

变电站厂界噪声测量结果不确定度评定方法

钱勇¹, 韩利¹, 张庆霞¹, 拓守桓², 马裕超³

(1. 国网宁夏电力有限公司电力科学研究院, 宁夏 银川 750011;

2. 宁夏回族自治区核与辐射安全中心, 宁夏 银川 750002;

3. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

摘 要: 变电站厂界噪声测量是电力设施环境因子的重要监测项目之一, 测量不确定度是定量说明测量结果质量的重要参数。针对变电站厂界噪声测量不确定度评定的问题, 首先, 给出变电站厂界噪声测量方法, 分析不确定度来源; 其次, 建立变电站厂界噪声等效连续 A 声级模型和噪声标准测量不确定度的评定模型, 包括 A 类、B 类评定模型; 最后, 结合实际算例给出完整测量不确定度评定计算过程, 为工程技术人员提供企业厂界噪声测量不确定度评定的可操作方法。

关键词: 厂界噪声; 不确定度; 评定

中图分类号: X 839.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-3643(2023)02-0059-06

有效访问地址: <http://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1672-3643.2023.02.010>

Uncertainty evaluation method of measurement results for boundary noise around the substation

QIAN Yong¹, HAN Li¹, ZHANG Qingxia¹, TA Shouhuan², MA Yuchao³

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Yinchuan Ningxia 750011, China;

2. Nuclear and Radiation Safety Center of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan Ningxia 750002, China;

3. China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100192, China)

Abstract: Substation boundary noise measurement is one of the important monitoring items of environmental factors of power facilities. Measurement uncertainty is an important parameter to quantitatively describe the quality of measurement results. Aiming at the problem of uncertainty evaluation of substation boundary noise measurement, firstly, the measurement method of substation boundary noise is given, and the source of uncertainty is analyzed. Secondly, the equivalent continuous A sound level model of substation boundary noise and the evaluation model of noise standard measurement uncertainty are established, including A and B evaluation models. Finally, combined with the actual example, the complete calculation process of measurement uncertainty evaluation is given, which provides an operable method for engineering and technical personnel to evaluate the uncertainty of factory boundary noise measurement in industrial enterprises.

Keywords: factory boundary noise; uncertainty; evaluation

DOI: 10.3969/j.issn.1672-3643.2023.02.010

0 引 言

变电站厂界噪声测量是电力设施环境因子的重要监测项目之一,测量不确定度是定量说明测量结果质量的重要参数。真值是理想值,因此测量误差是不可知量。在实际测量中,测量结果的准确性和可靠性会受到人员、机器、原料、方法、环境等因素的影响,如果能够评估这些影响因素,就可以评定测量结果的准确性和可靠性,这就是测量不确定度评定。由于测量不确定度的存在,测量结果不可能是单一的数值,只能给出测得量值在一定置信概率下的置信区间。文献[1]给出我国最新修订的测量不确定度评定与表示方法的标准。相较于文献[2],文献[3]给出最新修订的声级计检定规程,删除了入射角定义及指向性响应要求,技术指标的“允差”修改为“接受限”。文献[4]给出声校准器声压级的计量性能。文献[5]给出厂界噪声测量的不确定度评定方法,然而依据的声级计、声校准器检定规程已多次更新版本,噪声监测测量方向偏差导致的不确定度已被取消,声校准器声压级允差值已被更改,且针对测量不确定度 B 类评定方法不够全面。文献[6]给出专业实验室中对声级计的不确定度来源分析与计算,包括标准传声器灵敏度、前置放大器准确度、消声室声场特性、消声室声场不均匀性对测量结果的影响。

针对变电站厂界噪声测量不确定度评定的问题,给出变电站厂界噪声测量方法,分析不确定度来源。依据文献[1-2,4]中的技术规范,建立变电站厂界噪声等效连续 A 声级模型和标准测量不确定度的评定模型,完善补充噪声标准不确定度的 B 类评定模型,结合实际算例,给出完整测量不确定度评定的计算过程。

