

TM938.12

HP3458A 数字万用表电子校准技术

⑩

39-45

七二二所 刘勇

关键词：电子校准 A/D转换 传递测量 复用电表

摘要：HP3458A是具有0.1ppm传递测量准确度的8^{1/2}位数字万用表，由于其优异的短期稳定性和A/D转换兼顾了高线性、高分辨率以及快的采样速率，使它仅需要两个外部标准就可以进行全功能校准，利用内部标准可以自动校准，特别是交流频率响应校准更具有特色，是目前唯一具备这种校准功能的数字万用表。近年来，其它型号的万用表校准技术虽然有很大提高，但与HP3458A相比仍存在较大差距。HP3458A的校准技术提高了仪器测量准确度，扩展了工作环境范围，充分体现了校准技术的优越性，成为仪器仪表发展的趋势。

A

1. 前言

由于现代仪器所具有的准确度越来越高，校准这些仪器变得越来越复杂，花费越来越大。为了简化校准、降低校准代价，HP3458A数字万用表最大限度地减小了校准所需的外部参考标准，其所有功能和量程校准只需要一个外部直流电压标准和一个外部电阻标准。

标准计量实验室保存和使用的许多传统的外部参考标准，如电阻网络和DC/AC转换设备，在HP3458A被内部电路和算法代替并能达到同样的效果。HP3458A内部所有调整都是电子式的，没有任何调整电位器。

由于HP3458A万用表一年的准确度达到了其它大部分万用表一天的准确度，所以在很多应用中可以延长两次校准的时间，从而节约校准费用。在实际应用中，工作温度通常超过40℃而且变化大，HP3458A的自动校准可以提高在这种环境下的测量准确度。最终结果是，HP3458A万用表测量直流、交流时达到了其它万用表无可比拟的准

确度、精确度和测量速度，同时避免了维护这类仪器的高代价。

2. 自动校准的基础

所有外部校准均以以下三个外部输入为基础：

- 四线短路环
- 10V直流电压标准
- 10k Ω 电阻标准

下文论述的外部校准，保证了所有功能、量程和内部参考标准相对于两个外部校准的跟踪性。一个附加的内部自动校准使用内部标准调整HP3458A万用表，这个内部标准通过外部校准跟踪外部标准。自动校准可随时执行，克服长时间和大的温度变化带来的影响，从而使HP3458A达到有使用价值的准确度。

万用表的设计人员和用户常常必须面对测量时减小内部电路带来的偏置误差和增益误差这个问题。由于元件参数随时间、温度、湿度和其它环境条件而变化，造成了偏置和增益误差的经常性变化。早期的万用表靠调整内部关键元件来减小误差，这种调整

有两个缺点，一是调整经常需要打开机壳，这样改变了万用表的内部温度，二是可调元件常是漂移的主要因素，增加了不确定度。

随着非易失记忆元件的出现，万用表设计只有几个或没有可调元件，而是用微处理器来计算每个功能和量程的偏置和增益校正常数，这些校正常数贮存在非易失记忆单元中用来校正内部线路的误差，因此校准不需要打开机壳和调整内部线路的元件。

HP3458A 万用表可以方便地校正由于

时间或环境变化引起的误差，这一点优于以前的校准技术。HP3458A 虽然也考虑到其它的误差来源，但其调整主要是偏置和增益校正常数。一个HP的专利可以防止非易失存储器内校准常数的丢失。在HP3458A所采用的校准技术中，最重要的是A/D转换的线性和传递准确度。A/D转换线性决定了仪器在这种技术状态下测量两个直流电压比率的可靠性，另一方面，A/D转换在不做任何内部修正的情况下，其线性保证了整个测量范围的准确度。A/D转换采用专利技术

