 (4.8) 和式 (4.12) 的绝对值相等，即  $\gamma_f = \gamma_T$ ，则有

$$\frac{1}{f_x \cdot T_s} + \left| \frac{\Delta f_c}{f_c} \right| = \frac{k}{T_x \cdot f_c} + \left| \frac{\Delta f_c}{f_c} \right|$$

将上式中的  $f_x$  换为中界频率  $f_0$ ，可得到中界频率的计算公式：

$$f_0 = \sqrt{\frac{f_c}{kT_s}} \quad (4.18)$$

式中,  $f_0$ ——中界频率;

$f_c$ ——标准晶振的振荡频率;

$T_s$ ——标准晶振分频后形成的时标周期。

需要说明的是, 实际使用的电子计数器, 面板上一般有可变的 K、T 旋钮, 改变 K、T 旋钮的位置, K、T 的取值就会发生相应的变化, 中界频率也会随之改变, 这一点在实际测量中应引起注意。

**例 4.2** 用电子计数器测量  $f_x=2\text{kHz}$  信号的频率, 分别采用测频 (闸门时间为 1s) 和测周 (晶体振荡频率  $f_c=10\text{MHz}$ ) 两种测量方法。试比较这两种方法由于量化误差引起的相对误差, 并求出中界频率。

**解:** (1) 测频时, 量化误差为:

$$\frac{\Delta N}{N} = \pm \frac{1}{f_x \cdot T_s} = \pm \frac{1}{2 \times 10^3 \times 1} = \pm 5 \times 10^{-4}$$

(2) 测周时, 量化误差为:

$$\frac{\Delta N}{N} = \pm \frac{1}{T_x \cdot f_c} = \pm \frac{f_x}{f_c} = \pm \frac{2 \times 10^3}{10^7} = \pm 2 \times 10^{-4}$$

(3) 中界频率为:

$$f_0 = \sqrt{\frac{f_c}{T_s}} = \sqrt{\frac{10^7}{1}} \approx 3.16 \times 10^3 \text{ Hz} = 3.16 \text{ kHz}$$

例 4.2 中被测频率低于中界频率, 根据前面的理论, 采用测周法比测频法误差小, 计算结果也表明, 测周法测频的误差确实比测频法的误差小。

## 2. 多周期测量

所谓多周期测量法, 是指在测量被测信号的周期时, 时间间隔的起点在一个信号上取出, 终点在若干个周期后的信号中取出。由于采用多周期测量, 两相邻周期由于转换产生的误差互相抵消, 最后剩下的只有第一个和最后一个的转换误差。如测量 10 个周期时, 只有第一个周期开始时产生的转换误差  $\Delta T_1$  和第十个周期结束产生的转换误差  $\Delta T_2$  才会产生测周误差。这是一个随机误差, 两个随机误差的合成值为  $\Delta T = \sqrt{(\Delta T_1)^2 + (\Delta T_2)^2}$ , 这个误差是由 10 个周期产生的, 所以每个周期产生的误差为  $\Delta T/10$ , 而原来单个周期法所产生误差为  $\Delta T$ , 可见误差减少了 10 倍。

此外, 由于周期倍增后计数器计得的数值也增加了 10 倍, 这样,  $\pm 1$  误差所引起的测周误差也减少 10 倍。

所以, 经“周期倍乘”后再进行周期测量, 其测量精确度大为提高。需要注意的是所乘倍数  $k$  要受到仪器显示位数等的限制。

## 3. 测周法测量差频

测周法测量差频是指测量频率时, 先把被测频率降低, 然后采用测周法测频, 其框图

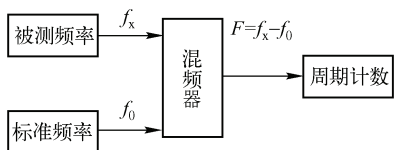


图 4.12 测周法测量差频框图

如图 4.12 所示。

被测信号  $f_x$  和标准频率  $f_0$  送入混频器，由混频器检出两者的差频  $F=f_x-f_0$ ，用测周计数器测出差频信号的周期  $T$ ，然后计算出  $F$ ，最后可得被测信号的频率  $f_x=f_0+F$ 。

