

《自整角机/旋转变压器模拟器》

测量结果不确定度评定

《自整角机/旋转变压器模拟器》起草小组

2022年10月

自整角机/旋转变压器模拟器测量结果不确定度评定

一. 概述

1. 依据：测量结果的不确定度的评定按照《自整角机/旋转变压器模拟器》执行
2. 环境温度：(20±1)℃ 相对湿度：(50±10)%RH
3. 标准装置：感应分压器、相角电压表、角度位置指示器。

表 1. 实验室的计量标准器参数性能

检定装置	技术性能		
	测量范围	不确定度/ 准确度等级	备注
感应分压器	0~1	3×10^{-7}	型号：隔离式宽频 证书编号：DCjz2022-20440
相角电压表	(0~150) V	20μV	型号：PAV2250 证书编号：DCjz2022-00441
角度位置指示器	0~360°	0.0015°	型号：8810A 证书编号：DCjz2022-00442

4. 被校自整角机/旋转变压器模拟器：5300 同步解算标准器、A5410C-30-1 同步解算模块

表 2. 被测电能表参数性能

型号	型号	设备编号	技术指标	制造商
同步解算标准器	5300	176411	0.0005°	North Atlantic
同步解算模块	A5410C-30-1	93720	0.009°	North Atlantic

二. 不确定度评定

A.1 感应比例补偿测量法电角度示值误差校准结果的不确定度评定

A.1.1 测量模型

以感应比例补偿测量法校准自整角机/旋转变压器模拟器的旋转变压器模式，在线电压 11.8V、频率 1 kHz 条件下，旋转变压器模拟器电角度（0°~45°、180°~225°）的电角度示值误差为例进行不确定度评定。校准方法见 7.2.3.3，其误差校准的测量模型可用式（7-4）表示，

$$\Delta\theta = \arcsin\left(\frac{\Delta V \cos\theta}{V_{L-L}}\right) \approx \frac{\Delta V \cos\theta}{V_{L-L}} = \frac{\Delta V}{V_{L-L}} \sqrt{\frac{1}{1+K^2}} \quad (\text{A.1})$$

其中 $K = \frac{\sin \theta}{\cos \theta}$, $0 \leq K \leq 1$, 为感应分压器比率设置值。由 (A.1) 可得

$$\Delta \theta = \phi - \left(\theta + \frac{\Delta V}{V_{L-L}} \sqrt{\frac{1}{1+K^2}} \right) \quad (\text{A.2})$$

式中:

$\Delta \theta$ ——被校旋转变压器模拟器电角度示值误差, ($^{\circ}$);

ϕ ——被校旋转变压器模拟器电角度示值, ($^{\circ}$);

θ ——感应分压器比例的模拟电角度值, ($^{\circ}$);

K —— 感应分压器的比例设置值;

ΔV —— 相角电压表测得的同相电压分量, (V);

V_{L-L} ——被校旋转变压器模拟器输出的线电压, (V)。

各输入量之间不相关, 旋转变压器模拟器电角度示值误差测量不确定度传播可用式 (A.3) 表示:

$$\begin{aligned} u_c(\Delta \theta) &= \sqrt{c^2(\theta) \times u^2(\theta) + c^2(\Delta V) \times u^2(\Delta V) + u_A^2(\theta)} \\ &= \sqrt{c^2(\theta) \times c^2(K) \times u^2(K) + c^2(\Delta V) \times u^2(\Delta V) + u_A^2(\theta)} \end{aligned} \quad (\text{A.3})$$

式中:

$$c(\theta) = -\left(1 + \frac{\Delta V}{V} \sin \theta\right) \approx -1, \quad c(\Delta V) = \frac{\cos(\theta)}{V} \leq \frac{1}{V} \approx 0.085, \text{ 为不确定度分量系}$$

数;

$$u(\theta) = c(K) \times u(K) \approx \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{2\pi\theta}{360}\right)^2 + \frac{2}{3} \left(\frac{2\pi\theta}{360}\right)^4\right]} \times u(K) \leq 1 \times u(K), \text{ 为感应分压器}$$

比例的模拟电角度值的不确定度分量;

$u(\Delta V)$ 为相角电压表引入的不确定度分量;

