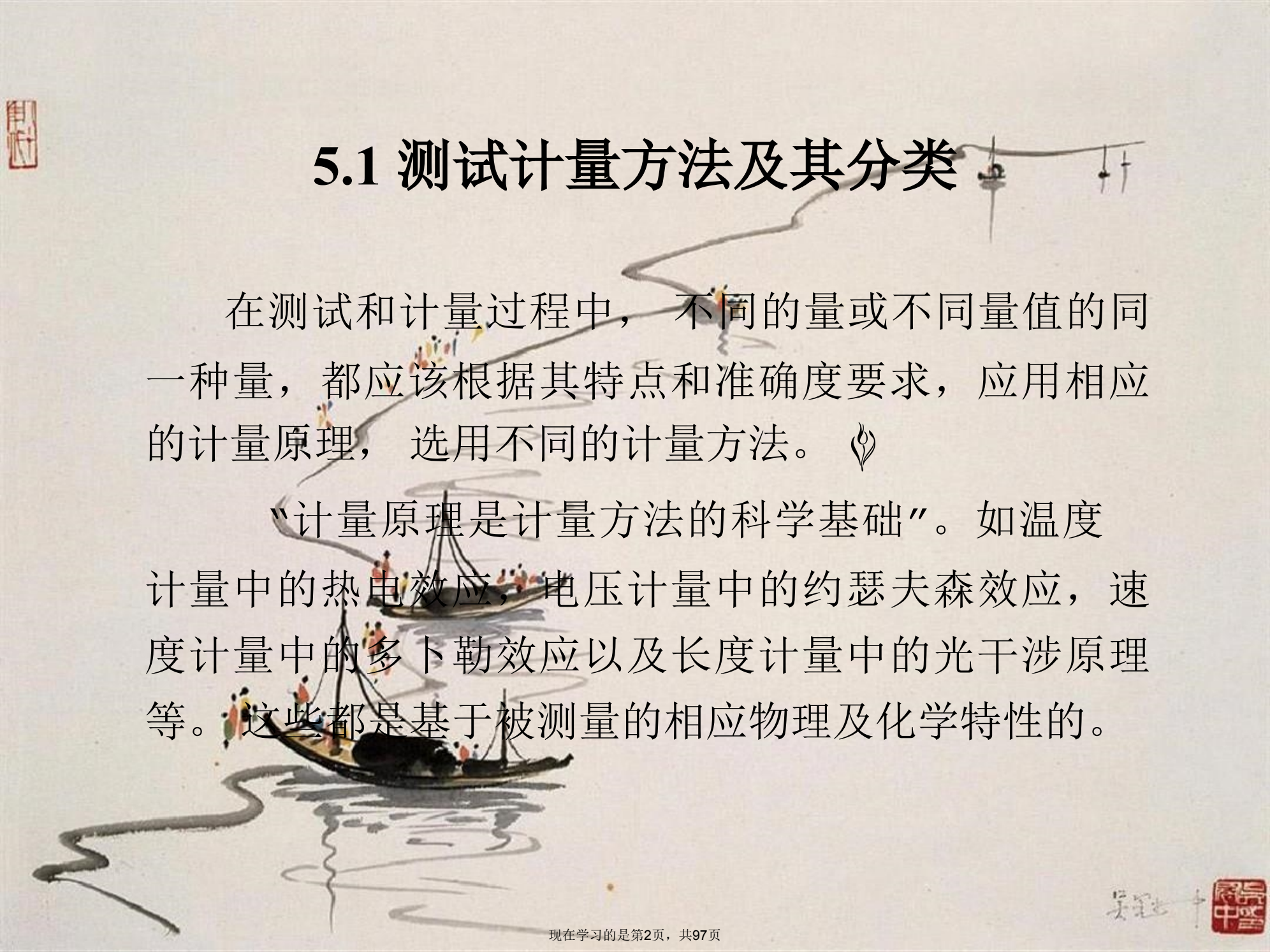




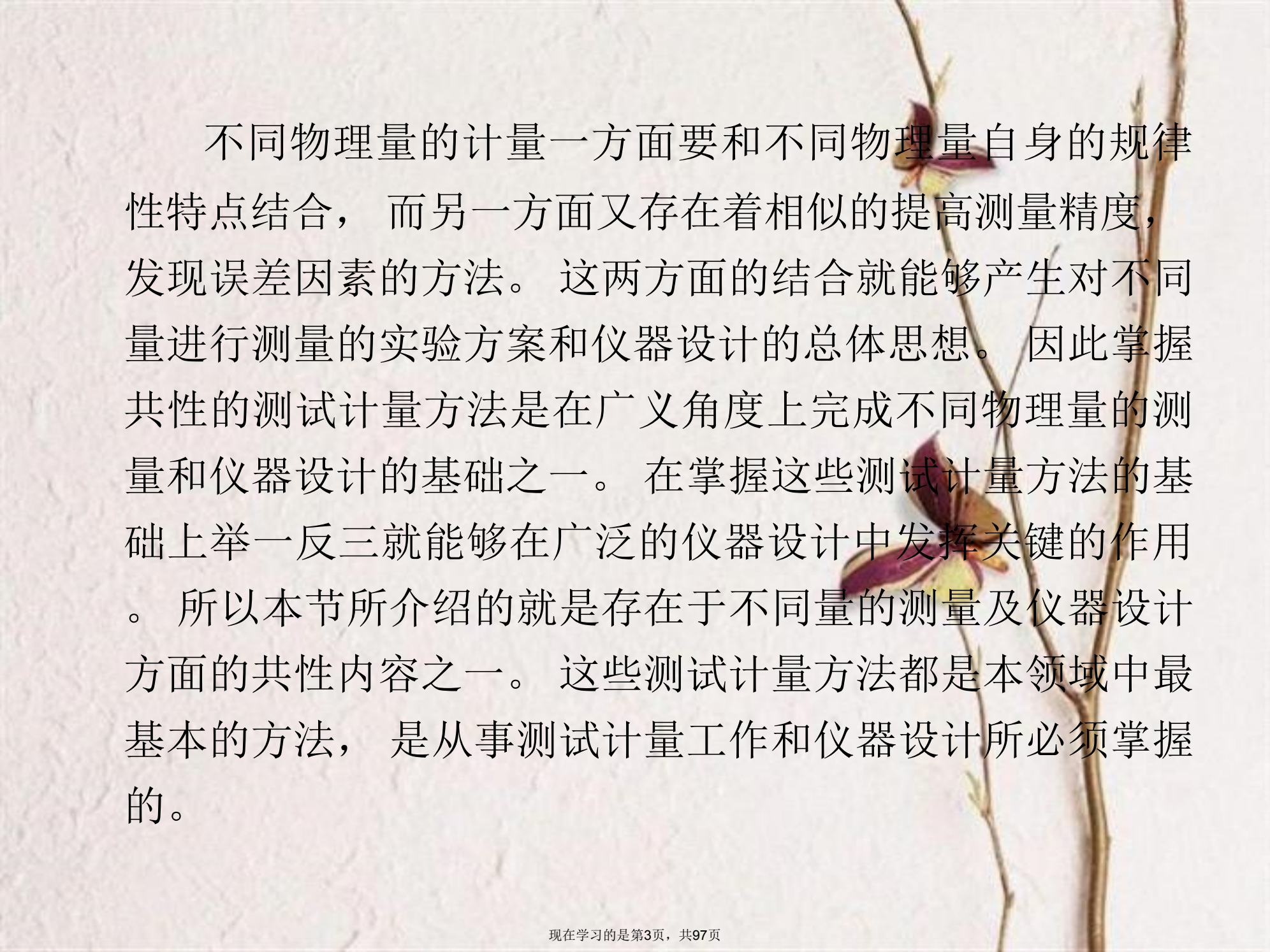
测试与计量方法




5.1 测试计量方法及其分类

在测试和计量过程中，不同的量或不同量值的同一种量，都应该根据其特点和准确度要求，应用相应的计量原理，选用不同的计量方法。🔥

“计量原理是计量方法的科学基础”。如温度计量中的热电效应，电压计量中的约瑟夫森效应，速度计量中的多卜勒效应以及长度计量中的光干涉原理等。这些都是基于被测量的相应物理及化学特性的。



