

中华人民共和国国家标准

GB/T 16927.2—2013
代替 GB/T 16927.2—1997

高电压试验技术 第2部分：测量系统

High-voltage test techniques—Part 2: Measuring systems

(IEC 60060-2:2010, MOD)

杭州高电
专业高试铸典范

Professional high voltage test

高压测量仪器智造 | 电力试验工程服务

2013-02-07 发布

2013-07-01 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局
中国国家标准化管理委员会 发布



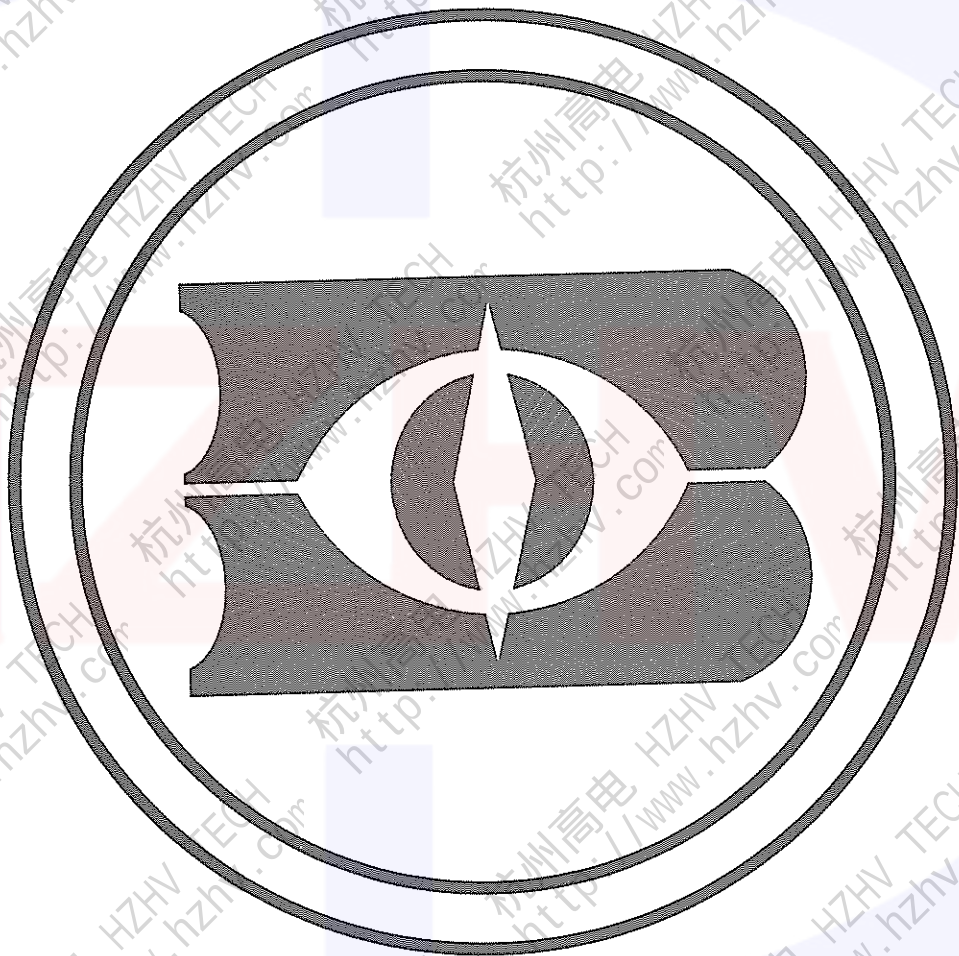
目 次

前言	V
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
3.1 测量系统	1
3.2 测量系统组件	2
3.3 刻度因数	3
3.4 额定值	3
3.5 有关动态特性的定义	4
3.6 有关不确定度的定义	5
3.7 有关测量系统试验的定义	6
4 测量系统的使用和性能校验程序	7
4.1 概述	7
4.2 性能试验周期	7
4.3 性能校核周期	7
4.4 对性能记录的要求	7
4.5 工作条件	8
4.6 不确定度	8
5 对认可测量系统及其组件的试验和试验要求	9
5.1 一般要求	9
5.2 校准—确定刻度因数	9
5.3 线性度试验	12
5.4 动态特性	14
5.5 短时稳定性	14
5.6 长期稳定性	14
5.7 环境温度影响	15
5.8 邻近效应	15
5.9 软件处理	15
5.10 刻度因数的不确定度计算	16
5.11 时间参数测量的不确定度计算(仅对冲击电压)	17
5.12 干扰试验(对冲击电压测量的传输系统和仪器)	19
5.13 转换装置的耐受试验	19
6 直流电压测量	19
6.1 对认可测量系统的要求	19
6.2 认可测量系统的试验	20
6.3 性能校核	20

6.4 纹波幅值的测量	21
7 交流电压的测量	22
7.1 对认可测量系统的要求	22
7.2 认可测量系统的试验	23
7.3 动态特性试验	23
7.4 性能校核	24
8 雷电冲击电压的测量	25
8.1 对认可测量系统的要求	25
8.2 认可测量系统的试验	25
8.3 测量系统的性能试验	26
8.4 动态特性试验	27
8.5 性能校核	27
9 操作冲击电压的测量	28
9.1 对认可测量系统的要求	28
9.2 认可测量系统的试验	28
9.3 测量系统的性能试验	28
9.4 动态特性的比对试验	29
9.5 性能校核	30
10 标准测量系统	30
10.1 对标准测量系统的要求	30
10.2 标准测量系统的校准	31
10.3 标准测量系统的校准周期	31
10.4 标准测量系统的使用	31
附录 A (资料性附录) 测量不确定度	32
A.1 概述	32
A.2 补充定义	32
A.3 模型函数	33
A.4 标准不确定度的 A 类评定	33
A.5 标准不确定度的 B 类评定	33
A.6 合成标准不确定度	35
A.7 扩展不确定度	35
A.8 有效自由度	35
A.9 不确定度预算	36
A.10 测量结果表述	36
附录 B (资料性附录) 高电压测量不确定度计算示例	38
B.1 示例 1: 交流测量系统的刻度因数(比对法)	38
B.2 示例 2: 冲击电压测量系统的刻度因数(比对法)	41
B.3 示例 3: 雷电冲击电压的波前时间	45
附录 C (资料性附录) 阶跃响应测量	48
C.1 概述	48
C.2 补充定义	48

C.3 阶跃响应测量回路	49
C.4 对组件阶跃响应的要求	49
附录 D (资料性附录) 用阶跃响应测量确定动态特性的卷积法	52
D.1 概述	52
D.2 卷积的方法	52
D.3 进行卷积计算的程序	52
D.4 不确定度分量	53
D.5 冲击参数计算误差的讨论	53
参考文献	55
图 1 幅-频响应及限值频率(f_1 、 f_2)示例	4
图 2 全电压范围内比对的校准	10
图 3 校准的不确定度分量(最少取 5 个电压水平的示例)	10
图 4 有限电压范围比对和附加线性度试验的校准	11
图 5 用线性装置在扩展电压范围内进行测量系统的线性度试验	13
图 6 用于单个基波频率 f_{nom} (试验频率为 $f_{nom} \sim 7f_{nom}$) 的测量系统的可接受的归一化幅频响应 阴影区域	23
图 7 用于基波频率 f_{nom1} 至 f_{nom2} 范围(试验频率为 $f_{nom1} \sim 7f_{nom2}$) 的测量系统的可接受的归一化 幅频响应阴影区域	23
图 A.1 正态概率分布 $p(x)$	37
图 A.2 矩形概率分布 $p(x)$	37
图 B.1 被校系统 X 与标准系统 N 的比对	46
图 B.2 $T_1 \approx 0.8 \mu s \sim 1.6 \mu s$ 内系统 X 相对于标准系统 N 的波前时间偏差 $\Delta T_{1,j}$ 及其平均值 ΔT_{1m}	47
图 C.1 响应参数的定义	50
图 C.2 带有起始畸变时间 T_0 的单位阶跃响应 $g(t)$	51
图 C.3 阶跃响应测量的适用电路	51
表 1 直流电压认可测量系统要求的试验	20
表 2 纹波测量不确定度分量要求的试验	21
表 3 交流电压认可测量系统要求的试验	24
表 4 雷电冲击电压认可测量系统要求的试验	26
表 5 操作冲击电压认可测量系统要求的试验	29
表 6 冲击电压标准测量系统响应参数的推荐值	31
表 A.1 有效自由度 ν_{eff} 对应的包含因子 $k(P=95.45\%)$	36
表 A.2 不确定度预算的示意	37
表 B.1 比对测量结果	39
表 B.2 $h=5$ 个电压水平($V_{xmax}=200 \text{ kV}$)下结果汇总	40
表 B.3 短时稳定性试验结果	40
表 B.4 标定刻度因数 F_x 的不确定度预算	41
表 B.5 正极性冲击电压比对	41
表 B.6 负极性冲击电压比对	42

表 B.7	各电压水平下结果汇总	42
表 B.8	扩展范围的非线性试验	43
表 B.9	短时稳定性测试	43
表 B.10	标定刻度因数 F_x 的不确定度预算	44
表 B.11	波前时间 T_1 和偏差的校准结果	45
表 B.12	波前时间偏差 ΔT_{1al} 的不确定度预算	46



前 言

GB/T 16927《高电压试验技术》已经或计划发布以下部分：

- 第1部分：一般定义及试验要求；
- 第2部分：测量系统；
- 第3部分：现场试验的定义及要求。

本部分为 GB/T 16927 的第2部分。

本部分按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本部分代替 GB/T 16927.2—1997《高电压试验技术 第2部分：测量系统》。

本部分与 GB/T 16927.2—1997 相比，除编辑性修改外主要技术变化如下：

- 增加并修改了与高电压测量相关的术语，特别是冲击电压测量系统的术语；
- 对测量系统的使用和性能试验程序（包括周期）提出了更加明确的要求；
- 对认可测量系统及其组件的校核提出了更细的要求，增加了软件处理的内容；
- 对测量系统及其组件的不确定度分量及其确定方法给出了具体方法；
- 删除了冲击电流测量系统的内容；
- 删除了 1997 版标准中的附录 A，增加了新的附录 A，给出了不确定度及其分量的确定方法；
- 删除了 1997 版标准中附录 B，增加了新的附录 B，给出了认可测量系统不确定度计算示例；
- 对附录 C，阶跃响应测量进行了修订；
- 删除了 1997 版标准中附录 D，增加了新的附录 D，用阶跃响应测量确定动态性能的卷积法；
- 删除了 1997 版标准中附录 F，将这些内容放在相关标准条款中叙述。

本部分修改采用 IEC 60060-2:2010《高电压试验技术 第2部分：测量系统》。本部分与 IEC 60060-2:2010 的技术性差异及其原因如下：

- 按照我国实验室认可测量系统不确定度的计算惯例，收集实验室高电压测量数据，给出高压（交流、冲击、雷电冲击）测量系统不确定度计算示例（见附录 B）；
- 对于测量系统的性能校验程序的工作条件，考虑到我国高压测量仪器设备以及实验室的具体情况，增加“设备委员会可规定更长标定工作时间”的说明（见 4.5）。

本部分还做了下列编辑性修改：

- 对图 3 校准不确定度分量中图示公式有误处作出相应修改；
- 对图 C.1a) 单位阶跃响应 $g(t)$ 的有关定义中符号有误处作出相应修改。

本部分与 IEC 60060-2:2010 的上述主要差异涉及的条款已通过在其外侧页边空白位置的垂直单线()进行了标示。

请注意本部分的某些内容可能涉及专利。本部分的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本部分由中国电器工业协会提出。

本部分由全国高电压试验技术和绝缘配合标准化技术委员会(SAC/TC 163)归口。

本部分负责起草单位：西安高压电器研究院有限责任公司、国网电力科学研究院。

本部分参加起草单位：国家高压电器质量监督检验中心、国家绝缘子避雷器质量监督检验中心、清华大学、西安交通大学、南方电网科学研究院、深圳电气科学研究院、陕西电力科学研究院、江西省电力科学研究院、沈阳变压器研究院、昆明电器科学研究院、西安西电开关电气有限公司、西安西电变压器有限责任公司、保定天威保变电气股份有限公司、山东电力研究院、湖北省电力公司电力试验研究院、北京华天机电研究所有限公司、四川省绵竹西南电工设备有限责任公司、江苏盛华电气有限公司、桂林电力

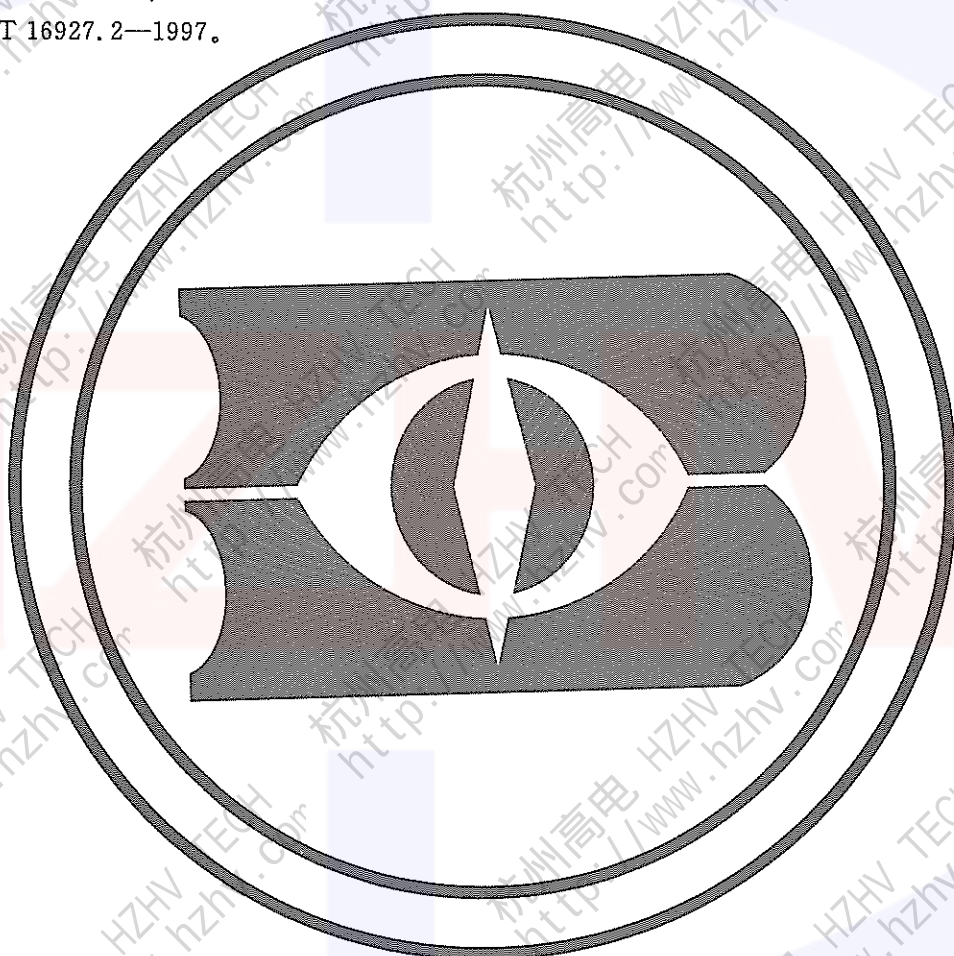
电容器有限责任公司、北京兴迪仪器有限责任公司、湖北省电力公司生产技术部、苏州华电电气股份有限公司。

本部分主要起草人：王建生、雷民、崔东、冯建强、戚庆成、张艳、李前、李彦明、危鹏。

本部分参加起草人：王亨、肖敏英、李世成、陈绍义、黄天顺、艾晓宇、廖学理、赵磊、周琼芳、汪涛、王琦、高永利、赵富强、薄海旺、蒲路、王军、李银行、邓永辉、周春荣、张健、黄永祥、肖传强、卢军、余青。

本部分所代替标准的历次版本发布情况为：

- GB/T 311—1964；
- GB 311.4—1983；
- GB 311.5—1983；
- GB/T 16927.2—1997。



高电压试验技术 第2部分:测量系统

1 范围

GB/T 16927 的本部分适用于在实验室和工厂试验中用于测量 GB/T 16927.1 规定的直流电压、交流电压、雷电和操作冲击电压的测量系统及其组件。现场试验测量见 GB/T 16927.3。

本部分规定的测量不确定度的限值适用于 GB 311.1 规定的试验电压,但其原则也适用于更高试验电压,此时不确定度可能较大。

本部分包含以下内容:

- a) 定义所使用的术语;
- b) 给出高压测量不确定度的估算方法;
- c) 规定测量系统应当满足的要求;
- d) 给出测量系统的认可方法及其组件的校核方法;
- e) 给出测量系统满足本部分要求的程序,包括测量不确定度的限值。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB 311.1 绝缘配合 第1部分:定义,原则和规则(GB 311.1—2012,IEC 60071-1,MOD)

GB/T 311.6 电压测量标准空气间隙(GB/T 311.6—2005,IEC 60052,MOD)

GB/T 7354 局部放电测量(IEC 60270,IDT)

GB/T 16896.1 高电压冲击测量仪器和软件 第1部分:对仪器的要求(IEC 61083-1,MOD)

GB/T 16896.2 高电压冲击测量仪器和软件 第2部分:软件的要求(IEC 61083-2,MOD)

GB/T 16927.1 高电压试验技术 第1部分:一般定义和试验要求(IEC 60060-1,MOD)

GB/T 16927.3 高电压试验技术 第3部分:现场试验的定义及要求(IEC 60060-3,MOD)

JJF 1059 测量不确定度评定与表示

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1 测量系统 Measuring systems

3.1.1

测量系统 measuring system

用于进行高电压测量的整套装置。用于获取或计算测量结果的软件也是测量系统的一部分。

注1:测量系统通常包括以下组件:

- 带引线的转换装置,该引线是指转换装置与试品或回路的连接以及接地连接;
- 连接转换装置的输出端到测量仪器(并附有衰减、终端匹配阻抗或网络)的传输系统;

- 带有电源线的测量仪器;仅由以上某些组件组成或基于非传统原理的测量系统,只要符合本部分规定的
不确定度要求也是可以接受的。

注2: 测量系统所处的环境,如与带电体和接地物体的净距、周围电场或磁场等都可能明显影响测量结果及其不确定度。

3.1.2

性能记录 record of performance

使用者建立并保存的测量系统的详细记录,是说明系统和表明系统达到标准所列要求的证明文件。

注: 文件中应包含初始性能试验结果和历次性能试验,性能校核结果以及相应性能试验(校核)的周期。

3.1.3

认可测量系统 approved measuring system

满足本部分给出的一组或几组要求的测量系统。

3.1.4

标准测量系统 reference measuring system

通过校准可溯源到相关国家和/或国际基准,且具有足够的准确度和稳定性的测量系统。在进行特定波形和特定电压范围内的比对测量中,该系统用于认可其他的测量系统。

注: 满足本部分要求的标准测量系统可作为认可测量系统使用,但认可测量系统不能作为标准测量系统使用。

3.2 测量系统组件 Components of a measuring system

3.2.1

转换装置 converting device

将被测量转换成测量仪器可记录或显示的量值的装置。

3.2.2

分压器 voltage divider

由高压臂和低压臂组成的转换装置。输入电压加到整个装置上,而输出电压则取自低压臂。

注: 两个臂的元件通常是电阻、电容或两者的组合体。装置的名称取决于元件的类型及布置(例如,电阻、电容或阻容)。

3.2.3

电压互感器 voltage transformer

包含有一变压器的转换装置,在正常使用条件下,其二次电压基本正比于一次电压;对正确的连接方式,其相位差近似为零。

3.2.4

电压转换阻抗 voltage converting impedance

承载与施加电压成比例的电流的转换装置。

3.2.5

电场探头 electric-field probe

测量电场幅值和波形的转换装置。

注: 当测量不受电晕或空间电荷的影响时,电场探头可用来测量产生电场的电压波形。

3.2.6

传输系统 transmission system

将转换装置的输出信号传输到测量仪器的一套装置。

注1: 传输系统一般由带终端阻抗的同轴电缆组成,还可包括转换装置与测量仪器之间所连接的衰减器、放大器或其他装置,例如,光纤系统包括光发射器、光缆和光接收器以及相应的放大器。