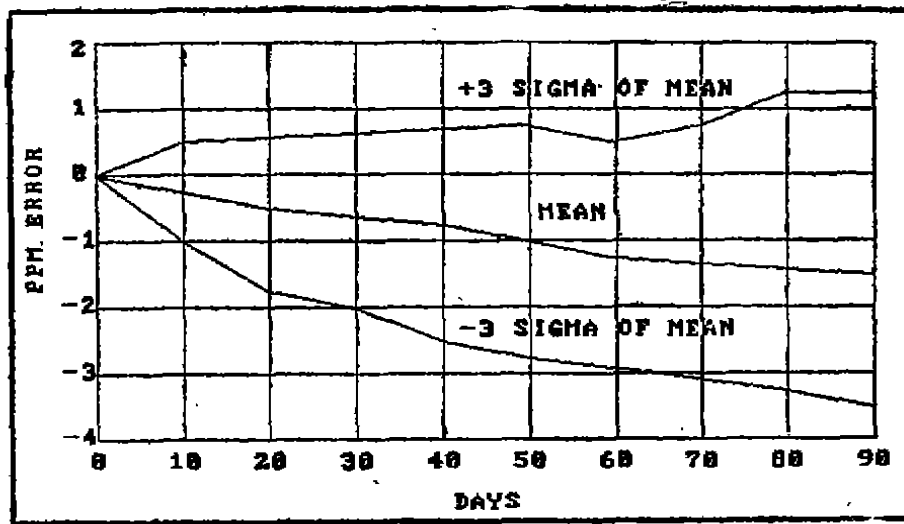


图1 内部参考电压随时间的漂移

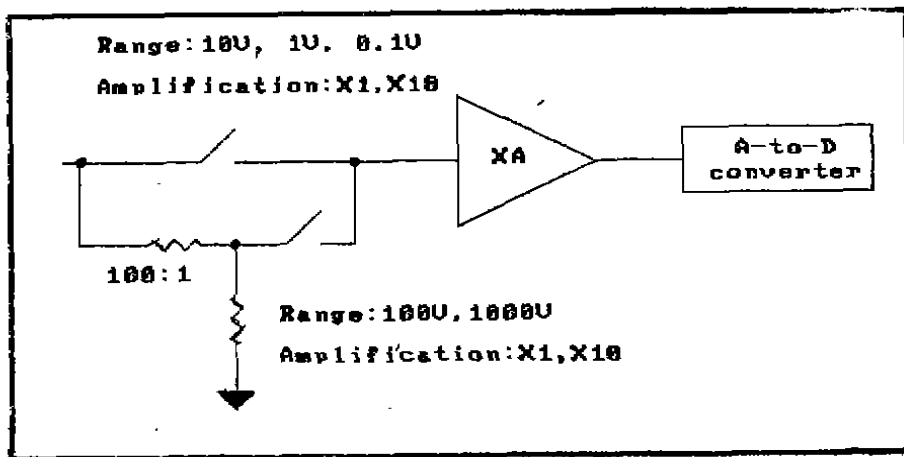


图2 直流电压输入通道框图

“多斜积分”来获得高线性、高速率性能。这种技术采用电荷平衡的原理，输入信号的电荷被参考信号注入的电荷所抵消。多斜积分允许积分速率改变，便于测量速度和测量分辨率的转变。

设计的A/D转换的线性采用美国国家标准局的约瑟夫逊结标准来测量，测量结果表明积分线性小于0.1ppm、微分线性为0.02ppm。

HP3458A 万用表内部校准不能消除的误差只有内部参考电压和内部标准电阻的漂移，内部参考电压90天平均漂移小于2ppm，三倍平均漂移小于4ppm，如图1所示。HP3458A 万用表直流电压传递测量时，短期稳定性在读数的0.1ppm内。内部参考电阻具有每年漂移5ppm，温度系数为1ppm/°C的指标。

自动校准调整内部电路相对于内部参考的时间和温度漂移，外部校准可以调整内部参考相对于外部标准的漂移。

3. 偏置调整

为消除内部电路的偏置误差，万用表在输入端内部连接了一个短路器并测量这个偏置。通常测量输入端信号时减去这个偏置得到正确的读数，这种方法唯一的不能消除的偏置误差是从输入端到内部短路点的热耦合偏置。偏置误差调整需要4线短路器，由开关选择连到前面和后面板输入端，然后执行CAL 0 这条指令，测量零点偏置并作为附加的偏置校准常数来修正随后的读数。其它万用表也采用这种方法消除偏置误差，HP3458A 所做的改进是采用更稳定的元件，最低限度地降低时间和环境温度变化带来的误差。

