

第 5 章

频率时间测量与仪器

频率和时间测量是电子测量的一个重要内容。时间、频率是极为重要的物理量,在通信、航空航天、科学试验、工业自动化等领域都存在时频测量。因此,时间和频率测量具有重要的基础性地位。本章重点讨论频率和时间测量的方法及其所用的仪器,还涉及相位的测量。

5.1 频率时间测量概述

5.1.1 时间、频率的基本概念

1. 时间和频率的定义

时间的含义有两个:一个是指“时刻”,即某个事件何时发生;另一个是指“时间间隔”,即某个事件相对于一开始时刻持续了多久。

所谓频率就是指周期信号在单位时间(1 s)内变化的次数。如果在一定时间间隔 T 内周期信号重复变化了 N 次,则其频率可表达为

$$f = \frac{N}{T} \quad (5-1)$$

由于周期和频率呈现式(5-1)所示的关系,所以对周期(时间间隔)的测量可转化为对频率的测量,然后取倒数即可。

2. 时频测量的特点

(1)测量精度高。在电子技术各测量参数中,频率测量的精确度是最高的(10^{-14}),因而可以利用某种确定的函数关系把其他电参数的精确测量转换成频率的测量。

(2)应用范围广。现代科技所涉及的频率范围是极其宽广的,从百分之一赫兹甚至更低频率开始,一直到 10^{12} Hz 以上。因此,电子学及其他许多领域都离不开频率测量。

(3)自动化程度高。时频测量极易实现数字化。电子计数器利用数字电路的各种逻辑功能很容易实现自动重复测量、自动选择量程、测量结果自动显示等。

(4)测量速度快。由于数字式仪器实现了测量自动化,因此不但操作简便,而且大大加快了测量速度。

3. 频率测量方法

根据测量方法原理,频率测量方法的分类如图 5-1 所示。



视频
示波器频率
测量

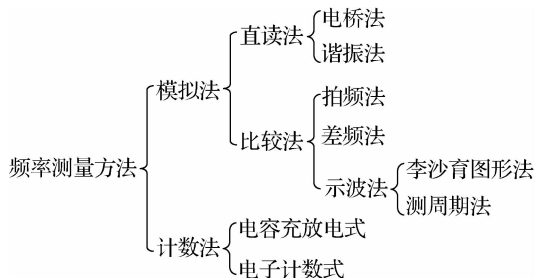


图 5-1 频率测量方法的分类

其中,直读法又称频响法,它利用无源网络频率特性测频,包括电桥法和谐振法。电桥法是利用电桥平衡原理来进行测量。谐振法是利用 LC 回路的谐振特性测频的(如谐振式波长表可测无源 LC 回路的固有谐振频率),测频范围为 $0.5\sim 1\ 500\ \text{MHz}$ 。

比较法是指将被测频率信号与已知频率信号相比较,通过观察、比较结果,获得被测信号的频率,它包括拍频法、差频法和示波法。差频法是改变标准信号频率,使它与被测信号混合,取其差频,当差频为零时读取频率。这种外差式频率计可测量高达 $3\ 000\ \text{MHz}$ 的微弱信号的频率,测频精确度为 10^{-6} 左右。示波法是在示波器上根据李沙育图形或信号波形的周期个数进行测频,这种方法可测量从音频到高频信号的各种信号。

计数法是直接计量单位时间内被测信号的脉冲数,然后以数字形式显示频率值。它包括电容充放电式和电子计数式两种,前者利用电子电路控制电容充放电的次数或时间常数,再用磁电式仪表测量充放电电流的大小,从而指示出被测信号的频率值;后者是根据频率定义进行测量的一种方法,它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。这种方法测量精确度高、速度快,适合不同频率、不同精确度测频的需要,所以本章将重点介绍电子计数器法在频率、时间等方面的测量原理。

5.1.2 电子计数器的分类

电子计数器按功能可以分为如下四类:

(1)通用电子计数器。通用电子计数器是指多功能的电子计数器,它一般具有测量频率、频率比、周期、时间间隔、累加计数和计时及自检等功能。

(2)频率计数器。频率计数器又称数字式频率计,是指专门用于测量信号频率的电子计数器,它通常只具有频率测量和计数功能,频率范围较宽。

(3)智能型计数器。智能型计数器是指带有微处理器的电子计数器。它除了测量功能以外,还具有数据运算功能,配有通信接口,可与计算机或其他仪器连接实现自动化测量。

(4)特种计数器。特种计数器是指具有特殊功能的电子计数器,如可逆计数器、程序计数器、预置计数器等。特种计数器主要用于工业生产自动化测量与控制装置中。

电子计数器按用途可分为测量用计数器和控制用计数器,按测量范围可分为低速计数器(低于 $10\ \text{MHz}$)、中速计数器($10\sim 100\ \text{MHz}$)、高速计数器(高于 $100\ \text{MHz}$)和微波计数器($1\sim 80\ \text{GHz}$)。

5.1.3 电子计数器的主要性能指标

1. 测量功能

测量功能是指电子计数器所具有的全部测量功能,一般包括频率测量、频率比测量、周



视频
电子计数器

期测量、时间间隔测量、累加计数和计时、自校准等功能。

2. 测量范围

测量范围是指不同测量功能的有效测量范围,一般用其上下限值表示,如频率测量范围、周期测量范围、时间间隔测量范围、最大计数范围等。

3. 输入特性

输入特性是指电子计数器与被测信号相关联的一组特性参数,主要包括:

(1)输入灵敏度。输入灵敏度是指使仪器能正常工作的最小输入电压的有效值。

(2)最高输入电压。最高输入电压是指仪器所允许输入的最大电压值,若被测信号电压超过该值,有可能会损坏仪器。

(3)输入耦合方式。仪器一般都设置有 AC 和 DC 两种耦合方式,以适应不同频率和不同波形的输入信号。

(4)输入阻抗。输入阻抗包括输入电阻和输入电容,为了尽量减小仪器对被测信号的影响,一般都采用高输入阻抗,输入电阻大于 $1\text{ M}\Omega$,输入电容小于 30 pF 。

4. 闸门时间和时标

闸门时间和时标是说明仪器内部标准时间信号源可提供的闸门时间信号与时标信号。测量频率是在一定的时间内对被测信号的周期进行计数,这个对被测信号周期进行计数的时间就是闸门时间。这种计数方式会造成一个被测信号周期的误差,闸门时间越长,计数周期数就越多,误差一个周期所占的比例越小,精度自然就高。闸门时间不一定为 1 s ,用户可根据测频精度和速度不同要求自由选择。通常是以 10 为系数的一系列时间基准信号。

时标是标度时间的方法,也就是时间标准。在时间标度上存在两个需求,因而存在两种方法:一个是世界时(UT1),它是基于地球自转的时标,称为天文学需求;另一个是国际原子时(TAI),是基于单位时间的时标,它是“铯-133 原子基态两个超精细能级间跃迁辐射 $9\ 192\ 631\ 770$ 周所持续的时间”为一秒,可以称作原子时标。原子时标的准确度为每日数纳秒,而世界时的准确度只有数毫秒。

5. 分频倍率

分频倍率是指周期和频率比测量时对被测信号分频的倍数。对被测信号进行分频,可提高测量分辨率,减小测量误差。分频倍率通常为 10、100、1 000 等。

6. 显示位数

显示位数是指仪器的数码显示器所具有十进制显示的总位数,显示位数越多,分辨率越高,电子计数器的显示位数通常为 6~10 位。

7. 晶振器特性

晶振器特性是说明仪器中石英晶体振荡器的基本特性参数,包括晶体振荡器频率、频率准确度和频率稳定度,它们决定着仪器的准确度和稳定性。晶体振荡器频率一般为 5 MHz 或 10 MHz 。频率准确度和频率稳定度一般为 $\pm 10^{-6} \sim 10^{-9}$ 量级。

8. 输出信号及特性

输出信号及特性说明仪器可直接输出的信号类型及信号特性,输出信号有晶振信号、时标信号、闸门时间信号和测量数据,包括这些信号的输出电平和数据编码方式。

5.1.4 时间与频率的原始标准

由于在时间标度上存在两个独立的需求,即天文学需求和时间单位准确的需求,因而形

成了天文时标和原子时标两个时间标准。

1. 天文时标

时间和频率测量的一个重要特点就是：时间是一去不复返的。因此，寻找按严格相等的时间间隔重复出现的周期现象就成为制定时间和频率标准的首要问题。

长期以来，人们把地球自转当作符合上述要求的频率源，把由地球自转确定的时间计量系统称为世界时，它满足了当时人们的需要。随后，人们又制定了根据太阳来计量时间的计时系统，称为平太阳时系统，这种计时系统的精度比世界时有了大幅度的提高。

各地通过天文观测直接测定的世界时称为地方时，记作 UT_0 。在 UT_0 的基础上修正了地球极移的影响，产生了 UT_1 ；在 UT_1 的基础上修正了季节性变化的影响，产生了 UT_2 。它的稳定度比世界时提高了两个数量级，达到了 $\pm 1 \times 10^{-9}$ 量级。

1952年9月，国际天文学会第八次大会通过了历书时的正式定义。这种计时系统采用1900年1月1日0时(UT)起的回归年长度作为计量时间的单位，定义“秒是按1900年起始时的地球公转平均角速度计算出的一个回归年的 $1/315\,569\,259\,747$ ”，称之为历书秒。它在1960年的第十一届国际计量大会上得到认可。

2. 原子时标

天文时标具有一定的局限性。原子时标是近年来建立起来并确定的一种新型计时系统，它利用原子从某种能量状态转变到另一种能量状态时，辐射或吸收的电磁波的频率作为标准频率来计量时间。它们受宏观世界的影响较小，因此频率准确度和稳定度都十分高，远远超过了天文标准。