1 测量方法与不确定度来源分析

1.1 测量方法

依据文献[7]中规定,在变电站正常运行工况下和无雨雪、无雷电天气,风速为 5 m/s 以下气象条件时测量,变电站厂界噪声测点选在变电站

厂界外 1 m、高度 1.5 m、距任一反射面距离不小于 1 m 的位置,变电站噪声声源主要来自变压器、电抗器等,属于稳态噪声,采用 1 min 的等效连续 A 声级。测量前、测量后在测量现场进行声学校准。

1.2 不确定度来源分析

A 类不确定度主要是测量方法引起的不确定度,由单次测量的不确定度和重复测量的不确定度 2 部分组成。B 类不确定度主要为在噪声测量过程中因仪器性能影响产生的不确定度,主要由声级计频率计权、声级计级线性偏差、校准声源的不确定度 3 部分组成。

本文提及的测量不确定度评定方法应用于工程技术人员在现场的噪声测量,不针对非专业实验室中对声级计的测量结果不确定度评定。

2 数学模型的建立

2.1 噪声等效连续 A 声级模型

规定测量时间 T 内,在相同声环境、气象环境条件下对正常运行工况下的变电站厂界同一位置噪声独立重复测量 n 次,得到 n 个测量值,被测量的能量平均值就是变电站厂界噪声等效连续 A 声级模型,按公式(1)计算。

$$\bar{L}_{eq} = 10 \lg \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N 10^{L_i/10} \quad (1)$$

式中: N 为测量时间 T 内采样总数,文献[7]中常用 1 min 等效连续 A 声级,采样时间一般取 1 s, N 取 60 个; L_i 为第 i 次采样测得的 A 声级,单位为 dB(A)。

2.2 噪声标准不确定度的评定模型

2.2.1 标准不确定度的 A 类评定模型

A 类评定方法是对在规定测量条件下测得的量值用统计分析的方法进行测量不确定度分量的评定,最常用的方法为贝塞尔公式^[1]。变电站厂界噪声标准 A 类不确定度的评定模型计算方法如下:

单个测得值 L_k 的实验标准差 $s(L_k)$ 按公式(2)计算。

$$s(L_k) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (L_i - \bar{L}_{eq})^2} \quad (2)$$

被测量估计值 $\bar{L}$ 的 A 类标准不确定度 $u_A(\bar{L}_{eq})$ 按公式(3)计算。

$$u_A(\bar{L}_{eq}) = s(\bar{L}_{eq}) = \frac{s(L_k)}{\sqrt{n}} \quad (3)$$

变电站厂界噪声标准不确定度的 A 类评定流程见图 1。

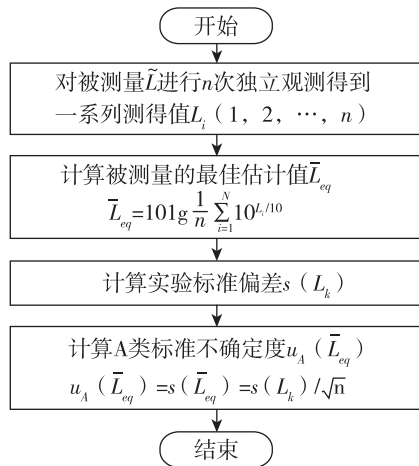


图 1 标准不确定度的 A 类评定流程

n 次测量必须在重复测量条件下进行,相同的测量程序,相同的测量人或团队,相同的地点,在相同条件下使用相同的测量设备,短时间内重复测量。

从理论上说,测量次数越多,得出的实验标准偏差越可靠,但当测量次数越多,重复性条件就越难以保证,测量所用的时间也就越长。文献[8]中规定在进行计量标准的重复性测量中,要求测量次数不小于 10 次。