不同物理量的计量一方面要和不同物理量自身的规律性特点结合，而另一方面又存在着相似的提高测量精度，发现误差因素的方法。这两方面的结合就能够产生对不同量进行测量的实验方案和仪器设计的总体思想。因此掌握共性的测试计量方法是在广义角度上完成不同物理量的测量和仪器设计的基础之一。在掌握这些测试计量方法的基础上举一反三就能够在广泛的仪器设计中发挥关键的作用。所以本节所介绍的就是存在于不同量的测量及仪器设计方面的共性内容之一。这些测试计量方法都是本领域中最基本的方法，是从事测试计量工作和仪器设计所必须掌握的。

测试计量方法的选择要求从测量精度、测量的量程范围、测量的响应时间以及所要设计的方案或仪器造价等多方面来考虑。 

采用不同的测量方法，由实验结果中所包含的误差成分与对被测量的测量误差的关系是不会完全一样的。从测量的高精度考虑，常常希望从直接实验精度并不一定很高的实验结果中得到对被测量的高得多的测量精度。



5.2 直接计量法和间接计量法

“不必对与被计量量有函数关系的其他量进行计量，而能直接得到被计量量值的计量方法”称为“直接计量法”。也就是说，计量结果可由实验操作直接获得，可用公式表示如下：

$$A=X \quad (5.2.1)$$

式中，A为被计量的量值；X为由实验直接得出的结果。用传感器线性地将被测量转换成电量或数字量显示的方法可以在式(5.2.1)的基础上理解为直接计量法。

这种测量方法的测量误差为

$$\Delta A = \Delta X \quad (5.2.2)$$

从该式可以看出，实验结果中的误差被100% \textcircled{P} 地转换为对被测量的测量误差，这就是这种方法的测量精度常常并不太高的原因。

在进行直接比较计量时，计量器具直接给出被计量的量值。在进行高精度计量或测试时，为了能对计量结果中所含的系统误差加以消除，需要作补充计量来确定影响量的值。

即使这样，这类计量仍属直接计量法。直接计量法是特征最明显且采用最多的一种测试计量方法。这种方法所获得的测量结果很直接、方便，使用的设备不一定很复杂，而且在大多数情况下其测量的范围可以很宽，还不存在时间响应的问题。



但是在大多数情况下，得到的测量精度并不一定是最高的。在测量和仪器的设计中，常常存在这样的矛盾，有时取得高的测量精度要以牺牲测量的时间响应或者测量的范围为代价。因此，测量方案的选择要进行多方面考虑和折中。🔥

直接计量法的典型例子是用数字频率计测量频率。在图5.2.1所示的频率计方框图中，把标频晶体振荡器所产生的准确和稳定的频率信号分频产生准确的时基信号（如秒信号），并用它控制一个闸门。被测信号经过该闸门后，由计数器计数。当时基信号为1s时，所计数的结果就严格等于被测信号的频率值。

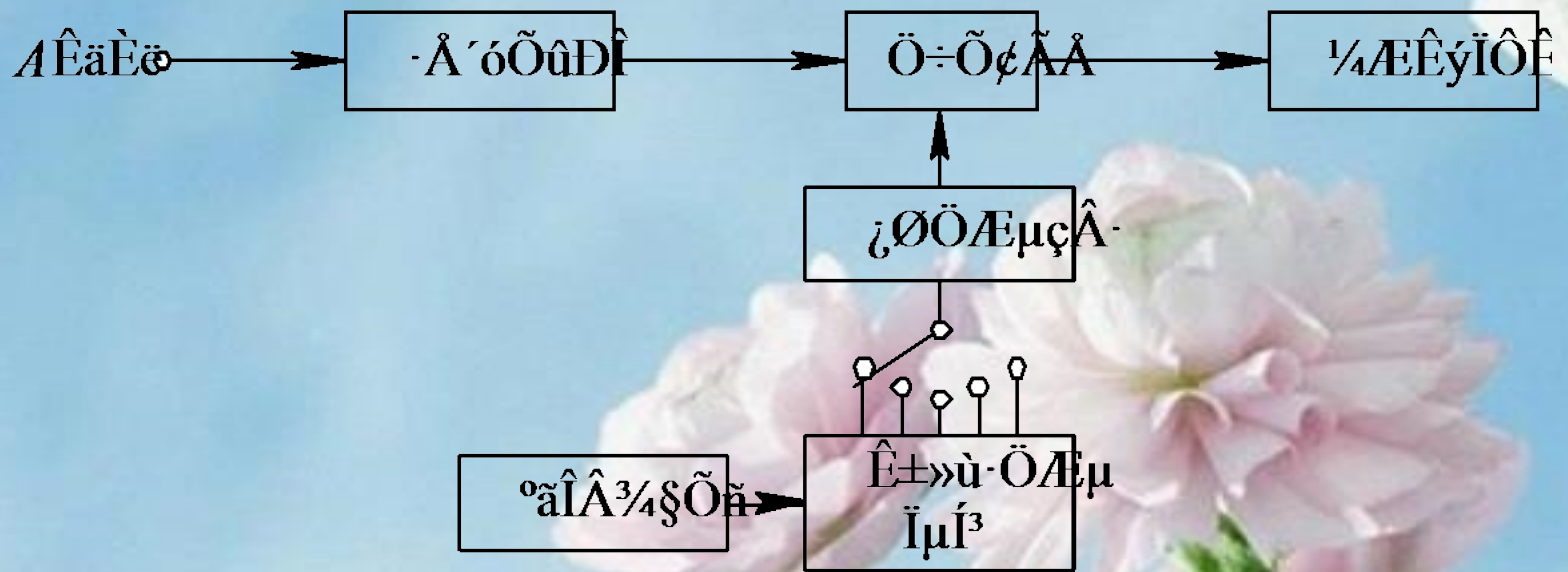


图5.2.1 使用直接计量法的数字频率计


“通过对与被计量量有函数关系的其他量的计量，以得到被计量量值的计量方法”称为“间接计量法”。被计量值可由下式求出：

$$A=F(X_1, X_2, X_3, \dots) \quad (5.2.3)$$

式中，A为被计量的量值； X_1 ， X_2 ， X_3 为可直接计量的量值。

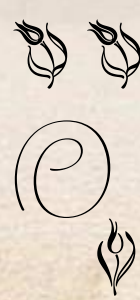
间接计量法在计量学中有着特别重要的意义，主要用于导出单位，如压力、流量、速度、重力加速度、功率等量的单位量值的复现。


