

分析电力设备检测中测量不确定度评定方法的应用

阿衣子布

国网电力科学研究院有限公司 江苏 南京 211106

【摘要】：依据中国国家认证认可监督管理委员会发布的 RB/T214-2017《检验检测机构资质认定能力评价检验检测机构通用要求》，检验检测项目中有测量不确定度的要求时，检验检测机构应建立和保持应用评定测量不确定度的程序，检验检测机构应建立相应数学模型，给出相应检验检测能力的评定测量不确定度案例。检验检测机构可在检验检测出现临界值、内部质量控制或客户有要求时，报告测量不确定度。依据中国合格评定国家认可委员会发布的 CNAS-CL01: 2018《检测和校准实验室能力认可准则》，开展检测的实验室应评定测量不确定度。当由于检测方法的原因难以严格评定测量不确定度时，实验室应基于对理论原理的理解或使用该方法的实践经验进行评估。随着电力设备检验检测机构的蓬勃发展，熟知测量不确定度的基本概念和掌握应用测量不确定度的评定方法成为电力设备检验检测工作人员的基本职业技能要求。本文主要通过介绍不确定度的基本术语，测量不确定度与测量误差的辨析，电力设备检测中不确定度评定的应用案例为相关检验检测人员提供指导，理清思路。

【关键词】：测量不确定度；评定；应用；电力设备检测

1 不确定度的基本术语^[1]

(1) 测量不确定度 (Measurement uncertainty)：与测量结果相联系的参数，表征合理地赋予被测量之值的分散性。

(2) 标准不确定度 (Standard uncertainty)：以标准偏差表示的测量不确定度。

(3) (不确定度的) A 类评定 (Type A evaluation of uncertainty)：对在规定测量条件下测得的量值用统计分析的方法进行的测量不确定度分量的评定。

注：规定测量条件是指重复性测量条件，期间精密度测量条件或复现性测量条件。

(4) (不确定度的) B 类评定 (Type B evaluation of uncertainty)：用不同于测量不确定度 A 类评定的方法对测量不确定度分量进行的评定。

(5) 合成标准不确定度 (Combined standard uncertainty)：由在一个测量模型中各输入量的标准测量不确定度获得的输出量的标准测量不确定度。

注：在数学模型中的输入量相关的情况下，当计算合成标准不确定度时必须考虑协方差。

(6) 扩展不确定度 (Expanded uncertainty)：合成标准不确定度与一个大于 1 的数字因子的乘积。

用于确定测量结果区间的量。合理赋予被测量的值分布的大部分可望落于该区间。扩展不确定度有时也称为展伸不确定度、范围不确定度。合理赋予被测量的值不只一个，而是多个，且具有一定分散性，对测量结果 y 而言，若其扩展不确定度为 U ，则被测量的值将以一定概率包含于区间

$[y-U, y+U]$ 中。

(7) 包含因子 (Coverage factor)：为获得扩展不确定度，对合成标准不确定度所乘的数字因子，记为 k 。

(8) 包含概率 (Level of confidence)：扩展不确定度确定的测量结果区间包含合理赋予被测量值分布的概率，记为 p ，有时也称为置信水平、包含概率。

(9) 相对标准不确定度 (Relative uncertainty)：标准不确定度除以测得值的绝对值。

2 测量不确定度与测量误差的辨析

序号	测量误差	测量不确定度
1	测量结果减去被测量的真值，是具有正号和负号的量值。	用标准偏差或其倍数的半宽度（置信区间）表示，并需要说明置信概率。无符号参数（或取正号）。
2	表明测量结果偏离真值。	说明合理地赋予被测量之值（最佳估值）的分散性。
3	客观存在，不以人的认识程度而改变。	与评定人员对被测量、影响量及测量过程的认识密切相关。
4	不能准确得到真值，而是用约定真值代替真值，此时只能得到真值的估计值。	通过实验、资料、根据评定人员的理论和实践经验进行评定，可以定量给出。
5	按性质可分为随机误差和系统误差两大类，都是无穷多次测量下的理想概	可表述为“随机效应或系统效应引起的不确定度分量”。可将评定方法分为“A 类或 B 类标准不确定度

	念。	评定方法”。
6	已知系统误差的估计值，可对测量结果进行修正，得到已修正的测量结果。	不能用测量不确定度修正测量结果。

(注：上接 2 中的表格)

3 电力设备检测中不确定度评定的应用案例

3.1 评定保护联结阻抗的不确定度

依据标准：GB/T14598.27-2017 量度继电器和保护装置第 27 部分：产品安全要求；DL/T478-2013 继电保护和自动装置通用技术条件使用的仪器设备：CS2678 型接地电阻测试仪；

