



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) XXXX—XXXX

# 固态微波功率器件直流参数测试仪 校准规范

Calibration Specification of DC-parameter Tester for  
Solid-state Microwave Power Device  
(报批稿)

XXXX-XX-XX发布

XXXX-XX-XX实施

# 中华人民共和国工业和信息化部发布

# 固态微波功率器件直流参数 测试仪校准规范

Calibration Specification of DC-parameter  
Tester for Solid-state Microwave Power  
Device

JJF(电子)××××—××××

归口单位：中国电子技术标准化研究院

主要起草单位：中国电子技术标准化研究院

参加起草单位：深圳赛西信息技术有限公司  
北京振兴计量测试研究所

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：

邢荣欣（中国电子技术标准化研究院）  
褚 楚（中国电子技术标准化研究院）

参加起草人：

吴永明（深圳赛西信息技术有限公司）  
李宗昆（北京振兴计量测试研究所）  
李道政（中国电子技术标准化研究院）

# 目录

引言.....	VI
1 范围.....	1
2 概述.....	1
3 计量特性.....	1
3.1 栅极双极性电压源.....	1
3.2 漏极电压源.....	1
3.3 漏极电流源.....	1
3.4 漏流测量单元.....	1
3.5 漏极电流测量单元.....	1
4 校准条件.....	1
4.1 环境条件.....	1
4.2 测量标准.....	1
5 校准项目和校准方法.....	2
5.1 外观及工作正常性检查.....	2
5.2 校准方法.....	3
5.2.1 栅极双极性电压源.....	3
5.2.2 漏极电压源.....	3
5.2.3 漏极电流源.....	4
5.2.4 漏流测量单元.....	4
6 校准结果表达.....	5
7 复校时间间隔.....	6
附录 A 原始记录格式.....	7
附录 B 校准证书内页格式.....	9
附录 C 测量不确定度评定示例.....	11

## 引言

本规范依据 JJF1071-2010《国家计量校准规范编写规则》和 JJF1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》编写。

本规范为首次发布。

# 固态微波功率器件直流参数测试仪校准规范

## 1 范围

本规范适用于栅极电压 $\pm(0.1\sim 20)\text{V}$ 、漏极电压 $\leq 3000\text{V}$ 、漏极电流 $\leq 30\text{A}$ 、漏电流 $(100\text{nA}\sim 1\text{mA})$ 的固态微波功率器件直流参数测试仪的校准，其他测量范围的固态微波功率器件直流参数测试仪可参照本规范校准。

## 2 概述

固态微波功率器件直流参数测试仪，由栅极双极性电压源、漏极电压源、漏极电流源和漏电流测量单元组成，可测量的直流参数包括栅源极夹断电压  $V_{\text{GSoff}}$ 、栅源极漏电流  $I_{\text{GSS}}$ 、漏极饱和电流  $I_{\text{DSS}}$ 、跨导  $g_{\text{m}}$  等参数。

