

中华人民共和国国家标准

GB/T 16927.4—2014

高电压和大电流试验技术 第4部分： 试验电流和测量系统的定义和要求

High voltage and high current test techniques—Part 4: Definitions
and requirements for test currents and measuring systems

(IEC 62475:2010, MOD)

2014-05-06 发布

2014-10-28 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	4
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	6
4.1 概述	6
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	7
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	8
5.1 一般要求	8
5.2 校准——刻度因数的确定	9
5.3 线性度试验	12
5.4 动态特性	13
5.5 短时稳定性	13
5.6 长期稳定性	15
5.7 环境温度影响	15
5.8 邻近回路电流影响	15
5.9 软件影响	17
5.10 不确定度计算	17
5.11 时间参数测量的不确定度计算(仅对冲击电流)	18
5.12 干扰试验	20
5.13 耐受试验	22
6 稳态直流电流	22
6.1 适用范围	22
6.2 术语和定义	23

6.3	试验电流	23
6.4	试验电流的测量	23
6.5	纹波幅值的测量	25
6.6	试验程序	26
7	稳态交流电流	26
7.1	适用范围	26
7.2	术语和定义	26
7.3	试验电流	27
7.4	试验电流的测量	27
7.5	试验程序	30
8	短时直流电流	30
8.1	适用范围	30
8.2	术语和定义	30
8.3	试验电流	31
8.4	试验电流的测量	31
8.5	试验程序	33
9	短时交流电流	33
9.1	适用范围	33
9.2	术语和定义	34
9.3	试验电流	35
9.4	试验电流的测量	36
9.5	试验程序	39
10	冲击电流	39
10.1	适用范围	39
10.2	术语和定义	39
10.3	电流试验	42
10.4	试验电流的测量	43
10.5	试验程序	45
11	高压绝缘性能试验中的电流测量	46
11.1	适用范围	46
11.2	试验电流的测量	46
11.3	试验程序	47
12	标准测量系统	47
12.1	概述	47
12.2	标准测量系统的校准周期	48
附录 A (资料性附录)	测量不确定度	49
附录 B (资料性附录)	大电流测量不确定度计算示例	56
附录 C (资料性附录)	阶跃响应测量	85
附录 D (资料性附录)	卷积法确定阶跃响应测量的动态性能	88

附录 E (资料性附录) 对特定波形的参数限值规定	91
附录 F (资料性附录) 电阻元件的温升	93
附录 G (资料性附录) 短时交流电流有效值的确定	94
附录 H (资料性附录) 国标和 IEC 大电流试验示例	102
参考文献	104

前 言

GB/T 16927《高电压和大电流试验技术》分为四个部分：

- 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；
- 第 4 部分：试验电流和测量系统的定义和要求。

本部分为 GB/T 16927 的第 4 部分。

本部分按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本部分使用重新起草法修改采用 IEC 62475:2010《大电流试验技术：试验电流和测量系统的定义和要求》。

本部分与 IEC 62475:2010 的技术性差异及其原因如下：

- 对大电流测量系统不确定度计算示例进行了修订(见附录 B)；
- 按照我国实验室认可测量系统不确定度的计算惯例，收集实验室大电流测量数据，给出短时交流电流测量系统不确定度计算示例和冲击电流测量系统不确定度计算示例(见 B.4 和 B.5)；
- 对于邻近回路电流影响的不确定度评定方法，本部分更正了 IEC 62475:2010 原文中邻近回路电流 B 类标准不确定度分量计算公式的错误(见 5.8)；
- 对于邻近回路电流影响试验的方法，为了使描述更加清晰，试验方法更加合理，本部分将分流器邻近回路电流影响试验描述为图 9(见 5.8、图 9)，将罗哥夫斯基线圈和带铁心电流互感器邻近回路电流影响试验合并描述为图 10(见 5.8、图 10)，删除了 IEC 62475:2010 原文中罗哥夫斯基线圈邻近回路电流影响试验方法；
- 对于短时交流电流试验，本部分依据行业实际情况，增加了相关术语(见 9.2.1、9.2.2、9.2.4、9.2.5、9.2.6)，同时对新增参数提出了容差要求(见 9.3)，并在附录 G 中增加了断路器短路开断电流的确定示例(见 G.9)和限流熔断器开断电流确定示例(见 G.10)。

本部分与 IEC 62475:2010 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。

本部分还做了如下编辑性修改：

- 对图 3 校准不确定度分量中图示公式有误处作相应修改；
- 对图 18 指数型冲击电流波形中图示公式有误处作相应修改；
- 对表 B.4 线性度试验结果中公式有误处作相应修改。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件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归口(SAC/TC 163)。

本部分负责起草单位：中国电力科学研究院、西安高压电器研究院有限责任公司。

本部分参加起草单位：昆明电器科学研究院、机械工业第五(西安)计量测试中心站、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、机械工业高压电器产品质量检验中心(沈阳)、西安西电变压器有限责任公司、沈阳变压器研究院股份有限公司、清华大学、西安西开高压电气股份公司、新东北电气集团高压开关有限公司、平高集团有限公司、深圳电气科学研究所、北京华天机电研究所有限公司、苏州华电电气股份有限公司、四川电力科学研究院、陕西电力科学研究院、湖北省电力公司、湖南省电力公司。

GB/T 16927.4—2014

本部分主要起草人：雷民、崔东、李前、任稳柱、王安、田恩文、袁渊、杨春燕、危鹏、王建生、赵伟、王亭、李鹤。

本部分参加起草人：周琼芳、杨左、吕建玉、陈奎、周远翔、殷晶辉、张勳、李新春、赵鸿飞、张建新、赵建沛、张东宁、邓永辉、肖敏英、艾晓宇、余青、江波、蒲路、卢军、李喜贵。

高电压和大电流试验技术 第4部分： 试验电流和测量系统的定义和要求

1 范围

GB/T 16927 的本部分规定了以下内容：

- 定义所使用的术语；
- 定义参数和容差；
- 给出大电流测量不确定度的估算方法；
- 规定完整测量系统应满足的要求；
- 给出测量系统的认可方法及其组件的校核方法；
- 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。

本部分适用于高压和低压设备的大电流试验与测量。适用的电流类型包括：稳态直流电流、短时直流电流（如大容量直流试验）、稳态交流电流、短时交流电流（如大容量交流试验）和冲击电流。

大于 100 A 的电流试验均可使用本部分，在这些试验中出现小于 100 A 的电流时可参照本部分。

注：本部分同样适用于故障检测中的电流测量，如雷电冲击试验。

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 1984 高压交流断路器(GB 1984—2003, IEC 62271-100:2001, MOD)

GB/T 7676.2—1998 直接作用模拟指示电测量仪表及其附件 第2部分：电流表和电压表的特殊要求(IEC 60051-2:1984, IDT)

GB/T 16927.1—2011 高电压试验技术 第1部分：一般定义及试验要求(IEC 60060-1:2010, MOD)

JJF 1059.1—2012 测量不确定度评定与表示(ISO/IEC Guide 98-3:2008)

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

3.1.1

测量系统 measuring system

用于进行测量的整套装置。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：大电流测量系统通常包括以下组件：

- 转换装置，包括将装置接入电流回路的端子或与电流回路的耦合连接，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、终端和匹配阻抗或网络）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、载流导体和接地物体的净距,周围有无电场或磁场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,是描述系统和表明系统达到标准所列要求的证明文件。文件中应包含初始性能试验结果和历次性能试验结果,以及性能校核结果和相应性能试验(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(标)准,且具有足够准确度和稳定性的测量系统。在进行特定波形和特定电流范围内的同时比对测量中,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

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

分流器 current-converting shunt

将被测电流按比例转化为电压的电阻器件。

3.2.3

电流互感器 current transformer

包含有变流器的转换装置,在正常使用条件下,其二次电流基本正比于一次电流;在正确的连接方式下,其相位差近似为零。

注: 电流互感器通常设计在单一频率下使用,但也可以通过特殊设计使之适用于宽频率范围。

3.2.4

罗哥夫斯基线圈(Rogowski 线圈) Rogowski coil

无铁心的感应式电流转换装置,基于罗哥夫斯基线圈的测量系统包括积分电路(有源、无源或数字)。

注: 基于罗哥夫斯基线圈的测量系统可适用于宽频范围。

3.2.5

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、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和测量仪器中。

3.2.6

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

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: 对不同的电流测量范围、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(例如电流互感器的变比), 也可以是有量纲的(例如分流器的阻抗)。

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 F **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个标定刻度因数。例如, 该系统在几个测量范围具有不同的刻度因数。

3.4 额定值

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

额定电流 **rated current**

测量系统可适用的具有规定频率或波形下的最大电流水平。

注: 额定工作电流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流范围, 在此范围内测量系统满足本部分规定的的不确定度要求。

注1: 标定测量范围的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: 测量系统可含有多个标定测量范围, 对应有不同的刻度因数。

3.4.4

标定工作时间 **assigned operating time**

对直流或交流电流, 在满足本部分规定的的不确定度要求前提下, 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**

在满足本部分规定的的不确定度要求的前提下, 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流或短时电流的最大次数。

注：该次数通常以每分钟施加的次数以及数分钟或数小时的时间间隔来表示。

3.5 有关动态特性的定义

3.5.1

测量系统的响应 **response of a measuring system**

G

系统输入端施加规定电流条件下,其输出与时间或频率的关系。

3.5.2

幅-频响应 **amplitude-frequency response**

$G(f)$

输入为正弦波条件下,测量系统的输出和输入之比与频率 f 的关系(见图 1)。

3.5.3

限值频率 **limit frequencies**

f_1 和 f_2

幅-频响应曲线上的一段近似恒定范围的下限和上限。

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(见图 1)。

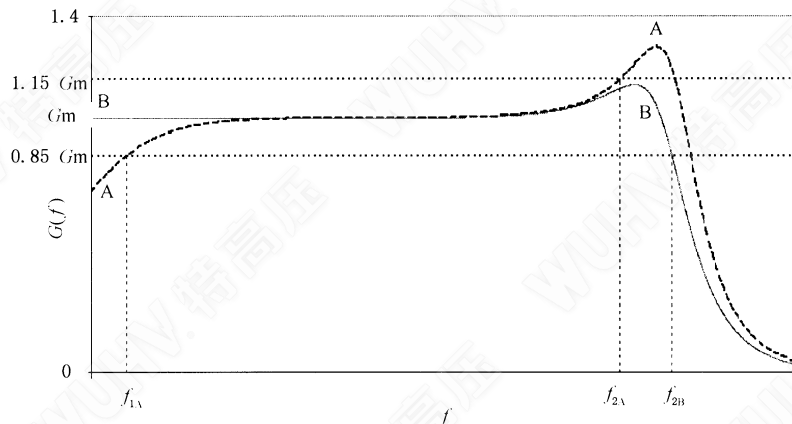
3.5.4

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：有关阶跃响应和阶跃响应参数的详细信息见附录 C。



注：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

3.6 有关不确定度的定义

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的不确定度。

注 2: 测得的试验电流应在规定试验电流的给定容差范围内。

3.6.2

(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: 电流测量的不确定度不应与规定试验电流的容差相混淆。

注 3: 更多信息见附录 A 和附录 B。

3.6.3

标准不确定度 **standard uncertainty**

u

以标准偏差表示的测量不确定度。

注 1: 标准偏差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。

3.6.4

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。

3.6.5

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: 扩展不确定度非常接近本部分较早版本中的“总不确定度”。

3.6.6

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%覆盖的概率和正态(高斯)概率分布,包含因子约为 $k = 2$ 。

3.6.7

误差 **error**

被测量值与参考量值之差。

3.6.8

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。

3.6.9

(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。

3.6.10

(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。

3.6.11

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计量标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

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。

注 1: 此术语基于不确定度方法。

注 2: 原则上,指示值与测量的关系结果可通过校准标定图表示。

注 3: 校准包括刻度因数的确定。

3.7.2

型式试验 **type test**

对于同一型号规格的测量系统或测量装置,在一个或多个样机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。

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在对拟测量试验电流进行测量,并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标准或国际标准。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。

对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保持稳定,以确保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级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(标)准。使用者应保证每次自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的。

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(标)准。

4.2 性能试验周期

为保持测量系统的特性,应参照 5.2 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：加长性能试验的周期,会加重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。

性能记录至少应包括以下信息:

- 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数据和功能组成,比如,额定工作电流、波形、净距范围、工作时间、或电流最大施加次数。对许多测量系统而言传输系统以及返回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

对本部分发布前制造的测量系统或组件,所要求的某些型式试验和例行试验证明文件可能无法获得(例如 5.7,5.13)。按较早版本的标准进行性能试验和性能校核,若刻度因数是稳定的,就认为已满足要求,但这些早期校核记录结果也应录入性能记录中。

对由几个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,每一转换装置应单独记录,而传输系统和测量仪器可综合记录。

4.5 工作条件

电流测量系统的分流器或电流互感器应与试品相串联,连接应使阻抗达到最小。载流导体的轴线部分应位于罗哥夫斯基线圈电流测量系统的中心。载流体的轴线应与线圈所在平面垂直,以减小测量

系统对外磁场的敏感度。

注 1: 载流导体在距罗哥夫斯基线圈一定距离范围内出现载流导体 90° 拐角, 研究表明, 此距离大于罗哥夫斯基线圈半径的 2 倍时, 其影响可忽略。

注 2: 杂散耦合还需进一步研究。

在工作和环境条件范围内, 测量系统的不确定度应当在本部分所规定的范围内。

对交、直流电流应规定测量系统的标定工作时间。

注 3: 推荐最短标定工作时间为 1 h。

对短时电流或冲击电流应规定最大施加频次。

注 4: 推荐最大施加频次的最小值为 2 次/min。

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 1059.1—2012 规范进行评定。

评定不确定度的程序可按 JJF 1059.1—2012 规范以及本部分给出的方法进行, 这些程序对大电流试验中常用的仪表设备和测量布置已满足要求了。但是, 使用者也可从 JJF 1059.1—2012 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, 冲击电流脉冲的时间参数及其误差。

注 1: 对特殊的转换装置其他测量是常用的。例如, 分流器是由阻值和它使用范围内的不确定度表征, 电流互感器则由变比误差、相位差和相应的不确定度加以表征。

依据 JJF 1059.1—2012, 测量的不确定度由 A 类和 B 类(见附录 A)合成不确定度确定。不确定度分量应从测量结果、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, 影响因素包括温度影响和邻近效应; 其他的影响因素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。

实际电流试验期间, 除了校准证书中所提供的刻度因数的校准不确定度, 通常需要考虑额外的影响因素, 以获得试验电流值的测量不确定度。

第 5 章及附录 A 和附录 B 中给出了确定需要考虑的测量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, 包含因子 $k=2$ 。

注 3: 本部分中, 刻度因数的不确定度和电流测量的不确定度(见 5.2~5.10)是用相对不确定度来表示的, 而不是 JJF 1059.1—2012 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 1059.1—2012 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, 以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、短时交流和短时直流测量系统, 性能试验还应表明其动态性能能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。

在大电流试验中, 因为设备的尺寸和实际电流水平以及试验和试验回路之间的相互影响, 校准应尽量在使用者实验室进行。

测量系统或其组件也可送到其他实验室按其工作条件布置模拟实际情况进行校准, 前提是干扰适

验(如果规定)应在使用者实验室进行。模拟试验布置应反映工作条件并在性能试验上记录。

如果转换装置(和/或其他测量系统的部件)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。

应当在每一个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。但是在大电流情况下不一定能找到相当的大电流标准测量系统,比对校准可在5%标定测量范围内进行,前提是已证明测量系统从该电流至标定测量电流范围最高值是线性的。在5.3中给出了一种线性度测量方法。

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(标)准的校准。

注:由国家计量机构或认可的校准实验室进行并在其认可范围内出具报告的校准可以认为已溯源到国家和/或国际基(标)准。

对认可测量系统的校准结果有影响的重要条件应包含在性能记录中。

5.2 校准——刻度因数的确定

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。

用于校准的输入电流应与被测电流具有相同类型、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,应与被校测量系统串联连接。应采取措施避免转换装置和测量仪器间的接地环路造成不可接受的影响。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在电流水平 I_k 下测量的刻度因数 $F_{i,k}$ 值。重复该测量 n 次,求取被校测量系统在某一电流水平 I_k 下的刻度因数的算术平均值 \bar{F}_k ,由式(1)给出:

$$\bar{F}_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_{i,k} \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中:

$F_{i,k}$ 的相对实验标准偏差 s_k 由式(2)给出:

$$s_k = \frac{1}{\bar{F}_k} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (F_{i,k} - \bar{F}_k)^2} \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中:

算术平均值 \bar{F}_k 的 A 类相对标准不确定度 u_k 由式(3)求得:

$$u_k = \frac{s_k}{\sqrt{n}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

注1:观测数 n 应不少于10次,即 $n \geq 10$,按照附录 A 来估算。

注2:对交、直流电流的测量,独立读数可通过施加试验电流读取 n 个读数或施加 n 次电流每次读取读数来求得。

对冲击电流则是施加 n 个冲击。

有多个标定测量范围的测量系统应当对每个范围进行校准。带有二次衰减器的测量系统,可仅在一个设置上校准,前提是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。这种情况下,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两种方法之一确定。

5.2.1.2 全部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,应根据 5.2.1.1,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比对来确定刻度因数,同时还应在至少 3 个近乎相等间隔的中间值下进行比对(见图 2)。不需再进行线性度试验。标定刻度因数 F 即为 h 个电流水平下记录到的所有刻度因数 \bar{F}_k 的平均值,由式(4)给出,即:

$$F = \frac{1}{h} \sum_{k=1}^h \bar{F}_k \quad \text{其中 } h \geq 5 \quad \dots\dots\dots(4)$$

式中:

h —— 电流水平;

\bar{F}_k —— 某一电流水平 I_k 下的刻度因数的算术平均值。

标定刻度因数 F 的标准不确定度 u_F 由 u_{B1} 、 u_{B2} 两个 B 类分量组成。 u_{B1} 表征平均刻度因数 \bar{F}_k 的非线性度。 u_{B2} 为 h 个电流水平试验得到的 A 类标准不确定度 u_k 的最大值。

$$u_F = \sqrt{u_{B1}^2 + u_{B2}^2} = \sqrt{\frac{1}{3} \left(\max_{k=1}^h \left| \frac{\bar{F}_k}{F} - 1 \right| \right)^2 + \left(\max_{k=1}^h (u_k) \right)^2} \quad \dots\dots\dots(5)$$

注 1: 因为数据不是在相同的条件下获得的,尤其考虑到不同的电流水平,刻度因数 F_k 的 h 个测量结果不能构成一个统计系统。所以不可能通过统计方式(即 A 类)获得标定刻度因数的不确定度,而是采用基于两个分量的 B 类估计方法获得。在不同电流水平下得到的 F_k 的分布可作为一种矩形概率分布,用与平均值的最大偏差来评估。在每一个电流水平下测得的单个 F_k 结果的统计学 A 类分量,则作为正态分布,通过单个 u_k 的最大值来进行评估(见图 3)。

注 2: 如果在评估刻度因数 F_0 的扩展不确定度时, F_0 和 F 的差值是 B 类不确定度的一个分量,则可将 F_0 的化整值作为标定刻度因数。

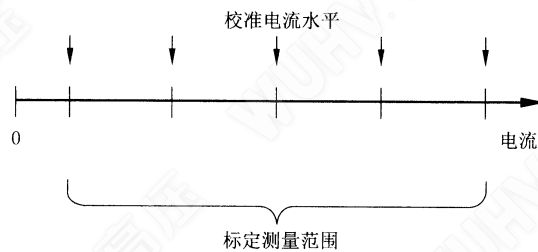


图 2 全电流范围内比对的校准

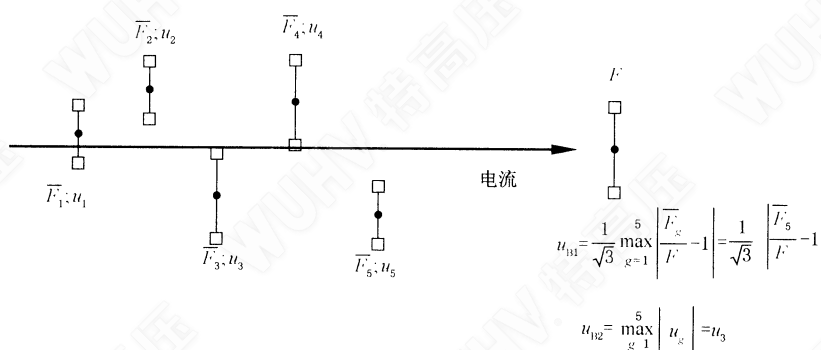


图 3 校准的不确定度分量(最少取 5 个电流水平的示例)

5.2.1.3 有限电流范围内比对

在标定测量范围超过标准测量系统测量范围情况下,应根据 5.2.1.1 比对至标准测量系统的最高电流水平,且应保证比对电流不低于标定测量范围的 5%(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 $a \geq 2$ 个电流水平下进行,最高电流水平等于标准测量系统的最高电流值。所需的线性度试验在 b 个电流水平下进行,其中一个电流水平应等于比对试验的最高电流水平(见 5.3)。所选取的电流水平至少包括标定测量范围的最大值和最小值,而且有:

$$\begin{aligned} a &\geq 2 \\ a + b &\geq 6 \end{aligned}$$

其中,线性度测量值 b 在 5.3 中给出。

标定刻度因数 F 即为按照 5.2.1 与标准测量系统进行比对得到的 a 个刻度因数的平均值:

$$F = \frac{1}{a} \sum_{k=1}^a \bar{F}_k \quad \dots\dots\dots (6)$$

标定刻度因数 F 的标准不确定度 u_F 由两个 B 类分量组成,一个表征平均刻度因数 \bar{F}_k 的非线性度,另一个为 a 个电流水平试验得到的 A 类标准不确定度 u_k 的最大值,具体为:

$$u_F = \sqrt{\frac{1}{3} \left(\max_{k=1}^a \left| \frac{\bar{F}_k}{F} - 1 \right| \right)^2 + \left[\max_{k=1}^a (u_k) \right]^2} \quad \dots\dots\dots (7)$$

如果在评估刻度因数 F_0 的扩展不确定度时, F_0 和 \bar{F}_k 的差值是 B 类不确定度的一个分量,则可将 F_0 的化整值作为标定刻度因数。

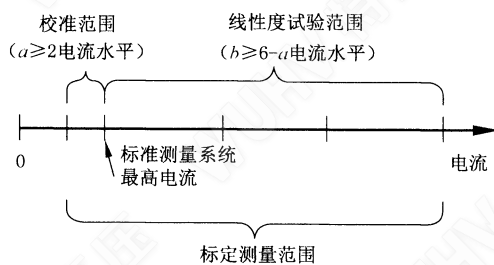


图 4 通过有限电流范围以上部分的线性度试验(见 5.3),将校准扩展至标定测试范围的最大值

5.2.2 由测量系统组件的刻度因数确定测量系统的刻度因数

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。对仅以电缆组成的传输系统,不要求单独进行试验。

测量仪器的刻度因数的确定是依据相关标准(见第 2 章)或实施校准来证明由仪器测量的量具有溯源性。

注 1: 根据 GB/T 7676.2—1998,模拟设备规定的准确度是与基准值相关的,即它是一个由设备测量范围上限的百分比数值表征的不确定度。在测量范围低端,相对误差相应会较大。

组件刻度因数可通过以下方法之一进行确定:

- 同步测量其输入输出量;
- 与标准组件比对(例如,分流器与标准分流器比对);
- 电桥法;

——基于阻抗测量值的计算；

——刻度因数的动态特性可用卷积方法(见附录 D)从阶跃响应的稳态分量(见附录 C)得到。

注 2: 应当采取措施确保测量中考虑包括了耦合的影响以及组件间的相互影响。

分流器的刻度因数可由直流测试给出,在直流测试之前应先单独测试其动态特性。

对测量系统的每一组件,应估算 A 类和 B 类不确定度分量(5.3~5.9),对每个组件都有效的合成不确定度根据 5.10 给出。确定合成不确定度时,应考虑校准使用的所有测量装置的不确定度分量。

注 3: 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进行,如电流、温度、邻近效应对结果的影响,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 1059.1—2012 规范(见附录 A 和附录 B),通过将各组件合成不确定度的组合来求取测量的扩展不确定度。转换装置、除电缆外的传输系统和测量仪器应依据 5.3~5.9 进行有关不确定度估算的进一步试验。

对时间参数测量不确定度的估算应按 5.11 进行,与估算电流测量不确定度的原则相同。

5.3 线性度试验

5.3.1 应用

线性度试验仅是为了扩展依据 5.2.1.3 进行校准得到的标定刻度因数的有效范围,即扩展至标定测量范围的最高限值,一般情况下等于测量系统的额定电流(见图 4)。

一些类型的转换装置,如分流器,其线性度在寿命期限内原则上不会出现变化,对于这类装置需进行初始线性度试验,后续的线性度试验可以被先进的科学证明替代,证明其线性度不受可预见的使用过程中影响。

测量系统的输出应与线性度已被认可的或至少根据其原理可推测其在线性度试验全电流范围是线性的比对装置(如 Rogowski 线圈)或系统进行比对。使用该方法得到的线性度不满足要求的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流值范围中给出 b 个不同电流范围内测量系统与比对装置或系统的读数之比值 R (见图 4)。

线性度的评估是基于 b 个测量电流和对应比对装置电流之比值 $R_{i,k}$ 和平均值 R_k 的最大偏差。最大偏差作为与在扩展电流范围下刻度因数非线性有关的标准不确定度 u_{lin} 的 B 类评估(见图 5):

$$u_{lin} = \frac{1}{\sqrt{3}} \max_{k=1}^b \left| \frac{R_{i,k}}{R_k} - 1 \right| \dots\dots\dots (8)$$

5.3.2 替代方法(以下方法按适用性排序)

5.3.2.1 与认可测量系统的比对

依据 5.3.1 所述程序,用认可测量系统的输出校核测量系统的输出。

认可测量系统的线性度应按 5.2.1 给出的方法予以校准。

5.3.2.2 评估分流器的温升

分流器流过冲击或短时电流时,电阻元件的温升会引起刻度因数的明显变化。可用电阻元件的温度系数计算确定温升效应对线性度的影响程度及其与电流的关系(见附录 F)。

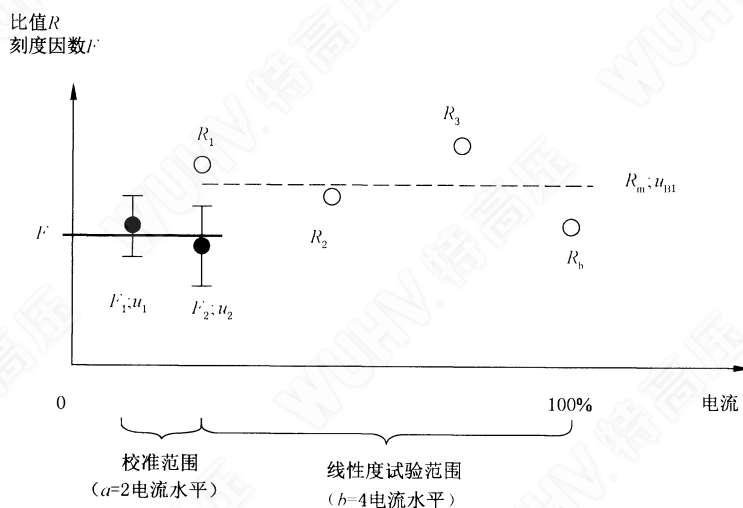


图 5 用线性装置在扩展电流范围内进行测量系统的线性度试验

5.3.2.3 与罗哥夫斯基线圈比对

固定位置的刚性的罗哥夫斯基线圈的输出原则上是线性的,可依据 5.3.1 中所述的程序进行线性度试验。

5.4 动态特性

一个组件或测量系统的刻度因数的动态响应会受各种因素影响,取决于所测电流的类型以及测量条件。对相关电流的进一步要求有详细的条款说明。

有关动态特性的 B 类相对标准不确定度 u_{dyn} 的估算由式(9)给出:

$$u_{dyn} = \frac{1}{\sqrt{3}} \max_{i=1}^k \left| \frac{F_i}{\bar{F}} - 1 \right| \quad \dots\dots\dots (9)$$

式中:

K —— 在一个频率范围内或一个冲击参数范围内测得的刻度因数值的次数;

F_i —— 单独的刻度因数;

\bar{F} —— 一个频率范围内或一个冲击时间参数范围内刻度因数的平均值。

有一些类型的转换装置在装置的寿命期限内原则上未出现动态性能变化现象,对于这类装置需进行初始动态性能试验,后续动态性能试验则可能被装置的动态性能不受可预见的使用过程影响的科学证明取代。

5.5 短时稳定性

5.5.1 方法

短时稳定性试验是为考核转换装置自热效应的影响。

转换装置上应持续施加标定测量范围的最大电流(对冲击则以标定最大施加次数),施加时间应与预期使用时间相适应。

注: 电流施加时间不应长于标定使用时间,但应足够其达到正常使用工况下的热平衡状态。

刻度因数应在施加电流的最初及最后时刻测量,若为一组脉冲试验,则在一组脉冲开始时和结束时测量。刻度因数的测量应与被认可测量系统进行比对或采用其他合适的方法。如果选择其他方法,测