在一些测量仪器中也常常通过中间量的测量，并经过计算而得到被测量的值，这样获得的精度可能会更高一些。因此间接计量法在高精度测试和计量中常被选用。



对于精度的提高情况可以通过对相应函数关系式的分析得到。也就是说，首先要建立被测量与各中间量之间的数学模型，以发现中间量的值对被测量精度的贡献。

比如在频标比对中，直接测频法的精度不高。但是由于频标比对都是在两比对频率信号频率值很接近的情况下来完成测量工作的，所以通过频标信号间相位差变化量的测量可以用公式


$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta T}{\tau}$$

(5.2.4) 

算出被测信号的相对频差，并且随着比对时间的延伸而获得很高的测量精度。式（5.2.4）中， ΔT 是两信号之间的相位差变化量， τ 是发生该变化所用的时间。其误差公式是

$$\begin{aligned} \delta \left| \frac{\Delta f}{f} \right| &\leq \left| \frac{\delta(\Delta T)}{\tau} \right| + \left| \frac{\Delta T}{-\tau^2} \right| \cdot |\delta\tau| \\ &= \left| \frac{\delta(\Delta T)}{\tau} \right| + \left| \frac{\Delta f}{f} \right| \cdot \frac{|\delta\tau|}{\tau} \end{aligned} \quad (5.2.5)$$

式中的右边第二项是误差的次要成分。只要两比相频率源的频率值比较接近，并适当照顾到对采样周期 τ 的测量或控制精度，则该项误差与第一项相比就可以忽略不计。该式右边的第一项是误差的主要成分。从式（5.2.5）中可以看出，测频的精度随着比相时间的延长，以及对相位差测试精度的提高而提高。🔥

这里直接被测的中间量是 $\Delta T = T_2 - T_1$ 及 τ ，其中 T 是相位差（时间间隔），而 τ 是发生 ΔT 变化所用的时间。 τ 可以从秒、分、小时直至天。而对高精度频率源， ΔT 的变化范围常常是微秒或纳秒。

两信号间的频差不一样， ΔT 的变化范围也不一样；比相信号频率值的高低不同，测量的分辨率也不一样。如在10MHz(⊙)的频率下比相时，两信号间相位差变化范围为0~100 ns。如果能获得对100ns的1%的分辨率($\delta(\Delta T)$)，就能够获得对 $\Delta f/f_0$ 的相当高的精度(如 1×10^{-9} ✿/秒、 3×10^{-13} ✿/小时和约 1×10^{-14} ✿/天等)。这是只用一般直接测频的方法难以达到的精度。这种情况下的仪器并不一定复杂，但应该符合一定要求。从对上述比相法的分析中，也可以看到对于不同测量目的的测量方法确立其相应数学模型并进行分析的重要性。通过这样的分析可以确定实际可获得的测量精度、直接测量对象、简化仪器及其设计的途径等。

比相法测量频率的仪器方框图如图5.2.2所示。可以看到，这种设备的复杂程度并不比直接进行计数测频的仪器复杂。🔥

用比相法获得的相位差比对结果的示意图如图5.2.3所示。



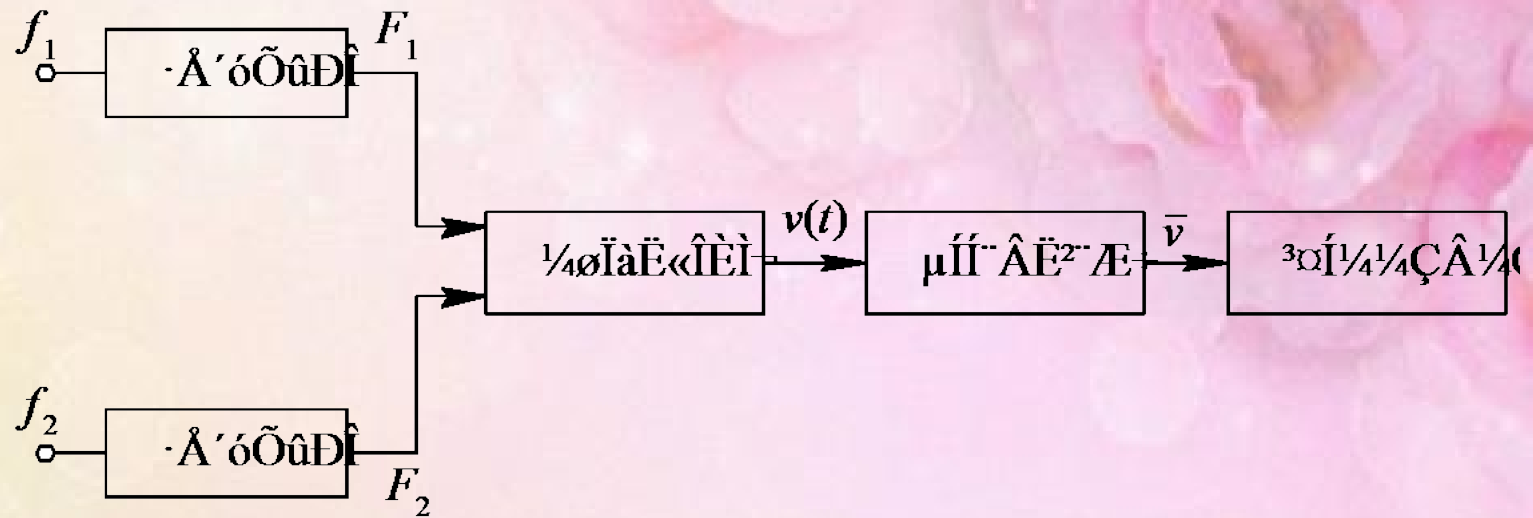


图5.2.2 比相法测量频率的仪器方框图

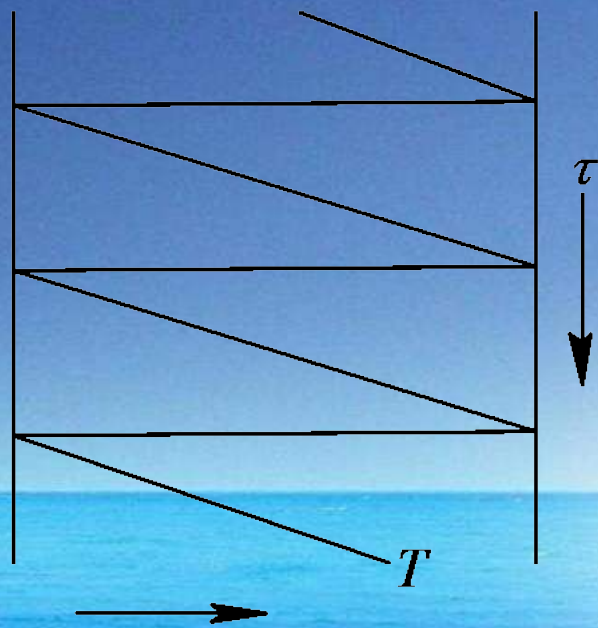


图5.2.3 相位差对比结果的示意图



全面分析某些间接测量方法和直接测量方法的特点，也可以看到有时候高精度的获得要牺牲测量范围。比如，用计数器直接测频，虽然测量精度比较低，但是测量的频率范围只受计数速度的限制，且是宽频率范围的。但是，用了间接比相法测量时，精度得到了大幅度的提高，而比对只能在同频或者频率关系成倍数的情况下进行。🔥