注2: 传输系统可全部或部分地归入转换装置或测量仪器中。

3.2.7

测量仪器 measuring instrument

单独或与外加装置一起进行测量的装置。

3.3 刻度因数 scale factor

3.3.1

测量系统的刻度因数 scale factor of a measuring system

与测量仪器的读数相乘便得到整个测量系统的输入量值的因数。

注1：对不同的标定测量范围、不同的频率范围或不同的波形，一个测量系统可有多多个刻度因数。

注2：直接显示输入量值的测量系统，其标称刻度因数为1。

3.3.2

转换装置的刻度因数 scale factor of a converting device

与转换装置的输出量值相乘便得到其输入量值的因数。

注：转换装置的刻度因数可以是无量纲的（例如分压器的分压比），也可以是有量纲的（例如电压转换阻抗的阻抗）。

3.3.3

传输系统的刻度因数 scale factor of a transmission system

与传输系统的输出量值相乘便得到其输入量值的因数。

3.3.4

测量仪器的刻度因数 scale factor of a measuring instrument

与仪器的读数相乘便得到其输入量值的因数。

3.3.5

标定刻度因数 assigned scale factor

F

最近一次性能试验所确定的测量系统的刻度因数。

注：一个测量系统可有多多个标定刻度因数。例如，若系统有几个测量范围和/或标称时段（见3.5.4），每个范围或标称时段可有不同的刻度因数。

3.4 额定值 rated values

3.4.1

工作条件 operating conditions

规定的条件范围，在此条件范围内测量系统能在规定的不确定度范围内工作。

3.4.2

额定工作电压 rated operating voltage

测量系统可适用的具有规定频率或波形的最大电压水平。

注：额定工作电压可高于标定测量范围的上限。

3.4.3

标定测量范围 assigned measurement range

用单一刻度因数来表征的具有规定频率或波形的测量系统可能工作的电压范围。

注1：标定测量范围限值可由使用者选定，并经本部分规定的性能试验加以验证。

注2：对于含有多多个刻度因数的测量系统可有多多个标定测量范围。

3.4.4

标定工作时间 assigned operating time

对直流或交流电压，测量系统能在标定测量范围上限工作的最长时间。

3.4.5

标定施加频次 assigned rate of application

测量系统能在标定测量范围上限工作,并在规定的时间间隔内所能承受的规定冲击电压的最大次数。

注:该次数通常以每分钟施加次数以及以数分钟或数小时为时间间隔内的施加次数来表示。

3.5 有关动态特性的定义 definitions related to the dynamic behaviour

3.5.1

测量系统的响应 response of a measuring system

G

当系统的输入端施加规定的电压时的输出,该输出是时间或频率的函数。

3.5.2

幅-频响应 amplitude-frequency response

$G(f)$

当输入为正弦波时,测量系统的输出和输入之比值与频率 f 的关系(见图 1)。

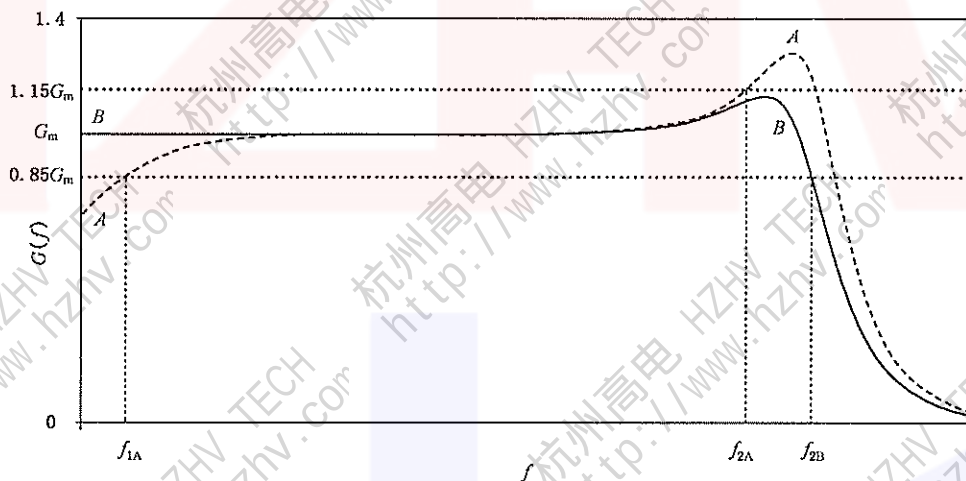
3.5.3

阶跃响应 step response

$G(t)$

当输入为一个阶跃波时,测量系统的输出与时间的关系。

注:关于阶跃响应和阶跃响应参数的详细信息参见附录 C。



说明:曲线 A 示出了上、下限频率;曲线 B 为一个下限直到直流的恒定的响应。

图 1 幅-频响应及限值频率(f_1 、 f_2)示例

3.5.4

标称时段(仅对冲击测量) nominal epoch(impulse voltage only)

τ_{N1}

测量系统被认可的相关冲击电压时间参数最小值($t_{\min}$)和最大值($t_{\max}$)之间的间隔。

注 1:相关的时间参数是:

- 全波和波尾截断雷电冲击的波前时间 T_1 ;
- 波前截断雷电冲击的截断时间 T_C ;
- 操作冲击的峰值时间 T_P 。

注 2:对于不同的波形,一个测量系统可能有一个以上的标称时段。例如,一个特定的测量系统可以认可如下标称时段:

- 对全波或波尾截断的雷电冲击, 标定刻度因数 F_1 被认可的标称时段 τ_{N1} 为 $T_1=0.8\ \mu\text{s}\sim 1.8\ \mu\text{s}$;
- 对波前截断的雷电冲击, 标定刻度因数 F_2 被认可的标称时段 τ_{N2} 为 $T_C=0.5\ \mu\text{s}\sim 0.9\ \mu\text{s}$;
- 对操作冲击, 标定刻度因数 F_3 被认可的标称时段 τ_{N3} 为 $T_p=150\ \mu\text{s}\sim 500\ \mu\text{s}$ 。

注 3: “波前截断冲击”是指冲击截断发生在波前 $0.5\ \mu\text{s}$ 到峰值时间的范围内, 以区别于截断时间大于峰值时间的“波尾截断冲击”。

3.5.5

限值频率 limit frequencies

f_1 和 f_2

幅-频响应近似恒定范围的频率的下限和上限(见图 1)。

注: 该上、下限是响应第一次偏离恒定值某一数值(例如 $\pm 15\%$) 的位置。容许的偏离与测量系统可接受的不确定度有关。

3.6 有关不确定度的定义 definitions related to uncertainty

3.6.1

容差 tolerance

测量值与规定值之间的允许差值。

注 1: 此差值应区别于测量不确定度。

注 2: 测得的试验电压应在规定试验电压的给定容差范围内。

3.6.2

误差 error

被测量值与参考量值之差。

3.6.3

(测量)不确定度 uncertainty(of measurement)

表征合理地赋予被测量之值的分散性, 与测量结果相联系的参数。

注 1: 不确定度是不带符号的正数。

注 2: 电压测量的不确定度不应与规定试验电压的容差相混淆。

注 3: 更多信息参见附录 A 和附录 B。

3.6.4

标准不确定度 standard uncertainty

u

以标准偏差表示的测量结果的不确定度。

注 1: 标准不确定度与被测值的估计值有关, 与被测值有相同的量纲。

注 2: 某些情况下, 可以使用测量的相对标准不确定度, 测量的相对标准不确定度是标准不确定度除以被测值, 因此是无量纲值。

3.6.5

合成标准不确定度 combined standard uncertainty

u_c

当测量结果是由若干个其他分量的值求得时, 测量值的标准不确定度等于各分量的方差或协方差总和的平方根的正值。计算时需依据各分量对测量结果的影响权重。

3.6.6

扩展不确定度 expanded uncertainty

U

确定测量结果区间的量, 合理赋予被测量之值分布的大部分可望含于此区间。

注 1: 扩展不确定度非常接近本部分较早版本中的“总不确定度”。

注 2: 由于覆盖概率小于 100% (见 3.6.7), 不可知的试验电压的真值可能落在不确定度的限值之外。

3.6.7

覆盖因子(包含因子) coverage factor

k

为求得扩展不确定度,与合成标准不确定度相乘的数字因子。

注:对95%覆盖概率和正态(高斯)概率分布,覆盖因子约为 $k=2$ 。

3.6.8

(不确定度的)A类评定 Type A evaluation(of uncertainty)

对一系列观测值进行统计分析来评定标准不确定度的方法。

3.6.9

(不确定度的)B类评定 Type B evaluation(of uncertainty)

对一系列观测值进行非统计分析来评定标准不确定度的方法。

3.6.10

可溯源性 traceability

通过一条具有规定不确定度的不间断的比较链,使测量结果或测量的标准值能够与规定的参考标准,通常是与国家测量基准或国际测量基准联系起来的特性。

3.6.11

国家计量研究机构 National Metrology Institute

由国家指定的对一个或多个量的国家测量基准进行开发和维护的科研机构。

3.7 有关测量系统试验的定义 Definitions related to tests on measuring systems

3.7.1

校准 calibration

在规定条件下,为确定测量仪器或测量系统所指示的量值,或实物量具或参考物质所代表的量值,与对应的由标准所复现的量值之间关系的一组操作。

3.7.2

型式试验 type test

在一套(台)或多套(台)典型测量系统或测量装置上进行的符合性试验。

注:测量系统的型式试验可理解为,对相同设计的整套测量系统或单个组件在工作条件下检测其性能的试验。

3.7.3

例行试验 routine test

每个单套测量系统或其组件加工期间或加工后进行的符合性试验。

注:例行试验可理解为对每个整套测量系统或每个组件在工作条件下检测其性能的试验。

3.7.4

性能试验 performance test

对整套测量系统在工作条件下检测其性能的试验。

3.7.5

性能校核 performance check

验证最近一次性能试验所确定的结果是否仍有效所进行的简化试验。

3.7.6

参考记录(仅对冲击测量) reference record(impulse measurements only)

性能试验中规定的条件下得到的记录,可用来与将来进行的相同条件下试验或校核所得的记录进行比较。

参考记录经常被称作“指纹”,用于表征动态特性。冲击电压测量经常从阶跃响应测量中提取参考记录。

4 测量系统的使用和性能校验程序

4.1 概述

每个认可测量系统在其整个使用寿命期间均需经初始试验、性能试验(周期性的,见 4.2)及其性能校核(周期性的,见 4.3)。初始试验包括型式试验(在相同设计的单个组件或系统上进行)和例行试验(在每个组件或系统上进行)。

性能试验和性能校核应证明测量系统可对拟测量试验电压进行测量,且应满足本部分给出的不确定度要求,而且该测量可溯源到相应的国家或国际测量基准。只有在其性能记录中包含系统布置和工作条件的情况下,测量系统才能被认可。

测量系统的转换装置、传输系统、测量仪器的主要要求是在规定的工作条件范围内应稳定,保证测量系统的刻度因数在长时间内保持恒定。

标定刻度因数通过性能试验校准确定。使用者应采用本部分规定的试验来评定其测量系统。当然,使用者也可选择由国家计量机构或有资质的校准实验室来进行性能试验。不论采取何种方式,使用者应将试验数据存入性能记录中。

任一校准应溯源到国家和/或国际基准。使用者应保证每次自行校准是由能胜任的人员使用标准测量系统和合适的操作程序进行。

注:由国家计量机构或有资质的校准实验室进行的校准及其出具的报告、证书可以认为是已溯源到国家和/或国际基准。

4.2 性能试验周期

为保持测量系统的性能,应定期重复性能试验以确定其标定刻度因数。性能试验周期应基于以往测量系统的稳定性评估。建议性能试验应每年重复一次,最大时间间隔不应超过 5 年。

注:性能试验的周期加长会增加测量系统变化未被发现的风险。

测量系统经过大修后以及回路布置超出性能记录中给出的使用范围时均应进行性能试验。

由于性能校核中发现标定刻度因数不再有效而必须进行性能试验时,在性能试验前应先研究发生变化的原因。

4.3 性能校核周期

应根据性能记录中记录的测量系统稳定性的时限进行性能校核。与最近性能试验或性能校核的时间间隔不应超过 1 年。

对新的或检修过的系统应缩短其性能校核的时间间隔以确定其稳定性。

由于性能校核的准确度要求低于性能试验的要求,因此对性能校核不规定标准方法。

4.4 对性能记录的要求

4.4.1 性能记录的内容

所有试验和校核结果包括获取这些结果的条件均应保存在由使用者建立并保存的性能记录中(根据地方法规和质量体系允许由纸质文件或电子文档储存),性能记录应包含测量系统的每个组件,而且保证测量系统的性能完整连续可查。

性能记录至少包括以下信息:

- 测量系统的一般说明;
- 转换装置、传输系统和测量仪器、测量系统(如果已进行的)的型式试验和例行试验结果;

- 测量系统的每次性能试验结果；
- 测量系统的每次性能校核结果。

注：测量系统的一般说明通常由测量系统的主要指标和功能组成，比如：额定工作电压、波形、净距范围、工作时间、或电压最大施加频次。对许多测量系统而言传输系统以及高压和接地布置的信息是重要的。如果需要，测量系统的组件说明还应包括测量仪器的型号和相关文件。

4.4.2 例外情况

对本部分 1997 版公布前制造的测量系统或组件，所要求的型式试验和例行试验有些部分证明文件可能无法获得。按较早版本的标准进行性能试验和校核，只要表明刻度因数是稳定的，就认为是足够了，但这些早期校核记录结果应录入性能记录中。

由几件可互换使用的装置组成的认可测量系统应包括各种最少重复组合的单独性能记录，即每一装置应单独记录，而传输系统和测量仪器可综合记录。

4.5 工作条件

认可的电压测量系统应直接与试品两端相连，或使试品两端和测量系统间的电压差可被忽略。连接时应使试验和测量回路之间的杂散耦合减至最小。

注 1：杂散耦合还需进一步研究。

在性能记录给出的整个工作和环境条件范围内，认可测量系统的不确定度应当在本部分所规定的范围内。

对交、直流电压应规定测量系统的标定工作时间。

注 2：推荐最短标定工作时间为 1 h。有关设备委员会可规定更长的标定工作时间。¹⁾

对冲击电压应规定最大施加频次。

注 3：推荐最大施加频次的最小值为 1 次/min 或 2 次/min，且应根据转换装置的尺寸来规定。

应当注明测量系统组件满足本部分要求的环境条件范围。

4.6 不确定度

按本部分进行的所有测量的不确定度应依据 JJF 1059 规范进行评定。

评定不确定度的程序可按 JJF 1059 规范以及本部分给出的方法进行。本部分第 5 章中给出的简化程序对高电压试验中常用的仪表设备和测量布置已足够了。但是，使用者也可从 JJF 1059 规范中选取其他合适的程序，附录 A 和附录 B 简要给出了这些程序。

通常，被测量需要考虑的是测量系统的刻度因数。但是在某些情况下还应考虑其他量值，例如冲击电压的时间参数及其误差。

注 1：对特殊的转换装置其他量是常用的。例如，分压器是由使用范围内的分压比及其不确定度进行表征，电压互感器则由变比误差、相位差和相应的不确定度进行表征。

依据 JJF 1059，测量的不确定度由 A 类和 B 类（见 5.10、5.11 和附录 A）合成不确定度确定。应从测量结果、制造商手册、校准证书以及测量期间影响因素的合理估算值中获得。例如，第 5 章中所述的影响因素包括温度影响和邻近效应；其他的如测量仪器的有限分辨率也应包括在内（如果需要）。

注 2：测量仪器的分辨率，如记录仪的位数较低，可能是不确定度的重要影响因素。

实际电压试验期间，除了校准证书中所述刻度因数的校准不确定度，通常需要考虑附加的影响因素，以获得试验电压值的测量不确定度。

第 5 章及附录 A 和附录 B 中给出了需要考虑的不确定度分量及其合成不确定度的确定导则。不确定度应以覆盖概率近似为 95% 的扩展不确定度给出，在正态分布的假定下，覆盖因子 $k=2$ 。

1) 采标说明：根据我国实际情况，增加此说明。

本部分中,刻度因数的不确定度和电压测量的不确定度(5.2~5.10)是用相对不确定度来表示的,而不是 JJF 1059 规范通常考虑的绝对不确定度。在 5.11 以及附录 A 和附录 B 中,对时间参数直接采用 JJF 1059 规范并以绝对不确定度来表示。

5 对认可测量系统及其组件的试验和试验要求

5.1 一般要求

应依据规定的性能试验进行校准来确定测量系统的标定刻度因数。对标定的测量范围,标定刻度因数是唯一值。如果需要,不同的标定测量范围可规定不同刻度因数。

对冲击测量系统,性能试验还应表明其动态特性足以满足规定的测量要求,而且其任意干扰水平未超出规定范围。

因为设备的大尺寸和实际环境条件,校准应尽量在现场通过与标准测量系统的比对来进行。

较小尺寸的测量系统或其组件可送到其他实验室按其工作条件布置进行校验。但是,干扰试验(如果规定),应在使用者实验室进行。

如果转换装置对邻近效应是敏感的,则应确定有效标定刻度因数对应的净距范围,且应保存在性能记录中。每一净距范围对应的标定刻度因数均应验证。

应当在标定测量范围内确定测量系统的刻度因数,最好是通过与标准测量系统的比对来确定。但是,高电压的标准测量系统很难获得,比对可在大于或等于 20% 标定测量范围内进行,前提是已证明从该电压至标定测量电压范围最高值是线性的。

所有用于确定测量系统刻度因数的设备应可溯源至国家和/或国际基准的校准。

注:由国家计量机构或有资质的校准实验室进行的校准及其出具的报告、证书可以认为是已溯源到国家和/或国际基准。

对认可测量系统的校准结果有重要影响的条件应包含在性能记录中。

5.2 校准—确定刻度因数

5.2.1 通过与标准测量系统比对进行校准(优选方法)

5.2.1.1 比对测量

整套测量系统的刻度因数是通过与标准测量系统的比对确定的。

用于校准的输入电压应与被测电压具有相同类型、频率或波形。如不满足此条件,应估算相关不确定度分量。

对溯源至国家计量机构的比对标准测量系统,应与被校测量系统并联连接。应采取措施避免转换装置和测量仪器间的接地环路。两个系统应同时读数。由标准测量系统读到的每次测量的输入量除以被校测量系统仪器的相应读数求得该次测量的刻度因数 $F_{i,g}$ 值。重复该测量 n 次求取被校测量系统在某一电压水平 u_g 下的刻度因数平均值 F_g 。平均值由式(1)给出:

$$F_g = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_{i,g} \quad \dots\dots\dots (1)$$

F_g 的相对标准偏差 s_g 由式(2)给出:

$$s_g = \frac{1}{F_g} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (F_{i,g} - F_g)^2} \quad \dots\dots\dots (2)$$

平均值 F_g 的 A 类相对标准不确定度 u_g 由式(3)求得(参见附录 A):

$$u_g = \frac{s_g}{\sqrt{n}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

注 1: 通常独立读数 $n=10$ 已足够。

注 2: 对交、直流电压的测量, 独立读数可通过施加试验电压读取 n 个读数或施加 n 次电压读取每次读数来求得。

对冲击电压则是施加 n 次冲击。

有多个标定测量范围(例如有几个低压臂的分压器)或采用不同传输系统的测量系统应当对每个范围或每个传输系统进行校准。有二次衰减器的测量系统, 只要能够通过其他试验证明对所有设置该转换装置的输出负载是不变的, 可仅在一个设置上校准, 这种情况应分别校准二次衰减器的所有范围。

刻度因数应在整个标定测量范围由以下 5.2.1.2(优选)、5.2.1.3 和 5.2.2 所述方法之一确定。

5.2.1.2 全部标定测量范围内进行比对

该试验包括标定刻度因数的确定和线性度的确定, 应在标定测量范围的最小和最大值之间直接与标准测量系统进行比对来确定刻度因数, 而且还应在至少 3 个近乎相等间隔的中间值下进行比对(见图 2)。标定刻度因数即为 h 个电压水平下记录到的所有刻度 F_g 因数的平均值见式(4):

$$F = \frac{1}{h} \sum_{g=1}^h F_g, \text{ 其中 } h \geq 5 \quad \dots\dots\dots (4)$$

取各个 A 类标准不确定度中的最大值[见式(5)]作为标定刻度因数 F 的标准不确定度(见图 3)。

$$u_A = \max_{g=1}^h u_g \quad \dots\dots\dots (5)$$

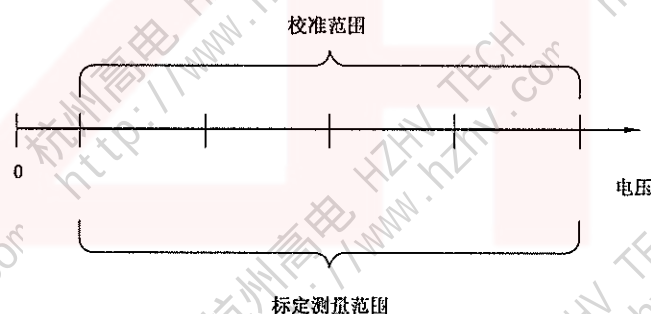


图 2 全电压范围内比对的校准

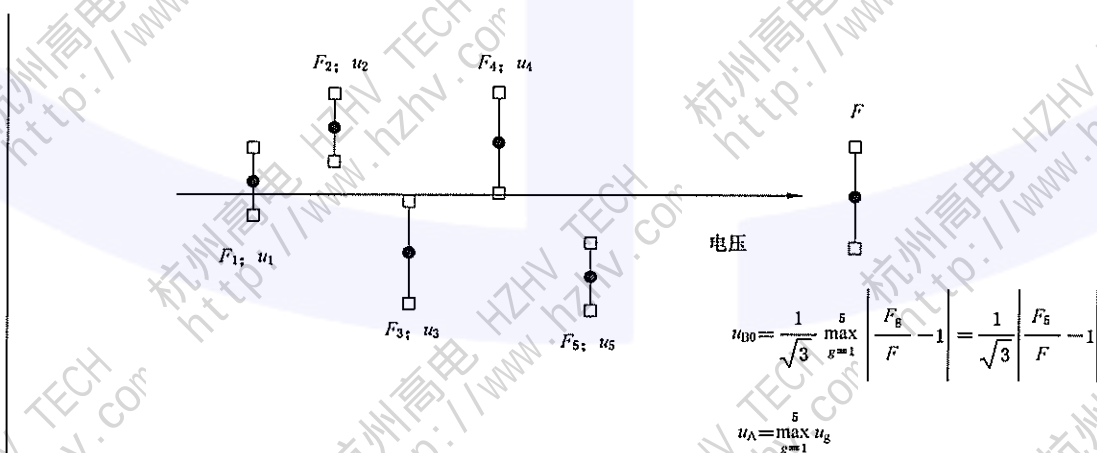


图 3 校准的不确定度分量(最少取 5 个电压水平的示例)²⁾

2) 采标说明: IEC 图中公式有误, 这里已作修改。

F 中非线性度的影响估计为一个 B 类标准不确定度, 由式(6)表示:

$$u_{B0} = \frac{1}{\sqrt{3}} \max_{g=1}^h \left| \frac{F_g}{F} - 1 \right| \quad \dots\dots\dots (6)$$

注 1: 在评估刻度因数的扩展不确定度时, 如果将修约值 F_0 和 F 的差值作为 B 类不确定度的分量来考虑, 可将 F_0 作为标定刻度因数。

注 2: 应在校准证书中给出 h 个电压水平下对应的每个刻度因数及其不确定度。

5.2.1.3 有限电压范围内的比对

在标定测量范围超过标准测量系统测量范围的情况下, 应对比至标准测量系统最高电压来确定刻度因数。应在不低于标定测量范围 20% 的电压下进行比对(见图 4)。

应依据 5.3 补充进行线性度试验。使用测量系统时, 计算测量不确定度时应考虑与线性度有关的不确定度分量, 见 5.10.3。

与标准测量系统比对在 $a \geq 2$ 个电压水平下进行, 最高电压水平等于标准测量系统的最高电压值。所需的线性度试验在 $b \geq 2$ 个电压水平下进行, 其中一个电压水平应等于比对最高电压水平(见 5.3)。所选取的电压水平至少包括标定测量范围的最大、最小值, 因此,

$$a + b \geq 6$$

标定刻度因数 F 即为标准测量系统记录的刻度因数的平均值见式(7):

$$F = \frac{1}{a} \sum_{g=1}^a F_g \quad \dots\dots\dots (7)$$

刻度因数 F 的标准不确定度由以下两个分量构成:

A 类标准不确定度, 即为单个标准不确定度 u_g 的最大值见式(8):

$$u_A = \max_{g=1}^a u_g \quad \dots\dots\dots (8)$$

和校准值中的非线性分量见式(9):

$$u_{B0} = \frac{1}{\sqrt{3}} \max_{g=1}^a \left| \frac{F_g}{F} - 1 \right| \quad \dots\dots\dots (9)$$

注: 在评估刻度因数的扩展不确定度时, 如果将修约值 F_0 和 F 的差值作为 B 类不确定度的分量来考虑, 可将 F_0 作为标定刻度因数。

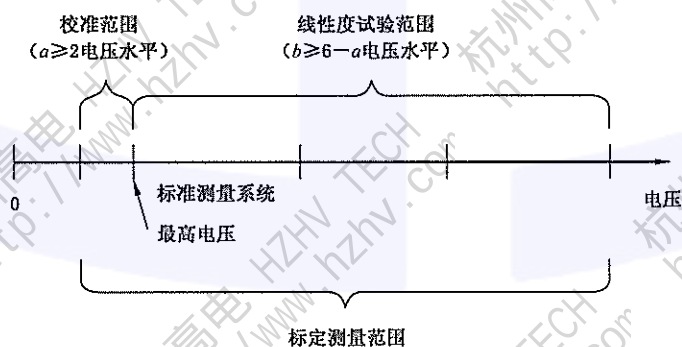


图 4 有限电压范围比对和附加线性度试验的校准

5.2.2 由测量系统组件刻度因数确定测量系统刻度因数(替代方法)

测量系统的标定刻度因数应为其转换装置、传输系统、二次衰减器以及测量仪器的刻度因数的乘积。

对转换装置和传输系统或它们的组合,其刻度因数应由以下方法之一进行测量。对仅以电缆组成的传输系统不要求单独试验。测量仪器的刻度因数的确定是依据相关标准(见第2章,特别是GB/T 16896.1和GB/T 16896.2)或依据第5章实施校准和试验。

组件刻度因数可通过以下方法之一进行确定:

- 与标准组件比对(例如:分压器与标准分压器比对)或采用精确的低压校准器;
- 同步测量其输入输出量;
- 电桥法或精确的低压下的变比测量;
- 基于所测阻抗的计算。

注1:应当采取措施确保测量中包括了杂散电容或耦合电容的影响以及组件间的相互影响。

对测量系统的每一组件,应估算A类和B类不确定度分量(5.2~5.9),确定每一组件的合成不确定度时应考虑校准中使用的测量装置的不确定度分量。

注2:组件校准法中不确定度分量的估算要求对每一组件在全范围条件内,如电压、温度、邻近效应等对结果的影响,这种分析比较复杂,需要对测量过程有深入的了解。

应根据JJF 1059规范(见附录A和附录B,尤其是B.2示例),通过将各组件合成不确定度的组合来求取电压测量的扩展不确定度。

时间参数测量不确定度的估算应按5.11进行,与电压测量的原则相同。

5.3 线性度试验

5.3.1 应用

该试验仅是为了依据5.2.1.3进行校准的最大电压的刻度因数提供一个扩展的有效范围,即扩展至标定测量范围的最高限值(见图4)。

测量系统的输出应与线性度已被认可或其被推测在全电压范围是线性的装置或系统进行比对(见5.3.2)。使用该方法得到的不满足要求的线性度不一定意味着系统非线性。在这种情况下可选择其他适合线性度测量的试验。应按5.2.1.1从标定测量范围的最高限值到确定刻度因数的电压值范围中给出***b***个不同电压值内测量系统与比对装置或系统的读数之比(见图4)。

线性度的评估是基于***b***个测量电压和对应比对装置电压之比 R_g 与平均值 R_m 的最大偏差。该最大偏差作为与在扩展电压范围内刻度因数非线性有关的标准不确定度的B类评估 u_{B1} [见式(10)、图5]:

$$u_{B1} = \frac{1}{\sqrt{3}} \max_{g=1}^b \left| \frac{R_g}{R_m} - 1 \right| \quad \dots\dots\dots (10)$$

5.3.2 替代方法

5.3.2.1 与认可测量系统的比对

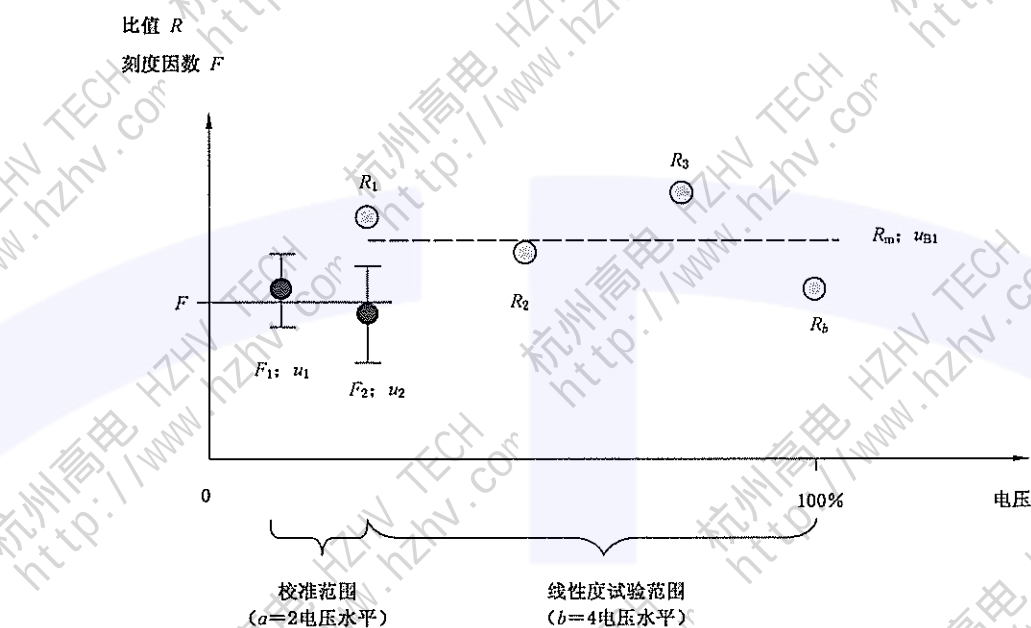
应依据5.3.1所述步骤,用认可测量系统的输出校核测量系统的输出。应已按5.2给出的校准的优选标准方法予以验证认可测量系统的线性度。

5.3.2.2 与线性高压发生器的输入电压比对

考虑5.3.1所述电压水平,用高压发生器的输入电压校核测量系统的输出。

注1:此方法尤其适用于多级冲击电压发生器充电电压或多级直流电压发生器的交流输入。

注2:应当注意电压发生器所有级的均匀充电。必须让发生器所有级有足够的时间充电后再触发。



说明:

F_1, F_2 ——由标准分压器在校准范围内确定的刻度因数;

u_1, u_2 ——刻度因数 F_1 和 F_2 的标准不确定度;

F —— F_1 和 F_2 的平均值;

$R_1 \cdots R_4$ ——仅是在扩展电压范围内线性度试验确定的比值;

R_m ——在扩展电压范围内线性装置确定的比值的平均值;

u_{B1} ——扩展电压范围内刻度因数非线性引起的 B 类标准不确定度。

图 5 用线性装置在扩展电压范围内进行测量系统的线性度试验

5.3.2.3 与电场测量仪器输出比对(电场探头)

可用相关的电场测量系统校核测量系统,该电场探头放置在某一正比于被测电压的电场中并测量电场。

电场测量系统应当对被测电压类型有足够的响应。

注 1: 该方法可用于测量电晕起始电压(见 GB/T 7354)。

注 2: 此方法适用于测量交流电压和冲击电压。

5.3.2.4 与 GB/T 311.6 推荐的标准空气间隙比对

可用球隙校核交流、雷电冲击或操作冲击电压测量系统。对直流电压测量系统应使用棒-棒间隙。两种情况下的比对均应依据 GB/T 311.6 给出的方法进行。

整个线性度试验应当在大气条件不改变且由此不需进行大气修正的短时间内进行。否则,须依据 GB/T 16927.1 进行大气条件的修正。

5.3.2.5 多级转换装置(分压器)的方法

对一个由几个相同高压单元组成的转换装置,应进行以下试验:

——在一个等效的完整转换装置(安装了电极)上进行第 6 章~第 9 章规定的型式试验。

——在 5 个均等间隔的电压下测量每一个高压单元的电容和/或电阻值。由测得的值和低压臂值

计算对应电压下的刻度因数(类似于 5.2.1.2 的规定)。

——对装配好的转换装置的校核不应受电晕及在标定测量范围的上限电压的其他影响。

注:可视及可见电晕或泄漏电流会产生很大影响。

5.4 动态特性

5.4.1 概述

一个组件或测量系统的响应应在能代表其使用条件的条件下确定,尤其是与接地体和带电体的距离。优选的测量方法分别是:对直流和交流电压测量其幅频响应;对冲击电压在标称时段的上限和下限分别确定其刻度因数和时数参数(5.4.3)。有关单位阶跃响应的附加信息参见附录 C。

有关动态特性的相对标准不确定度的 B 类估算由式(11)给出:

$$u_{B2} = \frac{1}{\sqrt{3}} \max_{i=1}^k \left| \frac{F_i}{F} - 1 \right| \quad \text{..... (11)}$$

式中:

k ——在一个频率范围内的,或在一个定义标称时段的冲击时间参数内确定的刻度因数的次数;

F_i ——单独的刻度因数;

F ——标称时段内刻度因数的平均值。

5.4.2 幅频响应的确定

向系统或组件施加一已知幅值的正弦输入,测量其输出,该试验通常是在低电压下进行。测量在一个合适的频率范围内重复进行,刻度因数的偏差应按式(11)进行计算。

5.4.3 冲击电压测量系统的标准方法

用校准刻度因数(见 5.2)时得到的冲击电压的记录来确定标称时段的限值,应按式(11)对电压及时间参数的不确定度分量进行计算。

注:有关单位阶跃响应测量和计算参见附录 C。

5.5 短时稳定性

在适当的预期使用时间内,对测量系统连续施加标定测量范围的最大电压(对冲击则以标定最大施加频次),在刚刚达到最大电压时,立即测量刻度因数,并在电压降低前立即重复测量。

注 1:短时稳定性试验应包括转换装置的自然效应。

注 2:电压施加时间不能长于标定工作时间,但可限制到一个足以达到平衡的时间。

试验结果是在电压施加时间内刻度因数变化的一个估算值,在这段时间内,可获得一 B 类估算的标准不确定度分量见式(12):

$$u_{B3} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left| \frac{F_{\text{after}}}{F_{\text{before}}} - 1 \right| \quad \text{..... (12)}$$

式中:

F_{before} ——短时稳定性试验前的刻度因数;

F_{after} ——短时稳定性试验后的刻度因数。

5.6 长期稳定性

应对刻度因数在一段时间内的稳定性进行考虑和评估。通常是以在一个预定的使用时间段 T_{use} (一般至下一次校准)内不确定度分量的有效性来评估,评估可以采用制造商提供的数据或以一系列性能试验结果为基础。评定的结果是刻度因数变化的一个估算值。评估产生一个以 B 类估算的标准不

确定度分量见式(13):

$$u_{B4} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left| \frac{F_2}{F_1} - 1 \right| \cdot \frac{T_{usc}}{T_2 - T_1} \quad \text{..... (13)}$$

式中: F_1 和 F_2 分别是在时间 T_1 和 T_2 进行的两个连续的性能试验的刻度因数。

在可得到许多性能试验结果的情况下,长期稳定性可由 A 类分量的形式来表征,见式(14):

$$u_{B4} = \frac{T_{usc}}{T_{mean}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{F_i}{F_m} - 1 \right)^2}{n-1}} \quad \text{..... (14)}$$

式中:

F_i ——刻度因数;

F_m ——刻度因数平均值;

T_{mean} ——平均时间间隔。

重复的性能试验结果为刻度因数 F_i 及其平均值 F_m 和重复的平均时间间隔 T_{mean} 。

注:长期稳定性通常规定以一年为周期。

5.7 环境温度影响

测量系统的刻度因数可能受环境温度影响,这可以通过在不同环境温度下确定刻度因数来定量,或基于组件的特性计算来确定。试验或计算的详细资料应存入性能记录中。

试验和计算的结果是由于环境温度变化引起的刻度因数变化的一种估算。

其 B 类标准不确定度由式(15)给出:

$$u_{B5} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left| \frac{F_T}{F} - 1 \right| \quad \text{..... (15)}$$

式中:

F_T ——所关注的温度下的刻度因数;

F ——校准时温度下的刻度因数。

注 1: 如果 F_T 与 F 的偏差大于 1%, 建议对刻度因数进行校正。

注 2: 自热效应包含在短时稳定性试验中。

注 3: 当环境温度在一个很宽的温度范围内变化时,可对刻度因数使用温度修正系数。任何温度修正应在性能记录中列出。一旦使用了温度修正系数,可将温度修正系数的不确定度 u_{B5} 作为不确定度分量。

5.8 邻近效应

由邻近效应而引起装置的刻度因数或参数的变化,可通过装置距一接地墙或一个带电体的不同距离所进行的测量来确定。

试验的结果是刻度因数的变化,其 B 类标准不确定度分量估算由式(16)给出:

$$u_{B6} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left| \frac{F_{max}}{F_{min}} - 1 \right| \quad \text{..... (16)}$$

式中:

F_{max} ——距其他物体最长距离时的刻度因数;

F_{min} ——距其他物体最短距离时的刻度因数。

注 1: 不同的距离范围可得出不同的 u_{B6} 值。

注 2: 一些试验场所可能只选择对单组距离或几组距离或某些距离范围来认可其测量系统。

5.9 软件处理

若测量数据是由软件处理的,则必须评估因软件处理产生的不确定度。这可以通过让软件对一组

已有的参考试验数据进行处理来进行评估,对冲击电压见 GB/T 16896.2。

评定结果是一个对数据处理影响的估算,由此获得—B类相对标准不确定度分量 u_{B7} 。

5.10 刻度因数的不确定度计算

5.10.1 概述

这里给出了确定一个测量系统的标定刻度因数的扩展不确定度的简单程序。这基于很多假定,这些假定在许多情形下是真实的。但是应该在每一独立的情形下予以验证。主要假定如下:

- a) 测量量之间没有相关性;
- b) 用 B 类方法评定的标准不确定度分量假定具有矩形分布;
- c) 最大的三个不确定度分量具有近似相等的幅值。

这些假定提供了一个刻度因数 F 的扩展不确定度的评定程序,该刻度因数 F 既适用于校准状况也适用于认可测量系统在测量中的应用。

校准的扩展不确定度 U_{cal} 是由标准系统的校准不确定度和在本条款中阐明的其他量的影响估算得到的,例如,标准测量系统稳定性和校准期间的环境参数等。

一个试验量的测量值的扩展不确定度 U_M 是由认可测量系统的刻度因数的校准不确定度和在 5.10.3 条中讨论的其他量的影响估算求得,例如,测量系统的稳定性,校准证书中没有考虑的测量过程中的环境参数。

评估不确定度的其他方法在 JJF 1059 规范中给出,同时也在附录 A 和附录 B 中给出。

5.10.2 校准的不确定度

刻度因数校准的相对扩展不确定度 U_{cal} 是由标准测量系统的不确定度和所阐述的 A 类和 B 类不确定度计算而来的,见式(17):

$$U_{cal} = k \cdot u_{cal} = 2 \sqrt{u_{ref}^2 + u_A^2 + \sum_{i=0}^N u_{Bi}^2} \dots\dots\dots (17)$$

式中:

$k=2$ ——覆盖因子,对应于约 95% 的覆盖概率,且为正态分布;

u_{ref} ——标准测量系统在其校准时的刻度因数的合成不确定度;

u_A ——在刻度因数确定中统计的 A 类不确定度;

u_{B0} ——在刻度因数校准过程中确定的标准不确定度的非线性分量;

u_{Bi} ——由第 i 个影响量产生的刻度因数的合成标准不确定度分量,以 B 类分量估算(参见附录 A)。

这些分量和标准测量系统相关,由非线性、短时和长期不稳定性等因素产生。根据 5.3~5.9,既可由附加测量确定也可由其他数据源估算确定,如果校准期间其他量,如其短时稳定性、测量的分辨率,对认可测量系统的影响是重要的,则必须考虑在内。

注:如果校准是在整个标定测量范围内进行(5.2.1.2),则不需要进行单独的线性度试验(5.3)。

在以上假定不成立的情况下,可采用附录 A 给出的程序,或如果需要,可采用 JJF 1059 规范中给出的程序。

B 类不确定度分量的个数 N 可因不同类型的试验电压(第 6 章~第 9 章)而不同,更多的有关 B 类不确定度分量的信息在相关条款中给出。

如果测量系统的标定刻度因数是由其组件的刻度因数(5.2.2)计算得到的,则组件校准的标准不确定度必须结合测量系统的其他条件 and 环境条件来综合考虑(参见附录 A)。

5.10.3 使用认可测量系统的测量不确定度

使用者应进行试验电压值测量的扩展不确定度的估算。然而,可以结合校准证书,在测量条件的某

一限定范围内给出其估算。

测量试验电压值的相对扩展不确定度 U_M 由认可测量系统的校准中确定的标称刻度因数的合成标准不确定度和所阐述的 B 类不确定度分量计算得出, 见式(18):

$$U_M = k \cdot u_M = 2 \sqrt{u_{\text{cal}}^2 + \sum_{i=0}^N u_{\text{Bi}}^2} \quad \dots\dots\dots (18)$$

式中:

$k=2$ ——覆盖因子, 对应于约 95% 的覆盖概率, 且为正态分布;

u_M ——使用认可测量系统测量的合成标准不确定度, 在预定的使用时间(例如一个校准时间间隔)内有效;

u_{cal} ——在校准中确定的认可测量系统的刻度因数的合成标准不确定度;

u_{Bi} ——由第 i 个影响量产生的认可测量系统合成标准不确定度的分量, 以 B 类分量估算。这些分量和认可测量系统的正常使用有关, 由非线性, 短时和长期不稳定性等因素产生, 根据 5.3~5.9, 既可由附加测量确定, 也可由其他数据源估算确定, 还应考虑其他重要影响因素, 如认可测量系统仪器的显示分辨率等。

注: 校准证书可包含校准不确定度 u_{cal} 的信息及当在规定条件下使用时认可测量系统的试验电压值的相对扩展测量不确定度 U_M 的信息。

在上述 5.10.1 提及的假定不成立的情况下, 可采用附录 A 给出的程序, 或如果需要, 可采用 JJF 1059 规范中给出的程序。

B 类不确定度分量个数 N 可随测量量类型的不同而不同(第 6 章~第 9 章, 电压和时间参数)。

5.11 时间参数测量的不确定度计算(仅对冲击电压)

5.11.1 概述

当冲击电压的时间参数在规定的范围内时, 冲击电压的认可测量系统应能在规定的扩展不确定度限值内准确测量时间参数(T_1, T_2, T_p, T_c)。对波前时间, 该规定范围通常是指标称时段。可通过对比法或组元法来给出实验论据, 还可以在实验阶跃响应的基础上用卷积的方法以计算给出论据(附录 C 和附录 D)。

以由对比方法确定的波前时间 T_1 为例(参见附录 B.3 示例), 对估算时间参数及其不确定度的一般程序进行了描述。该方法同样也适用于其他时间参数。

注: 时间参数不确定度估算得出的是绝对不确定度值。

5.11.2 时间参数校准的不确定度

n 次冲击电压的波前时间 T_1 应和被校测量系统(标记为 X)以及标准测量系统(标记为 N)同时评估, 可以假定忽略标准系统的误差, 则波前时间的平均误差见式(19):

$$\Delta T_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_{1X,i} - T_{1N,i}) \quad \dots\dots\dots (19)$$

实验标准偏差见式(20):

$$s(\Delta T_1) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta T_{1,i} - \Delta T_1)^2} \quad \dots\dots\dots (20)$$

式中:

$\Delta T_{1,i}$ ——系统 X 和系统 N 测量的第 i 次波前时间的差。

注 1: 通常需要不大于 $n=10$ 次的独立的读数。

注 2: 通常, 波前时间是由系统 X 和系统 N 用于确定峰值刻度因数的相同记录来求取。

由 $s(\Delta T_1)$, 可算出 A 类标准不确定度, 见式(21):

$$u_A = \frac{s(\Delta T_1)}{\sqrt{n}} \quad \dots\dots\dots (21)$$

比对在一个合适的电压下进行,至少需用两个波前时间,包括测量系统认可的标称时段的最小和最大 T_1 值。在标称时段中间,可增加一个另外的 T_1 值,时间参量的 A 类标准不确定度可从不同的 T_1 值确定的单个不确定度中的最大值来求得。对每个不同的 T_1 值,可按上述方法计算平均误差 $\Delta T_{1,j}$,对 $m \geq 2$ 平均误差的总平均见式(22):

$$\Delta T_{1m} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \Delta T_{1,j} \quad \dots\dots\dots (22)$$

用单个 $\Delta T_{1,j}$ 值与其平均值 ΔT_{1m} 之最大差值来确定 B 类不确定度 u_B , 见式(23):

$$u_B = \frac{1}{\sqrt{3}} \max_{j=1}^m |\Delta T_{1,j} - \Delta T_{1m}| \quad \dots\dots\dots (23)$$

注:更一般地,标准测量系统 N 可由如同其校准证书中标明的标称时段一样,也可用同样的方式由其波前时间的平均误差 ΔT_{1ref} 来表征。被校系统 X 本身引起的波前时间测量结果误差为: $\Delta T_{1cal} = \Delta T_{1m} + \Delta T_{1ref}$ 。