试刻度因数时可能需将转换装置从测试回路中卸下,此时应在电流或冲击施加后尽快测量,以确保刻度因数未发生明显变化,推荐最大时间为 20 min。

试验结果是在电流施加时间内刻度因数变化的一个估算值,其 B 类标准不确定度分量为:

$$u_{st} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left| \frac{F_{after}}{F_{before}} - 1 \right| \dots\dots\dots (10)$$

式中:

F_{before} 、 F_{after} ——短时稳定性试验前、后的刻度因数。

5.5.2 稳态电流

刻度因数应在施加电流之前或开始时测量,转换装置上应施加额定电流直至达到热平衡,在施加电流结束时刻(或之后),应再次测量刻度因数(见图 6)。

在某些情况下,应允许一定时间重新连接转换装置。这一时间不能超过转换装置热时间常数的 20%,且在任何情况下均不能超过 20 min。

另一种方法是在试验时测量分流器中阻性器件的温度,此时可用两种方法得到电流施加结束时刻的刻度因数,一是人工加热分流器同时进行直接测量;二是记录冷却过程中的刻度因数,将温度曲线外推至施加电流的最后瞬间。

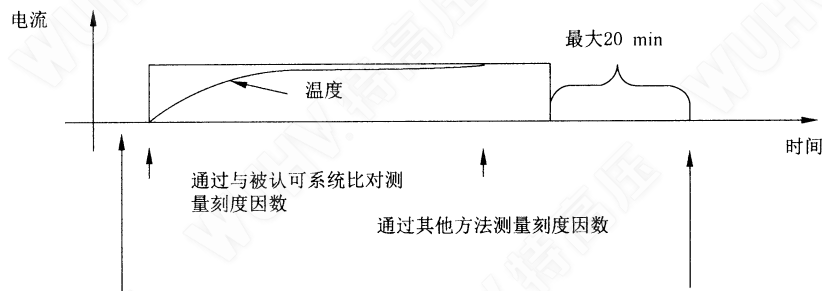


图 6 稳态电流的短时稳定性试验

5.5.3 冲击电流和短时电流

刻度因数应在施加电流的瞬间或者之前,以及施加电流的最后瞬间或之后立即进行测量。转换装置上应加额定电流(见图 7)。

另外,刻度因数应在下一次脉冲施加之前或施加瞬间进行测量,以证明两脉冲之间的时间足以让刻度因数回到初始值。

注:在短时直流或交流情况下,在施加单次电流前后对刻度因数进行测量是评估短时稳定性的合适方法。

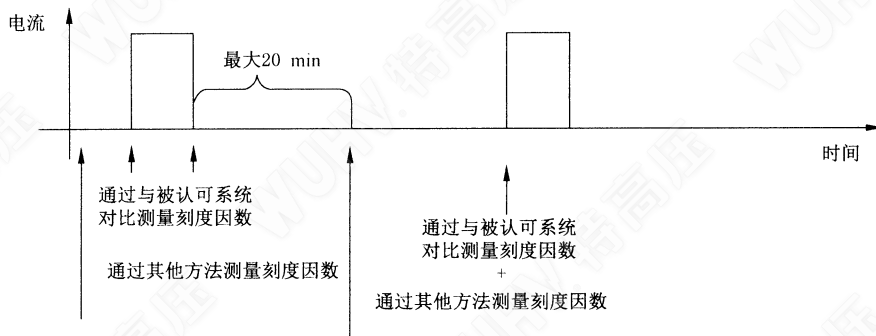


图 7 脉冲电流和短时电流的短时稳定性试验

5.5.4 周期脉冲电流和周期短时电流

刻度因数应在施加一系列电流脉冲或者短时电流之前或施加瞬间测量,以及在施加电流最后时刻或之后立即测量(见图 8),转换装置上应施加额定电流。

另外,刻度因数应在下一组脉冲施加之前或施加瞬间进行测量,以证明两组脉冲之间的时间足以让刻度因数回到初始值。

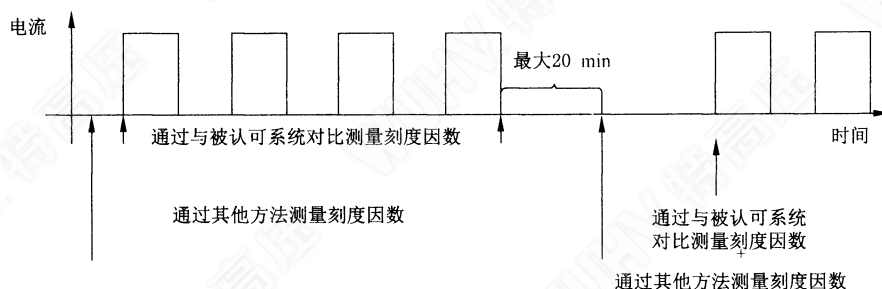


图 8 周期脉冲电流和周期短时电流的短时稳定性试验

5.6 长期稳定性

应对长时间内刻度因数的稳定性进行考虑和评定。通常评估为一个不确定度分量,在预定使用时间段 T_{use} (一般至下一次校准)内有效的。评定可以是基于制造商的数据或是一系列性能试验的结果。评定的结果是刻度因数变化的一个估算值。刻度因数的变化评估为一个 B 类标准不确定度分量 u_{lt} :

$$u_{lt} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left| \frac{F_2}{F_1} - 1 \right| \cdot \frac{T_{use}}{T_2 - T_1} \dots\dots\dots (11)$$

式中:

F_1, F_2 —— 在时间 T_1, T_2 进行的两个连续的性能试验中测得的刻度因数。

在可得到许多性能试验结果的情况下,长期稳定性可由 A 类分量来表征:

$$u_{lt} = \frac{T_{use}}{T_{interval}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{F_i}{\bar{F}} - 1 \right)^2}{n-1}} \dots\dots\dots (12)$$

式中:

F_i —— 平均时间间隔为 $T_{interval}$ 的多个重复性能试验测得的刻度因数;

\bar{F} —— F_i 的平均值。

5.7 环境温度影响

设备的刻度因数或者某一参数(例如:电阻或互感器比率误差)由于环境温度的改变而引起的变化可以通过使用单一组件的温度系数计算得到(见附录 F),或者通过在不同温度下测量单一组件得到。

环境温度的影响也可以通过对不同环境温度下刻度因数的测定来量化。

数据和计算的资料应存入性能记录中,这些资料可以从制造商提供的数据中获得。

试验和计算的结果是对环境温度变化引起的刻度因数变化的一种估算,由 B 类标准不确定度分量 u_{temp} 给出:

$$u_{temp} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times \max \left| \frac{F_{T_i}}{F_{cal}} - 1 \right| \dots\dots\dots (13)$$

式中：

F_{Ti} ——特定温度条件下的刻度因数；

F_{cal} ——校准温度条件下的刻度因数。

注：自热效应包含在短时稳定性试验中。

当环境温度在一个很宽的范围内变化时，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_{temp} 作为不确定度分量。

5.8 邻近回路电流影响

邻近大电流回路的互感效应(例如：在三相测试电路中)引起的干扰对电流测量结果的影响，可在电流转换装置与可能引起干扰的电路的间距为典型值的条件下，通过测量确定。试验时，接地应该与常规试验条件时相同。

试验时，在邻近电路中流过某一合适的电流，电流转换装置中不通过电流，同时读取被测测量系统和邻近回路电流的读数(见图 9 和图 10)。

试验结果是邻近回路电流对测量结果影响的一个估算值，以 B 类标准不确定度分量 u_{prox} 给出：

$$u_{prox} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left| \frac{i_{prox}}{i_{nearby}} \right| \dots\dots\dots (14)$$

式中：

i_{prox} ——被测测量系统的(干扰)电流读数；

i_{nearby} ——施加到邻近导体中的电流。

在多相试验电路中，为了确定邻近回路电流的影响，假设邻近导体承载的电流近似等于实际大电流试验中施加在被测测量系统转换装置上的电流。不确定度分量 u_{prox} 对于不同的距离可能会有所变化。

注 1：一些试验场所可能只选择在单组距离或几组距离或某些距离范围下认可其测量系统。

注 2：转换装置的邻近回路电流的影响试验应该对每一件装置或每一组装置都进行一次。

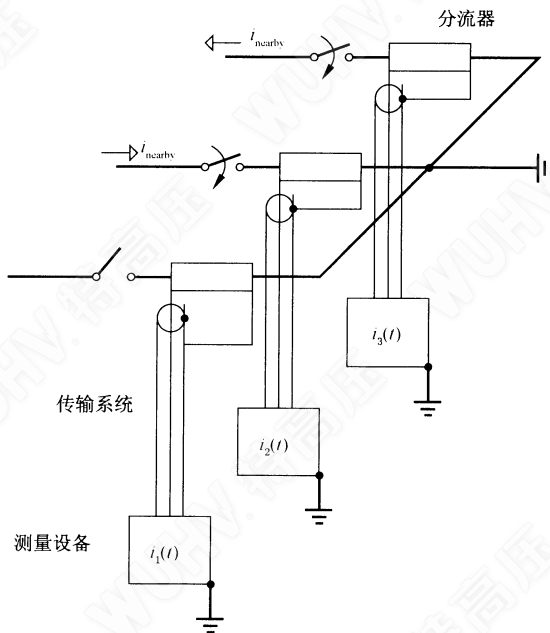


图 9 分流器的邻近回路电流影响试验电路

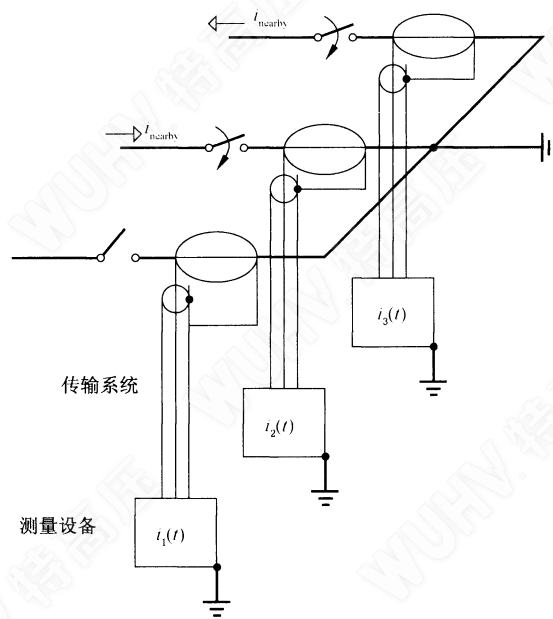


图 10 无铁心感应测量系统(罗哥夫斯基线圈)和带铁心电流互感器的邻近回路电流影响试验电路

5.9 软件影响

若测量数据是由软件处理的,则必须评定因软件处理产生的不确定度。这可以通过评定一套由试验数据发生器产生的数据并与数据的基准值相比较来进行。

评定结果是数据处理对刻度因数影响的一个估算,由此获得一 B 类相对标准不确定度分量 u_{soft} 。

5.10 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况下予以验证。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具有矩形分布;
- c) 最大的 3 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其他延伸条件下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 U_{mes} 的扩展不确定度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 中讨论的其他量的影响估算求得,例如:测量系统的稳定性、测量过程中的环境参数等。

评估不确定度的其他方法在 JJF 1059.1—2012 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

刻度因数的校准扩展不确定度 U_{cal} 是由标准测量系统的不确定度和在本条款中阐述的 A 类和 B 类不确定度计算而来的:

$$U_{\text{cal}} = k \cdot u_{\text{ccal}} = 2 \sqrt{u_{\text{cref}}^2 + u_F^2 + \sum_{i=1}^N u_{\text{B}i}^2} \dots\dots\dots (15)$$

式中：

- k ——包含因子,对应于约 95% 的覆盖概率,且为正态分布。 $k=2$;
- u_{ccal} ——认可测量系统在其校准时的刻度因数的合成不确定度;
- u_{cref} ——标准测量系统在其校准时的刻度因数的合成不确定度;
- u_F ——按照 5.2.1 或者 5.2.2,刻度因数中确定的标准不确定度;
- $u_{\text{B}i}$ ——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 类分量给出(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,既可由附加测量确定也可由 5.3~5.9 中的数据源估算确定,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。

在以上假定不成立的情况下,可采用附录 A 和附录 B 给出的程序,当需要时,可采用 JJF 1059.1—2012 规范中给出的程序。

B 类不确定度分量的个数 N 可随试验电流类型的不同而不同(见第 6 章~第 11 章),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,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和环境条件综合考虑(见附录 A 和附录 B)。

5.10.3 使用认可测量系统的测量不确定度

使用者应进行测量的扩展不确定度的估算。然而,可以结合校准证书,在测量条件的一个限定的范围内给出其估算。

测量值的相对扩展测量不确定度 U_{mes} 由认可测量系统在校准中得到的标称刻度因数的合成标准不确定度和本条款阐述的 B 类不确定度分量计算得出：

$$U_{\text{mes}} = k \cdot u_{\text{cmes}} = 2 \sqrt{u_{\text{ccal}}^2 + \sum_{i=1}^N u_{\text{B}i}^2} \dots\dots\dots (16)$$

式中：

- k ——包含因子,对应于约 95% 的覆盖概率,且为正态分布。 $k=2$;
- u_{cmes} ——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_{ccal} ——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;
- $u_{\text{B}i}$ ——由第 i 个影响量引起的认可测量系统合成标准不确定度的分量,以 B 类分量评定。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,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,还应考虑其他影响,如认可测量系统的显示分辨率。

注：校准证书可包含校准不确定度信息 U_{cal} 及在规定条件下使用认可测量系统测量试验电流的相对扩展测量不确定度 U_{mes} 的信息。

在以上假定不成立的情况下,可采用附录 A 给出的程序,当需要时,可采用 JJF 1059.1—2012 规范中给出的程序。

B 类不确定度分量的个数 N 可随试验电流类型的不同而不同(见第 6 章~第 11 章),更多的有关 B 类不确定度分量的信息在相关条款中给出。

5.11 时间参数测量的不确定度计算(仅对冲击电流)

5.11.1 概述

当冲击电流的时间参数在规定的范围内时,冲击电流的认可测量系统应能在规定的 uncertainty 限值内准确测量每一个时间参数。对波前时间,通常是指标称时段(10.2.9)。可通过对比法或组件法来给出试验依据,还可以在阶跃响应试验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,对估算时间参数及其 uncertainty 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。

冲击电流各时间参数的定义在条款 10 中给出。

注:时间参数 uncertainty 估算得出的是绝对 uncertainty 值。

5.11.2 时间参数校准的 uncertainty

应使用被试测量系统(标记为 X)和标准测量系统(标记为 N)同时测量 n 次冲击电流的波前时间 T_1 ,假定标准系统的误差可以忽略,则波前时间的平均误差见式(17):

$$\Delta T_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_{1X,i} - T_{1N,i}) \dots\dots\dots(17)$$

单个波前时间的实验标准偏差见式(18):

$$s(\Delta T_1) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta T_{1,i} - \Delta T_1)^2} \dots\dots\dots(18)$$

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(见 5.2.1.1)。

由 $s(\Delta T_1)$ 可算出平均波前时间误差的 A 类标准 uncertainty 见式(19):

$$u_A = \frac{s(\Delta T_1)}{\sqrt{n}} \dots\dots\dots(19)$$

比对在一个合适的电流下进行,其波前时间需用测量系统使用的最小和最大 T_1 值。不同的波前时间可由一个序列号 j 来区分,记为 $T_{1,j}$ 。对每个不同的 T_1 值,可按上述方法计算平均误差 $\Delta T_{1,j}$,对应 $m \geq 2$ 的平均误差的总平均见式(20):

$$\overline{\Delta T_{1,m}} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \overline{\Delta T_{1,j}} \dots\dots\dots(20)$$

用单个 $\Delta T_{1,j}$ 值与其平均值 $\overline{\Delta T_{1,m}}$ 的最大差值来确定 B 类 uncertainty u_B ,见式(21):

$$u_B = \frac{1}{\sqrt{3}} \max_{j=1}^m |\overline{\Delta T_{1,j}} - \overline{\Delta T_{1,m}}| \dots\dots\dots(21)$$

注 3:如果测量系统只用于单一的波前时间,则可只进行一次比对测量。

时间参数校准的扩展 uncertainty 等于导出的平均误差 $\Delta T_{1,cal}$ 的扩展 uncertainty,由式(22)求得:

$$U_{cal} = k \times u_{cal} = 2 \sqrt{u_{ref}^2 + u_A^2 + u_B^2} \dots\dots\dots(22)$$

式中:

u_{cal} ——被校测量系统的平均波前时间误差 $\Delta T_{1,cal}$ 的合成标准 uncertainty;

k ——包含因子,对应于约 95% 的覆盖概率,且为正态分布。 $k=2$;

u_{ref} ——标准测量系统平均波前时间的误差 $\Delta T_{1,ref}$ 的合成标准 uncertainty;

u_A ——被校测量系统平均波前时间偏差 $\Delta T_{1,cal}$ 的 A 类标准 uncertainty;

u_B ——被校测量系统平均波前时间偏差 $\Delta T_{1,cal}$ 的 B 类标准 uncertainty。

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,然而可以结合校正证书,在测量条件的限定范围内给出其估算。

注 1: 如果时间参数校准的扩展不确定度 U_{cal} 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_{mes} 等于 U_{cal} 。

时间参数测量的扩展不确定度 U_{mes} 应按式(23)进行计算:

$$U_{\text{mes}} = k \cdot u_{\text{cmes}} = 2 \sqrt{u_{\text{cal}}^2 + \sum_{i=1}^N u_{\text{bi}}^2} \dots\dots\dots (23)$$

式中:

u_{cal} —— 已校准的测量系统的平均波前时间误差的合成标准不确定度;

k —— 包含因子,对应于约 95% 的覆盖概率,且为正态分布。 $k=2$;

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 类分量评定。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,短时稳定性,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,如认可测量系统的显示分辨率。

u_{cmes} —— 用认可测量系统测得的冲击电流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。

在特定条件下,计算 U_{mes} 时,应考虑到扩展不确定度的其他分量可能很重要,如在冲击电流波前叠加振荡的情况。

注 2: 只要观测到的相对平均误差 $\overline{\Delta T_{1,2}}/T_1$ 和其相对扩展不确定度 U_{mes} 的和小于相关时间参数测量结果要求的相对不确定度的 70%, 时间参数测量结果是不要求修正的。

注 3: 时间参数的变化对试验结果的影响应该是很小的。

注 4: 修正的时间参数 T_{cor} 的扩展不确定度应该按照本条款确定。

5.12 干扰试验

5.12.1 应用范围

稳态交流电流、短时交/直流电流和脉冲电流测量系统需要进行干扰试验。

进行干扰试验的目的是确保在已知的工作条件下给定电路中的电流测量系统不受干扰,这些干扰可能由瞬变的电磁场感应引起的,或者由信号线和电源线传导产生的。

试验应按照 5.12.2 或者 5.12.3 在测量系统上进行,其传输系统(测量电缆)以及任何相关组件的接地连接保持不变。应该在测量系统的输入端制造干扰条件,例如在大电流试验中对测量系统的输入端施加典型的试验电流波形,记录其输出。干扰试验电流应包括大电流试验装置中使用的、预期使用的及装置附近使用的每一种电流,包括多相和截波电流。

干扰比应由干扰测量值的最大幅值除以测量系统测量试验电流的输出值来确定。

测得的干扰比不能超过 1%。在不确定度要求仍然满足的情况下,较大的干扰比值是允许的。

注 1: 进行干扰试验时短时交流电流测量系统作为冲击电流测量系统考虑。

注 2: 邻近回路电流的影响在 5.8 中已考虑。

5.12.2 分流器和带铁心电流互感器

在干扰试验中,试验条件应与正常大电流试验相同,测量系统的转换装置应该安装在电流电路中,

转换装置中应承载电流。对于分流器,一端应与转换装置连接,另外一端与转换装置断开,测量电缆在分流器端短路;对带铁心的电流互感器,二次绕组短路连接(同轴电缆情况下);或者在输入端连接其特征阻抗(以最能代表正常测量条件为准),同时接地方式应与正常测量时相同(见图 11)。

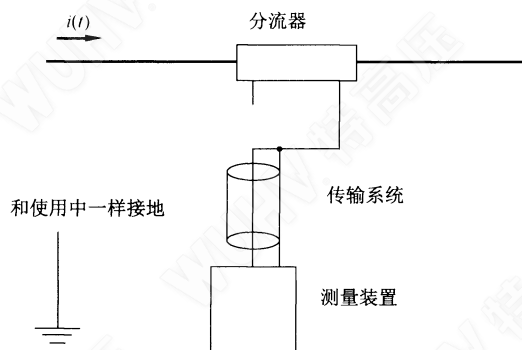


图 11 干扰试验电路原理图

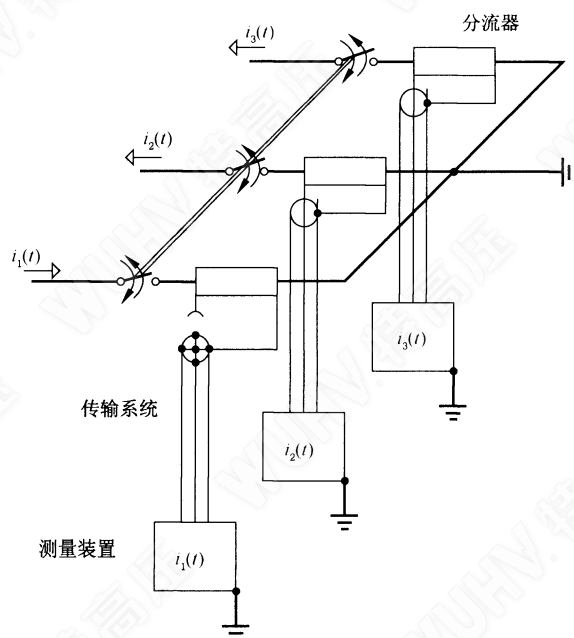


图 12 典型三相短路装置中,分流器或带铁心电流互感器的测量系统 $i_1(t)$ 干扰试验(举例)

5.12.3 无铁心感应测量系统(罗哥夫斯基线圈)

对于由无铁心的感应转换装置构成的测量系统,如罗哥夫斯基线圈,需证明其线圈和内部单元有足够的抗干扰能力(正确的同轴设计及防止电容耦合的屏蔽设计等)。所以,在干扰试验中,传输系统(测量电缆)应同正常测量时一样与转换装置的输出端相连,包括接地。而转换装置要从其正常的同轴位置移开,使其保持垂直接近,同时又不环绕于大电流载流导体(见图 13)。罗哥夫斯基线圈与干扰电流路径的轴线距离与实验室的条件有关,如果是邻近接地电流回路,该距离应大概等于罗哥夫斯基线圈直径的二分之一;如果是高电位的电流路径,则需按照必要的净距要求扩大该距离。

注:干扰试验同时也是邻近回路电流影响试验。但与电流导体之间的间距要小,可能不是 5.8 中需要的代表性间距,在这种情况下,可对一个更具有代表性的间距进行另一个试验。

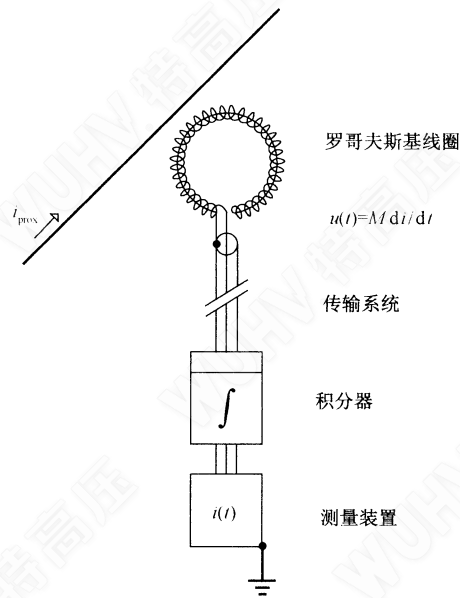


图 13 无铁心感应系统干扰试验电路

5.13 耐受试验

5.13.1 电压耐受试验

电压耐受试验只适用于使用在高电位条件下的转换装置。

转换装置必须通过干式耐压试验,电压为要求的频率或波形,电压值为其额定电压的 110%。耐受试验的试验程序见 GB/T 16927.1—2011。

耐受试验应在系统使用的单个极性或两个极性下进行。

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

5.13.2 电流耐受试验

5.13.2.1 短时耐受电流

当要求进行短时耐受电流试验时,转换装置应该为测量系统的一部分,同时应可以承受与其额定短时耐受电流相当的短时电流。在该电流下,测量系统应满足刻度因数的要求,而且转换装置不能出现损坏的迹象。

5.13.2.2 峰值耐受电流

当要求进行峰值耐受电流试验时,转换装置应该为测量系统的一部分,同时应可以承受与其额定峰值耐受电流相当的峰值电流。在该电流下,测量系统应满足刻度因数的要求,而且转换装置不能出现损坏的迹象。

6 稳态直流电流

6.1 适用范围

本试验适用于稳态直流大电流的测量。下面给出的试验电流的测量程序适用于校准和测量。

6.2 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

6.2.1

直流试验电流值 value of the d.c. test current

试验电流的算术平均值。

6.2.2

纹波 ripple

周期性地偏离电流的算术平均值的量。纹波的幅值定义为被测电流瞬时值最大值和最小值之差的一半。

6.2.3

纹波因数 ripple factor

电流的纹波幅值和算术平均值的比值。

6.3 试验电流

6.3.1 要求

除非相关技术委员会另有规定,试验电流为纹波因数不大于7%的直流电流。更多的试验要求可以在设备相关标准中定义。

6.3.2 容差

除非相关技术委员会另有规定,全部试验的试验电流的容差要求应为 $\pm 3\%$ 。

注1:必须强调,容差是试验规定值与实际测量值的允许差值。该差值应与测量的不确定度区分开来。

注2:相关技术委员会可以规定其他的容差限值,例如 $0\% \sim +5\%$ 。

6.4 试验电流的测量

6.4.1 认可测量系统的要求

除非相关技术委员会另有规定,一般要求是试验电流测量的扩展不确定度 U_{mes} (包含概率为95%)不超过3%。

6.4.2 不确定度分量

对直流电流测量系统,扩展不确定度 U_{mes} 应依据5.10.3进行评定,如果需要,还可依据附录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,其他分量可能很重要,则另外加以考虑。这里给出的信息仅供参考。

6.4.3 动态特性

对于仅测量直流试验电流值(算术平均值)的测量系统,没有动态特性方面的要求。纹波测量请参见6.5.3。

6.4.4 对认可测量系统进行的校准和试验

与型式试验要求的符合性,可以通过对具有相同设计的设备进行试验或者根据制造商的数据获得。

每一台设备都要进行例行试验。详细情况见 4.6, 例外情况见 4.4.2。

表 1 稳态直流电流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
校准测量系统的刻度因数			5.2 和 5.10.2	
刻度因数校核				6.4.5
线性度		5.3(如果适用)	5.3(如果适用)	
测量系统的动态特性				
短时稳定性		5.5		
长期稳定性	5.6		5.6(如果适用)	
环境温度影响	5.7			
邻近回路电流对转换装置的影响	5.8(如果适用)			
软件影响	5.9(如果适用)			
转换装置的干式耐压试验		5.13.1(如果适用)		
电流耐受试验				
转换装置的刻度因数		5.2		
除电缆外的传输系统刻度因数		5.2		
测量仪器的刻度因数		5.2		
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

6.4.5 性能校核

6.4.5.1 概述

认可测量系统的刻度因数可通过下述方法之一进行校核。

6.4.5.2 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 中描述的性能试验来确定标定刻度因数的新值。

注: 一般来说测量分流器的直流电阻对于性能校核来说就已足够。

6.4.5.3 测量系统刻度因数的校核

可按照 5.2 的程序与另一认可测量系统进行比对, 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 中描述的性能试验来确定标定刻度因数的新值。

6.5 纹波幅值的测量

6.5.1 认可测量系统的要求

测量纹波幅值的扩展不确定度(包含概率为95%)应不大于纹波幅值的10%或者直流试验电流值的1%,取两者中较大者。

可以使用独立的纹波测量系统测量直流试验电流值和纹波幅值,或使用带有两台独立仪器的同一转换装置来测量直流试验电流值和纹波幅值。

6.5.2 不确定度分量

对于纹波电流测量系统,扩展不确定度 U_{mes} 应依据5.10.3进行评定,如果需要,还可依据附录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2中给出。在个别情况下,其他不确定度分量可能显得重要。这里给出的信息仅供参考。

6.5.3 纹波的动态特性

6.5.3.1 要求

一般来说,如果测量系统幅频响应的-3dB上限截止频率 f_2 大于纹波基波频率 f 的10倍,-3dB下限截止频率 f_1 小于纹波基波频率 f 的1/10,可以认为该测量系统由于动态特性影响引出的不确定度满足要求。