4. 直流增益调整

直流电压从100mV到1kV所有的五

个量程增益调整只需要一个外部直流电压标准。如图2所示的直流电压输入通道，需要三个调整。任何给定量程的校准增益为：

$$G_{r1} \times G_A \times G_D$$

其中 G_{r1} 为A/D转换器的增益

G_A 为放大器增益(每个量程不同)

G_D 为衰减值

工厂设置了每个增益调整的允许范围，如果增益调整超过了这个范围说明仪器有故障。因此，仪器检查每个增益调整值并标记对应的错误信息。

用户键入外部10V直流电压标准的实际值，例如：CAL10”，然后HP3458A 万用表自动执行下列操作，计算所有量程的增益：

- 4.1. 在10V量程测量外部“10V”标准。
- 4.2. 用测量的比率和外部标准实际值进行增益调整。
- 4.3. 测量内部参考标准对外部标准的准确度，并将差值贮存作为参考调整。(当随后的过程执行时，自动校准采用这些贮存值再次计算所有增益调整常数)。现在可以进行其它直流电压量程的增益调整。
- 4.4. 用10V量程输入通道准确地测量内部产生的1V电压。(测量线路的线性可以准确反映1V输出的实际值，也就是说，从10V量程到其它量程有准确的传递跟踪性)。对低量程使用放大器放大输入信号使之符合于10V满度的A/D转换器，每个放大器用所需的增益常数 G_A 调整读数，通过下列过程可以得到这些常数。
- 4.5. 在1V量程测量用10V量程测量过的同一个1V电压。
- 4.6. 计算1V量程增益调整值使两次测量一致。(注意，内部1V电压的实际值和长期稳定性并不重要，重要的是两次测量间的稳定性)。

4.7. 用调整过的1V量程准确测量0.1V的内部电压

4.8. 用100mV量程测量同一个0.1V的电压。

4.9. 计算100mV量程增益调整值使两次测量一致。

通常100V和1kV量程测量使用一个100:1的电阻网络衰减输入信号,为了校正这个网络的引入误差,首先在输入端施加零电压,然后施加一个10V电压并测量其实际值。最后测量衰减100倍后的0.1V电压,在减掉零点误差后,计算增益调整常数。在1kV量程,当输入电压大于100V时,在电阻网络上产生自热误差,其误差与输入电压曲线如图3所示,这种特定误差简单作为仪器公布误差的一部分。附加的测量常数用来补偿开关不稳定性和泄露电流的影响。

5. 电阻与直流电流调整

从10 Ω 到1G Ω 的九个电阻量程和从100nA到1A的八个电流量程校准只需要一

个外部标准电阻。电阻测量是通过在未知电阻上施加已知电流并测量电阻上的压降实现的,电流的测量是通过将未知电流施加在已知分流电阻上并测量电阻上的压降实现的。直流电压输入通道已由前叙过程校准过了,可用于测量电流源和分流电阻的实际值以便于调整电阻和电流测量的实际值。电流和电阻校准同时进行,电阻测量时根据不同量程,电流源提供500nA到10mA的电流,电流测量时用的分流电阻从0.1 Ω 到545.2k Ω 变化。

用户键入外部10k Ω 电阻标准的实际值,例如“CAL10E3”,然后万用表自动执行下列操作,并计算电阻和直流电流所有量程的调整常数:

5.1. 用10k Ω 量程对外部“10k Ω ”标准进行四线补偿测量。

5.2. 采用比率测量结果和“10k Ω ”标准的实际值计算10k Ω 量程的校准常数(即调整10k Ω 量程的电流源)。

5.3. 测量内部参考电阻相对外部标准的电阻值,并将差值贮存作为参考调整。(当随后

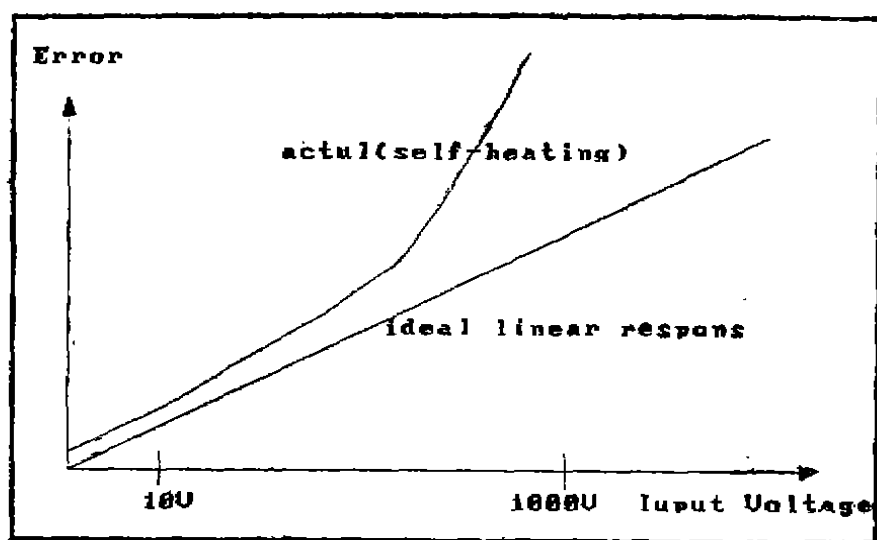


图3 1kV量程衰减器自热误差与输入电压关系

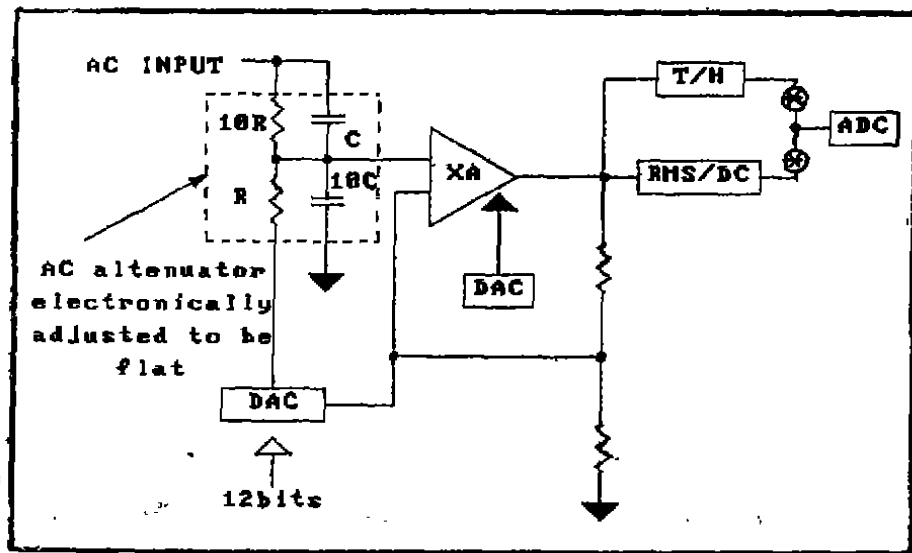


图4 交流电压平坦度校准与增益校准原理

的过程执行时，自动校准采用这些贮存值再次计算所有增益调整常数）。

5.4. 用校正过的内部参考电阻调整其它电阻量程的电流源的值。

5.5. 用校正过的电流源调整直流电流测量所用的分流电阻值。

电阻测量的泄露电流和电流测量时分流电阻的偏置产生了附加误差。测量和贮存这些误差作为调整常数来校正这些附加误差。

6. 交流平坦度和增益调整

交流电压和交流电流的周期校准不需要外部交流标准。为了准确地测量交流信号，内部电路必须对不同频率的输入信号有固定增益。一个HP专利技术完整的交流调整如图4所示。这种技术首先调整交流衰减网络的频率响应平坦度，然后调节有效值转换器和跟踪保持放大器的增益。

