

交流电子负载校准规范

# 测量不确定度评定报告

《交流电子负载校准规范》编制组

# 测量不确定度评定报告

## 1 引言

交流电子负载的校准项目有 8 项，校准项目和对应的校准方法见表 1。其中交流电流和恒定电流、交流电阻和恒定电阻、交流功率和恒定功率在校准时可以同时进行，校准所用的测量标准相同，标准不确定度来源和评定程序类似。

表 1 交流电子负载校准项目一览表

序号	校准项目	校准方法	评定过程序号
1	交流电压	标准表法（比较测量法）	2.1
		标准源法（直接测量法）	2.2
2	交流电流	标准表法（比较测量法）	3.1
		分流器法（间接测量法）	3.2
		电流比例标准法（间接测量法）	3.3
3	恒定电流	标准表法（比较测量法）	4.1
		分流器法（间接测量法）	4.2
		电流比例标准法（间接测量法）	4.3
4	交流电阻	间接测量法	5
5	恒定电阻	间接测量法	6
6	交流功率	标准表法（比较测量法）	7
7	恒定功率	标准表法（比较测量法）	8
8	功率因数	标准表法（比较测量法）	9

## 2 交流电压测量不确定度评定

### 2.1 标准表法

#### 2.1.1 概述

测量条件：环境温度：(20±5) °C，相对湿度：20%~80%；

测量标准：标准交流电压表；辅助设备：交流稳压电源；

被测对象：交流电子负载；

测量方法：采用标准表法，即比较测量法，使被校交流电子负载和标准交流电压表同时测量交流稳压电源的输出电压 220V，50 Hz，记录被校交流电子负载交流电压示值  $V_x$  和标准交流电压表的测量值  $V_0$ 。

### 2.1.2 测量模型

被校交流电子负载交流电压示值误差  $\Delta V$  为输出量。被校交流电子负载交流电压示值  $V_x$ 、标准交流电压表的测量值  $V_0$  为输入量。考虑到被校交流电子负载交流电压分辨力  $\delta V_x$  和交流稳压电源输出电压短期稳定性  $\delta V_s$  对测量结果的影响，以及在标准条件下，由温度、湿度、供电电源不稳定和电磁干扰等带来的影响可忽略，标准表法的测量模型可用 (2.1) 式表示。

$$\Delta V = V_x - V_0 + \delta V_x + \delta V_s \quad (2.1)$$

式中：

$\Delta V$  ——被校交流电子负载交流电压示值误差，V；

$V_x$  ——被校交流电子负载交流电压示值，V；

$V_0$  ——交流电压标准值，V；

$\delta V_x$  ——被校交流电子负载交流电压分辨力，V；

$\delta V_s$  ——交流稳压电源输出电压短期稳定性的影响，V。

因各输入量互不相关，则其测量不确定度传播律可用 (2.2) 式表示。

$$u_c^2(\Delta V) = c^2(V_x) \times u^2(V_x) + c^2(V_0) \times u^2(V_0) + c^2(\delta V_x) \times u^2(\delta V_x) + c^2(\delta V_s) \times u^2(\delta V_s) \quad (2.2)$$

式中，灵敏系数为：

$$c(V_x) = 1 \quad c(V_0) = -1 \quad c(\delta V_x) = 1 \quad c(\delta V_s) = 1$$

### 2.1.3 标准不确定度来源

- 1) 被校交流电子负载交流电压测量重复性引入的标准不确定度  $u_A(V_x)$ 。
- 2) 被校交流电子负载交流电压示值分辨力引入的标准不确定度  $u(\delta V_x)$ 。
- 3) 标准交流电压表的最大允许误差引入的标准不确定度  $u(V_0)$ 。
- 4) 交流稳压电源输出电压短期稳定性的影响引入的标准不确定度  $u(\delta V_s)$ 。

### 2.1.4 标准不确定度评定

#### 2.1.4.1 被校交流电子负载交流电压测量重复性引入的标准不确定度 $u_A(V_x)$

连续重复测量10次，得到一系列被校交流电子负载交流电压的重复性测量数据，见表2.1。按A类评定，用贝塞尔公式计算其实验标准偏差作为被校交流电子负载交流电压测量重复性引入的标准不确定度。

表 2.1 被校交流电子负载交流电压的测量重复性测量数据

第 $i$ 次测量	1	2	3	4	5
测量值 (V)	219.96	219.90	219.95	219.98	219.91
第 $i$ 次测量	6	7	8	9	10
测量值 (V)	219.97	219.92	219.97	219.96	219.92

用单次测量值作为校准结果时，单次测量值的实验标准偏差  $s(V_x)$  为：

$$s(V_x) = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^{10} (V_{xi} - \bar{V}_x)^2} = 0.029 \text{ V}$$

则测量重复性引入的标准不确定度  $u_A(V_x)$  为：

$$u_A(V_x) = s(V_x) = 0.029 \text{ V}$$

#### 2.1.4.2 被校交流电子负载交流电压示值分辨力引入的标准不确定度 $u(\delta V_x)$

被校交流电子负载交流电压的示值分辨力为0.01 V，由此引入的标准不确定度按B类评定，服从均匀分布，包含因子  $k = \sqrt{3}$ ，则被校交流电子负载交流电压示值分辨力引入的标准不确定度为：

$$u(\delta V_x) = \frac{0.01}{2\sqrt{3}} \text{ V} = 0.0029 \text{ V}$$

#### 2.1.4.3 标准交流电压表的最大允许误差引入的标准不确定度 $u(V_0)$

由标准交流电压表的说明书可知，当交流电压评定点为220 V，50 Hz时，标准交流电压表的量程为1000 V，其最大允许误差为 $\pm(0.008\%RD + 0.002\%FS)$ ，按B类评定，服从均匀分布，包含因子  $k = \sqrt{3}$ ，则标准交流电压表最大允许误差引入的标准不确定度为：

$$u(V_0) = \frac{220 \times 0.008\% + 1000 \times 0.002\%}{\sqrt{3}} \text{ V} = 0.022 \text{ V}$$

#### 2.1.4.4 交流稳压电源输出电压短期稳定性的影响引入的标准不确定度 $u(\delta V_s)$

通过试验可知，交流稳压电源输出220V，50Hz时，其1 min的短期稳定性为0.02%，按B类评定，服从均匀分布，包含因子  $k = \sqrt{3}$ ，则交流稳压电源的短期稳定性的影响引入的标准不确定度为：

$$u(\delta V_s) = \frac{220 \times 0.02\%}{\sqrt{3}} \text{ V} = 0.064 \text{ V}$$

#### 2.1.5 合成标准不确定度

交流电压标准不确定度分量汇总表见表2.2。

表 2.2 交流电压标准不确定度分量汇总表

输入量	标准不确定度来源	评定方法	概率分布	k值	标准不确定度	灵敏系数
$u_A(V_x)$	被校交流电子负载交流电压测量重复性	A	正态	/	0.029 V	1
$u(\delta V_x)$	被校交流电子负载交流电压分辨力	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.0029 V	1
$u(V_0)$	标准交流电压表最大允许误差	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.022 V	-1
$u(\delta V_s)$	交流稳压电源短期稳定性的影响	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.064 V	1

被校交流电子负载交流电压的分辨力与重复性引入的标准不确定度存在重复，故舍去其中较小者，取其较大者  $u_A(V_x)$ ，又  $u_A(V_x)$ 、 $u(V_0)$  和  $u(\delta V_s)$  互不相关，则合成标准不确定度  $u_c$  为：

$$u_c = \sqrt{u_A^2(V_x) + u^2(V_0) + u^2(\delta V_s)} = 0.036 \text{ V}$$

### 2.1.6 扩展不确定度的确定

取  $k = 2$ ，则扩展不确定度  $U$  为：

$$U = ku_c = 2 \times 0.036 \text{ V} \approx 0.08 \text{ V} \quad (k=2)$$

### 2.1.7 测量不确定度的最后陈述

用标准表法对被校交流电子负载交流电压 220 V，50 Hz 校准点进行校准，交流电压 220 V，50 Hz 校准结果的测量不确定度为  $U=0.08 \text{ V} (k=2)$ 。

## 2.2 标准源法

### 2.2.1 概述

测量条件：环境温度：(20±5) °C，相对湿度：20%~80%；

测量标准：标准交流电压源；

被测对象：交流电子负载；

测量方法：采用标准源法，即直接测量法，用标准交流电压源输出电压 110 V，400 Hz，记录被校交流电子负载交流电压示值  $V_x$  和标准交流电压源输出电压标准值  $V_s$ 。

### 2.2.2 测量模型

被校交流电子负载交流电压示值误差  $\Delta V$  为输出量。被校交流电子负载交流电压示值  $V_x$ 、标准交流电压源输出交流电压标准值  $V_0$ 。考虑到被校交流电子负载交流电压分辨力  $\delta V_x$  对测量结果的影响，以及在标准条件下，由温度、湿度、标准交流电压源的短期稳定性、供电电源不稳定和电磁干扰等带来的影响可忽略，标准源法的测量模型可用 (2.3) 式表示。

$$\Delta V = V_x - V_0 + \delta V_x \quad (2.3)$$

式中：

$\Delta V$ ——被校交流电子负载交流电压示值误差，V；

$V_x$ ——被校交流电子负载交流电压示值，V；

$V_0$ ——交流电压标准值，V；

$\delta V_x$ ——被校交流电子负载交流电压分辨力，V。

因各输入量互不相关，则其测量不确定度传播律可用 (2.4) 式表示。

$$u_c^2(\Delta V) = c^2(V_x) \times u^2(V_x) + c^2(V_0) \times u^2(V_0) + c^2(\delta V_x) \times u^2(\delta V_x) \quad (2.4)$$

式中，灵敏系数为：

$$c(V_x) = 1 \quad c(V_0) = -1 \quad c(\delta V_x) = 1$$

### 2.2.3 标准不确定度来源

- 1) 被校交流电子负载交流电压测量重复性引入的标准不确定度  $u_A(V_x)$ 。
- 2) 被校交流电子负载交流电压示值分辨力引入的标准不确定度  $u(\delta V_x)$ 。
- 3) 标准交流电压源的最大允许误差引入的标准不确定度  $u(V_0)$ 。

### 2.2.4 标准不确定度评定

#### 2.2.4.1 被校交流电子负载交流电压测量重复性引入的标准不确定度 $u_A(V_x)$

连续重复测量10次，得到一系列被校交流电子负载交流电压的重复性测量数据，见表2.3。按A类评定，用贝塞尔公式计算其实验标准偏差作为被校交流电子负载交流电压测量重复性引入的标准不确定度。

表 2.3 被校交流电子负载交流电压测量重复性测量数据

第 $i$ 次测量	1	2	3	4	5
测量值 (V)	110.02	110.05	110.01	110.01	110.03
第 $i$ 次测量	6	7	8	9	10
测量值 (V)	110.01	110.00	110.03	110.02	110.04

用单次测量值作为校准结果时，单次测量值的实验标准偏差  $s(V_x)$  为：

$$s(V_x) = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^{10} (V_{xi} - \bar{V}_x)^2} = 0.015 \text{ V}$$