6.5.3.2 幅频响应的直接测量

给测量系统施加一个已知幅值的正弦信号(通常幅值较小)并测量测量系统的输出。在合适的频率范围内重复该测量。

6.5.4 认可纹波电流测量系统进行的校准和试验

表2中规定的试验仅适用于纹波幅值测量系统。

与型式试验要求的符合性,可以通过对具有相同设计的设备进行试验或者根据制造商的数据获得。每一台设备都要进行例行试验。详细情况见4.6,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,这里给出的信息仅供参考。

表2 纹波电流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
校准测量系统的刻度因数			6.5.5 和 5.2	
刻度因数校核				6.5.6
纹波动态特性			6.5.3	
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,至少每年1次

6.5.5 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,其扩展不确定度应不大于 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。

6.5.6 纹波电流测量系统的性能校核

6.5.6.1 概述

认可测量系统的刻度因数可以通过以下方法之一进行校核。

6.5.6.2 组件的刻度因数校核

应使用扩展不确定度不大于 3%的内部或外部校准器来校核每一组件的刻度因数,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 3%,则认为该标定刻度因数仍然有效;如果该差值超出 3%,则应按 5.2 中描述的性能试验来确定标定刻度因数的新值。

注:一般来说测量分流器的直流电阻对于性能校核来说就已足够。

6.5.6.3 测量系统的刻度因数校核

依据 5.2.1 中的程序与另一个认可测量系统进行比对。如果两个测量值的差值不大于 10%,即认为之前的标定刻度因数有效。如果大于 10%,则应进行性能试验以重新确定标定刻度因数(见 5.2)。

6.6 试验程序

试验程序由相关技术委员会规定,或者基于与客户之间的协议。

7 稳态交流电流

7.1 适用范围

试验适用于稳态交流电流试验。

下面给出的试验电流的测量程序适用于校准和测量。

7.2 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

7.2.1

交流试验电流值 value of the a.c. test current

试验电流的真有效值。

7.2.2

真有效值 true r.m.s value

由式(24)计算该值

$$I_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} \dots\dots\dots (24)$$

式中:

0 ——交流周波的起始时刻,作为积分的起始;

T ——几个整数周期对应的时间;

$i(t)$ ——电流的瞬时值。

注 1: 如果已经获取了足够的采样值(见附录 G.4), 一般可以从任意周期波形的数字记录中计算得到真有效值。

注 2: 在频率变化的情况下, 没有计算真有效值的严格公式。

7.2.3

峰值 peak value

i_{ss}

电流的最大瞬时幅值。

7.3 试验电流

7.3.1 要求

试验电流为交流电流, 一般其额定频率在 45 Hz~65 Hz 范围内, 称之为工频试验电流。特殊试验可能要求频率大大低于或高于该范围, 由相关技术委员会规定。

电流波形应近似于一个正弦波, 正峰值和负峰值的差异小于 2%。

如果总的相对谐波畸变率(THD)不超过基波分量有效值的 5%, 则可认为大电流试验的结果不受波形畸变的影响。

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{50} I_n^2}}{I_1} \dots\dots\dots (25)$$

式中:

I_1 ——电流基波分量的有效值;

I_n ——从 $n=2$ 开始的第 n 次谐波分量的有效值。

对于某些常用试验回路允许较大的波形畸变。例如: 被试品可能会造成相当大的波形畸变, 特别是具有非线性阻抗特性的被试品。

7.3.2 容差

除非相关技术委员会另有规定, 所有试验中试验电流的容差规定为 $\pm 3\%$ 。

注 1: 必须强调, 容差是试验规定值与实际测量值的允许差值。该差值应与测量的不确定度区分开来。

注 2: 相关技术委员会可以规定其他的容差限值, 例如: $0\% \sim +5\%$ 。

7.4 试验电流的测量

7.4.1 认可测量系统的要求

除非相关技术委员会另有规定, 一般要求试验电流测量的扩展不确定度 U_{mes} (包含概率为 95%) 不超过 3%。

7.4.2 不确定度分量

对交流电流测量系统, 扩展不确定度 U_{mes} 应依据 5.10.3 进行评定, 如果需要, 还可依据附录 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 3 中给出。某些情况下, 其他分量可能很重要, 则另外加以考虑。这里给出的信息仅供参考。

7.4.3 动态特性

7.4.3.1 要求

工作于单个基频 f_{nom} 下的测量系统的幅频响应应位于(在图 14 中用点划线描画的频率范围内)用

实线和虚线标示的上限和下限之间。该限值来源于对不确定度的要求。图表中的数对给出了限值线拐点处的归一化频率(以对数尺度表示)及该频率下响应与理想幅频响应的允许偏离值。从 $f_{nom} \sim 7f_{nom}$ 处的性能应通过试验或电路分析验证。该范围以外的幅频响应限值仅供参考。不确定度分量 u_{dyn} 取为 0。

相关技术委员会可以规定有关动态性能的其他要求。

注 1: 对动态响应提出限值要求的目的是为了保证基波分量以外的频率分量不会对试验电流测量结果产生大的影响。满足这些要求的测量系统可认为其频率响应适合于总谐波畸变率(THD)的测量。

注 2: 对标明区域以外的频率响应,虽不作要求,但其的确很好地代表了实际情况。

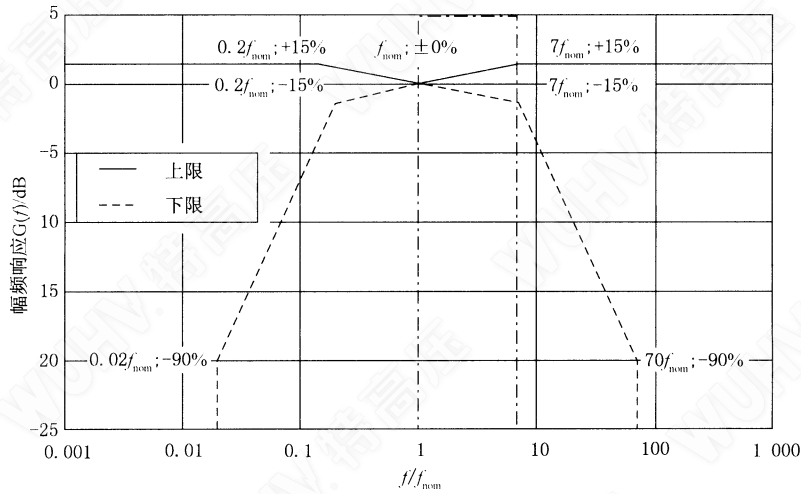


图 14 用于单个基波频率 f_{nom} 的交流测量系统的可接受的归一化幅频响应

还可对测量系统在其基波频率范围进行认可,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(及相应的幅频响应)应稳定在 1% 以内。在 $f_{nom1} \sim 7f_{nom2}$ 范围内的响应应处于图 15 中表明的区域内。该限值来源于对不确定度的要求。图中的数对给出了限值线拐点处的归一化频率(以对数尺度表示)及该频率下响应与理想幅频响应的允许偏离值。图中横纵坐标数值为归一化频率和限值线拐点处对应的理想响应的允许偏差。从 $f_{nom1} \sim 7f_{nom2}$ 处的性能应通过试验或电路分析验证。该范围以外的幅频响应限值仅供参考。

应依据 5.4 评估刻度因数在 $f_{nom1} \sim f_{nom2}$ 频率范围内的变化引起的不确定度分量 u_{dyn} 。

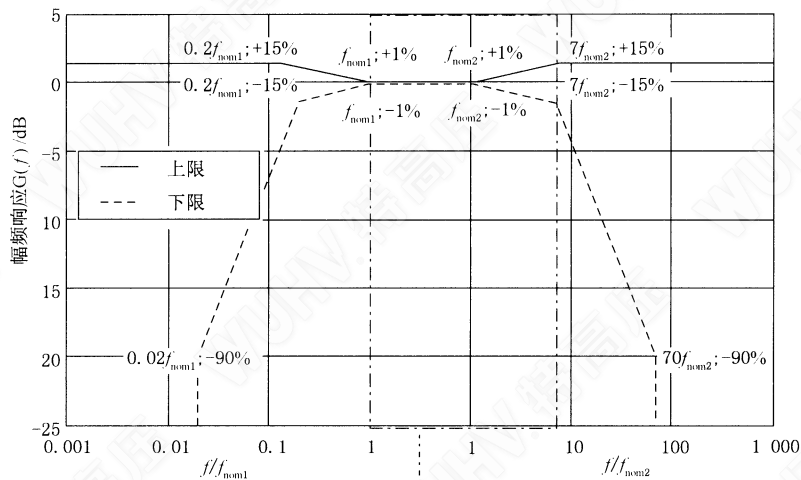


图 15 用于基波频率 $f_{nom1} \sim f_{nom2}$ 范围的交流测量系统的可接受的归一化幅频响应

表 3 稳态交流电流要求的试验

试验类型	型式试验	例行试验	性能试验	性能校核
校准测量系统的刻度因数			5.2	
刻度因数校核				7.4.5
线性度		5.3(如果适用)	5.3(如果适用)	
测量系统的动态特性		7.4.3 和 5.4		
转换装置的短时稳定性		5.5		
长期稳定性	5.6		5.6(如果适用)	
环境温度影响	5.7			
邻近回路电流对转换装置的影响	5.8(如果适用)			
软件影响	5.9(如果适用)			
干扰试验			5.12	
转换装置的干式耐压试验		5.13.1(如果适用)		
电流耐受试验		—		
转换装置的刻度因数		5.2		
除电缆外的传输系统的刻度因数		5.2		
测量仪器的刻度因数		5.2		
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)		视其稳定性, 但至少每 5 年 1 次	视其稳定性, 但至少每年 1 次

7.4.3.2 幅频响应的直接测量

为了确定动态特性,给测量系统施加一个已知幅值的正弦信号(通常幅值较小)并测量测量系统的输出。在合适的频率范围内重复该测量。

7.4.4 对认可测量系统进行的校准和试验

与型式试验要求的符合性,可以通过对具有相同设计的设备进行试验或者根据制造商的数据获得。每一台设备都要进行例行试验。详细情况见 4.6,例外情况见 4.4.2。

7.4.5 性能校核

7.4.5.1 概述

认可测量系统的刻度因数可由下述方法之一进行校核。

7.4.5.2 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 中描述的性能试验来确定标定刻度因数的新值。

注:一般来说测量分流器的直流电阻对于性能校核来说就已足够。

7.4.5.3 测量系统刻度因数的校核

可按照 5.2.1 的程序与另一认可测量系统进行比对,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%,则应进行性能试验来确定标定刻度因数的新值(见 5.2)。

7.5 试验程序

试验程序由相关技术委员会规定,或者基于与客户之间的协议。

8 短时直流电流

8.1 适用范围

本试验适用于大容量试验中的直流电流。例如,在大容量(短路)直流试验中遇到的具有一定持续时间(例如达到 1 s)的直流电流即为短时直流电流(示例波形见图 16)。在典型物理量的测量过程中,由于电流开断,可能会出现暂态现象,这可能会对大容量试验室里的电流和电压测量系统造成严重干扰。

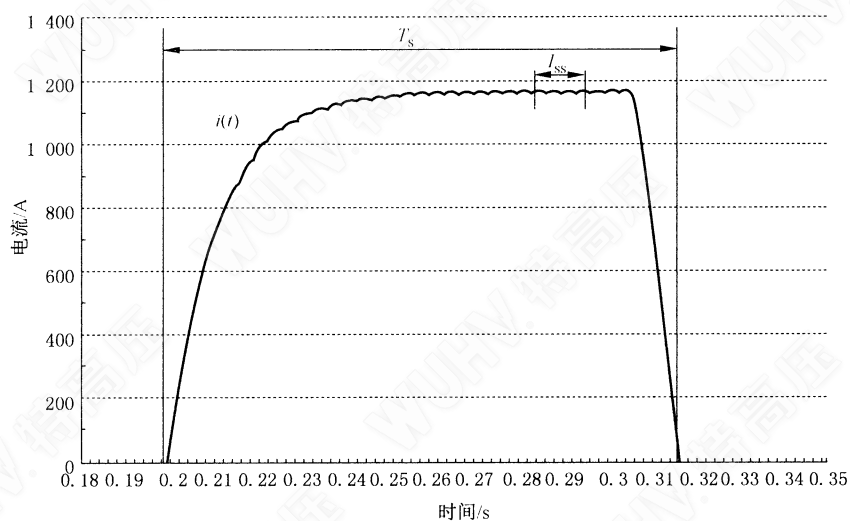


图 16 短时直流电流的示例

下面给出的试验电流测量程序适用于校准和测量。

8.2 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

8.2.1

峰值 peak value

\hat{i}_{ss}

电流的最大瞬时幅值。

8.2.2

稳态直流电流 steady-state d.c. current

I_{ss}

稳态时电流的算术平均值,也就是超过 90% 峰值以上部分的电流的算术平均值。

8.2.3

回路的时间常数 **time constant of the circuit**

τ

回路中的电感值与电阻值之比。

注 1: 时间常数是呈指数上升的电流达到其 $(1-e^{-1})$ 稳态值的时间。实测得到的时间常数不一定等于通过电阻值和电感值计算得到的时间常数。

注 2: 铁磁材料的饱和效应以及回路接通和切断时的差异会导致回路电感发生变化。

8.2.4

持续时间 **duration**

试验电流超过 10% 峰值电流部分的持续时间。

8.3 试验电流

8.3.1 对试验电流的要求

试验电流一般使用以下特征量表征:

- 峰值; 稳态直流电流;
- 回路的时间常数;
- 持续时间。

8.3.2 容差

除非相关技术委员会另有规定, 试验电流的容差要求应依照表 4。

注 1: 必须强调, 容差是试验规定值与实际测量值的允许差值。该差值应与测量的不确定度区分开来。

注 2: 相关技术委员会可规定其他容差限值。

表 4 短时直流电流的试验电流参数的容差要求

量	容差/%
峰值	±5
稳态直流电流	±5
时间常数	0~+25
持续时间	由相关技术委员会规定

8.4 试验电流的测量

8.4.1 对认可测量系统的要求

除非相关仪器标准另有规定, 一般要求峰值和稳态电流的扩展测量不确定度 U_{mes} (95% 的覆盖概率) 不应超过 5%。

8.4.2 不确定度分量

对短时直流电流测量系统, 扩展不确定度 U_{mes} 应依据 5.10.3 进行评定, 如果需要, 还可依据附录 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 5 中给出。某些情况下, 其他分量可能很重要, 则另外加以考虑。这里给出的信息仅供参考。

8.4.3 动态特性

8.4.3.1 要求

测量系统的设计应包含从直流到上限频率 f_2 的频率范围。测量系统的幅频响应的-3dB 上限频率 f_2 应大于 1 kHz。由频率响应引起的不确定度分量认为是 0。

8.4.3.2 动态特性试验

幅频响应既可以直接确定,也可以通过评估脉冲响应的频谱密度来确定。

为了直接确定幅频响应,给测量系统输入一个已知幅值的正弦信号(通常幅值较小)并测量测量系统的输出。在足够宽的频率范围内重复测量以验证从直流到上限频率 f_2 频率范围的响应情况。

为了采用频谱密度函数确定幅频响应,给测量系统输入一个冲击电流信号,并测量它的输入信号和输出信号。用标准测量系统测量输入信号,标准测量系统在关心的频率范围内具有平坦的响应曲线。电流脉冲的上升时间应该比被测系统被认可使用范围内的最短上升时间短。为了验证从直流到上限频率 f_2 频率范围的响应特性,电流脉冲应该有足够长的持续时间。通过对标准测量系统测得的试验电流与被测认可测量系统测得的输出信号之比进行傅里叶变换,对幅频响应进行评估。

注:某些转换装置本身就具有稳定的动态特性,在这种情况下,对其进行一次动态试验可能就满足要求了。

8.4.4 对认可测量系统进行的校准和试验

表 5 短时直流电流要求的试验

试验类型	型式试验	例行试验	性能试验	性能校核
校准测量系统的刻度因数			5.2	
刻度因数校核				8.4.5
线性度		5.3 和 8.4.6 (如果适用)	5.3 和 8.4.6 (如果适用)	
测量系统的动态特性		8.4.3	8.4.3 (如果适用)	
转换装置的短时稳定性		5.5		
长期稳定性	5.6		5.6(如果适用)	
环境温度影响	5.7			
邻近回路电流对转换装置的影响	5.8(如果适用)			
软件影响	5.9(如果适用)			
有源传输系统的干扰试验			5.12	
测量系统的干扰试验			5.12	
转换装置的湿或污秽耐压试验	5.13.1(如果适用)			
转换装置的干式耐压试验		5.13.1(如果适用)		
电流耐受试验		5.13.2		
转换装置的刻度因数		5.2		
除电缆外的传输系统的刻度因数		5.2		

表 5 (续)

试验类型	型式试验	例行试验	性能试验	性能校核
测量仪器的刻度因数		5.2		
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)		视其稳定性, 但至少每 5 年 1 次	视其稳定性, 但至少每年 1 次

与型式试验要求的符合性,可以通过对具有相同设计的设备进行试验或者根据制造商的数据获得。每一台设备都要进行例行试验。详细情况见 4.6,例外情况见 4.4.2。

8.4.5 性能校核

8.4.5.1 概述

认可测量系统的刻度因数可以通过下述方法之一进行校核。

8.4.5.2 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%,则应进行性能试验来确定标定刻度因数的新值(见 5.3)。

注:一般来说测量分流器的直流电阻对于性能校核来说就已足够。

8.4.5.3 测量系统刻度因数的校核

可按照 5.2 的程序与另一认可测量系统进行比对,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 中描述的性能试验来确定标定刻度因数的新值。

8.4.6 线性度试验

线性度试验既可以使用短时直流电流或者峰值因数大约为 2 的不对称工频电流进行,需按照 5.3 中的程序进行试验。

需要确定的是第一个峰的峰值。只需对一个极性进行线性度试验。

8.5 试验程序

试验程序由相关的技术委员会规定,或者基于与客户之间的协议。

9 短时交流电流

9.1 适用范围

本试验适用于大容量试验。短时交流电流是具有有限持续时间(例如达到 5 s)的交流电流(示例波形见图 17),可能有也可能没有瞬时直流分量,有瞬时直流分量的称为非对称电流,没有瞬时直流分量的称为对称电流。在典型物理量的测量过程中,由于电流开断,可能会出现暂态现象,这可能会对电流测量系统造成严重干扰。

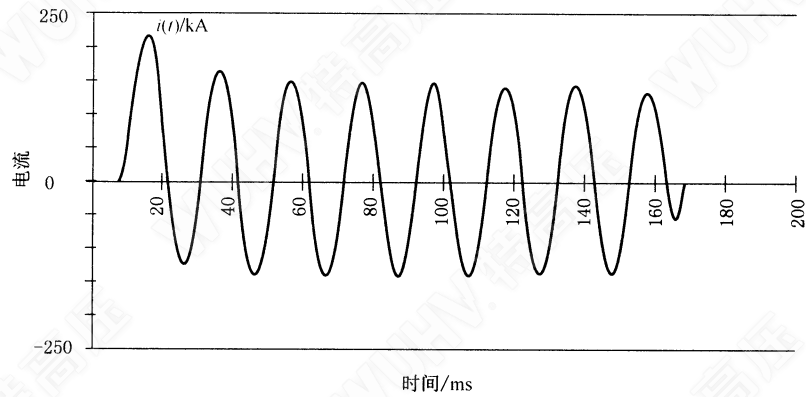


图 17 短时交流电流示例

下面给出的试验电流测量程序适用于校准和测量。

9.2 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

9.2.1

对称电流 symmetrical current

不含直流分量或直流分量可以忽略的电流。

9.2.2

非对称电流 asymmetrical current

直流分量不可忽略的电流。

9.2.3

峰值 peak value

\hat{i}

电流的最大瞬时幅值。

9.2.4

瞬时电流值 instantaneous value of current

电流中任一时刻的瞬时值。

9.2.5

电流交流分量 a.c. component of current

电流中的交流分量有效值。

9.2.6

电流直流分量 d.c. component of current

电流中直流分量与交流分量峰值之比,以百分数表示。

9.2.7

真有效值 true r.m.s. value of an event

I_{rms}

由式(26)获取该值

$$I_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} \dots\dots\dots (26)$$

式中：

- 0 —— 电流第一次偏离零点的时刻；
- T —— 电流最后一次偏离零点经历的时间；
- $i(t)$ —— 电流的瞬时值。

注 1：若采样点数足够，真有效值一般可从有限时间内的数字化记录进行计算得到。

注 2：真有效值也要考虑直流分量。

9.2.8

对称交流分量 symmetrical a.c. component

任何直流分量衰减后的电流的真有效值。

9.2.9

峰值因数 peak factor

交变量绝对值的最大值与其均方根值之比。

9.2.10

阻抗相角 impedance angle

φ

$$\varphi = \arctan \frac{X}{R} = \arctan \frac{\omega L}{R} \dots\dots\dots (27)$$

式中：

- ω —— 电源的角频率；
- L —— 电感，单位为亨(H)；
- R —— 短时交流等效回路的电阻，单位为欧姆(Ω)；
- 阻抗相角常用 $\cos\varphi$ 的值表示，称为“功率因数”。

注 1：阻抗相角是试验回路本身的特征参数。

注 2：确定阻抗相角的方法可能会在产品标准中给出。一般程序见附录 G。

9.3 试验电流

9.3.1 对试验电流的要求

试验电流一般用以下特征量表征：

- 峰值；
- 电流交流分量；
- 电流直流分量；
- 瞬时电流值；
- 对称交流分量；
- 频率；
- 回路的功率因数($\cos\varphi$ ，见附录 G)；
- 持续时间。

在某些应用中可能会用到其他的参数，如焦耳积分：

$$I_{\text{rms}}^2 \times T = \int_0^T i^2(t) dt \dots\dots\dots (28)$$

注：附录 G 中给出了确定有效值的实际程序。

9.3.2 容差

除非相关技术委员会另有规定，试验电流的容差要求应依照表 6。

注 1: 必须强调,容差是试验规定值与实际测量值的允许差值。该差值应与测量的不确定度区分开来。

注 2: 相关技术委员会可规定其他容差限值。

表 6 短时交流电流试验参数的容差要求

量	容差/%
峰值	±5
电流交流分量	±5
电流直流分量	±10
对称交流分量	±5
$\cos\varphi$	±0.05
频率	±5
持续时间	由相关技术委员会规定

9.4 试验电流的测量

9.4.1 对认可测量系统的要求

除非相关仪器标准另有规定,一般要求在性能记录中给出的指定测量范围内测量峰值和电流交流分量的扩展测量不确定度 U_{mes} (95%的覆盖概率)不应超过 5%。

注 1: 测量阻抗相角(用 $\cos\varphi$ 表示)的扩展测量不确定度应不超过 0.05。但是,测量不确定度可能会受到用于此次测量的其他测量系统的影响。

注 2: 对于使用带铁心的电流互感器作为转换装置的测量系统,应该特别注意由连续不对称试验电流引起的铁心饱和和可能带来的影响。

9.4.2 不确定度分量

对短时交流电流测量系统,扩展不确定度 U_{mes} 应依据 5.10.3 进行评定,如果需要,还可依据附录 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 7 中给出。某些情况下,其他分量可能很重要,则另外加以考虑。这里给出的信息仅供参考。

表 7 短时交流电流要求的试验

试验类型	型式试验	例行试验	性能试验	性能校核
校准测量系统的刻度因数			5.2	
刻度因数校核				9.4.5
线性度		5.3 和 9.4.6 (如果适用)	5.3 和 9.4.6 (如果适用)	
测量系统的动态特性		9.4.3	9.4.3 (如果适用)	
转换装置的短时稳定性		5.5		
长期稳定性	5.6		5.6 (如果适用)	
环境温度影响	5.7			

表 7 (续)

试验类型	型式试验	例行试验	性能试验	性能校核
邻近回路电流对转换装置的影响	5.8 (如果适用)			
软件影响	5.9 (如果适用)			
有源传输系统的干扰试验, 干扰比			5.12	
测量系统的干扰试验, 干扰比			5.12	
转换装置的干式耐压试验		5.13.1 (如果适用)		
电流耐受试验		5.13.2		
转换装置的刻度因数		5.2		
除电缆外的传输系统的刻度因数		5.2		
测量仪器的刻度因数		5.2		
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)		视其稳定性, 但至少每 5 年 1 次	视其稳定性, 但至少每年 1 次

9.4.3 动态特性

9.4.3.1 要求

对动态特性的要求取决于所做试验的类型。在每种情况下,都要指出测量系统满足 9.4.1 要求的最小和最大频率范围。表 8 给出了典型试验及相应的要求。试验应按照 5.4 中的程序进行。

一般地,符合表 9 刻度因数要求的测量系统被认为是满足 9.4.1 要求的,而且由于频率响应引入的不确定度分量 u_{dyn} 可认为忽略不计。详细情况见 4.6,例外情况见 4.4.2。

表 8 大容量实验室的典型试验和测量系统的最小频率范围要求

试验类型	电流的基波频率	频率范围要求	备注
峰值耐受和短时 耐受电流试验	工频	0.2 Hz 到 7 倍试验 电流的基波频率	直流分量也要测量
关合和开断试验	工频	0.2 Hz 到 7 倍试验 电流的基波频率	一般不截断
并联电抗器开合试验	工频	0.2 Hz 到 7 倍试验 电流的基波频率	多次重燃电流试验, 试验评估不要求电流测量
容性电流开合试验	工频但是电流截断, 背靠背试验中是 4 250 Hz	直直到 8 500 Hz	电流基本上为正弦波
合成试验	250 Hz~1 000 Hz	0.2 Hz 到 7 倍试验 电流的基波频率	合成试验中的注入电流, 电流基本上为正弦波
限流熔断器试验	带截止电流的工频	20 Hz~5 000 Hz	测量截止电流

表 9 刻度因数在频率范围低端和高端的允许偏差要求

在基波频率下	在频率范围的低端/%	在频率范围的高端/%
见 5.2	±15	±15

9.4.3.2 幅频响应的直接测量

为了确定动态特性,给测量系统施加一个已知幅值的正弦信号(通常幅值较小)并测量测量系统的输出。在合适的频率范围内重复该测量。

9.4.3.3 用频谱密度函数确定幅频响应

给系统输入一个冲击电流信号,并测量系统的输入信号和输出信号。用标准测量系统测量输入信号,标准测量系统在关心的频率范围内具有平坦的响应曲线。电流脉冲的上升时间应该比被测系统被认可使用范围内的最短上升时间短。电流脉冲的总持续时间应该和被测系统被认可的电流类型相关。通过输入信号(用性能好/标准系统)和输出信号的比评估幅频响应。

9.4.3.4 用卷积方法估算不确定度

用卷积方法(见附录 D)可以通过阶跃响应来评估由测量系统的时间响应引起的测量系统的不确定度。

9.4.4 对认可测量系统进行的校准和试验

见表 7。

与型式试验要求的符合性,可以通过对具有相同设计的设备进行试验或者根据制造商的数据获得。每一台设备都要进行例行试验。详细情况见 4.6,例外情况见 4.4.2。

9.4.5 性能校核

9.4.5.1 概述

认可测量系统的刻度因数可以通过下述方法之一进行校核。

9.4.5.2 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%,则应进行性能试验来确定标定刻度因数的新值(见 5.2)。

注:一般来说测量分流器的直流电阻对于性能校核已足够。

9.4.5.3 测量系统刻度因数的校核

可按照 5.2 的程序与另一认可测量系统进行比对,如果两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 中描述的性能试验来确定标定刻度因数的新值。

注:进行两个测量系统的比较时常采用将三相电路中的两相串联来测量同一电流的方法。

9.4.6 线性度试验

应使用峰值因数为 2.8(或试验回路的最大有效峰值系数)的不对称工频电流进行线性度试验。需

按照 5.3 中的程序进行试验。

需要确定的是第一个峰的峰值。要求对直流分量的两个极性进行线性度试验。

注 1: 在某些转换装置中,如带铁心的电流互感器,由于可能出现饱和现象,在以后使用中可能需要改变直流分量的极性。

注 2: 通过两个极性下试验可以鉴别出测量系统的偏置。

9.4.7 干扰试验

干扰试验及要求见 5.11。

只用于工频电流测量的系统应在工频下进行干扰试验。

用于工频及工频外其他频率的系统,建议在试验电流的频率范围内进行附加干扰试验。

9.5 试验程序

试验程序由相关技术委员会规定,或者基于与客户之间达成的协议。

10 冲击电流

10.1 适用范围

本试验适用于冲击电流耐受试验,如避雷器试验、电磁兼容试验、雷电冲击电流耐受试验,见图 18~图 21。

下面给出的试验电流测量程序适用于校准和测量。

注: 在冲击电流试验中,施加在被试品上的电流波形的分辨率和复现性是特别重要的,在这些情况下,见 11。

10.2 术语和定义

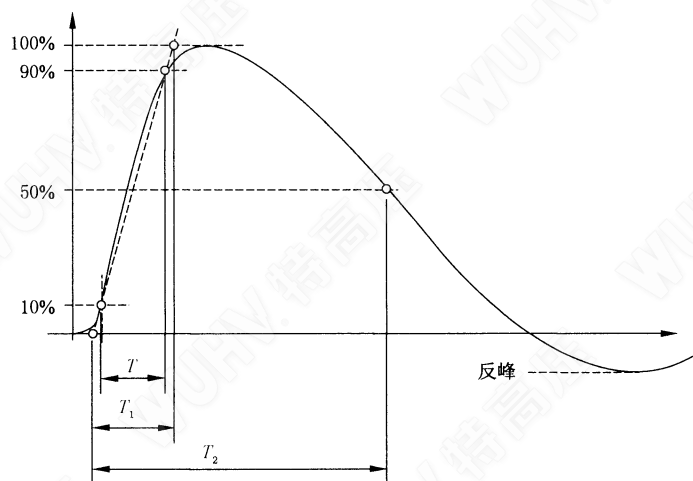
下列术语和定义适用于本文件。

10.2.1

指数型冲击电流 exponential impulse current

在很短时间内电流从零上升至峰值,之后近似按指数形式或者以强阻尼的正弦曲线下降至零,电流波形定义为波前时间 T_1 (见 10.2.4)、半峰值时间 T_2 (见 10.2.6),一般表示成 T_1/T_2 型冲击电流(见图 18)波形。