1967年10月的第十三届国际计量大会正式通过了秒的新定义：秒是铯-133原子基态的两个超精细结构能级之间跃迁频率相应的射线束持续 $9\,192\,631\,770$ 个周期的时间。这个定义已为全世界所接受，并自1972年1月1日零时起，时间单位“秒”由天文秒改为原子秒。

3. 石英晶体振荡器

目前，时间和频率的测量之所以在所有物理量的测量中处于领先地位，主要因为频率是迄今为止复制得最准确(10^{-13} 量级)、保持得最稳定(10^{-14} /星期)、测量得最准确的物理量。时基电路的作用就是提供准确的闸门时间 T ，它由高稳定度的石英晶体振荡器、分频整形电路与门控电路组成。

石英晶体有很高的机械稳定性和热稳定性。压电效应使得石英晶体高度稳定的机械振动可以直接控制电振荡，使电振荡频率也保持得非常稳定。图5-2所示为高稳定度石英晶体振荡器的结构装置。

由于系统漂移或老化现象，必须定期和高一级的频率源校准，通过微调频率以达到规定的准确度和稳定度。由于采用了高质量因数的泛音晶体、精密的恒温设备及特别选定的电子器件的工作状态，目前，石英晶体老化率不难做到 10^{-8} ，较好的可达 $3 \times 10^{-9}/\text{天} \sim 5 \times 10^{-10}/\text{天}$ ，短期稳定度达 $2 \times 10^{-10}/\text{秒} \sim 5 \times 10^{-11}/\text{秒}$ 。

4. 标准时频的传递

在当代实际生活、工作和科学研究中，人们越来越感觉到有统一的时间频率标准的重要性。一个群体或一个系统的各部件的同步运作或确定运作的先后次序都迫切需要一个统一的时频标准。通常时频标准采用下述两类方法提供给用户使用：本地比较法和发送-接收标准电磁波法。这里所说的标准电磁波是指其时间频率受标准源控制的电磁波，或含有标准

时频信息的电磁波。

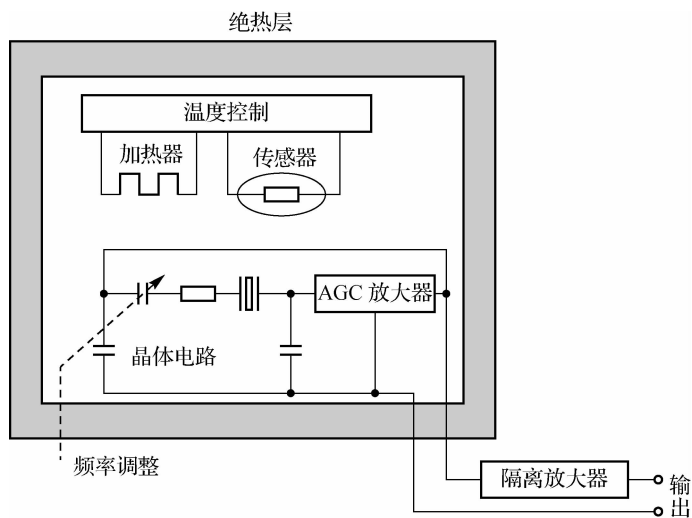


图 5-2 高稳定性石英晶体振荡器的结构装置

(1)本地比较法。本地比较法就是用户把自己要核准的装置搬到拥有标准源的地方,或者由有标准源的主控室通过电缆把标准信号送到需要的地方,然后通过中间测试设备进行比对。

(2)发送-接收标准电磁波法。发送-接收标准电磁波法就是拥有标准源的地方通过发射设备将上述标准电磁波发送出去,用户用相应的接收设备将标准电磁波接收下来,便可得到标准时频信号,并与自己的装置进行比对测量。现在,从甚长波到微波的无线电的各频段都有标准电磁波广播。例如,甚长波中有美国海军导航台的 NWC 信号(22.3 kHz)、英国的 GBR 信号(16 kHz),长波中有美国的罗兰 C 信号(100 kHz)、中国的 BPL 信号(100 kHz),短波中有日本的 JJY 信号、中国的 BPM 信号(5 MHz、10 MHz、15 MHz);微波中有电视网络等。用标准电磁波传送标准时频是时频量值传递与其他物理量传递方法显著不同的地方,它极大地扩大了时频精确测量的范围,大大提高了远距离时频的精确测量水平。

5.1.5 频率和时间的测量原理

1. 模拟测量原理

模拟测量按工作原理可分为直接法和比较法两类。

1)直接法

在某些电路中,输入被测频率 f_x 是电路和设备的已知参数 a, b, c, \dots 的确定的函数关系。进行测量时,利用各种有源和无源的频率比较设备和指示器来确定这种函数关系的具体形式,以获取被测信号的频率。谐振法和电桥法是其典型代表。

(1)谐振法。被测信号经互感 M 与 LC 串联谐振回路进行松耦合,改变可变电容 C ,使回路发生串联谐振。谐振时回路电流 I 达到最大。被测频率可用下式计算:

$$f_x = f_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (5-2)$$

当 f_0 和被测信号频率 f_x 相等时, 电路发生谐振。此时, 串联接入回路中的电流表将指示最大值 I_0 。当被测频率偏离 f_0 时, 指示值下降, 据此可以判断谐振点。

谐振法可测量 1 500 MHz 以下的频率, 频率的误差在 $\pm(0.25\sim 1)\%$ 范围内。谐振法测量频率结构比较简单、操作方便, 常作为频率粗测或某些仪器的附属测频部件, 如图 5-3 所示。

(2) 电桥法。电桥法测频是利用电桥的平衡条件和被测信号频率有关这一特性来测频的。交流电桥能够达到平衡, 电桥的四个臂中至少有两个电抗元件, 其具体的线路有多种形式, 这里以常见的文氏电桥为例介绍电桥法测频的原理, 如图 5-4 所示。

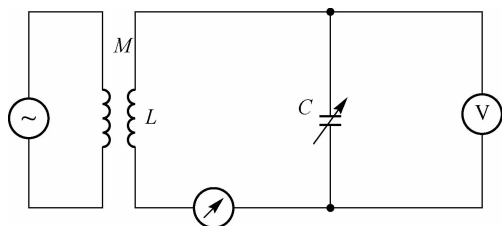


图 5-3 谐振法测频原理

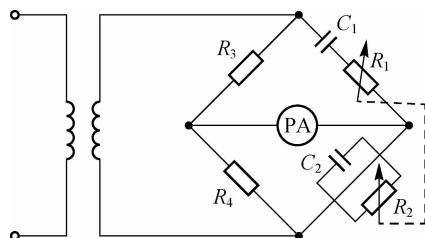


图 5-4 文氏电桥的原理电路

图中, PA 为指示电桥平衡的检流计, 该电桥的复平衡条件为

$$\left(R_1 + \frac{1}{j\omega_x C_1}\right)R_4 = \left[\frac{1}{\frac{1}{R_2} + j\omega_x C_2}\right]R_3 \quad (5-3)$$

$$\left(R_1 + \frac{1}{j\omega_x C_1}\right)\left(\frac{1}{R_2} + j\omega_x C_2\right) = \frac{R_3}{R_4} \quad (5-4)$$

要使式(5-4)成立, 则式子左端实部等于 R_3/R_4 , 虚部等于零, 从而得该电桥平衡的两个实平衡条件为

$$\frac{R_1}{R_2} + \frac{C_2}{C_1} = \frac{R_3}{R_4} \quad (5-5)$$

$$R_1\omega_x C_2 - \frac{1}{R_2\omega_x C_1} = 0 \quad (5-6)$$

$$\omega_x = \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} \text{ 或 } f_x = \frac{1}{2\pi \sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}$$

若 $R_1 = R_2 = R, C_1 = C_2 = C$, 则有

$$f_x = \frac{1}{2\pi RC} \quad (5-7)$$

借助 R (或 C) 的调节, 可使电桥对被测频率 f_x 达到平衡 (指示器指示最小), 故可变电阻 R (或可变电容 C) 上即可按频率进行刻度。

电桥法测频的准确度取决于电桥中各元件的准确度、判断电桥平衡准确度 (检流计的灵敏度及人眼观察误差) 和被测信号的频谱纯度。它能达到的测频准确度为 $\pm(0.5\sim 1)\%$ 。在高频时, 由于寄生参数影响严重, 会使测量准确度大大下降, 所以这种电桥法测频仅适用于 10 kHz 以下的音频范围。

2) 比较法

比较法利用标准频率 f_s 和被测频率 f_x 进行比较来测量频率。其数学模型为

$$f_x = Nf_s \quad (5-8)$$

利用比较法测量频率,其准确度主要取决于标准频率 f_s 的准确度,即判断式(5-8)存在的误差。拍频法、外差法、示波法及计数法测频是这种测量法的典型代表。

电子计数器也是一种利用比较法进行测量的最常见、最基本的数字化仪器,是其他数字化仪器的基础。

2. 数字测量原理

1) 门控计数法测量原理

门控计数法可理解为:在规定的时间内打开闸门,让信号进入计数电路做累加计数,在已知的标准时间内累计未知的待测输入信号的脉冲个数,就实现频率测量;在未知的待测的时间间隔内累计已知的标准时间脉冲个数,就实现周期或时间间隔的测量。其原理如图 5-5 所示。

