

是德科技

使用数字万用表更好地进行交流有效值测量

应用指南





引言

如果您使用数字万用表 (DMM) 进行交流电压测量, 那么必须要了解您的万用表为您提供的是峰值、平均值、有效值 (rms) 值还是其他测量值。如果是“其他测量值”, 那么您可能会遇到麻烦, 通常麻烦出现在交流有效值测量中。本应用指南将帮助您了解数字万用表如何利用各种技巧来测量有效值, 信号如何影响您的测量质量, 以及如何避免常见的测量错误。

测量交流有效值

测量交流有效值并不像一眼看上去那么简单。如果它十分复杂，那么我们为何担心呢？原因就是真有效值是唯—与信号形状无关的交流电压读数。通常，它是对实际波形最有用的测量。

有效值通常用来度量等热值，与等效直流值驱动电阻负载的功耗数量有关。例如， $1V_{pk}$ 正弦波为电阻负载提供的功率与 $0.707V_{dc}$ 信号相同。信号的有效值读数较为可靠，将有助于您更好地了解信号在电路中产生的影响。

图 1 显示了 4 个常见的电压参数。峰值电压 (V_{pk}) 和峰峰值电压 (V_{pk-pk}) 非常简单。 V_{avg} 是指一个完整波形周期中所有瞬时值的平均值。下面我们会介绍如何计算 V_{rms} 。如果是正弦波，波形的负半波与正半波恰好抵消，在一个周期中平均值为零。这类平均值不能提供关于信号有效幅度的深入信息，因此，大多数仪表是基于波形的绝对值来计算 V_{avg} 。同样是正弦波，这里可以使用 $V_{pk} \times 0.637$ 来计算 (图 2)。

您可以先求波形中每个点的平方值，再求它们的平均值，最后求平均值的平方根，由此计算出 V_{rms} 。如果是纯正弦波，您可以利用一些捷径：只需 $V_{pk} \times 0.707$ 或 $V_{avg} \times 1.11$ 即可。经济实惠的峰值响应或平均值响应仪表正是根据这些换算系数而设计的。

换算系数仅适用于纯正弦波。对于其他类型的信号，使用此方法得到的答案是错误的。如果您使用的仪表并不是专门针对此任务设计的，那么您很可能出现严重的错误——取决于仪表或信号，计算值与正确值可能相差 40% 以上。

V_{pk} 与 V_{rms} 的比值 (即波峰因数) 是决定测量精度的重要因素。波峰因数衡量的是波形峰值相对于其有效值的高度。波峰因数越高，进行准确的交流测量就越难。

有两个测量挑战与高波峰因数有关。第一个挑战涉及输入范围。想象一个脉冲串有非常低的占空比和相对较高的峰值幅度。这样的信号会导致仪表同时需要测量高峰值和非常低的有效值，这可能会在高端造成过载问题，并在低端造成分辨率问题。

