



中华人民共和国工业和信息化部

电子计量技术规范

JJF(电子)0107—2023

## 输电线路工频参数测试仪校准规范

Calibration Specification for Power Frequency Parameters of

Transmission Lines

(报批稿)

202X-××-××发布

202X-××-××实施

中华人民共和国工业和信息化部 发布

# 输电线路工频参数测试仪 校准规范

Calibration Specification for Power Frequency  
Parameters of Transmission Lines

JJF (电子) 0107—2023

归口单位：中国电子技术标准化研究院

主要起草单位：广电计量检测集团股份有限公司

参加起草单位：广电计量检测（西安）有限公司

广东电网有限责任公司汕头供电局

本规范技术条文委托起草单位负责解释

**本规范主要起草人：**

潘 乔（广电计量检测集团股份有限公司）

龙 阳（广电计量检测集团股份有限公司）

伍尚彬（广电计量检测集团股份有限公司）

张国茂（广电计量检测集团股份有限公司）

**参加起草人：**

钟 攀（广电计量检测集团股份有限公司）

闫 伟（广电计量检测（西安）有限公司）

陈 昕（广东电网有限责任公司汕头供电局）

# 目录

引 言 .....	II
1 范围 .....	1
2 引用文件 .....	1
3 术语和计量单位 .....	1
3.1 输电线路工频参数 .....	1
3.2 异频法 .....	1
4 概述 .....	1
5 计量特性 .....	2
5.1 输出电压 .....	2
5.2 输出电流 .....	2
5.3 输出频率 .....	2
5.4 电压测量 .....	2
5.5 电流测量 .....	2
5.6 电容 .....	2
5.7 阻抗 .....	2
5.8 阻抗角 .....	2
6 校准条件 .....	3
6.1 环境条件 .....	3
6.2 测量标准及其它设备 .....	3
7 校准项目和校准方法 .....	4
7.1 校准项目 .....	4
7.2 校准方法 .....	4
8 校准结果表达 .....	10
9 复校时间间隔 .....	11
附录 A 原始记录格式 .....	12
附录 B 校准证书内页格式 .....	15
附录 C 测量不确定度评定示例 .....	18

# 引 言

本规范依据 JJF 1071-2010《国家计量校准规范编写规则》、JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》编写。

本规范为首次发布。

# 输电线路工频参数测试仪校准规范

## 1 范围

本规范适用于测量工频电气参数的输电线路工频参数测试仪的校准。

## 2 引用文件

本规范引用了下列文件：

DL/T 1119—2010 输电线路工频参数测试仪通用技术条件

DL/T 1583—2016 交流输电线路工频电气参数测量导则

注：凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本规范；凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本规范。

## 3 术语和计量单位

### 3.1 输电线路工频参数 power frequency parameter of transmission line

指输电线路的工频率阻抗，即在工频率电压作用下，输电线路对所施加的工频率电压所呈现的阻抗。

[DL/T1119—2010，术语和定义 ]

### 3.2 异频法 different frequency method

为避免电力系统工频感应信号对被测线路的干扰，对被测线路施加非工频电源进行参数测量，并滤除掉测量信号中的工频感应分量，实现精确测量和分析的方法。

[DL/T1583-2016，术语 3.1.2 ]

## 4 概述

输电线路工频参数测试仪（以下简称测试仪）用于测量各种高压输电线路（架空、电缆、架空电缆混合等）的工频参数，工频参数包括正序阻抗、正序电容、零序阻抗、零序电容等。测试仪主要由测试电源、测量控制单元、安全防护单元和分析处理单元组成，其结构原理图如下图1所示。

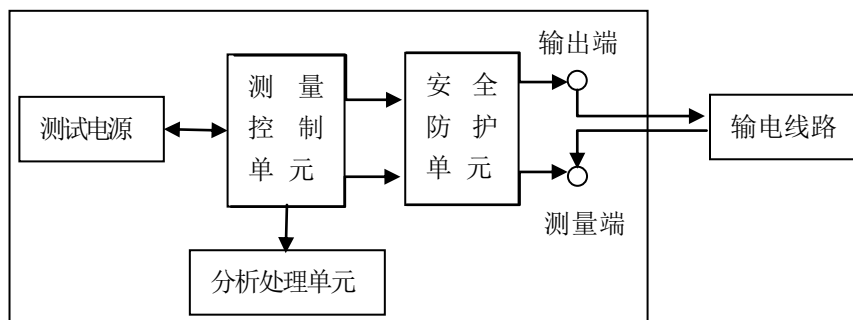


图1 输电线路工频参数测试仪结构原理图

## 5 计量特性

### 5.1 输出电压

电压范围：(10~600)V，最大允许误差： $\pm 0.2\%$ 。

### 5.2 输出电流

电流范围：(0.1~60)A，最大允许误差： $\pm 0.2\%$ 。

### 5.3 输出频率

频率范围：(40~65)Hz，最大允许误差： $\pm 0.2\text{Hz}$ 。

### 5.4 电压测量

测量范围：(10~600)V，最大允许误差： $\pm 0.2\%$ 。

### 5.5 电流测量

测量范围：(0.1~60)A，最大允许误差： $\pm 0.2\%$ 。

### 5.6 电容测量

测量范围：(0.1~1) $\mu\text{F}$ ，最大允许误差： $\pm 2.0\% \pm 0.01\mu\text{F}$ ；

(1~200) $\mu\text{F}$ ，最大允许误差： $\pm 1.0\% \pm 0.01\mu\text{F}$ 。

### 5.7 阻抗

测量范围：(0.1~1) $\Omega$ ，最大允许误差： $\pm 2.0\% \pm 0.01\Omega$ ；

(1~600) $\Omega$ ，最大允许误差： $\pm 1.0\% \pm 0.01\Omega$ 。

### 5.8 阻抗角

测量范围：(0.01°~360°)，最大允许误差： $\pm (0.02^\circ \sim 0.2^\circ)$ 。

注：以上范围及指标不适用于合格性判定，仅供参考。

## 6 校准条件

### 6.1 环境条件

6.1.1 环境温度:  $(20 \pm 5) ^\circ\text{C}$ 。

6.1.2 环境相对湿度:  $\leq 80\%$ 。

6.1.3 供电电源: 电压  $(220 \pm 11) \text{V}$ , 频率  $(50 \pm 0.5) \text{Hz}$ 。

6.1.4 其他: 周围无影响仪器正常工作的电磁干扰和机械振动。

### 6.2 测量标准及其它设备

#### 6.2.1 多功能校准仪

交流电压输出范围:  $(1 \sim 1000) \text{V}$  ( $40 \text{Hz} \sim 65 \text{Hz}$ ), 最大允许误差:  $\pm 0.05\%$ 。