时间参数校准的扩展不确定度等于求得的平均误差 ΔT_{1cal} 的扩展不确定度,由式(24)求得:

$$U_{cal} = k \cdot u_{cal} = 2 \sqrt{u_{ref}^2 + u_A^2 + u_B^2} \quad \dots\dots\dots (24)$$

式中:

u_{cal} ——被校测量系统的平均波前时间误差 ΔT_{1cal} 的合成标准不确定度;

$k=2$ ——覆盖因子,对应于约 95% 的覆盖概率,且为正态分布;

u_{ref} ——标准测量系统平均波前时间的误差 ΔT_{1ref} 的合成标准不确定度;

u_A ——被校测量系统平均波前时间误差 ΔT_{1m} 的 A 类标准不确定度;

u_B ——被校测量系统平均波前时间误差 ΔT_{1m} 的 B 类标准不确定度。

在特殊情况下,扩展不确定度的其他分量可能很重要,应加以考虑。

5.11.3 使用认可测量系统的时间参数测量的不确定度

使用者应进行时间参数测量的扩展不确定度的估算,然而可以结合校准证书,在测量条件的某一限定范围内给出其估算。

注:如果时间参数校准的扩展不确定度比本部分规定的时间参数测量的扩展不确定度低 70%,则通常可假定所用认可测量系统时间参数测量的不确定度 U_M 等于 U_{cal} 。

时间参数测量的扩展不确定度 U_M 应按式(25)进行计算:

$$U_M = k \cdot u_M = 2 \sqrt{u_{cal}^2 + \sum_{i=1}^N u_{Bi}^2} \quad \dots\dots\dots (25)$$

式中:

u_{cal} ——被校测量系统平均波前时间误差的合成标准不确定度;

$k=2$ ——覆盖因子,对应于约 95% 的覆盖概率,且为正态分布;

u_{Bi} ——由第 i 个影响量产生的认可测量系统冲击时间参数的合成标准不确定度的分量,以 B 类分量估算。这些分量和认可测量系统的正常使用有关,由例如长期不稳定性,软件影响等因素产生,也可由不理想的冲击波形产生。依据 5.3~5.9,既可由附加测量确定,也可由其他数据源估算确定,在某些情况下,还应考虑其他影响,例如,认可测量系统的显示分辨率;

u_M ——用认可测量系统测得的冲击电压时间参数的合成标准不确定度,在一个预定的使用期间内有效。

在特殊情况下,计算 U_M 时应考虑到扩展不确定度的其他分量可能很重要,如在冲击电压波前叠加振荡的情况。

注：当用认可测量系统测量无振荡的冲击电压时，可用在校准时确定的相关时间参数结果误差 ΔT_{cal} 来修正所测得的时间参数 T_{meas} ：

$$T_{\text{1corr}} = T_{\text{1meas}} - \Delta T_{\text{1cal}}$$

该程序也适用于其他时间参数。修正后的时间参数 T_{1corr} 的扩展不确定度应参见附录 B 中 B.3 示例给出。

5.12 干扰试验(对冲击电压测量的传输系统和仪器)

试验应在测量系统上进行，在不改变电缆或传输系统接地连接的状况下，把电缆和传输系统解开，置于惯常的位置，并将其输入端短路。采用高压试验中具有典型的冲击电压幅值、波形和可能放电瞬时的冲击电压，以破坏性放电在测量系统输入端来产生干扰，并由仪器记录其输出。

注：为了防止转换装置(电压分压器)的过电压输出，建议将分压器的输出端短路。

干扰比应由被测干扰的最大幅值除以测量系统测量该试验电压的输出幅值来确定。

测得的干扰比应小于 1%，如果能够表明其干扰不影响测量，则干扰比大于 1% 是允许的。

5.13 转换装置的耐受试验

转换装置应通过具有规定电压值、要求频率或波形的电压的干耐受试验。

注 1：建议耐受试验电压为额定工作电压的 110%，耐受试验的试验程序见 GB/T 16927.1。

耐受试验应在测量系统工作电压的单个极性或两个极性下进行。

当规定要进行湿试验和污秽试验时，应作为型式试验进行。

注 2：认可测量系统的任一组件的设计和结构应能保证承受发生在试品上的破坏性放电不会使其特性发生改变。

6 直流电压测量

6.1 对认可测量系统的要求

6.1.1 概述

一般要求是按照 GB/T 16927.1 测量试验电压值(算术平均值)的扩展不确定度为 $U_M \leq 3\%$ 。

当纹波幅值在 GB/T 16927.1 中规定的限值以内时，不确定度极限值不应超过上述规定。

注：应注意可能出现交流电压耦合到测量系统并影响测量仪器的读数。

6.1.2 不确定度分量

对直流电压测量系统，测量的扩展不确定度 U_M 应按照 5.10.3 以 95% 覆盖概率进行评定，如果需要，还可参见附录 A 或附录 B 进行评定。为评定不确定度分量所需进行的试验在表 1 中给出。某些情况下，其他分量可能显得重要时，应另外加以考虑。

6.1.3 对转换装置的要求

用于直流电压的转换装置，通常是一个电阻分压器或一个电压测量阻抗(高压电阻)，该转换装置应能确保绝缘外表面的泄漏电流对测量不确定度的影响可以忽略。

注：为保证泄漏电流的影响可以忽略，在额定电压时，测量电流可能需要达到 0.5 mA。

6.1.4 测量电压变化的动态特性

对按照以每秒试验电压的 1% 的规定速率上升或下降的直流电压的测量，高压测量系统的时间常数应不大于 0.25 s。

注 1：实际测量时，可使用实验阶跃响应时间 T_N 来代替时间常数。

注 2：通常，用于测量试验电压值(即算术平均值)的仪器不受纹波的影响。然而，如果使用了具有快速响应的仪器时，有必要保证测量不受纹波的不利影响。

当需要测量污秽试验中的瞬时电压跌落时,测量系统的时间常数应小于瞬态电压上升时间的三分之一。

6.2 认可测量系统的试验

为了鉴定测量系统及其组件的资格以及评估测量系统的扩展不确定度,依据第 5 章,必须进行表 1 中的试验。例外情况见 4.4.2。

型式试验和例行试验结果可以从制造商的数据获得,例行试验应在每一个组件上进行。

6.3 性能校核

6.3.1 概述

一个认可测量系统的刻度因数可通过下述方法之一进行校核。

表 1 直流电压认可测量系统要求的试验

试验类型	型式试验	例行试验	性能试验		性能校核
刻度因数校准			5.2		
刻度因数校核					6.3
线性度,见注 2		5.3	5.3(若适用)		
动态特性	5.4				
短时稳定性		5.5			
长期稳定性	5.6		5.6(若适用)		
环境温度影响	5.7				
邻近效应(见注 3)	5.8(若适用)		5.8(若适用)		
软件影响	5.9(若适用)				
转换装置的干耐受试验	5.13	5.13(若适用)			
转换装置的湿或污秽耐受试验	5.13(若适用)				
转换装置的刻度因数	5.2.2	5.2.2			
除电缆外的传输系统刻度因数	5.2.2	5.2.2			
测量仪器的刻度因数	5.2.2	5.2.2			
责任	组件由制造商负责		系统由使用者负责(见注 1)		
推荐重复率	仅 1 次(型式试验和例行试验)		推荐每年 1 次,但至少每 5 年 1 次	视其稳定性,但至少每年 1 次	

注 1: 如果性能试验是按照替代方法(见 5.2.2)进行的,上表所列试验也适用于单个组件。为了得到认可测量系统的测量不确定度,组件的测量不确定度必须按照附录 B 示例说明进行合成。

注 2: 只有当校准不能在整个标称测量范围内(5.2.1.2)进行比对时,才需要按照 5.3 进行线性度试验。

注 3: 邻近效应可能由电晕和相关的空间电荷效应产生的,只有当型式试验数据不充分时,才需要在性能试验中进行邻近效应的试验研究。

6.3.2 与认可测量系统比对

可按照 5.2 的程序与另一个认可测量系统进行比对,或按照 GB/T 311.6 与一个棒-棒间隙进行比

对。如果两个系统被测量值之间的差值(绝对值)不大于3%,则认为标定刻度因数仍然有效;如果该差值超出3%,应按5.2中描述的性能试验(校准)确定标定刻度因数的新值。

6.3.3 组件的刻度因数的校核

应使用扩展不确定度不大于1%的内部或外部校准器来校核每个组件的刻度因数,如果每一个组件的刻度因数与其先前的值之差值(绝对值)不大于1%,则认为该标定刻度因数仍然有效;如果该差值超出1%,则应按5.2中描述的性能试验(校准)来确定标定刻度因数的新值。

6.4 纹波幅值的测量

6.4.1 要求

纹波幅值测量的扩展不确定度应不大于纹波幅值的10%或不大于直流电压算术平均值的1%,取两者中较大者。

可以使用独立的纹波测量系统测量电压的平均值和纹波幅值或使用带有两台独立仪器的同一转换装置来测量电压的平均值和纹波幅值。

纹波测量系统的幅频响应的一15%上限频率应大于纹波基波频率 f 的5倍;而一15%下限频率应小于纹波基波频率 f 的0.5倍。

注:在许多情况下,可用电源电压的频率来检验对下限频率的要求。

6.4.2 不确定度分量

对于纹波电压测量系统,不确定度应参考附录A进行估算,另外,应考虑条款5.3~5.9中提及的其他不确定度分量。更详细的情况也可参见交流电压测量(第7章)的相关条款,在个别情况下,其他不确定度分量可能显得重要。这里给出的信息仅作参考。

6.4.3 纹波电压认可测量系统的校准和试验

表2中规定的试验只适用于纹波幅值测量系统。

可通过在具有相同设计的一个装置上的试验或由制造商提供的数据来验证其满足型式试验的要求。例行试验应在每一个组件上进行,例外情况见4.4.2。

在个别情况下,其他不确定度分量可能显得重要,这里给出的信息仅作参考。

表2 纹波测量不确定度分量要求的试验

试验类型	型式试验	例行试验	性能试验	性能校核
测量系统的刻度因数校准			5.2	
刻度因数校核				6.4.6/7.4
纹波动态特性		6.4.5	6.4.5	
长期稳定性	5.6			
环境温度影响	5.7			
责任	组件由制造商负责		系统由使用者负责	
推荐重复率	仅1次(型式试验和例行试验)		推荐每年1次,但至少每5年1次	视其稳定性,但至少每年1次

6.4.4 纹波频率下刻度因数的测量

纹波测量系统的刻度因数应在纹波基波频率 f 下确定,其扩展不确定度不应大于 3%。也可以由组件的刻度因数的乘积来确定测量系统刻度因数。

6.4.5 由幅频响应确定动态特性

向测量系统输入一已知幅值的正弦波(通常为低电压),测量其输出,在 0.5 倍~7 倍的纹波基波频率的频率范围内重复这种测量,测得的电压的差应在 3 dB 以内。

6.4.6 纹波测量系统的性能校核

认可测量系统的刻度因数可通过 7.4 中描述的交流电压测量系统的方法之一进行校核。

7 交流电压的测量

7.1 对认可测量系统的要求

7.1.1 概述

一般要求是按照 GB/T 16927.1 在其额定频率下测量试验电压值(峰值/ $\sqrt{2}$ 或 r. m. s 值)的扩展不确定度为 $U_M \leq 3\%$ 。

7.1.2 不确定度分量

对于交流电压测量系统,扩展不确定度 U_M 应按照 5.10.3 以 95% 覆盖概率进行评定,如果需要,可参考附录 A 和附录 B 进行评定。为评定不确定度分量所需进行的试验在表 3 中给出。有些情形下,其他分量可能显得重要,则应另外加以考虑。

7.1.3 动态特性

打算工作在单一基频 f_{nom} 下的测量系统的幅频响应应处在由不确定度要求求得的图 6 中标明区域内,图中成对的数字为归一化频率(对数刻度)和限值线拐点处对应的偏差。测量系统从在 f_{nom} 至 $7f_{nom}$ 范围内的特性应由试验或回路分析来检验,此区域外的幅频响应仅作为信息给出。

测量系统也可在一段基波频率范围内进行认可(如依据 GB/T 16927.1 在 45 Hz~55 Hz 范围内),这种情况下,从最低基波频率 f_{nom1} 至最高基波频率 f_{nom2} ,刻度因数应稳定在 1% 以内。在 f_{nom1} 至 $7f_{nom2}$ 范围内的幅频响应应处于图 7 中表明的区域内,图中成对的数字为归一化频率和限值线拐点处对应的偏离理想响应的允许偏差。应由试验或回路分析来证明测量系统从 f_{nom1} 至 $7f_{nom2}$ 之间的特性,此区域外的幅频响应仅作为信息给出。

动态特性的特殊要求由相关的技术委员会具体规定。

注 1: 满足上述要求的测量系统可认为其频率响应适合测量试验电压的谐波总失真度(THD)。

注 2: 对标明区域外的频率响应,虽然不做要求,但其的确很好地代表了实际情况。

注 3: 若交流电源(例如串联谐振系统)能够证明它在所有运行条件下试验电压峰值与 r. m. s. 的比值为 $\sqrt{2} \pm 1\%$ 内,则用于这种交流电源的测量系统可以不做幅频响应测试。

注 4: 在某些情况下,有必要测量叠加在交流电压上的瞬态电压,对这一点,这里没有给出要求,但可参考第 8 章中的一些指导。

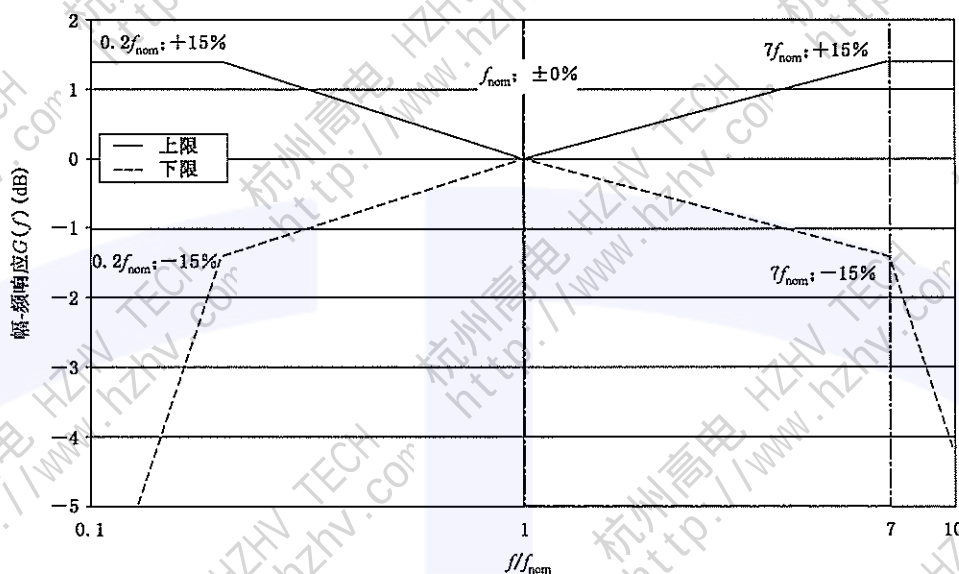


图6 用于单个基波频率 f_{nom} (试验频率为 $f_{\text{nom}} \sim 7f_{\text{nom}}$) 的测量系统的可接受的归一化幅频响应阴影区域

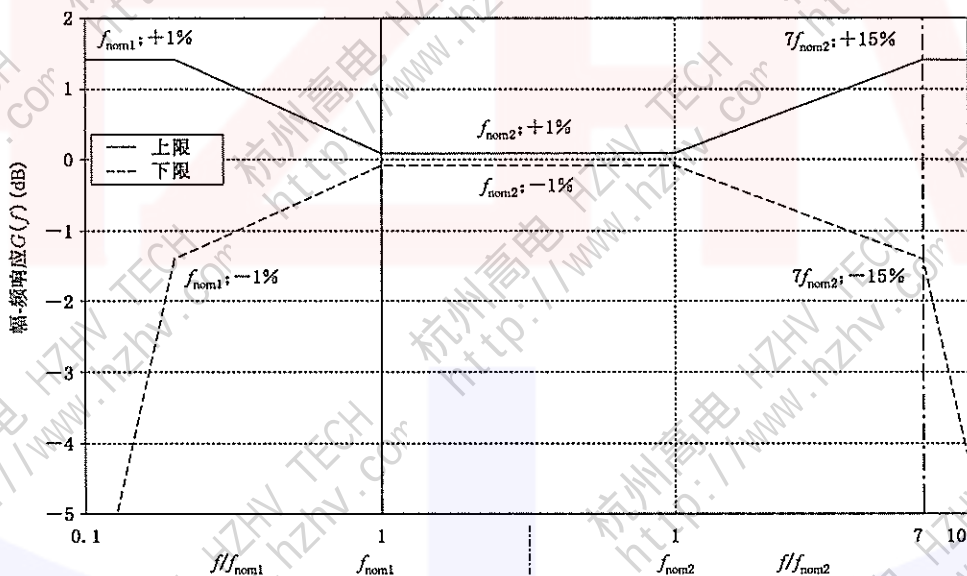


图7 用于基波频率 f_{nom1} 至 f_{nom2} 范围 (试验频率为 $f_{\text{nom1}} \sim 7f_{\text{nom2}}$) 的测量系统的可接受的归一化幅频响应阴影区域

7.2 认可测量系统的试验

为了鉴定测量系统及其组件的资格以及评估测量系统的扩展不确定度,依据第5章,必须进行表3中的试验。例外情况见4.4.2。

型式试验和例行试验结果可以从制造厂的数据中获得,例行试验应在每一单元上进行。

7.3 动态特性试验

为了确定动态特性,向测量系统输入一已知幅值(通常为低电压)的正弦波,测量其输出。在1倍至

7 倍的测试频率范围内重复这种测量。结果应符合 7.1.3 要求。

7.4 性能校核

7.4.1 概述

表 3 交流电压认可测量系统要求的试验

试验类型	型式试验	例行试验	性能试验	性能校核
刻度因数校准			5.2	
刻度因数校核				7.4
线性度(见注 2)		5.3	5.3(若适用)	
动态特性	5.4/7.3		5.4	
短时稳定性		5.5		
长期稳定性	5.6		5.6(若适用)	
环境温度影响	5.7			
邻近效应(见注 3)	5.8(若适用)		5.8(若适用)	
软件影响	5.9(若适用)			
转换装置的干耐受试验	5.13	5.13(若适用)		
转换装置的湿或污秽耐受试验	5.13(若适用)			
转换装置的刻度因数	5.2.2	5.2.2		
除电缆外的传输系统的刻度因数	5.2.2	5.2.2		
测量仪器的刻度因数	5.2.2	5.2.2		
责任	组件由制造商负责		系统由使用者负责(见注 1)	
推荐重复率	仅 1 次(型式试验和例行试验)		推荐每年 1 次,但至少每 5 年 1 次	视其稳定性,但至少每年 1 次

注 1: 如果性能试验是按照替代办法(见 5.2.2)进行的,上表所列试验也适用于单个组件。为了获得认可测量系统的测量不确定度,这些组件的测量不确定度应按附录 B 中示例说明进行合成。

注 2: 只有当校准不能在测量范围内(5.2.1.2)进行对比时,才需要按照 5.3 进行线性度试验。

注 3: 只有当型式试验数据不充分时,才需要在性能试验中进行邻近效应的实验研究。

认可测量系统的刻度因数可通过下述方法之一进行校核。

7.4.2 与认可测量系统比对

可按 5.2 的程序与另一认可测量系统进行比对,或按 GB/T 311.6 与一球隙进行比对,如果两个系统测量值之间的差值(绝对值)在 3% 以内,则认为标定刻度因数仍然有效;如果该差值超出 3%,则应按 5.2 中描述的性能试验(校准)来确定标定刻度因数的新值。

7.4.3 组件刻度因数的校核

应使用扩展不确定度不大于 1% 的内部或外部校准器来校核每个组件的刻度因数。如果每一组件的刻度因数与其先前值的差值(绝对值)不大于 1%,则认为该标定刻度因数仍然有效;如果该差值超出 1%,则应按 5.2 中描述的性能试验(校准)来确定标定刻度因数的新值。

8 雷电冲击电压的测量

8.1 对认可测量系统的要求

8.1.1 概述

一般要求是：

- 按照 GB/T 16927.1 测量全波或波尾截断冲击的试验电压值的扩展不确定度为 $U_{M1} \leq 3\%$ ；
- 测量波前截断 ($0.5 \mu s < T_c < 2 \mu s$) 冲击的峰值的扩展不确定度为 $U_{M2} \leq 5\%$ ；
- 按照 GB/T 16927.1 测量规定波形的时间参数的扩展不确定度为 $U_{M3} \leq 10\%$ ；
- 测量可能叠加在冲击波上的振荡，应保证振荡不超过 GB/T 16927.1 给出的允许值。

注：对于电压跌落的测量不给出建议，因为设备委员会在这方面还没有规定要求。

8.1.2 不确定度分量

对于雷电冲击电压测量系统，测量的扩展不确定度 U_M 应按照 5.10.3、5.11.3 以 95% 覆盖概率进行评定。如果需要，可参考附录 A 和附录 B 进行评定。为评定不确定度分量所需进行的试验在表 4 中给出，有些情况下，其他分量可能显得重要，应另外加以考虑。

8.1.3 对测量仪器的要求

测量仪器应满足 GB/T 16896.1 和 GB/T 16896.2 的要求。

8.1.4 动态特性

如果满足下列条件，则对于测量性能记录中所规定的波形，测量系统的动态特性能满足标称时段内的峰值电压和时间参数的测量：

——刻度因数在下列限值内是恒定的：

- 对冲击全波和波尾截断的冲击在 $\pm 1\%$ 以内。
- 对波前截断的冲击在 $\pm 3\%$ 以内。

——测量系统的时间参数的测量扩展不确定度不大于 10%。

注 1：为了在记录曲线上重现可能叠加在冲击波上的振荡，测量系统的上限频率可达数兆赫，若测量系统的响应参数 T_r 等于或小于数十纳秒，则认为可满足要求（见附录 C）。这些限值仍在考虑中。