则测量重复性引入的标准不确定度  $u_A(V_x)$  为：

$$u_A(V_x) = s(V_x) = 0.015 \text{ V}$$

#### 2.2.4.2 被校交流电子负载交流电压示值分辨力引入的标准不确定度 $u(\delta V_x)$

被校交流电子负载交流电压的示值分辨力为0.01 V，由此引入的标准不确定度按B类评定，服从均匀分布，包含因子  $k = \sqrt{3}$ ，则被校交流电子负载交流电压示值分辨力引入的标准不确定度为：

$$u(\delta V_x) = \frac{0.01}{2\sqrt{3}} \text{ V} = 0.0029 \text{ V}$$

#### 2.2.4.3 标准交流电压源的最大允许误差引入的标准不确定度 $u(V_0)$

由标准交流电压源的说明书可知，当交流电压评定点为110 V时，标准交流电压源的量程为330 V，其最大允许误差为  $\pm (0.019\%RD + 0.002V)$ ，按B类评定，服从均匀分布，包含因子  $k = \sqrt{3}$ ，则标准交流电压表最大允许误差引入的标准不确定度为：

$$u(V_0) = \frac{110 \times 0.019\% + 0.002}{\sqrt{3}} \text{ V} = 0.013 \text{ V}$$

## 2.2.5 合成标准不确定度

交流电压标准不确定度分量汇总表见表2.4。

表 2.4 交流电压标准不确定度分量汇总表

输入量	标准不确定度来源	评定方法	概率分布	k值	标准不确定度	灵敏系数
$u_A(V_x)$	被校交流电子负载交流电压测量重复性	A	正态	/	0.015 V	1
$u(\delta V_x)$	被校交流电子负载交流电压分辨力	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.0029 V	1
$u(V_0)$	标准交流电压表最大允许误差	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.013 V	-1

被校交流电子负载交流电压的分辨力与重复性引入的标准不确定度存在重复，故舍去其中较小者，取其较大者  $u_A(V_x)$ ，又  $u_A(V_x)$  和  $u(V_0)$  互不相关，则合成标准不确定度  $u_c$  为：

$$u_c = \sqrt{u_A^2(V_x) + u^2(V_0)} = 0.02 \text{ V}$$

## 2.2.6 扩展不确定度的确定

取  $k = 2$ ，则扩展不确定度  $U$  为：

$$U = k u_c = 2 \times 0.02 \text{ V} = 0.04 \text{ V} \quad (k=2)$$

## 2.2.7 测量不确定度的最后陈述

用标准源法对被校交流电子负载交流电压 110 V，400 Hz 进行校准，则其校准结果的测量不确定度为  $U=0.04 \text{ V} (k=2)$ 。

# 3 交流电流测量不确定度评定

## 3.1 标准表法

### 3.1.1 概述

测量条件：环境温度：(20±5) °C，相对湿度：20%~80%；

测量标准：标准交流电流表；辅助设备：交流稳压电源；

被测对象：交流电子负载；

测量方法：采用标准表法，即比较测量法，将标准交流电流表串联至被校交流电子负载和交流稳压电源的低端回路中，使被校交流电子负载在恒定电流模式下加载 8 A，50 Hz，记录被校交流电子负载交流电流示值  $I_x$  和标准交流电流表的测量值  $I_0$ 。

### 3.1.2 测量模型

被校交流电子负载交流电流示值误差  $\Delta I$  为输出量。被校交流电子负载交流电流示值  $I_x$ 、标准交流电流表的测量值  $I_0$  为输入量。考虑到被校交流电子负载交流电流分辨力  $\delta I_x$  对测量结果的影响，以及在标准条件下，由温度、湿度、供电电源不稳定和电磁干扰等带来的影响可忽略，标准表法的测量模型可用 (3.1) 式表示。

$$\Delta I = I_x - I_0 + \delta I_x \quad (3.1)$$

式中：

$\Delta I$ ——被校交流电子负载交流电流示值误差，A；

$I_x$ ——被校交流电子负载交流电流示值，A；

$I_0$ ——交流电流标准值，A；

$\delta I_x$ ——被校交流电子负载交流电流分辨力，A。

因各输入量互不相关，则其测量不确定度传播律可用（3.2）式表示。

$$u_c^2(\Delta I) = c^2(I_x) \times u^2(I_x) + c^2(I_0) \times u^2(I_0) + c^2(\delta I_x) \times u^2(\delta I_x) \quad (3.2)$$

式中，灵敏系数为：

$$c(I_x) = 1 \quad c(I_0) = -1 \quad c(\delta I_x) = 1$$

### 3.1.3 标准不确定度来源

- 1) 被校交流电子负载交流电流测量重复性引入的标准不确定度  $u_A(I_x)$ 。
- 2) 被校交流电子负载交流电流示值分辨力引入的标准不确定度  $u(\delta I_x)$ 。
- 3) 标准交流电流表的最大允许误差引入的标准不确定度  $u(I_0)$ 。

### 3.1.4 标准不确定度评定

#### 3.1.4.1 被校交流电子负载交流电流测量重复性引入的标准不确定度 $u_A(I_x)$

连续重复测量10次，得到一系列被校交流电子负载交流电流的重复性测量数据，见表3.1。按A类评定，用贝塞尔公式计算其实验标准偏差作为被校交流电子负载交流电流测量重复性引入的标准不确定度。

表 3.1 被校交流电子负载交流电流测量重复性测量数据

第 $i$ 次测量	1	2	3	4	5
测量值 (A)	7.994	7.996	7.995	7.993	7.995
第 $i$ 次测量	6	7	8	9	10
测量值 (A)	7.994	7.995	7.996	7.994	7.995

用单次测量值作为校准结果时，单次测量值的实验标准偏差  $s(I_x)$  为：

$$s(I_x) = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^{10} (I_{xi} - \bar{I}_x)^2} = 0.00095 \text{ A}$$

则测量重复性引入的标准不确定度  $u_A(I_x)$  为：

$$u_A(I_x) = s(I_x) = 0.00095 \text{ A}$$

#### 3.1.4.2 被校交流电子负载交流电流示值分辨力引入的标准不确定度 $u(\delta I_x)$

被校交流电子负载交流电流的示值分辨力为0.001 A，由此引入的标准不确定度按B类评定，服从均匀分布，包含因子  $k = \sqrt{3}$ ，则被校交流电子负载交流电流示值分辨力

引入的标准不确定度为：

$$u(\delta I_x) = \frac{0.001}{2\sqrt{3}} \text{ A} = 0.00029 \text{ A}$$

### 3.1.4.3 标准交流电流表的最大允许误差引入的标准不确定度 $u(I_0)$

由标准交流电流表的说明书可知，当交流电流评定点为8 A，50 Hz时，标准交流电流表的量程为10 A，其最大允许误差为 $\pm(0.05\%RD + 0.05\%FS)$ ，按B类评定，服从均匀分布，包含因子  $k = \sqrt{3}$ ，则标准交流电流表最大允许误差引入的标准不确定度为：

$$u(I_0) = \frac{8 \times 0.05\% + 10 \times 0.05\%}{\sqrt{3}} \text{ A} = 0.0052 \text{ A}$$

### 3.1.5 合成标准不确定度

交流电流标准不确定度分量汇总表见表3.2。

表 3.2 交流电流标准不确定度分量汇总表

输入量	标准不确定度来源	评定方法	概率分布	$k$ 值	标准不确定度	灵敏系数
$u_A(I_x)$	被校交流电子负载交流电流测量重复性	A	正态	/	0.00095 A	1
$u(\delta I_x)$	被校交流电子负载交流电流分辨力	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.00029 A	1
$u(I_0)$	标准交流电流表最大允许误差	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.0052 A	-1

被校交流电子负载交流电流的分辨力与重复性引入的标准不确定度存在重复，故舍去其中较小者，取其较大者  $u_A(I_x)$ ，又  $u_A(I_x)$  和  $u(I_0)$  互不相关，则合成标准不确定度  $u_c$  为：

$$u_c = \sqrt{u_A^2(I_x) + u^2(I_0)} = 0.0053 \text{ A}$$

### 3.1.6 扩展不确定度的确定

取  $k = 2$ ，则扩展不确定度  $U$  为：

$$U = ku_c = 2 \times 0.0053 \text{ A} \approx 0.011 \text{ A} \quad (k=2)$$

### 3.1.7 测量不确定度的最后陈述

用标准表法对被校交流电子负载交流电流8 A，50 Hz进行校准，则其校准结果的测量不确定度为  $U=0.011 \text{ A} (k=2)$ 。

## 3.2 分流器法

### 3.2.1 概述

测量条件：环境温度：(20±5) °C，相对湿度：20%~80%；

测量标准：交流分流器 (A40B-50A)、标准交流电压表 (8508A)；

辅助设备：交流稳压电源；

被测对象：交流电子负载；

测量方法：采用间接测量法，将交流分流器串联至被校交流电子负载和交流稳压电源的低端测量回路中，标准交流电压表的输入端与交流分流器的输出端相连，使被校交流电子负载在恒定电流模式下加载 45 A，50 Hz，记录被校交流电子负载交流电流示值  $I_x$ 、分流器的电阻标称值  $R_0$  和标准交流电压表的测量值  $V_1$ 。

### 3.2.2 测量模型

被校交流电子负载交流电流示值误差  $\Delta I$  为输出量。被校交流电子负载交流电流示值  $I_x$ 、标准交流电压表的测量值  $U_1$ 、交流分流器的电阻标称值  $R_0$  和交流电子负载交流电流示值分辨力  $\delta I_x$  为输入量。考虑到交流分流器上级溯源证书给与的交直流差  $d_{AC-DC}$  ( $\leq 47$  ppm) 和因交流分流器配套标准交流电压表产生的负载效应的引入误差  $e_{PC}$  ( $\leq 0.016$  ppm) 对测量结果的影响，相对于交流分流器电阻标称值的准确度  $\pm 250$  ppm，二者的影响可以忽略不计，以及在标准条件下，由温度、湿度、供电电源不稳定和电磁干扰等带来的影响也可以忽略，因此，分流器法测量交流电流的测量模型可用 (3.3) 式表示。

$$\Delta I = I_x - \frac{V_1}{R_0} + \delta I_x \quad (3.3)$$

式中：

$\Delta I$ ——被校交流电子负载交流电流示值误差，A；

$I_x$ ——被校交流电子负载交流电流示值，A；

$V_1$ ——交流电压标准值，V；

$R_0$ ——交流分流器电阻标称值， $\Omega$ ；

$\delta I_x$ ——被校交流电子负载交流电流示值分辨力，A。

因各输入量互不相关，则其测量不确定度传播律可用 (3.4) 式表示。

$$u_c^2(\Delta I) = c_1^2(I_x)u^2(I_x) + c_2^2(V_1)u^2(V_1) + c_3^2(R_0)u^2(R_0) + c_4^2(\delta I_x)u^2(\delta I_x) \quad (3.4)$$

式中，灵敏系数为：

$$c_1(I_x) = 1 \quad c_2(V_1) = -\frac{1}{R_0} = -62.5 \quad c_3(R_0) = -\left(-\frac{U_1}{R_0^2}\right) = 2812.5 \quad c_4(\delta I_x) = 1$$