2.2.2 标准不确定度的 B 类评定模型

B 类评定方法^[1]是根据有关的信息或经验,判断被测量的可能值区间 $[\bar{L}_{eq} - a, \bar{L}_{eq} + a]$ 。假设被测量值的概率分布,根据概率分布和要求的概率 p 确定 k ,则标准 B 类不确定度的评定模型 u_B 按公式(4)计算。

$$u_B = \frac{a}{k} \quad (4)$$

式中: a 为厂界噪声测量可能值区间的半宽度;根据概率论获得的 k 称置信因子,当 k 为扩展不确定度的倍乘因子时称包含因子。

本小节主要利用声级计检定证书、校准证书、说明书及其相关检定规程等能够获取的信息,用

于评定现场测量 B 类不确定度,具体情况如下:

1) 声级计出厂说明书给出仪器的最大允许误差或者适用接受限为 $\pm \Delta$,并经计量部门检定合格,则可能值的区间为 $(-\Delta, +\Delta)$,区间半宽度为 $a = \Delta$ 。当利用有关信息或经验估计出被测量可能值区间的上限和下限,其值在区间外的可能几乎为零时,若被测量值落在该区间内的任意值处的可能性相同,则可假设为均匀分布(或称矩形分布、等概率分布),那么包含因子 k 取 $\sqrt{3}$ 。变电站厂界噪声标准不确定度的 B 类评定模型 $u_{B.SLM1}$ 按公式(5)计算。

$$u_{B.SLM1} = \frac{a}{k} = \frac{\Delta}{\sqrt{3}} \quad (5)$$

2) 声级计校准证书或检定证书给出了其扩展不确定度为 U 和包含因子 k ,则区间的半宽度为 $a = U$ 。变电站厂界噪声标准不确定度的 B 类评定模型 $u_{B.SLM2}$ 按公式(6)计算。

$$u_{B.SLM2} = \frac{a}{k} = \frac{U}{k} \quad (6)$$

3) 文献[2]给出了声级计计量性能测量结果的最大允许测量不确定度,见表 1,因为被测量的随机变化近似正态分布,所以包含因子 k 取 1.960。变电站厂界噪声标准不确定度的 B 类评定模型 $u_{B.SLM3}$ 按公式(7)计算。

$$u_{B.SLM3} = \frac{a}{k} = \frac{U}{1.960} \quad (7)$$

表 1 声级计最大允许测量不确定度

项目	最大允许测量 不确定度/dB
频率计权 10 Hz ~ 4 kHz	0.60
频率计权 > 4 kHz ~ 10 kHz	0.70
频率计权 > 10 kHz ~ 20 kHz	1.00
1 kHz 处,C,Z 频率计权声级	0.20
相对 A 频率计权声级的偏差	
级线性偏差	0.30

4) 测量前后使用声级校准器(1 级或 2 级)校准,根据文献[4],声级校准器产生的声压级与相应的规定声压级之差的绝对值应不超过表 2 给出的适用接受限 $\pm \Delta$,按均匀分布,包含因子 k 取

$\sqrt{3}$ 。变电站厂界噪声标准不确定度的 B 类评定模型同公式(5)。

表 2 声级校准器声压级的接受限

标称频率/Hz	声压级接受限/dB	
	1 级	2 级
31.5 ~ <160	0.30	-
160 ~ 1 250	0.25	0.4
>1 250 ~ 4 000	0.35	-
>4 000 ~ 8 000	0.45	-
>8 000 ~ 16 000	0.50	-