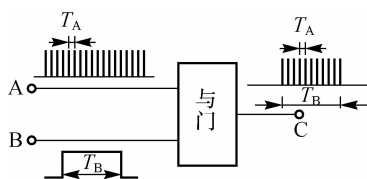


图 5-5 主门电路

2) 通用电子计数器的基本组成

通用电子计数器基本组成的原理框图如图 5-6 所示。电路由输入通道 A、输入通道 B、时基单元、主门、控制单元、计数与显示单元等组成。

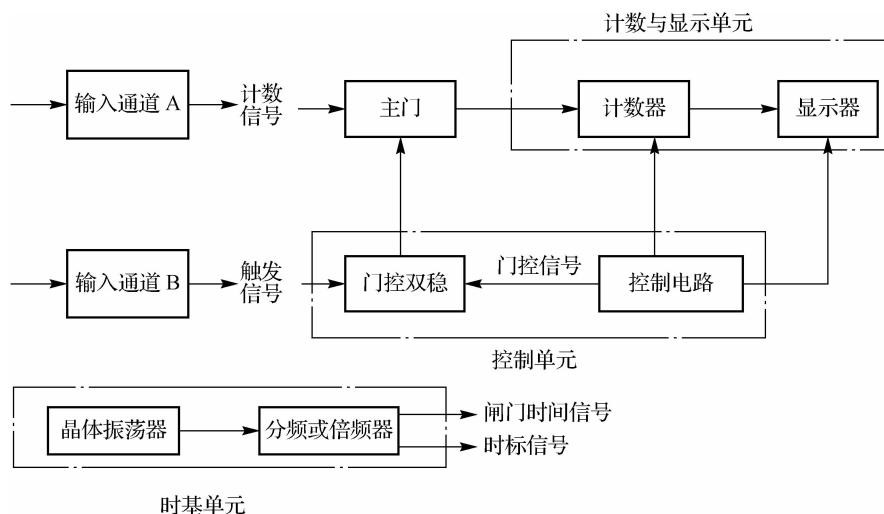


图 5-6 通用电子计数器基本组成的原理框图

(1) 输入通道。通常有 A、B、C 等多个通道。由输入通道电路对输入信号进行衰减、放大和整形后,为计数电路输入适合的计数脉冲信号。

(2) 主门电路。主门也称为闸门,用于控制计数信号能否输入计数电路,主要由门电路、逻辑控制电路等组成。

(3) 时基单元。时基单元由石英晶体振荡器、分频或倍频器组成,用于产生机内时间、频率测量的基准信号,即时间测量的时标或频率测量的标准信号。

(4) 控制单元。控制单元能产生各种控制信号去控制和协调通用计数器各单元的工作,

以使整机按一定的工作程序自动完成测量任务,使得每次测量都按照以下次序进行:准备、计数、显示、复零、准备下次测量。

(5)计数与显示单元。其接收主闸门输出的计数脉冲信号,并以十进制方式累加后完成脉冲计数并锁存,同时将计数结果以数字方式显示出来,主要由译码器、计数器、数字显示器电路组成。

(6)电源电路:为仪器电路提供所需要电能各类工作电源(图中未标出)。

3)电子计数器的工作流程

电子计数器的工作流程如图 5-7 所示。

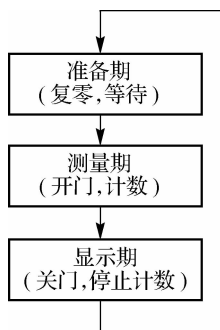


图 5-7 电子计数器的工作流程

5.2 电子计数器

5.2.1 电子计数器的测量功能

通用电子计数器的基本功能是测量频率、频率比、周期、时间间隔和自检等。计数器输入通道所加信号的不同组合,决定了其所实现的测量功能。

1. 频率测量

电子计数器按照式 $f=N/T$ 的定义进行频率测量,其原理如图 5-8 所示,其对应点的工作波形如图 5-9 所示。在开门时间,被测信号通过闸门进入计数器计数并显示。若闸门开启时间为 T_c ,输入信号频率为 f_x ,则计数值为

$$N = \frac{T_c}{T_x} = T_c f_x \quad (5-9)$$

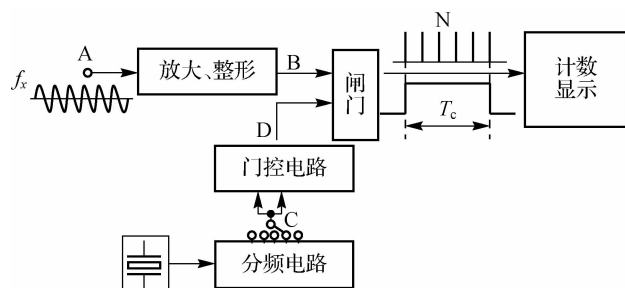


图 5-8 测频原理框图

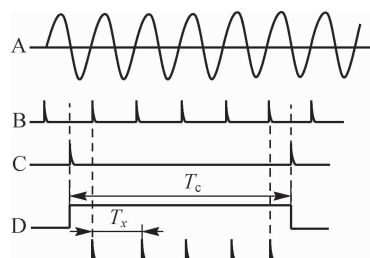


图 5-9 工作波形图

闸门的宽度是由标准的时基经过分频得到的,通过开关选择分频比,是已知量。因此,只要得到计数器的计数值,就可以由式(5-9)得到被测信号的频率。

2. 频率比的测量

前述频率测量的实质就是一种频率比的测量,是被测信号的频率和时基标准信号的频率比。因此,若要测量 f_A 对 f_B 的频率比(假设 $f_A > f_B$),只要用 f_B 的周期 T_B 作为闸门,在 T_B 时间内对 f_A 作周期计数即可。

测量两个信号的频率比与频率测量原理基本相同,其原理框图如图 5-10 所示。

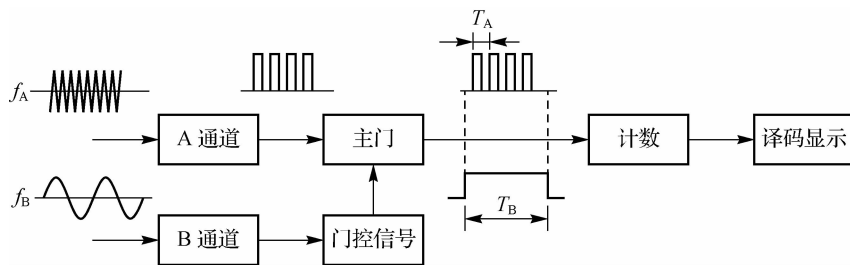


图 5-10 频率比测量原理框图

测量频率比时,频率高的信号由 A 端输入,频率低的信号由 B 端输入。 f_A 信号用作计数脉冲, f_B 信号用作闸门控制信号,用来控制主闸门的开启时间。在闸门开启时间 T_B 内对 T_A 进行计数,若计数值为 N ,此计数值就是 A 信号与 B 信号的频率比,即

$$f_A/f_B = N \quad (5-10)$$

提高频率比的测量精度,减小测量误差,通常是扩展 B 通道信号的周期个数。最后将显示值的小数点向左移动 n 位即得到 f_A/f_B 。

例如,以 B 通道信号的 10 个周期作为闸门信号,则计数值为

$$N = \frac{10T_B}{T_A} = 10 \frac{f_A}{f_B}$$

即计数值扩大了 10 倍,相应的测量精度也就提高了 10 倍。为得到真实结果,需将计数值 N 缩小 10 倍(小数点左移 1 位),即

$$\frac{f_A}{f_B} = \frac{N}{10}$$

3. 周期测量

周期测量的原理框图如图 5-11 所示。被测信号 T_x 从 B 输入端输入,经脉冲形成电路取出一个周期的方波信号,加到门控电路。若时基信号周期为 T_0 ,计数器读数为 N ,则被测周期的表达式应为

$$T_x = NT_0 \quad (5-11)$$

需要注意的是,门控信号由被测信号经过整形获得,而被计数的信号则是标准的时基信号经过分频得到,其周期是已知的。通过时基信号在开门时间内的计数值就可由式(5-11)得到被测信号的周期。

4. 时间间隔测量

时间间隔指两个时刻点之间的时间段,包括同一信号任意两点间的时间差(如脉冲宽度、脉冲上升或下降时间等)和两个同频率信号之间的时间差(如两个同频脉冲串间的时间间隔、信号的相位差等)。

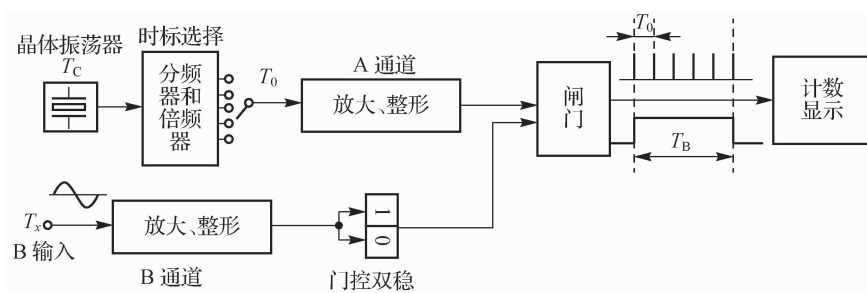


图 5-11 周期测量的原理框图

时间间隔测量和周期测量都是测量信号的时间,因此测量电路大体相同,所不同的是测量时间间隔需要 B、C 两个通道分别送出起始和停止信号去控制门控双稳电路,以形成闸门信号。在门控时间内对时标脉冲信号进行计数。计数值则为门控时间,即为被测的时间间隔。时间间隔测量的原理框图如图 5-12 所示。