### 3.2.3 标准不确定度来源

- 1) 被校交流电子负载交流电流测量重复性引入的标准不确定度  $u_A(I_x)$ 。
- 2) 被校交流电子负载交流电流示值分辨力引入的标准不确定度  $u(\delta I_x)$ 。
- 3) 标准交流电压表的最大允许误差引入的标准不确定度  $u(V_1)$ 。
- 4) 交流分流器电阻标称值的最大允许误差引入的标准不确定度  $u(R_0)$ 。

### 3.2.4 标准不确定度评定

### 3.2.4.1 被校交流电子负载交流电流测量重复性引入的标准不确定度 $u_A(I_x)$

连续重复测量10次，得到一系列被校交流电子负载交流电流的重复性测量数据，见表3.3。按A类评定，用贝塞尔公式计算其实验标准偏差作为被校交流电子负载交流电流测量重复性引入的标准不确定度。

表 3.3 被校交流电子负载交流电流测量重复性测量数据

第 $i$ 次测量	1	2	3	4	5
测量值 (A)	45.00	45.01	45.00	45.02	45.00
第 $i$ 次测量	6	7	8	9	10
测量值 (A)	45.00	44.99	45.00	45.01	45.00

用单次测量值作为校准结果时，单次测量值的实验标准偏差  $s(I_x)$  为：

$$s(I_x) = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^{10} (I_{xi} - \bar{I}_x)^2} = 0.0082 \text{ A}$$

则测量重复性引入的标准不确定度  $u_A(I_x)$  为：

$$u_A(I_x) = s(I_x) = 0.0082 \text{ A}$$

### 3.2.4.2 被校交流电子负载交流电流示值分辨力引入的标准不确定度 $u(\delta I_x)$

被校交流电子负载交流电流的示值分辨力为0.01 A，由此引入的标准不确定度按B类评定，服从均匀分布，包含因子  $k = \sqrt{3}$ ，则被校交流电子负载交流电流示值分辨力引入的标准不确定度为：

$$u(\delta I_x) = \frac{0.01}{2\sqrt{3}} \text{ A} = 0.0029 \text{ A}$$

### 3.2.4.3 标准交流电压表的最大允许误差引入的标准不确定度 $u(V_1)$

由标准交流电压表的说明书可知，当交流电流评定点为45 A，50 Hz时，交流分流器电阻值0.016  $\Omega$ 输出端的电压值为0.72 V，使用标准交流电压表的2 V量程，其最大允许误差为 $\pm(0.008\%RD + 0.002\%FS)$ ，按B类评定，服从均匀分布，包含因子  $k = \sqrt{3}$ ，则标准交流电流表最大允许误差引入的标准不确定度为：

$$u(V_1) = \frac{0.72 \times 0.008\% + 2 \times 0.002\%}{\sqrt{3}} \text{ V} = 0.000048 \text{ V}$$

### 3.2.4.4 交流分流器电阻标称值的最大允许误差引入的标准不确定度 $u(R_0)$

由50 A交流分流器的说明书可知，其电阻标称值的最大允许误差为 $\pm 0.025\%$ ，按B类评定，服从均匀分布，包含因子  $k = \sqrt{3}$ ，则交流分流器最大允许误差引入的标准不确定度为：

$$u(R_0) = \frac{0.016 \times 0.025\%}{\sqrt{3}} \Omega = 0.0000023 \Omega$$

### 3.2.5 合成标准不确定度

分流器法测量交流电流的标准不确定度分量汇总表见表3.4。

表 3.4 交流电流标准不确定度分量汇总表

输入量	标准不确定度来源	评定方法	概率分布	k值	标准不确定度	灵敏系数
$u_A(I_x)$	被校交流电子负载交流电流测量重复性	A	正态	/	0.0082 A	1
$u(\delta I_x)$	被校交流电子负载交流电流分辨力	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.0029 A	1
$u(V_1)$	标准交流电压表最大允许误差	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.000045 V	-62.5
$u(R_0)$	交流分流器电阻标称值最大允许误差	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.0000023 $\Omega$	2812.5

被校交流电子负载交流电流的分辨力与重复性引入的标准不确定度存在重复，故舍去其中较小者，取其较大者  $u_A(I_x)$ ，又  $u_A(I_x)$ 、 $u(V_1)$  和  $u(R_0)$  互不相关，则合成标准不确定度  $u_c$  为：

$$u_c = \sqrt{u_A^2(I_x) + u^2(V_1) + u^2(R_0)} = 0.011 \text{ A}$$

### 3.2.6 扩展不确定度的确定

取  $k = 2$ ，则扩展不确定度  $U$  为：

$$U = ku_c = 2 \times 0.011 \text{ A} = 0.022 \text{ A} \quad (k=2)$$

### 3.2.7 测量不确定度的最后陈述

用分流器法对被校交流电子负载交流电流 45 A，50 Hz 进行校准，则其校准结果的测量不确定度为  $U=0.022 \text{ A} (k=2)$ 。

## 3.3 电流比例标准法

### 3.3.1 概述

测量条件：环境温度：(20±5) °C，相对湿度：20%～80%；

测量标准：电流传感器 (ITZ600-PR)、标准交流电流表 (8508A)；

辅助设备：交流稳压电源；

被测对象：交流电子负载；

测量方法：采用间接测量法，将电流传感器串联至被校交流电子负载和交流稳压电源的低端测量回路中，标准交流电流表的输入端与电流传感器的输出端相连，使被校交流电子负载在恒定电流模式下加载 45 A，50 Hz，记录被校交流电子负载交流电流示值  $I_x$ 、电流传感器分流比的标称值  $K$  和标准交流电流表的测量值  $I_1$ 。

### 3.3.2 测量模型

被校交流电子负载交流电流示值误差  $\Delta I$  为输出量。被校交流电子负载交流电流示值  $I_x$ 、标准交流电流表的测量值  $I_1$ 、电流传感器分流比的标称值  $K$  和交流电子负载交

流电流示值分辨力  $\delta I_x$  为输入量。在标准条件下，由温度、湿度、供电电源不稳定和电磁干扰等带来的影响也可以忽略，因此，电流比例标准法测量交流电流的测量模型可用（3.5）式表示。

$$\Delta I = I_x - KI_1 + \delta I_x \quad (3.5)$$

式中：

$\Delta I$ ——被校交流电子负载交流电流示值误差，A；

$I_x$ ——被校交流电子负载交流电流示值，A；

$K$ ——电流传感器分流比的标称值，A/A；

$I_1$ ——交流电流标准值，A；

$\delta I_x$ ——被校交流电子负载交流电流示值分辨力，A。

因各输入量互不相关，则其测量不确定度传播律可用（3.6）式表示。

$$u_c^2(\Delta I) = c_1^2 u^2(I_x) + c_2^2 u^2(K) + c_3^2 u^2(I_1) + c_4^2 u^2(\delta I_x) \quad (3.6)$$

式中，灵敏系数为：

$$c_1 = 1 \quad c_2 = -I_1 = -0.075 \quad c_3 = -K = -600 \quad c_4 = 1$$

### 3.3.3 标准不确定度来源

- 1) 被校交流电子负载交流电流测量重复性引入的标准不确定度  $u_A(I_x)$ 。
- 2) 被校交流电子负载交流电流示值分辨力引入的标准不确定度  $u(\delta I_x)$ 。
- 3) 电流传感器分流比的最大允许误差引入的标准不确定度  $u(K)$ 。
- 4) 标准交流电流表的最大允许误差引入的标准不确定度  $u(I_1)$ 。

### 3.3.4 标准不确定度评定

#### 3.3.4.1 被校交流电子负载交流电流测量重复性引入的标准不确定度 $u_A(I_x)$

连续重复测量10次，得到一系列被校交流电子负载交流电流的重复性测量数据，见表3.5。按A类评定，用贝塞尔公式计算其实验标准偏差作为被校交流电子负载交流电流测量重复性引入的标准不确定度。

表 3.5 被校交流电子负载交流电流测量重复性测量数据

第 $i$ 次测量	1	2	3	4	5
测量值 (A)	45.00	45.01	45.00	45.02	45.00
第 $i$ 次测量	6	7	8	9	10
测量值 (A)	45.00	44.99	45.00	45.01	45.00

用单次测量值作为校准结果时，单次测量值的实验标准偏差  $s(I_x)$  为：

$$s(I_x) = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^{10} (I_{xi} - \bar{I}_x)^2} = 0.0082 \text{ A}$$

则测量重复性引入的标准不确定度  $u_A(I_x)$  为：

$$u_A(I_x) = s(I_x) = 0.0082 \text{ A}$$

### 3.3.4.2 被校交流电子负载交流电流示值分辨力引入的标准不确定度 $u(\delta I_x)$

被校交流电子负载交流电流的示值分辨力为0.01 A，由此引入的标准不确定度按B类评定，服从均匀分布，包含因子  $k = \sqrt{3}$ ，则被校交流电子负载交流电流示值分辨力引入的标准不确定度为：

$$u(\delta I_x) = \frac{0.01}{2\sqrt{3}} \text{ A} = 0.0029 \text{ A}$$

### 3.3.4.3 电流传感器分流比的最大允许误差引入的标准不确定度 $u(K)$

由电流传感器的说明书可知，其分流比600的最大允许误差为 $\pm 0.005\%$ ，按B类评定，服从均匀分布，包含因子  $k = \sqrt{3}$ ，则电流传感器最大允许误差引入的标准不确定度为：

$$u(R_0) = \frac{600 \times 0.005\%}{\sqrt{3}} = 0.017$$

### 3.3.4.4 标准交流电流表的最大允许误差引入的标准不确定度 $u(I_1)$

由电流传感器的说明书可知，当交流电流评定点为45 A，50Hz时，电流传感器分流比为600输出端的电流值为0.075 A，使用标准交流电流表的200 mA量程，其最大允许误差为 $\pm (0.025\%RD + 0.01\%FS)$ ，按B类评定，服从均匀分布，包含因子  $k = \sqrt{3}$ ，则标准交流电流表最大允许误差引入的标准不确定度为：

$$u(V_1) = \frac{0.075 \times 0.025\% + 0.2 \times 0.01\%}{\sqrt{3}} \text{ A} = 0.000023 \text{ A}$$

### 3.3.5 合成标准不确定度

电流比例标准法测量交流电流的标准不确定度分量汇总表见表3.6。

表 3.6 交流电流标准不确定度分量汇总表

输入量	标准不确定度来源	评定方法	概率分布	k值	标准不确定度	灵敏系数
$u_A(I_x)$	被校交流电子负载交流电流测量重复性	A	正态	/	0.0082 A	1
$u(\delta I_x)$	被校交流电子负载交流电流分辨力	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.0029 A	1
$u(K)$	电流传感器分流比标称值最大允许误差	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.017	-0.075
$u(I_1)$	标准交流电流表最大允许误差	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.000023 A	-600

被校交流电子负载交流电流的分辨力与重复性引入的标准不确定度存在重复，故舍去其中较小者，取其较大者  $u_A(I_x)$ ，又  $u_A(I_x)$ 、 $u(K)$  和  $u(I_1)$  互不相关，则合成标准不确定度  $u_c$  为：

$$u_c = \sqrt{c_1^2 u_A^2(I_x) + c_2^2 u^2(K) + c_3^2 u^2(I_1)} = 0.016 \text{ A}$$