5.3 基本计量法和定义计量法

关于计量方法的选择也可以通过对被计量量值的定义及它与一些有关基本量间的联系来确定。🔥

“通过对一些有关基本量的计量，以确定被计量量值的计量方法”称为“基本计量法”，有些书中也称其为“绝对计量法”。由定义可知，基本计量法实为间接计量法的一种。

“根据量的单位定义计量该量的方法”称为“定义计量法”。这是按计量单位的定义复现其量值的一类方法，适用于基本单位和导出单位。应该注意的是，按定义复现单位并不完全局限于建立基准，它可能有多种方法和不同准确度的结果。



例如,按照新的米定义,可以用三种方法、多种激光辐射来复现;又如伏特基准,可以用饱和惠斯顿标准电池,也可以利用约瑟夫森效应来复现。实际测量中,最有代表性的是根据欧姆定律中电阻和电压及电流之间的关系 $R=U/I$,通过电压和电流的测量计算获得对应的电阻值。





5.4 直接比较计量法和替代计量法


“将被计量量直接与已知的同一种量相比较的计量方法”被称为“直接比较计量法”。

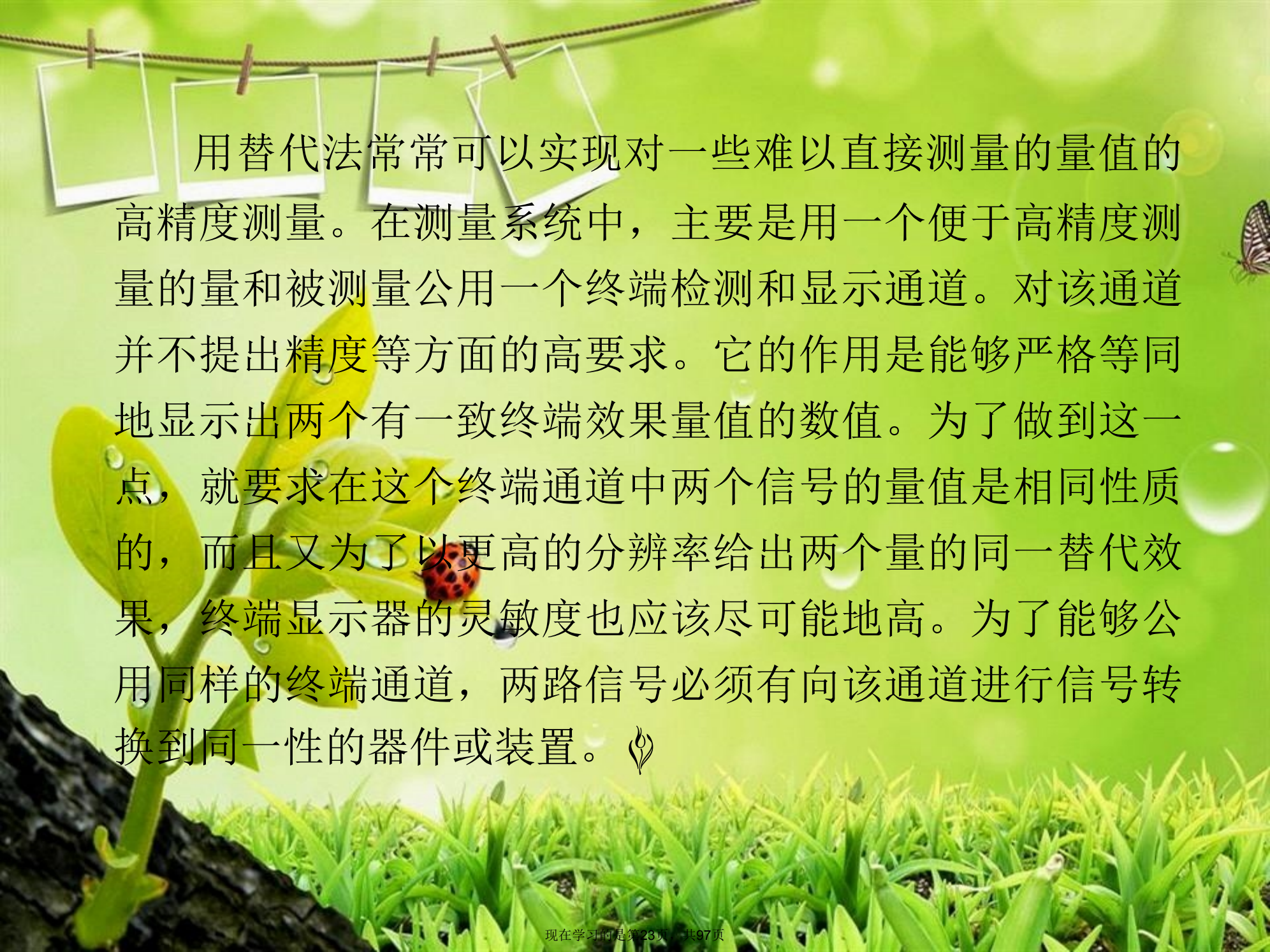
这种方法在计量和工程测试中被普遍应用。这种方法有两个特点：一是相比较的两个量必须是同一种量；二是计量时必须用比较式计量器具。因此，许多误差分量由于与标准器同方向增减而相互抵消，从而能获得较高的计量准确度。要创造能相互比较的条件，常常需要限制两比较量的数值范围（如量值接近或成一定的比例关系等），这也是直接比较计量法在#@测量的随意性和范围方面受到限制的因素。

“用选定的且已知其值的同一种量替代被计量量，并使作用于指示装置的效应相同的计量方法”称为“替代计量法”。例如，在天平上用已知其质量的砝码替代被计量物体，以求其质量的“波尔特”法为典型的替代计量法。这里所说的“作用于指示装置的效应”可以理解为仪器的示值。因此，砝码的质量就是被计量物体的质量，而且消除了由于天平的不等臂性所带来的一般不容易计算的误差。

在电子测量中替代法也有广泛的应用。在测量条件不变的情况下，用一个标准已知量替代被测量，并调整标准量使仪器的示值相同，于是被测量就等于标准量的相应标称值。

因为在替代过程中，测量电路和仪器的工作状态及示值均保持不变，故测量中的恒定系统误差对测量结果不产生影响。测量精度主要取决于已知标准量的正确度及指示仪器的灵敏度。  

这方面最典型的例子是在交流电压测量中以热电偶作为转换器件时的直流对交流的替代法计量。这可以消除对交流或交流转换信号指示器的误差。由于热电偶的输出电势只与热丝吸收的功率有关，而与低频频率无关，当同一热电偶对一低频电压和一直流电压的输出电势相同时，直流电压值就准确地等于被测交流电压的有效值。而直流电压值可以通过直流数字电压表准确地测得。 



用替代法常常可以实现对一些难以直接测量的量值的高精度测量。在测量系统中，主要是用一个便于高精度测量的量和被测量公用一个终端检测和显示通道。对该通道并不提出精度等方面的高要求。它的作用是能够严格等地显示出两个有一致终端效果量值的数值。为了做到这一点，就要求在这个终端通道中两个信号的量值是相同性质的，而且又为了以更高的分辨率给出两个量的同一替代效果，终端显示器的灵敏度也应该尽可能地高。为了能够公用同样的终端通道，两路信号必须有向该通道进行信号转换到同一性的器件或装置。🔥