测频误差为：

$$\frac{\Delta f}{f_x} = \frac{\Delta F}{f_x} = -\frac{\Delta T}{f_x \times T^2} = -\frac{F}{f_x} \times \frac{\Delta T}{T} \quad (4.19)$$

式中， $f_x$ ——被测信号的频率；

$F$ ——被测信号  $f_x$  和标准频率  $f_0$  的差频；

$\frac{\Delta T}{T}$ ——计数器测周的相对误差。

由式 (4.19) 可以看出，差频与被测信号的频率相比是一个很小的量，测频误差大大减小了，所以这种方法在计数器测量准确度不高的情况下，仍可得出较高的测频准确度。

#### 4. 差频倍增技术

差频倍增技术在差频技术基础上进一步发展，它将差频  $F$  倍增  $m$  倍，若经过  $n$  级倍增，每级倍增倍数都为  $m$ ，则计数器测得的差频为  $F_m=m^n F$ ，最后输出的频率为  $f_0+m^n F$ 。测频误差为：

$$\frac{\Delta f}{f_x} = \frac{F}{f_x} = \frac{F_m}{m^n \cdot f_x} \quad (4.20)$$

式中， $f_x$ ——被测信号的频率；

$F_m$ ——计数器测得的差频；

实际上，这种测量方法的主要优点是：由于被测信号的频率起伏大大增大，对测量设备准确度要求就大大降低了。

#### 5. 测量注意事项

- (1) 每次测试前应先对仪器进行自校检查，当显示正常时再进行测试。
- (2) 为了提高测量准确度，当被测频率较低时，应尽量选长的闸门时间或采用测周法。
- (3) 当被测信号的信噪比较差时，应降低输入通道的增益或加低通滤波器。
- (4) 为保证机内晶体稳定，应避免温度有大的波动和机械振动，避免强的工业磁电干扰，仪器的接地应良好。

### 4.3 其他测量时间和频率的方法

按工作原理来分类，频率的测量方法可分为直接法和比对法两大类，如表 4.1 所示。

在前一节重点介绍了比对法中的电子计数法，电子计数器测量频率的优点是测量方便、直观快速，测量精确度较高，是一种比较常用的测频方法，但它要求有较高的信噪比，

同时电子计数器法不能测量调制信号的频率。在对测量精确度要求不高的场合，可采用一些简单的测试方法。

表 4.1 频率测量的方法

频率测量的方法					
直接法		对比法			
谐振法	电桥法	拍频法	差频法	示波法	计数法
				李沙育图形法	电容充放电法
				测量周期法	电子计数法

### 4.3.1 谐振法测频

#### 1. 谐振法测频的基本原理

谐振法测频以 LC 调谐电路的谐振为基础，即利用电感、电容的串联谐振回路或并联谐振回路的谐振特性来实现测频的，如图 4.13 所示。 $L_2$ 、 $C$  构成一个串联谐振电路，被测信号  $f_x$  通过互感线圈与被测电路耦合。调节  $C$  的电容值，即改变  $L_2$ 、 $C$  组成的测量回路的固有频率  $f_0$ 。当  $f_x=f_0$  时，测量回路谐振。谐振时回路电流达到最大，同时电容两端的电压也最大。这时，串接于回路中的电流表或并接于电容  $C$  两端的电压表读数示值最大。当被测信号频率偏离  $f_0$  时，读数下降。显然

$$f_x = f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2C}} \quad (4.21)$$

式中， $f_x$ ——被测信号的频率；  
 $f_0$ ——测量回路的固有频率；  
 $L_2$ ——测量回路的电感值；  
 $C$ ——测量回路的电容。