### 3.3.6 扩展不确定度的确定

取  $k=2$ ，则扩展不确定度  $U$  为：

$$U = k u_c = 2 \times 0.016 \text{ A} = 0.032 \text{ A} \quad (k=2)$$

### 3.3.7 测量不确定度的最后陈述

用电流比例标准法对被校交流电子负载交流电流 45 A，50 Hz 进行校准，则其校准结果的测量不确定度为  $U=0.032 \text{ A} (k=2)$ 。

## 4 恒定电流测量不确定度评定

### 4.1 标准表法

#### 4.1.1 概述

测量条件：环境温度：(20±5) °C，相对湿度：20%~80%；

测量标准：标准交流电流表；辅助设备：交流稳压电源；

被测对象：交流电子负载；

测量方法：采用标准表法，即比较测量法，将标准交流电流表串联至被校交流电子负载和交流稳压电源的低端回路中，使被校交流电子负载在恒定电流模式下加载 8 A，50 Hz，记录被校交流电子负载恒定电流设定值  $I_p$  和标准交流电流表的测量值  $I_0$ 。

#### 4.1.2 测量模型

被校交流电子负载恒定电流设定值误差  $\Delta I_p$  为输出量。被校交流电子负载恒定电流设定值  $I_p$ 、标准交流电流表的测量值  $I_0$  为输入量。考虑到被校交流电子负载恒定电流分辨力  $\delta I_p$  对测量结果的影响，以及在标准条件下，由温度、湿度、供电电源不稳定和电磁干扰等带来的影响可忽略，标准表法的测量模型可用 (4.1) 式表示。

$$\Delta I_p = I_p - I_0 + \delta I_p \quad (4.1)$$

式中：

$\Delta I_p$  ——被校交流电子负载恒定电流设定值误差，A；

$I_p$  ——被校交流电子负载恒定电流设定值，A；

$I_0$  ——交流电流标准值，A；

$\delta I_p$  ——被校交流电子负载恒定电流分辨力，A。

因各输入量互不相关，则其测量不确定度传播律可用 (4.2) 式表示。

$$u_c^2(\Delta I_p) = c^2(I_p) \times u^2(I_p) + c^2(I_0) \times u^2(I_0) + c^2(\delta I_p) \times u^2(\delta I_p) \quad (4.2)$$

式中，灵敏系数为：

$$c(I_p) = 1 \quad c(I_0) = -1 \quad c(\delta I_p) = 1$$

#### 4.1.3 标准不确定度来源

- 1) 恒定电流测量重复性引入的标准不确定度  $u_A(I_0)$ 。
- 2) 被校交流电子负载恒定电流设定值分辨力引入的标准不确定度  $u(\delta I_p)$ 。
- 3) 标准交流电流表的最大允许误差引入的标准不确定度  $u(I_0)$ 。

#### 4.1.4 标准不确定度评定

##### 4.1.4.1 被校交流电子负载恒定电流测量重复性引入的标准不确定度 $u_A(I_0)$

用标准交流电流表连续重复测量10次，得到一系列重复性测量数据，见表4.1。按A类评定，用贝塞尔公式计算其实验标准偏差作为被校交流电子负载恒定电流测量重复性引入的标准不确定度。

表 4.1 恒定电流测量重复性测量数据

第 $i$ 次测量	1	2	3	4	5
测量值 (A)	8.004	8.005	8.003	8.004	8.004
第 $i$ 次测量	6	7	8	9	10
测量值 (A)	8.005	8.004	8.003	8.004	8.005

用单次测量值作为校准结果时，单次测量值的实验标准偏差  $s(I_0)$  为：

$$s(I_0) = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^{10} (I_{0i} - \bar{I}_0)^2} = 0.0009 \text{ A}$$

则测量重复性引入的标准不确定度  $u_A(I_0)$  为：

$$u_A(I_0) = s(I_0) = 0.0009 \text{ A}$$

##### 4.1.4.2 被校交流电子负载恒定电流设定值分辨力引入的标准不确定度 $u(\delta I_p)$

被校交流电子负载说明书可知恒定电流设定值的分辨力为14 bits，即设定值分辨力的区间半宽度为  $\frac{1}{2^{14} \times 2}$  A，由此引入的标准不确定度按B类评定，服从均匀分布，包含因子  $k = \sqrt{3}$ ，则被校交流电子负载恒定电流设定值分辨力引入的标准不确定度为：

$$u(\delta I_p) = \frac{1}{2^{14} \times 2 \times \sqrt{3}} \text{ A} = 0.000018 \text{ A}$$

##### 4.1.4.3 标准交流电流表的最大允许误差引入的标准不确定度 $u(I_0)$

由标准交流电流表的说明书可知，当交流电流评定点为8 A，50 Hz时，标准交流电流表的量程为10 A，其最大允许误差为  $\pm (0.05\% \text{RD} + 0.05\% \text{FS})$ ，按B类评定，服从均匀分布，包含因子  $k = \sqrt{3}$ ，则标准交流电流表最大允许误差引入的标准不确定度为：

$$u(I_0) = \frac{8 \times 0.05\% + 10 \times 0.05\%}{\sqrt{3}} \text{ A} = 0.0052 \text{ A}$$

#### 4.1.5 合成标准不确定度

恒定电流标准不确定度分量汇总表见表4.2。

表 4.2 恒定电流标准不确定度分量汇总表

输入量	标准不确定度来源	评定方法	概率分布	$k$ 值	标准不确定度	灵敏系数
$u_A(I_0)$	被校交流电子负载恒定电流测量重复性	A	正态	/	0.0007 A	1
$u(\delta I_p)$	被校交流电子负载恒定电流设定值分辨力	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.000018 A	1
$u(I_0)$	标准交流电流表最大允许误差	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.0052 A	-1

被校交流电子负载交流电流的分辨力与重复性引入的标准不确定度存在重复，故舍去其中较小者，取其较大者  $u_A(I_0)$ ，又  $u_A(I_0)$  和  $u(I_0)$  互不相关，则合成标准不确定度  $u_c$  为：

$$u_c = \sqrt{u_A^2(I_0) + u^2(I_0)} = 0.0052 \text{ A}$$

#### 4.1.6 扩展不确定度的确定

取  $k = 2$ ，则扩展不确定度  $U$  为：

$$U = ku_c = 2 \times 0.0052 \text{ A} \approx 0.011 \text{ A} \quad (k=2)$$

#### 4.1.7 测量不确定度的最后陈述

用标准表法对被校交流电子负载恒定电流 8 A，50 Hz 进行校准，则其校准结果的测量不确定度为  $U=0.011 \text{ A} (k=2)$ 。

## 4.2 分流器法

### 4.2.1 概述

测量条件：环境温度：(20±5) °C，相对湿度：20%~80%；

测量标准：交流分流器 (A40B-50A)、标准交流电压表 (8508A)；

辅助设备：交流稳压电源；

被测对象：交流电子负载；

测量方法：采用间接测量法，将交流分流器串联至被校交流电子负载和交流稳压电源的低端测量回路中，标准交流电压表的输入端与交流分流器的输出端相连，使被校交流电子负载在交流电流模式下加载 45 A，50 Hz，记录被校交流电子负载恒定电流设定值  $I_p$ 、分流器的电阻标称值  $R_0$  和标准交流电压表的测量值  $V_1$ 。

### 4.2.2 测量模型

被校交流电子负载恒定电流设定值误差  $\Delta I_p$  为输出量。被校交流电子负载恒定电流示值  $I_p$ 、标准交流电压表的测量值  $U_1$ 、交流分流器的电阻标称值  $R_0$  和交流电子负载恒定电流设定值分辨力  $\delta I_p$  为输入量。考虑到交流分流器上级溯源证书给与的交直流差  $d_{AC-DC}$  ( $\leq 47 \text{ ppm}$ ) 和因交流分流器配套标准交流电压表产生的负载效应的引入误差  $e_{PC}$

( $\leq 0.016$  ppm) 对测量结果的影响, 相对于交流分流器电阻标称值的准确度  $\pm 250$  ppm, 二者的影响可以忽略不计, 以及在标准条件下, 由温度、湿度、供电电源不稳定和电磁干扰等带来的影响也可以忽略, 因此, 分流器法测量恒定电流的测量模型可用 (4.3) 式表示。

$$\Delta I_p = I_p - \frac{V_1}{R_0} + \delta I_p \quad (4.3)$$

式中:

$\Delta I_p$ ——被校交流电子负载恒定电流设定值误差, A;

$I_p$ ——被校交流电子负载恒定电流设定值, A;

$V_1$ ——交流电压标准值, V;

$R_0$ ——交流分流器电阻标称值,  $\Omega$ ;

$\delta I_p$ ——被校交流电子负载恒定电流设定值分辨力, A。

因各输入量互不相关, 则其测量不确定度传播律可用 (4.4) 式表示。

$$u_c^2(\Delta I_p) = c_1^2(I_p)u^2(I_p) + c_2^2(V_1)u^2(V_1) + c_3^2(R_0)u^2(R_0) + c_4^2(\delta I_p)u^2(\delta I_p) \quad (4.4)$$

式中, 灵敏系数为:

$$c_1(I_p) = 1 \quad c_2(V_1) = -\frac{1}{R_0} = -62.5 \quad c_3(R_0) = -\left(-\frac{U_1}{R_0^2}\right) = 2812.5 \quad c_4(\delta I_p) = 1$$

#### 4.2.3 标准不确定度来源

- 1) 被校交流电子负载恒定电流测量重复性引入的标准不确定度  $u_A(I_p)$ 。
- 2) 被校交流电子负载恒定电流设定值分辨力引入的标准不确定度  $u(\delta I_p)$ 。
- 3) 标准交流电压表的最大允许误差引入的标准不确定度  $u(V_1)$ 。
- 4) 交流分流器电阻标称值的最大允许误差引入的标准不确定度  $u(R_0)$ 。

#### 4.2.4 标准不确定度评定

##### 4.2.4.1 被校交流电子负载恒定电流测量重复性引入的标准不确定度 $u_A(I_p)$

连续重复测量 10 次, 得到一系列被校交流电子负载恒定电流的重复性测量数据, 见表 4.3。按 A 类评定, 用贝塞尔公式计算其实验标准偏差作为被校交流电子负载恒定电流测量重复性引入的标准不确定度。

表 4.3 被校交流电子负载恒定电流测量重复性测量数据

第 $i$ 次测量	1	2	3	4	5
电压测量值 (V)	0.71866	0.71867	0.71869	0.71872	0.71864
电阻标称值 ( $\Omega$ )	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016
电流实际值 (A)	44.916	44.917	44.918	44.920	44.915

第 <i>i</i> 次测量	6	7	8	9	10
电压测量值 (V)	0.71877	0.71870	0.71874	0.71866	0.71864
电阻标称值 (Ω)	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016
电流实际值 (A)	44.923	44.919	44.921	44.916	44.915