这种装置或者是针对两路信号，或者是仅仅针对被测信号的。为了实现这样的转换，一些特殊的器件，尤其是针对不同被测量的转换器件必须能够掌握。以下，通过实际的替代法的应用实例来说明这种方法对于其他方法所不易获得高精度的精密测量，以及系统中各部分对测量的影响。

替代法的典型应用是用能够高精度测量的直流信号替代交流信号来实现对交流有效值的高精度测量。为了实现替代，就必须实现同一性的转换。也就是，能够把交直流信号转换成相应于它们有效值的量，通过对该量的检测求出被测量。这里，热效应转换使用方便、准确度高，获得了普遍应用。应用这种效应做成的转换器件是热电偶。

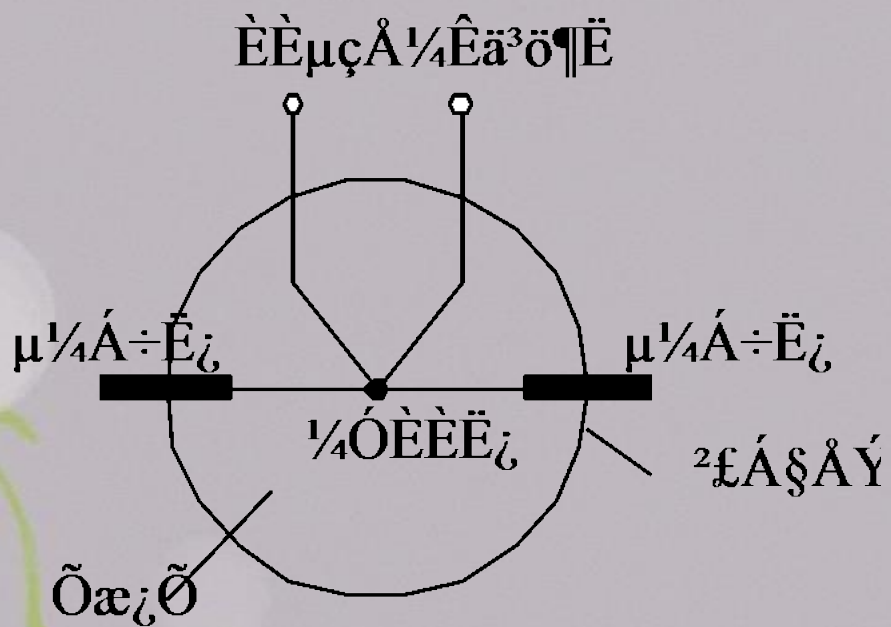


图5.4.1 真空单元热电偶

图5.4.1所示的是一种常用的真空单元热电偶。实际计量时，轮流将交流电流及直流电流通入加热丝。如果在这两种情况下热电偶输出的热电势相等，就认为加热丝的发热量相同，即交流电流的有效值等于直流电流的数值。因此，只要计量出直流电流，就可得出相当的交流电流的有效值。在计量交流电压的有效值时，可用电阻元件将交流电压转换成交流电流后再计量。

加热丝的额定电流约为数十毫安，而且只有在接近额定值时才能得到较好的效果。为了使热电偶适用于计量不同量值的电流和电压，需用电阻分流器、分压器或感应耦合比例器件扩展热电偶的量限。一般常将热电偶和扩展量程的附件组装在一起，组成热电比较仪。其不确定度为 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 。



在电子计量中的低频电压的频段一般覆盖从几赫兹到1 MHz左右的频率范围。在这个频段内用真空热电偶作转换元件的交直流转换标准的准确度最高。这种热电偶的输出电势仅与热丝吸收的功率有关，与低频频率无关。因此把一低频电压和直流电压先后加到同一真空热电偶，如果它的输出电势相等，所加的两个电压也相等。其原理如图5.4.2所示。



在低频电压标准中，影响准确度的主要因素是热电偶的制造工艺不完善，它会引起热电偶直流正反向误差、交直流转换误差和频响误差等。应该对此采取相应的措施。🔥


在这种替代法对交流电压和电流的测量中，对真空热电偶在交、直流两种输入情况下的输出电势的测量只要求严格的相等，而并不要求对它的测量精度很高。所以所用电势测量的仪器只要求有高的稳定度和一定范围的灵敏度就可以了。此时，是用对直流量进行测量用的直流数字电压或电流表来等效被测交流量的有效值的。真正反映测量精度的就是这个直流表的精度。

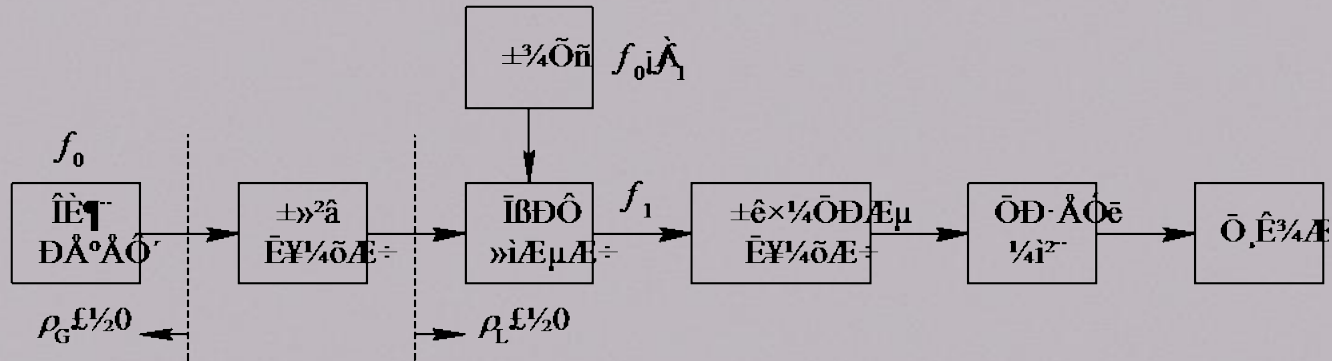
对于直流量的测量可以获得比直接测量交流量高得多的精度。这就是此处替代法能够获得高精度的原因。

在射频直至微波频段，衰减的直接测量是很困难的。在这种情况下，替代法发挥了很重要的作用。这里可以使用的有直接替代法和中频替代法。在各种替代法中，中频替代法是最重要的，其优点是量程大，准确度高，因此虽然系统比较庞大，操作也较复杂，但目前仍是用得最广泛的衰减计量方法。中频替代法的基本工作原理是将射频信号（被测衰减器的工作频率）通过外差混频线性地变成固定的中频信号。然后用工作于该中频的标准衰减器对被测衰减器进行替代，以得出被测的衰减值。中频替代法按工作方式有串联和并联两种（见图5.4.3）。