第二个挑战就是信号中的高频能量较大。一般而言，高波峰因数意味着存在更多谐波，这会所有仪表带来麻烦。尤其是峰值和平均值响应仪表，想要测量有效值会面临重重困难。

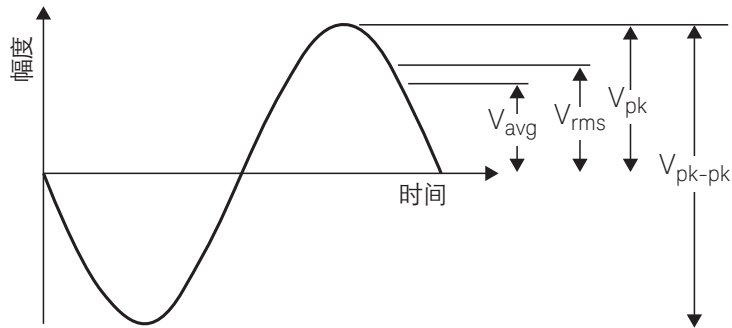


图 1. 常见电压参数

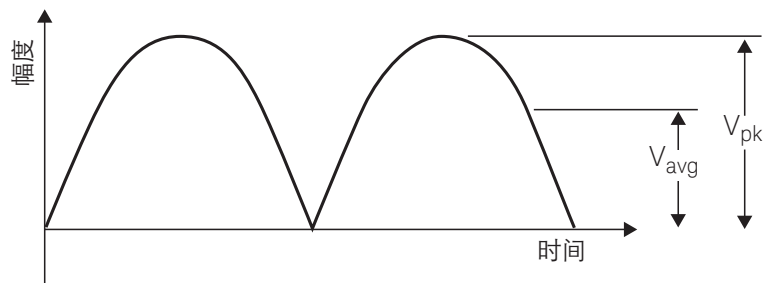


图 2. 根据波形绝对值计算的 V_{avg} 。

更好地进行交流有效值测量的技巧

考虑到测量有效值的重要性与困难，什么办法能够让您最好地完成日常测量任务？下列技巧将帮助您获得更好的结果。

第 1 个技巧： 了解您的数字万用表如何测量有效值。

在测量有效值方面，不同的万用表各有所长。了解万用表在测量有效值时所使用的技术，将有助于您决定其是否符合您的需求。这里我们汇总了 4 种常见万用表技术的优缺点。前 3 种采用的方法是将交流转换为直流；最后一种是将模拟输入信号转换为数字输入信号，然后计算有效值。

热交流至直流转换器

这种传统技术使用等热值法来测量有效值。交流信号会使热电偶温度上升，然后仪表的直流部分将读取热电偶输出。这一方法的优点包括宽带宽和能够处理非常高的波峰因数，这意味着该方法能够计算各类真实信号的真有效值。

等热值法的缺点是成本较高，在权衡测量速度和低频精度时不够灵活。由于这些原因，最新一代数字万用表没有采用该技术。

如果您需要高精度地测量高带宽和高波峰因数信号，您可以寻求合适的热模型。如果高精度对您很重要，您可以考虑数字采样的万用表。

峰值和平均值交流至直流转换器

经济实惠的仪表，特别是经济实惠的手持式仪器，通常根据峰值或平均值来计算有效值电平。它们仅能计算无失真的纯正弦波的真有效值。如果您需要对真实环境中的信号进行真有效值测量，这些仪表并不适用。

模拟交流至直流转换器

很多中档数字万用表使用一连串的模拟电路来计算平方值，再计算其平均值，最后计算平均值的平方根，提供几乎所有信号类型的真有效值。

数字采样

最后这个方法采用与数字示波器类似的采样技术，都是创建一组通过有效值算法发送的数据点。同步采样使用多个通路来捕获信号，如图 3 所示。每个后面的通路都会有轻微时延，当拥有足够的通路时，信号能够以非常高的分辨率进行数字化。

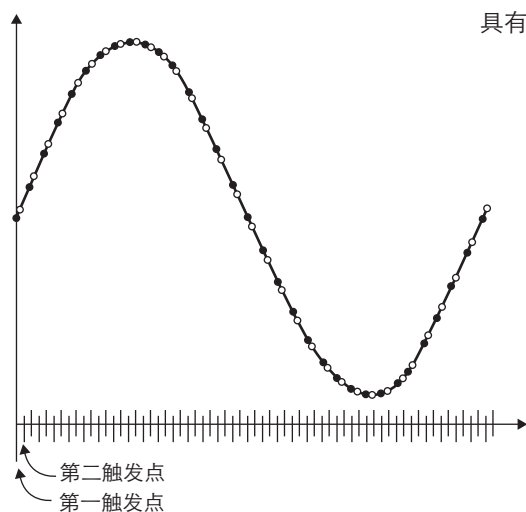


图 3. 数字采样

这项技术具有众多优势：提供广泛信号的真有效值；高精度；即使使用较慢的模数转换器也能支持快速、高效的采样率和更宽带宽。但是，这一方法仅适用于重复信号。

如果精确的有效值测量对于您很重要，您可能需要测量脉冲串和其他复杂的信号，此时真有效值仪表是您唯一的解决方案。另一方面，使用峰值或平均值响应仪表可能会节省资金。您需要牢记的是这些仪表具有或不具有哪些功能。

第 2 个技巧： 了解信号如何影响您的测量质量。

让我们来看几个不同的信号，首先是正弦波。纯正弦波的波峰因数为 1.414，峰值响应仪表仅需定标 V_{pk} 值就能提供精确的有效值。如果 V_{pk} 值是 500 mV，我们估计有效值大约为 350 至 357 mV（此范围考虑了所用信号发生器的不精确度）。不出所料，真有效值仪表获得的信号读数为 353.53 mV。价格较低的平均值响应仪表得到的信号读数为 351 mV。

与纯正弦波不同，图 4 中的三角波拥有部分高频能量，因此波峰因数为 1.732，完全在意料之内。将峰值除以波峰因数，得出预计的有效值为大约 290 mV。现在，平均响应仪表开始出现问题，其信号读数为 276 mV，与真有效值仪表 288.68 mV 的读数相比，出现 4% 的误差。