用单次测量值作为校准结果时，单次测量值的实验标准偏差  $s(I_p)$  为：

$$s(I_p) = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^{10} (I_{pi} - \bar{I}_p)^2} = 0.0027 \text{ A}$$

则测量重复性引入的标准不确定度  $u_A(I_p)$  为：

$$u_A(I_p) = s(I_p) = 0.0027 \text{ A}$$

#### 4.2.4.2 被校交流电子负载恒定电流设定值分辨力引入的标准不确定度 $u(\delta I_p)$

被校交流电子负载恒定电流的设定值分辨力为0.005 A，由此引入的标准不确定度按B类评定，服从均匀分布，包含因子  $k = \sqrt{3}$ ，则被校交流电子负载恒定电流设定值分辨力引入的标准不确定度为：

$$u(\delta I_x) = \frac{0.005}{2\sqrt{3}} \text{ A} = 0.00144 \text{ A}$$

#### 4.2.4.3 标准交流电压表的最大允许误差引入的标准不确定度 $u(V_1)$

由标准交流电压表的说明书可知，当恒定电流评定点为45 A，50 Hz时，交流分流器电阻值0.016 Ω输出端的电压值为0.72 V，使用标准交流电压表的2 V量程，其最大允许误差为±(0.008%RD + 0.002%FS)，按B类评定，服从均匀分布，包含因子  $k = \sqrt{3}$ ，则标准交流电流表最大允许误差引入的标准不确定度为：

$$u(V_1) = \frac{0.72 \times 0.008\% + 2 \times 0.002\%}{\sqrt{3}} \text{ V} = 0.000048 \text{ V}$$

#### 4.2.4.4 交流分流器电阻标称值的最大允许误差引入的标准不确定度 $u(R_0)$

由50 A交流分流器的说明书可知，其电阻标称值的最大允许误差为±0.025%，按B类评定，服从均匀分布，包含因子  $k = \sqrt{3}$ ，则交流分流器最大允许误差引入的标准不确定度为：

$$u(R_0) = \frac{0.016 \times 0.025\%}{\sqrt{3}} \Omega = 0.0000023 \Omega$$

#### 4.2.5 合成标准不确定度

分流器法测量恒定电流标准不确定度分量汇总表见表4.4。

表 4.4 恒定电流标准不确定度分量汇总表

输入量	标准不确定度来源	评定方法	概率分布	k值	标准不确定度	灵敏系数
$u_A(I_p)$	被校交流电子负载恒定电流测量重复性	A	正态	/	0.0027 A	1
$u(\delta I_p)$	被校交流电子负载恒定电流分辨力	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.00144 A	1
$u(V_1)$	标准交流电压表最大允许误差	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.000045 V	-62.5
$u(R_0)$	交流分流器电阻标称值最大允许误差	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.0000023 $\Omega$	2812.5

被校交流电子负载恒定电流设定值的分辨力与重复性引入的标准不确定度存在重复，故舍去其中较小者，取其较大者  $u_A(I_p)$ ，又  $u_A(I_p)$ 、 $u(V_1)$  和  $u(R_0)$  互不相关，则合成标准不确定度  $u_c$  为：

$$u_c = \sqrt{u_A^2(I_p) + u^2(V_1) + u^2(R_0)} = 0.0076 \text{ A}$$

#### 4.2.6 扩展不确定度的确定

取  $k = 2$ ，则扩展不确定度  $U$  为：

$$U = ku_c = 2 \times 0.0076 \text{ A} = 0.015 \text{ A} \quad (k=2)$$

#### 4.2.7 测量不确定度的最后陈述

用分流器法对被校交流电子负载恒定电流 45 A，50 Hz 进行校准，则其校准结果的测量不确定度为  $U=0.015 \text{ A} (k=2)$ 。

### 4.3 电流比例标准法

#### 4.3.1 概述

测量条件：环境温度：(20±5) °C，相对湿度：20%~80%；

测量标准：电流传感器 (ITZ600-PR)、标准交流电流表 (8508A)；

辅助设备：交流稳压电源；

被测对象：交流电子负载；

测量方法：采用间接测量法，将电流传感器串联至被校交流电子负载和交流稳压电源的低端测量回路中，标准交流电流表的输入端与电流传感器的输出端相连，使被校交流电子负载在恒定电流模式下加载 45 A，50 Hz，记录被校交流电子负载恒定电流设定值  $I_p$ 、电流传感器的分流比标称值  $K$  和标准交流电流表的测量值  $I_1$ 。

#### 4.3.2 测量模型

被校交流电子负载恒定电流设定值误差  $\Delta I_p$  为输出量。被校交流电子负载恒定电流设定值  $I_p$ 、电流传感器分流器的分流比  $K$ 、标准交流电流表的测量值  $I_1$  和交流电子负载恒定电流设定值分辨力  $\delta I_p$  为输入量。在标准条件下，由温度、湿度、供电电源不稳

定和电磁干扰等带来的影响也可以忽略，因此，电流比例标准法测量恒定电流的测量模型可用（4.5）式表示。

$$\Delta I_p = I_p - KI_1 + \delta I_p \quad (4.5)$$

式中：

$\Delta I_p$ ——被校交流电子负载恒定电流设定值误差，A；

$I_p$ ——被校交流电子负载恒定电流设定值，A；

$K$ ——电流传感器分流比的标称值，A/A；

$I_1$ ——交流电流标准值，A；

$\delta I_p$ ——被校交流电子负载恒定电流设定值分辨力，A。

因各输入量互不相关，则其测量不确定度传播律可用（4.6）式表示。

$$u_c^2(\Delta I_p) = c_1^2 u^2(I_p) + c_2^2 u^2(K) + c_3^2 u^2(I_1) + c_4^2 u^2(\delta I_p) \quad (4.6)$$

式中，灵敏系数为：

$$c_1 = 1 \quad c_2 = -I_1 = -0.075 \quad c_3 = -K = -600 \quad c_4 = 1$$

#### 4.3.3 标准不确定度来源

- 1) 被校交流电子负载恒定电流测量重复性引入的标准不确定度  $u_A(I_p)$ 。
- 2) 被校交流电子负载恒定电流示值分辨力引入的标准不确定度  $u(\delta I_p)$ 。
- 3) 电流传感器分流比的最大允许误差引入的标准不确定度  $u(K)$ 。
- 4) 标准交流电流表的最大允许误差引入的标准不确定度  $u(I_1)$ 。

#### 4.3.4 标准不确定度评定

##### 4.3.4.1 被校交流电子负载恒定电流测量重复性引入的标准不确定度 $u_A(I_p)$

连续重复测量10次，得到一系列被校交流电子负载恒定电流的重复性测量数据，见表4.5。按A类评定，用贝塞尔公式计算其实验标准偏差作为被校交流电子负载恒定电流测量重复性引入的标准不确定度。

表 4.5 被校交流电子负载恒定电流测量重复性测量数据

第 $i$ 次测量	1	2	3	4	5
分流比(A/A)	600	600	600	600	600
测量值(A)	0.074863	0.074862	0.074870	0.074875	0.074865
实际值(A)	44.918	44.917	44.922	44.925	44.919
第 $i$ 次测量	6	7	8	9	10
分流比(A/A)	600	600	600	600	600
测量值(A)	0.074860	0.074872	0.074862	0.074868	0.074873
实际值(A)	44.916	44.923	44.917	44.921	44.924

用单次测量值作为校准结果时，单次测量值的实验标准偏差  $s(I_p)$  为：

$$s(I_p) = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^{10} (I_{pi} - \bar{I}_p)^2} = 0.0032 \text{ A}$$

则测量重复性引入的标准不确定度  $u_A(I_p)$  为：

$$u_A(I_p) = s(I_p) = 0.0032 \text{ A}$$

#### 4.3.4.2 被校交流电子负载恒定电流设定值分辨力引入的标准不确定度 $u(\delta I_p)$

被校交流电子负载恒定电流的设定值分辨力为0.005 A，由此引入的标准不确定度按B类评定，服从均匀分布，包含因子  $k = \sqrt{3}$ ，则被校交流电子负载恒定电流设定值分辨力引入的标准不确定度为：

$$u(\delta I_p) = \frac{0.005}{2\sqrt{3}} \text{ A} = 0.0014 \text{ A}$$

#### 4.3.4.3 电流传感器分流比的最大允许误差引入的标准不确定度 $u(K)$

由电流传感器的说明书可知，其分流比600的最大允许误差为 $\pm 0.005\%$ ，按B类评定，服从均匀分布，包含因子  $k = \sqrt{3}$ ，则电流传感器最大允许误差引入的标准不确定度为：

$$u(R_0) = \frac{600 \times 0.005\%}{\sqrt{3}} = 0.017$$

#### 4.3.4.4 标准交流电流表的最大允许误差引入的标准不确定度 $u(I_1)$

由电流传感器的说明书可知，当交流电流评定点为45 A，50 Hz时，电流传感器分流比为600输出端的电流值为0.075 A，使用标准交流电流表的200 mA量程，其最大允许误差为 $\pm (0.025\% \text{RD} + 0.01\% \text{FS})$ ，按B类评定，服从均匀分布，包含因子  $k = \sqrt{3}$ ，则标准交流电流表最大允许误差引入的标准不确定度为：

$$u(V_1) = \frac{0.075 \times 0.025\% + 0.2 \times 0.01\%}{\sqrt{3}} \text{ A} = 0.000023 \text{ A}$$

#### 4.3.5 合成标准不确定度

电流比例法测量恒定电流的标准不确定度分量汇总表见表4.6。

表 4.6 恒定电流标准不确定度分量汇总表

输入量	标准不确定度来源	评定方法	概率分布	k值	标准不确定度	灵敏系数
$u_A(I_p)$	被校交流电子负载恒定电流测量重复性	A	正态	/	0.0032 A	1
$u(\delta I_p)$	被校交流电子负载恒定电流设定值分辨力	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.0014 A	1
$u(K)$	电流传感器分流比标称值最大允许误差	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.017	-0.075
$u(I_1)$	标准交流电流表最大允许误差	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.000023 A	-600

被校交流电子负载恒定电流的分辨力与重复性引入的标准不确定度存在重复，故舍去其中较小者，取其较大者  $u_A(I_p)$ ，又  $u_A(I_p)$ 、 $u(K)$  和  $u(I_1)$  互不相关，则合成标准不确定度  $u_c$  为：

$$u_c = \sqrt{c_1^2 u_A^2(I_p) + c_2^2 u^2(K) + c_3^2 u^2(I_1)} = 0.014 \text{ A}$$

#### 4.3.6 扩展不确定度的确定

取  $k=2$ ，则扩展不确定度  $U$  为：

$$U = k u_c = 2 \times 0.014 \text{ A} = 0.028 \text{ A} \quad (k=2)$$

#### 4.3.7 测量不确定度的最后陈述

用电流比例标准法对被校交流电子负载恒定电流 45 A，50 Hz 进行校准，则其校准结果的测量不确定度为  $U=0.028 \text{ A} (k=2)$ 。