交流电流输出范围:  $(0.06 \sim 60) \text{A}$  ( $40 \text{Hz} \sim 65 \text{Hz}$ ), 最大允许误差:  $\pm 0.05\%$ 。

#### 6.2.2 数字多用表

交流电压测量范围:  $(1 \sim 750) \text{V}$  ( $40 \text{Hz} \sim 65 \text{Hz}$ ), 最大允许误差:  $\pm 0.05\%$ 。

#### 6.2.3 标准电流表

交流电流测量范围:  $(0.1 \sim 60) \text{A}$  ( $40 \text{Hz} \sim 65 \text{Hz}$ ), 最大允许误差:  $\pm 0.05\%$ 。

#### 6.2.4 标准电容器

电容范围:  $(0.1 \sim 200) \mu\text{F}$ , 最大允许误差:  $\pm 0.5\%$ , 工作电压:  $\leq 300 \text{V}$ 。

#### 6.2.5 标准电感器

电感范围:  $(1 \sim 200) \text{mH}$ , 最大允许误差:  $\pm 0.5\%$ , 工作电压:  $\leq 300 \text{V}$ 。

#### 6.2.6 标准电阻器

电阻范围:  $(0.1 \sim 600) \Omega$ , 最大允许误差:  $\pm 0.2\%$ , 无感电阻, 额定功率:  $\geq 100 \text{W}$ 。

#### 6.2.7 相位计

相位范围:  $(0.01 \sim 360) ^\circ$ , 最大允许误差:  $\pm (0.005 ^\circ \sim 0.05 ^\circ)$ ,

输入电压:  $(0.1 \sim 300) \text{V}$ , 频率:  $(1 \sim 100) \text{Hz}$ 。

#### 6.2.8 标准频率表

频率范围:  $(10 \sim 100) \text{Hz}$ , 最大允许误差:  $\pm 0.05 \text{Hz}$ , 输入电压:  $(0.1 \sim 300) \text{V}$ 。

#### 6.2.9 负载电阻

电阻范围:  $(1 \sim 100) \Omega$ , 额定功率  $\geq 1000 \text{W}$



7 校准项目和校准方法

7.1 校准项目

校准项目见表 1

表 1 校准项目表

序号	项目名称	校准方法条款
1	外观及工作正常性检查	7.2.1
2	输出电压	7.2.2
3	输出电流	7.2.3
4	输出频率	7.2.4
5	电压测量	7.2.5
6	电流测量	7.2.6
7	电容测量	7.2.7
8	阻抗	7.2.8
9	阻抗角	7.2.9

7.2 校准方法

7.2.1 外观及工作正常性检查

被校测试仪应外观完好，无影响仪器正常工作的机械损伤；各种标志清晰准确，各种调节旋钮、按键灵活可靠。检查结果记录于附录 A 表 A.1 中。

7.2.2 输出电压

7.2.2.1 采用直接测量法，接线如图 2 所示，将数字多用表电压测量端与被校测试仪电源输出 A 相端和 N 端连接。

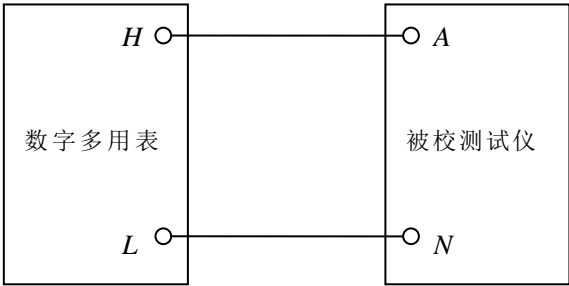


图 2 输出电压校准连接图

7.2.2.2 设置输出频率为 50Hz，在输出电压量程范围内（10%~100%）均匀选取 3~5 个校准点，按选取的校准点调节输出电压值，启动被校测试仪，读取数字多用表交流电压测量值，并记录在附录 A 表 A.2 中。

按公式 (1) 计算输出电压相对误差:

$$\delta_U = \frac{U_x - U_0}{U_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

$\delta_U$ ——输出电压相对误差;

$U_x$ ——被校测试仪电压显示值;

$U_0$ ——数字多用表电压测量值。

7.2.2.3 将被校测试仪电源输出 B 相端和 N 端分别与数字多用表电压测量端连接, 重复 7.2.2.1~7.2.2.2 步骤。

7.2.2.4 将被校测试仪电源输出 C 相端和 N 端分别与数字多用表电压测量端连接, 重复 7.2.2.1~7.2.2.2 步骤。

### 7.2.3 输出电流

7.2.3.1 采用标准电流表法, 接线如图 3 所示, 将负载电阻和标准电流表与被校测试仪电源输出 A 相端和 N 端进行连接。

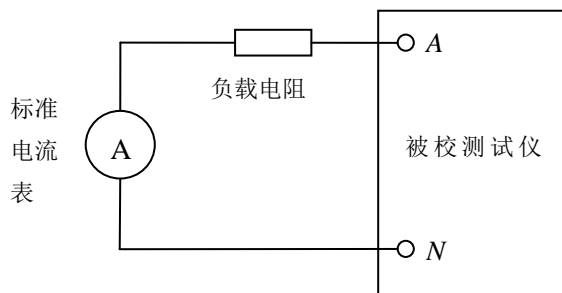


图 3 输出电流校准连接图

7.2.3.2 启动被校测试仪, 设置输出频率为 50Hz, 调节输出电压值, 使输出电流由最小到最大改变, 在输出电流量程范围内 (10%~100%) 均匀选取 3~5 个校准点, 分别读取被校测试仪电流示值及标准电流表测量值, 并记录在附录 A 表 A.3 中。

按公式 (2) 计算输出电流相对误差:

$$\delta_I = \frac{I_x - I_0}{I_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中:

$\delta_I$ ——输出电流相对误差;