注: 其他脉冲也应用于试验中,例如,切入正弦波和环形波等。



说明:

T_1 ——波前时间 = $1.25 \times T$;

T_2 ——半峰值时间。

图 18 指数型冲击电流波形

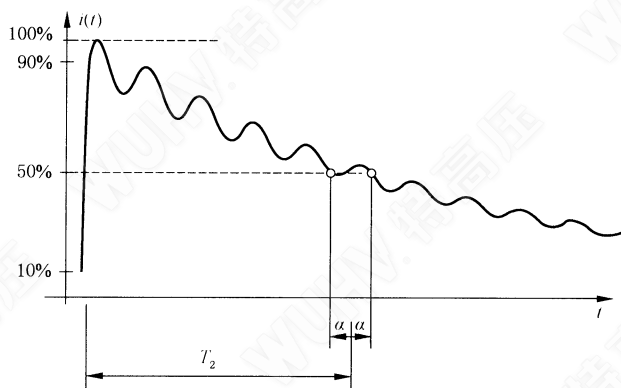


图 19 指数型冲击电流-波尾振荡

10.2.2

矩形冲击电流(冲击电流波形-矩形波) rectangular impulse current

近似矩形的电流波形,由持续时间 T_d 和总持续时间 T_i (见 10.2.8)定义,一般表示为 T_d/T_i 型冲击电流(见图 20)。

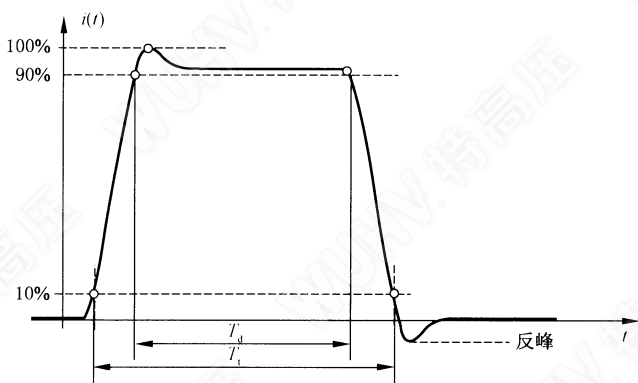


图 20 冲击电流-矩形,平滑

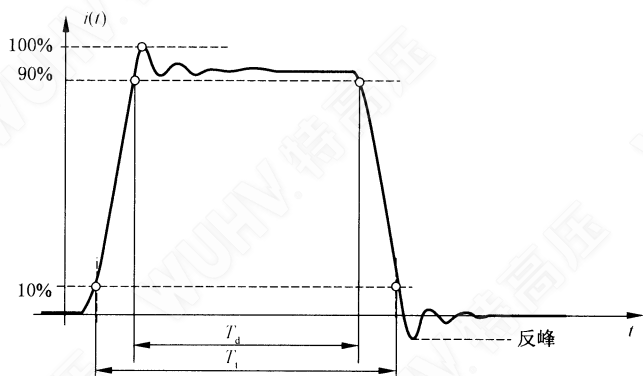


图 21 冲击电流-有振荡的矩形波

10.2.3

冲击电流值 value of the impulse current

试验电流峰值。

注：采用某些试验回路电流波形中可能会出现过冲和振荡。在这种情况下，峰值由电流极限值决定，除非相关技术委员会另有规定，例如：在振荡中绘制平滑曲线。

10.2.4

波前时间 front time

T_1

指数冲击电流的视在参数，定义为峰值的 10% 和 90% 之间时间间隔 T 的 1.25 倍。

10.2.5

视在起点 virtual origin

O_1

指数波曲线中相对于 10% 峰值电流点超前 $0.1T_1$ 的时刻，对于采用线性时间刻度的波形，视在起点为时间轴与波前部分通过 10% 峰值点和 90% 峰值点所画直线的交点。

10.2.6

半峰值时间 time to half-value

T_2

为指数型冲击电流的视在参数，定义为视在起点 O_1 到冲击电流下降至峰值一半时刻之间的时间间隔（见图 18），如果波尾出现振荡， T_2 为由视在起点 O_1 到冲击电流下降至峰值一半的第一个瞬间和最后一个瞬间的时间间隔的平均值（见图 19）。

10.2.7

持续时间 duration

T_d

矩形冲击电流超过峰值 90% 的持续时间（见图 20，图 21），如果出现振荡， T_d 取电流持续超过峰值 90% 的最长时间间隔。

10.2.8

总持续时间 total duration

T_t

定义为矩形冲击电流波形上高于峰值 10% 的时间间隔（见图 20，图 21）。

注：如果波前出现轻微振荡，需要画一条平均曲线以确定到达 10% 峰值的时间。

10.2.9

标称时段（脉冲的波前部分） nominal epoch (front part of impulse only)

τ_N

测量系统被认可的相关冲击时间参数的最小值 (t_{\min}) 与最大值 (t_{\max}) 之间的间隔。

注 1：相关时间参数是：

——指数型脉冲电流波前时间 T_1 的范围。

——矩形脉冲电流 T_t 与 T_d 差值的一半。

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。

注 3：对于矩形冲击电流，标称时段为：

$$t_{\min} = \min\left(\frac{T_t - T_d}{2}\right), t_{\max} = \max\left(\frac{T_t - T_d}{2}\right)$$

10.2.10

冲击电流电荷 charge of an impulse current

Q

瞬时电流绝对值对时间的积分。

$$Q = \int_0^{\infty} |i(t)| dt \quad \dots\dots\dots (29)$$

注 1: 基于实际考虑, 积分上限值的选取应使得剩余部分的影响小于相关技术委员会给出的规定值。

注 2: 电流的绝对值适用于弧根电压降基本恒定的情况。

10.2.11

冲击电流焦耳积分 joule integral of an impulse current

I^2t

瞬时电流平方对时间的积分。

$$I^2t = \int_0^{\infty} i^2(t) dt \quad \dots\dots\dots (30)$$

注: 基于实际考虑, 积分上限值的选取应使得剩余部分的影响小于相关技术委员会给出的规定值。

10.3 电流试验

10.3.1 概述

试验中使用各种不同的标准冲击电流波形。表 10 中列举了指数型冲击电流波形, 更多波形在附录 H 中给出。其他波形可由相关技术委员会规定。

注: 正在开展减少波形数量的进一步的工作。

表 10 指数型冲击电流波形示例

冲击类型	波前时间 $T_1/\mu s$	半峰值时间 $T_2/\mu s$	时间参数的容差	
1/≤20	1	≤20	$T_1 \pm 10\%$	$T_2 \leq 20 \mu s$
8/20	8	20	$T_1 \pm 20\%$	$T_2 \pm 20\%$
10/350	10	350	$T_1 \pm 30\%$	$T_2 \pm 20\%$

10.3.2 容差

10.3.2.1 指数型冲击电流

除非相关技术委员会另有规定, 指数型冲击电流规定值的允许偏差如下:

- 电荷 0%, 上限值由相关技术委员会规定;
- 焦耳积分 0%, 上限值由相关技术委员会规定;
- 试验电流值 ±10%;
- 波前时间 T_1 ±20%;
- 半峰值时间 T_2 ±20%。

注 1: 由于物理特性的限制, 对某些类型的冲击波仅通过线性元件很难达到这些容差的规定值(例如, 4/10、8/20 波形见附录 E), 相关技术委员会可规定更详细的要求或改变容差值。

注 2: 在某些情况下, 电荷或规定的能量对试验很重要, T_2 的容差可为 ±50%。

除非相关委员会另有规定, 试验电流过零后的任何反峰值不能超过冲击电流峰值的 30%。

10.3.2.2 矩型冲击电流

- 电荷 0%, 上限值由相关技术委员会规定;

- 焦耳积分 0%，上限值由相关技术委员会规定；
- 峰值 0%，+20%；
- 峰值持续时间 T_d 0%，+20%；
- 总持续时间 T_i $<1.5T_d$ 。

除非相关委员会另有规定，试验电流过零后的反峰值不能超过冲击电流峰值的 10%。

10.4 试验电流的测量

10.4.1 对认可测量系统的要求

一般要求如下：

- 测量冲击电流值(峰值)的扩展不确定度 U_{meas} (覆盖概率为 95%) 不大于 3%；
- 测量时间参数(波形定义)的扩展不确定度(覆盖概率为 95%) 不大于 10%；
- 具有足够低的输出偏置以便计算获得冲击电流的电荷和焦耳积分值。

10.4.2 不确定度分量

对冲击电流测量系统，扩展不确定度 U_{meas} 应依据 5.10.3 进行评定，如果需要，还可依据附录 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 11 中给出。某些情况下，其他分量可能很重要，则另外加以考虑。这里给出的信息仅供参考。

表 11 冲击电流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
校准测量系统的刻度因数			5.2	
刻度因数校核				10.4.5
线性度		5.3 (如果适用)	5.3 (如果适用)	
测量系统的动态特性	10.4.3 (如果适用)		10.4.3 (如果适用)	10.4.5.1 (如果适用)
转换装置的短时稳定性		5.5		
长期稳定性	5.6		5.6 (如果适用)	
环境温度影响	5.7			
邻近回路电流对 转换装置的影响	5.8 (如果适用)			
软件影响	5.9 (如果适用)			
有源传输系统的干扰试验，干扰比			5.12	
测量系统的干扰试验，干扰比			5.12	
转换装置的干式耐压试验		5.13.1 (如果适用)		
电流耐受试验		5.13.2		
转换装置的刻度因数		5.2		

表 11 (续)

试验类型	型式试验	例行试验	性能试验	性能校核
除电缆外的传输系统刻度因数		5.2		
测量仪器的刻度因数		5.2		
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)		视其稳定性, 但至少每 5 年 1 次	视其稳定性, 但至少每年 1 次

10.4.3 动态特性

10.4.3.1 要求

如果满足下列条件,则测量系统的动态特性对于测量性能记录中所规定的波形范围是满足的:

在每个波形范围内,刻度因数稳定在 1% 以内;

被测量的时间参数的扩展不确定度加上其误差不超过 10%。

在测量系统的标称时段上采用下列两种不同的冲击波形评价其动态特性:

t_{\min} 等于标称时段内的最短时间参数(见 10.2.9);

t_{\max} 等于标称时段内的最长时间参数(见 10.2.9)。

半峰值时间(如果是矩形冲击电流则为总持续时间)应近似等于测量系统要求被认可的最长时间。

标称时段内刻度因数的变化引入的不确定度分量 u_{dyn} 应根据 5.4 进行评定。

10.4.3.2 与标准测量系统比对(优选方法)

可以采用 5.2.1 试验中获取的相同记录,对两个系统均应计算被测冲击电流的相关时间参数。应计算被校系统测量时间参数的误差,同时应评定被校系统时间参数测量误差的不确定度,此时应同时考虑标准测量系统的不确定度和校准过程中引入的不确定度。

注:当需要对一组冲击类型进行认可时, t_{\min} 可以从一种冲击类型中选择, t_{\max} 可以从另一种冲击类型中选择,这种情况应采用所有冲击类型中最长的半峰值时间。

10.4.3.3 基于卷积法的替代方法

测量系统的刻度因数可根据任何合适的方法来确定,用来确定刻度因数的波形应在下面描述的卷积法的覆盖范围之内。

动态特性由测量系统的阶跃响应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,可以估算测量系统对不同波形产生的误差,通过这些误差可以评估其测量不确定度。在标称时段时间范围内,刻度因数的变化应在 $\pm 1\%$ 以内。阶跃波响应应根据 10.4.3.6 进行记录,同时参考附录 C 和附录 D。

10.4.3.4 基于组件的校准

测量系统各组件的刻度因数可根据任何合适的方法确定,用来确定刻度因数的波形应在下面描述的卷积法的覆盖范围之内。

动态特性由测量系统各组件的阶跃响应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,可以估算测量系统各组件对不同波形产生的误差,通过这些误差可以评估其测量不确定度。在标称时段时间范围内,刻度因数的变化应在 $\pm 1\%$ 以内。阶跃波响应应根据 10.4.3.6 进行记

录,同时参考附录 C 和附录 D。

10.4.3.5 参考记录(可选)

若需要用测量系统的阶跃响应进行性能校核,应按照 10.4.3.6 的方法记录测量系统的阶跃响应。阶跃响应应包括在性能记录的记录中作为参考记录(“指纹”),用于检测后续性能校核中动态特性是否发生变化(10.4.5)的判据。

10.4.3.6 阶跃响应记录

对测量系统施加冲击电流,测量其输入输出。用标准测量系统测量输入信号,标准测量系统在关心的频率范围内具有平坦的响应曲线。电流脉冲的波前时间应该比被测系统被认可使用范围内的最短上升时间 t_{min} (见 10.2.9)短。脉冲总时间应与被试系统所要求的冲击类型相符。

10.4.4 对认可测量系统进行的校准和试验

与型式试验要求的符合性,可以通过对具有相同设计的设备进行试验或者根据制造商的数据获得。每一台设备都要进行例行试验。详细情况见 4.6,例外情况见 4.4.2。

10.4.5 性能校核

10.4.5.1 概述

认可测量系统的刻度因数可以通过下述方法之一进行校核。

10.4.5.2 测量系统刻度因数的校核

可按照 5.2.1 的程序与另一认可测量系统进行比对,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%,则应通过性能试验来确定标定刻度因数的新值(见 5.3)。

10.4.5.3 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,用于校准冲击电流测量仪器的冲击校准器的扩展不确定度应不超过 1.5%。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%,则应进行性能试验来确定标定刻度因数的新值。

10.4.5.4 动态特性校核

应按照 10.4.3.2 的程序与另外一个认可测量系统(或标准测量系统)比对进行动态性能校核。

作为替代,在每次校核中都进行阶跃响应测量,以与阶跃响应参考记录(见 10.4.3.5)相同的方式和回路记录阶跃响应结果。阶跃响应记录应与之前的校核进行比较。期望校核之间的变化很小,可接受的变化范围应在较早的校核中确定。对于任何较大的变化,应认真研究并进行性能试验。

10.5 试验程序

试验程序应由相关技术委员会规定,或者基于与客户之间的协议。

11 高压绝缘性能试验中的电流测量

11.1 适用范围

在高压绝缘性能试验中,冲击电流测量系统用于监测雷电冲击电压试验中绝缘材料的击穿,如变压器和电抗器。电流测量系统通常连接于变压器(电抗器)的中性抽头和/或不承受冲击电压的端子。主要目的是为了验证冲击电流幅值随着冲击试验电压的变化而线性变化,以此来说明试验过程中试品内部未发生击穿。对冲击电流实际值的测量没有特殊需求。

注:在冲击电压试验中,流过试品电流波形的分辨率和重复性可能非常重要,在这些情况下,对被测参数的要求应由相关技术委员会中规定。

在高压试验中,所记录电流的时间参数依赖于试品的复阻抗(例如变压器和电抗器)和长绕组的反射,波形是不可预知的,但是,通常可以假设最快的上升时间与施加试验电压的上升时间为同一数量级。由传统的经验估算,最快的冲击波前时间可以假定为 $0.3 \mu\text{s}$ 。

11.2 试验电流的测量

11.2.1 对认可测量系统的要求

通用要求:

- 在一个试验序列中,对波形相同,幅度变化不超过 2 倍的试验波形,刻度因数差别不应超过 1%;
- 动态特性应足以复现波前时间为 $0.3 \mu\text{s}$ 的冲击电流波形。

11.2.2 不确定度分量

不确定度的估算需要考虑冲击电流测量系统的短时稳定性和线性度。

11.2.3 动态特性

电流测量系统的动态特性应充分覆盖在高压绝缘试验中可能遇到的波形。这一条件可根据第 10 章中对 1/20 型冲击电流测量系统的要求执行。

11.2.4 认可测量系统的校准和试验

见表 12。

表 12 高压绝缘试验中冲击电流要求的试验

试验类型	型式试验	例行试验	性能试验	性能校核
校准测量系统的刻度因数			不适用	
刻度因数校核				10.4.5
线性度		5.3 (如果适用)	5.3 (如果适用)	
测量系统的动态特性	10.4.3 (如果适用)		10.4.3 (如果适用)	10.4.5.4 (如果适用)
转换装置的短时稳定性		5.5		
长期稳定性				

表 12 (续)

试验类型	型式试验	例行试验	性能试验	性能校核
环境温度影响				
邻近回路电流对转换装置的影响				
软件影响	5.9 (如果适用)			
有源传输系统的干扰试验, 干扰比			5.12	
测量系统的干扰试验, 干扰比			5.12	
转换装置的干式耐压试验		5.13.1 (如果适用)		
电流耐受试验		5.13.2		
转换装置的刻度因数		5.2		
除电缆外的传输系统的刻度因数		5.2		
测量仪器的刻度因数		5.2		
责任	组件由制造商负责		系统由使用者负责	
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 (型式和例行试验)		视其稳定性, 但至少 5 年 1 次	视其稳定性, 但至少每年一次

与型式试验要求的符合性, 可以通过对具有相同设计的设备进行试验或者根据制造商的数据获得。每一台设备都要进行例行试验。详细情况见 4.6, 例外情况见 4.4.2。

11.2.5 性能校核

用于高压绝缘试验的冲击电流测量系统的性能校核主要包括短时稳定性和动态性能。性能校核的方法和要求见 10.4.5。

11.2.6 线性度试验

见 5.3。

11.2.7 干扰试验

干扰试验及要求见 5.12。

11.3 试验程序

试验程序应由相关技术委员会规定, 或者基于与客户之间的协议。

12 标准测量系统

12.1 概述

标准测量系统的不确定度值应足够低, 从而满足对认可测量系统进行校准的不确定度要求。标准测量系统应当可以通过一个完整的测量不确定度已知的校准链溯源到国家标准或国际标准。

12.2 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,建议每年校准1次,至少每5年重复1次校准,前提是定期的性能校核表明该标准测量系统是稳定的。

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大电流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处理说明,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 1059.1—2012 规范是我国估算测量不确定度的标准。

JJF 1059.1—2012 作为一个规范,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 1059.1—2012 中提炼出一套特殊规则,用于处理大电流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 1059.1—2012 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 1059.1—2012 的基本原理和在大电流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大电流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

s^2

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.2.7 (标准不确定度的)A类评定

对一系列观测进行统计分析来评定标准不确定度的方法。

A.2.8 (标准不确定度的)B类评定

对一系列观测进行非统计分析来评定标准不确定度的方法。

A.3 模型函数

每一测量可以用一个函数关系 f 描述:

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

式中:

Y —— 被测量;

X_i —— 编号从 1 到 N 的不同的输入量。

在 JJF 1059.1—2012 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,或是它们的合成,一般来说,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 1059.1—2012 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 f 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 $x_{i,k}$ 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 $x_{i,k}$ 所构成的随机变量。一般来说,可假定一个随机变量的 n 个观测值具有正态(高斯)概率分布(图 A.1)。

n 个观测值 $x_{i,k}$ 的算数平均值 \bar{x}_i 定义如下:

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

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:

$$u(x_i) = s(x_i) = \frac{s(x_{i,k})}{\sqrt{n}} \dots\dots\dots (A.3)$$

式中:

$s(x_{i,k})$ —— 各观测值的实验标准偏差。

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

方差 $s^2(x_{i,k})$ 和 $s^2(x_i)$ 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,标准不确定度的可靠性须用有效自由度来校核(见 A.8)。

注: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) 分流器和测量仪器的非线性;
- 4) 短时稳定性,自热;
- 5) 长期稳定性,漂移;
- 6) 测量期间的环境条件;
- 7) 数字仪器的有限分辨率、模拟量仪器的读数;
- 8) 邻近回路电流的影响;
- 9) 电磁干扰;
- 10) 刻度因数随频率或冲击波形的变化;
- 11) 仪器或计算结果采用的软件的影响。

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包含因子 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,其测量不确定度分量为:

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

式中:

k ——包含因子。人们可用置信度表述,如 68.3%、95.45%或 99.7%代替扩展不确定度和包含因子的表述。一般来讲可以假定如图 A.1 所示的正态分布,则上述置信度的表述分别对应包含因子 $k=1$ 、 $k=2$ 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 $a_- \sim a_+$ 区间内。通常,没有 $p(x_i)$ 的详细知识,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 ,即:

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

相关的标准不确定度为:

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

式中: $a = \frac{(a_- - a_+)}{2}$ 。

某些情况下,采用其他概率分布可能更适合,如矩形、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 1059.1—2012 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安全保险原因求得比按 JJF 1059.1—2012 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,如根据温度和电流的关系。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):

$$u_i(y) = c_i u(x_i) \quad \dots\dots\dots (A.8)$$

式中:

c_i ——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差才会在下一步骤中用到。

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

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

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

由式(A.10), $u_c(y)$ 为平方根的正值,即:

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

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 f 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性问题。

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满足要求了。可将合成标准不确定度乘以包含因子 k 来求取。

$$U = k u_c(y) \dots\dots\dots (A.12)$$

式中:

U —— 扩展不确定度;

k —— 包含因子。 $k = 2$ 。用在 y 属于正态分布和 $u_c(y)$ 有足够的可靠度,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,该术语解释为包含因子 $k = 2$ 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。对大电流测量系统的校准,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%。适当的包含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。

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

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 $a_1 \sim a_2$ 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,而包含因子则由表 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。

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

也可用式(A.14)由 ν_{eff} 计算 k :

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

注: 可用软件计算反 t 分布。

A.9 不确定度预算

一个测量的不确定度预算是根据模型函数 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} 。

表 A.2 不确定度预算的示意

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
X_i	x_i	$u(x_i)$	ν_i	c_i	$u_i(y)$
Y	y	—	ν_{eff}	—	$u_c(y)$
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 中对表 A.2 的量进行自动计算。

A.10 测量结果表述

在校准证书以及试验报告中，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：作为示例，电流测量结果可用下列方式之一表述：

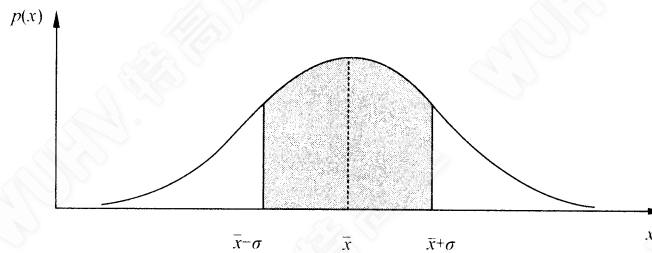
$(227.2 \pm 2.5) \text{ kA}$ ；

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

并应加注说明覆盖概率 p 以及包含因子 k 。

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

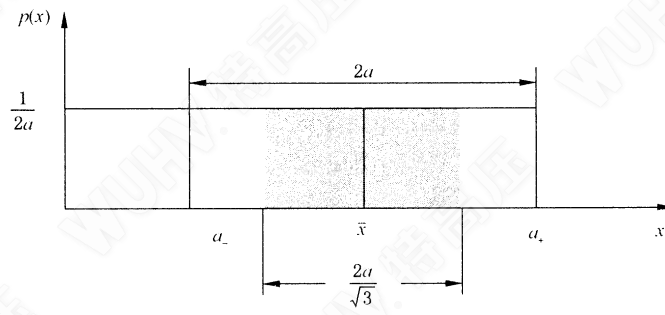
“本报告的扩展不确定度表述为测量不确定度乘以包含因子， $k = 2$ （ $k = XX$ ），相应于覆盖概率约为 95% 的正态分布（ t 分布，且有效自由度 $\nu_{\text{eff}} = YY$ ）。测量的标准不确定度是按 GB/T 16927.2 的方法确定的”。



注 1： σ 表示标准偏差；

注 2：阴影区域表示标准不确定度。

图 A.1 连续随机变量 x 正态概率分布 $p(x)$



注：阴影区域表示标准不确定度。

图 A.2 矩形概率分布 $p(x)$

附录 B
(资料性附录)

大电流测量不确定度计算示例

B.1 概述

校准不确定度和使用已校准的测量系统进行测量的不确定度之间存在明显的区别。

校准不确定度仅在校准时适用,它主要由对标准测量系统的不确定度分析构成,同时也可能包含与被校准系统相关的一些不确定度分量。

使用已校准的测量系统进行测量的不确定度,包括与已校准测量系统相关的校准不确定度和参数,以及使用条件。

本附录给出了使用第 5 章的方法对测量系统进行评估的计算示例。

B.2 示例 1:交流电流测量系统的刻度因数(比对法)

由一个被认可的校准实验室在用户实验室对一个额定测量范围 1 kA~10 kA 的交流电流测量系统(记为 X,最高电流为 $I_{X,max} = 5 \text{ kA}$)进行校准。校准是与标准测量系统(记为 N)进行比对,最高电流为 $I_{N,max} = 5 \text{ kA}$ 。两套系统均有分流器和数字电压表,分别在分流器输出端显示真有效电压值 V_X 和 V_N 。标准测量系统 N 的刻度因数和扩展不确定度为 20 °C 下, $F_N = 10\,025 \text{ A/V}$, $U_N = 0.8\%$ ($k = 2$),包括长期稳定性这一不确定度分量。

校准期间,环境温度为 $15 \text{ °C} \pm 2 \text{ °C}$,由于系统 N 的刻度因数是在 20 °C 下校准的,因此按温度系数为 -0.01% 对刻度因数 F_N 进行修正,由此在 15 °C 下的实际 $F_N = 10\,024 \text{ A/V}$ 。但是这种修正不是很精确,而且由于校准期间温度变化范围为 $\pm 2 \text{ °C}$,因此假定 F_N 的可能值在 F_N 的 $\pm 0.1\%$ 范围内服从矩形分布。对试验回路施加 10 次短时电流,同时读取电压 V_X 和 V_N ,每次施加间隔一段较长的时间以消除温升效应。被校准系统 X 的线性度通过与一个罗哥夫斯基线圈(见 5.2.1.3)在 5 kA~10 kA 范围内进行比对来考查(见 B.3)。

用于计算 F_X 值及其合成标准不确定度的模型公式如下,理想情况下,两套测量系统显示的是同一个交流试验电流 I (见图 B.1),即:

$$I = F_N V_N = F_X V_X \quad \dots\dots\dots (B.1)$$

由此导出计算被校测量系统刻度因数的基本公式:

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

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 $\Delta F_{X1}, \Delta F_{X2}, \dots$ (前者决定了校准不确定度,后者组成了使用被校准测量系统进行测量的不确定度)。一般说来,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 u_i 。用误差来修正刻度因数,修正值具有相反的符号。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,半宽为 a_i ,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 除以包含因子 k 来求得。

分量 $\Delta F_{N,m}$ 或 $\Delta F_{X,j}$ 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_x 。

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

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

注1: 根据定义,等式两边均加入带符号的误差项,定义为 $\Delta F = \text{测量值} - \text{标准值}$ 。通过比对法确定的交流测量系统的刻度因数 $F_{N,cal}$ 可表示为:

$$F_{N,cal} = \overline{\left(\frac{V_N}{V_N}\right)} \times (F_N - \Delta F_{N,comp}) = \overline{\left(\frac{V_N}{V_N}\right)} \times F_N \times \left(1 - \frac{\Delta F_{N,comp}}{F_N}\right) \quad \dots\dots\dots (B.4)$$

式中:

$\Delta F_{N,comp}$ —— 标准测量系统在较低温度使用下产生的不确定度分量;

$\overline{\left(\frac{V_N}{V_N}\right)}$ —— 比对测量中算式 $q = V_N / V_N$ 的算术平均值。

测量系统 X 与标准系统 N 的比对测量产生 10 对测量值 V_N 和 V_N ,由此可计算 V_N / V_N 之商值,相应的平均值以及实验标准偏差 $s(V_N / V_N)$ (见表 B.1)。表 B.1 给出了约 25% $I_{N,max}$ 电流下测量值的示例。使用同样的方法,可得到最大电流 5 kA, $g = 3$ 个试验电流等级下的 V_N / V_N 商值、相应的平均值以及实验标准偏差 $s(V_N / V_N)$ (见表 B.2)。线性度试验结果见表 B.3。

