

示波器探头的使用及测量结果误差探究

徐庆玉 范立斌 侯秀波 李田甜

(哈尔滨飞机工业集团有限责任公司 黑龙江 哈尔滨 150066)

摘要: 电信号在运行中需要精准测量脉冲波形数据,从而针对性地做出运行状态调整策略。示波器属于电信号测量的主要工具,为保障测量结果精度,有效消除测量误差,应确保示波器探头的科学应用。为此,本文从示波器探头及其结构分析入手,明确了示波器探头的种类、关键结构,然后以无源示波器为例,基于其结构性能进一步总结了示波器的工作原理,提出示波器探头的使用要点及注意事项,最后对示波器探头应用的测量结果误差展开了分析,旨在应用实践中科学选用示波器探头,实现被测信号的完整获取,以保证测量结果的有效性。

关键词: 示波器; 探头选择; 使用要点; 测量误差

0 引言

作为电信号运行综合特征测量的常用方法之一,示波器的测量更加全面,且可实现信号波动状态不一时不同时间段的电信号波形变化曲线,便于了解电信号运行的周期及频率等各项参数。示波器能够对信号快速响应,且工作频带宽度较大,尤其适用于脉冲式参数测量。示波器与被测电路连接时,需要在输入端设置探头,因其是测量时两个设备的连接媒介,因而示波器探头的质量效果与测量结果是否精准直接相关。因此,需要通过示波器探头使用及测量结果误差分析,保障示波器运行的有效性,实现电信号运行特征的精准测量。

1 示波器探头及其工作原理分析

1.1 示波器探头的种类

示波器探头是连接测试点、示波器的重要结构,可有效衔接信号源及示波器输入端。此结构的连接是否有效,重点在于物理连接质量的高低、探头对电力操作产生的影响程度和信号传输速度的快慢这三个方面。示波器探头有多种类别,根据应用时是否需要电力资源供应作为区分标准,可将示波器探头划分两个类别:无源电压探头和有源 FET 探头,这两种示波器探头均较为常用。除此之外,还有电流探头、逻辑探头等其他类别的示波器探头。

1.2 示波器探头关键结构

示波器探头的结构较为复杂,除了头部结构、探头以外,其结构中还包括补偿设备,并设置了信号调节网络,此外还需要利用电缆进行相关结构件的连接。应用示波器探头工作时,需要在测试点上连接一个长度为 1 ~ 2m 的电缆线,另一侧需连接在示波器探头之上。

电缆线的长度大小需要以示波器探头宽度作为确定依据,若示波器安装的是宽探头,则需适当增加电缆线的长度值。除电缆线之外,示波器探头之上还安装了具有探针的把手,此结构的作用是对探头进行固定,进而增强示波器探头与测试点之间连接的稳定性。探针上的信号需经由头部进入电缆,进而向示波器传送测试点获取到的测量数据。

1.3 示波器探头运行原理

在示波器多种类型的探头之中,应用率最高、适用范围最广的当属无源探头,此种探头涵盖导线、连接器两部分主要结构,除此之外并未安装晶体管,内部也未装设放大器,在无需电力资源供应的条件下无源探头便可应用,因而适用场景更为广阔,操作过程也更加便利。

1.3.1 无源示波器结构特性

无源示波器补偿或衰减的过程中,需要应用到电阻器、电容器等设备。从结构形式来看,无源电压探头属于电阻分压电容补偿电路,由于其结构特性影响,其工作频带的宽度更大,并且在分压电阻应用下使示波器量程得以进一步拓展,因此可增大无源示波器探头的过载能力,可在高频率条件下稳定运行。在示波器上安装无源探头时,BNC 接口是主要的连接端口,然而示波器实践中,由于示波器自身结构特性影响,对各个不同品牌的探头类型识别时自动化功能偏弱,因此,需由工作人员手动进行衰减比的设置,测量过程中才能够对探头的信号衰减进行合理补偿。

1.3.2 无源示波器探头工作原理

通过分析无源示波器探头的工作系统发现,其中除了输入阻抗之外,还包含寄生电容,还安装了可调节补偿电容,且涵盖传输导线等其他辅助性结构件。示波器开启后,无源示波器探头开始运行,其输入阻抗的初始

数值为 $10\text{M}\Omega$ ，且衰减比因子值为 $10:1$ 。同时，示波器输入点处及前端所测电压的比值 $10:1$ 。通过分析发现，相较于探头探测电压而言，示波器所获取电压相对较小，仅为其 $1/10$ 。与此同时，由于无源示波器探头运行时的阻抗为 $10\text{M}\Omega$ ，因而运行条件下，无源示波器探头并不会在待测电压上产生较大的负载效应，在测量不高于 500MHz 的频段电信号时，可实现大覆盖范围的测量，并且具备较高的耐压性能，通常耐压数值介于 $300 \sim 400\text{Vrms}$ 范围内。由于无源示波探头具有造价低、应用范围广的优势，因而在电信号测量方面具有较好的应用优势。