变电站厂界噪声标准不确定度的 B 类评定流程见图 2。

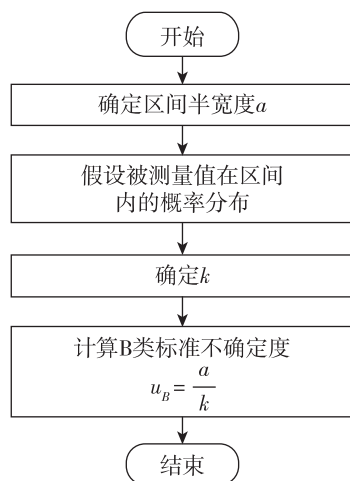


图 2 标准不确定度的 B 类评定流程

2.2.3 合成标准不确定度的评定模型

变电站厂界噪声可直接测量,且测量不确定度的各分量 u_i 相互间不相关,则合成标准不确定度 u_c 按公式(8)计算。

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2} \quad (8)$$

2.2.4 扩展不确定度的评定模型

扩展不确定度 U_c 由合成标准不确定度 u_c 乘以包含因子 k 得到,按公式(9)计算。

$$U_c = k u_c \quad (9)$$

测量结果按公式(10)计算。

$$\bar{L} = \bar{L}_{eq} \pm U_c \quad (10)$$

被测量 $\bar{L}$ 的可能值以较高的包含概率落在 $[\bar{L}_{eq} - U_c, \bar{L}_{eq} + U_c]$ 区间内。被测量的值落在包

含区间内的包含概率取决于所取的包含因子 k 的值, k 值一般取 2 或 3。

在通常的测量中,一般取 $k = 2$ 。当取其他值时,应说明其来源。当给出扩展不确定度 U_c 时,一般应注明所取的 k 值;若未注明 k 值,则指 $k = 2$ 。

3 实际算例

3.1 数据来源与不确定度来源说明

对 750 kV 变电站厂界噪声测量进行不确定度评定,主要噪声源为主变压器、电抗器,为稳态噪声,测量仪器为噪声统计分析仪(AWA6291 型 1 级)。在变电站正常运行工况下和无雨、无雪、风力 <5.0 m/s 的气候条件下,采用 A 计权、F 档测量,采样时间间隔为 1 s,采样时间为 1 min,评价量为等效连续 A 声级。为分析稳态噪声测量重复性的不确定度,在正常工况下连续 10 次进行 1 min 等效连续 A 声级测量。每次测量完毕,关闭电源,其目的在于使每次测量结果彼此独立。

3.2 标准不确定度的 A 类评定

厂界噪声 1 min 等效连续 A 声级测量结果见表 3,其中噪声统计分析仪自动计算标准偏差,在声级计上显示为 SD,可直接读数。

表 3 厂界噪声等效声级测量结果

测量次数	标准偏差/dB(A)	1 min 等效连续 A 声级/dB(A)
L_1	2.1	47.4
L_2	2.1	46.6
L_3	1.8	47.0
L_4	1.9	46.9
L_5	2.0	47.8
L_6	2.9	47.0
L_7	3.1	47.5
L_8	3.0	46.9
L_9	2.9	47.2
L_{10}	2.5	47.0

3.2.1 单次测量值的不确定度

10 次厂界噪声测量中,1 min 等效连续 A 声

级标准偏差最大值 $s(L_i)$ 为 3.1 dB(A), 单次测量结果的不确定度分量为

$$u_{a1} = s(L_i) / \sqrt{n_1} = 0.40 \text{ dB(A)} \quad (11)$$

式中: n_1 为 60 个, 是 1 min 测量的样本数。

3.2.2 重复性的不确定度

10 次厂界噪声测量的能量平均值为

$$\bar{L}_{eq} = 10 \lg \frac{1}{n_2} \sum_{i=1}^n 10^{L_i/10} = 47.14 \text{ dB(A)} \quad (12)$$

次厂界噪声测量的标准偏差为

$$s(L_k) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (L_i - \bar{L}_{eq})^2}{n_2 - 1}} = 0.35 \text{ dB(A)} \quad (13)$$

测定结果重复性的不确定度分量为

$$u_{a2} = s(L_k) / \sqrt{n_2} = 0.11 \text{ dB(A)} \quad (14)$$

式中: n_2 为 10 个, 是重复测量次数。

A 类相对标准不确定度计算为

$$\frac{u_a}{\bar{L}_{eq}} = \sqrt{\left[\frac{u_{a1}}{\bar{L}_{eq}}\right]^2 + \left[\frac{u_{a2}}{\bar{L}_{eq}}\right]^2} = 0.0088 \quad (15)$$