## 3 计量特性

### 3.1 栅极双极性电压源

电压范围： $\pm(0.1\sim 20)\text{V}$ ；

最大允许误差： $\pm 0.5\%$ 。

### 3.2 漏极电压源

电压范围： $(0.5\sim 3000)\text{V}$ ；

最大允许误差： $\pm(0.5\%\sim 2\%)$ 。

### 3.3 漏极电流源

直流电源： $(0.1\sim 10)\text{A}$ ；

最大允许误差： $\pm 0.5\%$ 。

脉冲电源： $(10\sim 30)\text{A}$ ，脉宽： $300\mu\text{s}$

最大允许误差： $\pm 1\%$ 。

### 3.4 漏电流测量单元

电流范围： $100\text{nA}\sim 1\text{mA}$ ；

最大允许误差： $\pm(1\%\text{读数}+10\text{nA})$ 。

### 3.5 漏极电流测量单元

直流电流： $(0.1\sim 10)\text{A}$ ；

最大允许误差： $\pm 0.5\%$ 。

脉冲电流： $(10\sim 30)\text{A}$ ，脉宽： $300\mu\text{s}$

最大允许误差： $\pm 1\%$ 。

## 4 校准条件

### 4.1 环境条件

4.1.1 环境温度： $20^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$ ；

4.1.2 相对湿度： $\leq 75\%$ ；

4.1.3 电源要求： $(220\pm 22)\text{V}$ 、 $(50\pm 1)\text{Hz}$ ；

4.1.4 周围无影响仪器正常工作的电磁干扰和机械振动；

4.1.5 保证校准过程中对静电有严格的防护措施，以免损害仪器和被校二极管、双极型晶体管、场效应晶体管、绝缘栅双极晶体管等半导体器件。

### 4.2 校准用设备

#### 4.2.1 数字多用表

直流电压测量范围：0.1V~1000V；最大允许误差： $\pm(4.3 \times 10^{-6} \sim 1.4 \times 10^{-5})$

#### 4.2.2 直流分压器

输入电压范围：(10~3000)V

分压比： $\geq 5:1$ ；最大允许误差： $\pm 0.5\%$

#### 4.2.3 数字化仪

测量范围： $\pm(0.1V \sim 10V)$ ，最大允许误差： $\pm(0.2\% \sim 1\%)$ ；

带宽： $\geq 100kHz$ ；

采样速率： $\geq 5 \times 10^4 Sa/s$

#### 4.2.4 标准电阻

a) 电阻阻值：0.1 $\Omega$ 、1 $\Omega$ 、10 $\Omega$ 、20 $\Omega$ 、50 $\Omega$ 、100 $\Omega$ 、1k $\Omega$ 、10k $\Omega$ 、1M $\Omega$ ；

最大允许误差： $\pm 0.1\%$ ；

b) 电感量，在 300 $\mu s$  脉冲宽度时电阻的时间常数小于 10 $\mu s$ ；

标准电阻选用参考值如表 1 所示。

表 1 标准电阻选用参考值

被校脉冲电流幅度范围	电阻值
$\pm(100nA \sim 0.1mA)$	1M $\Omega$ (0.5W)
$\pm(>0.1mA \sim 0.3mA)$	1k $\Omega$ 、10k $\Omega$ (1W)
$\pm(>0.3mA \sim 30mA)$	10 $\Omega$ 、100 $\Omega$ (1W)
$\pm(>30mA \sim 50mA)$	10 $\Omega$ 、50 $\Omega$ (1W)
$\pm(>50mA \sim 200mA)$	10 $\Omega$ 、20 $\Omega$ (1W)
$\pm(>200mA \sim 30A)$	1 $\Omega$ 、0.1 $\Omega$ (20W)

## 5 校准项目和校准方法

固态微波功率器件直流参数测试仪校准项目见表 2。

表 2 校准项目一览表

序号	校准项目名称	首次校准	后续校准	使用中校准
1	外观及工作正常性检查	+	+	+
2	栅极双极性电压源	+	+	+
3	漏极电压源	+	+	+
4	漏极电流源	+	+	+
5	漏流测量单元	+	+	+
6	漏极电流测量单元	+	+	+

### 5.1 外观及工作正常性检查

5.1.1 被校固态微波功率器件直流参数测试仪的产品名称、制造厂家等均应有明确标记，结构完好，不应有影响正常工作的机械碰伤及接触不良的现象，并记录于附录 A 表 A.1 中；

5.1.2 开启固态微波功率器件直流参数测试仪，并按规定预热。检查被校固态微波功率器件直流参数测试仪是否正常运行，并记录于附录 A 表 A.1 中。



## 5.2 校准方法

### 5.2.1 栅极双极性电压源

a) 将被校测试仪的栅极双极性电压源输出端与数字多用表的输入端相连, 如图 1 所示;

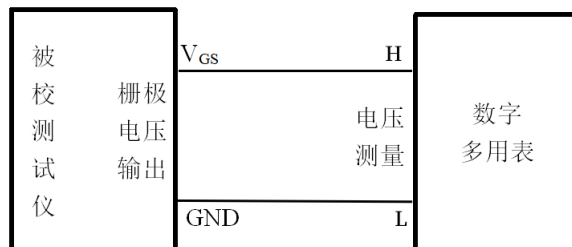


图 1 栅极双极性电压源校准示意图

b) 在被校系统栅极双极性电压源输出范围内选取  $V_{GS}$  校准点, 至少应包含最大值、最小值和中间典型电压值;

c) 数字多用表设置为直流电压测量方式, 量程设置为自动模式;

d) 设置栅极双极性电压源的输出电压值  $V_{GS}$ , 启动电压输出功能;

e) 读取数字多用表的电压测量值  $V_{cal}$ , 并将  $V_{GS}$ 、 $V_{cal}$  记入附录 A 表 A.2 中;

f) 对于其他栅极双极性电压的校准, 按步骤 a)~e) 操作。

### 5.2.2 漏极电压源

a) 对于  $\leq 1000V$  的漏极电压源, 将被校测试仪的漏极电压源输出端与数字多用表的输入端相连, 如图 2 所示; 对于  $> 1000V$  的漏极电压源, 通过直流分压器将被校测试仪的漏极电压源输出端与数字多用表的输入端相连, 如图 3 所示;