现在让我们看一下脉冲串，此处的波峰因数取决于占空比。您可以通过下列公式获得与波峰因数接近的近似值：

$$CF \cong \sqrt{\frac{T}{t}}$$

其中：

CF = 波峰因数

T = 波形周期

t = 此周期中有信号的部分

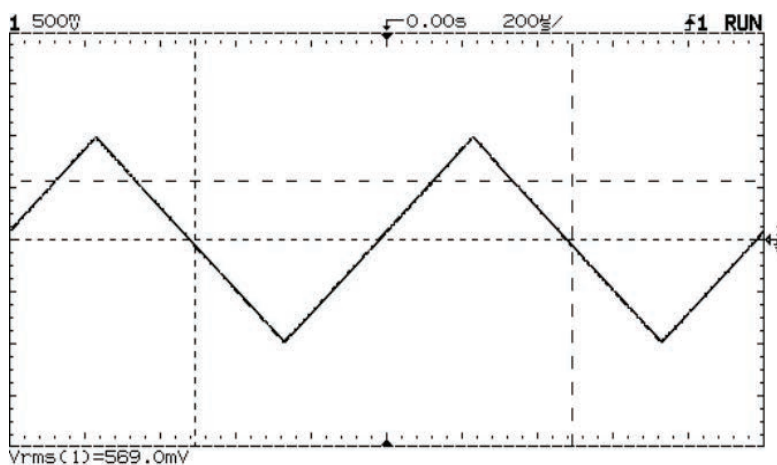


图 4. 测量三角波的有效值

它也等于占空比倒数的平方根。因此，以图 5 中的脉冲串为例，其占空比为 2%，波峰因数就是 50 的平方根或 7.071。

计算正弦波和三角波的有效值相当简单；有效值等于 V_{pk} 除以波峰因数。然而，计算脉冲串的交流有效值则稍为复杂：

$$V_{rms} = \frac{V_{pk}}{CF} \times \sqrt{\left(1 - \frac{1}{CF}\right)^2}$$

使用此公式，图 5 中具有 2% 占空比的 2 V_{pk} 脉冲串的理论有效值约为 280 mV。即使在此例中，其有效值已经超出了指定的性能范围，但真有效值仪表读数为 275.9 mV。另一方面，平均响应仪表读数为 73 mV，误差达到 74%。这是一个极端的例子，但是能够让您清楚地了解高波峰因数会给您的测量带来什么影响。

让我们再看看另一个波形——图 6 中显示的包含噪声的杂乱正弦波。真有效值仪表的读数为 348.99 mV，此结果接近数字示波器测量所得的 345 mV。平均响应仪表将该值设为 273 mV，误差超过 20%。这一误差是由平均响应仪表有限的带宽所致。信号包含高频能量，而平均响应仪表未将其考虑在内。