被检装置：DARI-3461 不停电自动快速调电装置。

测量程序：在环境温度为 15℃~25℃，相对湿度为 45%~75%，大气条件为 86kPa~106kPa 的条件下进行测量。将接地电阻测试仪的接地电阻测试端接至被测 DARI-3461 不停电自动快速调电装置的接地端子以及壳体上可接近的导电部分，保证所有试验设备、仪表仪器接线正确，施加交流模拟量 20A，持续时间 60s，检测 DARI-3461 不停电自动快速调电装置的保护联结阻抗不应超过 0.1Ω。

数据模型：检测结果直接由测试仪读数给出 $R_x = R_h$ 式中， R_x —保护联结阻抗，mΩ； R_h —接地电阻测试仪示值，mΩ。

不确定度来源：保护联结阻抗 R_x 值测量的不确定度来源主要包括：

保护联结阻抗 R_x 测量重复性引起的标准不确定度 u_{A1} ，采用 A 类方法评定；

样品复杂性（选取样品的 5 个测试部位）引起的标准不确定度 u_{A2} ，采用 A 类方法评定；

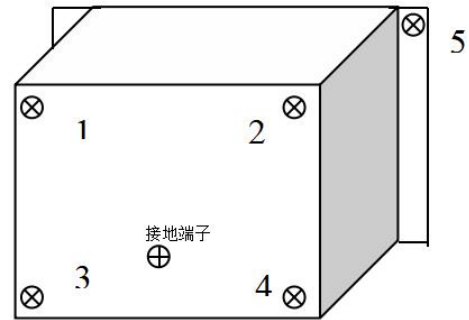
CS2678 型接地电阻测试仪阻抗测量误差引入的不确定度 u_{B1} ，采用 B 类方法评定；

CS2678 型接地电阻测试仪阻抗显示分辨率引入的不确定度 u_{B2} ，采用 B 类方法评定；

CS2678 型接地电阻测试仪校准证书校准结果的不确定度 u_{B3} ，采用 B 类方法评定；

实验室环境条件的波动引入的标准不确定度 u_{B4} ，采用 B 类方法评定。

标准不确定度评定。



样品位置图示

检验员 A、B 在样品接地端子与 1 号位置之间分别进行 5 次测试结果如下表：

序号	检验员 A(mΩ)	检验员 B(mΩ)
1	21.8	20.9
2	20.0	21.0
3	20.7	20.7
4	20.8	19.9
5	20.9	19.8

检验员 A 在样品接地端子与外壳 5 个不同导电位置之间分别进行 5 次测试结果如下表：

序号	检验员 A(mΩ)
1	21.8
2	17.8
3	18.5
4	18.1
5	13.2

保护联结阻抗 R_x 测量重复性引起的标准不确定度 u_{A1}

根据 10 次重复测量结果（21.8、20.0、20.7、20.8、20.9、20.9、21.0、20.7、19.9、19.8），应用贝塞尔公式计算单次样本标准偏差为：

$$s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (R_{xi} - \bar{R}_x)^2}{(n-1)}} = \sqrt{\frac{1}{10-1} \sum_{i=1}^{10} (R_{xi} - \bar{R}_x)^2} = 0.61 \text{ m}\Omega$$

日常检测中，对同一位置通常仅进行单次测量，所以 A 类标准不确定度为：

$$u_{A1} = s(x) = 0.61 \text{ m}\Omega$$

样品复杂性（选取样品的 5 个测试部位）引起的标准不

确定度 u_{A2}

根据被检装置 5 个不同导电位置的测量结果(21.8、17.8、18.5、18.1、13.2)，应用贝塞尔公式计算单次样本标准偏差为：

$$s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (R_{xi} - \bar{R}_x)^2}{(n-1)}} = \sqrt{\frac{1}{5-1} \sum_{i=1}^5 (R_{xi} - \bar{R}_x)^2} = 3.07 \text{ m}\Omega$$