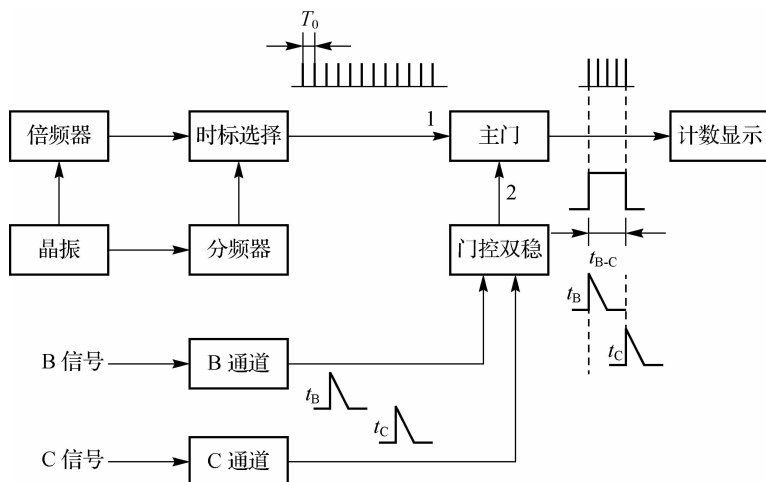


图 5-12 时间间隔测量的原理框图

时标信号作为计数脉冲,B 通道输入的信号作为主门的开门信号,当主门打开时,时标脉冲通过主门进入计数显示电路;C 通道输入的信号作为主门的关门信号。若计数器在主门打开时间内计得脉冲个数为 N ,则 B 和 C 两脉冲信号之间的时间间隔为

$$t_{B-C} = NT_0 \quad (5-12)$$

为增强测量的灵活性,在 B、C 两通道内分别设有极性选择开关和电平调节电位器,通过触发电平的选择,可以选取两个输入信号的上升沿或下降沿的某电平点作为时间间隔的始点和终点,这样就可以测量两个输入信号任意两点之间的时间间隔,如图 5-13 所示。

5. 相位差测量

相位差测量通常是指两个同频率的信号之间的相位差的测量。相位差测量的主要方法有示波器法、比较器法、直读法等。利用电子计数器也可进行相位差的测量,它是时间间隔测量的一个应用。瞬时值数字相位差测量原理框图如图 5-14 所示,通过测量两个正弦波上两个相应点之间的时间间隔,可换算出它们之间的相位差。

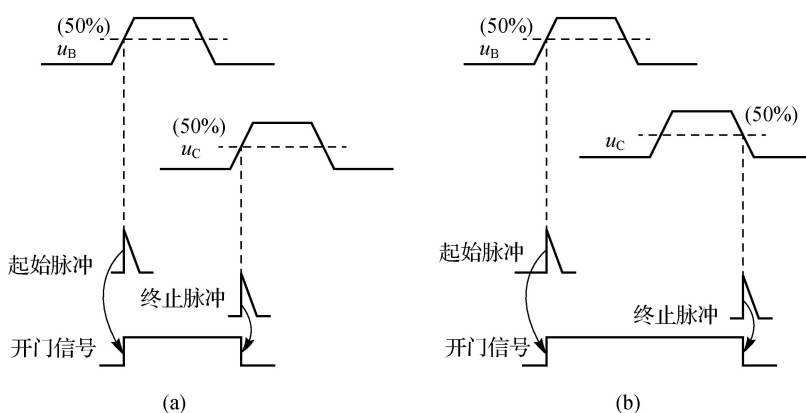


图 5-13 输入信号任意两点间的时间间隔测量示意图

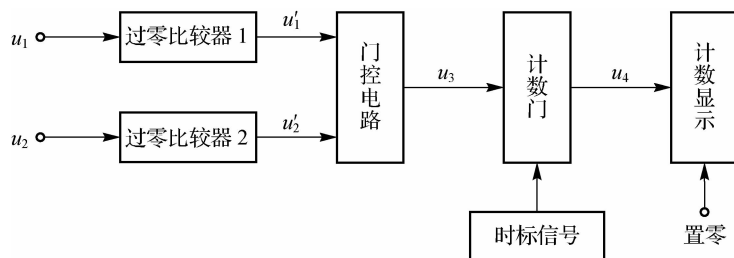


图 5-14 瞬时值数字相位差测量原理框图

当被测信号 u_1 、 u_2 由负变正通过零点时,分别由过零比较器 1 和 2 产生脉冲信号 u'_1 、 u'_2 。设 u'_1 超前于 u'_2 ,则 u'_1 、 u'_2 分别作为门控电路的开启信号、关闭信号,使门控电路产生门控信号 u_3 , u_3 的脉宽与两个信号的相位差相对应。 u_3 脉宽期间打开计数门,时标信号则经由计数门送至计数显示电路,得到对应的相位差数值。其工作波形如图 5-15 所示。

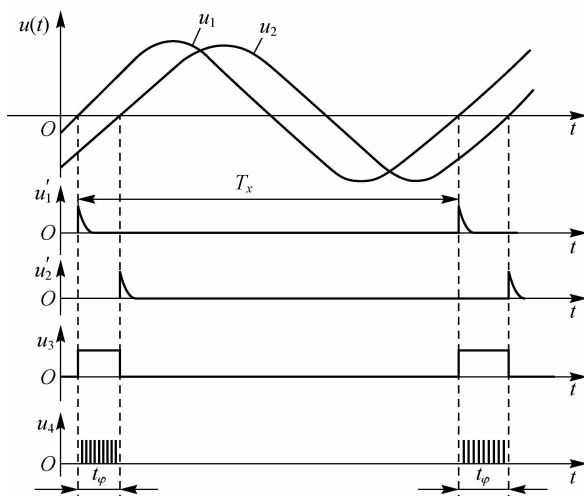


图 5-15 瞬时值数字相位差测量的工作波形

设被测信号周期为 T_x ,门控信号 u_3 的宽度,即两个信号相位差 $\Delta\varphi$ 对应的时间为 t_φ ,则

$$\left. \begin{aligned} \frac{t_\varphi}{T_x} &= \frac{\Delta\varphi}{360^\circ} \\ t_\varphi &= NT_s \end{aligned} \right\} \quad (5-13)$$

由以上两式可得

$$\Delta\varphi = \frac{NT_s}{T_x} \times 360^\circ = N \frac{f_x}{f_s} \times 360^\circ \quad (5-14)$$

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“+”,信号由负变正通过零点,测得 $t_{\varphi 1}$;第二次设置为“-”,信号由正变负通过零点,测得 $t_{\varphi 2}$ 。两次测量结果取平均值,即

$$t_\varphi = \frac{t_{\varphi 1} + t_{\varphi 2}}{2} \quad (5-15)$$

6. 自校准

通常在使用电子计数器进行测量之前,要对电子计数器进行自校准,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量。自校准的原理框图如图 5-16 所示。

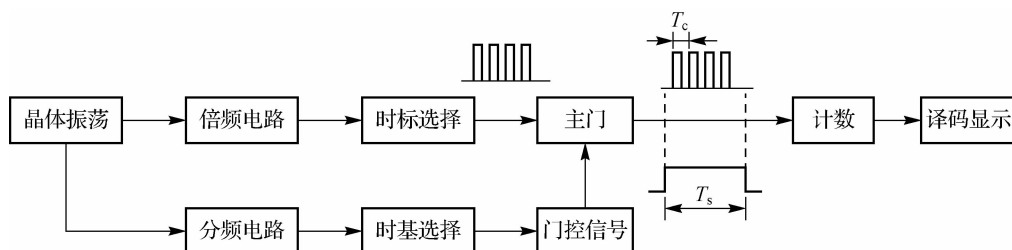


图 5-16 自校准的原理框图

利用机内的晶体振荡器分频形成时基 T_s (闸门信号),倍频形成时标 T_c 。因此,自校准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,因而计数器显示的读数 $N = T_s / T_c$ 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,若选择 $T_s = 10 \text{ ms}$, $T_c = 1 \mu\text{s}$,则自检显示应稳定在 $N = 10\,000$ 。当然自检不能检测内部基准源。

5.2.2 电子计数器的测量误差

1. 测量误差的来源

1) 量化误差

量化误差是指在进行频率的数字化测量时,被测量与标准单位不是正好为整数倍,因此在量化过程中有一部分时间零头没有被计算在内而造成的误差,再加之闸门开启和关闭的时间和被测信号不同步(随机的),使电子计数器出现 ± 1 误差。

2) 触发误差

触发误差是指门控脉冲在干扰信号的作用下使触发提前或滞后所带来的误差。

3) 标准频率误差

标准频率误差是指由于电子计数器所采用的频率基准(如晶振等)受外界环境或自身结构性能等因素的影响产生漂移而给测量结果引入的误差。

2. 频率测量误差分析

计数器直接测频的误差主要由两项组成： ± 1 量化误差和标准频率误差。一般地，总误差可采用分项误差绝对值合成得到。

$$\frac{\Delta f_x}{f_x} = \pm \left(\frac{1}{T_s f_x} + \left| \frac{\Delta f_c}{f_c} \right| \right) \quad (5-16)$$

1) 量化误差

在测频时，由于闸门开启时间和被计数脉冲周期不成整数倍，在开始和结束时产生零头时间 Δt_1 和 Δt_2 ，如图 5-17 所示。

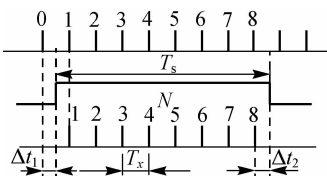


图 5-17 量化误差示意图

由于 Δt_1 和 Δt_2 在 $0 \sim T_x$ 任意取值，则可能有列情况：

- (1) 当 $\Delta t_1 = \Delta t_2$ 时， $\Delta N = 0$ 。
- (2) 当 $\Delta t_1 = 0, \Delta t_2 = T_x$ 时， $\Delta N = -1$ 。
- (3) 当 $\Delta t_1 = T_x, \Delta t_2 = 0$ 时， $\Delta N = +1$ 。

即最大计数误差为 ± 1 个数，故电子计数器的量化误差又称为 ± 1 误差。

$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{\pm 1}{N} = \pm \frac{1}{T_s f_x} \quad (5-17)$$

2) 标准频率误差

晶振输出频率不稳定引起闸门时间的不稳定，造成测频误差。

$$T_s = k T_c = \frac{k}{f_c}, \text{ 而 } \Delta T_s = \frac{d(T_s)}{d(f_c)} = \Delta f_c = \frac{k \Delta f_c}{f_c^2}$$