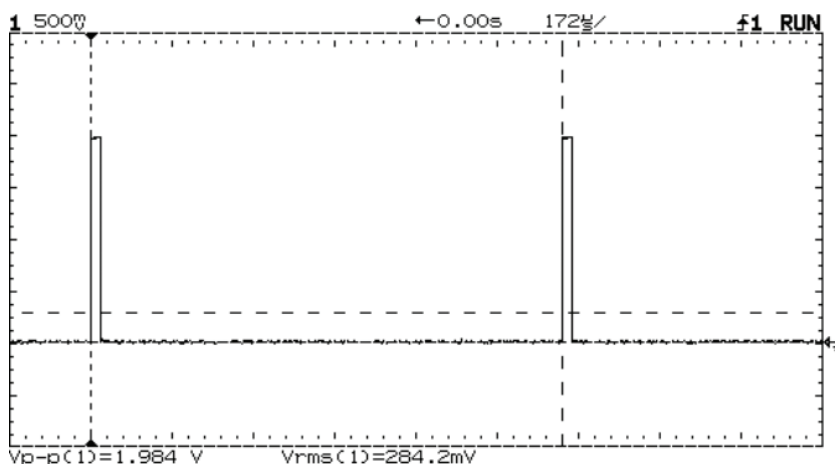


图 5. 测量低占空比脉冲串的有效值

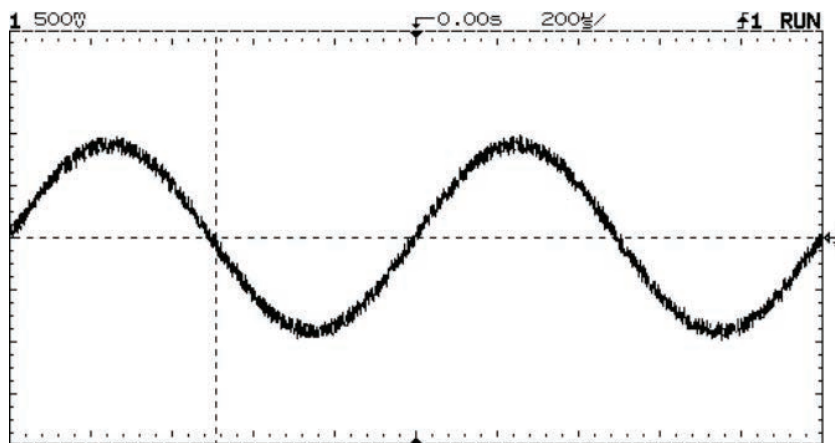


图 6. 测量噪声正弦波的有效值

第 3 个技巧： 避免常见的测量陷阱。

如果一个交流有效值读数意义不明，这是否自动假定您的电路有问题，而问题可能出在您如何进行测量上。下列为可能影响有效值测量的常见陷阱。我们已经遇到了一些陷阱，您在之前可能也已经遇到过。

低于满量程的测量

大多数仪表规定交流输入最低为满量程的 5% 或 10% (有一些最低仅为满量程的 1%)。为了实现最大精度，测量需要尽可能地接近满量程。有时，如果手动设置可以帮助您最大化输入范围，您可能需要放弃自动定标。

交流或直流耦合

当您忙碌起来时，很容易忽略这个问题。如果您的仪表为交流耦合 (或具有可选的交流耦合)，它会以与输入信号串联的形式插入一个电容器，电容器会阻隔您的信号中的直流分量。取决于信号和您想要获得的结果，测量可能令人满意或适得其反。

如果您期待包含直流分量，但是仪表为交流耦合，那么其结果可能大错特错。请注意，如果您需要测量较大直流偏置上的较小交流信号，而您的仪表无法直接提供交流 + 直流功能，您可以使用交流耦合测量交流分量，再单独测量直流分量。然后，您可以使用有效值加法将二者相加：

$$AC + DC = \sqrt{(AC_{rms} \cdot 2)^2 + DC^2}$$

高波峰因数信号的饱和问题

高波峰因数信号除了会导致高频分量问题，还会对输入范围造成破坏。请回想一下 2% 占空比的脉冲串。其 7+ 的波峰因数意味着峰值比有效值高出 7 倍多。这意味着您的仪表需要为低有效值提供足够的幅度分辨率，避免高峰值达到饱和。

更糟糕的是，您通常根本无法获得波峰因数饱和的过载指示。您必须检查仪表的最大峰值因数指标，并避免它们超标。

带宽错误

如果测量中没有包含更多的谐波分量，谐波较多的信号就可能产生低读数的测量结果。请检查仪器的技术资料，了解您需要多少带宽。然后确保您的信号未超过带宽。

自热错误

高压会使仪表的信号调理元器件温度上升，从而导致测量值发生偏移。请注意最大输入电压；如您超过该值，那么在进行其他测量前，应给仪表留出冷却的时间。

建立时间

根据定义，有效值测量要求对被测最低频率的多个周期计算平均时间。因此，如果您并不在意某个特定测量中的低频分量而且您的数字万用表具有可选的平均滤波器，那么请切换至更快的滤波器。

结论

交流有效值测量比您第一眼看上去要复杂得多，但是稍微了解一下其原理，将帮助您更好地应对复杂性。如果您还没有这样做，那么请查看您的数字万用表技术资料标明的波峰因数、带宽和其他极限值。请尽量遵守这些极限值。