表 B.1 单个电流下比对测量结果

测量次数	标准系统 V_N / V	被试系统 V_N / V	商 V_N / V_N
1	0.191 4	0.190 8	1.003 4
2	0.191 6	0.190 9	1.003 7
3	0.190 7	0.189 9	1.001 2
4	0.189 9	0.189 0	1.001 8
5	0.190 9	0.189 0	1.010 1
6	0.191 2	0.190 2	1.005 3
7	0.191 3	0.190 4	1.001 7
8	0.191 2	0.190 1	1.001 2
9	0.190 6	0.189 9	1.003 7
10	0.191 3	0.190 7	1.003 1
V_N / V_N 的平均值			1.001 7
实验标准偏差 $s(V_N / V_N)$			0.002 032

$$u_x = u\left(\frac{V_N}{V_N}\right) = \frac{s_x}{\sqrt{n}} = \frac{0.002\ 302}{\sqrt{10}} = 0.000\ 64 \quad \dots\dots\dots (B.5)$$

表 B.2 h=3 个电流等级下结果汇总

电流等级数 g	电流水平 $I_{N,max}$ 的百分数	V_N/V_N	$s(V_N/V_N)$	u_{N_g}
1	10	1.004 2	0.002 44	0.000 77
2	25	1.004 7	0.002 03	0.000 64
3	50	1.003 7	0.002 88	0.000 91(= u_{max})
平均值		1.004 2		

据此,通过与标准系统进行比对得到的刻度因数可评估为:

$$F_N = 10.024 \times 1.004 2 = 10.066,1 \quad \dots\dots\dots (B.6)$$

V_N/V_N 的不确定度评定为:

$$u_F = \sqrt{\frac{1}{3} \left(\max_{\epsilon=1}^3 \left| \frac{F_g}{F} - 1 \right| \right)^2 + [\max_{\epsilon=1}^3 (u_{N_g})]^2} = \sqrt{\frac{1}{3} (0.000 5)^2 + (0.000 91)^2} = 0.001 0 \quad \dots\dots\dots (B.7)$$

不确定度评定结果表 B.3 列出了模型等式(B.4)右侧输入量的数值及其标准不确定度,自由度依据式(A.13)确定。评定结果包含刻度因数及其标准不确定度,表中最后一行给出了其有效自由度, $\nu_{eff} = 55$ 表示 F_N 可能值属正态分布,因此 $k=2$ 是有效的(见表 A.1)。

表 B.3 标定刻度因数 F_N 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
V_N/V_N	1.004 2	0.001 ^a	9	10.024	10.02
F_N	10.025	40.1 ^a	50	1.004 2	40.26
$\Delta F_{N,temp}$	1.002 5	5.79 ^b	∞	1.004 2	5.81
F_N	10.066,1		55		41.9

^a 正态分布。
^b 矩形分布。

表 B.3 中的合成标准不确定度为

$$u_{cal} = \sqrt{u_{V_N/V_N}^2 + u_{F_N}^2 + u_{\Delta F_{N,temp}}^2} = \sqrt{10.02^2 + 40.26^2 + 5.81^2} = 42 \quad \dots\dots\dots (B.8)$$

最终,校准结果的完整表述为 $F_N = F_{N,cal} = 10.066 \pm 84 = 10.066 \times (1 \pm 0.008 4)$,覆盖概率不小于 95% ($k=2$)。

刻度因数校准的扩展不确定度为 $U_{cal} = 0.84\%$,使用该测量系统进行的测量的不确定度,需要考虑更多不确定度因素。

B.3 示例 2:使用认可测量系统进行的测量不确定度评估

B.2 中描述了认可的交流测量系统 X 的校准情况,其刻度因数为 $F_N = 10.066,1$,校准的扩展不确定度为 $U_{cal} = 0.8\%$ ($k=2$)。其从 5 kA~10 kA 的线性度通过一个罗哥夫斯基线圈进行考察(结果见表 B.4),对动态特性、短时稳定性、温度间隔时间以及的干扰的研究表明,这些因素对 F_N 的影响为每种因

素±0.2%。根据制造商的数据,在下次校准前, F_X 的长时间稳定性的影响在±0.3%范围。由于测量系统 X 安装在用户试验厅的固定位置,邻近回路电流的影响已在校准中体现,不需要单独考虑。

校准刻度因数 $F_{X,mes}$ 的模型等式及其扩展标准不确定度为:

$$F_{X,mes} = F_{X,cal} - \Delta F_{X,lin} - \Delta F_{X,st} - \Delta F_{X,lt} - \Delta F_{X,dyn} - \Delta F_{X,temp} \dots\dots\dots (B.9)$$

式中:

$F_{X,cal}$ —— 比对法测得的刻度因数结果(见式 B.2);

$\Delta F_{X,lin}$ —— 线性度试验分量;

$\Delta F_{X,st}$ —— 系统短时稳定性分量;

$\Delta F_{X,lt}$ —— 系统长期稳定性分量;

$\Delta F_{X,dyn}$ —— 系统动态特性分量;

$\Delta F_{X,temp}$ —— 使用系统的温度间隔引入的分量。

系统的刻度因数数值及其不确定度受漂移、温度等因素的影响。

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数值及其不确定度。上面列出了本例中的影响分量。一般说来,影响刻度因数 F_X 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,修正值具有与误差相反的符号。不确定度分量评定方法如 A.5 中所述,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 $u_i = \frac{a}{\sqrt{3}}$;或者,用被校组件的扩展不确定度 U 除以包含因子 k 来求得。分量 $F_{X,i}$ 并不总是有误差(或假定误差很小可以忽略),此时仅需考虑不确定度分量 u_i ,线性度试验结果见表 B.4。

表 B.4 线性度试验结果

电流等级数 g	电流水平 $I_{X,max}$ 的百分数	F_{Xg}	$(F_{Xg} - F_{Xc}) - 1$
4	50	10 064.1	-0.001 9
5	75	10 077.2	-0.000 6
6	100	10 107.4	+0.002 4
平均值		10 082.9	

依据 5.3 评估相对标准不确定度为:

$$u_{lin} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times \max_{g=1}^6 \left| \frac{F_{Xg}}{F_{Xc}} - 1 \right| = 0.001 4 \dots\dots\dots (B.10)$$

标准不确定度评定结果(表 B.5)列出了模型等式(式 B.5)右侧输入量的数值及其标准不确定度,自由度依据式(A.13)确定。评定结果包含刻度因数及其合成标准不确定度,表中最后一行给出了其有效自由度, $\nu_{eff} = 118$ 表示 F_X 可能值属正态分布,因此 $k = 2$ 是有效的(表 B.5)。

表 B.5 刻度因数 $F_{X,mes}$ 的不确定度评定结果

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
$F_{X,cal}$	10 066.1	41.9 ^a	50	1.0	41.1
$\Delta F_{X,lin}$	0	44.1 ^b	∞	-1.0	-44.1

表 B.5 (续)

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
$\Delta F_{X,st}$	0,0	11,6 ^b		-1,0	-11,6
$\Delta F_{X,t}$	0,0	17,1 ^b		-1,0	-17,1
$\Delta F_{X,dyn}$	0,0	11,6 ^b		-1,0	-11,6
$\Delta F_{X,temp}$	0,0	11,6 ^b		-1,0	-11,6
$\Delta F_{X,pro$					
$F_{X,mes}$	10 066,1		118		51
正态分布 ^b 矩形分布					

表 B.5 中的合成标准不确定度 u_{mes} 计算为:

$$u_{mes} = \sqrt{u_{X,cal}^2 + \sum_{i=1}^6 u_{X,i}^2} = \sqrt{u_{X,cal}^2 + u_{X,lim}^2 + u_{X,st}^2 + u_{X,t}^2 + u_{X,dyn}^2 + u_{X,temp}^2 + u_{X,pro}^2}$$

$$= \sqrt{11,9^2 + 11,1^2 + 11,6^2 + 17,1^2 + 11,6^2 + 11,6^2 + 0^2} = 51,0 \dots\dots\dots (B.11)$$

最终,使用认可测量系统进行测量时认可测量系统的刻度因数的完整表述为 $F_{X,mes} = 10\,066 \pm 102 = 10\,066 \times (1 \pm 0,010)$,覆盖概率不小于 95% ($k=2$)。

该测量系统使用时刻度因数的扩展不确定度为 $U_{mes} = 1,0\%$ 。在下次校准前,此扩展不确定度值可作为扩展测量不确定度的最大值。

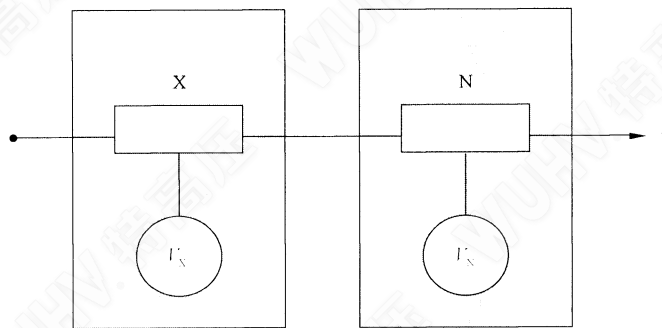


图 B.1 校准系统 X 和标准系统 N 的比对

B.4 短时交流电流测量系统不确定度计算示例

B.4.1 概述

B.4 给出了使用第 5 章和第 9 章的方法对短时交流电流测量系统进行评估的计算示例,同时参考了 STL(国际短路试验联盟)技术报告《大容量实验室以 STL 标准分流器为基准的大电流测量系统的溯源》。

短时交流电流测量系统(记为 X)由 Rogowski 线圈(含积分放大器)和波形记录仪以及进行数据处

理读数的软件组成。标定测量范围有效值为 3 kA~120 kA, 峰值 7.5 kA~300 kA。

短时交流电流标准测量系统(记为 N)由标准分流器和波形记录仪以及进行数据处理读数的软件组成。标定测量范围有效值为 1 kA~140 kA, 最大峰值 350 kA。

由一个被认可的校准实验室在用户实验室使用系统 N 对系统 X 进行校准。

对系统 X 测量不确定度的评估按照峰值和有效值分别进行。

校准试验是系统 X 与系统 N 进行比对, 在 $a=2$ 个电流水平下进行, 保证最大校准电流不低于系统 X 标定测量范围最大值的 5%。

依据 5.3 进行线性度试验。系统 X 与系统 N 进行比对, 在 $b=6$ 个电流水平下进行, 其中一个电流水平应等于系统 X 最高电流水平, 所选取的电流按照最高电流水平的 10%、20%、40%、60%、80%、100% 进行。

B.4.2 示例 1: 短时交流电流测量系统的有效值刻度因数校准及其校准不确定度的评估(比对法)

校准试验电流类型为对称电流, 电流持续时间 100 ms, 两个电流水平电流有效值为 3 kA 和 12 kA 各 10 次, 系统 N 的刻度因数和测量电流有效值的扩展不确定度为: 23 °C 下, $F_N = 24.23 \text{ kA/V}$ 、 $U_N = 0.6\%$ ($k=2$), 包括长期稳定性这一不确定度分量。

校准期间, 环境温度为 $25 \text{ °C} \pm 2 \text{ °C}$, 由于系统 N 的刻度因数是在 23 °C 下校准的, 因此根据资料按温度系数为 0.005% 对刻度因数 F_N 进行修正, 经计算对 25 °C 下的实际 F_N 、影响很小忽略不计取 $F_N = 24.23 \text{ kA/V}$ 。但是这种修正不是很精确, 因为环境温度变化范围为 $\pm 2 \text{ °C}$, 而且标准分流器经使用后本体温度一般比环境温高, 因此假定 F_N 的可能值在 F_N 的 $\pm 0.3\%$ ($0 \sim 100 \text{ °C}$) 范围内服从矩形分布。对试验回路施加短时电流, 每次施加间隔一段较长的时间满足标准分流器的正常使用条件。

系统 N 测量电流为 I_N 。用于计算 F_N 值及其合成标准不确定度的模型方程如下, 理想情况下, 两套测量系统显示的是同一个短时交流测试电流 I (见图 B.2), 即:

$$I = I_N = F_N V_N \quad \dots\dots\dots (\text{B.12})$$

由此导出计算被校测量系统刻度因数的基本等式:

$$F_X = \frac{I_N}{V_X} \quad \dots\dots\dots (\text{B.13})$$

在每个电流水平下系统 X 与系统 N 的比对测量产生 10 对测量值 I_N 和 V_X , 由此可计算 F_X , 相应的平均值以及实验标准偏差 $s(F_X)$ 。表 B.6、表 B.7 给出了约 3 kA 和 12 kA 电流下测量值的示例。 $g=2$ 个试验电流水平下的 F_N 、相应的平均值以及实验标准偏差见表 B.8。

表 B.6 3 kA 电流比对测量结果

测量次数	标准系统 I_N / kA	被试系统 V_X / V	F_N
1	3.106	0.062 2	19.935 7
2	3.036	0.060 5	50.181 8
3	2.951	0.059 2	19.898 6
4	3.002	0.060 1	19.950 1
5	2.971	0.059 6	19.819 0
6	2.875	0.057 4	50.087 1
7	2.923	0.058 3	50.137 2
8	3.085	0.061 6	50.081 2
9	2.906	0.058 1	50.017 2

表 B.6 (续)

测量次数	标准系统 I_N /kA	被试系统 V_N /V	F_N
10	3.133	0.062 5	50.128 0
F_N 的平均值			50.026 6
相对实验标准偏差 $s_g(F_N)$			0.002 263

$$u_g = u(F_N) = \frac{s_g}{\sqrt{n}} = \frac{0.002\ 263}{\sqrt{10}} = 0.000\ 716 \dots\dots\dots (B.14)$$

表 B.7 12 kA 电流比对测量结果

测量次数	标准系统 I_N /kA	被试系统 V_N /V	F_N
1	12.056	0.241 0	50.024 9
2	11.755	0.234 5	50.127 9
3	12.294	0.245 0	50.179 6
4	11.628	0.232 7	49.969 9
5	12.224	0.243 8	50.139 5
6	11.620	0.232 4	50.000 0
7	11.842	0.235 8	50.220 5
8	12.151	0.242 0	50.210 7
9	12.336	0.247 1	49.923 1
10	11.497	0.229 5	50.095 9
F_N 的平均值			50.089 2
相对实验标准偏差 $s_g(F_N)$			0.002 085

$$u_g = u(F_N) = \frac{s_g}{\sqrt{n}} = \frac{0.002\ 085}{\sqrt{10}} = 0.000\ 659 \dots\dots\dots (B.15)$$

表 B.8 $g = 2$ 个电流水平比对测量结果汇总

电流水平数 g	电流水平 $I_{N,max}$ 的百分数/%	F_N	$s_g(F_N)$	u_{Ng}
1	2.5	50.026 6	0.002 3	0.000 716 (= u_{max})
2	10	50.089 2	0.002 1	0.000 659
平均值		50.057 9		

据此,通过与标准系统进行比对得到的刻度因数可评估为:

$$F_N = 50.057\ 9 \dots\dots\dots (B.16)$$

F_N 的不确定度评定为:

$$u_F = \sqrt{\frac{1}{3} \left(\max_{k=1}^2 \left| \frac{F_k}{F} - 1 \right| \right)^2 + \left[\max_{k=1}^2 (u_k) \right]^2} = \sqrt{\frac{1}{3} (0.000\ 625)^2 + (0.000\ 716)^2} = 0.000\ 80$$

.....(B.17)

表 B.9 列出标定刻度因数 F_X 的不确定度预算及相对标准不确定度计算结果,表中最后一行给出了其有效自由度, $\nu_{\text{eff}} = 142$ 表示 F_X 可能值属正态分布,因此 $k = 2$ 是有效的(见附录 A.1)。

表 B.9 标定刻度因数 F_X 的不确定度预算

量	值	自由度	合成相对标准不确定度分量
F_X 的相对标准不确定度分量 ^a	0.000 80	9	0.000 80
系统 N 的相对扩展不确定度 ^a	0.006 0	50	0.003 0
系统 N 温度变化分量 $\Delta F_{N,\text{temp}}$ ^b	0.003 0	∞	0.001 7
系统 N 数据处理软件相对扩展不确定度 ^a	0.003 91	50	0.002 0
F_X	50.057 9	142	0.004 1
^a 正态分布。 ^b 矩形分布。			

表 B.9 中的合成相对标准不确定度为:

$$u_{\text{cal}} = \sqrt{u_{F_X}^2 + u_{F_N}^2 + u_{\Delta F_{N,\text{temp}}}^2 + u_{\text{soft}}^2} = \sqrt{0.000\ 80^2 + 0.003\ 0^2 + 0.001\ 7^2 + 0.002\ 0^2} = 0.004\ 1$$

.....(B.18)

最终,校准结果的完整表述为 $F_X = F_{X,\text{cal}} = 50.057\ 9 \times (1 \pm 0.008\ 2)$,覆盖概率不小于 95% ($k = 2$)。

刻度因数校准的扩展不确定度为 $U_{\text{cal}} = 0.82\%$,使用该测量系统进行的测量的不确定度,需要考虑更多不确定度因素。

B.4.3 示例 2:使用短时交流电流测量系统(认可测量系统)有效值进行的测量不确定度评估

B.4.2 中描述了认可短时交流测量系统 X 的校准情况,其刻度因数为 $F_X = 50.057\ 9$,校准的相对扩展不确定度为 $U_{\text{cal}} = 0.82\%$ ($k = 2$)。其从 12 kA~120 kA 的线性度通过与标准测量系统(记为 N)进行比对,每一个电流水平通流 3 次,试验电流类型为对称电流,电流持续时间 100 ms,计算出相应的线性度分量。同时对测量系统的动态特性、短时稳定性、环境温度影响以及邻近回路电流试验进行了研究测试,并对 F_X 的影响进行了相应计算。刻度因数 $F_{X,\text{mes}}$ 的模型等式及其扩展标准不确定度为:

$$F_{X,\text{mes}} = F_{X,\text{cal}} - \Delta F_{X,\text{lin}} - \Delta F_{X,\text{st}} - \Delta F_{X,\text{dyn}} - \Delta F_{X,\text{temp}} - \Delta F_{X,\text{prox}} - \Delta F_{X,\text{soft}}$$

.....(B.19)

式中:

$F_{X,\text{cal}}$ —— 比对法测得的刻度因数结果(见式 B.13);

$\Delta F_{X,\text{lin}}$ —— 线性度试验分量;

$\Delta F_{X,\text{st}}$ —— 系统短时稳定性分量;

$\Delta F_{X,\text{dyn}}$ —— 系统动态特性分量;

$\Delta F_{X,\text{temp}}$ —— 使用系统的温度间隔引入的分量;

$\Delta F_{X,\text{prox}}$ —— 邻近回路引入的分量;

$\Delta F_{X,\text{soft}}$ —— 数据处理软件引入的分量。

系统的刻度因数及其不确定度受漂移、温度等因素的影响。上面列出了本例中的影响分量。一般说来,影响刻度因数 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,修正值具有

与误差相反的符号。不确定度分量评定方法如 A.5 中所述,即若假定在 $\pm a_i$ 区间内是矩形概率分布,则其扩展不确定度 $u_i = \frac{a_i}{\sqrt{3}}$;或者,用被校组件的扩展不确定度 U 除以包含因子 k 来求得。分量 F_{X_i} 并不总是有误差(或假定误差很小可以忽略),此时仅需考虑不确定度分量 u_i 。

1) 系统 X 线性度引入的不确定度分量

表 B.10、表 B.11、表 B.12 仅列出了部分等级电流的比对测量结果数据,线性度试验结果见表 B.13。

表 B.10 10%电流水平下比对测量结果

测量次数	标准系统 I_N /kA	被试系统 V_N /V	F_N
1	12.151	0.242 0	50.210 7
2	12.336	0.247 1	49.923 1
3	11.497	0.229 5	50.095 9
F_N 的平均值			50.076 6

表 B.11 20%电流水平下比对测量结果

测量次数	标准系统 I_N /kA	被试系统 V_N /V	F_N
1	24.324 5	0.486 3	50.019 5
2	23.476 5	0.469 7	49.981 9
3	24.092 6	0.480 1	50.182 5
F_N 的平均值			50.061 3

表 B.12 80%电流水平下比对测量结果

测量次数	标准系统 I_N /kA	被试系统 V_N /V	F_N
1	93.191	1.863 1	50.020 9
2	96.212	1.932 2	49.809 5
3	95.866	1.918 6	49.966 6
F_N 的平均值			49.932 4

表 B.13 线性度试验结果

电流水平数 g	电流水平 $I_{N,max}$ 的百分数 /%	F_{Ng}	$\left \frac{F_{Ng}}{F_{N0}} - 1 \right $
3	10	50.076 6	0.001 258
4	20	50.061 3	0.000 952
5	40	50.101 0	0.001 746
6	60	50.097 2	0.001 670
7	80	49.932 4	0.001 625

表 B.13 (续)

电流水平数 g	电流水平 $I_{N,max}$ 的百分数 %	F_{Nc}	$\left \frac{F_{Nc}}{F_{Nc}} - 1 \right $
8	100	19.813 6	0.001 001
平均值		50.013 7	

依据5.3评估相对标准不确定度为:

$$u_{lim} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times \max_{g=1}^8 \left| \frac{F_{Nc}}{F_{Nc}} - 1 \right| = 0.002 3 \dots\dots\dots (B.20)$$

2) 测量系统的短时稳定性引入的不确定度分量

根据5.5在 12 kA 电流下对系统 X 进行了短时稳定性试验,试验结果进行如下计算:

$$u_{st} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times \left| \frac{F_{after}}{F_{before}} - 1 \right| = \frac{1}{\sqrt{3}} \times \left| \frac{50.193 3}{50.093 2} - 1 \right| = 0.001 2 \dots\dots\dots (B.21)$$

3) 测量系统的温度效应引入的不确定度分量

根据5.7在 12 kA 电流下对系统 X 进行了 -10 °C、50 °C 的刻度系数试验,对结果进行如下计算:

$$u_{temp} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times \max \left| \frac{F_{T_i}}{F_{cal}} - 1 \right| \dots\dots\dots (B.22)$$

式中:

F_{T_i} —— 特定温度时的刻度因数;

F_{cal} —— 校准确定的刻度因数。

计算结果见表 B.14。

表 B.14 12 kA 电流下温度结果

测量温度 / °C	F_N	$\left \frac{F_{T_i}}{F_{cal}} - 1 \right $
-10	19.968 0	0.001 796
50	50.298 6	0.004 808
校准确定的刻度因数	50.057 9	

取其中最大值,计算如下:

$$u_{temp} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times 0.004 808 = 0.002 8 \dots\dots\dots (B.23)$$

4) 测量系统的动态特性引入的不确定度分量

根据 5.4,对系统 X 进行了 20 Hz、50 Hz、1 kHz、5 kHz、10 kHz 的动态特性试验,试验波形为振荡衰减正弦波,每个频率下正负极性各 10 次,最大峰值电流为 30 kA,试验结果进行如下计算:

$$u_{dyn} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times \max_{i=1}^k \left| \frac{F_i}{\bar{F}} - 1 \right| \dots\dots\dots (B.24)$$

式中:

k —— 在冲击参数范围或频率范围内确定刻度因数的数量;

F_i —— 各个刻度因数;

\bar{F} —— 在冲击参数范围或频率范围内刻度因数的平均值。

测试结果见表 B.15。

表 B.15 动态特性测试结果

测量频率/Hz	F_X	$\left \frac{F_i}{\bar{F}} - 1 \right $
20	50.042 6	0.000 158
50	50.050 5	0.000 000
1 000	49.937 5	0.002 258
5 000	49.897 4	0.003 059
10 000	49.857 4	0.003 858

大容量试验电流波形通常为混频信号,其基波频率为 50 Hz,取 F (50 Hz) 为 \bar{F} 。取其中最大值,计算如下:

$$u_{\text{dyn}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times 0.003\ 858 = 0.002\ 2 \quad \dots\dots\dots (\text{B.25})$$

5) 测量系统的邻近回路试验引入的不确定度分量

根据 5.8 对系统 X 进行了邻近回路试验, I_{nearby} 电流有效值 96 kA, I_{prox} 有效值 25 A, 则

$$u_{\text{prox}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times \left| \frac{i_{\text{prox}}}{i_{\text{nearby}}} \right| = 0.000\ 15 \quad \dots\dots\dots (\text{B.26})$$

6) 测量系统软件引入的不确定度分量

根据 5.9, 使用 TDG 对系统 X 测试软件进行有效值计算方法评估, 结果其相对扩展不确定度为 0.391% ($k=2$), $u_{X,\text{soft}} = 0.002\ 0$ 。

表 B.16 列出了刻度因数 $F_{X,\text{mes}}$ 不确定度预算及相对标准不确定度计算结果, 自由度依据式 (A.13) 确定。评定结果包含刻度因数及其合成标准不确定度, 表中最后一行给出了其有效自由度, $\nu_{\text{eff}} = 232$ 表示 F_X 可能值属正态分布, 因此 $k=2$ 是有效的。

表 B.16 刻度因数 $F_{X,\text{mes}}$ 的不确定度预算及标准不确定度计算结果

量	值	自由度	合成相对标准不确定度分量
相对扩展不确定度 $F_{X,\text{cal}}^a$	0.008 2	50	0.004 1
$u_{X,\text{lin}}^b$	0.002 0	∞	0.002 0
$u_{X,\text{st}}^b$	0.001 2	∞	0.001 2
$u_{X,\text{dyn}}^b$	0.002 2	∞	0.002 2
$u_{X,\text{temp}}^b$	0.002 8	∞	0.002 8
$u_{X,\text{prox}}^b$	0.000 15	∞	0.000 15
$u_{X,\text{soft}}^a$	0.002 0	50	0.002 0
$F_{X,\text{mes}}$	50.057 9	232	0.006 4

^a 正态分布。
^b 矩形分布。

表 B.16 中的合成标准不确定度 u_{mes} 计算为:

$$u_{\text{mes}} = \sqrt{u_{X,\text{cal}}^2 + u_{X,\text{lin}}^2 + u_{X,\text{st}}^2 + u_{X,\text{dyn}}^2 + u_{X,\text{temp}}^2 + u_{X,\text{prox}}^2 + u_{X,\text{soft}}^2}$$

$$= \sqrt{0.0041^2 + 0.0023^2 + 0.0012^2 + 0.0022^2 + 0.0028^2 + 0.00015^2 + 0.0020^2} = 0.0064 \dots\dots\dots (B.27)$$

最终,系统 X 的刻度因数的完整表述为 $F_{X,mcs} = 50.0579 \times (1 \pm 0.013)$,覆盖概率不小于 95% ($k=2$)。该测量系统使用时刻度因数的扩展不确定度为 $U_{mcs} = 1.3\%$ 。在下次校准前,此扩展不确定度值可作为扩展测量不确定度的最大值。

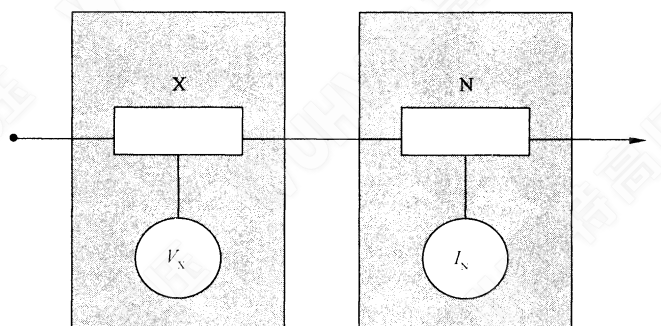


图 B.2 校准系统 X 和标准系统 N 的比对示意图

B.4.4 示例 3: 短时交流电流测量系统的峰值刻度因数校准及其校准不确定度的评估(比对法)

校准试验电流类型为非对称电流(峰值因数为 2.5),最大电流峰值为 7.5 kA 和 30 kA 两个电流水平,每个电流水平正负极性各 10 次,电流持续时间为 100 ms,每次施加间隔一段较长的时间满足标准分流器的正常使用条件。系统 N 的测量电流峰值的扩展不确定度为: $U_N = 0.76\%$ ($k=2$),包括长期稳定性这一不确定度分量。校准期间,环境温度为 $25\text{ }^\circ\text{C} \pm 2\text{ }^\circ\text{C}$,考虑到标准分流器的实际工作温度,假定 F_N 的可能值在 $\pm 0.3\%$ ($0 \sim 100\text{ }^\circ\text{C}$) 范围内服从矩形分布。