日常检测中，按照标准对不同位置各进行 1 次测量，取最大的保护联结阻抗值（当前是 21.8 mΩ）为测试结果，所以 A 类标准不确定度为：

$$u_{A2} = s(x) = 3.07 \text{ m}\Omega$$

CS2678 型接地电阻测试仪阻抗测量误差引入的不确定度 u_{B1} 。

CS2678 型接地电阻测试仪阻抗测量误差 $\pm 2 \text{ m}\Omega$ ，区间半宽 $2 \text{ m}\Omega$ ，区间内服从均匀分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，可得出标准不确定度为：

$$u_{B1} = \frac{2}{\sqrt{3}} = 1.16 \text{ m}\Omega$$

CS2678 型接地电阻测试仪阻抗显示分辨率引入的不确定度 u_{B2} 。

仪器显示的分辨率为 $0.1 \text{ m}\Omega$ ，区间半宽 $0.1 \div 2 = 0.05 \text{ m}\Omega$ ，服从均匀分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，可得出标准不确定度为：

$$u_{B2} = \frac{0.05}{\sqrt{3}} = 0.03 \text{ m}\Omega$$

CS2678 型接地电阻测试仪校准证书校准结果的不确定度 u_{B3} 。

CS2678 型接地电阻测试仪校准证书校准结果的扩展不确定度为 $U = 0.1 \text{ m}\Omega$ ($k=2$)，可得出标准不确定度为：

$$u_{B3} = \frac{0.1}{2} = 0.05 \text{ m}\Omega$$

实验室环境条件的波动引入的标准不确定度 u_{B4} 。

根据经验，由于环境温度引起的阻抗波动为 $\pm 1 \text{ m}\Omega$ ，区间内服从均匀分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，可得出标准不确定度为：

$$u_{B4} = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0.58 \text{ m}\Omega$$

列表给出不确定度汇总如下：

保护联结阻抗不确定度汇总表

序号	标准不确定度					
	不确定度来源	类型	分 布	包含因子 (ki)	符号	数值 (mΩ)
1	测量重复性	A	——	——	u _{A1}	0.61
2	样品复杂性	A	——	——	u _{A2}	3.07
3	接地电阻测试仪阻抗测量误差	B	均匀	$\sqrt{3}$	u _{B1}	1.16
4	接地电阻测试仪阻抗显示分辨率	B	均匀	$\sqrt{3}$	u _{B2}	0.03
5	校准证书校准结果	B	正态	2	u _{B3}	0.05
6	实验室环境条件的波动	B	均匀	$\sqrt{3}$	u _{B4}	0.58
7	合成标准不确定度	$u_c = \sqrt{u_{A1}^2 + u_{A2}^2 + \sum_{i=1}^4 u_{Bi}^2}$			u _c	3.39
8	扩展不确定度 U=2u _c ； k=2					

合成标准不确定度评定：各标准不确定度分量互不相关的，采用方和根方法合成，得出合成标准不确定度：

$$u_c = \sqrt{u_{A1}^2 + u_{A2}^2 + u_{B1}^2 + u_{B2}^2 + u_{B3}^2 + u_{B4}^2} = 3.39 \text{ m}\Omega$$

扩展不确定度评定：取包含因子 $k=2$ ，置信概率 95%，保护联结阻抗的扩展不确定度为

$$U = k \times u_c = 2 \times 3.39 = 6.78 \text{ m}\Omega$$

报告检测结果和相对扩展不确定度：DARI-3461 不停电自动快速调电装置保护联结阻抗的测试结果为 $R_x = 21.8 \text{ m}\Omega$ ，其扩展不确定度为 $U = 6.8 \text{ m}\Omega$ ， $k=2$ 。

3.2 评定要点

如果为客户所做的某项测量不是实验室的常规测量，则不确定度的 A 类评定应随该项测量实时进行。但实验室常常是在类似的条件下，用相同的设备相同的方法，在常规基础上做基本类似性质的测量。在这种情况下，通常不需要每次测量都进行 A 类标准不确定度评定，可以直接引用预先评定的结果。但如果随后的测量进行几次(典型情况是 $n' = 3$)，而且将 n' 次测量的平均值作为结果提供给客户，则应由原先的实验获得的标准差 $s(x)$ 除以次数 n' 的平方根，以求得算术平均值的实验标准差。

从人、机、料、法、环各方面分析测量不确定度的来源。

按照《CNAS-CL01-G003 测量不确定度的要求》，扩展不

确定度的数值不应超过两位有效数字,最终报告的测量结果的末位应与扩展不确定度的末位对齐。

4 结束语

不确定度是国际公认的用来评定测量结果质量的参数,

准确合理的评定是提供正确测量结果的前提和保证^[2]。本文介绍了不确定度的基本术语,进行了测量不确定度与测量误差的辨析,通过电力设备检测中不确定度评定的应用案例为相关检验检测人员提供了实际评定工作指导。

参考文献:

- [1] 中国合格评定国家委员会.电器领域测量不确定度的评估指南[J].中国评定网,2020.
- [2] 江长杰.低压电器温升试验的不确定度分析[J].广西质量监督导报,2013,(7):45-46,48.