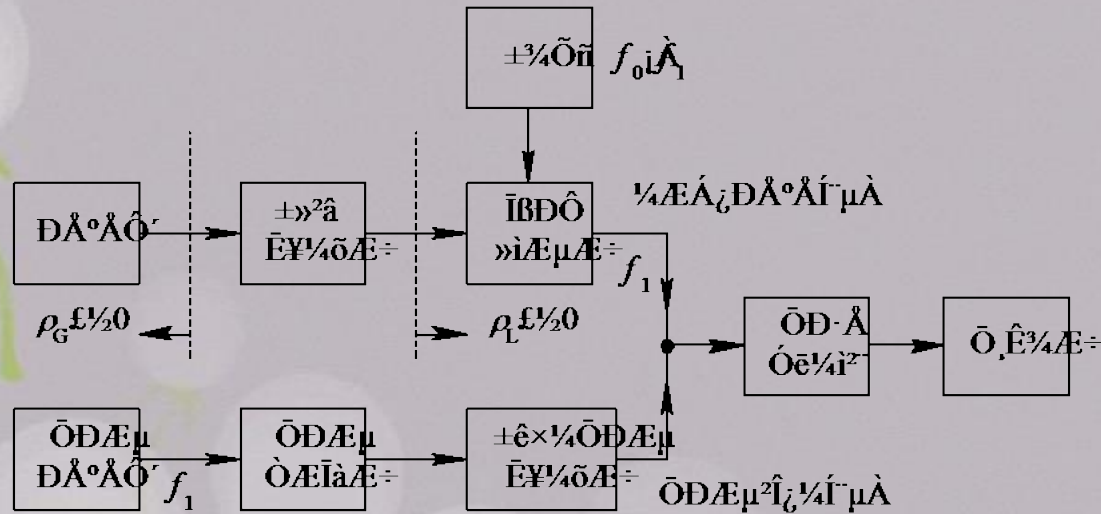
串联中频替代法比并联中频替代法的设备简单，操作也比较方便。但信号源和接收机的任何不稳都会导致较大的计量误差。若用截止衰减器作为标准衰减器，则由于起始段（20~30）有相当大的非线性，必然会缩小计量系统的量程。并联替代法系统比较复杂，比串联替代法多用的一个中频信号源也会造成新的误差，但比起前者它量程更宽，所以应用更广泛。🔥

中频替代法只是使用了仅仅对被测量的同一性转换，把它转换成与替代量性质相同的量（中频），并在该量的背景下通过替代量的增、减来补偿被测量的减、增使得最终的显示器件上的显示值保持严格不变。这里要注意的是，被测衰减器和标准衰减器常常是用开关转换进行衰减量的步进式变化的。

衰减量可以有 $n \times 10$ dB、 $n \times 1$ dB等选择。标准衰减器还常常包括了更精细的带刻度的连续衰减的调节。工作中频下的标准衰减器可以保证比工作在更高频率下的被测衰减器容易有更高的精度。这样，在测量过程中，先在有被测衰减器加入衰减而标准衰减器没有加入衰减的情况下调节中频放大部分的增益，使得显示器有一个合适的显示值。然后逐渐撤掉被测衰减器的衰减，而在同时加入对等的标准衰减器的衰减保持不变。那么所加入的标准衰减器的衰减值就等于被测衰减器原来在测量通道中所加入的衰减值。 



(a)



(b)

图5.4.3 中频替代法工作原理方框图

(a) 串联中频替代法计量衰减原理图；

(b) 并联中频替代法计量衰减原理图

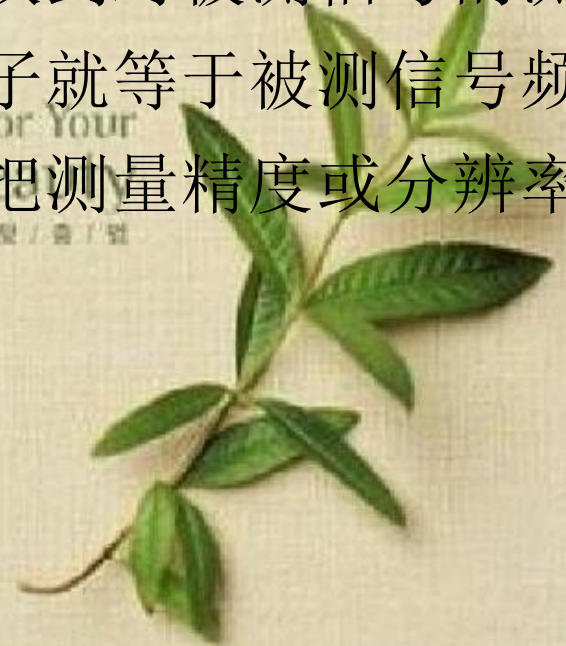


5.5 微差计量法和符合计量法

1. 微差计量法

“将被计量量与同它的量值只有微小差别的同一种已知量相比较，并计量出这两个量值之差的计量方法”称为“微差计量法”。它常用于计量和工程测试。由于两个相比较的量处于相同条件下，因此，各个影响量引起的误差分量可自动作局部抵消或基本上全部抵消，从而提高了计量准确度。微差计量法的误差来源主要有两个：一是标准器本身的误差，二是比较仪的示值误差。

微差计量法直接测量的是两比对量之间的微小差值，所以常常可以用测量精度相对低的测量设备获得高得多的测量精度。其中最典型的例子是频率测量中的差拍测量周期法。当两个频率值相近的频标信号混频后再测量其差拍周期值时，对差拍周期的测量精度反映到对被测信号的测量精度时提高了一个倍增因子。该因子就等于被测信号频率与差拍信号频率的比值，常常可以把测量精度或分辨率提高数万到上百万倍。