3.3 标准不确定度的 B 类评定

3.3.1 声级计频率计权的不确定度

根据文献[2]及仪器检定证书, 10 Hz ~ 4 kHz 仪器频率计权的扩展不确定度为 $U = 0.60 \text{ dB(A)}$, $k = 2$; 8 kHz 仪器频率计权的扩展不确定度为 $U = 0.70 \text{ dB(A)}$, $k = 2$; 12 500 Hz ~ 20 kHz 仪器频率计权的扩展不确定度为 $U = 1.00 \text{ dB(A)}$, $k = 2$ 。变电站噪声来源于主变压器、电抗器的地面低频稳态声源, 噪声主要集中于 20 Hz ~ 1 kHz^[9], 其他频段可忽略不计, 因此选取 10 Hz ~ 4 kHz 仪器频率计权的不确定度分量为

$$u_{b1} = \frac{U}{k} = \frac{0.6}{2} = 0.30 \text{ dB(A)} \quad (16)$$

专业检验检测实验室在声级计频率计权测试时, 按照文献[2], 在各频段内测试多个频率的纯音, 根据测试结果计算频率计权的不确定度。

3.3.2 声级计级线性偏差的不确定度

根据文献[2]、仪器检定证书, 声级计级线性偏差的扩展不确定度 U 取 0.30 dB(A), 包含因子取 k 取 2, 声级计级线性偏差的扩展不确定度分量为

$$u_{b2} = \frac{U}{k} = \frac{0.30}{2} = 0.15 \text{ dB(A)} \quad (17)$$

3.3.3 校准声源的不确定度

测量前后使用声级标准器(1 级)校准, 根据文献[4]及仪器校准证书, 变电站噪声主要集中于 20 Hz ~ 1 kHz^[9], 其他频段可忽略不计, 查询表 2, 声校准器产生的声压级与相应的规定声压级之差的绝对值适用接受限为 $\pm 0.25 \text{ dB(A)}$, 按均匀分布, 包含因子 k 取 $\sqrt{3}$, 校准声源的不确定度分量为

$$u_{b3} = \frac{\Delta}{\sqrt{3}} = \frac{0.25}{\sqrt{3}} = 0.14 \text{ dB(A)} \quad (18)$$

B 类相对标准不确定度计算为

$$\frac{u_b}{\bar{L}_{eq}} = \sqrt{\left[\frac{u_{b1}}{\bar{L}_{eq}}\right]^2 + \left[\frac{u_{b2}}{\bar{L}_{eq}}\right]^2 + \left[\frac{u_{b3}}{\bar{L}_{eq}}\right]^2} = 0.0077 \quad (19)$$

3.3.4 扩展不确定度计算及结果

合成标准不确定度的计算为

$$\frac{u_c}{\bar{L}_{eq}} = \sqrt{\left[\frac{u_a}{\bar{L}_{eq}}\right]^2 + \left[\frac{u_b}{\bar{L}_{eq}}\right]^2} = 0.012 \quad (20)$$

得 $u_c = 0.56 \text{ dB(A)}$, 包含因子 k 取 2 (近似 95% 置信概率), 扩展不确定度的计算为

$$U_c = k u_c = 0.56 \times 2 = 1.12 \text{ dB(A)} \quad (21)$$

厂界噪声结果为

$$\bar{L} = \bar{L}_{eq} \pm U_c = (47.13 \pm 1.12) \text{ dB(A)} \quad (22)$$

4 结 论

针对变电站厂界噪声测量不确定度评定, 首先, 给出变电站厂界噪声测量方法, 分析不确定度来源; 其次, 建立变电站厂界噪声等效连续 A 声级模型和噪声标准测量不确定度的评定模型; 最后, 结合实际算例给出完整测量不确定度评定计算过程。本文讨论的方法可推广至声环境敏感目标、工业、企业厂界噪声测量不确定度评定。

参考文献

- [1] 国家质量监督检验检疫总局. 测量不确定度评定与表示技术规范: JJF1059.1—2012[S]. 北京: 中国质检出版社, 2012.
- [2] 国家质量监督检验检疫总局. 声级计检定规程: JJG 188—2002[S]. 北京: 中国计量出版社, 2002.
- [3] 国家质量监督检验检疫总局. 声级计检定规程: JJG 188—2017[S]. 北京: 中国质检出版社, 2017.