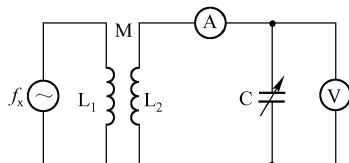


图 4.13 LC 谐振法测频原理图

通常，用改变电感的方法来改变频段，用可变电容器作频率细调。 $L_2$  的值预先给定， $C$  是标准可变电容器，由面板上的刻度盘可直接读出  $C$  值，根据式 (4.21) 便可算出待测频率  $f_x$ 。

#### 2. 谐振点的判断

在谐振点附近随着频率  $f_0$  的变化，电流和电压表的读数变化比较缓慢，这给准确判断谐振点的位置带来一定的困难，使得测量误差较大。而利用谐振回路的谐振曲线具有较好对称性的特点，采用对称交叉读数法，可以大大提高测量的精确度。谐振电路的曲线如图 4.14 所示。

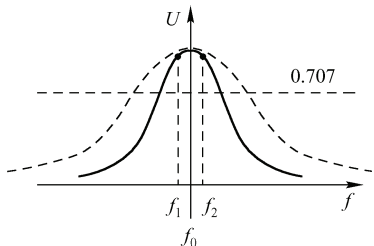


图 4.14 LC 谐振法的谐振曲线

该曲线是一条以谐振频率  $f_0$  为中心的对称曲线，曲线在半功率点处斜率最大。所以我们可以有意使回路失谐，在谐振频率  $f_0$  附近的左右对称点读取两个对应的失谐频率  $f_1$ 、 $f_2$ ，求其平均值即为比较准确的谐振频率  $f_0$ ，也就是被测信号的频率。其中， $f_1$ 、 $f_2$  的频率值可由面板上的刻度盘直接读出。被测信号频率  $f_x$  为：



$$f_x = f_0 = \frac{f_1 + f_2}{2} \quad (4.22)$$

式中,  $f_x$ ——被测信号的频率;  
 $f_0$ ——谐振时测量回路的谐振频率;  
 $f_1$ 、 $f_2$ ——谐振点附近的频率。

### 3. 谐振法测频的误差分析

谐振法测量频率的原理和测量方法都比较简单, 应用也比较广泛, 利用该法测量频率的测量误差大约在  $\pm 0.25\% \sim \pm 1\%$  范围内。可作为频率粗测或某些仪器的附属测频部件。这种测频误差的来源主要有以下几种。

- (1) 实际中电感、电容的损耗越大, 品质因数越低, 谐振曲线越平滑, 越不容易找出真正的谐振点。如图 4.14 虚线所示。
- (2) 面板上的频率刻度是在规定的标定条件下刻度的。当环境温度、湿度等因数变化时, 将使电感、电容的实际值发生变化, 从而使回路的固有频率变化。
- (3) 由于频率刻度不能分得无限细, 人眼读数常常有一定误差。

### 4.3.2 电桥法测频

电桥法测频是利用交流电桥平衡条件与加在该电桥中的交流工作信号频率有关的特性来进行的。交流电桥种类很多, 这里以最常用的文氏电桥为例, 介绍电桥法测频的原理, 如图 4.15 所示。

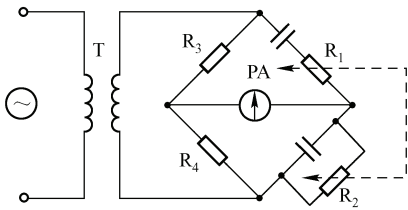


图 4.15 电桥法测频的原理图

交流电桥的平衡条件为:

$$\frac{R_1}{\frac{1}{R_3} + j\omega_x C_3} = R_4 \left( R_2 - j \frac{1}{\omega_x C_2} \right)$$

将上式进行整理可得:

$$\left( \frac{R_2}{R_3} + \frac{C_3}{C_2} \right) + j \left( \omega_x R_2 C_3 - \frac{1}{\omega_x R_3 C_2} \right) = \frac{R_1}{R_4}$$