设被测量为 x ，和它相近的标准量为 B ，被测量与标准量之微差为 A ， A 的数值可由指示仪表读出，则



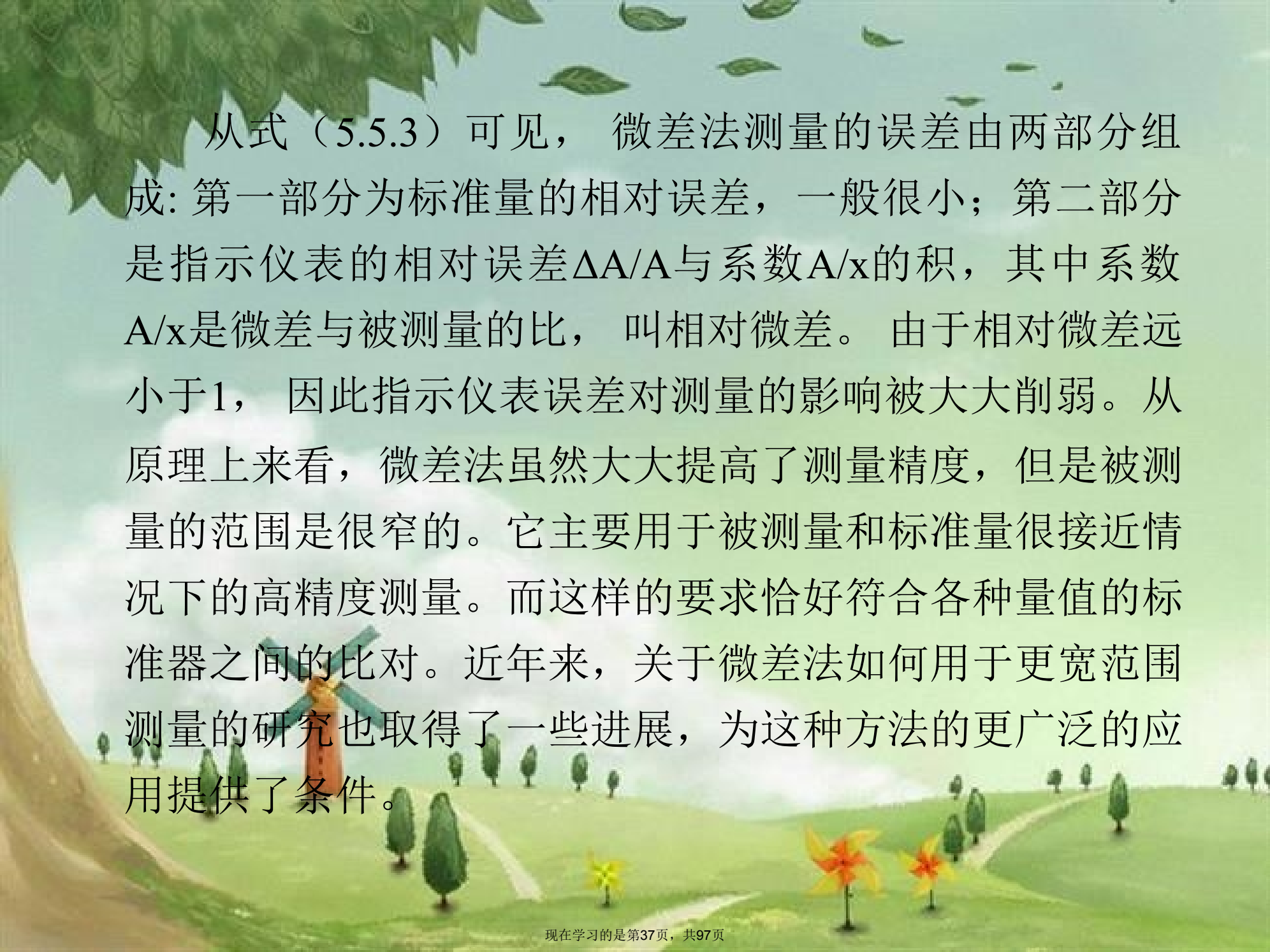
$$x=B+A \quad (5.5.1)$$

因为

$$\frac{\Delta x}{x} = \frac{\Delta B}{x} + \frac{\Delta A}{x} = \frac{\Delta B}{A+B} + \frac{\Delta A}{x} \cdot \frac{\Delta A}{A} \quad (5.5.2)$$

又由于 A 远小于 B ，所以 $A+B \approx B$ （这也是微差法的条件），从而可得测量误差为

$$\frac{\Delta x}{x} = \frac{\Delta B}{B} + \frac{\Delta A}{x} \cdot \frac{\Delta A}{A} \quad (5.5.3)$$



从式(5.5.3)可见, 微差法测量的误差由两部分组成: 第一部分为标准量的相对误差, 一般很小; 第二部分是指示仪表的相对误差 $\Delta A/A$ 与系数 A/x 的积, 其中系数 A/x 是微差与被测量的比, 叫相对微差。由于相对微差远小于1, 因此指示仪表误差对测量的影响被大大削弱。从原理上来看, 微差法虽然大大提高了测量精度, 但是被测量的范围是很窄的。它主要用于被测量和标准量很接近情况下的高精度测量。而这样的要求恰好符合各种量值的标准器之间的比对。近年来, 关于微差法如何用于更宽范围测量的研究也取得了一些进展, 为这种方法的更广泛的应用提供了条件。

2. 符合计量法

“用观察某些标记或信号相符合的方法，来计量出被计量值与作为比较标准用的同一种已知量值之间微小差值的一种计量方法”称为“符合计量法”(简称符合法)。用游标卡尺计量零件尺寸就是应用这种计量原理。根据游标上的刻线与主尺上的刻线是否相符合来确定零件的尺寸。

零示法是符合计量法的一个特例。它是在测量中使被测量对指示器的作用与标准量对指示器的作用相互平衡，以使指示器示零的一种比较测量方法。其优点是可以消除指示器不准所造成的系统误差。如电子测量中的各种电桥法就是以这种方法为基础，通过电桥的平衡而根据桥路中各参考器件的值算出被测器件的值的。

图5.5.1是用零示法测量未知电压的电路。其中， E 是标准直流电压； R_1 和 R_2 构成标准可调分压器； G 是检流计。通过调整分压比，使 $U=ER_2/(R_1+R_2)$ 等于被测电压 U_x ，这时，检流计的示值为零，被测电压的数值就等于上述的分压电压值。

测量精度取决于标准直流电压的精度、检流计的灵敏度以及电阻分压器的指示精度。在平衡状态下，检流计支路不对 R_2 起负载作用，不影响分压比。测量结果也与检流计本身的精度无关。

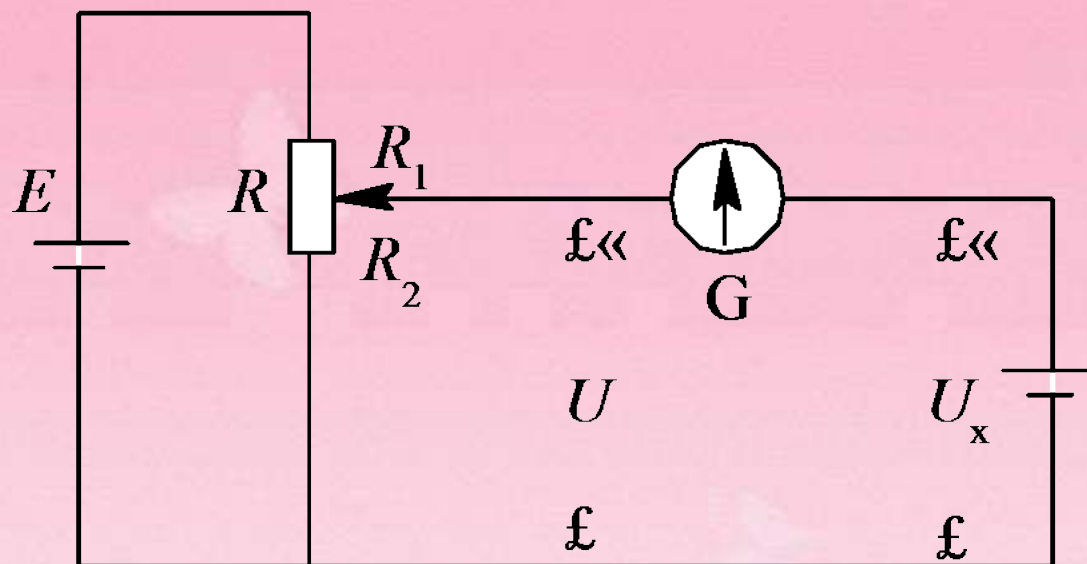


图5.5.1 零示法测电压

符合测量法有时也被称为重合测量法(简称重合法)，它可以有很高的测量精度。这是因为对两个参与比对的量值的均匀刻度的最小间隔要远远大于对重合判断的误差，也就是重合法测量的精度将远远优于以刻度间隔为测量分辨率的直接测量时的精度，但是对测量条件会有一些的要求。这里的测量误差常常取决于对两比较信号之间重合状态的判断误差。如果比对设备能够保证完全重合，则影响测量精度的就只是标准量本身的误差。

这种测量方法在高精度的测量中是很有潜力的，但是需要一些辅助技术配合以完善重合测量的条件。重合法多是将被测量的一系列均匀交替的记号或信号（如频率信号的周期交替、长度信号的均匀刻度等），与已知量的一系列均匀交替的记号或信号相比较，并检测其重合的情况。在此基础上，在重合间隔内，根据两比对信号所分别完成或经历的完整交替值的个数，来求出被测量的值。从广义的角度来看，只要被测量与已知量能以均匀交替的方式来表示，就可以应用重合法来比较与测量。