与示波器探头调节类似，恰当调整交流衰减网络可以获得对阶跃输入电压的最佳平坦度响应。图5说明了交流衰减器的频率调

整是以施加阶跃输入信号后特定延时的两次测量读数为基础，图示了补偿后和两种未补偿情况下的阶跃输入的频响。用傅里叶变换原理能证明，对阶跃输入信号有不失真的阶跃输出的电路对不同频率输入信号，都有恒定的增益。HP3458A 万用表产生所需的阶跃输入电压，然后A/D转换器采样衰减器输出，这些测量结果用来计算控制平坦度调整DAC输出所需要的常数。控制DAC输出可以有效地改变衰减器一个臂的电阻来获得最理想的平坦度。每个交流量程的平坦度校准常数都是独立的。

交直流转换器通常存在翻转误差，一个典型的计量经验是用正负信号来修正翻转误差。因为正负信号两次采样间的短的时间间隔有助于降低 $1/f$ 噪声，这样 HP3458A 万用表以高速率采样正负信号来抑制 $1/f$ 噪声，如图6所示。正负信号加到有效值转换器和跟踪保持放大器输入通道，根据所选用的交流电压量程，衰减或放大输入信号。HP3458A 用早已校准好的直流通道的测量这些直流电压的实际值，然后计算有效值转换