所以有

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

3) 减小测频误差方法的分析

根据式(5-17)所表示的测频误差 $\Delta f_x/f_x$ 与 ± 1 误差和标频误差 $\Delta f_c/f_c$ 的关系，可画出如图 5-18 所示的误差曲线。

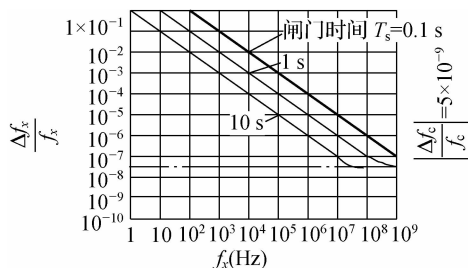


图 5-18 计数器测频时的误差曲线

从图 5-18 中可以看出:当 f_x 一定时,增加闸门时间 T_s 可以提高测频分辨力和准确度。当闸门时间一定时,输入信号频率 f_x 越高,则测量准确度越高。在这种情况下,随着 ± 1 误差减小到 $|\Delta f_c/f_c|$ 以下, $|\Delta f_c/f_c|$ 的影响不可忽略。这时,可以认为 $|\Delta f_c/f_c|$ 是计数器测频的准确度的极限。

【例 5-1】 设 $f_x = 20$ MHz,选闸门时间 $T_s = 0.1$ s,则由于 ± 1 误差而产生的测频误差为

$$\frac{\Delta f_x}{f_x} = \pm \frac{1}{T_s f_x} = \frac{\pm 1}{0.1 \times 2 \times 10^7} = \pm 5 \times 10^{-7}$$

若 T_s 增加为 1 s,则测频误差为 $\pm 5 \times 10^{-8}$,精度提高 10 倍,但测量时间是原来的 10 倍。

3. 周期测量误差分析

1) 误差表达式

由式 $T_x = NT_0$ 可得

$$\frac{\Delta T_x}{T_x} = \frac{\Delta N}{N} + \frac{\Delta T_0}{T_0}$$

因为

$$N = \frac{T_x}{T_0} = T_x f_0$$

所以

$$\frac{\Delta T_x}{T_x} = \pm \frac{1}{T_x f_0} \pm \frac{\Delta T_c}{T_c} = \pm \left(\frac{1}{T_x f_0} + \frac{\Delta f_c}{f_c} \right) \quad (5-18)$$

2) 减小测量周期误差的方法

根据式(5-18)可以得到图 5-19 所示的测量周期误差曲线图,由图中可以看出:周期测量时信号的频率越低,周期的测量误差越小;周期倍乘的值越大,误差越小;另外,可以通过对更高频率的时基信号进行计数来减小量化误差的影响。

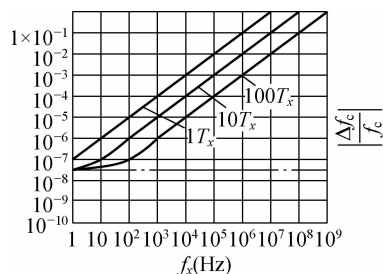


图 5-19 测量周期误差曲线图

4. 中界频率

当直接测频和直接测周期的量化误差相等时,就确定了一个测频和测周测的分界点,这个分界点的频率称为中界频率。

$$\frac{F_s}{f_{xm}} = \frac{T_0}{T_{xm}} = \frac{f_{xm}}{f_0} \quad (5-19)$$

$$f_{xm} = \sqrt{F_s f_0} \quad (5-20)$$

根据中界频率可以选择合适的测量方法来减小测量误差,即当 $f_x > f_{xm}$ 时,应使用测频的方法;当 $f_x < f_{xm}$ 时,适宜用测周期的方法。

5. 触发误差

在测量周期时,被测信号通过触发器转换为门控信号,其触发电平波动及噪声的影响等对测量精度均会产生影响。

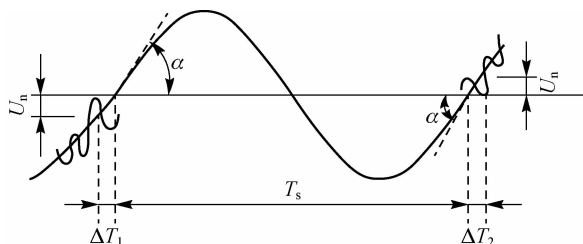


图 5-20 触发误差示意图

测量周期时,闸门信号宽度应准确等于一个输入信号周期。闸门方波是输入信号经施密特触发器整形得到的。在没有噪声干扰时,主门开启时间刚好等于一个被测周期 T_x 。

如图 5-20 所示,当被测信号受到干扰时存在噪声,有可能使触发时间提前 ΔT_1 ,也可能使触发时间延迟 ΔT_2 。若粗略分析,设正弦波形过零点的斜率为 $\tan \alpha$, α 角如图中虚线所标,则得

$$\Delta T_1 = \frac{U_n}{\tan \alpha} \quad (5-21)$$

$$\Delta T_2 = \frac{U_n}{\tan \alpha} \quad (5-22)$$

式中, U_n 为被测信号上叠加的噪声“振幅值”。当被测信号为正弦波,即 $u_x = U_m \sin \omega_x t$, 门控电路触发电平为 U_p , 则

$$\begin{aligned} \tan \alpha &= \left. \frac{du_x}{dt} \right|_{u_x=U_p, t=t_p} = 2\pi f_x U_m \cos \omega_x t_p \\ &= \frac{2\pi}{T_x} U_m \sqrt{1 - \sin^2 \omega_x t_p} = \frac{2\pi}{T_x} U_m \sqrt{1 - \left(\frac{U_p}{U_m}\right)^2} \end{aligned} \quad (5-23)$$

则

$$\Delta T_1 = \Delta T_2 = \frac{U_n T_x}{2\pi U_m \sqrt{1 - \left(\frac{U_p}{U_m}\right)^2}} \quad (5-24)$$

由于一般门电路采用过零触发,即 $U_p = 0$, 因此有

$$\Delta T_1 = \Delta T_2 = \frac{T_x}{2\pi} \cdot \frac{U_n}{U_m} \quad (5-25)$$

在极限情况下,闸门开门的起点将提前 ΔT_1 , 关门的终点将延迟 ΔT_2 , 或者与此相反。根据随机误差的合成,采用方和根合成法可得总的触发误差为

$$\Delta T_n = \pm \sqrt{(\Delta T_1)^2 + (\Delta T_2)^2} = \pm \sqrt{2} \frac{T_x}{2\pi} \cdot \frac{U_n}{U_m} \quad (5-26)$$

若门控信号周期扩大 k 倍,则由随机噪声引起的触发相对误差可降低为

$$\frac{\Delta T_n}{T_x} = \pm \frac{1}{k} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \frac{U_n}{U_m} \quad (5-27)$$

式(5-27)表明,测量周期时的触发误差与信噪比成反比。例如,当 $U_m/U_n = 10$ 时,

$\Delta T_n/T_x = \pm 2.3 \times 10^{-2}$; 当 $U_m/U_n = 100$ 时, $\Delta T_n/T_x = \pm 2.3 \times 10^{-3}$ 。由本例数据计算的结果可更直观地看出, 信噪比越大, 其触发误差就越小。

分析至此, 若考虑噪声引起的触发误差, 则用电子计数器测量信号周期的误差共有三项, 即量化误差 (± 1 误差)、标准频率误差和触发误差。按最坏的可能情况考虑, 在求其总误差时可进行绝对值相加, 即

$$\frac{\Delta T_x}{T_x} = \pm \left(\frac{1}{kT_x f_c} + \left| \frac{\Delta f_c}{f_c} \right| + \frac{1}{\sqrt{2}k\pi} \cdot \frac{U_n}{U_m} \right) \quad (5-28)$$

式中, k 为周期倍乘数。

6. 多周期同步法

多周期测量减小转换误差的原理如图 5-21 所示。因为闸门信号是和被测信号同步后产生的, 所以对周期个数的计数值不存在量化误差。而两相邻周期触发误差所产生的 ΔT 是相互抵消的, 因此平均到一个周期上来说就相当于原来误差的 $1/10$ 。

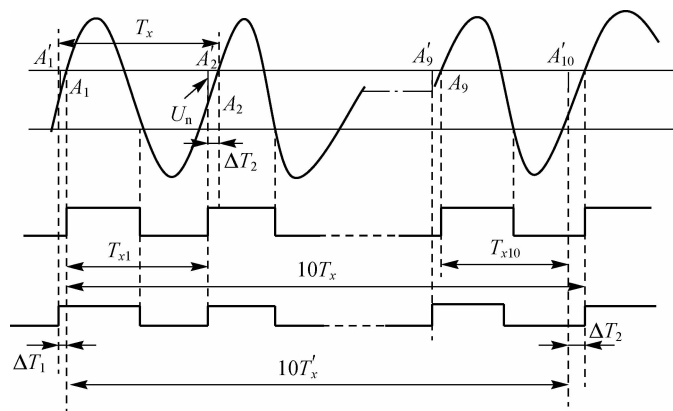


图 5-21 多周期测量减小转换误差的原理

5.3 高分辨率的时间和频率测量技术

5.3.1 多周期同步测量技术

倒数计数器采用多周期同步测量的原理, 即测量输入信号的多个 (整数个) 周期值, 再进行倒数运算而求得频率。倒数计数原理图如图 5-22 所示。

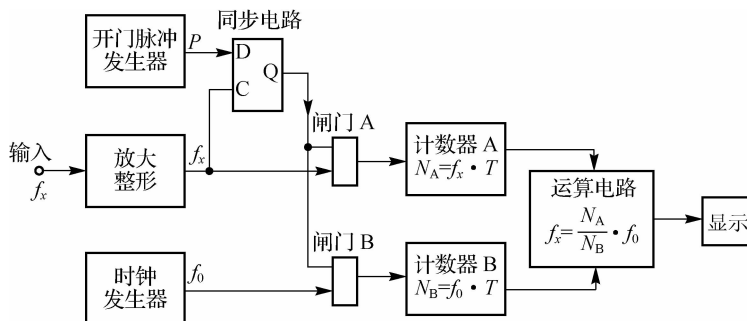


图 5-22 倒数计数原理图

图中, f_x 为输入信号频率, f_0 为时钟脉冲的频率。A、B 两个计数器在同一闸门时间 T 内分别对 f_x 和 f_0 进行计数, 计数器 A 的计数值 $N_A = f_x T$, 计数器 B 的计数值 $N_B = f_0 T_0$ 。由于