## 5 交流电阻测量不确定度评定

### 5.1 间接测量法

#### 5.1.1 概述

测量条件：环境温度：(20±5) °C，相对湿度：20%~80%；

测量标准：标准交流电压表、标准交流电流表或标准交流功率表；

辅助设备：交流稳压电源；

被测对象：交流电子负载；

测量方法：采用间接测量法，将标准交流电压表测量端与被校交流电子负载输入端并联，将标准交流电流表串联至被校交流电子负载和交流稳压电源的低端回路中，使交流稳压电源输出电压 100 V，50 Hz，被校交流电子负载在恒定电阻模式下加载 10 Ω，50 Hz，记录被校交流电子负载交流电阻示值  $R_x$ 、标准交流电压表的测量值  $V_0$  和标准交流电流表的测量值  $I_0$ 。

#### 5.1.2 测量模型

被校交流电子负载交流电阻示值误差  $\Delta R_x$  为输出量。被校交流电子负载交流电阻示值  $R_x$ 、标准交流电压表的测量值  $V_0$ 、标准交流电流表的测量值  $I_0$  为输入量。考虑到被校交流电子负载恒定电阻分辨力  $\delta R_x$  对测量结果的影响，以及在标准条件下，由温度、湿度、供电电源不稳定和电磁干扰等带来的影响可忽略，间接测量法的测量模型可用 (6.1) 式表示。

$$\Delta R_x = R_x - \frac{V_0}{I_0} + \delta R_x \quad (6.1)$$

式中：

$\Delta R_x$  ——被校交流电子负载交流电阻示值误差，Ω；

$R_x$ ——被校交流电子负载交流电阻示值,  $\Omega$ ;

$V_0$ ——交流电压标准值, V;

$I_0$ ——交流电流标准值, A;

$\delta R_x$ ——被校交流电子负载交流电阻分辨力,  $\Omega$ ;

因各输入量互不相关, 则其测量不确定度传播律可用(6.2)式表示。

$$u_c^2(\Delta I_x) = c^2(R_x) \times u^2(R_x) + c^2(V_0) \times u^2(V_0) + c^2(I_0) \times u^2(I_0) + c^2(\delta R_x) \times u^2(\delta R_x) \quad (6.2)$$

式中, 灵敏系数为:

$$c(R_x) = 1 \quad c(V_0) = -\frac{1}{I_0} = -0.1 \quad c(I_0) = -\left(-\frac{V_0}{I_0^2}\right) = \frac{V_0}{I_0^2} = 1 \quad c(\delta R_x) = 1$$

### 5.1.3 标准不确定度来源

- 1) 交流电阻测量重复性引入的标准不确定度  $u_A(R_x)$ 。
- 2) 被校交流电子负载交流电阻示值分辨力引入的标准不确定度  $u(\delta R_x)$ 。
- 3) 标准交流电压表的最大允许误差引入的标准不确定度  $u(V_0)$ 。
- 4) 标准交流电流表的最大允许误差引入的标准不确定度  $u(I_0)$ 。

### 5.1.4 标准不确定度评定

#### 5.1.4.1 被校交流电子负载交流电阻测量重复性引入的标准不确定度 $u_A(R_x)$

连续重复测量10次, 得到一系列重复性测量数据, 见表5.1。按A类评定, 用贝塞尔公式计算其实验标准偏差作为被校交流电子负载交流电阻测量重复性引入的标准不确定度。

表 5.1 恒定电阻测量重复性测量数据

第 $i$ 次测量	1	2	3	4	5
电阻测量值 ( $\Omega$ )	10.02	9.98	10.00	10.01	10.01
第 $i$ 次测量	6	7	8	9	10
电阻测量值 ( $\Omega$ )	10.02	10.00	10.01	9.99	10.02

用单次测量值作为校准结果时, 单次测量值的实验标准偏差  $s(R_x)$  为:

$$s(R_x) = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^{10} (R_{xi} - \bar{R}_x)^2} = 0.014 \Omega$$

则测量重复性引入的标准不确定度  $u_A(R_x)$  为:

$$u_A(R_x) = s(R_x) = 0.014 \Omega$$

#### 5.1.4.2 被校交流电子负载交流电阻示值分辨力引入的标准不确定度 $u(\delta R_x)$

被校交流电子负载说明书可知交流电阻示值的分辨力为  $0.01 \Omega$ , 由此引入的标准不

确定度按B类评定，服从均匀分布，包含因子  $k = \sqrt{3}$ ，则被校交流电子负载交流电阻示值分辨力引入的标准不确定度为：

$$u(\delta R_x) = \frac{0.01}{2 \times \sqrt{3}} \Omega = 0.0029 \Omega$$

#### 5.1.4.3 标准交流电压表的最大允许误差引入的标准不确定度 $u(V_0)$

由标准交流电压表的说明书可知，被测交流电压100 V时，标准交流电压表的量程为100 V，其最大允许误差为 $\pm (0.05\%RD + 0.05\%FS)$ ，按B类评定，服从均匀分布，包含因子  $k = \sqrt{3}$ ，则标准交流电压表最大允许误差引入的标准不确定度为：

$$u(V_0) = \frac{100 \times 0.05\% + 100 \times 0.05\%}{\sqrt{3}} \text{ V} = 0.058 \text{ V}$$

#### 5.1.4.4 标准交流电流表的最大允许误差引入的标准不确定度 $u(I_0)$

由标准交流电流表的说明书可知，当交流电流评定点为10 A，50 Hz时，标准交流电流表的量程为10 A，其最大允许误差为 $\pm (0.05\%RD + 0.05\%FS)$ ，按B类评定，服从均匀分布，包含因子  $k = \sqrt{3}$ ，则标准交流电流表最大允许误差引入的标准不确定度为：

$$u(I_0) = \frac{10 \times 0.05\% + 10 \times 0.05\%}{\sqrt{3}} \text{ A} = 0.0058 \text{ A}$$

### 5.1.5 合成标准不确定度

恒定电阻标准不确定度分量汇总表见表5.2。

表 5.2 交流电阻标准不确定度分量汇总表

输入量	标准不确定度来源	评定方法	概率分布	k值	标准不确定度	灵敏系数
$u_A(R_p)$	被校交流电子负载交流电阻测量重复性	A	正态	/	0.014 $\Omega$	1
$u(\delta R_p)$	被校交流电子负载交流电阻示值分辨力	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.0029 $\Omega$	1
$u(V_0)$	标准交流电压表最大允许误差	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.058 V	-0.1
$u(I_0)$	标准交流电流表最大允许误差	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.0058 A	1

被校交流电子负载交流电流的分辨力与重复性引入的标准不确定度存在重复，故舍去其中较小者，取其较大者  $u_A(R_x)$ ，又  $u_A(R_x)$ 、 $u(V_0)$  和  $u(I_0)$  互不相关，则合成标准不确定度  $u_c$  为：

$$u_c = \sqrt{c^2(R_x) \times u_A^2(R_x) + c^2(V_0) \times u^2(V_0) + c^2(I_0) \times u^2(I_0)} = 0.016 \Omega$$

#### 5.1.6 扩展不确定度的确定

取  $k = 2$ ，则扩展不确定度  $U$  为：

$$U = k u_c = 2 \times 0.016 \Omega = 0.032 \Omega \quad (k=2)$$

### 5.1.7 测量不确定度的最后陈述

用标准表法对被校交流电子负载交流电阻 $10\Omega$ ，50 Hz进行校准，则其校准结果的测量不确定度为 $U=0.032\ \Omega$  ( $k=2$ )。

## 6 恒定电阻测量不确定度评定

### 6.1 间接测量法

#### 6.1.1 概述

测量条件：环境温度： $(20\pm 5)\ ^\circ\text{C}$ ，相对湿度：20%~80%；

测量标准：标准交流电压表、标准交流电流表或标准交流功率表；

辅助设备：交流稳压电源；

被测对象：交流电子负载；

测量方法：采用间接测量法，将标准交流电压表测量端与被校交流电子负载输入端并联，将标准交流电流表串联至被校交流电子负载和交流稳压电源的低端回路中，使交流稳压电源输出电压220 V，50 Hz，被校交流电子负载在恒定电阻模式下加载 $100\ \Omega$ ，50 Hz，记录被校交流电子负载恒定电阻设定值 $R_p$ 、标准交流电压表的测量值 $V_0$ 和标准交流电流表的测量值 $I_0$ 。

#### 6.1.2 测量模型

被校交流电子负载恒定电阻设定值误差 $\Delta R_p$ 为输出量。被校交流电子负载恒定电阻设定值 $R_p$ 、标准交流电压表的测量值 $V_0$ 、标准交流电流表的测量值 $I_0$ 为输入量。考虑到被校交流电子负载恒定电阻分辨力 $\delta R_p$ 对测量结果的影响，以及在标准条件下，由温度、湿度、供电电源不稳定和电磁干扰等带来的影响可忽略，间接测量法的测量模型可用(6.1)式表示。

$$\Delta R_p = R_p - \frac{V_0}{I_0} + \delta R_p \quad (6.1)$$

式中：

$\Delta R_p$ ——被校交流电子负载恒定电阻设定值误差， $\Omega$ ；

$R_p$ ——被校交流电子负载恒定电阻设定值， $\Omega$ ；

$V_0$ ——交流电压标准值，V；

$I_0$ ——交流电流标准值，A；

$\delta R_p$ ——被校交流电子负载恒定电阻分辨力， $\Omega$ ；

因各输入量互不相关，则其测量不确定度传播律可用(6.2)式表示。

$$u_c^2(\Delta R_p) = c^2(R_p) \times u^2(R_p) + c^2(V_0) \times u^2(V_0) + c^2(I_0) \times u^2(I_0) + c^2(\delta R_p) \times u^2(\delta R_p) \quad (6.2)$$

式中，灵敏系数为：

$$c(R_p) = 1 \quad c(V_0) = -\frac{1}{I_0} = -0.4545 \quad c(I_0) = -\left(-\frac{V_0}{I_0^2}\right) = \frac{V_0}{I_0^2} = 45.45 \quad c(\delta R_p) = 1$$

### 6.1.3 标准不确定度来源

- 1) 恒定电阻测量重复性引入的标准不确定度  $u_A(R_p)$ 。
- 2) 被校交流电子负载恒定电阻设定值分辨力引入的标准不确定度  $u(\delta R_p)$ 。
- 3) 标准交流电压表的最大允许误差引入的标准不确定度  $u(V_0)$ 。
- 4) 标准交流电流表的最大允许误差引入的标准不确定度  $u(I_0)$ 。

### 6.1.4 标准不确定度评定

#### 6.1.4.1 被校交流电子负载恒定电阻测量重复性引入的标准不确定度 $u_A(R_p)$

用标准交流电压表和标准交流电流表连续重复测量10次，得到一系列重复性测量数据，见表6.1。按A类评定，用贝塞尔公式计算其实验标准偏差作为被校交流电子负载恒定电阻测量重复性引入的标准不确定度。

表 6.1 恒定电阻测量重复性测量数据

第 $i$ 次测量	1	2	3	4	5
电压测量值 (V)	220.08	220.10	219.97	220.09	220.13
电流测量值 (A)	2.1956	2.1964	2.1953	2.1962	2.1968
电阻测量值 ( $\Omega$ )	100.237	100.209	100.200	100.214	100.205
第 $i$ 次测量	6	7	8	9	10
电压测量值 (V)	220.10	219.96	220.06	220.03	220.09
电流测量值 (A)	2.1962	2.1947	2.1955	2.1957	2.1959
电阻测量值 ( $\Omega$ )	100.219	100.223	100.232	100.210	100.228