$I_x$ ——被校测试仪电流显示值；

$I_0$ ——标准电流表电流测量值。

7.2.3.3 将负载电阻及标准电流表与被校测试仪电源输出 B 相端和 N 端进行连接，重复 7.2.3.1~7.2.3.2 步骤。

7.2.3.4 将负载电阻及标准电流表与被校测试仪电源输出 C 相端和 N 端进行连接，重复 7.2.3.1~7.2.3.2 步骤。

## 7.2.4 输出频率

7.2.4.1 采用标准频率表法，接线如图 4 所示，将标准频率表与被校测试仪电源输出 A 相端和 N 端连接。

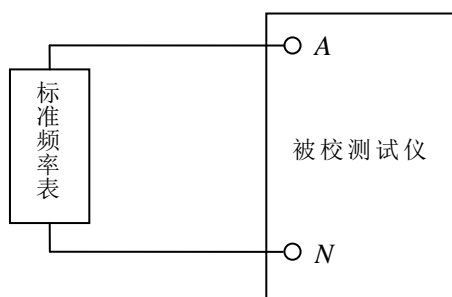


图 4 输出频率校准连接图

7.2.4.2 启动被校测试仪，调节输出电压为 50V，设置输出频率值，频率一般选取 45Hz、50Hz、55Hz、60Hz、65Hz 共 5 个校准点（也可以根据客户实际使用情况选取测量点），读取标准频率表测量值，并记录在附录 A 表 A.4 中。

按公式（3）计算频率输出相对误差：

$$\delta_f = \frac{f_x - f_0}{f_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中：

$\delta_f$ ——输出频率相对误差；

$f_x$ ——被校测试仪器频率显示值；

$f_0$ ——标准频率表测量值。

## 7.2.5 电压测量

7.2.5.1 采用标准源法，接线如图 5 所示，将多功能校准仪输出端与被校测试仪测量输入  $U_A$  端和  $U_N$  端连接。

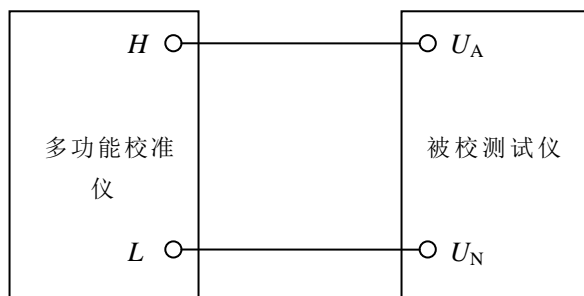


图5 电压测量校准连接图

7.2.5.2 设置多功能校准仪输出频率为 50Hz 的电压值，在被校测试仪电压测量范围内均匀选取 3~5 个校准点，读取被校测试仪电压测量值，并记录于附录 A 表 A.5 中。

按公式 (4) 计算电压测量相对误差：

$$\delta_u = \frac{U_x - U_0}{U_0} \times 100\% \quad (4)$$

式中：

$\delta_u$  —— 电压测量相对误差；

$U_x$  —— 被校测试仪电压测量值；

$U_0$  —— 多功能校准仪电压输出值。

7.2.5.3 将多功能校准仪输出端分别与被校测试仪测量输入  $U_B$  端和  $U_N$  连接，重复 7.2.5.1~7.2.5.2 步骤。

7.2.5.4 将多功能校准仪输出端分别与被校测试仪测量输入  $U_C$  端和  $U_N$  连接，重复 7.2.5.1~7.2.5.2 步骤。

## 7.2.6 电流测量

7.2.6.1 采用标准源法，接线如图 6 所示，将多功能校准仪输出端与被校测试仪电源输出 A 相端、测量输入  $U_N$  端连接。

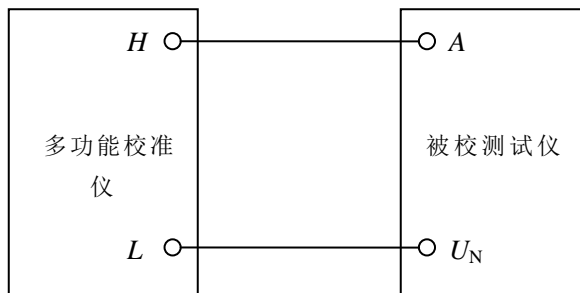


图6 电流测量校准连接图

7.2.6.2 设置多功能校准仪输出频率为 50Hz 的电流值，在被校测试仪电流测量范围内

均匀选取 3~5 个校准点, 读取被校测试仪电流测量值, 并记录于附录 A 表 A.6 中。

按公式 (5) 计算电流测量相对误差:

$$\delta_I = \frac{I_x - I_0}{I_0} \times 100\% \quad (5)$$

式中:

$\delta_I$ —— 电流测量相对误差;

$I_x$ —— 被校测试仪电流测量值;

$I_0$ —— 多功能校准仪电流输出值。

7.2.6.3 将多功能校准仪输出端分别与被校测试仪输出 B 相端和测量输入  $U_N$  端连接, 重复 7.2.6.1~7.2.6.2 步骤。

7.2.6.4 将多功能校准仪输出端分别与被校测试仪输出 C 相端和测量输入  $U_N$  端连接, 重复 7.2.6.1~7.2.6.2 步骤。

## 7.2.7 电容测量

7.2.7.1 采用标准电容法, 接线如图 7 所示, 将标准电容器输出端与被校测试仪电源输出 A 相端、测量输入  $U_A$  端连接。

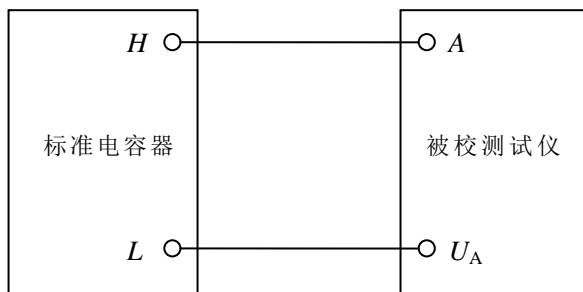


图 7 电容校准连接图

7.2.7.2 设置标准电容值, 启动被校测试仪, 调节输出电压值为 50V, 频率为 50Hz, 在电容测量范围内均匀选取 3~5 个校准点, 读取被校测试仪电容显示值, 并记录于附录 A 表 A.7 中。

按公式 (6) 计算电容相对误差:

$$\delta_c = \frac{C_x - C_0}{C_0} \times 100\% \quad (6)$$

式中:

$\delta_c$ —— 电容相对误差;