系统 N 测量电流为 I_N 。用于计算 F_X 值及其合成标准不确定度的模型方程如下,理想情况下,两套测量系统显示的是同一个短时交流测试电流 I (见图 B.2),即:

$$I = I_N = F_X V_X \dots\dots\dots (B.28)$$

由此导出计算被校测量系统刻度因数的基本等式:

$$F_X = \frac{I_N}{V_X} \dots\dots\dots (B.29)$$

每个电流水平下,系统 X 与系统 N 的比对测量产生 10 对测量值 I_N 和 V_X ,由此可计算 F_X ,相应的平均值以及实验标准偏差 $s(F_X)$ 。表 B.17、表 B.18、表 B.19、表 B.20 分别给出了 +7.5 kA、-7.5 kA、30 kA 和 -30 kA 电流下测量值的示例。 $g=2$ 个试验电流水平下的 F_X 、相应的平均值以及实验标准偏差见表 B.21。

表 B.17 +7.5 kA 电流下比对测量结果

测量次数	标准系统 I_N /kA	被试系统 V_X /V	F_X
1	7.189	0.143 1	50.237 6
2	7.322	0.146 4	50.013 7
3	7.822	0.156 4	50.012 8
4	7.492	0.150 2	49.880 2
5	7.465	0.149 3	50.000 0
6	7.303	0.145 9	50.054 8

表 B.17 (续)

测量次数	标准系统 I_N /kA	被试系统 V_N /V	F_N
7	7.537	0.150 5	50.079 7
8	7.672	0.153 6	49.947 9
9	7.505	0.150 3	49.933 5
10	7.634	0.151 9	50.256 7
F _N 的平均值			50.041 7
相对实验标准偏差 $s_r(F_N)$			0.002 458

$$u_g = u(F_N) = \frac{s_g}{\sqrt{n}} = \frac{0.002\ 458}{\sqrt{10}} = 0.000\ 777 \quad \dots\dots\dots(B.30)$$

表 B.18 -7.5 kA 电流下比对测量结果

测量次数	标准系统 I_N /kA	被试系统 V_N /V	F_N
1	-7.788	-0.156 2	49.859 2
2	-7.512	-0.150 0	50.080 0
3	-7.485	-0.149 0	50.234 9
4	-7.321	-0.146 6	49.938 6
5	-7.490	-0.149 3	50.167 4
6	-7.458	-0.149 6	49.852 9
7	-7.709	-0.153 7	50.156 1
8	-7.462	-0.148 7	50.181 6
9	-7.468	-0.149 7	49.886 4
10	-7.665	-0.153 0	50.098 0
F _N 的平均值			50.045 5
相对实验标准偏差 $s_r(F_N)$			0.002 934

$$u_g = u(F_N) = \frac{s_g}{\sqrt{n}} = \frac{0.002\ 934}{\sqrt{10}} = 0.000\ 928 \quad \dots\dots\dots(B.31)$$

表 B.19 +30 kA 电流下比对测量结果

测量次数	标准系统 I_N /kA	被试系统 V_N /V	F_N
1	28.592	0.569 4	50.214 3
2	30.732	0.612 9	50.141 9
3	29.939	0.598 9	49.990 0
4	30.329	0.607 0	49.965 4

表 B.19 (续)

测量次数	标准系统 I_N /kA	被试系统 V_N /V	F_N
5	30.230	0.604 9	49.975 2
6	31.078	0.622 8	49.900 4
7	30.916	0.618 3	50.001 6
8	30.302	0.606 0	50.003 3
9	29.049	0.579 1	50.162 3
10	31.159	0.621 3	50.151 3
F _N 的平均值			50.050 6
相对实验标准偏差 $s_g(F_N)$			0.002 122

$$u_g = u(F_N) = \frac{s_g}{\sqrt{n}} = \frac{0.002\ 122}{\sqrt{10}} = 0.000\ 671 \dots\dots\dots (B.32)$$

表 B.20 -30 kA 电流下比对测量结果

测量次数	标准系统 I_N /kA	被试系统 V_N /V	F_N
1	-31.436	-0.627 8	50.073 3
2	-29.219	-0.585 1	49.938 5
3	-29.004	-0.578 3	50.153 9
4	-30.638	-0.612 6	50.013 1
5	-30.065	-0.602 2	49.925 3
6	-28.952	-0.576 5	50.220 3
7	-30.546	-0.608 6	50.190 6
8	-30.954	-0.618 8	50.022 6
9	-28.949	-0.578 3	50.058 8
10	-30.478	-0.609 0	50.046 0
F _N 的平均值			50.064 2
相对实验标准偏差 $s_g(F_N)$			0.001 978

$$u_g = u(F_N) = \frac{s_g}{\sqrt{n}} = \frac{0.001\ 978}{\sqrt{10}} = 0.000\ 626 \dots\dots\dots (B.33)$$

表 B.21 $g = 2$ 个电流水平(正负) $\varepsilon = 4$ 结果汇总

电流水平数 g	电流水平 $I_{X,\max}$ 的百分数 / %	F_X	$s_k(F_X)$	u_{Xg}
1	+2.5	50.041 7	0.002 5	0.000 777
	-2.5	50.045 5	0.002 9	0.000 928
2	+10	50.050 6	0.002 1	0.000 671
	-10	50.064 2	0.002 0	0.000 626
平均值		50.050 5		

据此,通过与标准系统进行比对得到的刻度因数可评估为:

$$F_X = 50.050 5 \dots\dots\dots (B.34)$$

F_X 的不确定度评定为:

$$u_F = \sqrt{\frac{1}{3} \left(\max_{\varepsilon=1} \left| \frac{F_g}{F} - 1 \right| \right)^2 + \left(\max_{\varepsilon=1} u_g \right)^2} = \sqrt{\frac{1}{3} (0.000 298)^2 + (0.000 917)^2} = 0.000 933 \dots\dots\dots (B.35)$$

表 B.22 列出标定刻度因数 F_X 的不确定度预算及相对标准不确定度计算结果,表中最后一行给出了其有效自由度, $\nu_{\text{eff}} = 80$ 表示 F_X 可能值属正态分布,因此 $k = 2$ 是有效的(见附录 A.1)。

表 B.22 标定刻度因数 F_X 的不确定度预算

量	值	自由度	合成相对标准不确定度分量
F_X 的相对标准不确定度分量 ^a	0.000 941	9	0.000 941
系统 N 的相对扩展不确定度 ^a	0.007 6	50	0.003 8
系统 N 温度变化分量 $\Delta F_{N,\text{temp}}$ ^b	0.003 0	∞	0.001 7
系统 N 数据处理软件相对扩展不确定度 ^a	0.001 28	50	0.000 64
F_X	50.050 5	80	0.004 3

^a 正态分布。
^b 矩形分布。

表 B.3 中的合成标准不确定度为:

$$u_{\text{cal}} = \sqrt{u_{F_X}^2 + u_{F_N}^2 + u_{\Delta F_{N,\text{temp}}}^2 + u_{\text{soft}}^2} = \sqrt{0.000 941^2 + 0.003 8^2 + 0.001 7^2 + 0.000 64^2} = 0.004 3 \dots\dots\dots (B.36)$$

最终,校准结果的完整表述为 $F_X = F_{X,\text{cal}} = 50.050 5 \times (1 \pm 0.008 6)$,覆盖概率不小于 95% ($k = 2$) 峰值刻度因数校准的相对扩展不确定度为 $U_{\text{cal}} = 0.86\%$,使用该测量系统进行的测量的不确定度,需要考虑更多不确定度因素。

B.4.5 示例 4:使用短时交流电流测量系统(认可测量系统)峰值进行的测量不确定度评估

B.4.4 中描述了认可交流测量系统 X 的峰值刻度因数校准情况,其刻度因数为 $F_X = 50.050 5$,校准的相对扩展不确定度为 $U_{\text{cal}} = 0.86\%$ ($k = 2$)。其从 30 kA~300 kA 的线性度通过与标准测量系统(记为 N)进行比对,计算出相应的线性度分量。同时对测量系统动态特性、短时稳定性、环境温度影响以及

邻近回路电流试验进行了研究测试,并对 F_X 的影响进行了相应计算。校准刻度因数 $F_{X,mcs}$ 的模型等式及其扩展标准不确定度为:

$$F_{X,mcs} = F_{X,cal} - \Delta F_{X,lin} - \Delta F_{X,st} - \Delta F_{X,dyn} - \Delta F_{X,temp} - \Delta F_{X,prox} - \Delta F_{X,soft} \dots\dots\dots (B.37)$$

式中:

$F_{X,cal}$ —— 比对法测得的刻度因数结果[见式(B.29)];

$\Delta F_{X,lin}$ —— 线性度试验分量;

$\Delta F_{X,st}$ —— 系统短时稳定性分量;

$\Delta F_{X,dyn}$ —— 系统动态特性分量;

$\Delta F_{X,temp}$ —— 使用系统的温度间隔引入的分量;

$\Delta F_{X,prox}$ —— 邻近回路电流引入的分量;

$\Delta F_{X,soft}$ —— 数据处理软件引入的分量。

系统的刻度因数及其不确定度受漂移、温度等因素的影响。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及其不确定度。上面列出了本例中的影响分量。一般说来,影响刻度因数 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,修正值具有与误差相反的符号。不确定度分量评定方法如 A.5 中所述,即若假定在 $\pm a_i$ 区间内是矩形概率分布,则其扩展不确定度 $u_i = \frac{a}{\sqrt{3}}$;或者,用被校组件的扩展不确定度 U 除以包含因子 k 来求得。分量 $F_{X,i}$ 并不总是有误差(或假定误差很小可以忽略),此时仅需考虑不确定度分量 u_i 。

1) 测量系统线性度引入的不确定度分量

表 B.23~表 B.28 仅列出了部分等级电流的比对测量结果数据,线性度试验结果见表 B.29。

表 B.23 +10%电流水平下比对测量结果

测量次数	标准系统 I_N /kA	被试系统 V_X /V	F_X
1	28.592	0.569 4	50.214 3
2	30.732	0.612 9	50.141 9
3	29.939	0.598 9	49.990 0
F _X 的平均值			50.115 4

表 B.24 -10%电流水平下比对测量结果

测量次数	标准系统 I_N /kA	被试系统 V_X /V	F_X
1	-31.436	-0.627 8	50.073 3
2	-29.219	-0.585 1	49.938 5
3	-29.004	-0.578 3	50.153 9
F _X 的平均值			50.055 2

表 B.25 +20%电流水平下比对测量结果

测量次数	标准系统 I_N / kA	被试系统 V_N / V	F_N
1	59,360 7	1,185 0	50,093 4
2	61,889 7	1,235 4	50,096 9
3	60,634 2	1,209 9	50,115 1
F_N 的平均值			50,101 8

表 B.26 -20%电流水平下比对测量结果

测量次数	标准系统 I_N / kA	被试系统 V_N / V	F_N
1	62,166 9	1,247 7	49,825 2
2	59,909 1	1,193 7	50,187 7
3	59,360 7	1,186 2	50,012 7
F_N 的平均值			50,018 6

表 B.27 +80%电流水平下比对测量结果

测量次数	标准系统 I_N / kA	被试系统 V_N / V	F_N
1	242,066 2	4,826 8	49,150 5
2	236,345 1	4,739 8	49,863 9
3	245,790 2	4,915 9	49,999 0
F_N 的平均值			50,004 5

表 B.28 -80%电流水平下比对测量结果

测量次数	标准系统 I_N / kA	被试系统 V_N / V	F_N
1	216,118 4	4,910 7	50,119 3
2	234,291 5	4,697 7	49,873 4
3	238,617 7	4,768 3	50,043 0
F_N 的平均值			50,011 9

表 B.29 线性度试验结果

电流水平数 g	电流水平 $I_{N,max}$ 的百分数 / %	F_{N_g}	$\left \frac{F_{N_g}}{F_{N_e}} - 1 \right $
3	+10	50,115 4	0,001 857
	-10	50,055 2	0,000 654

表 B.29 (续)

电流水平数 g	电流水平 $I_{N,max}$ 的百分数 %	F_{Nc}	$\left \frac{F_{Nc}}{F_{Nc}} - 1 \right $
1	+20	50,101 8	0,001 585
	-20	50,018 6	0,000 078
5	+10	50,091 2	0,001 373
	-10	50,072 3	0,000 995
6	+60	50,006 0	0,000 330
	-60	50,082 9	0,001 207
7	+80	50,001 5	0,000 360
	-80	50,011 7	0,000 216
8	+100	49,897 6	0,002 197
	-100	49,812 9	0,001 190
平均值		50,022 5	

依据 5.3 评估相对标准不确定度为：

$$u_{lim} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times \max_{g=1}^{12} \left| \frac{F_{Nc}}{F_{Nc}} - 1 \right| = 0,002 419 \quad \dots\dots\dots (B.38)$$

2) 测量系统的短时稳定性引入的不确定度分量

根据 5.5, 对系统 X 进行了短时稳定性试验, F_{before} 、 F_{after} 是在非对称电流最大峰值 ± 30 kA 下进行校准, 其结果如下：

$$u_{st} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times \left| \frac{F_{after}}{F_{before}} - 1 \right| = \frac{1}{\sqrt{3}} \times \left| \frac{50,222 3}{50,057 6} - 1 \right| = 0,001 9 \quad \dots\dots\dots (B.39)$$

3) 测量系统的温度效应引入的不确定度分量

根据 5.7, 在非对称电流最大峰值 ± 30 kA 下对系统 X 分别进行了 -10 °C、 50 °C 各档位的刻度系数试验, 对结果进行如下计算：

$$u_{temp} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times \max \left| \frac{F_{T_i}}{F_{cal}} - 1 \right| \quad \dots\dots\dots (B.40)$$

式中：

F_{T_i} —— 特定温度 T_i 时的刻度因数；

F_{cal} —— 校准确定的刻度因数。

计算结果见表 B.30。

表 B.30 ± 30 kA 电流下温度结果

测量温度 / °C	F_{Nc}	$\left \frac{F_{T_i}}{F_{cal}} - 1 \right $
-10	49,902 4	0,002 959
50	50,307 9	0,005 113
校准确定的刻度因数	50,050 5	

取其中最大值, $u_{\text{temp}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times 0.005\ 143 = 0.002\ 969$ (B.41)

4) 测量系统的动态特性引入的不确定度分量

根据 5.4,对系统 X 进行了 20 Hz、50 Hz、1 kHz、5 kHz、10 kHz 的动态特性试验,试验波形为振荡衰减正弦波,每个频率下正负极性各 10 次,最大峰值电流为 30 kA,试验结果进行如下计算:

$$u_{\text{dyn}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times \max_{i=1}^k \left| \frac{F_i}{\bar{F}} - 1 \right| \quad \text{.....(B.42)}$$

式中:

k ——在冲击参数范围或频率范围内确定刻度因数的数量;

F_i ——各个刻度因数;

\bar{F} ——冲击参数范围或频率范围内刻度因数的平均值。

计算结果见表 B.31。

表 B.31 动态特性测试结果

测量频率/Hz	F_X	$\left \frac{F_i}{\bar{F}} - 1 \right $
20	50.042 6	0.000 158
50	50.050 5	0.000 000
1 000	49.937 5	0.002 258
5 000	49.897 4	0.003 059
10 000	49.857 4	0.003 858

大容量试验电流波形通常为混频信号,其基波频率为 50 Hz,取 F (50 Hz)为 \bar{F} 。取其中最大值,计算如下:

$$u_{\text{dyn}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times 0.003\ 858 = 0.002\ 227 \quad \text{.....(B.43)}$$

5) 测量系统的邻近回路试验引入的不确定度分量

根据 5.8 对系统 X 进行了邻近回路试验, I_{nearby} 电流峰值 240 kA, I_{prox} 峰值 30 A,则

$$u_{\text{prox}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times \left| \frac{i_{\text{prox}}}{i_{\text{nearby}}} \right| = 0.000\ 072 \quad \text{.....(B.44)}$$

6) 测量系统软件引入的不确定度分量

根据 5.9,使用 TDG 对系统 X 测试软件进行峰值计算方法评估,结果其相对扩展不确定度为 0.128% ($k=2$), $u_{X,\text{sf}} = 0.000\ 64$ 。

表 B.32 列出了刻度因数 $F_{X,\text{mes}}$ 不确定度预算及相对标准不确定度计算结果,自由度依据式(A.13)确定。评定结果包含刻度因数及其合成标准不确定度,表中最后一行给出了其有效自由度, $\nu_{\text{eff}} = 261$ 表示 F_X 可能值属正态分布,因此 $k = 2$ 是有效的。

表 B.32 刻度因数 $F_{X,\text{mes}}$ 不确定度预算及不确定度评定结果

量	值	自由度	合成相对标准不确定度分量
相对扩展不确定度 $F_{X,\text{cal}}^a$	0.008 6	50	0.004 3
$u_{X,\text{in}}^b$	0.002 419	∞	0.002 419

表 B.32 (续)

量	值	自由度	合成相对标准不确定度分量
$u_{X,st}^b$	0,001 9	∞	0,001 9
$u_{X,dyn}^b$	0,002 227	∞	0,002 227
$u_{X,temp}^b$	0,002 969	∞	0,002 969
$u_{X,prox}^b$	0,000 072	∞	0,000 072
$u_{X,st}^a$	0,000 64	50	0,000 64
$F_{X,mcs}$	50,050 5	261	0,006 5

^a 正态分布。
^b 矩形分布。

表 B.32 合成标准不确定度 u_{mes} 计算为:

$$u_{mes} = \sqrt{u_{X,cal}^2 + u_{X,lin}^2 + u_{X,st}^2 + u_{X,dyn}^2 + u_{X,temp}^2 + u_{X,prox}^2 + u_{X,st}^2}$$

$$= \sqrt{0,004\ 3^2 + 0,002\ 419^2 + 0,001\ 9^2 + 0,002\ 27^2 + 0,002\ 969^2 + 0,000\ 072^2 + 0,000\ 64^2}$$

$$= 0,006\ 5 \dots\dots\dots (B.15)$$

最终,使用认可的测量系统进行测量时认可测量系统的刻度因数的完整表述为 $F_{X,mcs} = 50,050\ 5 \times (1 \pm 0,013)$,覆盖概率不小于 95% ($k = 2$)。

该测量系统使用时刻度因数的扩展不确定度为 $U_{mes} = 1,3\%$ 。在下一一次校准前,此扩展不确定度值可作为扩展测量不确定度的最大值。

B.5 冲击电流测量不确定度计算示例

B.5.1 示例 1:冲击电流测量系统的刻度因数(比对法)

冲击电流测量系统(记为 X)由一台额定冲击电流为 200 kA 的 Pearson 线圈,其温度系数为 0,005%/°C,光纤隔离波形记录仪以及数据处理读数的软件组成。

冲击电流标准测量系统(记为 N),使用 200 kA 的标准冲击电流测量系统,标准测量系统 N 的扩展不确定度为:23 °C 下, $U_N = 0,39\%$ ($k = 2$),包括温度变化和长期稳定性不确定度分量。

校准试验是系统 X 与系统 N 在全量程内进行比对。

系统 N 测量电流为 I_N 。用于计算 F_X 值及其合成标准不确定度的模型方程如下,理想情况下,两套测量系统显示的是同一个冲击测试电流 I (见图 B.2),即:

$$I = I_N = F_X V_X \dots\dots\dots (B.16)$$

由此导出计算被校测量系统刻度因数的基本等式:

$$F_X = \frac{I_N}{V_X} \dots\dots\dots (B.17)$$

在每个电流水平下系统 X 与系统 N 的比对测量产生 10 对测量值 I_N 和 V_X ,由此可计算 F_X ,相应的平均值以及相对实验标准偏差 $s_g(F_X)$ 。表 B.33、表 B.34、表 B.35、表 B.36、表 B.37 分别给出了约 20%、40%、60%、80%、100% 电流下测量值的示例。 $g = 5$ 个试验电流水平下的 F_X 、相应的平均值以及相对实验标准偏差见表 B.38。

表 B.33 20%冲击电流水平比对

次数	约-20%电流值			约+20%电流值		
	标准系统 I_N /kA	被校系统 V_N /V	F_N	标准系统 I_N /kA	被校系统 V_N /V	F_N
1	-39.557	-39.360	1.005	+40.128	+39.968	1.001
2	-39.110	-38.993	1.003	+40.103	+39.821	1.007
3	-39.568	-39.727	0.996	+40.165	+39.965	1.005
4	-39.196	-39.040	1.004	+39.983	+40.103	0.997
5	-39.128	-39.128	1.000	+39.998	+39.878	1.003
6	-39.322	-39.244	1.002	+40.122	+40.202	0.998
7	-39.687	-39.608	1.002	+39.957	+40.117	0.996
8	-39.652	-39.692	0.999	+39.896	+40.096	0.995
9	-39.087	-39.363	0.993	+40.187	+40.067	1.003
10	-39.356	-39.199	1.004	+40.039	+39.840	1.005
F _N 的平均值			1.001			1.001
相对实验标准偏差 s _r (F _N)			0.003 8			0.001 3

-20%电流水平: $u_{\alpha} = u(F_N) = \frac{s_r}{\sqrt{n}} = 0.001 21$

+20%电流水平: $u_{\alpha} = u(F_N) = \frac{s_r}{\sqrt{n}} = 0.001 36$

表 B.34 40%冲击电流水平比对

次数	约-40%电流值			约+40%电流值		
	标准系统 I_N /kA	被校系统 V_N /V	F_N	标准系统 I_N /kA	被校系统 V_N /V	F_N
1	-80.923	-80.360	1.007	+79.832	+80.233	0.995
2	-80.221	-80.513	0.996	+80.235	+80.882	0.992
3	-81.023	-80.540	1.006	+81.127	+81.127	1.000
4	-80.156	-79.916	1.003	+80.235	+80.235	1.000
5	-80.568	-81.136	0.993	+80.336	+79.936	1.005
6	-80.638	-80.557	1.001	+80.954	+80.712	1.003
7	-80.559	-80.238	1.004	+80.013	+79.853	1.002
8	-80.157	-80.077	1.001	+80.567	+81.135	0.995
9	-80.675	-80.514	1.002	+79.968	+80.370	0.995
10	-80.369	-80.773	0.995	+80.325	+80.648	0.996
F _N 的平均值			1.001			0.998
相对实验标准偏差 s _r (F _N)			0.004 7			0.001 4

$$-40\% \text{ 电流水平: } u_g = u(F_N) = \frac{s_g}{\sqrt{n}} = 0.001\ 49$$

$$+40\% \text{ 电流水平: } u_g = u(F_N) = \frac{s_g}{\sqrt{n}} = 0.001\ 40$$

表 B.35 60%冲击电流水平比对

次数	约-60%电流值			约+60%电流值		
	标准系统 I_N /kA	被校系统 V_N /V	F_N	标准系统 I_N /kA	被校系统 V_N /V	F_N
1	-121.223	-121.710	0.996	+120.036	+120.156	0.999
2	-121.652	-122.633	0.992	+120.538	+120.901	0.997
3	-121.025	-121.268	0.998	+120.952	+120.711	1.002
4	-120.894	-120.653	1.002	+120.887	+120.525	1.003
5	-121.369	-120.765	1.005	+120.268	+119.670	1.005
6	-121.548	-121.548	1.000	+120.564	+120.084	1.004
7	-121.685	-121.563	1.001	+120.681	+120.560	1.001
8	-121.346	-121.833	0.996	+120.365	+120.245	1.001
9	-121.225	-120.742	1.001	+120.854	+121.096	0.998
10	-120.953	-120.712	1.002	+120.445	+120.445	1.000
F _N 平均值			1.000			1.001
相对实验标准偏差 s _g (F _N)			0.004 1			0.002 6

$$-60\% \text{ 电流水平: } u_g = u(F_N) = \frac{s_g}{\sqrt{n}} = 0.001\ 30$$

$$+60\% \text{ 电流水平: } u_g = u(F_N) = \frac{s_g}{\sqrt{n}} = 0.000\ 823$$

表 B.36 80%冲击电流水平比对

次数	约-80%电流值			约+80%电流值		
	标准系统 I_N /kA	被校系统 V_N /V	F_N	标准系统 I_N /kA	被校系统 V_N /V	F_N
1	-158.593	-157.961	1.004	+160.123	+159.010	1.007
2	-159.276	-158.958	1.002	+161.258	+162.068	0.995
3	-159.117	-159.596	0.997	+159.599	+160.079	0.997
4	-159.448	-160.572	0.993	+159.981	+160.917	0.994
5	-158.763	-159.401	0.996	+160.324	+160.968	0.996
6	-158.921	-157.660	1.008	+160.260	+160.904	0.996
7	-158.974	-159.773	0.995	+160.298	+160.298	1.000
8	-159.663	-160.465	0.995	+160.777	+160.938	0.999

表 B.36 (续)

次数	约-80%电流值			约+80%电流值		
	标准系统 I_N /kA	被校系统 V_N /V	F_N	标准系统 I_N /kA	被校系统 V_N /V	F_N
9	-158.725	-159.203	0.997	+160.873	+161.034	0.999
10	-159.321	-159.961	0.996	+160.172	+161.441	0.994
F_N 的平均值			0.998			
相对实验标准偏差 $s_r(F_N)$			0.004 8			

$$-80\% \text{ 电流水平: } u_k = u(F_N) = \frac{s_r}{\sqrt{n}} = 0.001 52$$

$$+80\% \text{ 电流水平: } u_k = u(F_N) = \frac{s_r}{\sqrt{n}} = 0.001 24$$

表 B.37 100%冲击电流水平比对

次数	约-100%电流值			约+100%电流值		
	标准系统 I_N /kA	被校系统 V_N /V	F_N	标准系统 I_N /kA	被校系统 V_N /V	F_N
1	-197.263	-197.263	1.000	+199.594	+200.195	0.997
2	-196.355	-196.748	0.998	+199.688	+198.497	1.006
3	-197.487	-197.487	1.000	+201.375	+200.973	1.002
4	-196.444	-196.838	0.998	+199.011	+199.210	0.999
5	-196.583	-197.175	0.997	+199.754	+199.554	1.001
6	-196.641	-196.445	1.001	+201.896	+201.292	1.003
7	-196.321	-195.929	1.002	+197.635	+198.429	0.996
8	-196.985	-197.776	0.996	+198.662	+198.265	1.002
9	-196.787	-197.975	0.994	+197.693	+197.496	1.001
10	-196.001	-195.415	1.003	+198.757	+197.965	1.004
F_N 平均值			0.999			
相对实验标准偏差 $s_r(F_N)$			0.002 8			

$$-100\% \text{ 电流水平: } u_k = u(F_N) = \frac{s_r}{\sqrt{n}} = 0.000 886$$

$$+100\% \text{ 电流水平: } u_k = u(F_N) = \frac{s_r}{\sqrt{n}} = 0.000 981$$

表 B.38 $g=5$ 个正负电流水平下及线性度结果汇总

电流水平数 g	电流水平 $I_{N,max}$ 的百分数/%	F_N	$s_g(F_N)$	u_{N_g}	$\left \frac{F_N}{F} - 1 \right $
1	-20	1.001	0,003 8	0,001 21	0,001 2
2	+20	1,001	0,004 3	0,001 36	0,001 2
3	-40	1,001	0,004 7	0,001 49	0,001 2
4	+40	0,998	0,004 4	0,001 40	0,001 8
5	-60	1,000	0,004 1	0,001 30	0,000 2
6	+60	1,001	0,002 6	0,000 823	0,001 2
7	-80	0,998	0,004 8	0,001 52	0,001 8
8	+80	0,998	0,003 9	0,001 24	0,001 8
9	-100	0,999	0,002 8	0,000 886	0,000 8
10	+100	1,001	0,003 1	0,000 981	0,001 2
平均值		0,999 8			

据此,通过与标准系统进行比对得到的刻度因数可评估为:

$$F_N = 0,999 8$$

F_N 的不确定度评定为:

$$u_F = \sqrt{\frac{1}{3} \left(\max_{\epsilon=\pm 1}^{10} \left| \frac{F_N}{F} - 1 \right| \right)^2 + \left(\max_{\epsilon=\pm 1}^{10} (u_{g_i}) \right)^2} = 0,001 85$$

表 B.39 列出标定刻度因数 F_N 的不确定度预算及相对标准不确定度计算结果,表中最后一行给出了其有效自由度, $\nu_{\text{eff}} = 33$ 表示 F_N 可能值属正态分布,因此 $k=2$ 是有效的(见附录 A.1)。

表 B.39 标定刻度因数 F_N 的不确定度预算

量	值	自由度	合成相对标准不确定度分量
F_N 的相对标准不确定度分量 ^a	0,001 85	9	0,001 85
系统 N 的相对扩展不确定度 ^b	0,003 9/2	50	0,001 95
F_N	0,999 8	33	0,002 69

^a 正态分布。
^b 矩形分布。

表 B.39 中的合成相对标准不确定度为:

$$u_{\text{rel}} = \sqrt{u_{F_N}^2 + u_{F_N}^2} = \sqrt{0,001 85^2 + 0,001 95^2} = 0,002 69 \dots \dots \dots (B.48)$$

最终,校准结果的完整表述为: $F_N = F_{N,\text{rel}} = 0,999 8 \times (1 \pm 0,005 4)$,覆盖概率不小于 95% ($k=2$)。