注 2：最好是一个测量系统能够测量所有要求的量，例如峰值、时间参数和振荡。然而，许多测量系统可用于测量峰值和时间参数但却不能用于测量振荡。在这种情况下，则需认可一个测量系统用于测量峰值和时间参数，而认可一个辅助系统用于测量振荡。

8.1.5 与试品的连接

应将转换装置直接接到试品的端子上，不应将转换装置接在电源和试品之间，连接转换装置的引线应仅承载流入测量系统的电流，转换装置的位置应使得试验回路和测量回路间的耦合可忽略不计。

注：可能的例外是联合电压试验（见 GB/T 16927.1）。

8.2 认可测量系统的试验

为了鉴定雷电冲击电压测量系统及其组件的资格以及评估测量系统的扩展不确定度，依据第 5 章，必须进行表 4 中的试验。例外情况见 4.4.2。

型式试验和例行试验的结果可以从制造厂的数据获得，例行试验应在每一单元上进行。

表 4 雷电冲击电压认可测量系统要求的试验

试验类型	型式试验	例行试验	性能试验	性能校核
刻度因数和时间的校准			5.2 5.11/8.3	
刻度因数校核				8.5
线性度(见注 2)		5.3	5.3(若适用)	
动态特性	5.4/8.4		5.4/8.4	8.5
长期稳定性	5.6		5.6(若适用)	
环境温度影响	5.7			
邻近效应(见注 3)	5.8(若适用)		5.8(若适用)	
软件影响	5.9(若适用)			
干扰试验			5.12	5.12
转换装置的干耐受试验	5.13	5.13(若适用)		
转换装置的湿或污秽耐受试验	5.13(若适用)			
转换装置的刻度因数、时间参数	5.2.2	5.2.2		
除电缆外的传输系统的刻度因数、时间参数	5.2.2	5.2.2		
测量仪器的刻度因数、时间参数	5.2.2(GB/T 16896)	5.2.2(GB/T 16896)		
责任	组件由制造商负责		系统由使用者负责(见注 1)	
推荐重复率	仅 1 次(型式试验和例行试验)		推荐每年 1 次,但至少每 5 年 1 次	视其稳定性,但至少每年 1 次
注 1: 如果性能试验是按照替代方法(见 5.2.2)进行的,上表所列试验也适用于单个组件。为了获得认可测量系统的测量不确定度,这些组件的测量不确定度应按附录 B 中示例说明进行合成。 注 2: 只有当校准不能在整个测量范围内(5.2.1.2)进行比对时,才需要按照 5.3 进行线性度试验。 注 3: 只有当型式试验数据不充分时,才需要在性能试验中进行邻近效应的实验研究。				

8.3 测量系统的性能试验

8.3.1 标准方法(优选)

应按 5.2 中给出的方法,通过与标准测量系统的比对来确定测量系统的标定刻度因数和动态特性,建议在两个测量系统间设置一个模拟试品。

应采用两种不同波形的冲击来验证标称时段 $t_{\min}$ 至 $t_{\max}$ 范围内的性能:

对于全波和波尾截断的冲击:

—— $t_{\min}$ 等于最短波前时间 $T_{1\min}$;

—— $t_{\max}$ 等于最长波前时间 $T_{1\max}$ 。

——两种波形都应近似地具有测量系统要求认可的最长半峰值时间 $T_{2\max}$ 。

对于波前截断的冲击:

—— $t_{\min}$ 等于最短截断时间 $T_{c\min}$;

—— $t_{\max}$ 等于最长截断时间 $T_{c\max}$ 。

8.3.2 附加阶跃响应测量的替代方法

首先,按 5.2 通过与标准测量系统比对测量来确定标定刻度因数,采用一种全波冲击,其波前时间 T_{1cal} 在 T_{1min} 和 T_{1max} 范围内,半峰值时间约等于测量系统需认可的最长半峰值时间。也可选用由组件的刻度因数来确定标定刻度因数(5.2.2)。

对用于测量波前截断冲击的测量系统,校准冲击的截断时间 T_{ccl} 应在 T_{cmin} 和 T_{cmax} 之间。

然后,按照附录 C 进行测量系统的阶跃响应的测量,在下列时刻被测测量系统的阶跃响应值与参考电平时段内的参考电平的差值(绝对值)应不大于:

- 在 T_{1cal} 时刻,对全波和波尾截断的冲击为 1%;
- 在 T_{ccl} 时刻,对波前截断的冲击波为 1%。

在参考电平时段 $0.5T_{1min} \sim 2T_{1max}$ 内(附录 C),阶跃响应与参考电平的偏离应不大于 2%,而在 $2T_{1max} \sim 2T_{2max}$ 范围内阶跃响应与基准电平偏离应不大于 5%,这里, T_{2max} 是系统需被认可的冲击波的最长半峰值时间。

8.4 动态特性试验

8.4.1 与一个标准测量系统比对(优选)

可以采用 8.3.1 的试验中获取的相同记录,两个系统均应测量计算被测冲击的相关时间参数,同时应评定被测测量系统测量的时间参数的不确定度(见 5.11)。

注:对于需要认可一组冲击波形的情形, t_{min} 可以从一种冲击波形中选取, t_{max} 可以从另一种冲击波形中选择取,对这种情况半峰值时间应取所有冲击波形中最长的半峰值时间。

8.4.2 基于阶跃响应参数的替代方法(附录 C)

给系统输入一个电压阶跃波,记录其输出,其值的计算见附录 C。

注:测量系统的性能可以使用卷积技术进行研究,测量系统的刻度因数可通过任何合适的方法确定。用于确定刻度因数的波形在附录 D 中描述的卷积法覆盖范围之内。

动态特性由测量系统的阶跃响应(按附录 C 记录)以及所记录的阶跃响应与需认可的归一化标称波形的卷积确定。通过卷积,可以估算由于测量系统对不同波形产生的误差(附录 D)。在基准电平时段内,刻度因数的变化应在 $\pm 1\%$ 以内。

8.5 性能校核

8.5.1 与认可测量系统比对

可按照 5.2 的程序与另一个认可测量系统(或标准测量系统)进行比对,对峰值比对可与满足 GB/T 311.6 标准的球隙进行。

若两个测量系统测得的峰值的差值(绝对值)不大于 3%,则认为标定刻度因数仍然有效;如果该差值超出 3%,则应进行性能试验重新确定标定刻度因数的新值。

每个时间参数值与另一测量系统所测值相应的差值(绝对值)应在 10% 以内。若差值超出 10% 时,则应进行性能试验重新确定标称时段。

8.5.2 组件刻度因数的校核

应使用扩展不确定度不大于 1% 的内部或外部校准器来校核每个组件的刻度因数。如果每一组件的刻度因数与其先前值的差值(绝对值)不大于 1%,则认为该标定刻度因数仍然有效;如果差值超出 1%,则应确定标定刻度因数的新值。

8.5.3 用参考记录进行动态特性校核

若需要用测量系统的阶跃响应进行性能校核,则应按照附录 C 的方法记录测量系统的阶跃响应。结果应包括在性能记录的记录中以作为一个参考记录(“指纹”),用于检测以后性能校核中动态特性的是否变化的判据。

9 操作冲击电压的测量

9.1 对认可测量系统的要求

9.1.1 概述

一般要求是:

——按照 GB/T 16927.1 测量操作冲击试验电压值的扩展不确定度为 $U_{M1} \leq 3\%$;

——按照 GB/T 16927.1 测量规定波形的时间参数的扩展不确定度为 $U_{M3} \leq 10\%$ 。

9.1.2 不确定度分量

对于操作冲击电压测量系统,测量的扩展不确定度 U_M 应按照 5.10.3, 5.11.3 以 95% 覆盖概率进行评定,如果需要,可参考附录 A 和附录 B 进行评定。为评定不确定度分量所需进行的试验在表 5 中给出。有些情况下,其他分量可能显得重要,应另外加以考虑。

9.1.3 对测量仪器的要求

测量仪器应满足 GB/T 16896.1 和 GB/T 16896.2 的要求。

9.1.4 动态特性

如果满足下列条件,则测量系统的动态特性是满足的,

——在性能记录中规定的冲击波波形范围内,刻度因数稳定在 $\pm 1\%$ 以内;

——在波形范围内,所测时间参数的扩展不确定度不大于 10%。

9.1.5 与试品的连接

认可测量系统应直接接到试品的端子上,与雷电冲击电压测量(见 8.1.5)不同的是,测量系统可以接在电源和试品之间。试验回路和测量回路间的耦合可忽略不计。

9.2 认可测量系统的试验

为了鉴定操作冲击电压测量系统及其组件的资格以及评估测量系统的扩展不确定度,依据第 5 章,必须进行表 5 中的试验。例外情况见 4.4.2。

型式试验和例行试验的结果可以从制造厂的数据中获得。例行试验应在每一单元上进行。

9.3 测量系统的性能试验

9.3.1 标准方法(优选)

应按 5.2 中给出的方法,通过与标准测量系统的比对来确定测量系统的标定刻度因数和动态特性。用如下两种不同波形的冲击来验证标称时段 $t_{\min}$ 至 $t_{\max}$ 范围内的性能:

—— $t_{\min}$ 等于最短峰值时间 $T_{p\min}$;

- $t_{\max}$ 等于最长峰值时间 $T_{p\max}$;
- 两种波形都应近似地具有测量系统要求认可的最长的半峰值时间 $T_{2\max}$ (或 90% 峰值以上时间或回零值时间)。

9.3.2 附加阶跃响应测量的替代方法

首先,按 5.2 通过与标准测量系统的比对测量来确定标定刻度因数。采用一种全波冲击,其峰值时间 $T_{p\text{cal}}$ 在 $T_{p\min}$ 和 $T_{p\max}$ 范围内,半峰值时间(或 90% 峰值以上时间或回零值时间)近似等于测量系统要求认可的最长半峰值时间(或 90% 峰值以上时间或回零值时间)。也可选用由组件的刻度因数来确定标定刻度因数(5.2.2)。

然后,按照附录 C 进行测量系统的阶跃响应的测量,在 $T_{p\text{cal}}$ 时刻被试测量系统的阶跃响应与参考电平时段内的参考电平的差值(绝对值)应不大于 1%。

被试测量系统在 $T_{p\min}$ 至 $T_{2\max}$ (或 90% 峰值以上时间或回零值时间)范围内,阶跃响应的变化应不大于 5%。

9.4 动态特性的比对试验

可以采用 9.3.1 的试验中获取的相同的记录,两个系统均应测量计算被测冲击的相关时间参数,同时,应按 5.4(表 5)评定被试测量系统测量的时间参数的不确定度。

注:对于需要认可一组冲击波形的情形, $t_{\min}$ 可以从一种冲击波形中选取, $t_{\max}$ 可从另一种冲击波形中选取,对这种情况半峰值时间应取所有冲击波形中最长的半峰值时间。

表 5 操作冲击电压认可测量系统要求的试验

试验类型	型式试验	例行试验	性能试验	性能校核
刻度因数和时参数的校准			5.2 5.11/9.3	
刻度因数校核				9.5
线性度(见注 2)		5.3	5.3(若适用)	
动态特性	5.4/9.4		5.4/9.4	9.5
短时稳定性		5.5		
长期稳定性	5.6			
环境温度影响	5.7			
邻近效应(见注 3)	5.8(若适用)		5.8(若适用)	
软件影响(GB/T 16896)	5.9(若适用)			
干扰试验			5.12	5.12
转换装置的干耐受试验	5.13	5.13(若要求)		
转换装置的湿或污秽耐受试验	5.13(若要求)			
转换装置的刻度因数、时间参数	5.2.2	5.2.2		
除电缆外的传输系统的刻度因数、时间参数	5.2.2	5.2.2		
测量仪器的刻度因数、时间参数	5.2.2(GB/T 16896)	5.2.2(GB/T 16896)		
责任	组件由制造商负责		系统由使用者负责(见注 1)	

表 5 (续)

试验类型	型式试验	例行试验	性能试验	性能校核
推荐重复率	仅 1 次(型式试验和例行试验)		推荐每年 1 次,但至少每 5 年 1 次	视其稳定性,但至少每年 1 次

注 1: 如果性能试验是按照替代方法(见 5.2.2)进行的,上表所列试验也适用于单个组件。为了获得认可测量系统的测量不确定度,这些组件的测量不确定度应按附录 B 中示例说明进行合成。

注 2: 只有当校准不能在整个测量范围内(5.2.1.2)进行比对时,才需要按照 5.3 进行线性度试验。

注 3: 只有当型式试验数据不充分时,才需要在性能试验中进行邻近效应的实验研究。

9.5 性能校核

9.5.1 与认可测量系统比对

可按 5.2 的程序与另一个认可测量系统(或标准测量系统)进行比对,对峰值比对可与满足 GB/T 311.6 标准要求的球隙进行。

若两个测量系统测得的峰值的差值(绝对值)不大于 3%,则认为标定刻度因数仍然有效;如果该差值超出 3%,则应进行性能试验重新确定标定刻度因数的新值。

每个时间参数值与另一测量系统所测值相应的差值(绝对值)应在 10%以内,若差值超出 10%时,则应进行性能试验重新确定标称时段。

9.5.2 组件刻度因数的校核

应使用扩展不确定度不大于 1%的内部或外部校准器来校核每个组件的刻度因数。如果每一组件的刻度因数与其先前值的差值(绝对值)不大于 1%,则认为该标定刻度因数仍然有效;如果差值超出 1%,则应确定标定刻度因数的新值。

9.5.3 用参考记录进行动态性能校核

若需要用测量系统的阶跃响应进行性能校核,应按照附录 C 的方法记录测量系统的阶跃响应。结果应包括在性能记录的记录中作为参考记录(“指纹”),用于检测以后性能校核中动态特性的是否变化的判据。

10 标准测量系统

10.1 对标准测量系统的要求

10.1.1 直流电压

对直流电压测量,标准测量系统在其使用范围内的扩展不确定度为 $U_M \leq 1\%$ 。不确定度不应受纹波系数最高达 3%的纹波的影响。

10.1.2 交流电压

对交流电压测量,标准测量系统在其使用范围内的扩展不确定度为 $U_M \leq 1\%$ 。

10.1.3 雷电全波和雷电截波以及操作冲击电压

对全波和波尾截断的冲击电压峰值的测量,标准测量系统在其使用范围内的扩展不确定度为

$U_{M1} \leq 1\%$; 对波前截断的冲击电压峰值的测量, 标准测量系统在其使用范围内的扩展不确定度为 $U_{M2} \leq 3\%$ 。对时间参数的测量, 标准测量系统在其使用范围内的扩展不确定度为 $U_{M3} \leq 5\%$ 。

注: 应能准确记录振荡和/或过冲(见 8.1.4)。

10.2 标准测量系统的校准

10.2.1 概述

应通过 10.2.2 的试验表明标准测量系统满足本部分 10.1 给出的相关要求。也可用 10.2.3 的可选试验。

10.2.2 标准方法: 比对测量

应通过与较高级标准测量系统在相关试验电压下进行比对测量的校准来证明标准测量系统的性能符合要求, 此较高级标准测量系统可溯源到国家计量机构的基准。

对冲击电压, 应施加能覆盖标称时段的一个或多个不同波前时间的波形。

注: 对较高级的标准测量系统的要求是: 对电压的扩展不确定度 $U_{M1} \leq 0.5\%$; 对时间参数(仅对冲击电压)的扩展不确定度 $U_{M3} \leq 3\%$ 。

10.2.3 对冲击电压的替代方法: 刻度因数的测量和阶跃响应参数的计算

首先, 标准测量系统的刻度因数应对一种冲击电压波形来确定, 其方法可通过与较高级的标准测量系统在相关试验电压下进行比对。然后, 按照附录 C 测得的响应参数应满足表 6 的要求, 而且在冲击电压参数对应时刻被校的测量系统的阶跃响应值与参考电平时段内定的参考水平的差值(绝对值)不应大于 0.5%。

表 6 冲击电压标准测量系统响应参数的推荐值

电压	推荐值		
	全波和波尾截断雷电冲击	波前截断雷电冲击	操作冲击
实验响应时间 T_N	$\leq 15 \text{ ns}$	$\leq 10 \text{ ns}$	
稳定时间 t_s	$\leq 200 \text{ ns}$	$\leq 150 \text{ ns}$	$\leq 10 \text{ } \mu\text{s}$
部分响应时间 T_a	$\leq 30 \text{ ns}$	$\leq 20 \text{ ns}$	

10.3 标准测量系统的校准周期

校准周期应按照国家规定确定, 如果没有规定, 建议至少每五年重复一次校准, 但前提是定期的性能校核表明标准测量系统是稳定的。

10.4 标准测量系统的使用

建议标准测量系统仅用于性能试验的比对测量, 然而, 标准测量系统也可用于其他测量, 包括例行的日常使用, 不过, 需表明此种应用不会影响它们的性能(本部分中规定的性能校核足以验证这一点)。此外, 只要满足相关标准的要求允许用等效的测量仪器予以替换。

附录 A (资料性附录) 测量不确定度

A.1 概述

第 5 章描述了在适用于和完全满足高压测量的通常条件下评定测量不确定度的一个简化程序。然而,在有些情况下,有必要或期望用一个更复杂的方法来评定不确定度。

附录 A 给出了针对这些状况如何进行处理的说明,附录 B 给出了 3 个应用例子。

每个量的测量都会存在一些不足,测量的结果只是测量量“真”值的一个近似(“估算”)。测量不确定度对测量给出了一个清楚的说明。它能够使使用者去比较和权衡处理结果,例如从不同的实验室获得的处理结果。它提供了例如测量结果是否在标准规定的限值内这样的信息。目前,JJF 1059 规范是我国估算测量不确定度的标准。

JJF 1059 作为一个导则,提供在各种不确定度水平下的测量的宽频谱范围内的不确定度的评定和表达的一般规则,因此有必要从 JJF 1059 中提炼出一套特殊规则,用于处理高电压测量的这个特殊领域和准确度水平以及各种复杂状况。与 JJF 1059 的基本原理一致,不确定度按照其评定方法分为两类。两种方法都基于影响测量的量的概率分布和基于以方差或标准偏差定量表示的标准不确定度,允许对两类不确定度和对被测量的合成标准不确定度的评定进行统一处理。在本部分的范围内,扩展不确定度对应的覆盖概率约为 95%。

本附录给出了 JJF 1059 的基本原理和在高压测量中如何去确定不确定度的示例。这里给出的公式和示例对于经常出现在高电压测量中的非相关输入量是有效的。

A.2 补充定义

A.2.1

可测量的量 measurable quantity

现象、物体或材料可以定性辨识和定量确定的特征。

A.2.2

量值 value of a quantity

一般由一个数乘以测量单位所表示的特定量的大小。

A.2.3

被测量 measurand

作为测量对象的特定量。

A.2.4

方差 variance

在其预期的可能性意义上,随机变量的偏差的平方期望值。

A.2.5

相关性 correlation

两个或几个随机变量在其分布范围内相互的关系。

A.2.6

覆盖概率 coverage probability

数值分布的百分率,通常是大百分率,作为理应属于被测量的测量结果。

A.3 模型函数

每一测量可以用一个函数关系 f 描述见式(A.1):

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_N) \quad \dots\dots\dots (A.1)$$

式中, Y 是被测量, X_i 是编号从 1 到 N 的不同的输入量。在 JJF 1059 规范中, 函数模型 f 包含所有的测量值、影响量、修正值、修正系数、物理常数和任何可能对 Y 值和其不确定度有重要影响的其他数据。此模型函数可以以一个单项的或多项的解析式或数字表达式表示, 或是它们的组合, 通常, 输入量 X_i 是随机变量, 以具有指定概率分布的观测值 x_i (输入估计值) 表示, 并与 A 类和 B 类的标准不确定度 $u(x_i)$ 相关联。两种类型的不确定度按照 JJF 1059 规范进行合成产生输出估算量 y 的标准不确定度 $u(y)$ 。

注 1: 式(A.1)中的模型函数也分别对于输入和输出估算值 x_i 和 y 有效。注 2: 在一系列观测值中, 第 k 个 X_i 量的观测值用 x_{ik} 表示。

A.4 标准不确定度的 A 类评定

A 类评估方法适用于在相同的测量条件下获得的 n 个独立观测值所构成的随机变量。通常, 可假定 n 个观测值 x_{ik} 具有正态(高斯)概率分布(图 A.1)。

注 1: X_i 可能是用一系列观测值 x_{ik} 表示的刻度因数, 试验电压值或时间参数。 n 个观测值 x_{ik} 的算数平均值 $\bar{x}_i$, 定义如式(A.2):

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_{ik} \quad \dots\dots\dots (A.2)$$

该式认为是 X_i 的最佳估算值。其 A 类标准不确定度等于实验标准偏差平均值, 见式(A.3):

$$u(\bar{x}_i) = s(\bar{x}_i) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{n}} \quad \dots\dots\dots (A.3)$$

式中:

 $s(x_i)$ ——各观测值的实验标准偏差, 见式(A.4)。

$$s(x_i) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (x_{ik} - \bar{x}_i)^2} \quad \dots\dots\dots (A.4)$$

方值 $s^2(x_i)$ 和 $s^2(\bar{x}_i)$ 分别称为样本方差和平均方差, 观测数 n 应至少 10 次, 即 $n \geq 10$, 否则, A 类标准不确定度的可靠性须用有效自由度来校核(见 A.8)。

注 2: 某些情况下, 有可能由以往很明确的条件下得到的大量观测来综合估算方差 s_p^2 , 然后再由少量的 n ($n=1, 2, 3, \dots$) 个类似的测量, 用 $u(\bar{x}_i) = s_p/\sqrt{n}$ 来估算标准不确定度, 这种方法优于用式(A.3)进行的估算。

A.5 标准不确定度的 B 类评定

B 类评估方法适用于除一系列观察的统计分析以外的所有事项。B 类不确定度由科学判断进行评定, 这种判断基于具有观测值 x_i 的输入量 X_i 的可能变化的所有可用的信息, 如:

- 1) 量的估算方法;
- 2) 测量系统及其组件的校准不确定度;

- 3) 分压器和测量仪器的非线性;
- 4) 动态特性,如刻度因数随频率或冲击波形的变化;
- 5) 短时稳定性,自热;
- 6) 长期稳定性,漂移;
- 7) 测量期间的环境条件;
- 8) 周围物体的邻近效应;
- 9) 仪器或计算结果采用的软件的影响;
- 10) 数字仪器的有限分辨率、模拟量仪器的读数。