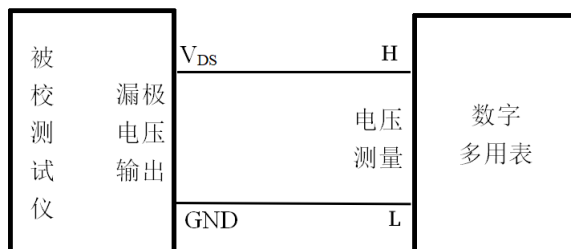


图 2 漏极电压源校准示意图 ( $\leq 1000V$ )

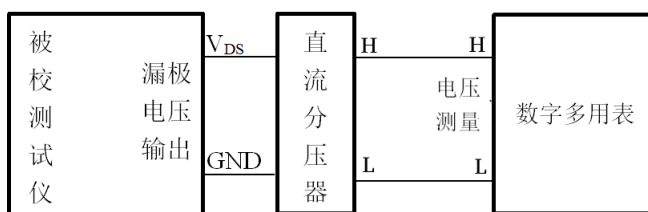


图 3 漏极电压源校准示意图 ( $> 1000V$ )

b) 在被校系统漏极电压源输出范围内选取  $V_{DS}$  校准点, 至少应包含最大值、最小值和中间典型电压值;

c) 数字多用表设置为直流电压测量方式, 量程设置为自动模式;

d) 设置漏极电压源的输出电压值  $V_{DS}$ , 读取数字多用表的电压测量值  $V_M$ , 根据公式 (1), 计算得到源漏电压校准值  $V_{cal}$ , 并将  $V_{DS}$ 、 $V_{cal}$  记入附录 A 表 A.3 中。

$$V_{cal} = V_M \times \eta_V \quad \dots\dots(1)$$

式中：

$V_{cal}$  为漏极电压校准值；

$V_M$  为数字多用表电压显示值；

$\eta_V$  为高压分压器分压比。

e) 对于其他漏极电压源校准点的校准，按步骤 c)~d) 操作。

### 5.2.3 漏极电流源

a) 将被校测试仪的漏极电流源输出端与精密电阻串联，数字多用表/数字化仪的输入端与精密电阻两端相连，如图 4 所示；

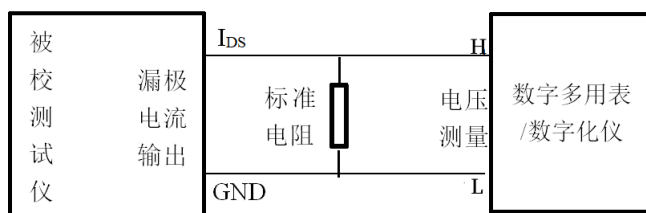


图 4 漏极电流源校准示意图

b) 在被校系统漏极电流源输出范围内选取  $I_{DS}$  校准点，至少应包含最大值、最小值和中间典型电流值；

c) 设置漏极电流源的输出电流值  $I_{DS}$ ，根据  $I_{DS}$  选取标准电阻。电阻的选取原则是，电流和电阻乘积在 0.1V~10V 之间，同时电流不应超过电阻的额定电流值。测量直流漏极电流时，数字多用表设置为直流电压测量方式，量程设置为自动模式；测量脉冲漏极电流时，数字化仪设置为高速采样模式，根据电流电阻乘积选择适合的电压测量量程；

d) 读取数字多用表/数字化仪的电压测量值  $V_M$ ，根据公式 (2)，计算得到漏极电流源输出电流校准值  $I_{cal}$ ，并将  $I_{DS}$ 、 $I_{cal}$  记入附录 A 表 A.4 中。

$$I_{cal} = \frac{V_M}{R} \quad \dots\dots(2)$$

式中：

$I_{cal}$  为漏极电流校准值；

$V_M$  为数字多用表/数字化仪电压显示值；

$R$  为标准电阻阻值。

e) 对于其他漏极电流的校准，按步骤 c) ~d) 操作。

### 5.2.4 漏流测量单元

a) 漏流测量单元为加压测量方式，即采用栅极电压源施加电压，利用电流测量单元进行漏流测量。将被校测试仪的漏流测量单元与标准电阻相连接，电阻两端与数字多用表相连接，如图 5 所示；