两复数相等, 它的实部和虚部应分别相等。令上式左端实部等于  $R_1/R_4$ , 虚部等于 0, 得电桥平衡的两个条件为:

$$\frac{R_2}{R_3} + \frac{C_3}{C_2} = \frac{R_1}{R_4}$$

$$\omega_x R_2 C_3 - \frac{1}{\omega_x R_3 C_2} = 0$$

式中,  $R_1$ 、 $R_4$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  都是常量 (标准值);

$R_2$ 、 $R_3$  是可调电位器, 令  $R_2=R_3=R$ 、 $C_2=C_3=C$ , 则平衡条件为:

$$\begin{cases} R_1 = 2R_4 \\ f_x = \frac{1}{2\pi RC} \end{cases} \quad (6.23)$$

式中,  $R_1$ 、 $R_4$ 、 $R$ ——标准电阻;

$f_x$ ——被测信号的频率;

$C_2$ ——标准电容。

在  $R_1=2R_4$  条件下, 调节  $R$  或  $C$ , 可使电桥对被测信号频率  $f_x$  达到平衡, 此时检流计指示值最小。如果根据式 (4.23), 先换算出  $f_x$  与  $R$ 、 $C$  的对应值, 然后直接在面板按频率刻度, 测试人员就可直接读取被测信号  $f_x$  的频率值。

电桥测频法的测量精确度取决于电桥中各元件的精确度、检流计的灵敏度、测试者判断电桥平衡的准确度以及被测信号的频谱纯度等。该法测量误差大约为  $\pm (0.5\% \sim 1\%)$ 。高频时, 由于寄生参数的影响, 会使测量精确度大大下降, 所以该法只适用于 10kHz 以下的频率测量。

### 4.3.3 频率-电压转换法测频

频率-电压转换的方法是把被测信号的频率大小转换成与之成比例的时间间隔, 其原理框图如图 4.16 所示。

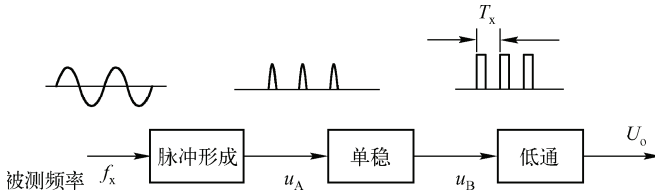


图 4.16 频率-电压转换法测频原理框图

脉冲形成电路把频率为  $f_x$  的正弦信号  $u_x$  转换成周期与之相等的尖脉冲  $u_A$ , 该尖脉冲加入单稳多谐振荡器, 产生周期为  $T_x$ , 宽度为  $\tau$ 、幅度为  $U_m$  的矩形脉冲序列  $u_B$ ,  $u_B$  的平均值为:

$$U_o = \overline{u_B} = \frac{U_m \cdot \tau}{T_x} = U_m \cdot \tau \cdot f_x \quad (4.24)$$

式中,  $U_o$ ——转换后的矩形脉冲电压的平均值幅度;

$U_m$ ——矩形脉冲的幅度, 为定值;

$\tau$ ——矩形脉冲的宽度, 为定值;

$f_x$ ——被测信号的频率。

上式中,  $U_m$ 、 $\tau$  为定值, 所以输出电压与被测信号频率之间为线性关系, 如果电压表盘根据式 (4.24) 按频率刻度, 则从电压表上可直接读出被测信号的频率  $f_x$ 。

这种  $f-u$  转换式最高测量频率可达几兆赫兹, 可以连续监视频率的变化是这种测量法的突出优点。

### 4.3.4 比较法测频

比较法测频就是用标准频率与被测频率进行比较, 当把标准频率调节到与被测频率相等时, 指零仪表指零, 此时的标准频率值即为被测频率值。比较法测频可分为拍频法测频与差频法测频两种。

拍频现象是指将两个正弦振荡信号在某个线性元件上叠加, 且这两个信号的振荡频率