2 示波器探头使用的基本要点及注意事项分析

2.1 示波器探头的使用要点

2.1.1 强化宽带频率及上升时间控制效果

示波器自身具备一定的频带宽度，与此同时，示波器探头也有相应的频带宽度数值，并且探头频带宽度的大小会影响电信号响应输出幅度的衰减值大小，带宽变化时，响应输出幅度衰减时所对应的频率值也会发生变化。为此，在示波器探头应用的过程中，需要合理设定示波器探头的频带宽度。与此同时，还需要加强带宽自脉冲上升的时间控制，从而降低测量时信息获取的失真率。在测量电路之上完成示波器探头加载的情况下，可视作示波器输入电容上采取并联方式增设了一个电容，从而使测试系统的输入电容值得到了进一步扩充，由此会导致测量系统上带宽频率脉冲上升时间的增加。据测算，带宽与上升时间相乘时，二者的乘积一般为 0.35 左右，因而可按照如下公式进行测量系统总带宽的测算，即：

$$\frac{1}{\text{测量带宽}} = \sqrt{\left(\frac{1}{\text{信号带宽}}\right)^2 + \left(\frac{1}{\text{示波器带宽}}\right)^2 + \left(\frac{1}{\text{探头带宽}}\right)^2} \quad (1)$$

按照公式 (1) 计算得出结果分析发现，测量系统的总带宽会在示波器输入电容增大的同时出现下降现象。在应用示波器进行电信号测量的过程中，示波器探头的带宽与示波器自身的带宽具有一定的关联，示波器探头带宽设定时，要确保其始终比示波器带宽略大，或与之保持相同带宽。在测量信号不同的情况下，示波器探头的带宽取值也要有所差异，即纯正弦信号测量时，要求以被测信号频率的最大数值作为示波器探头带宽；而非正弦信号测量时，应确定被测信号的基波，计算出其重要谐波分量，结合这些数据确定探头的具体带宽。

2.1.2 加强阻抗匹配调整

从定义层面分析，阻抗指的是电压及电流两个指标的比例。测量过程中，若是不考虑测量电路受到测量仪器的影响，阻抗值的测定结果应与未接测量仪器时无较

大区别。测量仪器连接完成的情况下，需要以被测电路的输出阻抗为依据设定测量仪器的输入阻抗值的大小，通过增强二者阻抗值的匹配度，提升测试通道的传输功率值，使这一数据趋向于最大化，以便于增强电信号测量结果的精准性。

2.1.2.1 不同电路阻抗设定方法

由于纯电阻电路无阻抗幅角，因而在阻抗设置时，应以源阻值作为负载阻值的确定依据，二者数值必须完全相同，不仅爪波器输入端的模数据要一致，同时幅角数据也要保持统一。若电路并不属于纯电阻电路，则需要以共轭值作为阻抗匹配的依据，即负载阻抗、源阻抗各自的共轭值需要保持一致，要求二者模数据相同，并且幅角数据相加得出结果应保持为零。

2.1.2.2 阻抗匹配调节方法

阻抗匹配度的高底是决定测量结果波形是否出现变形现象的关键，若阻抗匹配度不佳，电信号测量完成后，得出波形可能会出现变形度较大的情况，进而会导致测量结果失真。为有效防止波形变形问题，应做好阻抗匹配调节控制。通常做法是在示波器探头应用之前便针对阻抗进行匹配度调节，以示波器探头之上安装的电容装置为调节工具，进而将阻抗匹配部分调节至适宜的数值范围。同时还应以示波器输入阻抗的高低作为探头选用的依据。在示波器输入阻抗较高时，所应用探头最好为 $\times 10$ ；而示波器输入阻抗较低时，采用低电容有源探头即可，或是选用 50 输入阻抗探头。

2.1.3 提升示波器探头负载效应控制有效性

电信号测量过程中，若是在被测电路上完成了示波器探头的安装，此时探头与被测电路便会形成一个整体，此时示波器探头运行时，由于受到其输入阻抗影响，被测电路之上的负载会进一步增加，且这一负载效应会施加于被测电路之上，会影响原本较为稳定的被测信号，从而导致被测信号数据大小出现波动。若是示波器探头输入阻抗所产生的额外负载值过大，则会对被测电路形成较大的负载效应，此时将会影响电信号测量结果的精准性。

2.1.3.1 示波器探头的负载效应划分

示波器探头对被测电路所产生的负载效应主要有三种类型，一是阻性负载效应，即被测电路上安装示波器探头之后，等于被测电路上有另外一个电阻串联，此电阻的增加会导致被测信号电压被分散，进而会使被测信号出现较大幅度的波动，或使直流数据出现偏差。二是容性负载效应，即连接示波探头后的被测电路电容会增大，进而会过滤掉部分被测电路上传输的信号，同时也会导致被测信号的转换时间增大或减少，如此一来，可能会改变信号输送通道的带宽大小。三是感性负载效应，此效应主要是由于示波器探头与被