输入量和不确定度信息可从以下方面获得,如:实际的或以前的测量、校准证书、手册中数据、标准、制造商规范以及相关仪器或材料特性的知识等。以下情况的不确定度的 B 类评定可认为是确定的:

- a) 常常已知单个输入值 x_i 及其标准不确定度 $u(x_i)$,如单个测量值、修正值或从参考文献查到的参考值。该值(x_i)及其不确定度可用于模型函数式(A.1)。若 $u(x_i)$ 为未知,则须从其他相关不确定度数据计算求得或根据经验估算。
- b) 可将标准不确定度与覆盖因子 k 的乘积作为装置的不确定度。如校准证书中的数字电压表的扩展不确定度 U (见 A.7)。当电压表用于复杂的测量系统时,其不确定度分量见式(A.5):

$$u(x_i) = \frac{U}{k} \quad \dots\dots\dots (A.5)$$

式中:

k ——覆盖因子。可用置信度表述,如 68.3%、95.45% 或 99.7% 代替扩展不确定度和覆盖因子的表述。通常可以假定如图 A.1 所示的正态分布,则上述置信度的表述分别对应覆盖因子 $k=1$ 、 $k=2$ 或 $k=3$ 。

- c) 输入量 X_i 的估算值 x_i 落在具有一定概率分布 $p(x_i)$ 的 a_- 至 a_+ 区间内。通常,没有 $p(x_i)$ 的详细信息,可假定其可能值为矩形分布(图 A.2),那么 X_i 的期望值即为该区间的中间点 $\bar{x}_i$ 见式(A.6):

$$\bar{x}_i = \frac{(a_- + a_+)}{2} \quad \dots\dots\dots (A.6)$$

相关的标准不确定度见式(A.7)

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad \dots\dots\dots (A.7)$$

式中:

$$a = (a_- - a_+)/2。$$

某些情况下,采用其他概率分布可能更适合,如四边形、三角形或正态分布。

注 1: 对三角形分布,标准不确定度为 $u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{6}}$;对正态分布, $u(x_i) = \sigma$ 。也就是说,矩形分布的标准不确定度比其他分布的标准不确定度要大。

JJF 1059 规范指出,如果特殊影响已在 A 类不确定度中考虑了,则 B 类不确定度不应二次计算。而且,不确定度的评定应该是实际的并依据标准不确定度来进行,以避免因个人因素或其他安全保险原因求得比按 JJF 1059 规范方法求得的还要大的不确定度。通常输入量 X_i 应予以调整或修正以减小幅值的系统影响,如根据温度和电压的关系。但是,仍应考虑与该修正相关联的不确定度 $u(x_i)$ 。

注 2: 当使用数字记录仪进行重复冲击测量时,可能会出现不确定度分量二次计算的情况,如刻度因数的校准。N 个测量值的分散性产生 A 类不确定度分量,但这种分散性可能部分地是由记录仪的分辨率不够或其内部噪声造成的,可不必再次考虑分辨率的全部影响,仅需在 B 类不确定度中考虑很小的一部分即可。但是,如果数字记录仪在冲击电压试验期间测得一个测量值,则分辨率不够这一因素应在 B 类不确定度中考虑。

注3: B类不确定度评定要求相关的物理关系、影响量和测量技术的广博知识和经验。由于评估本身不是可导致单一解答的严谨科学,有经验的试验工程师可能用不同的方式判断测量过程,得到不同的B类不确定度,这种情况很常见。

A.6 合成标准不确定度

用A类或B类评定的每一输入量 X_i 的估算值 x_i 的相应标准不确定度 $u(x_i)$,对输出量的标准不确定度的影响见式(A.8):

$$u_i(y) = c_i u(x_i) \quad \text{..... (A.8)}$$

式中, c_i 为敏感系数,其意义为输入量 x_i 的微小变化影响输出量 y 的程度,其值可从模型函数 f 进行偏微分直接求得(见A.9)。也可用等效数值法或实验的方法求得。 c_i 的符号可正可负。若输入量是不相关量,则不必考虑其符号,因为只有标准不确定度的方值才会在下一步骤中[式(A.9)]用到。

$$c_i = \left. \frac{\partial f}{\partial X_i} \right|_{x_i=x_i} = \frac{\partial f}{\partial x_i} \quad \text{..... (A.9)}$$

N 个标准不确定度 $u_i(y)$ [见式(A.8)]对输出量的合成不确定度的关系遵循“不确定度传递定律”:

$$u_c^2(y) = u_1^2(y) + u_2^2(y) + \dots + u_N^2(y) = \sum_{i=1}^N u_i^2(y) \quad \text{..... (A.10)}$$

由式(A.10), $u_c(y)$ 为平方根的正值,即:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2(y)} = \sqrt{\sum_{i=1}^N [c_i u(x_i)]^2} \quad \text{..... (A.11)}$$

若输出量 Y 是输入量 X_i 的积或商,可用类似的表达式如式(A.10)和式(A.11)求得相对不确定度 $u_c(y)/|y|$ 和 $u_c(x_i)/|x_i|$ 。“不确定度传递定律”也适用于不相关输入量模型函数的两种类型(A类和B类)。

注:对存在相关性的情况,在“不确定度传递定律”中将出现线性项,并且敏感系数也有相应的符号了。例如用同一台仪器测量两个或多个输入量的场合就会出现相关性。为避免复杂的计算,以适当的修正和不确定度在模型函数中增添附加的输入量可消除相关性。某些情况下,相关输入量的存在甚至会减小合成不确定度,因此,对于复杂不确定度的分析,为达到非常精确的不确定度评估,基本上必须考虑相关性。本部分中不再讨论相关问题。

A.7 扩展不确定度

在高电压和大电流测量领域,如同大多数其他工业应用一样,要求相应于约95%覆盖概率的不确定度已足够了。可将合成标准不确定度 $u_c(y)$ 乘以覆盖因子 k 来求取,见式(A.12)。

$$U = k u_c(y) \quad \text{..... (A.12)}$$

式中, U 为扩展不确定度。覆盖因子 $k=2$ 用在 y 属于正态分布和 $u_c(y)$ 有足够的可靠性,即 $u_c(y)$ 的有效自由度足够大(见A.8)的场合,否则应取 $k>2$ 以使 $p=95\%$ 。

注1:在某些老标准中采用术语“总不确定度”,大多数情况下,该术语解释为覆盖因子 $k=2$ 的扩展不确定度。

注2:由于不确定度定义为正值, U 的符号总是正的。当然,在用 U 表示不确定度区间时,将 k 表述为 $\pm U$ 。

A.8 有效自由度

通常,假定扩展不确定度具有正态分布在如下场合可以满足:具有类似的数值和很明确的概率分布(高斯、矩形等)的几个不确定度分量(如 $N>3$)组成合成标准不确定度的场合;以及A类不确定度是依

据 $n \geq 10$ 个重复观测值估算的场合。对电压测量系统的校准,这些条件均满足。若正态分布的假定不合理,需采用 $k > 2$ 的值以使覆盖率达到约 95%。适当的覆盖因子可依据标准不确定度 $u_c(y)$ 的有效自由度 ν_{eff} 来确定,见式(A.13)。

$$\nu_{\text{eff}} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{\nu_i}} \quad \text{.....(A.13)}$$

式中:

$u_i(y)$ ——由式(A.8)给出, $i=1, 2, \dots, N$;

ν_i ——为相应的自由度,其可靠值如下:

$\nu_i = n - 1$ ——适用于由 n 个独立观测得到的 A 类不确定度;

$\nu_i \geq 50$ ——适用于由校准证书给出的 B 类不确定度,且表明覆盖概率不小于 95% 的情形;

$\nu_i = \infty$ ——假定在区间 a_- 至 a_+ 之间为矩形分布的 B 类不确定度。

据此,可按式(A.13)计算有效自由度,而覆盖因子则由表 A.1 中选取。表中数值是依据 t 分布且覆盖概率为 95.45% 确定的。若 ν_{eff} 不是整数,则可用 ν_{eff} 插值或截尾为下一个较低的整数。

也可用式(A.14)由 ν_{eff} 计算 k :

$$k = 1.96 + \frac{2.374}{\nu_{\text{eff}}} + \frac{2.818}{\nu_{\text{eff}}^2} + \frac{2.547}{\nu_{\text{eff}}^3} \quad \text{.....(A.14)}$$

表 A.1 有效自由度 ν_{eff} 对应的包含因子 $k(P=95.45\%)$

ν_{eff}	1	2	3	4	5	6	7	8	10	20	50	∞
k	13.97	4.53	3.31	2.87	2.65	2.52	2.43	2.37	2.28	2.13	2.05	2.00

A.9 不确定度预算

一个测量的不确定度预算是依据模型函数 f 对不确定度所有因素及数值的详细分析,应以与表 A.2 相同或类似的表格形式将相关数据进行保存以备复查。最后一行说明测量结果 y 的值,合成不确定度 $u_c(y)$ 以及有效自由度 ν_{eff} 。

A.10 测量结果表述

在校准证书以及测试报告中,测量量 Y 的结果应表示为 $y \pm U$,并注明覆盖概率(或置信限)约为 95%,扩展不确定度 U 应修正到不超过 2 位有效数字。若修正后使数值减小超过 $0.05U$,则应向上修正(四舍五入原则)。 y 数值应修正到可能受扩展不确定度影响的最少有效数字。

注 1: 作为例子,电压测量结果可用下列方式之一表述:

$(227.2 \pm 2.4) \text{ kV}$;

$227.2 \times (1 \pm 0.011) \text{ kV}$;

$227.2 \times (1 \pm 1.1 \times 10^{-2}) \text{ kV}$ 。

并应加注说明覆盖概率 P 以及覆盖因子 k 。

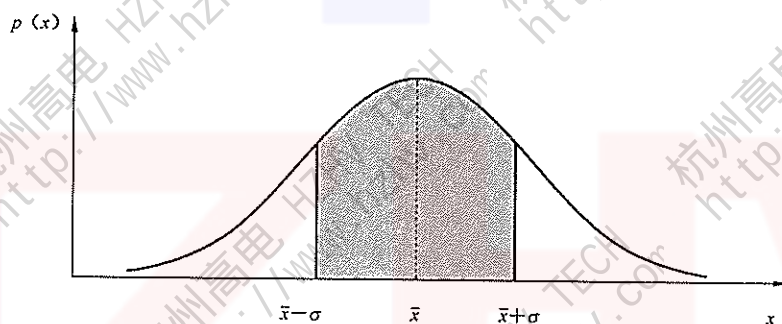
注 2: 作为例子,推荐采用下列完整表述(括号中内容适用于 $\nu_{\text{eff}} < 50$,即 $k > 2.05$ (见表 A.1)的场合:

“被报告的扩展不确定度表述为测量不确定度乘以覆盖因子, $k=2(k=XX)$,相应于覆盖概率约为 95% 的正态分布(t 分布,且有效自由度 $\nu_{\text{eff}}=YY$)。测量的标准不确定度是按 GB/T 16927.2 的方法确定的”。

表 A.2 不确定度预算的示意

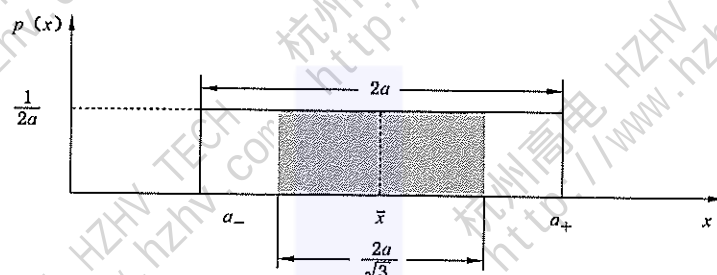
量 X_i	值 x_i	标准不确定度 分量 $u(x_i)$	自由度 ν_i/ν_{eff}	敏感系数 c_i	合成标准不确定度 分量 $u_i(y)$
X_1	x_1	$u(x_1)$	ν_1	c_1	$u_1(y)$
X_2	x_2	$u(x_2)$	ν_2	c_2	$u_2(y)$
:	:	:	:	:	:
X_N	x_N	$u(x_N)$	ν_N	c_N	$u_N(y)$
Y	y		ν_{eff}		$u_c(y)$

注：有效软件可从商业市场获取，也可由使用者从通用软件自行开发，以使由模型函数 f 中对本表的量进行自动计算。



注：阴影区域表示标准不确定度高于或低于 $\bar{x}_i$ 。

图 A.1 正态概率分布 $p(x)$



注：阴影区域表示标准不确定度高于或低于 $\bar{x}_i$ 。

图 A.2 矩形概率分布 $p(x)$

附录 B

(资料性附录)

高电压测量不确定度计算示例³⁾

B.1 示例 1: 交流测量系统的刻度因数(比对法)

由一认可的校准实验室在客户实验室对客户型号为 OWF200-500 额定电压为 200 kV 的交流测量系统(记为 X)进行校准。校准是与标准测量系统(记为 N)进行比对,最高电压为 $V_{x\max}=200$ kV(见图 B.1)。两套系统均有分压器和数字电压表,分别在分压器输出端显示电压值 V_N 和 V_X 。标准测量系统 N 的刻度因数和扩展不确定度为:25 °C 下, $F_N=1.056$, $U_N=0.33\%$ ($k=2$),包括温度变化和长期稳定性不确定度分量的估算值。

比对测量在 5 个电压水平下进行,分别约为 $V_{x\max}$ 的 20%、40%、60%、80% 以及 100%,在每一个电压水平上同时读取电压 V_N 和 V_X ,且分别读取 10 个电压数。进一步对短时稳定性、温度差异等试验。根据制造商数据资料,被校准测量系统到下一次校准时其长期稳定性的影响在 $\pm 0.3\%$ 以内。

用于计算 F_X 值的模型公式及其合成不确定度如下,理想情况下,两套测量系统显示的交流电压 V 的值相同,见式(B.1)和图 B.1:

$$V = F_N V_N = F_X V_X \quad \text{..... (B.1)}$$

由此导出计算被校测量系统刻度因数的基本式(B.2):

$$F_X = \frac{V_N}{V_X} F_N = \frac{V}{V_X} \quad \text{..... (B.2)}$$

正如上述,两套系统的刻度因数均会受到多个参量的影响,如漂移、温度等,它们会影响刻度因数值及其不确定度。这些影响因素分别记为:对标准测量系统,为 $\Delta F_{N1}, \Delta F_{N2}, \dots$;对被校测量系统,为 $\Delta F_{X1}, \Delta F_{X2}, \dots$ 。通常,影响刻度因数 F_N 和 F_X 的每一分量包括误差和标准不确定度。用误差来修正刻度因数,修正具有相反的符号。不确定度分量与相关的刻度因数 F_N 或 F_X 有关,其评定方法与 A.5 中所述的方法类似,即若假定在 $\pm a_i$ 区间内是矩形概率分布,则其标准不确定度 $u_i = \frac{a_i}{\sqrt{3}}$;或者,用被校组

件的扩展不确定度 U 除以覆盖因子 k 来求得。分量 ΔF_N 或 ΔF_X 并不总是有误差(或假定误差很小可以忽略),因此仅需考虑不确定度分量 u_i 。

基本式(B.2)加上分量 $\Delta F_{N,m}$ 和 $\Delta F_{X,i}$ 可求得确定刻度因数 F 的完整模型函数及其合成标准不确定度。由于可忽略影响量之间的相关性,式(B.2)可用下述一般形式表示,见式(B.3):

$$F_X = \sum_i \Delta F_{X,i} = \frac{V_N}{V_X} (F_N - \sum_m \Delta F_{N,m}) \quad \text{..... (B.3)}$$

注 1: 根据定义,加入等式两边的误差项带负号,定义为 $\Delta F = \text{显示值} - \text{正确值}$ 。

对有些场合,交流测量系统的刻度因数 F_X 可表示为式(B.4):

$$F_X = \frac{V_N}{V_X} (F_N - \Delta F_N) + \sum_{i=1}^5 \Delta F_{X,i} \quad \text{..... (B.4)}$$

式中:

ΔF_N ——标准测量系统在较低温度下产生的分量;

$\Delta F_{X,1}$ ——商的非线性产生的分量;

$\Delta F_{X,2}$ ——被校系统温度变化产生的分量;

3) 采标说明:这里给出我国高压(交流、冲击、雷电冲击)测量系统不确定度计算示例。

$\Delta F_{x,3}$ ——被校系统短时稳定性产生的分量；

$\Delta F_{x,4}$ ——被校系统长期稳定性产生的分量；

$\Delta F_{x,5}$ ——被校系统其他影响因素产生的分量。

注2：本示例中， ΔF_N 由刻度因数 F_N 的修正值及其不确定度分量组成，项 $\Delta F_{x,1} \sim \Delta F_{x,5}$ 仅对刻度因数 F_x 有影响。

为了方便，不确定度分量 $\Delta F_{x,1} \sim \Delta F_{x,5}$ 直接与 F_x 相关联，即已经考虑了这些输入量的敏感系数。

标准系统 N 与测量系统 X 在单个电压下的比对测量产生 10 对测量值 V 和 V_x ，由此可计算 V/V_x 之商值，相应的平均值以及实验标准偏差 $s(V/V_x)$ 。商 V/V_x 和标准偏差 $s(V/V_x)$ 是针对 200 kV 以内 5 个电压等级下求得的。

表 B.2 中 5 个商 V/V_x 的平均值为 1 000.9，为保守起见， V/V_x 的 A 类标准不确定度由标准偏差最大值 $s_{\max} = 2.3$ 进行估算：

$$u_A = \frac{s_{\max}}{\sqrt{n}} = \frac{2.3}{\sqrt{10}} = 0.73$$

表 B.1 比对测量结果

次数	20%电压值			40%电压值			60%电压值		
	V_x/V	V/kV	V/V_x	V_x/V	V/kV	V/V_x	V_x/V	V/kV	V/V_x
1	40.1	40.05	998.8	80.3	80.35	1 000.6	121.4	121.60	1 001.6
2	39.9	39.72	995.5	79.4	79.63	1 002.9	121.4	121.72	1 002.6
3	40.2	40.19	999.8	80.5	80.48	999.8	120.9	120.96	1 000.5
4	40.1	40.21	1 002.7	79.8	79.90	1 001.3	120.5	120.95	1 003.7
5	40.3	40.12	995.5	79.9	80.28	1 004.8	120.3	120.41	1 000.9
6	39.8	39.81	1 000.3	80.3	80.17	998.4	120.1	120.02	999.3
7	40.2	40.19	999.8	79.4	79.48	1 001.0	120.3	120.27	999.8
8	40.1	40.02	998.0	79.1	79.31	1 002.7	120.7	120.98	1 002.3
9	39.9	39.87	999.2	80.4	80.37	999.6	121.3	121.45	1 001.2
10	39.8	39.64	996.0	80.2	80.24	1 000.5	121.8	121.82	1 000.2
V/V_x 平均值			998.6	—	—	1 001.2	—	—	1 001.2
次数	80%电压值			100%电压值					
	V_x/V	V/kV	V/V_x	V_x/V	V/kV	V/V_x			
1	160.9	161.08	1 001.1	199.6	199.62	1 000.1			
2	160.7	160.62	999.5	199.6	200.36	1 003.8			
3	160.9	161.29	1 002.4	200.3	200.52	1 001.1			
4	159.7	160.26	1 003.5	199.3	200.02	1 003.6			
5	160.3	160.48	1 001.1	199.4	199.76	1 001.8			
6	161.1	161.38	1 001.7	199.3	199.33	1 000.2			
7	159.5	160.15	1 004.1	200.1	200.67	1 002.8			
8	159.9	160.32	1 002.6	200.1	200.32	1 001.1			
9	160.5	160.52	1 000.1	199.4	200.35	1 004.8			
10	161.0	161.12	1 000.7	200.7	200.84	1 000.7			
V/V_x 平均值			1 001.7	—	—	1 002.0			

表 B.1 中,商 V/V_x 与其平均值的偏差表征系统 X 的非线性特性,在 $20\%V_{x\max}$ 下其最大偏差为 $\alpha_1=2.3$ (见表 B.2),由非线性产生的 V/V_x 的 B 类标准不确定度。由此求得 B 类不确定分量:

$$u_{B0} = \frac{1}{\sqrt{3}} \max_{g=1}^5 |F_g - F| = \frac{1}{\sqrt{3}} \times 2.3 = 1.3$$

表 B.2 $h=5$ 个电压水平 ($V_{x\max}=200$ kV) 下结果汇总

电压等级数 g	电压水平 $V_{x\max}$ 的百分数	F_g	$s(V/V_x)$
1	20	998.6	2.3 ($=s_{\max}$)
2	40	1 001.2	1.9
3	60	1 001.2	1.4
4	80	1 001.7	1.5
5	100	1 002.0	1.7
平均值 F		1 000.9	

制造商提供的分压器温度变化参数为 $0.02\%/^{\circ}\text{C}$,分压器使用温度范围为 $5^{\circ}\text{C}\sim 35^{\circ}\text{C}$,比对时的环境温度为 25°C 。工作温度偏差最大值为 $\Delta T=25-5=20^{\circ}\text{C}$ 。所以最大温度变化带来的刻度因数的最大变化为:

$$\Delta F = 0.02\% \times 20 \times 1\,000.9 = 4.0;$$

$$u_{B1} = \frac{1}{\sqrt{3}} \Delta F = \frac{1}{\sqrt{3}} \times 4.0 = 2.3$$

表 B.3 短时稳定性测试,在分压器系统施加 199.5 kV 电压,持续 1 h,耐压前后分别比对其刻度因数。

表 B.3 短时稳定性试验结果

	V_x/V	V/kV	V/V_x
施加电压前	199.1	199.32	1 001.1
施加电压后	199.0	199.50	1 002.5

刻度因数的最大变化量为 $1\,002.5 - 1\,001.1 = 1.4$,所以短时稳定性带来的刻度因数的不确定度分量为:

$$u_{B2} = \frac{1}{\sqrt{3}} \Delta F = \frac{1}{\sqrt{3}} \times 1.4 = 0.81$$

长期稳定性的不确定度为:

$$u_{B3} = \frac{1}{\sqrt{3}} \Delta F = \frac{1}{\sqrt{3}} \times 3.0 = 1.7$$

对于其他的影响因素的不确定度用以下 u_{B4} 估算值为:

$$u_{B4} = 0.2\% \times F_x = 2.0$$

把所有输入量的数值及其标准不确定度代入模型公式(B.4)的右侧,用附录 A 中给出的公式对模型公式进行手工计算,也可借助于适用于计算不确定度的专业软件进行计算。计算结果见表 B.4,表中最后一行给出了标定刻度因数 F_x 的合成标准不确定度及其有效自由度, $\nu_{\text{eff}}=1\,730$ 表示 F_x 可能值属