$C_x$ ——被校测试仪电容显示值；

$C_0$ ——标准电容值。

7.2.7.3 将被校测试仪电源输出 B 相端和测量输入  $U_B$  端分别与标准电容器输出端连接，重复 7.2.7.1~7.2.7.2 步骤。

7.2.7.4 将被校测试仪电源输出 C 相端和测量输入  $U_C$  端分别与标准电容器输出端连接，重复 7.2.7.1~7.2.7.2 步骤。

## 7.2.8 阻抗

7.2.8.1 采取标准电阻、电感法，接线如图 8 所示，将标准电阻器、电感器输出端分别与被校测试仪电源输出 A 相端、测量输入  $U_A$  端连接。

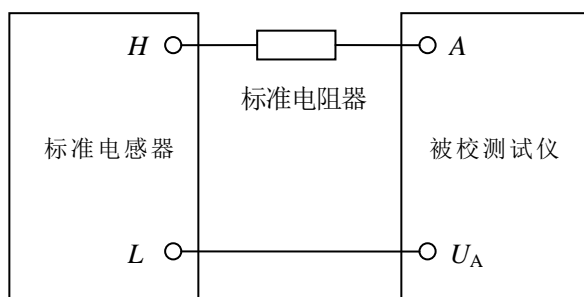


图 8 阻抗校准连接图

7.2.8.2 设置标准电阻、标准电感为最大值，启动被校测试仪，调节输出电压为 50V，频率为 50Hz，根据阻抗计算公式： $Z_0 = \sqrt{R^2 + X^2}$  合理设置标准电阻和标准电感值，在阻抗测量范围内均匀选取 3~5 个校准点，读取被校测试仪阻抗显示值  $Z_x$ ，记录于附录 A 表 A.8 中。

按公式 (7) 计算阻抗误差：

$$\delta_z = \frac{Z_x - Z_0}{Z_0} \times 100\% \quad (7)$$

式中：

$\delta_z$ ——阻抗相对误差，

$Z$ ——被校测试仪阻抗显示值， $\Omega$ ；

$Z_0$ ——标准阻抗值， $\Omega$ 。

7.2.8.3 将被校测试仪测试电源输出 B 相端和测量输入  $U_B$  端分别与标准电阻器、电感器输出端连接，重复 7.2.6.1~7.2.6.2 步骤。

7.2.8.4 将被校测试仪测试电源输出 C 相端和测量输入  $U_C$  端分别与标准电阻器、电感器输出端连接，重复 7.2.6.1~7.2.6.2 步骤。

## 7.2.9 阻抗角

7.2.9.1 接线如图 9 所示，将相位计、标准电阻器和标准电感器与被校测试仪电源输出 A 相端、测量输入  $U_A$  端连接。

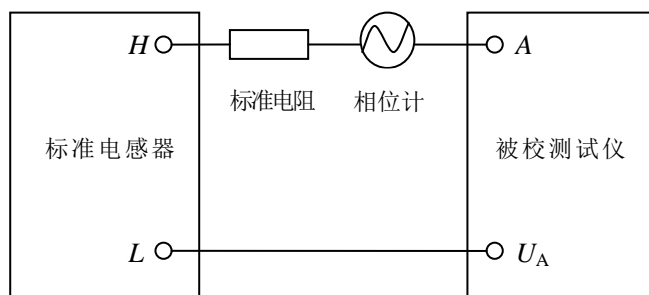


图 9 阻抗角校准连接图

7.2.9.2 设置标准电阻、标准电感为最大值，启动被校测试仪，调节输出电压为 50V，频率为 50Hz，根据阻抗角计算公式：阻抗角 $=\cot(XL/R)$ 合理设置标准电阻和标准电感值，在阻抗角测量范围内均匀选取 3~5 个校准点，读取标准相位计测量值  $\varphi_0$  和被校测试仪显示值  $\varphi_x$ ，记录于附录 A 表 A.9 中。

按公式 (8) 计算阻抗角误差：

$$\Delta\varphi = \varphi_x - \varphi_0 \quad (8)$$

式中：

$\Delta\varphi$ ——被校测试仪阻抗角示值误差；

$\varphi_x$ ——被校测试仪阻抗角显示值，(°)；

$\varphi_0$ ——标准相位计阻抗角测量值，(°)。

7.2.9.3 将相位计、标准电阻器和标准电感器与被校测试仪电源输出 B 相端、测量输入  $U_B$  端连接，重复 7.2.9.1~7.2.9.2 步骤。

7.2.9.4 将相位计、标准电阻器和标准电感器与被校测试仪电源输出 C 相端、测量输入  $U_C$  端连接，重复 7.2.9.1~7.2.9.2 步骤。

## 8 校准结果表达

输电线路工频参数测试仪校准后，出具校准证书。校准证书应至少包含以下信息：

- a) 标题: “校准证书”;
- b) 实验室名称和地址;
- c) 进行校准的地点 (如果与实验室的地址不同);
- d) 证书或报告的唯一性标识 (如编号), 每页及总页数的标识;
- e) 客户的名称和地址;
- f) 被校准对象的描述和明确标识;
- g) 进行校准的日期, 如果与校准结果的有效性有关时, 应说明被校对象的接收日期;
- h) 如果与校准结果的有效性应用有关时, 应对被校样品的抽样程序进行说明;
- i) 校准所依据的技术规范的标识, 包括名称及代号;
- j) 本次校准所用测量标准的溯源性及有效性说明;
- k) 校准环境的描述;
- l) 校准结果及其测量不确定度的说明;
- m) 对校准规范的偏离的说明;
- n) 校准证书签发人的签名、职务或等效标识;
- o) 校准结果仅对被校对象有效的说明;
- p) 未经实验室书面批准, 不得部分复制证书的声明。

## 9 复校时间间隔

建议复校时间间隔不超过 1 年。由于复校时间间隔的长短是由仪器的使用情况、使用者、仪器本身质量等诸多因素决定的, 因此, 送校单位可根据实际使用情况自主决定复校时间间隔。