测电路连接后,探头地线所产生的,地线的电感、容性负载会与阻性负载之间产生谐振现象,进而会导致被测信号上有振铃问题出现。

2.1.3.2 负载效应降低方法

为减少被测电路安装示波器探头后所产生的负载效应,降低对被测信号的干扰,提升测量结果的精准性,需要在探头选择时重点检测与分析探头的阻抗值,进而选择阻抗大小与被测电路最为匹配的示波器探头。通常情况下,应以被测电路的输出阻抗作为判断依据,所选探头的阻抗值应为被测电路输出阻抗的10倍以上。同时,还要加强阻抗误差控制,数据偏差幅度不能高于10%。此外,示波器探头应具备最小的电容负载,以此有效降低电容负载对被测信号所产生的干扰。通过阻抗适合的探头选用,将被测电路上的额外负载控制在最小范围,从而得出高精度的电信号测量结果。

2.2 示波器探头应用注意事项

示波器探头安装与应用的过程中,要重点关注以下几个方面:

(1) 应做精准校对探头,再经过严格的校验,确保探头各方面性能及相应参数均与应用要求相一致之后,再将其安装于示波器之上,同时要对探头的衰减补偿进行合理调整,以此降低电信号测量时所产生的数据偏差;

(2) 安装示波器探头时,需要在被测电路地端之上有效连接探头地线,防止二者虚接而使设备之间、设备及地端之间形成过大的电位差,否则会引发放电问题,从而导致示波器探头受损,或是使其他设备损坏;

(3) 在快速脉冲信号、高频信号测量的过程中,需要将接地线的长度适当降低,防止因长度过大而导致测量信号出现过冲现象或引发振铃问题。

3 示波器测量结果误差分析

标准性测量环境下,可忽略连接线缆产生的误差,并无需考虑负载或电源变化等原因导致的误差,同时,还可通过多次测量取平均数值的方式有效消除肉眼观察所产生的数据读取偏差。因此,示波器探头应用过程中测量误差控制应以示波器及探头构建而成的测试系统的上升时间引入误差作为重点。将被测脉冲上升时间设定为 t ,可按公式(2)计算出上升时间测量值,即:

$$t_{\text{测量值}} = \sqrt{t^2 + \left(\frac{1}{3}t\right)^2} = 1.054t \quad (2)$$

之后,可按公式(3)计算得出引入测量误差值,即:

$$\delta = \frac{1.054t - t}{t} \times 100\% = 5.4\% \quad (3)$$

若以被测脉冲上升时间的20%作为示波器及探头所构建的测试系统上升时间,即探头上升时间比率为1/5时,计算得出的测量误差值是1.9%,而探头上升时间比率分别为1、1/2和1/3时,计算得出的测量误差依次为41.1%、11.8%和5.4%。通过这组测量误差数据分析发现,测试系统上升时间的大小与测量误差呈正比关系,即上升时间越大、带宽越小的情况,测试系统上升时间所产生的测量误差值也越大。为此,需要以被测脉冲频率的300%~500%作为示波器系统带宽值,如此方可实现脉冲的完整测量,最大化地降低数据测量误差。

4 结语

利用示波器测量脉冲参数时,示波器探头的质量决定着最终能否获得精准的测量结果,因而,需要通过示波器探头的合理选用,尽可能消除探头与被测电路相连后所产生的负载效应。应结合被测信号的特性,科学选用各项参数均适宜的示波器探头,进而提高测量精度。示波器探头应用时,需强化宽带频率及上升时间控制效果,加强阻抗匹配调整,提升示波器探头负载效应控制有效性,同时还要把控好注意事项,并将测试系统上升时间引入误差作为测量误差控制的关键,将示波器与探头的系统带宽设定为被测信号的3~5倍,进而实现高精度的脉冲波形数据测量。

参考文献:

- [1] 张昕. 示波器探头带宽的使用及测量结果的误差分析[J]. 科技信息, 2017(4): 180-181.
- [2] 何洪伟, 杨浩勋, 欧兴臣. 数字示波器参数示值误差的测量不确定度评定[J]. 工业计量, 2018(1): 68-72.
- [3] 曹建勋, 邹朝晖. 示波器测量脉冲信号测量结果的不确定度分析与评定[J]. 名城绘, 2018(2): 221.
- [4] 于一, 古城中, 邱晓军, 等. 示波器检定装置测量结果的测量不确定度评定方法[J]. 仪器仪表与分析监测, 2020(4): 21-25.
- [5] 刘洋. 示波器探头应用及测量结果误差分析[J]. 电子技术与软件工程, 2015(8): 136-137.

作者简介: 徐庆玉(1975-), 男, 汉族, 黑龙江鸡西人, 本科, 高级工程师, 研究方向: 电学计量。