$u_A(\theta)$ 为测量重复性不确定度分量。

旋转变压器电角度示值误差测量不确定度评定如 (A.4) 表示:

$$u_c(\Delta \theta) = \sqrt{u^2(K) + 0.085^2 \times u^2(\Delta V) + u_A^2(\theta)} \quad (\text{A.4})$$

A.1.2 不确定度来源

a. 感应分压器引入的标准不确定度

根据项目研制感应分压器性能指标, 1 kHz 下, 其电压比例的最大允许误差为 3×10^{-7} , 在整个量程内测量值服从均匀分布, 则感应分压器最大允许误差引入的不确定度为:

$$u(K) = \frac{3 \times 10^{-7}}{\sqrt{3}} = 1.7 \times 10^{-7}$$

b. 相角电压表引入的标准不确定度 $u(\Delta V)$

相角电压表引入的标准不确定度 $u(\Delta V)$ 主要来源于相角电压表最大允许误差 $u_1(\Delta V)$ 和相角电压表不同频率或幅值下共模抑制比引入不确定分量 $u_2(\Delta V)$ 。

若采用读差法比较相角电压, 2250A 型相角电压表的最小量程为 50mV, 该量程电压测量的最大允许误差为 $\pm(\text{量程的 } 0.04\% + \text{读数的 } 0.04\%)$, 约等于 $\pm 20 \mu\text{V}$, 在此范围内测量值服从均匀分布, 则相角电压表最大允许误差引入的标准不确定度

$$u_1(\Delta V) = 20 / \sqrt{3} = 11.5 \mu\text{V}。$$

相角电压表不同频率或幅值下共模抑制比, 在 11.8V 线电压下评估, 1 kHz 影响量优于 120 dB, 读数影响小于 $11.8 \mu\text{V}$, 按均匀分布考虑, 引入不确定度分量为 $u_2(\Delta V) = 6.8 \mu\text{V}$ 。

相角电压表引入不确定度分量为 $u(\Delta V) = \sqrt{u_1^2(\Delta V) + u_2^2(\Delta V)} = 13.4 \mu\text{V}$ 。

c. 电角度校准测量重复性不确定度

旋转变压器电角度校准示值误差测量重复性标准不确定度评定, 该项不确定度分量可以通过连续重复测量 (测量 5 次) 获得, 具体的重复性实验数据见附件 4 所示。0°-45°重复性测试数据见表 A.1 所示, 最大重复性标准差为 0.000044° (0.16 弧秒/ArcSec)。

表 A.1. 旋转变压器电角度校准示值误差测量重复性数据

次数 角度	1 角度差 (ArcSec)	2 角度差 (ArcSec)	3 角度差 (ArcSec)	4 角度差 (ArcSec)	5 角度差 (ArcSec)	实验标准差 (ArcSec)
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.01
2.0	-0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.09
4.0	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.04
8.0	0.3	0.3	0.4	0.2	0.3	0.06
12.0	0.1	0.2	0.3	0.1	0.1	0.10
16.0	0.1	0.1	0.3	0.0	0.0	0.11
21.0	0.0	0.2	0.4	0.1	0.1	0.16
25.0	0.0	0.3	0.4	0.3	0.3	0.13
29.5	0.0	0.2	0.3	0.1	0.1	0.10
34.0	0.2	0.5	0.6	0.4	0.3	0.15
38.0	0.2	0.3	0.4	0.2	0.2	0.07
40.0	0.2	0.2	0.4	0.2	0.2	0.08
45.0	-0.1	0.0	0.1	-0.1	0.0	0.10

d. 旋转变压器模式电角度示值误差的扩展不确定度

1 kHz 下，旋转变压器电角度示值误差合成标准不确定度按式(A.4)计算可得

$$u_c(\Delta\theta) = \sqrt{u^2(K) + 0.085^2 \times u^2(\Delta V) + u_A^2(\theta)} = 0.000044^\circ$$