正态分布,因此 $k=2$ 是有效的(见附录 A 中表 A.1)。

最后,认可测量系统校准的不确定度为:

$$u=\sqrt{u_A^2+u_{B0}^2+u_{B1}^2+u_{B2}^2+u_{B3}^2+u_{B4}^2+u_{ref}^2}=4.2$$

扩展不确定度为:

$$U=k \cdot u=8.4$$

最后,认可测量系统校准的完整结果由其标定刻度因数及其扩展不确定度表示:

$$F_x=1\,000.9\pm 8.4=1\,000.9(1\pm 0.008\,4),25\,^{\circ}\text{C},\text{覆盖概率不小于 }95\%(k=2)。$$

表 B.4 标定刻度因数 F_x 的不确定度预算

量	值	标准不确定度 分量	自由度	敏感系数	合成标准不确定 度分量
F_N	1 056	0.003 3/2 ^a	50	1 000.9	1.65
ΔF_N	0	0	∞	0	0
V/V_x	1 000.9	0.73 ^a	9	1	0.73
$\Delta F_{x,1}$	0	1.3 ^b	∞		1.3
$\Delta F_{x,2}$	0	2.3 ^b	∞	1	2.3
$\Delta F_{x,3}$	0	0.81 ^b	∞	1	0.81
$\Delta F_{x,4}$	0	1.7 ^b	∞	1	1.7
$\Delta F_{x,5}$	0	2.0 ^b	∞	1	2.0
F_x	1 000.9		1 730		4.2
^a 正态分布; ^b 矩形分布。					

标定刻度因数的相对扩展不确定度 $U=0.84\%$ 。由于该数值已考虑了长期稳定性引起的不确定度分量,只要在直到下一次校准之前中间进行的性能校核(见 4.3)结果表明其刻度因数是稳定的,那么上述 F_x 值可作为该认可测量系统在下次校准之前的试验电压的扩展不确定度。

B.2 示例 2:冲击电压测量系统的刻度因数(比对法)

冲击电压测量系统包括额定电压为一台 4.8 MV 的冲击分压器(实际使用最大参数为 3 MV)、一台 12 位数字记录仪和一根 50 米长的同轴电缆。

比对过程使用一个 800 kV 的标准冲击测量系统,标准测量系统 N 的刻度因数和扩展不确定度为: 23 °C 下, $F_N=82\,100, U_N=0.56\%(k=2)$, 包括温度变化和长期稳定性不确定度分量的估算值。

标准冲击电压测量系统的电压最高只能达到 800 kV,所以对校准冲击测量系统只能进行 20% 电压到 800 kV 之间进行比对。其比对数据见表 B.5。

表 B.5 正极性冲击电压比对

次数	约+20%电压值			约+800 kV 电压值		
	V_x/V	V/kV	V/V_x	V_x/V	V/kV	V/V_x
1	165.9	625.22	3 768.7	211.3	795.27	3 763.7
2	164.8	623.18	3 781.4	210.4	795.43	3 780.6

表 B.5 (续)

次数	约+20%电压值			约+800 kV 电压值		
	V_x/V	V/kV	V/V_x	V_x/V	V/kV	V/V_x
3	165.5	624.8	3 775.2	211.1	797.35	3 777.1
4	165.1	622.51	3 770.5	211.4	795.86	3 764.7
5	165.7	623.23	3 761.2	211.4	797.62	3 773.0
6	166.1	624.32	3 758.7	210.9	793.92	3 764.4
7	165.8	625.29	3 771.4	211.3	793.87	3 757.1
8	165.2	623.74	3 775.7	211.3	798.84	3 780.6
9	165.3	621.12	3 757.5	211.2	796.27	3 770.2
10	165.8	623.43	3 760.1	211.2	794.89	3 763.7
V/V_x 平均值			3 768.0	—	—	3 769.5

表 B.6 负极性冲击电压比对

次数	约-20%电压值			约-800 kV 电压值		
	V_x/V	V/kV	V/V_x	V_x/V	V/kV	V/V_x
1	161.4	608.09	3 767.6	210.5	790.08	3 753.3
2	160.9	603.65	3 751.7	210.9	795.85	3 773.6
3	161.2	606.85	3 764.6	210.5	792.96	3 767.0
4	161.3	607.61	3 767.0	210.4	791.46	3 761.7
5	161.3	606.08	3 757.5	210.7	790.32	3 750.9
6	161.1	607.82	3 772.9	210.3	792.96	3 770.6
7	161.2	605.65	3 757.1	210.5	791.55	3 760.3
8	161.5	608.82	3 769.8	210.5	790.26	3 754.2
9	161.4	607.56	3 764.3	210.1	791.57	3 767.6
10	160.8	603.32	3 752.0	210.4	790.28	3 756.1
V/V_x 平均值			3 762.5	—	—	3 761.5

表 B.7 各电压水平下结果汇总

电压等级数 g	电压水平/kV	F_g	$s(V/V_x)$
1	600	3 768.0	8.3(= s_{max})
2	800	3 769.5	8.1
3	-600	3 762.5	7.4
4	-800	3 761.5	7.9
平均值 F		3 765.4	

表 B.7 中 4 个商 V/V_x 的平均值为 3 765.4, 为保守起见, V/V_x 的 A 类标准不确定度按下式由标准偏差最大值 $s_{\max}=8.3$ 进行估算:

$$u_A = \frac{s_{\max}}{\sqrt{n}} = \frac{8.3}{\sqrt{10}} = 2.6$$

校准在 800 kV 下其最大偏差为 $a_1=4.1$ (见表 B.6), 由非线性产生的 V/V_x 的 B 类标准不确定度分量为:

$$u_{B0} = \frac{1}{\sqrt{3}} \max_{g=1}^h |F_g - F| = \frac{1}{\sqrt{3}} \times 4.1 = 2.4$$

扩展范围的非线性试验采用冲击发生器充分充电, 确保输出电压波形没有明显变化情况下的发生器效率变化。试验数据见表 B.8。

表 B.8 扩展范围的非线性试验

序号	校准系统测量电压/ kV	发生器单级充电电压/ kV	输出电压/充电电压 R_g	$ R_g - R $
1	786.5	33.3	23.62	0.11
2	1 756	74.5	23.57	0.06
3	2 438	103.8	23.48	0.03
4	3 014	128.9	23.38	0.13(=max)
平均值 R		—	23.51	

扩展范围的非线性 B 类不确定分量:

$$u_{B1} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times \frac{F_x}{R} \times \max_{g=1}^h |R_g - R| = 12.0$$

制造商提供的分压器温度变化参数为 $0.02\%/^{\circ}\text{C}$, 分压器使用温度范围为 $5^{\circ}\text{C} \sim 35^{\circ}\text{C}$, 比对时的环境温度为 23°C , 工作温度偏差最大值为 $\Delta T = 23 - 5 = 18^{\circ}\text{C}$ 。所以最大温度变化带来的刻度因数的最大变化为:

$$\Delta F = 0.02\% \times 18 \times 3\,765.4 = 13.56$$

$$u_{B2} = \frac{1}{\sqrt{3}} \Delta F = \frac{1}{\sqrt{3}} \times 13.56 = 7.9$$

短时稳定性测试, 在对冲击测量系统 3 000 kV, 30 次 (0.5 次/分) 耐压前后分别比对其刻度因数。

刻度因数的最大变化量为 $3\,756.1 - 3\,744.5 = 11.6$ (见表 B.9), 所以短时稳定性带来的刻度因数的不确定度分类为:

$$u_{B3} = \frac{1}{\sqrt{3}} \Delta F = \frac{1}{\sqrt{3}} \times 11.6 = 6.8$$

表 B.9 短时稳定性测试

	V_x V	V kV	V/V_x
施加电压前	210.4	790.28	3 756.1
施加电压后	205.5	768.36	3 744.5

根据制造商数据资料,到下一次校准时其长期稳定性的影响在±0.3%以内。

长期稳定性的不确定度分量为:

$$u_{B4} = \frac{1}{\sqrt{3}} \Delta F = \frac{1}{\sqrt{3}} \times 11.3 = 6.5$$

对于其他的影响因素的不确定度用以下 u_{B5} 估算值为:

$$u_{B5} = 0.2\% \times F_X = 7.5$$

采用类似于示例 1 的标定刻度因数 F_X 的不确定度预算方法见表 B.10。

表 B.10 标定刻度因数 F_X 的不确定度预算

量	值	标准不确定度分量	自由度	敏感系数	合成标准不确定度分量
F_N	82 100	0.005 6/2 ^a	50	3 765.4	10.5
ΔF_N	0	0	∞	0	0
V/V_X	3 765.4	2.6 ^a	9	1	2.6
$\Delta F_{X,1}$	0	2.4 ^b	∞	1	2.4
$\Delta F_{X,2}$	0	12.0 ^b	∞	1	12.0
$\Delta F_{X,3}$	0	7.9 ^b	∞	1	7.9
$\Delta F_{X,4}$	0	6.8 ^b	∞	1	6.8
$\Delta F_{X,5}$	0	6.4 ^b	∞	1	6.5
$\Delta F_{X,6}$	0	7.5 ^b	∞	1	7.5
F_X	3 765.4		907		21.8
^a 正态分布; ^b 矩形分布。					

表中:

ΔF_N ——标准测量系统在较低温度下产生的分量;

$\Delta F_{X,1}$ ——商的非线性产生的分量;

$\Delta F_{X,2}$ ——被校系统扩展范围的非线性产生的分量;

$\Delta F_{X,3}$ ——被校系统温度变化产生的分量;

$\Delta F_{X,4}$ ——被校系统短时稳定性产生的分量;

$\Delta F_{X,5}$ ——被校系统长期稳定性产生的分量;

$\Delta F_{X,6}$ ——被校系统其他影响因素产生的分量。

表中最后一行给出了标定刻度因数 F_X 的合成标准不确定度及其有效自由度, $\nu_{\text{eff}} = 907$ 表示 F_X 可能值属正态分布,因此 $k=2$ 是有效的(见附录 A 中表 A.1)。

最后,认可测量系统校准的不确定度为:

$$u = \sqrt{u_A^2 + u_{B0}^2 + u_{B1}^2 + u_{B2}^2 + u_{B3}^2 + u_{B4}^2 + u_{B5}^2 + u_{\text{ref}}^2} = 21.8$$

扩展不确定度为:

$$U = k \cdot u = 2 \times 21.8 = 43.6$$

最后,认可测量系统校准的完整结果由其标定刻度因数及其扩展不确定度表示:

$$F_X = 3\,765.4 \pm 43.6 = 3\,765.4(1 \pm 0.012), 23\,^\circ\text{C}, \text{覆盖概率不小于 } 95\% (k=2)。$$

标定刻度因数的相对扩展不确定度 $U=1.2\%$ 。由于该数值已考虑了长期稳定性引起的不确定度

分量,只要在直到下一次校准之前中间进行的性能校核(见 4.3)结果表明其刻度因数是稳定的,那么上述 F_x 值可作为该认可测量系统在下次校准之前的试验电压的扩展不确定度。

B.3 示例 3: 雷电冲击电压的波前时间

用一包括分压器和数字记录仪(12 位,采样率为 100 MS/s)的 2 MV 冲击电压测量系统 X 与一标准测量系统 N 在约 500 kV 的雷电冲击电压下进行比对校准波前时间(见图 B.1)。系统 N 在标称时段测量波前时间的系统平均误差为 $\Delta T_{1N}=0.01 \mu\text{s}$,扩展不确定度为 $U_N=0.02 \mu\text{s}(k=2)$ 。

通过比对,两套系统同时记录了 10 对具有规定波前时间的雷电冲击电压。由系统 N 记录的第 i 次冲击电压的实际波前时间由式(B.5)确定:

$$T_{1N,i} = \frac{(t_{90} - t_{30})}{0.6} \quad \text{.....(B.5)}$$

式中, t_{30} 和 t_{90} 分别为系统 N 确定的峰值幅值的 30% 和 90% 对应的时刻;由系统 X 记录的同一冲击电压的波前时间 $T_{1X,i}$ 也是按相同方法计算的。

根据系统 X 和系统 N 测得的 $n=10$ 个对应波前时间的差,由式(B.6)确定波前时间偏差的平均值:

$$\Delta T_1 = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^n (T_{1X,i} - T_{1N,i}) \quad \text{.....(B.6)}$$

比对在标称时段的最小、最大和中间值三种不同的波前时间下进行,即 $T_1 \approx 0.8 \mu\text{s}$ 、 $T_1 \approx 1.6 \mu\text{s}$ 和 $T_1 \approx 1.2 \mu\text{s}$ 。对每个 T_1 值均计算平均偏差 $\Delta T_{1,j}$,三个 $\Delta T_{1,j}$ 值的总平均见式(B.7):

$$\Delta T_{1m} = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 \Delta T_{1,j} \quad \text{.....(B.7)}$$

换句话说, ΔT_{1m} 表示系统 X 相对于系统 N 在 $T_1 \approx 0.8 \mu\text{s} \sim 1.6 \mu\text{s}$ 内的平均波前时间误差。

经标准系统 N 的误差 ΔT_{1N} 修正后,系统 X 的误差的模型函数见式(B.8):

$$\Delta T_{1cal} = \Delta T_{1m} + \Delta T_{1N} \quad \text{.....(B.8)}$$

表 B.11 列出了由校准获得的单个数值、误差和偏差并另外在图 B.2 中显示。

表 B.11 波前时间 T_1 和偏差的校准结果

		值		
$T_{1N,j}$	μs	0.80	1.20	1.60
$T_{1X,j}$	μs	0.73	1.17	1.61
$s_j(T_{1X,j})$	μs	0.015	0.01	0.01
$\Delta T_{1,j}$	μs	-0.07	-0.03	0.01
ΔT_{1m}	μs	-0.03		

由三个 $T_{1X,j}$ 值的最大标准偏差计算 A 类标准不确定度见式(B.9):

$$u_A(T_{1X}) = \frac{1}{\sqrt{10}} \max_{j=1}^3 s_j = \frac{0.015 \mu\text{s}}{\sqrt{10}} = 0.0047 \mu\text{s} \quad \text{.....(B.9)}$$

由于在模型函数中没有直接提及 T_{1X} ,因此在不不确定度预算中(表 B.7), $u_A(T_{1X,j})$ 单独列出。

由平均值 ΔT_{1m} 中的三个单独 $T_{1X,j}$ 值的最大偏差给出 B 类标准不确定度见式(B.10):

$$u_B(T_{1m}) = \frac{1}{\sqrt{3}} \max_{j=1}^3 |\Delta T_{1,j} - \Delta T_{1m}| = \frac{0.04 \mu\text{s}}{\sqrt{3}} = 0.0231 \mu\text{s} \quad \text{.....(B.10)}$$

把所有输入量的数值及其标准不确定度代入模型公式(B.6和B.7)的右侧,用附录A中给出的公式对模型等式进行手工计算,也可借助于适用于计算不确定度的专业软件进行计算。计算结果见表B.12,表中最后一行给出了平均误差 $\Delta T_{1\text{cal}}$ 、合成标准不确定度及其有效自由度, $\nu_{\text{eff}}=1\,700$ 表示 $\Delta T_{1\text{cal}}$ 的可能值属正态分布,因此 $k=2$ 是有效的(见附录A中表A.1)。

表 B.12 波前时间偏差 $\Delta T_{1\text{cal}}$ 的不确定度预算

量	值/ μs	标准不确定度分量/ μs	自由度	敏感系数	合成标准不确定度分量/ μs
$\Delta T_{1\text{N}}$	0.01	0.01^{a}	50	1	0.01
$\Delta T_{1\text{m}}$	-0.03	$0.017\,3^{\text{b}}$	∞	1	0.023
$u_{\text{A}}(T_{1\text{X}})$	0.0	$0.004\,74^{\text{a}}$	9	1	0.004\,7
$\Delta T_{1\text{cal}}$	$-0.020\,\mu\text{s}$		1\,700		$0.025\,6\,\mu\text{s}$
^a 正态分布; ^b 矩形分布。					

最后,完整校准结果可表示为:

$$\Delta T_{1\text{cal}} = -0.020\,\mu\text{s} \pm 0.051\,\mu\text{s}, \text{覆盖概率不小于 } 95\% (k=2)。$$

换句话说,系统X在标称时段测得的波前时间误差太小,只有一 $0.02\,\mu\text{s}$,当用系统X测量冲击电压时,波前时间修正值只需将所测值 $T_{1\text{meas}}$ 加上 $0.02\,\mu\text{s}$ 即可。如果波前时间没有别的不确定度分量需考虑,则 $T_{1\text{cor}}$ 的扩展不确定度为 $0.051\,\mu\text{s} (k=2)$ 。

附加不确定度分量可能因系统X中用的数字记录仪与在比对时用的量程不同产生的。应估算其对 t_{30} 和 t_{90} 的影响,可根据式(B.6)计算 T_1 的合理偏差,由此在不确定度预算中引入了相应的B类标准不确定度。

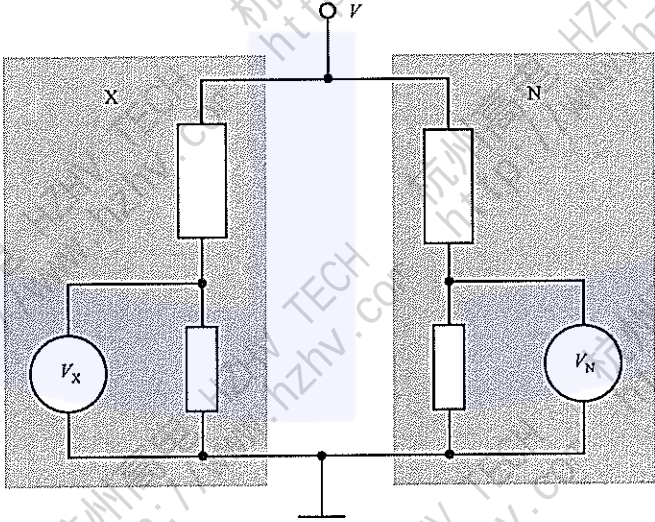


图 B.1 被校系统 X 与标准系统 N 的比对

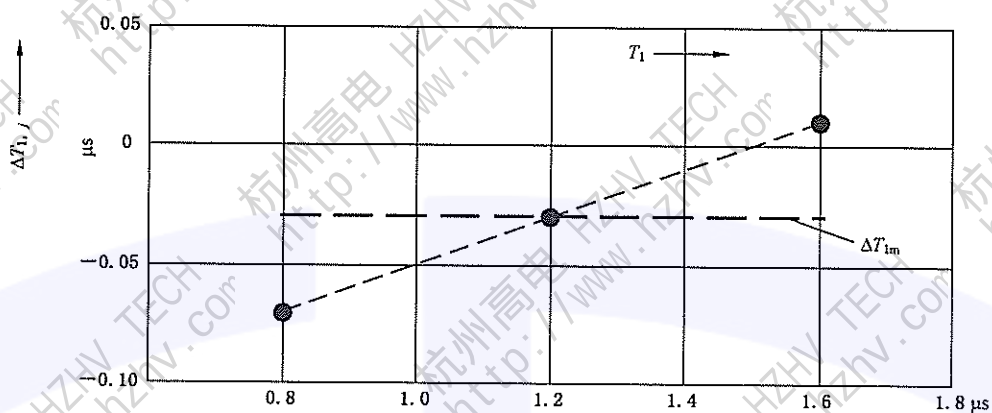


图 B.2 $T_1 \approx 0.8 \mu\text{s} \sim 1.6 \mu\text{s}$ 内系统 X 相对于标准系统 N 的波前时间偏差 $\Delta T_{1,j}$ 及其平均值 ΔT_{1m}

对于直流测量系统可以参照 B.1 交流测量系统和 B.2 冲击测量系统的例子进行分析。

附录 C

(资料性附录)

阶跃响应测量

C.1 概述

阶跃响应测量是表征冲击分压器、冲击示波器或数字记录仪性能的传统方法。由于单位阶跃响应参数与冲击电压的正确测量之间没有直接联系,本部分对其不作要求,但其对在比对测量中的动态特性仍有重要意义,特别是对分压器和仪器的研制十分有用,而且它仍适用于动态特性的性能校核(见 8.5.3 和 9.5.3)。

C.2 补充定义

C.2.1

参考电平(仅对冲击测量) reference level

l_R

在基准水平时段[见 C.2.10 和图 C.1a)]内取得的阶跃响应的平均值 l_R ,该时段为 $0.5t_{\min}$ 至 $2t_{\max}$ 。

注:一个测量系统可以具有一个以上的基准水平。例如,由于响应水平(见 3.5.4 和图 C.1)的变化,对不同的波形可具有不同的刻度因数。

C.2.2

阶跃响应原点 origin of a step response

O_1

响应曲线在(单位)阶跃响应[见图 C.1a)]的零电平处的噪声幅值之上的首次开始单调上升的瞬间。

注1:某些情况下,单位阶跃响应起始部分有畸变(见图 C.2),原点 O_1 确定为由阶跃响应单调上升部分向下延伸线与零线的交点。起始畸变部分可由参数 T_0 (称为起始畸变时间)来表征,它是零线与阶跃响应至 O_1 之间的部分区域。