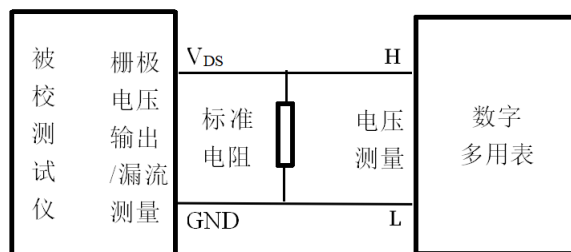


图 5 漏流测量单元校准示意图

b) 在被校系统漏流测量范围内选取  $I_{GSS}$  校准点，至少应包含最大值 1mA、最小值 100nA 和中间典型电流值（如：1 $\mu$ A、10 $\mu$ A、100 $\mu$ A 等）；

c) 被校系统的栅极电压输出固定为 1V，标准电阻选取 10M $\Omega$ 、100k $\Omega$ 、1k $\Omega$  等，分别对应 100nA、10 $\mu$ A、1mA 等；

d) 数字多用表设置为直流电压测量方式，量程设置为自动模式；

e) 启动漏流测量功能，读取被校系统的漏电流测量值  $I_{GSS}$  和数字电压表的电压测量值  $V_M$ ，根据公式 (3) 计算得到漏流校准值  $I_{cal}$ ，并将  $I_{GSS}$ 、 $I_{cal}$  记入附录 A 表 A.5 中。

$$I_{cal} = \frac{V_M}{R} \quad \dots\dots(3)$$

式中：

$I_{cal}$  为漏流校准值；

$V_M$  为数字多用表/数字化仪电压显示值；

$R$  为标准电阻阻值。

f) 对于其他漏流测量值的校准，按步骤 c) ~e) 操作。

### 5.2.5 漏极流测量单元

a) 将被校测试仪的漏极电流源输出端与精密电阻串联，数字多用表/数字化仪的输入端与精密电阻两端相连，如图 4 所示；

b) 被校系统设置为漏极电流测量和输出状态，在被校系统漏极电流测量范围内选取  $I_{DS}$  校准点，至少应包含最大值、最小值和中间典型电流值；

c) 根据 5.2.4 c) 设置选取标准电阻阻值和数字多用表和数字化仪的测量模式；

d) 根据 5.2.4 d) 测量计算  $I_{cal}$ ，读取漏极电流测量单元的电流测量  $I_M$ ，分别记入附录 A 表 A.6 中。

e) 对于其他漏极电流的校准，按步骤 c) ~d) 操作。

## 6 校准结果表达

校准后，出具校准证书。校准证书至少应包含以下信息：

- 标题：“校准证书”；
- 实验室名称和地址；
- 进行校准的地点（如果与实验室的地址不同）；
- 证书的唯一性标识（如编号），每页及总页数的标识；
- 客户的名称和地址；

- f) 被校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和应用有关时, 应说明被校对象的接收日期;
- h) 如果与校准结果的有效性和应用有关时, 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。

## 7 复校时间间隔

复校时间间隔由用户根据使用情况自行确定, 一般推荐为 1 年。由于复校时间间隔的长短是由被校系统的使用情况、使用者、本身质量等诸因素所决定的, 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

## 一、 外观及工作正常性检查

表 A.1 外观及功能检查记录表

外观检查：合格 <input type="checkbox"/> 不合格 <input type="checkbox"/> 工作正常性检查：正常 <input type="checkbox"/> 不正常 <input type="checkbox"/>
---

## 二、 栅极双极性电压源校准

表 A.2 栅极电压输出参数校准记录

输出电压设置值	校准值	测量不确定度 $k=2$

## 三、 漏极电压源校准

表 A.3 漏极电压输出参数校准记录 (1000V 以下分压比为 1: 1)