刻度因数校准的扩展不确定度为 $U_{\text{rel}} = 0,54\%$,使用该测量系统进行的测量的不确定度,需要考虑更多不确定度因素。

B.5.2 示例 2:使用冲击电流测量系统(认可测量系统)进行的测量不确定度评估

B.5.1 中描述了认可冲击测量系统 X 的校准情况,其刻度因数为 $F_N = 0,999 8$.校准的相对扩展不

确定度为 $U_{\text{cal}} = 0.54\%$ ($k = 2$)。其从 40 kA ~ 200 kA 的线性度通过与标准测量系统(记为 N)进行比对。对测量系统的环境温度影响、短时稳定性、长期稳定性、邻近回路电流、测量系统软件影响以及其他因素影响试验进行了研究测试,并对 F_N 的影响进行了相应计算。

刻度因数 $F_{N,\text{mes}}$ 的模型等式及其扩展标准不确定度见式(B.49):

$$F_{N,\text{mes}} = F_{N,\text{cal}} - \Delta F_{N,\text{temp}} - \Delta F_{N,\text{st}} - \Delta F_{N,\text{lt}} - \Delta F_{N,\text{prox}} - \Delta F_{N,\text{soft}} - \Delta F_{N,\text{other}} \dots\dots\dots (B.49)$$

式中:

$F_{N,\text{cal}}$ —— 比对法测得的刻度因数结果[见式(B.48)];

$\Delta F_{N,\text{temp}}$ —— 使用系统的温度间隔引入的分量;

$\Delta F_{N,\text{st}}$ —— 系统短时稳定性分量;

$\Delta F_{N,\text{lt}}$ —— 系统长期稳定性分量;

$\Delta F_{N,\text{prox}}$ —— 邻近回路引入的分量;

$\Delta F_{N,\text{soft}}$ —— 数据处理软件引入的分量;

$\Delta F_{N,\text{other}}$ —— 系统其他影响因素分量。

系统的刻度因数值及其不确定度受漂移、温度等因素的影响。上面列出了本例中的影响分量。一般说来,影响刻度因数 F_N 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,修正值具有与误差相反的符号。不确定度分量评定方法如附录 A.5 中所述,即若假定在 $\pm a_i$ 区间内是矩形概率分布,则其扩展不确定度 $u_i = \frac{a_i}{\sqrt{3}}$;或者,用被校组件的扩展不确定度 U 除以包含因子 k 来求得。分量 $F_{N,i}$

并不总是有误差(或假定误差很小可以忽略),此时仅需考虑不确定度分量 u_i 。

1) 测量系统的温度效应引入的不确定度分量

环境温度效应主要依据厂家提供的 Pearson 线圈温度系数,其温度变化参数为 $0.005\%/^{\circ}\text{C}$,线圈使用温度范围为 $0^{\circ}\text{C} \sim 65^{\circ}\text{C}$,比对时的环境温度为 23°C ,工作温度偏差最大值为 $\Delta T = 65 - 23 = 42^{\circ}\text{C}$ 。所以最大温度变化带来的刻度因数的最大变化为:

$$\Delta F = 0.005\% \times 42 \times F_N = 0.0021;$$

$$u_{\text{temp}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{\Delta F}{F} = 0.0012$$

2) 测量系统的短时稳定性引入的不确定度分量

短时稳定性采用对 Pearson 线圈进行短时冲击电流试验,冲击电流值为 $+100 \text{ kA}$,20 次,每次间隔 3 min,分别比对前后刻度因数,见表 B.40 所示。

表 B.40 短期稳定性试验

试验形式	施加电流值/kA	被校系统读数/V	刻度因数
冲击电流施加前	+100.121	+100.021	1.001
冲击电流施加后	+99.875	+99.975	0.999

刻度因数的最大变化量为 0.002,因此短期稳定试验结果进行如下计算:

$$u_{\text{st}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times \left| \frac{F_{\text{after}}}{F_{\text{before}}} - 1 \right| = \frac{1}{\sqrt{3}} \times \left| \frac{0.999}{1.001} - 1 \right| = 0.0012$$

3) 测量系统的长期稳定性引入的不确定度分量

长期稳定性的不确定度分量,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 $\pm 0.2\%$ 以内,因此长期稳定性的不确定度分量为:

$$u_{it} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times 0.002 = 0.001\ 15$$

4) 测量系统的邻近回路试验引入的不确定度分量

在间隔 0.5 m 的邻近回路中施加 200 kA 的冲击电流,被测量系统电流转换装置开路,读取到被测测量系统中的电流读数为 50 A,则该项带来的不确定度分量为:

$$u_{prox} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times \left| \frac{i_{prox}}{i_{nearby}} \right| = 0.000\ 15$$

5) 测量系统软件引入的不确定度分量

数据处理软件的相对扩展不确定度已知 $U_{sft} = 0.128\%$ ($k = 2$),则相对标准不确定度分量用以下 u_{sft} 表示估算值为:

$$u_{sft} = 0.001\ 28/2 = 0.000\ 64$$

6) 测量系统的其他影响因素引入的不确定度分量

对于其他的影响因素的不确定度用以下 u_{other} 估算值为:

$$u_{other} = 0.002\ 0$$

表 B.41 列出了刻度因数 $F_{X,mcs}$ 不确定度预算及相对标准不确定度计算结果,自由度依据式(A.13)确定。评定结果包含刻度因数及其合成标准不确定度,表中最后一行给出了其有效自由度, $\nu_{eff} = 158$ 表示 F_X 可能值属正态分布,因此 $k = 2$ 是有效的。

表 B.41 刻度因数 $F_{X,mcs}$ 的不确定度预算及标准不确定度计算结果

量	值	自由度	合成相对标准不确定度分量
相对扩展不确定度 $F_{X,cal}^a$	0,005 4/2	33	0,002 7
$u_{X,temp}^b$	0,001 2	∞	0,001 2
$u_{X,st}^b$	0,001 2	∞	0,001 2
$u_{X,lt}^b$	0,001 15	∞	0,001 15
$u_{X,prox}^b$	0,000 15	∞	0,000 15
$u_{X,sft}^a$	0,001 28/2	∞	0,000 64
$u_{X,other}$	0,002 0	∞	0,002 0
$F_{X,mcs}$		158	0.004 0

^a 正态分布。
^b 矩形分布。

表 B.41 中的合成标准不确定度 u_{mcs} 计算为:

$$u_{mcs} = \sqrt{u_{X,cal}^2 + u_{X,temp}^2 + u_{X,st}^2 + u_{X,lt}^2 + u_{X,prox}^2 + u_{X,sft}^2 + u_{X,other}^2}$$

$$= \sqrt{0.002\ 7^2 + 0.001\ 2^2 + 0.001\ 2^2 + 0.001\ 15^2 + 0.000\ 15^2 + 0.000\ 64^2 + 0.002\ 0^2} = 0.004\ 0$$

最终,系统 X 的刻度因数的完整表述为 $F_{X,mcs} = 0.999\ 8 \times (1 \pm 0.008\ 0)$,覆盖概率不小于 95% ($k = 2$)。该测量系统使用时刻度因数的扩展不确定度为 $U_{mcs} = 0.80\%$ 。在下次校准前,此扩展不确定度值可作为扩展测量不确定度的最大值。

B.5.3 示例 3: 冲击电流的波前时间

用一包括 Pearson 线圈和数字记录仪(12 位,采样率为 100 MS/s)的 200 kA 冲击电流测量系统 X

与一标准测量系统 N 在约 100 kA 的冲击电流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 8/20 μs 冲击电流波形波前时间的系统平均误差为 $\Delta T_{1N} = 0.08 \mu\text{s}$, 扩展不确定度为 $U_N = 0.16 \mu\text{s} (k=2)$ 。

通过比对, 两套系统同时记录了 10 对具有规定波前时间的冲击电流。由系统 N 记录的第 i 次冲击电流的实际波前时间由下式确定:

$$T_{1N,i} = \frac{(t_{90} - t_{10})}{0.8}$$

式中, t_{10} 和 t_{90} 分别为系统 N 确定的峰值幅值的 10% 和 90% 对应的时刻; 由系统 X 记录的同一冲击电流的波前时间 $T_{1X,i}$ 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, 由下式确定波前时间偏差的平均值:

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

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 $T_1 \approx 6 \mu\text{s}$ 、 $T_1 \approx 8 \mu\text{s}$ 和 $T_1 \approx 10 \mu\text{s}$, 不同的波前时间可由序列号 j 来区分。对每个 T_1 值均计算平均误差 $\Delta T_{1,j}$, 3 个 $\Delta T_{1,j}$ 值的总平均为:

$$\overline{\Delta T_{1m}} = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 \overline{\Delta T_{1,j}}$$

换句话说, ΔT_{1m} 表示系统 X 相对于系统 N 在 $T_1 \approx (6 \sim 10) \mu\text{s}$ 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 的误差的模型函数为:

$$\Delta T_{1\text{cal}} = \Delta T_{1m} - \Delta T_{1N}$$

表 B.42 列出了由校准获得的单个数值、误差和偏差并另外在图 B.3 中显示。

表 B.42 时间校准的相关数据

次数	约 6 μs 的时间值			约 8 μs 的时间值			约 10 μs 的时间值		
	$T_{N,i}$	$T_{X,i}$	ΔT_1	$T_{N,i}$	$T_{X,i}$	ΔT_1	$T_{N,i}$	$T_{X,i}$	ΔT_1
1	6.05	6.16	0.11	8.06	8.14	0.08	10.01	10.09	0.08
2	6.09	6.11	0.02	8.00	8.26	0.26	9.98	10.1	0.12
3	6.05	6.13	0.08	7.98	8.18	0.20	9.95	10.24	0.29
4	5.98	6.16	0.18	7.99	8.23	0.24	9.97	10.2	0.23
5	5.96	6.17	0.21	7.99	8.22	0.23	10.01	10.22	0.21
6	5.98	6.16	0.18	8.02	8.23	0.21	9.98	10.15	0.17
7	6.04	6.12	0.08	7.94	8.15	0.21	9.94	10.18	0.24
8	5.98	6.11	0.13	7.96	8.17	0.21	9.95	10.15	0.20
9	6.03	6.14	0.11	7.98	8.14	0.16	9.98	10.11	0.13
10	6.02	6.13	0.11	8.00	8.21	0.21	9.96	10.17	0.21
平均值			0.12			0.20			0.19

表 B.43 波前时间 T_1 和偏差的校准结果

		值		
$s_j(\Delta T_{1,j})$	μs	0,057	0,050	0,063
$\Delta T_{1,j}$	μs	0,12	0,20	0,19
ΔT_{1m}	μs	0,17		

表 B.43 给出了波前时间 T_1 和偏差的校准结果。

由 3 个 $T_{1X,j}$ 值的最大标准偏差计算 A 类标准不确定度：

$$u_A(T_{1X}) = \frac{1}{\sqrt{10}} \max_{j=1}^3 s_j = 0,0199 \mu\text{s}$$

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：

$$u_B(T_{1m}) = \frac{1}{\sqrt{3}} \max_{j=1}^3 |\Delta T_{1,j} - \Delta T_{1m}| = \frac{0,05 \mu\text{s}}{\sqrt{3}} = 0,029 \mu\text{s}$$

把所有输入量的数值及其标准不确定度代入模型公式，用附录 A 中给出的公式对模型等式进行计算。计算结果见表 B.44，表中最后一行给出了平均误差 ΔT_{1cal} 、合成标准不确定度及其有效自由度， $\nu_{\text{eff}} = 71$ 表示 ΔT_{1cal} 的可能值属正态分布，因此 $k = 2$ 是有效的（见表 A.1）。

表 B.44 波前时间偏差 ΔT_{1cal} 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
ΔT_{1X}	0,08	0,08 ^a	50	1	0,08
$u_A(T_{1X})$	0,00	0,020 ^a	9	1	0,020
ΔT_{1m}	0,17	0,029^b	∞	1	0,029
ΔT_{1cal}	0,09		71		0,088
^a 正态分布。					
^b 矩形分布。					

最后，表 B.43 的合成标准不确定度为：

$$u = \sqrt{u(\Delta T_{1X})^2 + u_A(T_{1X})^2 + u_B(T_{1m})^2} = 0,088$$

扩展不确定度为：

$$U = k \cdot u = 0,176$$

完整校准结果可表示为 $\Delta T_{1cal} = 0,09 \mu\text{s} \pm 0,176 \mu\text{s}$ ，覆盖概率不小于 95% ($k = 2$)。

换句话说，当用系统 X 测量冲击电流时，波前时间修正值需将所测值 $T_{1\text{meas}}$ 减去 $0,09 \mu\text{s}$ 即可。如果波前时间没有别的不确定度分量需要考虑，则 $T_{1\text{cor}}$ 的扩展不确定度为 $0,176 \mu\text{s}$ ($k = 2$)。

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_{10} 和 t_{90} 的影响，由此在不确定度预算中引入了相应的 B 类标准不确定度。

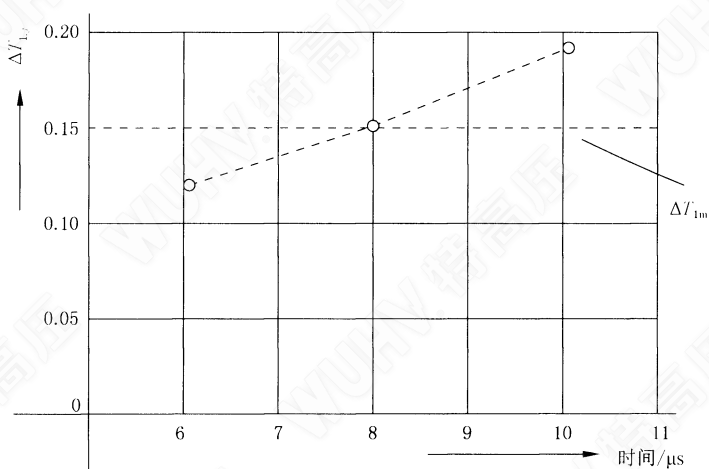


图 B.3 $T_1 \approx (6 \sim 8) \mu\text{s}$ 内系统 X 相对于标准系统 N 的波前时间偏差 $\Delta T_{1,j}$ 及其平均值 ΔT_{1m}

附录 C

(资料性附录)

阶跃响应测量

C.1 电流阶跃波概述

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。

在电流转换装置的输入端施加一个近似的电流阶跃波。阶跃波的上升时间应远小于被测电流波形(比例因子要求为 10 或更大)的最短波前时间(上升时间)。阶跃波的平坦部分应足够长,衰减尽可能小,在任何情况下,应大于被测冲击电流波形(比例因子要求为 10 或更大)的最长波尾时间(持续时间)。用数字记录仪或示波器测量转换装置的输出量(电压或电流)。

下面列出了两种产生阶跃波电流的方法。图 C.1 中,同轴电缆用于储存产生阶跃波所需的能量,与图 C.2 中电容的作用一致。使用同轴电缆产生的电流波形为陡阶跃波,持续时间为在电缆中的传递时间的两倍。图中也显示了在能量存储元件和电流转换装置之间的间隙和电阻。可使用不同方法完成截断,下述为常用方法:

- 利用汞润触点继电器,提供达 10 A 左右的阶跃波。
- 利用大气压下的最大至几毫米均匀场空气间隙,提供达 100 A 左右的阶跃波。
- 利用增加气压下的、最大至几毫米的均匀场间隙,提供达几千安培的阶跃波。

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。

采用半导体元件的电流阶跃波发生器在也某些实验室使用。

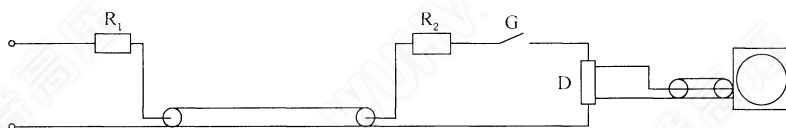
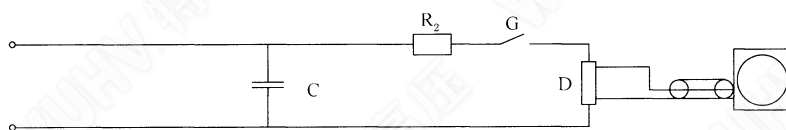


图 C.1 使用同轴电缆的电流阶跃波发生器电路



说明:

- C——电容;
- G——产生阶跃波的间隙;
- D——电流转换装置。

图 C.2 使用电容的电流阶跃波发生器电路

C.2 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

C.2.1

基准水平(仅对冲击测量) reference level

I_R

在区间 $0.5 \times t_{\min} \sim 2 \times t_{\max}$ 内阶跃响应的平均值 I_R (见图 C.3)

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(见图 C.3)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.3)的零电平处的噪声幅度之上的首次开始单调上升的瞬间。

注: 所有时间值均从原点 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.3), 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。

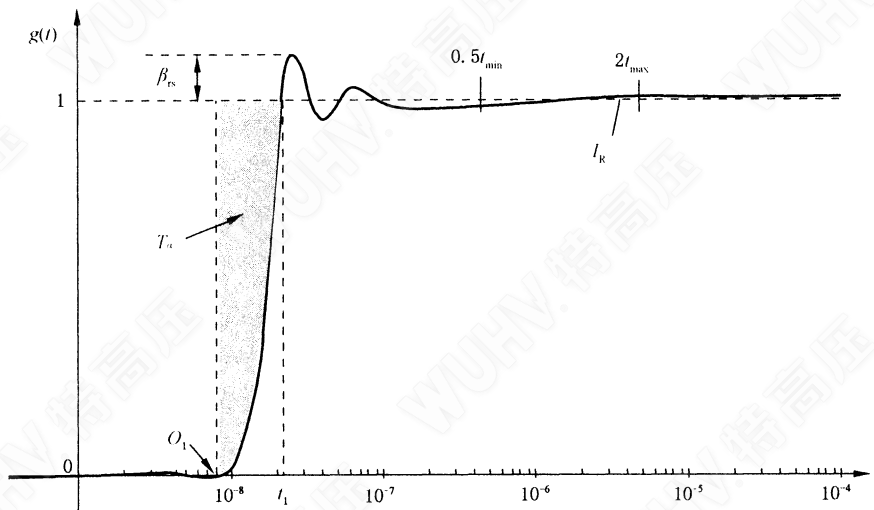


图 C.3 单位阶跃响应参数的有关定义

C.2.4

阶跃响应积分 $T(t)$ 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.3)。

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

C.2.5

实验响应时间 T_N experimental response time T_N

在 $2t_{\max}$ 时刻阶跃响应的积分值。

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

C.2.6

部分响应时间 T_α partial response time T_α

在 $t \leq 2t_{\max}$ 内的阶跃响应积分的最大值(见图 C.3), 它等于图 C.3 中的阴影区域。

注：通常， $T_n = T(t_1)$ ，这里 t_1 是 $g(t)$ 首次到达单位幅值的时间(图 C.3)。

C.2.7

剩余响应时间 $T_R(t_i)$ **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。

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

C.2.8

单位阶跃响应的过冲 β_{rs} **overshoot of the unit step response** β_{rs}

$g_{\max}(t)$ 的最大值减去 1 的百分数(图 C.3)：

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

附录 D
(资料性附录)

卷积法确定阶跃响应测量的动态性能

D.1 概述

卷积法通常用于由冲击电流转换装置、数字记录仪或一个完整的冲击电流测量系统的阶跃响应来确定它们的动态性能的场所。

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，且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

如果一个冲击测量系统的输入冲击波形和单位归一化的阶跃响应(附录 C)分别为 $V_m(t)$ 和 $g(t)$ ，则输出电压 $V_{out}(t)$ 可用如下的卷积积分表示：

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

式中：

t —— 时间；

$V'_m(t)$ —— 输入冲击波形 $V_m(t)$ 的一阶导数。

如果 $g(t)$ 和 $V_m(t)$ 以相同的采样间隔被采样，并且 $g(t)$ 和 $V_m(t)$ 的采样点数也相同，由此连续卷积积分(D.1)可转换为离散卷积总和的形式。

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

式中：

$V_{out}(i)$ —— 离散输出电压数列；

$V'_m(i)$ —— 输入数组的一阶导数；

$g(i)$ —— 单位阶跃响应数列；

n —— 输入数列采样点数；

Δt —— 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，具体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：

- a) 获取输入冲击波形数组 $V_m(i)$, ($i = 0, \dots, n - 1$)，并计算其冲击参数。
- b) 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 $V_m(i)$ 的一阶导数 $V'_m(i), i=0, \dots, n-1$ 。
- 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以获得低噪声的单位阶跃响应,如果式(D.2)用于卷积计算且冲击数列 $V_m(i)$ 已经平滑,则单位阶跃响应数列 $g(i)$ 的平滑便不太关键了。

注1:对于大电流测量系统,具有足够短的上升时间和足够长的波尾时间的阶跃响应是不可能得到。在这种情况下,通过组合波前较短的记录和波尾较长的记录可能得到近似的阶跃响应。这些记录可以通过不同的方法获得。

- 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。
- 4) 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 $g_0(i)$ 。

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

- 5) 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 。
- 6) 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2: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。

- c) 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 $V_m(i)$ 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来修正被算的参数,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 1059.1—2012 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,尽管它与峰值要求的测量不确定度相比可能较小的,但是峰值的计算误差与卷积数值误差相比往往是较大的。

峰值计算的相对误差应等于在输入冲击 $V_m(i)$ 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。

附录 E

(资料性附录)

对特定波形的参数限值规定

一些最初用来试验非线性的元器件的特定电流波形,在应用到线性元器件时在产生标准波形方面出现了一些问题。例如在避雷器试验中规定了 8/20 的波形,其中避雷器是高度非线性的元件。当负载为非线性时,该波形很容易得到,其参数如下:

- 峰值: $\pm 10\%$;
- $T_1 = 8 \mu\text{s} \pm 10\%$;
- $T_2 = 20 \mu\text{s} \pm 10\%$;
- 反峰值: $< 20\%$ 峰值。

但是当负载为线性时,这些参数通常很难得到,因为波形产生回路仅用到了 R 、 L 、 C 元件,只能得到 T_1 和 T_2 参数组合中的小部分参数。

波形计算的前提条件为反向过冲小于 20% ,可以得到 T_2/T_1 的比值在 2.7 和 3.8 之间(见 Sato, T. Harada 和 M. Hanai 的相关著作)。

图 E.1 中显示了 T_1 和 T_2 在允许变化量为 10% 和 20% 时的有效变化范围(阴影部分),以及电流反向时允许变化量在 20% 和 30% 时的有效范围,例如,若确定 $T_2 = 20 \mu\text{s}$,则在 $\pm 20\%$ 允许变化范围内, T_1 的变化范围为 $6.4 \mu\text{s} \sim 7.4 \mu\text{s}$,在 $\pm 10\%$ 允许变化范围内, T_1 的变化范围仅为 $7.2 \mu\text{s} \sim 7.4 \mu\text{s}$

因此,当试品仅为线性试品时,最好是允许更大的反向过冲,见图 E.2 和图 E.3。

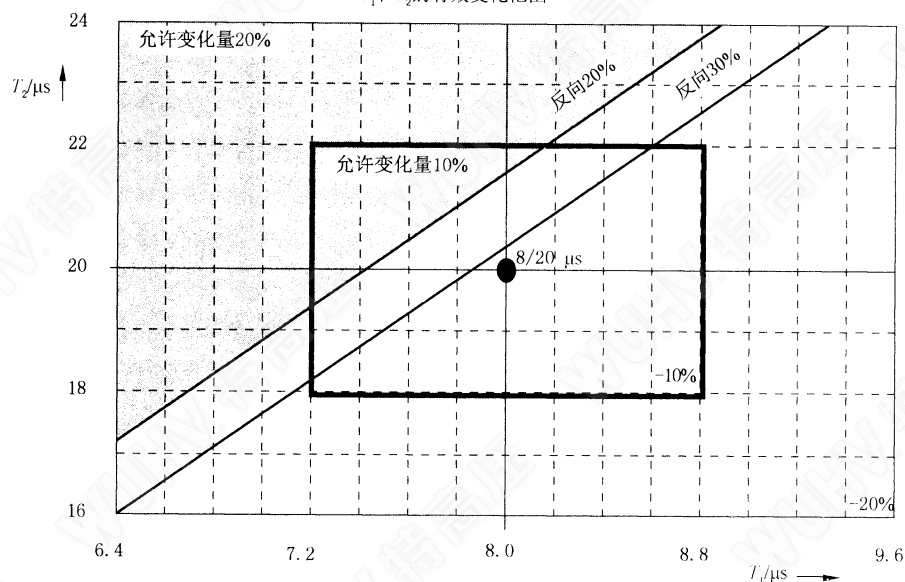
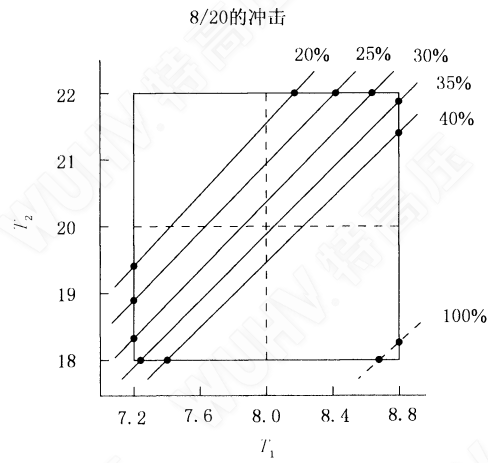
 T_1 和 T_2 的有效变化范围

图 E.1 最大反向过冲为 20% , 时间参数变化允许范围为 20% 的 8/20 冲击波形可达到的合成时间参数(阴影部分)



说明:结果对1/2.5和4/10冲击波形同样适用。

图 E.2 8/20 冲击电流所允许的时间参数与反向过冲值的函数轨迹

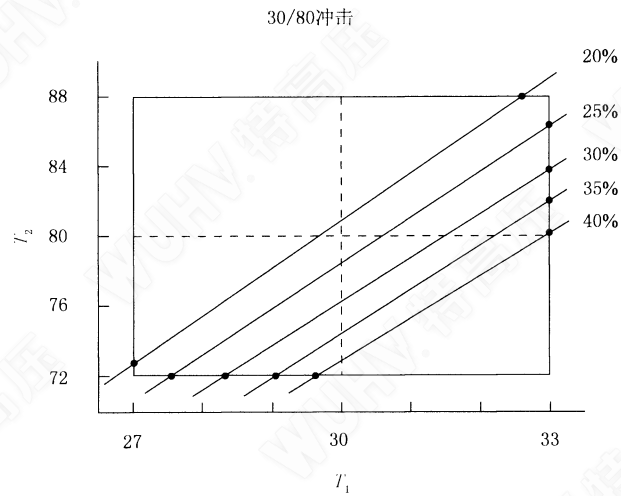


图 E.3 30/80 μs 冲击电流所允许的时间参数与反向过冲值的函数轨迹

附 录 F
(资料性附录)
电阻元件的温升

在冲击电流和/或短时电流的一般工作条件下,分流器在非常短的时间内要消耗大量热量,以至于该电阻材料的加热过程几乎是绝热过程。在这些情况下,温升 $\Delta\vartheta$ 和电阻变化量 ΔR 可以计算如下:

$$\Delta\vartheta = \frac{W}{m \times c}$$

$$\Delta R = \Delta\vartheta \times R \times \alpha$$

式中:

$\Delta\vartheta$ —— 温升,单位为开尔文(K);

W —— 分流器中消耗的能量,单位为焦耳(J);

m —— 电阻材料的质量,单位为千克(kg);

c —— 电阻材料的比热容,单位为焦每千克开[J/(kg·K)];

R —— 分流器的电阻,单位为欧姆(Ω);

ΔR —— 分流器电阻的变化量,单位为欧姆(Ω);

α —— 温度系数,单位为负一次方开(K^{-1})。

例如冲击电流试验中,冲击发生器存储的能量将主要在分流器中消耗。建议分流器应具有这样的特性,在前述条件下,温升不超过 200 K。

对于重复施加电流产生的逐步的温升,总的允许温升取决于电阻材料的温度系数和使用的绝缘材料的温度等级。

附录 G
(资料性附录)

短时交流电流有效值的确定

G.1 短时变化电流的一般特性

短路电流试验的等效电路图如图 G.1 所示。图中给出了在变压器输出端短路情况下的等效电路，其中考虑了变压器的漏感，但是忽略了励磁电感。它不能完全等效出在发电机末端或者其附近短路的情况，因为其瞬态或者次瞬态电抗会显著提高短路电路的初始峰值。

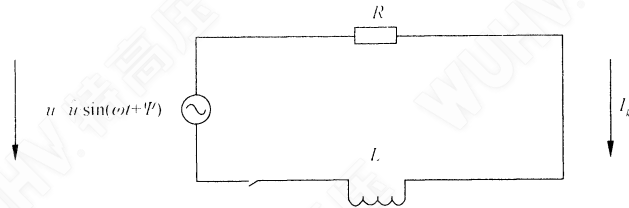


图 G.1 短路试验的等效电路图

如图 G.1 所示，在等效电路在的初始时刻， $t=0$ 时刻（即以任意的开关闭合瞬时作为电压信号的起始点），根据基尔霍夫电压定律可以得到电流的数学表达公式如下：

$$\hat{u} \times \sin(\omega t + \Psi) = L \times \frac{di_k}{dt} + R \times i_k \quad \dots\dots\dots (G.1)$$