## 附录 A

## 原始记录格式

## A.1 外观及工作正常性检查

表 A.1 外观及工作正常性检查

项目	检查结果
外观检查	
工作正常性检查	

## A.2 输出电压

表 A.2 输出电压

相别	量程	频率	设定值	测量值	示值误差	扩展不确定度 $U$ ( $k=2$ )
A						
B						
C						

## A.3 输出电流

表 A.3 输出电流

相别	量程	频率	标准值	示值	示值误差	扩展不确定度 $U$ ( $k=2$ )
A						
B						
C						

## A.4 输出频率

表 A.4 输出频率

设定值		测量值	示值误差	扩展不确定度 $U$ ( $k=2$ )
电压	输出频率			

## A.5 电压测量

表 A. 5 电压测量

相别	量程	频率	标准值	示值	示值误差	扩展不确定度 $U$ ( $k=2$ )
A						
B						
C						

## A.6 电流测量

表 A. 6 电流测量

相别	量程	频率	标准值	示值	示值误差	扩展不确定度 $U$ ( $k=2$ )
A						
B						
C						

## A.7 电容测量

表 A. 7 电容

相别	电压	频率	标准值	示值	示值误差	扩展不确定度 $U$ ( $k=2$ )
A						
B						
C						

## A.8 阻抗

表 A. 8 阻抗

电压：      频率：

相别	电阻	电感	标准值	示值	示值误差	扩展不确定度 $U$ ( $k=2$ )
A						
B						
C						

A.9 阻抗角

表 A. 9 阻抗角

电压：      频率：

相别	电阻	电感	标准值	示值	示值误差	扩展不确定度 $U$ ( $k=2$ )
A						
B						
C						

## 附录 B

## 校准证书内页格式

## B.1 外观及工作正常性检查

表 B.1 外观及工作正常性检查

项目	检查结果
外观检查	
工作正常性检查	

## B.2 输出电压

表 B.2 输出电压

相别	量程	频率	设定值	测量值	示值误差	扩展不确定度 $U$ ( $k=2$ )
A						
B						
C						

## B.3 输出电流

表 B.3 输出电流

相别	量程	频率	标准值	示值	示值误差	扩展不确定度 $U$ ( $k=2$ )
A						
B						
C						

## B.4 输出频率

表 B.4 输出频率

设定值		测量值	示值误差	扩展不确定度 $U$ ( $k=2$ )
电压	输出频率			

## B.5 电压测量

表 B. 5 电压测量

相别	量程	频率	标准值	示值	示值误差	扩展不确定度 $U$ ( $k=2$ )
A						
B						
C						

## B.6 电流测量

表 B. 6 电流测量

相别	量程	频率	标准值	示值	示值误差	扩展不确定度 $U$ ( $k=2$ )
A						
B						
C						

## B.7 电容测量

表 B. 7 电容

相别	电压	频率	标准值	示值	示值误差	扩展不确定度 $U$ ( $k=2$ )
A						
B						
C						

## B.8 阻抗

表 B. 8 阻抗

相别	电压	频率	标准值	示值	示值误差	扩展不确定度 $U$ ( $k=2$ )
A						
B						
C						

B.9 阻抗角

表 B. 9 阻抗角

相别	电压	频率	标准值	示值	示值误差	扩展不确定度 $U$ ( $k=2$ )
A						
B						
C						

## 附录 C

## 测量不确定度评定示例

## C.1 输出电压测量结果不确定度评定

## C.1.1 测量模型

用数字多用表测量输电线路工频参数测试仪输出电压的测量模型为：

$$U_x = U_0 \quad (\text{C.1})$$

式中：

$U_x$ ——输出电压设置值，V；

$U_0$ ——数字多用表实测值，V。

## C.1.2 不确定度来源

不确定度来源主要有数字多用表的交流电压分辨率、数字多用表的交流电压测量误差、测量重复性引入的不确定度分量。

## C.1.3 标准不确定度分量评定

C.1.3.1 由数字多用表交流电压分辨力引入的不确定度分量  $u_1$ 

数字多用表分辨力为 0.001V 可满足测量要求, 设其服从均匀分布, 取置信因子

$$k = \sqrt{3}, \text{ 则其不确定度分量: } u_1 = \frac{\delta}{2\sqrt{3}} = \frac{0.001\text{V}}{2\sqrt{3}} = 0.00029\text{V}。$$

C.1.3.2 数字多用表的交流电压测量误差引入的不确定度分量  $u_2$ 

数字多用表测量交流电压为 100V 时, 最大允差为  $\pm 0.05\%$ , 设其服从均匀分布,

$$\text{取置信因子 } k = \sqrt{3}, \text{ 则其不确定度分量: } u_2 = \frac{a}{\sqrt{3}} = \frac{0.05\%}{\sqrt{3}} = 0.029\%。$$

C.1.3.3 测量重复性引入的标准不确定度分量  $u_A$ 

设置输电线路工频参数测试仪输出电压值为 100V, 在重复条件下测量 10 次, 结果如下表(V):

测量序号	1	2	3	4	5
测量结果	100.21	100.18	100.14	100.22	100.21
测量序号	6	7	8	9	10
测量结果	100.19	100.17	100.24	100.18	100.16

平均值 $\bar{x}_n$	100.19	标准差	0.03
-----------------	--------	-----	------

则测量重复性引入的不确定度分量： $u_A = s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (x_i - \bar{x})^2}{(10-1)}} = 0.03 \text{ V}$ 。

采用相对不确定度表示则为： $u_A = \frac{0.03 \text{ V}}{100 \text{ V}} \times 100\% = 0.03\%$ 。

由于测量重复性包含了人员读数时因分辨力引入的误差，因此由分辨力引入的不确定度分量  $u_1$  和测量重复性引入的不确定度分量  $u_A$  取大者。

#### C.1.4 合成标准不确定度

##### C.1.4.1 主要不确定度汇总表

不确定度来源( $u_i$ )	$a_i$	$k_i$	$u_i$
数字多用表交流电压测量误差引入不确定度分量, $u_2$	0.05%	$\sqrt{3}$	0.029%
测量重复性, $u_A$	0.03%	1	0.03%

##### C.1.4.2 合成不确定度计算

以上各项不确定度分量相互独立不相关，不确定度来源的各个分量均为相对不确定度分量，则相对合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_2^2 + u_A^2} = 0.041\%$$

#### C.1.5 扩展不确定度

取包含因子  $k=2$ ，则在输出电压 100V 校准点的测量结果扩展不确定度为：

$$U_{\text{rel}} = k u_c = 0.08\%, \quad k=2。$$

### C.2 输出电流测量结果不确定度评定

#### C.2.1 测量模型

用标准交流电流表测量输电线路工频参数测试仪输出电流的测量模型为：

$$I_X = I_0 \quad (\text{C.2})$$

式中：

$I_X$ ——输出电流显示值，A；

$I_0$ ——标准交流电流表实测值，A。

#### C.2.2 不确定度来源

不确定度来源主要有标准交流电流表分辨率、标准交流电流表测量误差、测量重



复性引入的不确定度分量。

### C.2.3 标准不确定度分量评定

#### C.2.3.1 由标准交流电流表测量分辨力引入的不确定度分量 $u_1$

标准交流电流表在测量电流 1A 时的分辨力为 0.0001A, 设其服从均匀分布, 取置信因子  $k=\sqrt{3}$ , 则其不确定度分量:  $u_1 = \frac{\delta}{2\sqrt{3}} = \frac{0.0001\text{A}}{2\sqrt{3}} = 0.000029\text{A}$ 。

#### C.2.3.2 标准交流电流表测量误差引入的不确定度分量 $u_2$

标准交流电流表测量频率 50Hz, 交流电流 1A 时, 最大允差为  $\pm 0.05\%$ , 设其服从均匀分布, 取置信因子  $k=\sqrt{3}$ , 则其不确定度分量:  $u_2 = \frac{a}{\sqrt{3}} = \frac{0.05\%}{\sqrt{3}} = 0.029\%$ 。