注2:所有时间值(T_0 除外)均从原点 O_1 开始测量。

C.2.3

单位阶跃响应 unit step response

$g(t)$

以基准水平为单位值和零电平为零[图 C.1a)],经归一化后的阶跃响应。

注:对每一个基准水平,测量系统就有一个单位阶跃响应。阶跃响应的原点 O_1 同单位阶跃响应的原点相同。

C.2.4

阶跃响应积分 step response integral

$T(t)$

1 减去单位阶跃响应 $g(t)$ 的差从 O_1 至 t 的积分[图 C.1b)]。

$$T(t) = \int_{O_1}^t [1 - g(\tau)] d\tau \quad \dots\dots\dots (C.1)$$

C.2.5

实验响应时间 experimental response time

T_N

在 $2t_{\max}$ 时刻阶跃响应的积分值。

$$T_N = T(2t_{\max}) \quad \text{..... (C. 2)}$$

C. 2. 6

部分响应时间 partial response time

T_a

在 $t \leq 2t_{\max}$ 内的阶跃响应积分的最大值[见图 C. 1b)], 它等于图 C. 1a) 中的阴影区域。

注: 通常, $T_a = T(t_1)$, 这里 t_1 是 $g(t)$ 首次到达单位幅值的时间[图 C. 1a)]。

C. 2. 7

剩余响应时间 residual response time

$T_R(t_i)$

在某一特定的时间 t_i ($t_i \leq 2t_{\max}$) 实验响应时间 T_N 减去阶跃响应的积分值。

$$T_R(t_i) = T_N - T(t_i) \quad \text{..... (C. 3)}$$

C. 2. 8

单位阶跃响应的过冲 overshoot of the unit step response

β_{rs}

$g_{\max}(t)$ 的最大值减去 1 的百分数(图 C. 1a):

$$\beta_{rs} = 100\% (g_{\max}(t) - 1) \quad \text{..... (C. 4)}$$

C. 2. 9

稳定时间 settling time

t_s

使剩余响应时间 $T_R(t)$ 达到且保持小于 $2\%t$ 的最短时间, 即:

$$|T_N - T(t)| < 0.02 t \quad \text{..... (C. 5)}$$

t 的所有值应在 O_1 至被测冲击电压最长半峰值时间 $T_{2\max}$ 的时间段内[图 C. 1b)]。

C. 2. 10

参考电平时段(仅对冲击电压) reference level epoch

确定阶跃响应的参考电平时段, 其下限等于 0.5 倍的标称时段的下限值 ($0.5t_{\text{nom}}$), 其上限等于 2 倍的标称时段的上限值 ($2t_{\max}$)。

C. 3 阶跃响应测量回路

应在性能记录中说明测量阶跃响应所采用的回路布置, 并应尽可能的接近实际使用条件。

图 C. 3 给出了合适的回路, 优选的回路为图 C. 3a)。在回路中, 阶跃波发生器放置在金属墙上或放置在宽度至少为 1 m 的金属导体板上, 该金属导体板用做地回路。

为产生阶跃波, 可用一缓慢上升的脉冲或直流电压施加到测量系统上, 然后用继电器或间隙截断[图 C. 3d)], 可采用下述截断方法:

- 利用汞润触点继电器, 提供达几百伏的阶跃波。
- 利用大气压下的最大至几毫米均匀场空气间隙, 提供达几千伏的阶跃波。
- 利用增加气压下的、最大至几毫米的均匀场间隙, 提供达几十千伏的阶跃波。

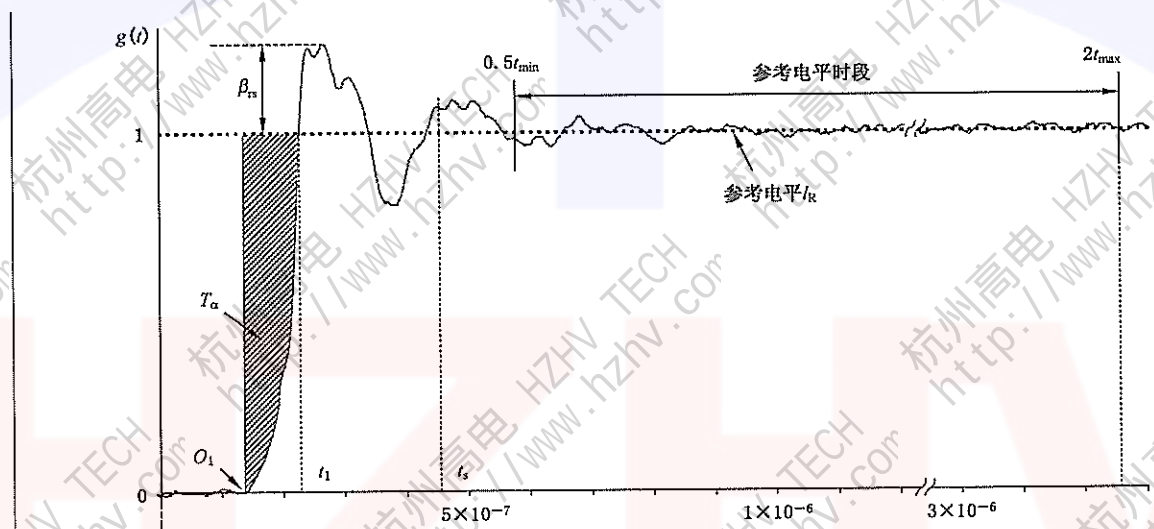
当使用重复式的发生器产生阶跃波时, 应对阶跃波的持续时间和阶跃波之间的间隔时间进行选择, 以期不产生和单次脉冲有关的附加误差。

C. 4 对组件阶跃响应的要求

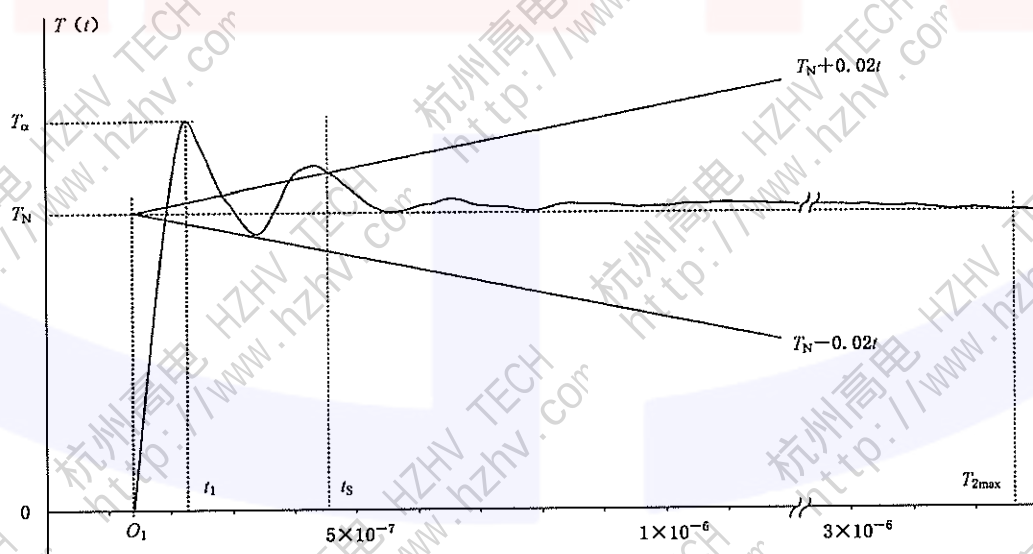
对组件(通常为一个转换装置或一个记录测量仪器)施加一个阶跃电压, 测量其输出, 所施加的阶跃

的上升时间应小于部分响应时间 T_p 的 $1/5$ 。建议对阶跃响应的记录数据进行适当的平滑处理,以减小叠加在阶跃响应上的小的振荡和噪声的影响。

在选定的参考电平时段内的单位阶跃响应与单位值的偏离应不大于 $\pm 2\%$ 。如果用于标定刻度因数测量的相应电压波形的时间 t_i 落在标称时段之外,则在 t_i 处的单位阶跃响应与参考电平的偏离也不应大于 $\pm 1\%$ 。当用雷电冲击电压全波来确定标定刻度因数时, $t_i = 2T_1$, 也就是说冲击电压波前时间的两倍;当用波前截断的冲击确定标定刻度因数时, $t_i = 2T_c$; 也就是说冲击截断时间的两倍;当用操作冲击确定标定刻度因数时, $t_i = T_p$, 即为冲击的到达峰值的时间;当用直流电压确定标定刻度因数时, $t_i = 100 \text{ ms}$;当用交流电压确定标定刻度因数时, $t_i = 1/4$ 电压周期。对冲击电压标准测量系统阶跃响应的要求,见 10.2.3。



a) 单位阶跃响应 $g(t)$ 的有关定义⁴⁾



b) 阶跃响应积分 $T(t)$ 的有关定义

图 C.1 响应参数的定义

4) 采标说明:IEC 图中时间参数符号有误,这里已作修改。

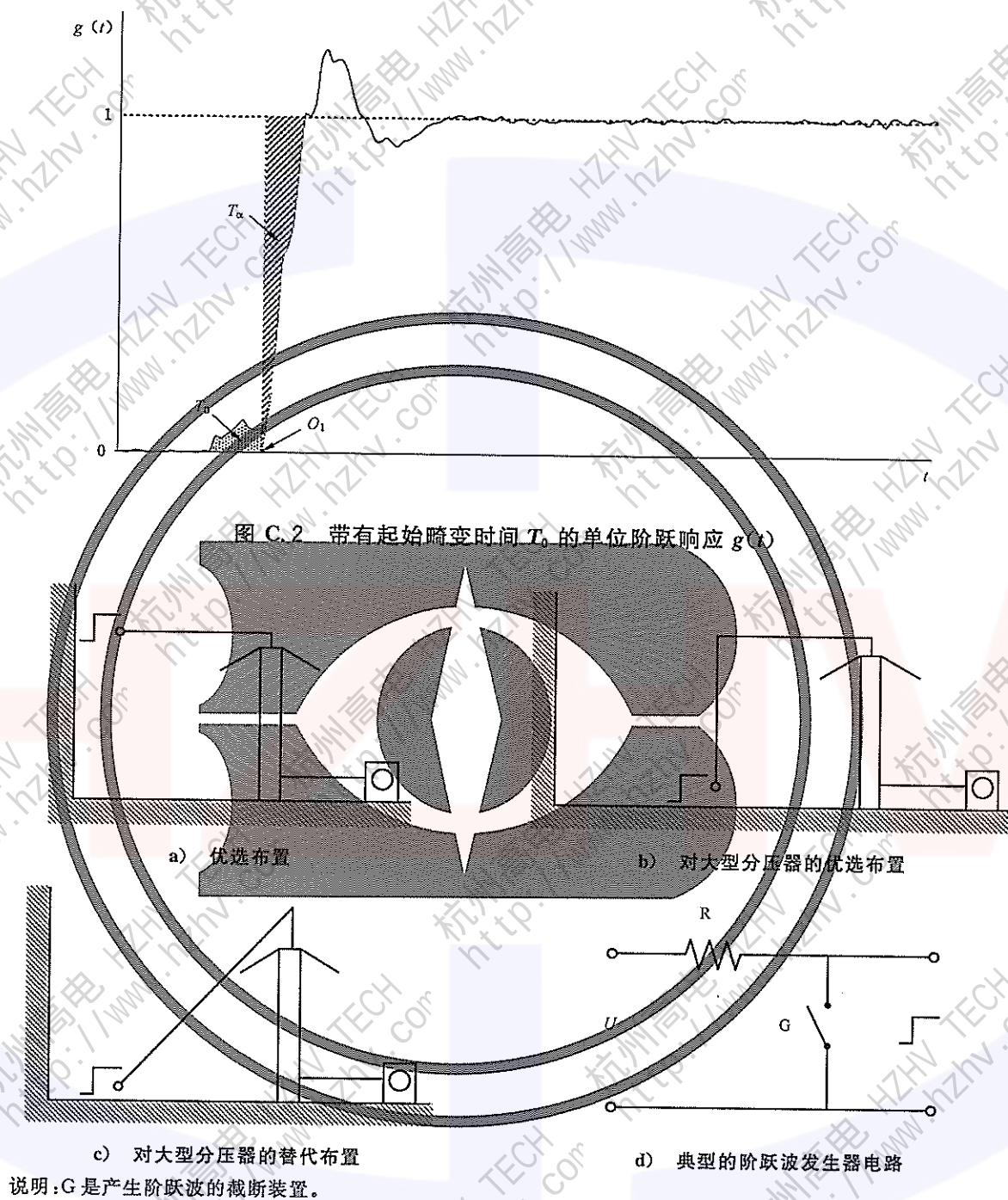


图 C.3 阶跃响应测量的适用电路

附录 D (资料性附录)

用阶跃响应测量确定动态特性的卷积法

D.1 概述

卷积法通常用于由冲击电压分压器、数字记录仪或一个完整的冲击电压测量系统的阶跃响应来确定它们的动态性能的场合。

卷积法是利用测量系统的阶跃响应从其输入冲击波形来计算其输出冲击波形,输出波形和输入波形冲击参数之间的误差可用于评定对所测量的特定波形的测量系统的性能。

卷积法假定测量系统的阶跃响应的测量是正确的以及用于计算的输入波形为被测实际冲击波形的典型波形。

D.2 卷积的方法

如果一个冲击电压测量系统的输入冲击电压波形和单位归一化的阶跃响应(附录 C)分别为 $V_{in}(t)$ 和 $g(t)$,则输出电压 $V_{out}(t)$ 可用下面卷积积分公式(D.1)表示:

$$V_{out}(t) = \int_0^t V'_{in}(\tau) g(t-\tau) d\tau \quad \dots\dots\dots (D.1)$$

式中:

t ——时间;

$V'_{in}(t)$ ——输入冲击电压波形 $V_{in}(t)$ 的一阶导数。

如果 $g(t)$ 和 $V_{in}(t)$ 以相同的采样间隔采样,并且 $g(t)$ 和 $V_{in}(t)$ 的采样点数也相同,由此连续卷积积分公式(D.1)可转换为离散卷积总和式(D.2)的形式。

$$V_{out}(i) = \sum_{k=0}^i V'_{in}(k) \cdot g(i-k) \cdot \Delta t \quad i=0, \dots, n-1 \quad \dots\dots\dots (D.2)$$

式中:

$V_{out}(i)$ ——离散输出电压数列;

$V'_{in}(i)$ ——输入电压数组的一阶导数;

$g(i)$ ——单位阶跃响应数列;

n ——输入电压数列采样点数;

Δt ——电压数列和阶跃响应数列的采样间隔。

D.3 进行卷积计算的程序

这个程序是基于公式(D.2)描述的离散卷积积分和,通常用于利用数字冲击波形来辅助计算的计算机,此程序用于估算冲击测量系统的输出和输入冲击参数的误差,这里给出的程序描述了计算的主要步骤,这些步骤是:

- 获取输入冲击波形数组 $V_{in}(i)$, $i=0, \dots, n-1$, 并计算其冲击参数。
- 输入冲击波形的采样率应与单位阶跃响应的采样率相同,且采样点数等于单位阶跃响应的采样点数(见步骤 3),输入波形应为平滑波形,其噪声最高频率已减小至远低于奈奎斯特频率

(冲击数列的采样频率的一半)。平滑的输入波形数列和它的冲击参数可用下列方法之一获得:

- 1) 由冲击的解析表达式(如一双指数函数)产生。该波形的冲击参数既可以由解析表达式获得,也可以由被测冲击测量系统的冲击计算软件求得。
- 2) 已由一精密低通数字滤波器或用一段三次样条拟合算法进行平滑后得到的实际记录波形。波形的冲击参数可由被测冲击测量系统的冲击计算软件求得。
- c) 通过数值计算的方法获得输入冲击波形 $V_{in}(i)$ 的一阶导数 $V'_{in}(i), i=0, \dots, n-1$ 。
- d) 获得单位阶跃响应数组 $g(i), i=0, \dots, m-1, m=n+j, j$ 是所记录的阶跃响应原点 O_1 之前的数据点数。

- 1) 把所测阶跃响应进行归一化后求得单位阶跃响应(附录 C)。为了进行卷积,可把数个阶跃响应记录取平均来获得低噪声的单位阶跃响应,如果公式(D. 2)用于卷积计算且冲击数列 $V_{in}(i)$ 已经平滑,则单位阶跃响应数列 $g(i)$ 的平滑便不太关键了。

- 2) 把阶跃的开始前记录的阶跃响应数列 $s(i)$ 的采样值取平均来获得阶跃响应的零电平 l_0 。

- 3) 把某一时间范围内记录的阶跃响应数列 $s(i)$ 的采样值取平均来获得阶跃响应的基准水平 l_R 。该时间范围是从测量系统需测的最短波前时间至确定转换装置刻度因数是所取频率的等效时间。

用式(D. 3)把阶跃响应数列 $s(i)$ 归一化为临时单位阶跃响应数列 $g_0(i)$ 。

$$g_0(i) = \frac{s(i) - l_0}{l_R - l_0} \quad \dots\dots\dots (D. 3)$$

- 4) 求取阶跃开始前 $g_0(i)$ 数列的采样值的标准偏差来求得零电平处噪声幅度。再反回去从头搜索 $g_0(i)$, 找出大于三倍的标准偏差 d_0 的采样值。把这个采样值的时间标定为 $g_0(i)$ 的原点 O_1 , 并把采样值的下标标为 j 。

- 5) 除去原点前 $g_0(i)$ 的采样值, 由此构建从原点开始的单位阶跃相应 $g(i)$:

$$g(i-j) = g_0(i) \quad i=j, \dots, m+j-1 \quad \dots\dots\dots (D. 4)$$

注: 临时的单位阶跃响应 $g_0(i)$ 的记录有 $m+j$ 个点。除去原点 O_1 之前的 j 个点后, 单位阶跃响应 $g(i-j)$ 有 $n=m$ 个点。

e) 求取输出数列及其冲击参数:

- 1) 在时域或频域用等式(D. 2)计算获取输出冲击波形数列 $V_{out}(i)$ 。
- 2) 用冲击测量系统的冲击计算软件计算 $V_{out}(i)$ 的冲击参数。
- 3) 计算 $V_{out}(i)$ 和 $V_{in}(i)$ 的冲击参数之差作为 $V_{out}(i)$ 的误差。

D. 4 不确定度分量

原则上, 由卷积计算的误差值可用于修正被算的参数, 然而, 这种修正要求具有波形的臆断认识, 也就是说, 除非冲击具有已知的规则形状, 否则修正是不可靠的。不同波形的误差及分散性可用作有关参数测量的合成不确定度的一个分量。不确定度计算应按 JJF 1059 规范进行, 也可参考附录 A 及附录 B 中的示例。

D. 5 冲击参数计算误差的讨论

D. 5.1 峰值误差

单位阶跃响应的单位电平不总是恒定的。因此, 尽管它与峰值电压要求的测量不确定度相比可能较小的, 但是峰值电压的计算误差与卷积数值误差相比往往是较大的。

峰值电压计算的相对误差应等于在输入冲击 $V_{in}(i)$ 的波前时间 T_1 大约 2 倍的时刻 ($2T_1$) 处 $g(i)$ 值与单位 1 之间的相对差值。在峰值电压的计算误差可与单位阶跃响应作比较以验证卷积计算是否正确。

D.5.2 波前时间误差

卷积计算可以揭示出由测量系统性能引起的冲击波形上的改变,因此可揭示出波前时间误差的大小,而阶跃响应本身显示不出这误差。由于阶跃响应较慢结果,输出冲击波前时间变得较长。然而,波前时间也受阶跃响应的过冲和负冲的影响,根据过冲和负冲在阶跃响应上的时间位置,冲击波形的波前部分可能被改变成不同的形状,导致波前时间增加或减少。

D.5.3 半峰值时间误差

半峰值时间 T_2 主要受被算冲击大约 $2T_1$ 时的 $g(i)$ 值和等于 T_2 时 $g(i)$ 值之间的差值的影响,可以用卷积的计算来估算 T_2 误差的大小,而用阶跃响应本身是无法直接求得的。

参 考 文 献

- [1] IEC 60050(300):2001, International Electrotechnical Vocabulary (IEV)—Electrical and electronic measurements and measuring instruments—Part 311: General terms relating to measurements—Part 312: General terms relating to electrical measurements—Part 313 Types of electrical measuring instruments—Part 314: Specific terms according to the type of instrument
- [2] IEC 60050(321):1986, International Electrotechnical Vocabulary (IEV)—Chapter 321, Instrument transformers
- [3] IEC 60051, Direct acting indicating analogue electrical measuring instruments and their accessories
- [4] IEC 60060-3:2004, High-voltage test techniques—Part 3: Definitions and requirements for on site testing
- [5] IEC 60071-1:2006, Insulation co-ordination—Part 1: Definitions, principles and rule
- [6] IEC 60270: High-voltage test techniques—Partial discharge measurements
- [7] IEC 62475:2011 High-current test techniques: Definitions and requirements for test currents and measuring systems
- [8] ISO/IEC 17025:2005, General requirements for the competence of testing and calibration laboratories (Metrology in short; Euromet ISBN 87-988154-1-2)
- [9] JCGM 200:2008, International vocabulary of metrology—Basic and general concepts and associated terms (VIM), <http://www.bipm.org/en/publications/guides>
- [10] J. G. Proakis and D. G. Manolakis, Introduction to Digital Signal Processing, Macmillan Publishing Company, New York, 1988.
- [11] Y. Li, J. Rungis and A. Pfeffer, The Voltage and Time Parameter Measurement Uncertainties of a Large Damped Capacitor Divider due to its Non-ideal Step Response, Proceedings of 15 International Symposium on High Voltage Engineering, Ljubljana, 2007.
-

中 华 人 民 共 和 国
国 家 标 准
高电压试验技术 第2部分:测量系统
GB/T 16927.2—2013

*

中国标准出版社出版发行
北京市朝阳区和平里西街甲2号(100013)
北京市西城区三里河北街16号(100045)
网址 www.spc.net.cn
总编室:(010)64275323 发行中心:(010)51780235
读者服务部:(010)68523946
中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷
各地新华书店经销

*

开本 880×1230 1/16 印张 4 字数 112 千字
2013年7月第一版 2013年7月第一次印刷

*

书号: 155066·1-47292 定价 54.00 元

如有印装差错,由本社发行中心调换
版权专有 侵权必究
举报电话:(010)68510107



GB/T 16927.2—2013

打印日期: 2013年8月20日 F055A