输出电压设置值	数字表电压读数	分压比	电压校准值	测量不确定度 $k=2$

## 四、 漏极电流源校准

表 A.4 漏极电流输出参数校准记录

输出电流设置值	标准电阻值	电压校准值	电流校准值	测量不确定度 $k=2$

## 五、 漏流测量单元校准

表 A.5 漏流测量参数校准记录

输出电压设置值	标准电阻值	电流测量值	电压校准值	电流校准值 ·	测量不确定度 $k=2$



## 六、漏极电流测量单元校准

表 A.6 漏极电流测量单元校准记录

漏极电流测量值	标准电阻值	电压校准值	电流校准值	测量不确定度 $k=2$

## 附录 B

## 校准证书内页格式

## 一、 外观及工作正常性检查

外观检查：合格 ☐ 不合格 ☐：工作正常性检查：正常 ☐ 不正常 ☐：

## 二、 栅极双极性电压输出参数校准

输出电压设置值	校准值	测量不确定度 $k=2$

## 三、 漏极电压输出参数校准

输出电压设置值 (V) $V_{DS}$	数字表电压读数	分压比	电压校准值	测量不确定度 $k=2$

## 四、 漏极电流输出参数校准

输出电流设置值	标准电阻值	电压校准值	电流校准值	测量不确定度 $k=2$

## 五、 漏流测量参数校准

输出电压设置值	标准电阻值	电流测量值	电压校准值	电流校准值	测量不确定度 $k=2$

## 六、 漏极电流测量单元校准

漏极电流测量值	标准电阻值	电压校准值	电流校准值	测量不确定度 $k=2$



## 附录 C

### 测量不确定度评定示例

#### C.1 栅极双极性电压参数校准

利用数字多用表，直接测量法进行栅极双极性电压输出参数校准。测量不确定度以 5V 为例进行测量不确定度的评定。

##### C.1.1 测量模型

数字表的电压测量值  $V_M$  作为校准值  $V_{cal}$ ，设置值为  $V_{GE}$ ，有测量模型：

$$V_{cal} = V_M \dots\dots\dots (C.1)$$

##### C.1.2 标准不确定度评定

###### C.1.2.1 数字多用表电压测量不准引入的不确定度分量 $u_{B1}$

按 B 类评定。数字多用表在 5V 测量点的最大允许误差为  $\pm 0.01\%$ ，则其区间半宽度为 0.01%，可认为在该区间内服从均匀分布，则包含因子为  $\sqrt{3}$ ，其引入不确定度分量为：

$$u_{B1} = \frac{a_1}{k_1} = 0.006\%$$

###### C.1.2.2 数字多用表读数分辨率引入的不确定度分量 $u_{B2}$

按 B 类评定。数字多用表在 5V 测量点的分辨率为 0.0001V，则其区间半宽度为 0.00005V，可认为在该区间内服从均匀分布，则包含因子为  $\sqrt{3}$ ，其引入不确定度分量为：

$$U_{B2} = \frac{a_1}{k_1} = \frac{0.00005V}{\sqrt{3}} = 0.000029V$$

$$\text{相对不确定度分量为: } u_{B2} = \frac{0.000029V}{5} = 5.8 \times 10^{-6}$$

###### C.1.2.3 测量重复性引入的测量不确定度分量 $u_A$

测量重复性等随机因素引入的不确定度分量按 A 类评定。对被校系统进行重复测

量，测量次数  $n=10$ ，重复性测试数据见下表。根据下式，则  $u_{A1}$  为：

$$u_{A1} = s_n(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

表 C1 栅极双极性电压源校准重复性数据

次别	校准数据 (V)
1	5.0001
2	4.9998
3	5.0000
4	4.9999
5	5.0001
6	4.9998
7	4.9999
8	5.0000
9	5.0001
10	4.9998
$\bar{x}$	4.99995
$S_n(x)/\bar{x}$	0.0026%

### C.1.3 不确定度的合成

不确定度分量一览表见表 C.2。

表 C.2 各不确定度分量一览表

不确定度分量	来源	评定方法	分布	$k$	标准不确定度分量
$u_{B1}$	数字多用表电压测量不准引入	B 类	均匀	$\sqrt{3}$	0.006%
$u_{B2}$	数字多用表读数分辨率引入	B 类	均匀	$\sqrt{3}$	0.000058%
$u_{A1}$	测量重复性等随机因素引入	A 类	/	/	0.0026%

由测量重复性和数字多用表读数分辨率引入的测量不确定度分量，取大者作为不确定度分量参与合成，即  $u_{A1} = 0.0026\%$ 。

不确定度分量  $u_{A1}$  和  $u_{B1}$  独立不相关，则合成标准不确定度可计算得到：

$$u_C = \sqrt{u_{A1}^2 + u_{B1}^2} = 0.007\%$$

### C.1.4 扩展不确定度

取值  $k=2$ ，根据  $U_{\text{rel}} = u_c \times k$ ，则扩展不确定度为：0.014%， $k=2$ 。

## C.2 漏极电流源输出电流参数校准

利用数字多用表/数字化仪、标准电阻进行输出电流参数校准。测量不确定度以 1A 为例进行测量不确定度的评定，此时标准电阻为  $1\Omega$ ，数字多用表电压读数为 1V。