#### C.2.3.3 测量重复性引入的标准不确定度分量 $u_A$

设置输电线路工频参数测试仪输出电流为 1A 时, 在重复条件下测量 10 次, 结果如下表(A):

测量序号	1	2	3	4	5
测量结果	1.0012	1.0009	1.0015	1.0014	1.0011
测量序号	6	7	8	9	10
测量结果	1.0007	1.0020	1.0013	1.0012	1.0017
平均值 $\bar{x}_n$	1.0013		标准差	0.0004	

则测量重复性引入的不确定度分量:  $u_A = s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (x_i - \bar{x})^2}{(10-1)}} = 0.0004\text{A}$ 。

采用相对不确定度表示则为:  $u_A = \frac{0.0004\text{A}}{1\text{A}} \times 100\% = 0.04\%$ 。

由于测量重复性包含了人员读数时因分辨力引入的误差, 因此由分辨力引入的不确定度分量  $u_1$  和测量重复性引入的不确定度分量  $u_A$  取大者。

### C.2.4 合成标准不确定度

#### C.2.4.1 主要不确定度汇总表

不确定度来源( $u_i$ )	$a_i$	$k_i$	$u_i$
标准交流电流表测量误差引入不确定度分量, $u_2$	0.05%	$\sqrt{3}$	0.029%
测量重复性, $u_A$	0.04%	1	0.04%

### C.2.4.2 合成不确定度计算

以上各项不确定度分量相互独立不相关, 不确定度来源的各个分量均为相对不确定度分量, 则相对合成标准不确定度为:

$$u_c = \sqrt{u_2^2 + u_A^2} = 0.049\%$$

### C.2.5 扩展不确定度

取包含因子  $k=2$ , 则被校测试仪输出电流 1A 校准点的测量结果扩展不确定度为:

$$U_{\text{rel}} = k u_c = 0.10\%, \quad k=2。$$

## C.3 输出频率测量结果不确定度评定

### C.3.1 测量模型

用标准频率表测量输电线路工频参数测试仪输出频率的测量模型为:

$$f_x = f_0 \quad (\text{C.3})$$

式中:

$f_x$ ——被校测试仪频率显示值, Hz;

$f_0$ ——标准频率表实测值, Hz。

### C.3.2 不确定度来源

不确定度来源主要有标准频率表分辨率、标准频率表测量误差、测量重复性引入的不确定度分量。

### C.3.3 标准不确定度分量评定

#### C.3.3.1 标准频率表分辨力引入的不确定度分量 $u_1$

在测量输电线路工频参数测试仪输出频率 50Hz 时, 标准频率表测量分辨率为 0.01Hz 便可满足测量要求, 设其服从均匀分布, 取置信因子  $k=\sqrt{3}$ , 则其不确定度分

$$\text{量: } u_1 = \frac{\delta}{2\sqrt{3}} = \frac{0.01\text{Hz}}{2\sqrt{3}} = 0.0029\text{Hz}。$$

#### C.3.3.2 频率表测量误差引入的不确定度分量 $u_2$

频率表测量频率为 50Hz 时, 最大允差为  $\pm 0.05\text{Hz}$ , 设其服从均匀分布, 取置信因子  $k=\sqrt{3}$ , 则其不确定度分量:  $u_2 = \frac{a}{\sqrt{3}} = \frac{0.05\text{Hz}}{\sqrt{3}} = 0.029\text{Hz}。$

C.3.3.3 测量重复性引入的标准不确定度分量  $u_A$ 

设置输电线路工频参数测试仪输出频率为 50Hz，在重复条件下测量 10 次，结果如下表(Hz)：

测量序号	1	2	3	4	5
测量结果	50.05	50.09	50.13	50.10	50.11
测量序号	6	7	8	9	10
测量结果	50.16	50.08	50.15	50.12	50.16
平均值 $\bar{x}_n$	50.12		标准差	0.036	

$$\text{则测量重复性引入的不确定度分量: } u_A = s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (x_i - \bar{x})^2}{(10-1)}} = 0.036 \text{ Hz}。$$

由于测量重复性包含了人员读数时因分辨力引入的误差，因此由分辨力引入的不确定度分量  $u_1$  和测量重复性引入的不确定度分量  $u_A$  取大者。

## C.3.4 合成标准不确定度

## C.3.4.1 主要不确定度汇总表

不确定度来源( $u_i$ )	$a_i$	$k_i$	$u_i$
频率表测量误差引入不确定度分量, $u_2$	0.05Hz	$\sqrt{3}$	0.029Hz
测量重复性, $u_A$	0.036Hz	1	0.036Hz

## C.3.4.2 合成不确定度计算

以上各项不确定度分量相互独立不相关，故合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_2^2 + u_A^2} = 0.046 \text{ Hz}$$

## C.3.5 扩展不确定度

取包含因子  $k=2$ ，则在频率 50Hz 校准点的测量结果扩展不确定度为：

$$U = k u_c = 0.09 \text{ Hz}, k=2。$$

## C.4 电压测量结果不确定度评定

## C.4.1 测量模型

用多功能校准仪对输电线路工频参数测试仪的电压进行测量的模型为：

$$\Delta U = U_x - U_o \quad (\text{C.4})$$

式中：

$\Delta U$  —— 被校测试仪电压示值误差；

$U_x$  —— 被校测试仪电压显示值；

$U_o$  —— 多功能校准仪电压输出值。

C.4.2 不确定度来源

不确定度来源主要有：多功能校准仪准确度、测量重复性引入的不确定度分量。

C.4.3 标准不确定度分量评定

C.4.3.1 多功能校准仪准确度引入的不确定度分量  $u_1$

根据其技术指标，在频率 50Hz 下输出 100V 电压时，其最大允许误差为：±0.05%

设其服从均匀分布，取置信因子  $k=\sqrt{3}$ ，则不确定度分量  $u_1 = \frac{a}{\sqrt{3}} = \frac{0.05\%}{\sqrt{3}} = 0.029\%$ 。

C.4.3.2 测量重复性引入的标准不确定度分量  $u_A$

在重复条件下对输电线路工频参数测试仪电压进行重复测量 10 次，结果如下表（V）：

测量序号	1	2	3	4	5
测量结果	100.024	100.021	100.025	100.029	100.031
测量序号	6	7	8	9	10
测量结果	100.023	100.025	100.030	100.036	100.033
平均值 $\bar{x}_n$	10.028		标准差 s	0.049	

则测量重复性引入的不确定度分量： $u_A = s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (x_i - \bar{x})^2}{(10-1)}} = 0.0049V$ 。