$$\frac{N_A}{f_x} = \frac{N_B}{f_0} = T$$

则被测频率 f_x 为

$$f_x = \frac{N_A}{N_B} f_0 \quad (5-29)$$

5.3.2 模拟内插法

内插法是把图 5-23 中的小于量化单位的时间零头 Δt_1 和 Δt_2 加以放大, 再对放大后的时间进行数字化测量。

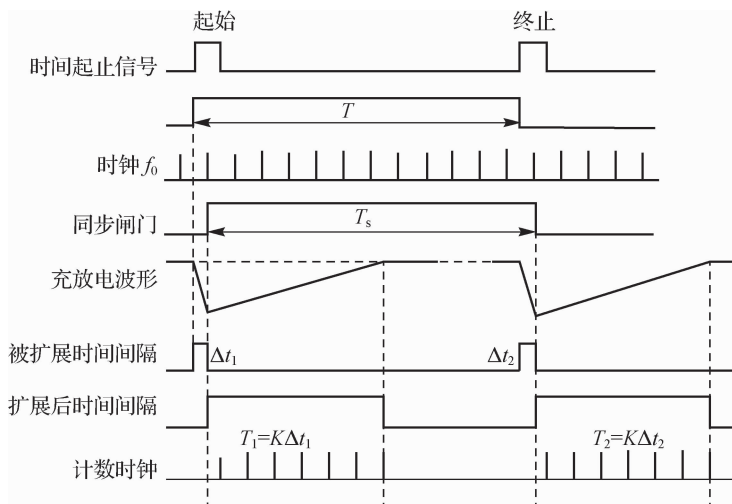


图 5-23 内插法示意图

内插法要对三段时间进行测量, 即要分别测出 T_s 、 T_1 、 T_2 , 如图 5-24 所示。

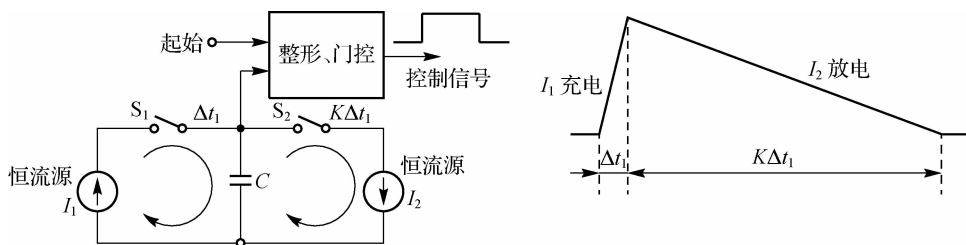


图 5-24 内插时间扩展示意图

在 Δt_1 期间 S_1 闭合, 恒流源 I_1 对电容 C 充电。 Δt_1 结束, S_1 断开, S_2 接通, 恒流源 $I_2 (= I_1 / 1\ 000)$ 对电容 C 放电, 直到起始电平位置, 然后保持此电平。例如, 在测量 Δt_1 的过程中, 可得到如下公式:

$$\frac{I_1 \Delta t_1}{C} = \frac{I_2 T_1}{C}, I_1 \Delta t_1 = \frac{I_1}{1\ 000} T_1, \Delta t_1 = \frac{T_1}{1\ 000}$$

从以上公式可以看出:虽然在测 T_1 、 T_2 时依然存在 ± 1 字的误差,但其相对大小可缩小 1 000 倍,使计数器的分辨率提高了三个数量级。

5.3.3 游标法

游标法使用了两种频率非常接近的时钟信号。两个信号开始计数的时刻不同,其差值就是被测的时间间隔 Δt_1 ,如图 5-25 所示。

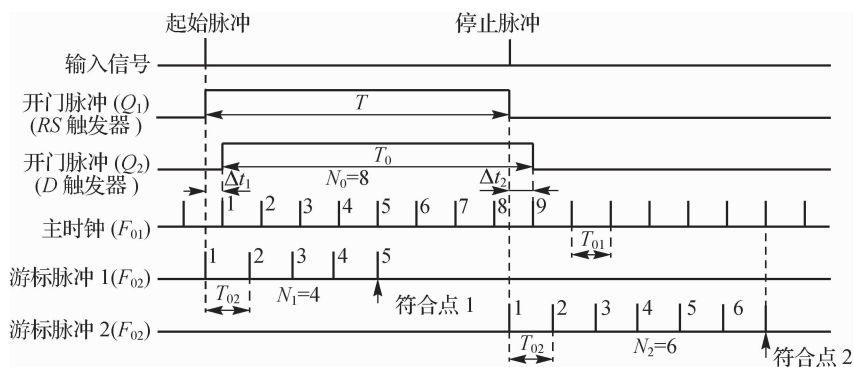


图 5-25 游标法原理图

因为 $F_{01} > F_{02}$,且两者非常接近,故以后的每个周期两时钟之间的间隔都将减少 $T_{02} - T_{01}$ 。当 $\Delta t_1 = N(T_{02} - T_{01})$ 时,经过 N 个周期,两个时钟信号在相位上完全相符,故被测时间间隔为

$$T = T_0 + \Delta t_1 - \Delta t_2 = N_0 T_{01} + (N_1 - N_2)(T_{02} - T_{01}) \quad (5-30)$$

定义扩展系数 K 为

$$K = \frac{T_{01}}{\Delta T_0} = \frac{T_{01}}{T_{02} - T_{01}}$$

由上式得

$$T_{02} = \frac{K+1}{K} T_{01}$$

则式(5-30)可写成

$$T = N_0 T_{01} + (N_1 - N_2) \frac{T_{01}}{K} = (N_0 + \frac{N_1 - N_2}{K}) T_{01} = (N_0 K + N_1 - N_2) \frac{T_{01}}{K} \quad (5-31)$$

由式(5-31)可见,游标法把测时分辨率从直接法的 T_{01} 提高到了 T_{01}/K 。

5.3.4 平均法

在普通的计数器中,由于闸门开启和被测信号脉冲时间关系的随机性,单次测量结果的相对误差在 $-1/N \sim 1/N$ 范围内出现。某一个误差值的出现对于所有的单次测量来说是服从均匀分布的,因而在多次测量的情况下,其平均值必然随着测量次数的无限增多而趋于零。以有限次 n 的测量来逼近理想情况可得

$$\frac{\Delta T_x}{T_x} = -\frac{\Delta f_x}{f_x} = \pm \frac{1}{\sqrt{n}} \times \frac{1}{N}$$

由上式可见,随着测量次数的增加,其误差为单次误差的 $1/\sqrt{n}$ 。

5.4 微波频率测量技术

在微波频率测量中,计数器的最高工作频率是其主要技术指标之一,它决定计数器的计数速度。微波频率测量包括变频法和置换法。

5.4.1 变频法

通用计数器能够直接计数的频率上限一般在 1.5 GHz 以下。要对微波频率的信号进行测量,必须采用频率变换技术将其转换为频率较低的信号,用电子计数器对此低频信号进行计数以获得差频值,再加上已知信号的频率就可得被测信号的实际频率。变频法的原理框图如图 5-26 所示。

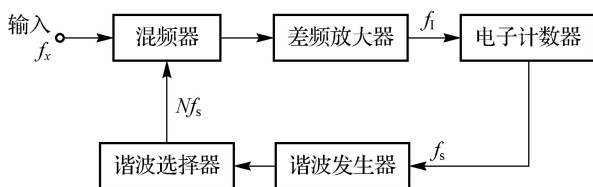


图 5-26 变频法的原理框图

电子计数器主机内送出高精度的标准频率 f_s ,在谐波发生器中产生它的各次谐波。被测信号 f_x 输入时,谐波选择器由低到高地选出标准信号的谐波分量 Nf_s 。被选出的第 N 次谐波使 $f_x - Nf_s$ 处在计数器的计数频率范围内时,计数器开始计数得到差频值。

$$f_x = Nf_s \pm f_1 \quad (5-32)$$

5.4.2 置换法

置换法的原理框图如图 5-27 所示。

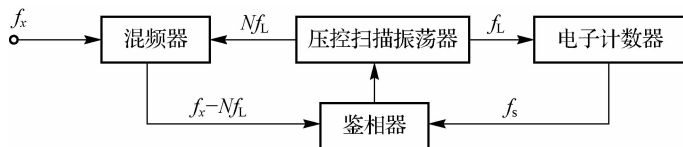


图 5-27 置换法的原理框图

被测频率 f_x 与压控扫描振荡器频率 f_L 的谐波 Nf_L 进行混频,其差频输出 $f_1 = f_x - Nf_L$ 。当 f_L 落在差频放大器的通频带内时,鉴相器的输出电压控制压控扫描振荡器,使它停止扫频,并由锁相环路保证与 f_x 锁定。当锁相环锁定时,被测频率为