Ψ 是开关闭合时电压波形对应的相位。

根据上述微分方程，可以得到：

$$i_k = \hat{i}_k \times [\sin(\omega t + \Psi - \varphi) - \sin(\Psi - \varphi) \times e^{-\frac{t}{\tau}}] \quad \dots\dots\dots (G.2)$$

式中：

\hat{i}_k —— 电流峰值；

$\omega = 2\pi \times f$ —— 电网频率 f 对应的角频率；

$$\varphi \quad \text{—— 相位角(阻抗角)} \varphi = \arctan \frac{X}{R} = \arctan \frac{\omega L}{R} \quad \dots\dots\dots (G.3)$$

$$\tau \quad \text{—— 时间常数 } \tau = \frac{L}{R} = \frac{X}{\omega R} \quad \dots\dots\dots (G.4)$$

Ψ —— 初始相位角，即在开关合上的瞬时电压波形对应的角度。

式(G.2)可以分解为两部分。第一部分表示短路电流中的稳态交流分量：

$$i_{ka} = \hat{i}_k \times \sin(\omega t + \Psi - \varphi)R \quad \dots\dots\dots (G.5)$$

第二部分表示短路电流中衰减的直流分量：

$$i_{dc} = -\hat{i}_k \times \sin(\Psi - \varphi) \times e^{-\frac{t}{\tau}} \quad \dots\dots\dots (G.6)$$

从上式可以看出，直流分量的最大值也是与时间常数 L/R 相关的。由于技术上的原因，相位(阻抗)角通常使用 $\cos\varphi$ (即功率因数)表示，而时间常数 L/R 可以通过其求得。

G.2 真有效值

关于周期电流信号的真有效值定义可以参照 7.2.2，短时交流电流信号的真有效值定义可以参照 9.2.2。

G.3 对称的交流分量(真有效值)

短路变化电流的对称交流分量(如由不受任何附加试品阻抗和试品自身承受的短路电流影响的特定试验回路产生的短路电流)的真有效值定义如图 G.2 所示。

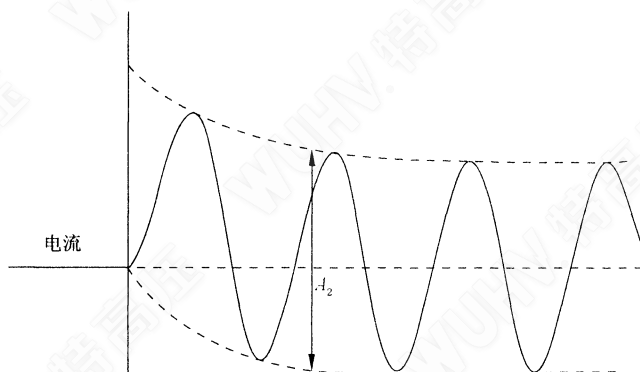


图 G.2 短路变化电流的对称交流分量

电流的对称分量是 $A_2/2\sqrt{2}$ 。

G.4 使用梯形数值计算法则计算真有效值

为了得到给定周期交流电流信号的有效值,首先必须计算下式在几个整数周期内的积分值:

$$I_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt}$$

根据梯形的计算公式, $i^2(t_i)$ 的面积如下式所示:

$$A_i = \frac{h}{2} \times [i^2(t_i) + i^2(t_{i+1})]$$

式中: $i = (0, \dots, n-1)$ 。数值估算方法见图 G.3。

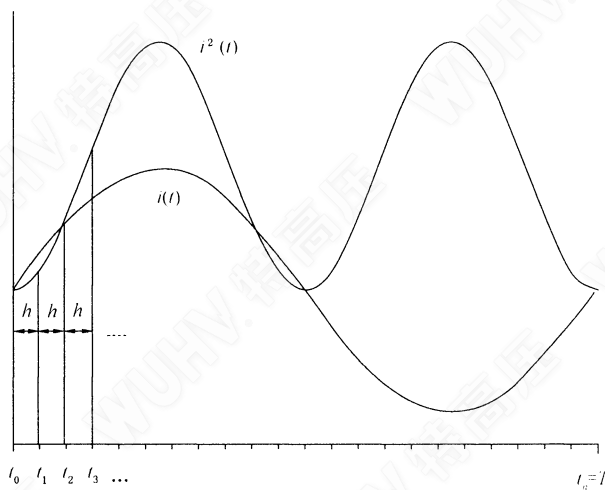


图 G.3 瞬时电流的真有效值和瞬时电流的平方值的数值估算方法

对所有梯形进行求和就可以得到电流的真有效值：

$$A(n) = \frac{h}{2} \times \sum_{i=0}^{n-1} [i^2(t_i) + i^2(t_{i+1})] = \frac{h}{2} \times \left[i^2(t_0) + 2 \sum_{i=0}^{n-1} i^2(t_i) + i^2(T) \right] = I_{\text{rms}}^2 \times T$$

$$\Rightarrow I_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{h}{2T} \times \left[i^2(t_0) + 2 \sum_{i=0}^{n-1} i^2(t_i) + i^2(T) \right]}$$

为了使整个数值积分的误差小到可以接受， n 必须足够大(例如，对于 50 Hz 的电流波形，采样数 n 应该为 800)。

G.5 交流分量的经典有效值

交流分量的经典有效值 I_{conv} 一般通过三个连续的峰值 $A(t_{i-1}, Y_{i-1})$ 、 $B(t_i, Y_i)$ ，和 $C(t_{i+1}, Y_{i+1})$ 确定，即三峰法(three-crest method)(图 G.4)，其中：

- t_i —— 峰值对应的时间瞬时值；
- Y_i —— 时刻 t_i 对应的瞬时值。

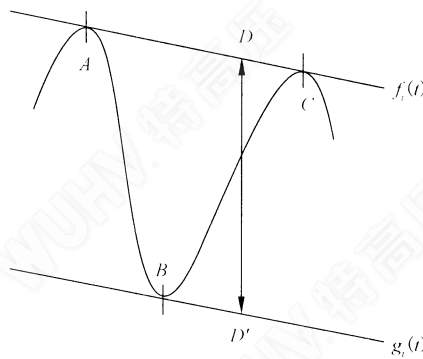


图 G.4 三峰法

有效值 I_{conv} 是通过 $DD'/2\sqrt{2}$ 得到的。此值可以通过作图法或数值计算获得，公式如下：

$$I_{\text{conv}} = \frac{(A+C)/2 - B}{2 \times \sqrt{2}}$$

或者通过下面公式计算 $f_i(t)$ 和 $g_i(t)$ 两条直线得到 I_{conv} ：

—— $f_i(t)$ 是指通过峰值点 A 和 C 的一条直线，其变量为时间 t_i ：

$$f_i(t) = a_i \times t_i + b_f$$

其中：

$$a_i = \frac{Y_{i+1} - Y_{i-1}}{t_{i+1} - t_{i-1}}$$

$$b_f = Y_{i+1} - a_i \times t_{i+1} \text{ 或者 } b_f = Y_{i-1} - a_i \times t_{i-1}$$

—— $g_i(t)$ 是经过峰值 B，并且平行于 $f_i(t)$ 的直线：

$$g_i(t) = a_i \times t_i + b_g \quad b_g = Y_i - a_i \times t_i$$

G.6 电弧电流的经典有效值

为了避免电流和频率的波动影响，电弧电流的有效值是通过一系列有效值(G.5 描述的三峰法)的等权平均得到的。每一个有效值是通过峰值与前一个峰值滑动计算得到。为了避免边界效应，在可能

的情况下,将第一个半波和最后一个周波去掉(图 G.5)。

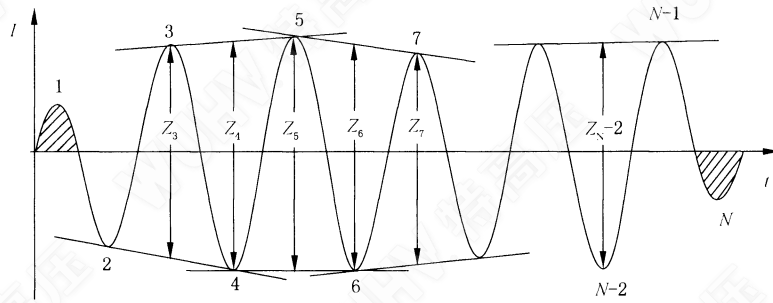


图 G.5 使用三峰法计算电弧电流的经典有效值

一个含有 N 个波峰(1, …, N)的信号的有效值可以通过下式计算得到:

$$I = \frac{1}{N-4} \times \sum_{i=3}^{N-2} (X_i) \text{ 或者}$$

$$I = \frac{1}{N-4} \times \frac{1}{\sqrt{8}} \sum_{i=3}^{N-2} (Z_i)$$

式中:

X_i ——第 i 个峰值对应的电弧电流的有效值;

Z_i ——第 i 个峰值对应的电弧电流的峰峰值。

一个含有 N 个波峰(1, …, N)的信号的有效值的数值解析形式为:

$$I = \frac{1}{N-4} \times \frac{1}{\sqrt{8}} \sum_{i=3}^{N-2} (a_i \times t_i + b_i - y_i)$$

式中:

t_i ——第 i 个峰值对应的时间瞬时值(时间横坐标);

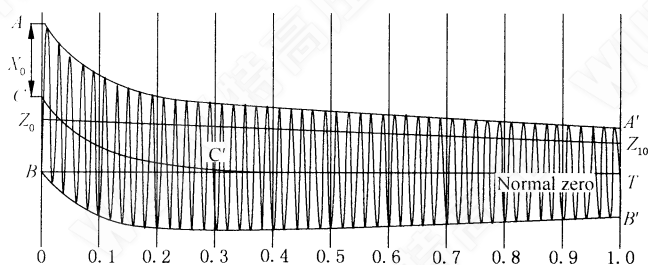
y_i ——第 i 个峰值对应的峰值;

a_i ——直线 $f_i(t)$ 的斜率;

b_i ——直线 $f_i(t)$ 的在 $t=0$ 的初始值。

G.7 短路电路在给定时间内的短时电流的等效有效值

如果短时电流中没有恒定的对称交流分量有效值,等效的有效值可以从示波图中求得,使用的方法如下:



说明:

AA' 和 BB' —— 短路电流的包络线;

CC' —— 电流波形零值分布线(与理论零值偏移);

Z₀...Z₁₀ —— 去掉直流分量后,电流的交流分量的有效值;

X₀ —— 短路电路初始时刻,电流交流分量的峰值;

BT —— 短路电路的持续时间(所有) t_i。

图 G.6 短路试验中短时电流等效有效值的估算

持续时间 t_i 被图 G.6 中竖线等分成 10 份,0—0.1—...—1.0,同时通过计算得到各个竖线之间电流对应交流分量的有效值,用 Z₀,Z₁...Z₁₀ 表示。

其中:

$$Z = \frac{X}{\sqrt{2}}$$

X —— 电流交流分量的峰值。

在时间 t_i 内电流的等效有效值可以通过下式计算:

$$I_i = \sqrt{\frac{1}{30} \times [Z_0^2 + 4 \times (Z_1^2 + Z_3^2 + Z_5^2 + Z_7^2 + Z_9^2) + 2 \times (Z_2^2 + Z_4^2 + Z_6^2 + Z_8^2) + Z_{10}^2]}$$

不考虑 CC' 所代表的直流分量。

G.8 阻抗角的确定

阻抗角可以通过测量一个合闸角为 0 度的试验电路的电流得到,通过下式计算,在被测电流的直流分量衰减完毕后,峰值因子 k 可以通过被测电流得到。

$$k = \frac{I_p}{\sqrt{2} \times I'_{rms}}$$

式中:

I_p —— 电流峰值(参照 9.2.1);

I'_{rms} —— 直流分量衰减完毕后电流的真有效值(参照 9.2.3)。

阻抗角如图 G.7 所示,可以通过下式计算得到:

$$\frac{R}{X} = \sqrt{\frac{\cos\varphi^2}{1 - \cos\varphi^2}}$$

$$k = \left[\frac{1}{\sqrt{1 + (R/X)^2}} e^{X \left(\frac{\pi}{2} + \arctan \frac{X}{R} \right)} \right]$$

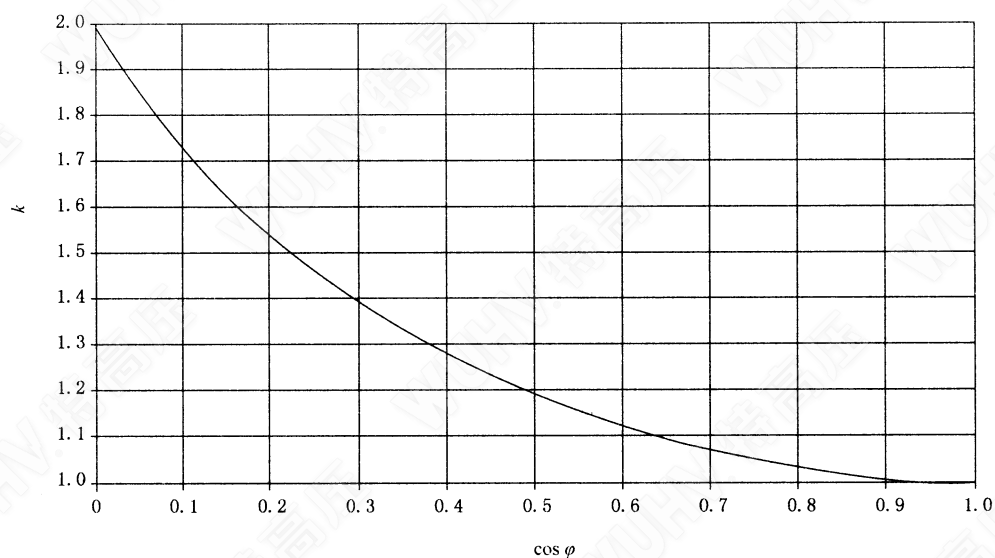


图 G.7 峰值因子 k 和功率因素 $\cos(\varphi)$ 之间的关系

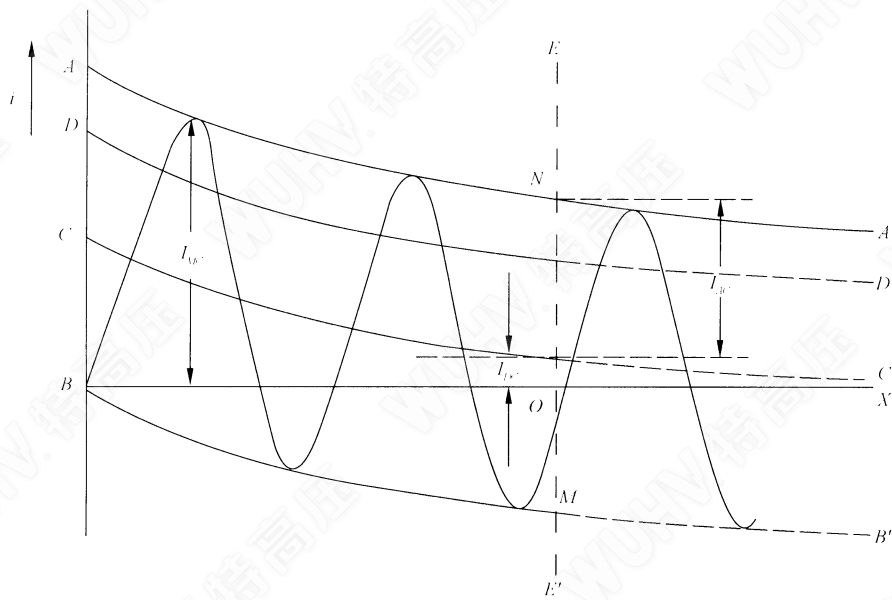
G.9 断路器短路开断电流的确定示例

短路开断电流是在 GB 1984 标准规定的使用和性能条件下,断路器所开断的短路电流。短路开断电流由两个值表征:

- 交流分量有效值;
- 导致触头分离时刻直流分量百分数的短路开断电流的直流时间常数。

注 1: 如果触头分离时刻的直流分量百分数不超过 20%, 短路开断电流仅由交流分量的有效值表征。

注 2: 直流分量百分数是短路开断电流的直流时间常数和短路电流起始时刻的函数(图 G.8)。



说明：

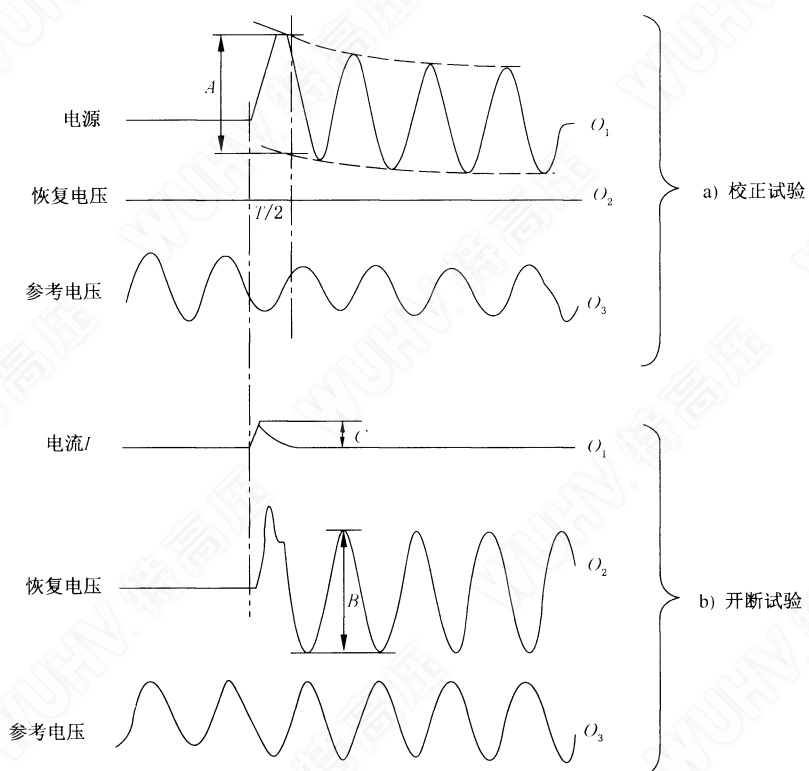
- AA' } 电流波的包络线；
- BB' }
- BX 正常的零线；
- CC' 任一时刻电流波形零线的偏移；
- DD' 任一时刻交流分量的有效值，从 CC' 测取；
- EE' 触头分离时刻(起弧)；
- I_M 峰值电流；
- I_M EE' 时刻电流的交流分量峰值；
- $\frac{I_M}{\sqrt{2}}$ EE' 时刻电流的交流分量有效值；
- I_{DC} EE' 时刻电流的直流分量；

$$\frac{I_{DC}}{I_M} \times 100 = \frac{ON - OM}{MN} \times 100 = \left(\frac{2 \times ON}{MN} - 1 \right) \times 100 \text{ 直流分量的百分数。}$$

图 G.8 短路开断电流以及直流分量百分数的确定

G.10 限流熔断器开断电流确定示例

图 G.9 给出了限流熔断器开断电流的波形图。



说明：

预期开断电流交流分量有效值 $I = \frac{A}{2\sqrt{2}}$ ；

恢复电压 $V = \frac{B}{2\sqrt{2}}$ ；

截止电流 $I = C$ 。熔断器在开断时出现的最大电流瞬时值。

注 1：当熔断器在没有达到回路预期峰值电流时动作，这个概念特别重要。

注 2：本图仅为了图解说明，电流波形没有按照相同的比例来画。

图 G.9 熔断器开断试验波形图

附录 H
(资料性附录)

国标和 IEC 大电流试验示例

表 H.1 短时交流电流的典型试验列表

试验类型	IEC 相关标准(示例)
峰值耐受电流和短时耐受电流试验	GB 1094.5、IEC 60076-5 GB/T 7251.2、IEC 60439-2 GB 14048.1、GB 14048.2、IEC 60947-1、IEC 60947-2 GB 14048.3、IEC 6047-3 DL/T 879、IEC 61230 IEC 61439-1 GB/T 11022、IEC 62271-1
关合和开断试验	GB 3804、IEC 60265-1 GB 14048.1、GB 14048.2、IEC 60947-1、IEC 60947-2 GB 14048.3、IEC 6047-3 GB 1984、GB 1985、IEC 62271-100、IEC 62271-102 GB/T 14810、GB 16926、IEC 62271-104、IEC 62271-105
并联电抗器开合试验	IEC 62271-110
容性电流开合试验	GB 1984、IEC 62271-100
合成试验	GB/T 4473、IEC 62271-101
限流熔断器试验	GB/T 15166.2、IEC 60282-1

表 H.2 指数型冲击电流的典型试验列表

试品类型	参考标准	冲击类型	时间参数
无间隙避雷器试验	GB 11032、IEC 60099-4	1 / ≤20	$T_1 \pm 10\%$ $T_2 \leq 20 \mu s$
无间隙避雷器试验	GB 11032、IEC 60099-4	4/10	$3.5 \mu s < T_1 < 4.5 \mu s$ $T_2 \pm 10\%$
无间隙避雷器试验	GB 11032、IEC 60099-4		$7 \mu s < T_1 < 9 \mu s$ $18 \mu s < T_2 < 22 \mu s$
避雷器试验	IEC 61643-11		$T_1 \pm 10\%$ $T_2 \pm 10\%$
电子设备	GB/T 17626.5、IEC 61000-4-5	8/20	$T_1 \pm 20\%$ $T_2 \pm 20\%$
通讯网络中的电涌保护器 低压配电系统中的电涌保护器 (SPD)	GB 18802.21、IEC 61643-21		$T_1 \pm 20\%$ $T_2 \pm 20\%$

表 H.2 (续)

试品类型	参考标准	冲击类型	时间参数
无间隙避雷器测试	GB 11032、IEC 60099-4	30/80	$25 \mu\text{s} < T_1 < 35 \mu\text{s}$ $70 \mu\text{s} < T_2 < 90 \mu\text{s}$
无间隙避雷器测试	GB 11032、IEC 60099-4	30-100/(60-200)	
无间隙避雷器测试	GB 11032、IEC 60099-4 中表 5 和表 6	$T_d = 500 \mu\text{s}, 1\,000 \mu\text{s}, 2\,000 \mu\text{s}$, 或 $2\,000 \mu\text{s} < T_d < 3\,200 \mu\text{s}$	$T_1 \pm 20\%$ $T_2 \pm 20\%$
通讯网络中的电涌保护器	GB 18802.21、IEC 61643-21	5/300	$T_1 \pm 30\%$ $T_2 \pm 20\%$
无间隙避雷器测试	GB/T 21714.1、IEC 62305-1	10/350	未给出
通讯网络中的电涌保护器	GB 18802.21、IEC 61643-21	10/350 10/250	$T_1 \pm 30\%$ $T_2 \pm 20\%$

表 H.3 使用矩形波冲击电流的典型试验

试品类型	参考标准	冲击类型
无间隙避雷器测试	GB 11032、IEC 60099-4 中表 5 和表 6	$T_d = 500 \mu\text{s}, 1\,000 \mu\text{s}, 2\,000 \mu\text{s}$, 或 $2\,000 \mu\text{s} < T_d < 3\,200 \mu\text{s}$

参 考 文 献

- [1] IEC 60050-151;2001 International Electrotechnical Vocabulary—Part 151: Electrical and magnetic devices
- [2] IEC 60050-300;2001 International Electrotechnical Vocabulary—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
- [3] IEC 60050-321;1986 International Electrotechnical Vocabulary—Part 321: Instrument transformers
- [4] IEC 60076-5;2000 Power transformers—Part 5: Ability to withstand short circuit
- [5] IEC 60099-4;2004 Surge arresters—Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems
- [6] IEC 60265-1;1998 High-voltage switches—Part 1: Switches for rated voltages above 1 kV and less than 52 kV
- [7] IEC 60282-1;2009 High-voltage fuses—Part 1: Current-limiting fuses
- [8] IEC 60947-1;2007 Low-voltage switchgear and controlgear—Part 1: General rules
- [9] IEC 60947-2;2006 Low-voltage switchgear and controlgear—Part 2: Circuit-breakers
- [10] IEC 60947-3;2008 Low-voltage switchgear and controlgear—Part 3: Switches, disconnectors, switch-disconnectors and fuse-combination units
- [11] IEC 61000-4-5 Electromagnetic compatibility (EMC)—Part 4-5: Testing and measurement techniques—Surge immunity test
- [12] IEC 61083-1;2001. Instruments and software used for measurement in high-voltage impulse tests—Part 1: Requirements for instruments
- [13] IEC 61083-2;1996 Digital recorders for measurements in high-voltage impulse tests—Part 2: Evaluation of software used for the determination of the parameters of impulse waveforms
- [14] IEC 61180-2;1994 High-voltage test techniques for low-voltage equipment, Test equipment
- [15] IEC 61230;2008, Live working—Portable equipment for earthing or earthing and short-circuiting
- [16] IEC 61643-1;2005 Low-voltage surge protective devices—Part 1: Surge protective devices connected to low-voltage power distribution systems—Requirements and tests
- [17] IEC 61643-11 Low-voltage surge protective devices—Part 11: Surge protective devices connected to Low-voltage power distribution systems—Performance requirements and testing methods
- [18] IEC 61643-21 Low-voltage surge protective devices—Part 21: Surge protective devices connected to telecommunications and signalling networks—Performance requirements and testing methods
- [19] IEC 62271-1 High-voltage switchgear and controlgear—Part 1: Common specifications
- [20] IEC 62271-100;2008 High-voltage switchgear and controlgear—Part 100: Alternating-current circuit-breakers
- [21] IEC 62271-101 High-voltage switchgear and controlgear—Part 101: Synthetic testing
- [22] IEC 62271-102;2001 High-voltage switchgear and controlgear—Part 102: Alternating current disconnectors and earthing switches
- [23] IEC 62271-103 High-voltage switchgear and controlgear—Part 103: Switches for rated

voltages above 1 kV up to and including 52 kV

[24] IEC 62271-104 High-voltage switchgear and controlgear—Part 104: Alternating current switches for rated voltages of 52 kV and above

[25] IEC 62271-105:2002 High-voltage switchgear and controlgear—Part 105: Alternating current switch-fuse combinations

[26] IEC 62271-110: 2009 High-voltage switchgear and controlgear—Part 110: Inductive load switching

[27] IEC 62305-1 Protection against lightning—Part 1: General principles

[28] ISO/IEC 17025: 2005 General requirements for the competence of testing and calibration laboratories

[29] ISO/IEC Guide 99:2007 International vocabulary of metrology—Basic and general concepts and associated terms (VIM)

[30] European Association of National Metrology Institutes (EUROMET), “Metrology—In Short”: Third edition, July 2008, ISBN: 87-988154-1-2 JCGM 100:2008 (GUM 1995 with minor corrections): Evaluation of measurement data—Guide to the expression of uncertainty in measurement, <http://www.bipm.org/en/publications/guides>

[31] JCGM 101:2008 Evaluation of measurement data—Supplement 1 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement”—Propagation of distributions using a Monte Carlo method, <http://www.bipm.org/en/publications/guides>

[32] JCGM 104:2009 Evaluation of measurement data—An introduction to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” and related documents, <http://www.bipm.org/en/publications/guides>

[33] JCGM 200:2008 International vocabulary of metrology—Basic and general concepts and associated terms (VIM), <http://www.bipm.org/en/publications/guides>

[34] SATO, S., HARADA, T. and HANAI, M. “IEC 60060-1 Requirements in Impulse Current Waveform Parameters”, Proceedings of the 7th International Power Engineering Conference, CD-ROM, No. TM-3.4, pp.1-5, Singapore, (2005)

[35] SATO, Shuji, HARADA, Tatsuya and HANAI, Masahiro, “IEC 60060-1 Requirements in Impulse Current Waveform Parameters”, International Journal of Emerging Electric Power Systems, Vol. 6, Art 7, pp.1-12, 2006, June

[36] SATO, Shuji, HARADA, Tatsuya, YOKOYAMA, Taizou, SAKAGUCHI, Sumiko, EBANA, Takao and SAITO, Tatsunori, “Impulse Current Waveform Compliance with IEC 60060-1”, IEEJ Trans. FM, Vol. 125, No.8, pp.609-613, (2005)

[37] PROAKIS, John G. and MANOLAKIS, Dimitris G. “Introduction to Digital Signal Processing”, Macmillan Publishing Company, New York, 1988.

[38] RUNGIS, Y. Li, J. and PFEFFER, A. “The Voltage and Time Parameter Measurement Uncertainties of a Large Damped Capacitor Divider due to its Non-ideal Step Response”, proceedings of 15th International Symposium on High Voltage Engineering, 27--31 August 2007, Ljubljana, Slovenia

[39] MALEWSKI, R., NGUYEN, C.T., FESER, K., HYLÉN-CAVALLIUS, N., “Elimination of the skin effect error in heavy current shunts”, IEEE Transactions, PAS-100, 1981