采用相对不确定度表示则为： $u_A = \frac{0.049}{100} V \times 100\% = 0.049\%$ 。

C.4.4 合成标准不确定度

C.4.4.1 主要不确定度汇总表

不确定度来源( $u_i$ )	$a_i$	$k_i$	$u_i$
多功能校准仪准确度引入不确定度分量， $u_1$	0.05%	$\sqrt{3}$	0.029%
测量重复性， $u_A$	0.049%	1	0.049%

## C.4.4.2 合成不确定度计算

以上各项不确定度分量相互独立不相关，不确定度来源的各个分量均为相对不确定度分量，则相对合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_A^2} = 0.057\%$$

## C.4.5 扩展不确定度

取包含因子  $k=2$ ，则测量电压为 100V 校准点下的扩展不确定度为：

$$U_{\text{rel}} = k u_c = 0.11\%, \quad k=2。$$

## C.5 电流测量结果不确定度评定

## C.5.1 测量模型

用多功能校准仪对输电线路工频参数测试仪电流进行测量的模型为：

$$\Delta I = I_x - I_o \quad (\text{C.5})$$

式中：

$\Delta I$  —— 被校测试仪电流示值误差；

$I_x$  —— 被校测试仪电流显示值；

$I_o$  —— 多功能校准仪电流输出值。

## C.5.2 不确定度来源

不确定度来源主要有：多功能校准仪准确度、测量重复性引入的不确定度分量。

## C.5.3 标准不确定度分量评定

C.5.3.1 多功能校准仪准确度引入的不确定度分量  $u_1$ 

根据其技术指标，在频率 50Hz 下输出 1A 电流时，其最大允许误差为：±0.05%

设其服从均匀分布，取置信因子  $k=\sqrt{3}$ ，则不确定度分量  $u_1 = \frac{a}{\sqrt{3}} = \frac{0.05\%}{\sqrt{3}} = 0.029\%$ 。

C.5.3.2 测量重复性引入的标准不确定度分量  $u_A$ 

在重复条件下对输电线路工频参数测试仪电压进行重复测量 10 次，结果如下表

(A)：

测量序号	1	2	3	4	5
测量结果	1.0012	1.0009	1.0015	1.0014	1.0007
测量序号	6	7	8	9	10

测量结果	1.0016	1.0021	1.0017	1.0013	1.0024
平均值 $\bar{x}_n$	1.00148		标准差 s	0.0005	

则测量重复性引入的不确定度分量： $u_A = s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (x_i - \bar{x})^2}{(10-1)}} = 0.0005 \text{ A}$ 。

采用相对不确定度表示则为： $u_A = \frac{0.0005}{1} \text{ A} \times 100\% = 0.05\%$ 。

#### C.5.4 合成标准不确定度

##### C.5.4.1 主要不确定度汇总表

不确定度来源( $u_i$ )	$a_i$	$k_i$	$u_i$
多功能校准仪准确度引入不确定度分量, $u_1$	0.05%	$\sqrt{3}$	0.029%
测量重复性, $u_A$	0.05%	1	0.05%

##### C.5.4.2 合成不确定度计算

以上各项不确定度分量相互独立不相关, 不确定度来源的各个分量均为相对不确定度分量, 则相对合成标准不确定度为:

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_A^2} = 0.0577\%$$

#### C.5.5 扩展不确定度

取包含因子  $k=2$ , 则在测量电流为 1A 的校准点下扩展不确定度为:

$$U_{\text{rel}} = k u_c = 0.12\%, \quad k=2。$$

### C.6 电容测量结果不确定度评定

#### C.6.1 测量模型

用标准电容器测量输电线路工频参数测试仪的电容参数的测量模型为:

$$\Delta C = C_x - C_o \quad (\text{C.6})$$

式中:

$\Delta C$  —— 被校测试仪电容示值误差;

$C_x$  —— 被校测试仪电容显示值;

$C_o$  —— 标准电容值。

#### C.6.2 不确定度来源

不确定度来源主要有：标准电容器准确度、测量重复性引入的不确定度分量。

### C.6.3 标准不确定度分量评定

#### C.6.3.1 标准电容器准确度引入的不确定度分量 $u_1$

根据其技术指标，电容值  $10\mu\text{F}$ ，频率  $50\text{Hz}$  时最大允许误差为： $\pm 0.2\%$  设其服从均匀分布，取置信因子  $k=\sqrt{3}$ ，则不确定度分量  $u_1 = \frac{a}{\sqrt{3}} = \frac{0.2\%}{\sqrt{3}} = 0.06\%$ 。

#### C.6.3.2 测量重复性引入的标准不确定度分量 $u_A$

在重复条件下对输电线路工频参数测试仪电容  $10\mu\text{F}$  进行重复测量 10 次，结果如下表 ( $\mu\text{F}$ )：

测量序号	1	2	3	4	5
测量结果	10.024	10.021	10.028	10.032	10.047
测量序号	6	7	8	9	10
测量结果	10.031	10.058	10.049	10.036	10.030
平均值 $\bar{x}_n$	10.037		标准差 s	0.011	

则测量重复性引入的不确定度分量： $u_A = s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (x_i - \bar{x})^2}{(10-1)}} = 0.011\mu\text{F}$ 。

采用相对不确定度表示则为： $u_A = \frac{0.011}{10} \mu\text{F} \times 100\% = 0.11\%$ 。

### C.6.4 合成标准不确定度

#### C.6.4.1 主要不确定度汇总表

不确定度来源( $u_i$ )	$a_i$	$k_i$	$u_i$
标准电容器准确度引入不确定度分量, $u_1$	0.2%	$\sqrt{3}$	0.12%
测量重复性, $u_A$	0.11%	1	0.11%

#### C.6.4.2 合成不确定度计算

以上各项不确定度分量相互独立不相关，不确定度来源的各个分量均为相对不确定度分量，则相对合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_A^2} = 0.163\%$$

### C.6.5 扩展不确定度

取包含因子  $k=2$ ，则在电容值为  $10\mu\text{F}$  校准点下扩展不确定度为：

$$U_{\text{rel}}=k u_c=0.33\%, k=2。$$

## C.7 阻抗测量结果不确定度评定

### C.7.1 测量模型

设置标准电阻  $100\Omega$  跟电感  $100\text{mH}$  时，测量输电线路工频参数测试仪阻抗的测量模型为：

$$Z_x=\sqrt{R^2+X^2} \quad (\text{C.7})$$

式中：

$Z_x$ ——被校测试仪阻抗显示值，

$\sqrt{R^2+X^2}$ —— $R$ 为标准电阻值， $X$ 为标准感抗值。

### C.7.2 不确定度传播律

$$u_c^2(\Delta)=c_1^2 u^2(R)+c_2^2 u^2(X)$$

$$\text{灵敏系数 } c_1=\frac{\partial \Delta}{\partial R}=-\frac{R}{\sqrt{R^2+X^2}}=-0.97, \quad c_2=\frac{\partial \Delta}{\partial X}=-\frac{X}{\sqrt{R^2+X^2}}=-0.3。$$