- [4] 国家市场监督管理总局. 声校准器检定规程: JJG 176—2022[S]. 北京: 中国质检出版社, 2022.
- [5] 张涛, 熊光陵. 厂界噪声测量的不确定度评定[J]. 环境监测管理与技术, 2007(2): 52—53.
- [6] 才越. 声级计频率计权示值误差测量结果不确定度评定[R]. 银川, 宁夏计量质量检验检测研究院, 2020.
- [7] 环境保护部. 国家质量监督检验检疫总局. 工业企业厂界环境噪声排放标准: GB 12348—2008[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2008.
- [8] 国家质量监督检验检疫总局. 计量标准考核规范:

- JJF1033—2022. [S]. 北京: 中国质检出版社, 2022.
- [9] 马裕超, 莫娟, 徐铎, 等. 220 kV 油浸式变压器振动与噪声试验研究[J]. 变压器, 2017, 54(7): 49—55.

收稿日期: 2023-01-09

作者简介: 钱勇(1992), 男, 硕士, 工程师, 主要从事输电工程噪声与电磁环境检测及治理工作, E-mail: 774779558@qq.com。

(上接第34页)

模波速差测距方法对于无测距装置分支线路的单相故障定位满足测距精度与可靠性要求。本次模拟试验过程中输电线路为理想均匀传输线, 对于输电线路参数缺失或不准确的情况下可利用行波发生装置在停电时进行实际波速测量或者利用之前故障数据进行推算; 同时配电线路为中短距离输电, 热胀冷缩导致的线路长度变化对于定位精度的影响可以忽略不计^[9]。

4 结 论

1) 结合现有配电网故障定位方法, 提出双端—线零模波速差故障定位方法。利用实物元件搭建配电网模型并进行单相故障的模拟试验, 试验与计算结果表明本方法具有合格的测距精度与稳定性。

2) 本测距方法使行波测距装置需求量几乎减半, 分支越多越可凸显其优越性。同时, 本文中行波波速为实际测算得出的数据, 相较于根据线路参数推算而出的波速值更贴合生产实际, 也对后续方法的实际应用具有较高的参考价值。

参考文献

- [1] 黎颖. 高压输电线路故障定位方法综合研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2007.
- [2] 贾惠彬, 赵海峰, 方强华, 等. 基于多端行波的配电网单相接地故障定位方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(2): 96—100.
- [3] 张帆, 潘贞存, 张慧芬, 等. 树型配电网单相接地故障

行波测距新算法[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(28): 46—52.

- [4] 李佳玮, 王小君, 和敬涵, 等. 基于图注意力网络的配电网故障定位方法[J]. 电网技术, 2021, 45(6): 2113—2121.
- [5] BERNADIC A, LEONOWICZ Z. Fault location in power net works with mixed feeders using the complex space-phasor and Hilbert-Huang transform [J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2012, 42(1): 208—219.
- [6] ZHANG Y, LI B, JIANG X, et al. A fault location method for extra-high voltage mixed line based on variation of sequence voltage [C]//2015 5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT). Changsha, China: IEEE, 2015: 916—921.
- [7] 李友军, 徐丽娜. 电力系统接地短路故障中零模分量的依频关系分析[J]. 继电器, 2007, 35(15): 4—8.
- [8] 国家能源局. 输电线路行波故障测距装置技术条件: DL/T 357—2019[S/OL]. [2022-10-12]. <https://hbba.sacinfo.org.cn/attachment/onlineRead/ce98ef63f6f6cfc4d70d65f08f93c382f92ef400f2c83212e6abbc3a7f04705f>.
- [9] 蒲涛, 许欣, 曾举鹏, 等. 基于行波时差的多段混合线路故障定位方法[J]. 电力学报, 2022, 37(4): 302—308.

收稿日期: 2022-11-28

修回日期: 2023-02-01

作者简介: 刘鹏宇(1992), 男, 硕士, 工程师, 从事一次变电设备检修维护工作, E-mail: 295058750@qq.com。