用单次测量值作为校准结果时，单次测量值的实验标准偏差  $s(R_p)$  为：

$$s(R_p) = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^{10} (R_{pi} - \bar{R}_p)^2} = 0.012 \Omega$$

则测量重复性引入的标准不确定度  $u_A(R_p)$  为：

$$u_A(R_p) = s(R_p) = 0.012 \Omega$$

#### 6.1.4.2 被校交流电子负载恒定电阻设定值分辨力引入的标准不确定度 $u(\delta R_p)$

被校交流电子负载说明书可知恒定电阻设定值的分辨力为  $50 \mu\text{S}$ ，即设定值分辨力的区间半宽度为  $\frac{100 \times 50}{1000000 \times 2} \Omega$ ，由此引入的标准不确定度按B类评定，服从均匀分布，包含因子  $k = \sqrt{3}$ ，则被校交流电子负载恒定电阻设定值分辨力引入的标准不确定度为：

$$u(\delta R_p) = \frac{100 \times 50}{1000000 \times 2 \times \sqrt{3}} \Omega = 0.0015 \Omega$$

#### 6.1.4.3 标准交流电压表的最大允许误差引入的标准不确定度 $u(V_0)$

由标准交流电压表的说明书可知，被测交流电压220 V时，标准交流电压表的量程为300 V，其最大允许误差为 $\pm(0.05\%RD + 0.05\%FS)$ ，按B类评定，服从均匀分布，包含因子  $k = \sqrt{3}$ ，则标准交流电压表最大允许误差引入的标准不确定度为：

$$u(V_0) = \frac{220 \times 0.05\% + 300 \times 0.05\%}{\sqrt{3}} \text{ V} = 0.15 \text{ V}$$

#### 6.1.4.4 标准交流电流表的最大允许误差引入的标准不确定度 $u(I_0)$

由标准交流电流表的说明书可知，当交流电流评定点为2.2 A，50 Hz时，标准交流电流表的量程为10 A，其最大允许误差为 $\pm(0.05\%RD + 0.05\%FS)$ ，按B类评定，服从均匀分布，包含因子  $k = \sqrt{3}$ ，则标准交流电流表最大允许误差引入的标准不确定度为：

$$u(I_0) = \frac{2.2 \times 0.05\% + 10 \times 0.05\%}{\sqrt{3}} \text{ A} = 0.0035 \text{ A}$$

#### 6.1.5 合成标准不确定度

恒定电阻标准不确定度分量汇总表见表6.2。

表 6.2 恒定电阻标准不确定度分量汇总表

输入量	标准不确定度来源	评定方法	概率分布	k值	标准不确定度	灵敏系数
$u_A(R_p)$	被校交流电子负载恒定电阻测量重复性	A	正态	/	0.012 $\Omega$	1
$u(\delta R_p)$	被校交流电子负载恒定电阻设定值分辨力	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.0015 $\Omega$	1
$u(V_0)$	标准交流电压表最大允许误差	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.15 V	-0.4545
$u(I_0)$	标准交流电流表最大允许误差	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.0035 A	45.45

被校交流电子负载交流电流的分辨力与重复性引入的标准不确定度存在重复，故舍去其中较小者，取其较大者  $u_A(R_p)$ ，又  $u_A(R_p)$ 、 $u(V_0)$  和  $u(I_0)$  互不相关，则合成标准不确定度  $u_c$  为：

$$u_c = \sqrt{c^2(R_p) \times u_A^2(R_p) + c^2(V_0) \times u^2(V_0) + c^2(I_0) \times u^2(I_0)} = 0.175 \Omega$$

#### 6.1.6 扩展不确定度的确定

取  $k = 2$ ，则扩展不确定度  $U$  为：

$$U = k u_c = 2 \times 0.175 \Omega = 0.35 \Omega \quad (k=2)$$

#### 6.1.7 测量不确定度的最后陈述

用标准表法对被校交流电子负载恒定电阻100  $\Omega$ ，50 Hz进行校准，则其校准结果的测量不确定度为  $U=0.35 \Omega (k=2)$ 。

## 7 交流功率测量不确定度评定

### 7.1 概述

测量条件：环境温度：(20±5) °C，相对湿度：20%~80%；

测量标准：标准交流功率表；辅助设备：交流稳压电源；

被测对象：交流电子负载；

测量方法：采用标准表法，即比较测量法，用被校交流电子负载的恒定功率模式给交流稳压电源加载 1000W，交流电子负载的功率因数设为 1，交流稳压电源的输出电压为 220V (50 Hz)，记录被校交流电子负载交流功率示值  $P_x$  和标准交流功率表测量值  $P_0$ 。

### 7.2 测量模型

被校交流电子负载交流功率示值误差  $\Delta P$  为输出量。被校交流电子负载交流功率示值  $P_x$ 、标准交流功率表的测量值  $P_0$  为输入量。考虑到被校交流电子负载交流功率分辨力  $\delta P_x$  对测量结果的影响，以及在标准条件下，由温度、湿度、供电电源不稳定和电磁干扰等带来的影响可忽略，标准表法的测量模型可用 (7.1) 式表示。

$$\Delta P = P_x - P_0 + \delta P_x \quad (7.1)$$

式中：

$\Delta P$ ——被校交流电子负载交流功率示值误差，W；

$P_x$ ——被校交流电子负载交流功率示值，W；

$P_0$ ——交流功率标准值，W；

$\delta P_x$ ——被校交流电子负载交流功率分辨力，W。

因各输入量互不相关，则其测量不确定度传播律可用 (7.2) 式表示。

$$u_c^2(\Delta P) = c^2(P_x) \times u^2(P_x) + c^2(P_0) \times u^2(P_0) + c^2(\delta P_x) \times u^2(\delta P_x) \quad (7.2)$$

式中，灵敏系数为：

$$c(P_x) = 1 \quad c(P_0) = -1 \quad c(\delta P_x) = 1$$

### 7.3 标准不确定度来源

- 1) 被校交流电子负载交流功率测量重复性引入的标准不确定度  $u_A(P_x)$ 。
- 2) 被校交流电子负载交流功率示值分辨力引入的标准不确定度  $u(\delta P_x)$ 。
- 3) 标准交流功率表的交流功率最大允许误差引入的标准不确定度  $u(P_0)$ 。

### 7.4 标准不确定度评定

#### 7.4.1 被校交流电子负载交流功率测量重复性引入的标准不确定度 $u_A(P_x)$

连续重复测量 10 次，得到一系列被校交流电子负载交流功率重复性测量数据，见表 7.1。按 A 类评定，用贝塞尔公式计算其实验标准偏差作为被校交流电子负载交流功率测量重复性引入的标准不确定度。

表 7.1 被校交流电子负载交流功率测量重复性测量数据

第 $i$ 次测量	1	2	3	4	5
测量值 (W)	1000.24	1000.43	1000.34	1000.41	1000.28
第 $i$ 次测量	6	7	8	9	10
测量值 (W)	1000.32	1000.37	1000.35	1000.26	1000.29

用单次测量值作为校准结果时，单次测量值的实验标准偏差  $s(P_x)$  为：

$$s(P_x) = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^{10} (P_{xi} - \bar{P}_x)^2} = 0.063 \text{ W}$$

则测量重复性引入的标准不确定度  $u_A(P_x)$  为：

$$u_A(P_x) = s(P_x) = 0.063 \text{ W}$$

#### 7.4.2 被校交流电子负载交流功率示值分辨力引入的标准不确定度 $u(\delta P_x)$

被校交流电子负载交流功率的示值分辨力为 0.01 W，由此引入的标准不确定度按 B 类评定，服从均匀分布，包含因子  $k = \sqrt{3}$ ，则被校交流电子负载交流功率示值分辨力引入的标准不确定度为：

$$u(\delta P_x) = \frac{0.01}{2\sqrt{3}} \text{ W} = 0.0029 \text{ W}$$

#### 7.4.3 标准交流功率表的交流功率最大允许误差引入的标准不确定度 $u(P_0)$

由标准交流功率表的说明书可知，当交流功率评定点为 1000 W 时，标准交流功率表的量程为 300 V/10 A/3 kW，其最大允许误差为  $\pm(0.05\%RD + 0.05\%FS)$ ，按 B 类评定，服从均匀分布，包含因子  $k = \sqrt{3}$ ，则标准交流功率表最大允许误差引入的标准不确定度为：

$$u(P_0) = \frac{1000 \times 0.05\% + 3000 \times 0.05\%}{\sqrt{3}} \text{ W} = 1.15 \text{ W}$$

### 7.5 合成标准不确定度

交流功率标准不确定度分量汇总表见表 7.2。

表 7.2 交流功率标准不确定度分量汇总表

输入量	标准不确定度来源	评定方法	概率分布	$k$ 值	标准不确定度	灵敏系数
$u_A(P_x)$	被校交流电子负载交流功率测量重复性	A	正态	/	0.063 W	1
$u(\delta P_x)$	被校交流电子负载交流功率分辨力	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.0029 W	1
$u(P_0)$	标准交流功率表最大允许误差	B	均匀	$\sqrt{3}$	1.15 W	-1

被校交流电子负载交流功率的分辨力与重复性引入的标准不确定度存在重复，故舍去其中较小者，取其较大者  $u_A(P_x)$ ，又  $u_A(P_x)$  和  $u(P_0)$  互不相关，则合成标准不确定度  $u_c$  为：

$$u_c = \sqrt{u_A^2(P_x) + u^2(P_0)} = 1.16 \text{ W}$$

## 7.6 扩展不确定度的确定

取  $k=2$ ，则扩展不确定度  $U$  为：

$$U = ku_c = 2 \times 1.16 \text{ W} \approx 2.3 \text{ W} \quad (k=2)$$

## 7.7 测量不确定度的最后陈述

用比较测量法对被校交流电子负载交流功率 1000 W 进行校准，则其校准结果的测量不确定度为  $U=2.3 \text{ W} (k=2)$ 。

# 8 恒定功率测量不确定度评定

## 8.1 概述

测量条件：环境温度：(20±5) °C，相对湿度：20%~80%；

测量标准：标准交流功率表；辅助设备：交流稳压电源；

被测对象：交流电子负载；

测量方法：采用标准表法，即比较测量法，用被校交流电子负载的恒定功率模式给交流稳压电源加载 1000 W，交流电子负载的功率因数设为 1，交流稳压电源的输出电压为 220 V，50 Hz，记录被校交流电子负载恒定功率设定值  $P_p$  和标准交流功率表测量值  $P_0$ 。