取包含因子 $k=2$ ，则扩展不确定度为：

$$U(\Delta\theta) = k \cdot u_c(\Delta\theta) = 0.00009^\circ (k=2)。$$

A.2 标准表法电角度示值误差校准结果的不确定度评定

A.2.1 测量模型

以标准表法校准自整角/旋转变压器模拟器的旋转变压器模式，在线电压 11.8V、频率 400Hz 工作条件下 30° 校准点的示值误差为例进行不确定度评定。

校准方法见 7.2.3.5，其误差校准的测量模型

$$\Delta\theta = \theta - \theta_x \tag{A.5}$$

式中：

$\Delta\theta$ ——被校旋转变压器模拟器电角度示值误差，(°)；

θ ——被校旋转变压器模拟器电角度输出标称值（示值），(°)；

θ_x ——标准电角度位置指示器测得的电角度值，(°)。

各输入量之间不相关，不确定度传播可用公式（A.6）表示。

$$u_c^2(\Delta\theta) = u^2(\theta_x) \quad (\text{A.6})$$

式中：

$u_c(\Delta\theta)$ ——被校旋转变压器模拟器电角度测量示值误差的合成标准不确定度，(°)；

$u(\theta_x)$ ——标准电角度位置指示器引入的标准不确定度，(°)。

A.2.2 不确定度来源

$u(\varphi_x)$ 的来源如下：

- a) 标准电角度位置指示器的最大允许误差引入的不确定度 $u_1(\theta_x)$ ；
- b) 标准电角度位置指示器的分辨力引入的不确定度 $u_2(\theta_x)$ ；
- c) 标准电角度位置指示器角度测量重复性引入的不确定度 $u_A(\theta_x)$ 。

A.2.3 不确定度评定

A.2.3.1 标准电角度位置指示器最大允许误差引入的不确定度 $u_1(\theta_x)$

根据标准电角度位置指示器技术说明书得到最大允许误差为 $\pm 0.0015^\circ$ ，在此范围内测量值服从均匀分布，按 B 类评定，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，则标准电角度位置指示器最大允许误差引入的不确定度：

$$u_1(\varphi_x) = \frac{0.0015^\circ}{\sqrt{3}} \approx 0.00086^\circ$$

A.2.3.2 标准电角度位置指示器角度测量的分辨力引入的不确定度 $u_2(\theta_x)$

根据被校同步分解模拟器技术说明书得到角度测量示值分辨力为 0.0001° ，按 B 类进行评定，那么其区间半宽度为 $a = 0.00005^\circ$ ，为均匀分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，则被校同步分解模拟器分解模式角度测量的分辨力引入的标准不确定度：

$$u_2(\theta_x) = \frac{a}{k} = \frac{0.00005^\circ}{\sqrt{3}} = 0.000029^\circ$$

A.2.3.3 标准电角度位置指示器角度测量重复性引入的不确定度 $u_A(\theta_x)$

测量结果的重复性引入的标准不确定度通过多次重复测量进行 A 类评定。多次重复测量结果如表 A.2 所示，用贝塞尔公式(A.7)计算实验标准差：

$$u_A(\theta_x) = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (\theta_{xi} - \bar{\theta}_x)^2} \quad (\text{A.7})$$

式中：

$\bar{\theta}_x$ ——被校同步分解模拟器分解模式角度重复测量示值的算术平均值，(°)；

n ——被校同步分解模拟器分解模式角度重复测量次数；

θ_{xi} ——被校同步分解模拟器分解模式角度第 i 次测量示值，V。

表 A.2 被校同步分解模拟器分解模式角度测量重复性测量数据

测量次数	1	2	3	4	5
角度示值/ (°)	30.0012	30.0015	30.0004	30.0007	30.0002
测量次数	6	7	8	9	10
角度示值/ (°)	30.0009	30.0022	30.0021	30.0013	30.0018

校准时取单次测量结果，故测量重复性引入的标准不确定度为：

$$u_2(\varphi_x) = s(\varphi_x) = 0.00069^\circ。$$

A.2.4 合成标准不确定度 $u_c(\theta_x)$

旋转变压器电角度示值误差合成标准不确定度

$$u_c(\theta_x) = \sqrt{u_1^2(\theta_x) + u_2^2(\theta_x) + u_A^2(\theta_x)} = 0.0011^\circ，$$

取包含因子 $k=2$ ，则扩展不确定度为：

$$U(\Delta\theta) = k \times u_c(\Delta\theta) = 2 \times 0.0011^\circ \approx 0.0022^\circ。$$