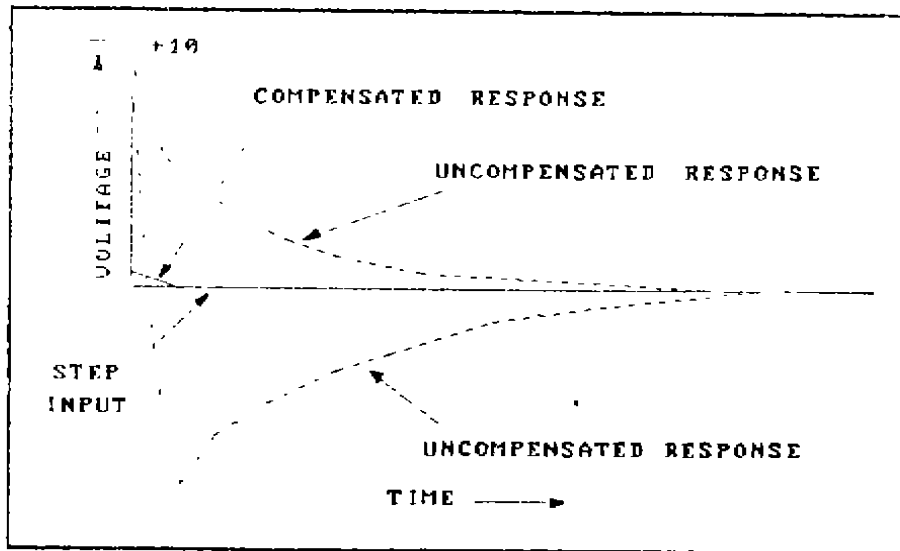


图5 阶跃输入补偿和两种未补偿情况的响应

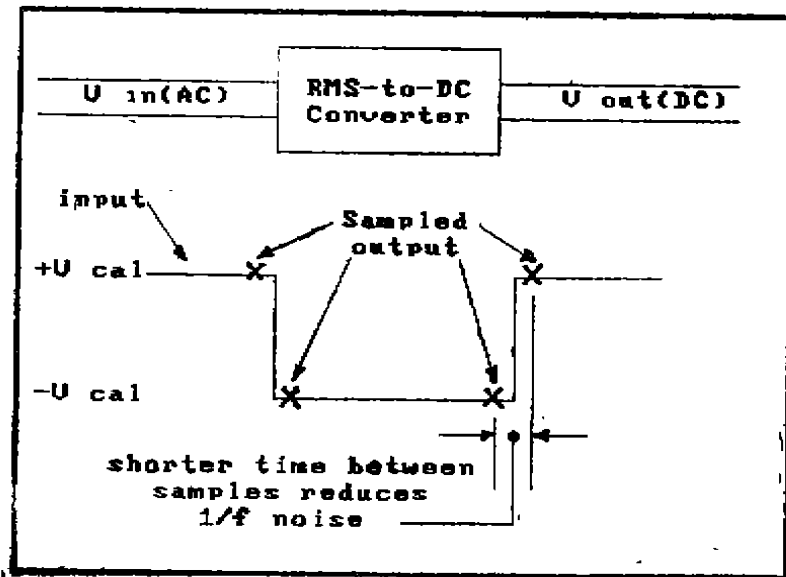


图6 利用正负信号抵消RMS转换翻转误差，快速采样抑制1/f噪声

和跟踪保持放大器通道的增益。增益常数反映了量程间传递的准确度，这与直流增益调整相同。

有效值转换器在满度十分之一处增益是非线性，这种非线性可以通过在满度十分之一处施加斩波直流电压来校正。

7. 一次性调整

只有在工厂或有关电路修理后才进行一次以下的电子调整，

7.1. 验证周期和频率测量所用晶振的实际频

率值。

9.2. 调整时间基准内插器的准确度。

9.3. 通过100kHz到2 MHz和8 MHz输入信号的传递测量来调整交流衰减器和放大器的高频响应。

8. 跟踪性

以上关于所有功能和量程调整方法能跟踪1个或2个内部标准,同时内部标准能跟踪外部标准。问题是它们跟踪的不确定度有多大,答案在于必须了解每次传递测量的最大不确定度。传递测量不确定度主要来源于内部电路的线性误差和每次测量的噪声,每次传递测量都产生一些误差,量程之间的多次传递,误差是累加的。然而由于内部参考源优异的短稳和A/D转换器的超级线性最大限度地降低了这些传递误差。HP3458A万用表在三个低直流电压量程传递误差小于1 ppm。HP3458A所有校准传递误差和噪声误差已详细列于公布的准确度指标之中。

9. 校准常数

HP3458A万用表总共贮存了253个校准常数,它们都可以被询问,其中只有以下44个常数与外部测量有关:

9.1. 直流电压0.1V到10V量程前面板和后面板输入通道6个偏置常数。

9.2. 两线电阻10 Ω 到1G Ω 量程前面板和后面板输入通道18个偏置常数。

9.3. 四线电阻10 Ω 到1G Ω 量程前面板和后面板输入通道18个偏置常数。

9.4. 内部参考电压值一个常数。

9.5. 内部参考电压值一个常数。

余下的209个校准常数,有6个由一次性外校准决定,这6个常数供频率和周期测量、时间基准内插器、2 MHz以上高频交流频响调整使用。另外6个附加常数分别记录上次偏校准、上次外部电压标准校准、上次外部电阻标准校准、上次直流自动校准、上次交流自动校准、上次电阻自动校准时的温度,这给用户提供了很大的方便。

余下的197个常数由前叙的内部比率传递校准决定,在每次自动校准“ACAL ALL”执行后,这些常数被更新,降低了时间、温度和环境变化引入的漂移误差。

10. 结束语

HP3458A万用表电子内部校准简化和缩短了校准时间,同时保证了准确度和跟踪性。万用表克服了除内部参考标准漂移外的所有漂移误差。这种自动校准技术依赖于内部参考电压和电阻的优异的稳定性和A/D转换器的超级线性。外部校准可以消除内部参考源的漂移。

在实际应用中,用内部参考标准自动校准有以下优点:

- 提高测量准确度
- 延长两次校准的时间间隔
- 扩展工作温度范围
- 减小引起误差的其它环境因素带来的误差

当应用于计量、电子测量以及其它用途时,与早期的数字万用表相比,这些优点有特殊的意义。

参考文献

[1] HP公司,“HP3458A Multimeter Calibration Manual”。

[2] 美国Wayne C. Goeke,“适用于8 1/2位数字多用表的模数变换器”,电子测量技术,91.1。