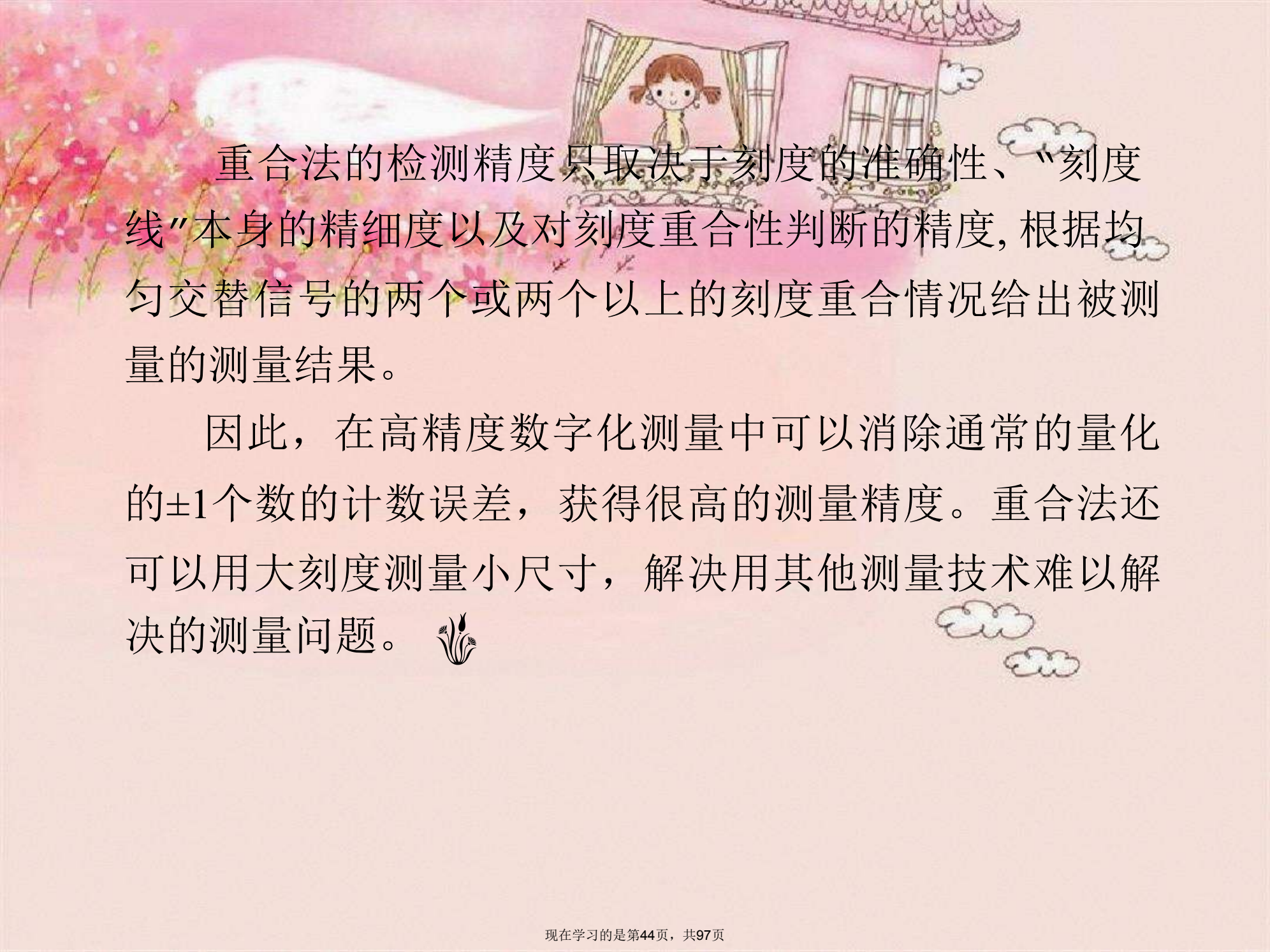


因为不少物理量都能够线性刻度与标定，所以只要有解决具体的重合检测方面的技术措施，就可以用重合法进行高精度测量。🔥


在物理量中，均匀交替的信号很多，它们有不同的自变量和表达形式。当这些量以数字量的方式表示时，数字量的每单位增量都是均匀的。均匀交替的信号可以表示为

$$A(t)=nt \quad (5.5.4) \quad \text{🌱 🌱}$$

其中， t 是自变量， n 是单位刻度值。更换自变量和因变量，并解决检测方面的手段和具体技术问题就可以方便地把对一种物理量检测中的误差分析等移植到对另一种物理量的测量中去。



重合法的检测精度只取决于刻度的准确性、“刻度线”本身的精细度以及对刻度重合性判断的精度,根据均匀交替信号的两个或两个以上的刻度重合情况给出被测量的测量结果。

因此,在高精度数字化测量中可以消除通常的量化的 ± 1 个数的计数误差,获得很高的测量精度。重合法还可以用大刻度测量小尺寸,解决用其他测量技术难以解决的测量问题。 

最小公倍数是重合测量中很重要的参数。同一物理量不同单位刻度的已知量和被测量之间存在着最小公倍数 $A_{\text{minc}}(t)$ 。使用重合法可以获得的最高测量分辨率为

$$\textcircled{c} \quad \Delta T = (A_0(t)A_x(t) A_{\text{minc}}(t)) \quad (5.5.5)$$

式(5.5.5)中的 $A_0(t)$ 和 $A_x(t)$ 分别为单位自变量下的已知量和未知量。也可以理解为它们不同的单位值(两相邻刻度间的量值大小)。

使用重合法时的测量精度不但与式（5.5.5）有关，要获得高的分辨率还与重合状态检测设备所具有的稳定性高低有关。同样从式（5.5.5）也可以看出， $A_0(t)$ 和 $A_x(t)$ 之间存在合适的差别是重合法能够高精度应用的条件。两者完全相等或成严格的倍数关系时，不但重合点难以捕捉，而且测量精度也会受到影响，必须采用别的方法辅助，才能得到满意的结果。

使用重合法时的测量对象，一种是均匀刻度的未知量的定度值，或可以用该定度值反映的量，如长度测量中的标尺定度，频率测量中的周期、频率以及电量测量中常遇到的一些情况。另一种是用两个不同均匀刻度的已知量去精确测量某一定的未知量，如长度测量中的游标测量、相位差测量等。🔥

第一种情况的测量示意图如图5.5.2所示。均匀刻度的被测量的刻度值可以为

$$T_x = \frac{T_0 N_0}{N_x} \quad (5.5.6)$$

其中 T_0 为已知量的刻度单位， N_0 和 N_x 分别是在若干个重合点之间读得的已知量和未知量均匀交替的个数。由于被测量常常可能是变化的，因此决定了式(5.5.5)中的 ΔT 也是变化的。为了保证测量精度及测量范围，必须选择合适的已知量的刻度单位值，要求其不但要比较小而且避免和未知量的单位值相近或成倍数关系，必要时还应该用一个辅助已知量来配合测量。只有这样，才能保证对重合状态的可靠检出。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：
<https://d.book118.com/755013012334012001>