高质量仪表会在其极限值之内运行，提供持续可靠的测量结果。

术语

波峰因数——波形峰值相对于波形有效值的量度。

DMM ——数字万用表

rms ——均方根的缩写

真有效值——术语“真”有效值用于区分实际测量有效值的仪表与根据峰值或平均值计算出有效值电平的仪表

V_{avg} ——平均电压，使用波形的绝对值（周期的负半波按照正半波一样计算）

V_{pk} ——峰值电压

V_{pk-pk} ——峰峰值电压

V_{rms} ——交流电压的有效值

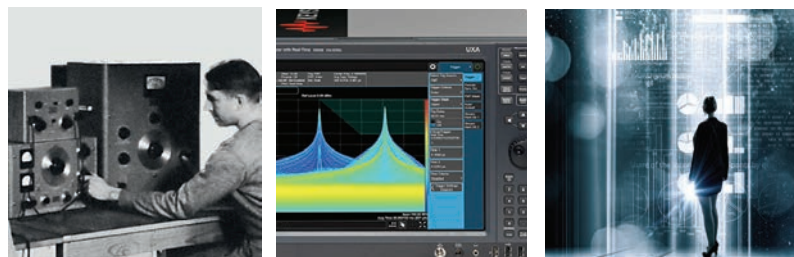
相关文献

Keysight Truevolt 系列数字万用表技术资料 (5991-1983CHCN)

演进

我们独有的硬件、软件和技术人员资源组合能够帮助您实现下一次突破。

我们正在开启技术的未来。



从惠普到安捷伦再到是德科技

myKeysight

myKeysight

www.keysight.com/find/mykeysight

个性化视图为您提供最适合自己的信息！



www.axiestandard.org

AdvancedTCA® Extensions for Instrumentation and Test (AXIe) 是基于 AdvancedTCA 标准的一种开放标准，将 AdvancedTCA 标准扩展到通用测试半导体测试领域。是德科技是 AXIe 联盟的创始成员。



www.lxistandard.org

局域网扩展仪器 (LXI) 将以太网和 Web 网络的强大优势引入测试系统中。是德科技是 LXI 联盟的创始成员。



www.pxisa.org

PCI 扩展仪器 (PXI) 模块化仪器提供坚固耐用、基于 PC 的高性能测量与自动化系统。



3 年保修

www.keysight.com/find/ThreeYearWarranty

是德科技卓越的产品可靠性和广泛的 3 年保修服务完美结合，从另一途径帮助您实现业务目标：增强测量信心、降低拥有成本、增强操作方便性。



www.keysight.com/go/quality

是德科技公司

DEKRA 认证 ISO 9001:2015

质量管理体系

www.keysight.com/find/dmm

如欲获得是德科技的产品、应用和服务信息，请与是德科技联系。如欲获得完整的产品列表，请访问：www.keysight.com/find/contactus

是德科技客户服务热线

热线电话：800-810-0189、400-810-0189

热线传真：800-820-2816、400-820-3863

电子邮件：tm_asia@keysight.com

是德科技 (中国) 有限公司

北京市朝阳区望京北路 3 号是德科技大厦

电话：86 010 64396888

传真：86 010 64390156

邮编：100102

是德科技 (成都) 有限公司

成都市高新区南部园区天府四街 116 号

电话：86 28 83108888

传真：86 28 85330931

邮编：610041

是德科技香港有限公司

香港北角电器道 169 号康宏汇 25 楼

电话：852 31977777

传真：852 25069233

上海分公司

上海市虹口区四川北路 1350 号

利通广场 19 楼

电话：86 21 26102888

传真：86 21 26102688

邮编：200080

深圳分公司

深圳市福田区福华一路 6 号

免税商务大厦裙楼东 3 层 3B-8 单元

电话：86 755 83079588

传真：86 755 82763181

邮编：518048

广州分公司

广州市天河区黄埔大道西 76 号

富力盈隆广场 1307 室

电话：86 20 38390680

传真：86 20 38390712

邮编：510623

西安办事处

西安市碑林区南关正街 88 号

长安国际大厦 D 座 501

电话：86 29 88861357

传真：86 29 88861355

邮编：710068

南京办事处

南京市鼓楼区汉中路 2 号

金陵饭店亚太商务楼 8 层

电话：86 25 66102588

传真：86 25 66102641

邮编：210005

苏州办事处

苏州市工业园区苏华路一号

世纪金融大厦 1611 室

电话：86 512 62532023

传真：86 512 62887307

邮编：215021

武汉办事处

武汉市武昌区中南路 99 号

武汉保利广场 18 楼 A 座

电话：86 27 87119188

传真：86 27 87119177

邮编：430071

上海MSD办事处

上海市虹口区欧阳路 196 号

26 号楼一楼 J+H 单元

电话：86 21 26102888

传真：86 21 26102688

邮编：200083



本文中的产品指标和说明可不经通知而更改

© Keysight Technologies, 2013 - 2017

Published in USA, June 12, 2017

出版号：5988-6916CHCN

www.keysight.com