### C.7.3 不确定度来源

不确定度来源主要有：标准电阻、标准电感本身不确定度、测量重复性引入的不确定度分量等。

### C.7.4 标准不确定度分量评定

#### C.7.4.1 标准电阻准确度引入的不确定度分量 $u_1$

根据说明书的技术指标，标准电阻  $100\Omega$  时的最大允许误差为  $\pm 0.5\%$ 。设其服从均匀分布，取置信因子  $k=\sqrt{3}$ ，则不确定度分量  $u_1=\frac{a}{\sqrt{3}}=\frac{0.5\%}{\sqrt{3}}=0.29\%$ 。

#### C.7.4.2 标准电感准确度引入的不确定度分量 $u_2$

根据说明书的技术指标，标准电感  $100\text{mH}$  时最大允许误差为  $\pm 0.2\%$ 。设其服从均匀分布，取置信因子  $k=\sqrt{3}$ ，则不确定度分量  $u_2=\frac{a}{\sqrt{3}}=\frac{0.2\%}{\sqrt{3}}=0.12\%$ 。

#### C.7.4.3 测量重复性引入的标准不确定度分量 $u_A$

在重复条件对输电线路工频参数测试仪阻抗为  $100\Omega$  进行重复测量 10 次，结果如



下表 ( $\Omega$ ):

测量序号	1	2	3	4	5
测量结果	99.94	99.90	99.96	100.02	100.06
测量序号	6	7	8	9	10
测量结果	100.01	99.97	99.90	99.87	99.96
平均值 $\bar{x}_n$	99.96		标准差 s	0.06	

则测量重复性引入的不确定度分量:  $u_A = s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (x_i - \bar{x})^2}{(10-1)}} = 0.06\Omega$ 。

相对不确定度分量:  $u_A = \frac{0.06}{100}\Omega \times 100\% = 0.06\%$ 。

### C.7.5 合成标准不确定度

#### C.7.5.1 主要不确定度汇总表

不确定度来源( $u_i$ )	$a_i$	$k_i$	$u_i$	$c_i$
标准电阻准确度引入的不确定度分量, $u_1$	0.2%	$\sqrt{3}$	0.12%	-0.97
标准电感准确度引入的不确定度分量, $u_2$	0.5%	$\sqrt{3}$	0.29%	-0.3
测量重复性, $u_A$	0.06%	1	0.06%	1

#### C.7.5.2 合成不确定度计算

以上各项不确定度分量相互独立不相关, 不确定度来源的各个分量均为相对不确定度分量, 则相对合成标准不确定度为:

$$u_{\text{crel}} = \sqrt{c_1^2 u_1^2 + c_2^2 u_2^2 + c_3^2 u_A^2} = 0.16\%$$

### C.7.6 扩展不确定度

取包含因子  $k=2$ , 则扩展不确定度为:  $U_{\text{rel}} = k u_c = 0.32\%$ ,  $k=2$ 。

## C.8 阻抗角测量结果不确定度评定

### C.8.1 测量模型

用标准相位计测量输电线路工频参数测试仪阻抗角的测量模型为:

$$\Delta\varphi = \varphi_x - \varphi_0 \quad (\text{C.8})$$

式中:

$\Delta\varphi$ ——阻抗角示值误差;

$\varphi_x$  —— 被校测试仪阻抗角显示值；

$\varphi_0$  —— 标准相位计测量值。

### C.8.2 不确定度来源

不确定度来源主要有：标准相位计分辨力、标准相位计测量误差、测量重复性引入的不确定度分量。

### C.8.3 标准不确定度分量评定

#### C.8.3.1 标准相位计分辨力引入的不确定度分量 $u_1$

在测量输电线路工频参数测试仪相位角时，其测量分辨率为  $0.001^\circ$  便可满足测量要求，设其服从均匀分布，取置信因子  $k=\sqrt{3}$ ，则其不确定度分量：

$$u_1 = \frac{\delta}{2\sqrt{3}} = \frac{0.001^\circ}{2\sqrt{3}} = 0.00029^\circ。$$

#### C.8.3.2 标准相位计测量误差引入的不确定度分量 $u_2$

根据说明书的技术指标，标准相位计最大允许误差为  $\pm 0.05^\circ$ 。设其服从均匀分布，取置信因子  $k=\sqrt{3}$ ，则不确定度分量  $u_2 = \frac{a}{\sqrt{3}} = \frac{0.05^\circ}{\sqrt{3}} = 0.029^\circ$ 。

#### C.8.3.3 测量重复性引入的标准不确定度分量 $u_A$

对输电线路工频参数测试仪在阻抗角为  $31.25^\circ$  下进行 10 次重复性测量，结果如下表 ( $^\circ$ )：

测量序号	1	2	3	4	5
测量结果	31.27	31.24	31.32	31.28	31.30
测量序号	6	7	8	9	10
测量结果	31.26	31.31	31.20	31.19	31.22
平均值 $\bar{x}_n$	31.259		标准差 s	0.046	

$$\text{则测量重复性引入的不确定度分量 } u_A = s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (x_i - \bar{x}_n)^2}{(10-1)}} = 0.046^\circ。$$

由于测量重复性包含了人员读数时因分辨力引入的误差，因此由分辨力引入的不确定度分量  $u_1$  和测量重复性引入的不确定度分量  $u_A$  取大者。

### C.8.4 合成标准不确定度

## C.8.4.1 主要不确定度汇总表

不确定度来源( $u_i$ )	$a_i$	$k_i$	$u_i$
标准相位计测量误差引入的不确定度分量, $u_2$	$0.05^\circ$	$\sqrt{3}$	$0.029^\circ$
测量重复性, $u_A$	$0.046^\circ$	1	$0.046^\circ$

## C.8.4.2 合成不确定度计算

以上各项不确定度分量相互独立不相关, 不确定度来源的各个分量均为相对不确定度分量, 则相对合成标准不确定度为:  $u_c = \sqrt{u_2^2 + u_A^2} = 0.054^\circ$ 。

## C.8.5 扩展不确定度

取包含因子  $k=2$ , 则扩展不确定度为:  $U = k u_c = 0.11^\circ$ ,  $k=2$ 。