$$f_x = Nf_L \pm f_s \quad (5-33)$$

由于置换法应用了锁相电路,其环路增益和整机灵敏度很高。但闸门时间需要扩展 N 倍,因而在同样测量时间的情况下其分辨率比变频法低。

5.5 电子计数器的使用

5.5.1 E-312A 型通用电子计数器的使用方法

1. E-312A 型通用电子计数器的面板

图 5-28 所示为 E-312A 型通用电子计数器面板及控制键示意图。各部分名称和功能如表 5-1 所示。

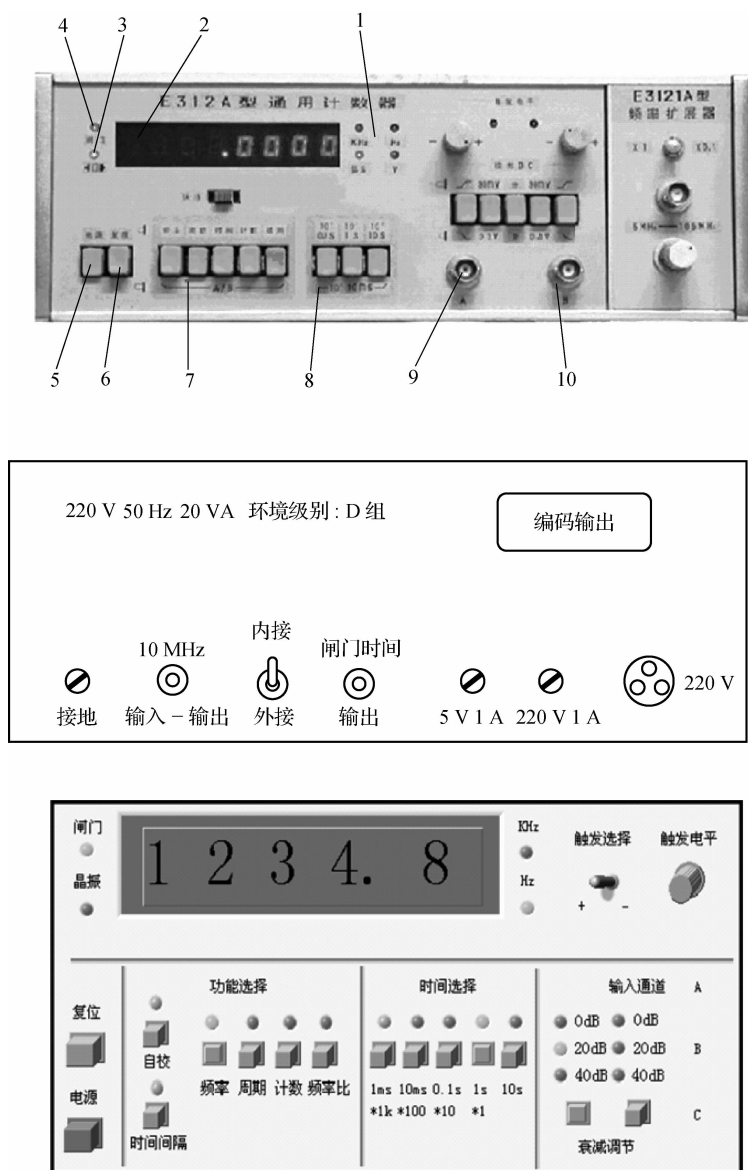


图 5-28 E-312A 型通用电子计数器面板及控制键示意图

1—频率插孔；2—显示器；3—晶振；4—闸门；5—电源开关；6—复位键；
7—功能键；8—倍率键；9—输入 A；10—输入 B

表 5-1 各部分名称和功能

| 名 称 | 功 能 |
|---------|---|
| 电源开关 | 按键开关,按下为机内电源接通,仪器可正常工作 |
| 复位键 | 每按一次,产生一个人工复位信号 |
| 功能选择模块 | 由一个三位拨动开关和五个按键开关组成,当拨动开关处于右边位置时,整机执行自诊功能,显示 10 MHz 钟频,位数随闸门时间不同而不同;当拨动开关处于左边位置时,将拨动前测得的数据保持显示不变(拨动开关处于上述两位置时,五个按键开关失去作用);当拨动开关处于中间位置时,整机功能由五个按键开关的位置决定,五个按键开关完成六种功能的选择:“频率”键按下时,仪器执行频率测量功能;“周期”键按下时,仪器进行周期测量;“时间”键按下时,仪器进行时间间隔测量;“计数”键按下时,仪器进行计数测量;“插测”键按下时,仪器进行功能扩展测量;五个按键开关之间为互锁关系,五个按键中只能按下其中之一,当五个按键全部弹出时,仪器进行频率比测量 |
| 闸门选择模块 | 由三个按键开关组成,可选择四挡闸门和四种倍乘率:“0.1 s(10^1)”键按下时,仪器选通 0.1 s 闸门或 10^1 倍乘;“1 s(10^2)”键按下时,仪器选通 1 s 闸门或 10^2 倍乘;“10 s(10^3)”键按下时,仪器选通 10 s 闸门或 10^3 倍乘;三个键全部弹出时,仪器选通 10 ms 闸门或 10^0 倍乘;至于闸门还是倍乘,应同时结合功能选择而定,频率、自校测量时,选择闸门,周期、时间测量时选择倍乘 |
| 闸门指示 | 闸门开启,发光二极管亮(红色) |
| 晶振指示 | 绿色发光二极管亮,表示晶体振荡器电源接通 |
| 显示器 | 八位七段 LED 显示,小数点自动定位 |
| 单位指示 | 四种单位指示:频率测量用 kHz 或 Hz(Hz 单位供功能扩展插件用);时间测量用 μs ;电压测量用 V(共扩展插件用) |
| A 输入插座 | 频率、周期测量的被测信号,时间间隔测量时的启动信号以及 A/B 测量时的 A 信号均由此处输入 |
| B 输入插座 | 时间间隔测量时的停止信号,A/B 测量时的 B 信号均由此处输入 |
| 分-合键 | 按下时为“合”,B 输入通道断开,A、B 通道相连,被测信号从 A 输入端口,弹出时为“分”,A、B 为独立的通道 |
| 输入信号衰减键 | 弹出时,输入不衰减地进入通道,按下时输入信号衰减为 1/10 进入通道 |
| 斜率选择键 | 选择输入信号的上升或下降沿。按下时,选择下降沿;弹出时,选择上升沿 |
| 触发电平调节器 | 由带开关的推拉电位器组成,通过推拉电位器阻值的调整完成触发电平的调节作用,调节电位器可使触发电平在 $-1.5 \sim +1.5$ V(调节时)连续调节,开关推入为 AC 耦合,拉出为 DC 耦合 |
| 触发电平指示灯 | 表征触发电平的调节状态,发光二极管均匀闪表示触发电平调节正常,常亮表示触发电平偏高,不亮表示触发电平偏低 |
| 内插件位置 | 当插入功能扩展单元时,就能完成插测功能的扩展作用 |

2. E-312A 型通用电子计数器的电路组成

E-312A 型通用电子计数器由输入通道、计数/控制逻辑单元、晶体振荡器、LED 显示器及电源等部分组成,如图 5-29 所示。

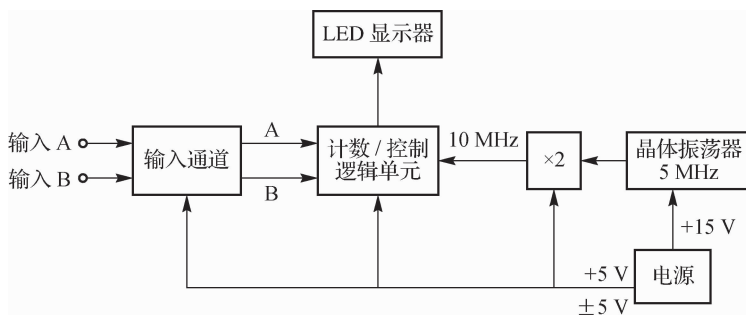


图 5-29 E-312A 型通用电子计数器的电路组成

(1)输入通道。A、B 两个输入通道,每个通道由衰减器、放大器、整形电路和门电路组成,以确保输出与计数电路相适应的脉冲信号。

(2)晶体振荡器。标准信号来源于 5 MHz 的石英晶体振荡器和 $\times 2$ 的倍频电路,为仪器所需的时标信号。

(3)计数/控制逻辑单元。计数/控制逻辑单元是整机的核心电路,它主要由一块大规模集成电路 ICM7226B 组成,其内部包含多位计数器、寄存器、时基电路、逻辑控制电路、显示译码驱动电路及溢出和消隐电路等。它可以直接驱动外接的八位 LED 显示数码管,以扫描形式显示测量结果。该电路具有 8421BCD 码输出、复原输出、记忆输出、段码输出和扫描位脉冲输出,还具有时钟输入、闸门时间(周期倍乘)输入、功能输入、复原输入、保持输入及 A、B 输入功能。其原理框图如图 5-30 所示。

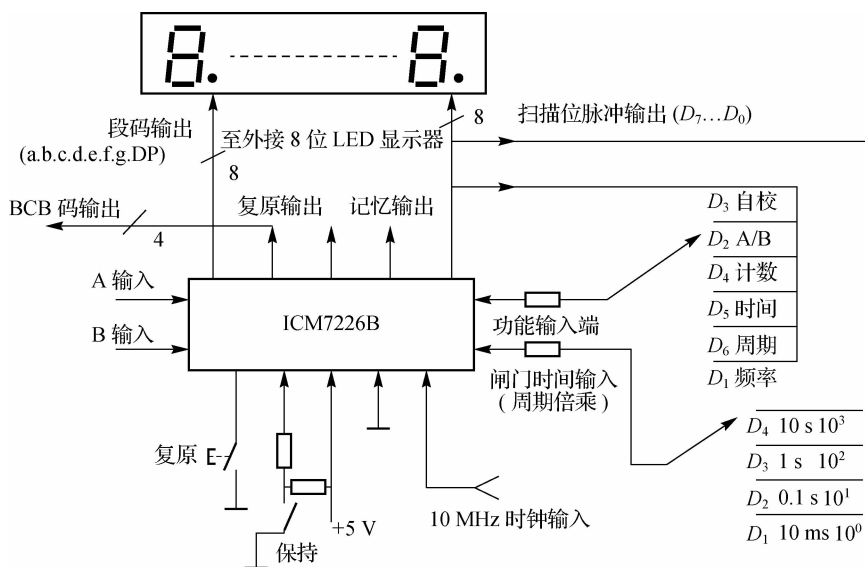


图 5-30 计数/控制逻辑单元的原理框图

3. E-312A 型通用电子计数器的操作方法

1) 测试前的准备

- (1) 当给该仪器通电后,应预热约 2 h,晶振频率的稳定度才能达到规定的指标。
- (2) 仪器使用时要注意周围环境的影响。
- (3) 仪器在进行各种测量前,应先进行自校检查。本仪器内部时钟信号频率固定为 10 MHz,当选择不同闸门时间时,显示结果应符合表 5-2 所示的读数,否则说明仪器存在故障。