### C.2.1 测量模型

数字表的电压测量值  $V_M$ ，标准电阻阻值为  $R$ ，电流校准值  $I_{\text{cal}}$ ，设置值为  $V_{\text{GE}}$ ，有测量模型：

$$I_{\text{cal}} = \frac{V_M}{R} \quad \dots\dots\dots (C.2)$$

电压测量引入测量不确定度分量的灵敏度系数：

$$k_V = \left| \frac{\partial I_{\text{cal}}}{\partial V_M} \right| = \left| \frac{1}{R} \right| = 1/\Omega$$

电阻阻值不准引入测量不确定度分量的灵敏度系数：

$$k_R = \left| \frac{\partial I_{\text{cal}}}{\partial R} \right| = \left| \frac{V}{R^2} \right| = 1V/\Omega^2$$

### C.2.2 标准不确定度评定

#### C.2.2.1 数字多用表电压测量不准引入的不确定度分量 $u_{B1}$

按 B 类评定。数字多用表在 1V 测量点的最大允许误差为  $\pm 0.01\%$ ，则其区间半宽度为 0.01%，绝对值为 0.0001V。可认为在该区间内服从均匀分布，则包含因子为  $\sqrt{3}$ ，其引入电压测量不确定度分量为：

$$u_{VB1} = \frac{a_1}{k_1} = 0.00006V$$

由电压不准引入的电流测量不确定度分量为：

$$U_{B1} = k_V u_{VB1} = 0.00006A$$

由电压不准引入的电流测量相对不确定度分量为：

$$u_{B1} = \frac{U_{B1}}{1A} \times 100\% = 0.006\%$$

C.2.2.2 标准电阻阻值不准引入的不确定度分量  $u_{B2}$ 

按 B 类评定。1 $\Omega$  标准电阻的最大允许误差为：±0.2%，电阻误差绝对值为±0.002 $\Omega$ ，则其区间半宽度为 0.002 $\Omega$ ，可认为在该区间内服从均匀分布，则包含因子为 $\sqrt{3}$ ，其引入不确定度分量为：

$$U_{RB2} = \frac{a}{k_2} = \frac{0.002\Omega}{\sqrt{3}} = 0.0012\Omega$$

由电阻不准引入的电流测量不确定度分量为：

$$U_{B2} = k_R u_{RB2} = 0.0012A$$

由电阻不准引入的电流测量相对不确定度分量为：

$$u_{B2} = \frac{U_{B2}}{1A} \times 100\% = 0.12\%$$

C.2.2.3 测量重复性引入的测量不确定度分量  $u_A$ 

测量重复性等随机因素引入的不确定度分量按 A 类评定。对被校系统进行重复测量，测量次数  $n=10$ ，重复性测试数据见下表。根据下式，则  $u_{A1}$  为：

$$u_{A1} = s_n(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

表 C3 栅极双极性电压源校准重复性数据

次别	校准数据 (A)
1	1.002
2	1.004
3	1.003
4	1.000
5	1.002
6	0.999
7	0.998
8	1.002
9	1.004
10	1.000
$\bar{x}$	1.0014
$S_n(x)/\bar{x}$	0.21%

## C.2.3 不确定度的合成

不确定度分量一览表见表 C.4。

表 C.4 各不确定度分量一览表

不确定度分量	来源	评定方法	分布	$k$	标准不确定度分量
$u_{B1}$	数字多用表电压测量不准引入	B 类	均匀	$\sqrt{3}$	0.0006%
$u_{B2}$	标准电阻阻值不准引入	B 类	均匀	$\sqrt{3}$	0.12%
$u_{A1}$	测量重复性等随机因素引入	A 类	/	/	0.21%

不确定度分量  $u_{A1}$ 、 $u_{B1}$  和  $u_{B2}$  独立不相关，则合成标准不确定度可计算得到：

$$u_C = \sqrt{u_{A1}^2 + u_{B1}^2 + u_{B2}^2} = 0.24\%$$

## C.2.4 扩展不确定度

取值  $k=2$ ，根据  $U_{rel} = u_c \times k$ ，则扩展不确定度为：0.5%， $k=2$ 。