## 8.2 测量模型

被校交流电子负载恒定功率设定值误差  $\Delta P_p$  为输出量。被校交流电子负载恒定功率设定值  $P_p$ 、标准交流功率表的测量值  $P_0$  为输入量。考虑到被校交流电子负载恒定功率设定值分辨力  $\delta P_p$  对测量结果的影响，以及在标准条件下，由温度、湿度、供电电源不稳定和电磁干扰等带来的影响可忽略，标准表法的测量模型可用 (8.1) 式表示。

$$\Delta P_p = P_p - P_0 - \delta P_p \quad (8.1)$$

式中：

$\Delta P_p$ ——被校交流电子负载恒定功率设定值误差，W；

$P_p$ ——被校交流电子负载恒定功率设定值，W；

$P_0$ ——交流功率标准值，W；

$\delta P_p$ ——被校交流电子负载恒定功率设定值分辨力，W。

因各输入量互不相关，则其测量不确定度传播律可用 (8.2) 式表示。

$$u_c^2(\Delta P_p) = c^2(P_p) \times u^2(P_p) + c^2(P_0) \times u^2(P_0) + c^2(\delta P_p) \times u^2(\delta P_p) \quad (8.2)$$

式中，灵敏系数为：

$$c(P_x)=1 \quad c(P_0)=-1 \quad c(\delta P_x)=1$$

### 8.3 标准不确定度来源

- 1) 恒定功率测量重复性引入的标准不确定度  $u_A(P_0)$ 。
- 2) 被校交流电子负载恒定功率设定值分辨力引入的标准不确定度  $u(\delta P_p)$ 。
- 3) 标准交流功率表的交流功率最大允许误差引入的标准不确定度  $u(P_0)$ 。

### 8.4 标准不确定度评定

#### 8.4.1 被校交流电子负载恒定功率测量重复性引入的标准不确定度 $u_A(P_p)$

用标准交流功率表连续重复测量10次，得到一系列重复性测量数据，见表8.1。按A类评定，用贝塞尔公式计算其实验标准偏差作为被校交流电子负载恒定功率测量重复性引入的标准不确定度。

表 8.1 恒定功率测量重复性测量数据

第 $i$ 次测量	1	2	3	4	5
测量值 (W)	1001.90	1001.69	1002.36	1001.69	1000.18
第 $i$ 次测量	6	7	8	9	10
测量值 (W)	1002.28	1002.71	1001.37	1001.35	1001.51

用单次测量值作为校准结果时，单次测量值的实验标准偏差  $s(P_p)$  为：

$$s(P_p) = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^{10} (P_{pi} - \bar{P}_p)^2} = 0.697 \text{ W}$$

则测量重复性引入的标准不确定度  $u_A(P_p)$  为：

$$u_A(P_p) = s(P_p) = 0.697 \text{ W}$$

#### 8.4.2 被校交流电子负载恒定功率设定值分辨力引入的标准不确定度 $u(\delta P_p)$

被校交流电子负载恒定功率设定值的分辨力为1.125 W，由此引入的标准不确定度按B类评定，服从均匀分布，包含因子  $k = \sqrt{3}$ ，则被校交流电子负载恒定功率设定值分辨力引入的标准不确定度为：

$$u(\delta P_p) = \frac{1.125}{2\sqrt{3}} \text{ W} = 0.325 \text{ W}$$

#### 8.4.3 标准交流功率表的交流功率最大允许误差引入的标准不确定度 $u(P_0)$

由标准交流功率表的说明书可知，当交流功率评定点为1000W时，标准交流功率表的量程为300 V/10 A/3 kW，其最大允许误差为  $\pm (0.05\%RD + 0.05\%FS)$ ，按B类评

定，服从均匀分布，包含因子  $k = \sqrt{3}$ ，则标准交流功率表最大允许误差引入的标准不确定度为：

$$u(P_0) = \frac{1000 \times 0.05\% + 3000 \times 0.05\%}{\sqrt{3}} \text{ W} = 1.15 \text{ W}$$

## 8.5 合成标准不确定度

恒定功率标准不确定度分量汇总表见表8.2。

表 8.2 恒定功率标准不确定度分量汇总表

输入量	标准不确定度来源	评定方法	概率分布	k值	标准不确定度	灵敏系数
$u(P_0)$	标准交流功率表最大允许误差	B	均匀	$\sqrt{3}$	1.15 W	-1
$u(\delta P_p)$	被校交流电子负载恒定功率设定值分辨力	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.325 W	1
$u_A(P_0)$	被校交流电子负载恒定功率测量重复性	A	正态	/	0.697 W	1

被校交流电子负载恒定功率设定值的分辨力与重复性引入的标准不确定度存在重复，故舍去其中较小者，取其较大者  $u_A(P_0)$ ，又  $u_A(P_0)$  和  $u(P_0)$  互不相关，则合成标准不确定度  $u_c$  为：

$$u_c = \sqrt{u_A^2(P_0) + u^2(P_0)} = 1.35 \text{ W}$$

## 8.6 扩展不确定度的确定

取  $k = 2$ ，则扩展不确定度  $U$  为：

$$U = ku_c = 2 \times 1.35 \text{ W} \approx 2.7 \text{ W} \quad (k=2)$$

## 8.7 测量不确定度的最后陈述

用比较测量法对被校交流电子负载交流功率 1000 W，50 Hz 进行校准，则其校准结果的测量不确定度为  $U=2.3 \text{ W} (k=2)$ 。

# 9 功率因数测量不确定度评定

## 9.1 概述

测量条件：环境温度：(20±5) °C，相对湿度：20%～80%；

测量标准：标准交流功率表；辅助设备：交流稳压电源；

被测对象：交流电子负载；

测量方法：采用标准表法，即比较测量法，被校交流电子负载设为恒定功率工作模式，恒定功率设为额定功率的50%，功率因数设为0.5，交流稳压电源的输出电压为 220 V(50 Hz)，记录被校交流电子负载功率因数示值  $\lambda_x$  和标准交流功率表的测量值  $\lambda_0$ 。

## 9.2 测量模型

被校交流电子负载功率因数设定值误差  $\Delta\lambda$  为输出量。被校交流电子负载功率因数设定值  $\lambda_x$ 、标准交流功率表的测量值  $\lambda_0$  为输入量。考虑到被校交流电子负载功率因数

设定值分辨力  $\delta\lambda_x$  对测量结果的影响，以及在标准条件下，由温度、湿度、供电电源不稳定和电磁干扰等带来的影响可忽略，标准表法的测量模型可用（9.1）式表示。

$$\Delta\lambda = \lambda_x - \lambda_0 + \delta\lambda_x \quad (9.1)$$

式中：

$\Delta\lambda$ ——被校交流电子负载功率因数设定值误差；

$\lambda_x$ ——被校交流电子负载功率因数设定值；

$\lambda_0$ ——功率因数标准值；

$\delta\lambda_x$ ——被校交流电子负载功率因数设定值分辨力。

因各输入量互不相关，则其测量不确定度传播律可用（9.2）式表示。

$$u_c^2(\Delta\lambda) = c^2(\lambda_x) \times u^2(\lambda_x) + c^2(\lambda_0) \times u^2(\lambda_0) + c^2(\delta\lambda_x) \times u^2(\delta\lambda_x) \quad (9.2)$$

式中，灵敏系数为：

$$c(\lambda_x) = 1 \quad c(\lambda_0) = -1 \quad c(\delta\lambda_x) = 1$$

### 9.3 标准不确定度来源

- 1) 被校交流电子负载功率因数测量重复性引入的标准不确定度  $u_A(\lambda_x)$ 。
- 2) 被校交流电子负载功率因数设定值分辨力引入的标准不确定度  $u(\delta\lambda_x)$ 。
- 3) 标准交流功率表功率因数最大允许误差引入的标准不确定度  $u(\lambda_0)$ 。

### 9.4 标准不确定度评定

#### 9.4.1 被校交流电子负载功率因数测量重复性引入的标准不确定度 $u_A(\lambda_x)$

用标准交流功率表连续重复测量10次，得到一系列功率因数的重复性测量数据，见表9.1。按A类评定，用贝塞尔公式计算其实验标准偏差作为被校交流电子负载功率因数测量重复性引入的标准不确定度。

表 9.1 功率因数重复性测量数据

第 $i$ 次测量	1	2	3	4	5
测量值	0.4998	0.4997	0.4998	0.4999	0.4998
第 $i$ 次测量	6	7	8	9	10
测量值	0.4996	0.4999	0.4997	0.4998	0.4999

用单次测量值作为校准结果时，单次测量值的实验标准偏差  $s(\lambda_x)$  为：

$$s(\lambda_x) = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^{10} (\lambda_{xi} - \bar{\lambda}_x)^2} = 0.0001$$

则测量重复性引入的标准不确定度  $u_A(\lambda_x)$  为：

$$u_A(\lambda_x) = s(\lambda_x) = 0.0001$$

#### 9.4.2 被校交流电子负载功率因数设定值分辨力引入的标准不确定度 $u_1(\lambda_x)$

被校交流电子负载功率因数设定值分辨力为0.0001。由此引入的标准不确定度按B类评定，服从均匀分布，包含因子  $k = \sqrt{3}$ ，则被校交流电子负载功率因数设定值分辨力引入的标准不确定度：

$$u_1(\lambda_x) = \frac{0.0001}{2\sqrt{3}} = 0.000029$$

#### 9.4.3 标准交流功率表功率因数最大允许误差引入的标准不确定度 $u(\lambda_0)$

由标准交流功率表说明书中可知，功率因数的最大允许误差为  $\pm(0.0002\lambda+1\text{digit})$ ，按B类评定，服从均匀分布，包含因子  $k = \sqrt{3}$ ，则标准交流功率表最大允许误差引入的标准不确定度：

$$u(\lambda_0) = \frac{0.5 \times 0.0002 + 0.0001}{\sqrt{3}} = 0.00012$$

#### 9.5 合成标准不确定度

功率因数标准不确定度分量汇总表见表9.2。

表 9.2 功率因数标准不确定度分量汇总表

输入量	标准不确定度来源	评定方法	概率分布	k值	标准不确定度	灵敏系数
$u_A(\lambda_x)$	功率因数测量重复性	A	正态	/	0.0001	1
$u(\delta\lambda_x)$	被校交流电子负载功率因数设定值分辨力	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.000029	1
$u(\lambda_0)$	标准交流功率表功率因数最大允许误差	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.00012	-1

被校交流电子负载功率因数的分辨力与重复性引入的标准不确定度存在重复，故舍去其中较小者，取其较大者  $u_A(\lambda_x)$ ，又  $u_A(\lambda_x)$  和  $u(\lambda_0)$  互不相关，则合成标准不确定度  $u_c$  为：

$$u_c = \sqrt{u_A^2(\lambda_x) + u^2(\lambda_0)} = 0.00015$$

#### 9.6 扩展不确定度的确定

取  $k = 2$ ，则扩展不确定度  $U$  为：

$$U = ku_c = 2 \times 0.00015 = 0.0003 \quad (k=2)$$

#### 9.7 测量不确定度的最后陈述

用比较测量法对被校交流电子负载功率因数0.5进行校准，则其校准结果的测量不确定度为  $U=0.0003$  ( $k=2$ )。

## 10 结论

上述评定测量不确定度均小于交流电子负载各项参数最大允许误差的三分之一，因此分析结果表明《交流电子负载校准规范》中给出的校准方法正确可行，主要不确定度的来源明确，对测量标准的要求符合实际，合理可行，实验验证所用标准设备满足校准规范中对整个校准系统不确定度的要求。