表 5-2 电子计数器自校显示值

| 闸门时间 | 10 ms | 0.1 s | 1 s | 10 s |
|------|---------|---------|---------|------------|
| 显示结果 | 10000.0 | 10000.0 | 10000.0 | .0000.0000 |

注:最高位左下角的小数点表示读数溢出。

2) 测量各参数的操作方法

- (1) 频率测量。按下“频率”键为减小误差,可将闸门时间选择较长些。
- (2) 周期测量。按下“周期”键,选择合适的周期倍率,使测量值显示的位数提高就可提高测量精度。
- (3) 频率比测量。将所有键弹开,频率较高的接入 A 插座,频率较低的接入 B 插座,则显示器的数值为被测信号的频率比。
- (4) 计数测量。按下“计数”键,当闸门指示灯灭时停止计数。
- (5) 单信号相邻脉冲的时间间隔测量。按下“时间”键,将通道分合开关置于“合”的位置,被测信号由 A 插座接入,调节 A 通道的触发电平旋钮,此时显示器的数值为被测信号相邻脉冲的时间间隔。
- (6) A、B 两信号间的时间间隔测量。按下“时间”键,测量时,启动信号由 A 插口输入,停止信号由 B 插口输入,调节两通道的触发电平旋钮,此时显示值为两被测信号间的时间。

5.5.2 SP-1500A 型数字频率计

1. SP-1500A 型数字频率计的面板介绍

如图 5-31 所示为 SP-1500A 型数字频率计的操作面板,共分四个区域,左上角区域为数字显示区,显示测量结果;左下角区域为功能键,从左到右依次为电源键、复位键、频率 A 键(用于测量频率)、周期 A 键(用于测量周期)、频率 B 键;右下角区域为输入通道 A;右上角区域为输入通道 B。

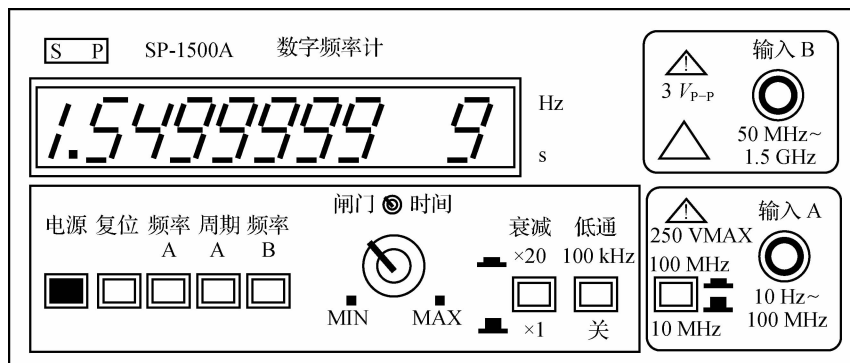


图 5-31 SP-1500A 型数字频率计的操作面板

2. SP-1500A 型数字频率计的基本操作方法

(1) 开机自检。

(2) 测量信号。测量频率时,若频率为 10 Hz~100 MHz,按下“频率 A”开关;测量周期时,按下“周期 A”开关,将输入信号接至通道 A。若频率大于 100 MHz,按下“频率 B”开关,将输入信号接至通道 B。

3. 数字频率计的测量应用

用 SP-1500A 频率计测量黑白电视机行扫描电路的行同步保持范围,如图 5-32 所示。

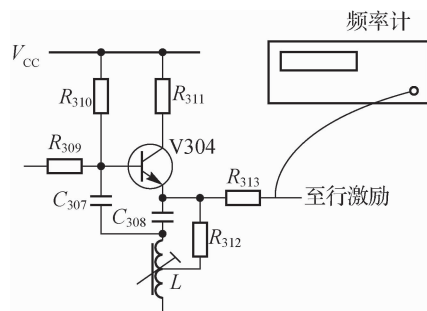


图 5-32 黑白电视机行扫描电路频率测量

(1) 调节行振荡线圈 L ,使频率计 SP-1500A 显示正确的行频(15 625 Hz);同时,电视机屏幕上显示稳定的方格图像(或阶梯灰度图像)。

(2) 调节行振荡线圈 L ,使行频缓慢升高,直到屏幕上的图像出现失步,记下此时的频率值 f_H 。

(3) 调节行振荡线圈 L ,使行频缓慢降低,直到屏幕上的图像再次失步,记下此时的频率值 f_L 。

(4) $f_H - f_L$ 即为行同步保持范围。一般要求 $f_H - f_L > 500$ Hz。

本章小结

(1) 时间与频率是最基本的一个参量。本章首先给出时间和频率的基本概念,以及时间和频率标准的建立。

时间和频率的测量技术经历了一个从模拟到数字的发展过程,从早期的电桥法、谐振法、拍频法等到现在的计数法,测量的精度和范围都有了巨大的提高。电子计数器是应用最为广泛的数字化仪器,也是最重要的电子测量仪器之一。

(2) 电子计数器的基本组成电路有输入电路、计数显示电路(包括十进制计数器、寄存器、译码器及显示电路)、标准时间信号形成电路(包括石英晶体振荡器及分频、倍频电路)和控制电路。

(3) 电子计数器的测量主要有频率测量、周期测量、频率比测量、时间间隔测量、相位差测量、累加计数和计时及自校准。

(4) 电子计数器的测量误差:量化误差、触发误差、标准频率误差。

① 频率测量误差分析。

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

要提高频率测量的准确度,应采取如下措施:

- 扩大闸门时间 T 或倍频被测信号的频率以减小 ± 1 误差。
- 提高晶振频率的准确度和稳定度以减小闸门时间误差。
- 被测信号频率 f_x 较高时,闸门时间误差较小,说明计数测频的误差较小;被测信号频率 f_x 较低时,闸门时间误差较大,说明计数测频的误差较大。所以,在被测信号频率 f_x 较低时,应采用测周期的方法进行测量。

②周期测量误差分析。

$$\frac{\Delta T_x}{T_x} = \pm \left(\frac{1}{kT_x f_c} + \left| \frac{\Delta f_c}{f_c} \right| + \frac{1}{\sqrt{2}k\pi} \frac{U_n}{U_m} \right)$$

为了减小测量误差,可以减小 T_c (增大 f_c),但这受到实际计数器计数速度的限制。在条件许可的情况下,应尽量使 f_c 增大。另一种方法是把 T_x 扩大 k 倍,形成的闸门时间宽度为 kT_x ,以它控制主门开启,实施计数。

对某信号使用测频法和测周期法测量频率,两者引起的误差相等,则该信号的频率定义为中界频率,记为 f_z 。

(5)高分辨率时间和频率测量技术。

①多周期同步法的原理。

②模拟内插法和游标法。

③平均法。

(6)微波计数器:变频法和置换法。

①变频法的特点:谐波 Nf_s 幅度低,灵敏度低,但分辨力高。

②置换法的特点:锁相环路增益高,灵敏度高,分辨力较差。

(7)典型仪器使用。

习 题

5.1 通用电子计数器主要由哪几部分组成?简述各部分的作用。

5.2 简述通用电子计数器测量频率、频率比、周期、时间间隔、累加计数及自校准功能的基本原理。

5.3 分析通用计数器测量频率和周期的误差,简述减小误差的方法。

5.4 当采用电子计数器测量频率为 200 Hz 的信号时,如果分别采用测频(闸门时间为 1 s)和测周期(时标为 0.1 μ s)两种方法,请分析这两种方法所产生的量化误差。

5.5 用电子计数式频率计测量 1 kHz 的信号,当闸门时间分别为 1 s 和 0.1 s 时,试比较两种方法由 ± 1 误差引起的相对误差。

5.6 利用计数器测频,已知内部晶振频率 $f_c = 1$ MHz, $\Delta f_c / f_c = \pm 1 \times 10^{-7}$,被测频率 $f_x = 100$ kHz,若要求 ± 1 误差对测频的影响比标准频率误差低一个量级(为 $\pm 1 \times 10^{-6}$),则闸门时间应取多大?若被测频率 $f_x = 1$ kHz,且闸门时间保持不变,上述要求能否满足?

5.7 简述外差法变频技术。

5.8 数字频率计主要由哪几部分组成?简述其工作原理。

5.9 当电子计数器测量频率时,若闸门开启时间 T 和计数值 N 如表 5-3 所示,计算 f_x 。

表 5-3 电子计数器的频率测量表

| | | | | | |
|-------|-----------|---------|--------|-------|------|
| T | 10 s | 1 s | 0.1 s | 10 ms | 1 ms |
| N | 1 000 000 | 100 000 | 10 000 | 1 000 | 100 |
| f_x | | | | | |

5.10 某计数式频率计测频率时闸门时间为 1 s,测周期时倍乘最大为 $\times 10\ 000$,晶振最高频率为 10 MHz,求中界频率。