|  |
| --- |
|  |
| **《数字源表校准规范》** |
| **不确定度评定报告** |
|  |

|  |
| --- |
| 《数字源表校准规范》起草小组2025年8月3日 |

**数字源表校准规范不确定度评定报告**

**一、 概述**

 依据JJF XX-XX《数字源表校准规范》，数字源表的校准项目有直流电压输出、直流电压测量、直流电流输出、直流电流测量、脉冲电流输出、脉冲电流测量、脉冲电流宽度、直流电阻测量等8项，结合试验数据，本报告对各参数的不同测量方法的校准结果进行详细的不确定度分析评定，以验证校准规范内容的可行性和科学性。

**二、被校设备信息**

以KEITHLEY2400型数字源表为例，叙述数字源表测量结果的不确定度评定过程。2400数字源表的技术指标见表1。

表1 2400型数字源表技术指标

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 功能 | 量程 | 分辨率 | 技术指标 |
| 直流电压输出 | 2V | 50μV | 0.02%R+600μV |
| 直流电流输出 | 1mA | 50nA | 0.034%R+200nA |
| 直流电压测量 | 2V | 10μV | 0.012%R+300μV |
| 直流电流测量 | 1mA | 10nA | 0.027%R600nA |
| 电阻测量 | 20kΩ | 0.1Ω | 0.06%R+3Ω |

**三、评定依据**

 JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》；

JJF XX-XX《数字源表校准规范》。

**四、不确定度分析报告**

1 直流电压输出示值误差测量结果的不确定度

1.1 测量模型

按6.2.2.1条款方法，用数字多用表直接校准数字源表直流电压输出示值误差，测量模型可用公式（1）表示。

 （1）

式中：

——被校数字源表直流电压输出示值误差，V；

——被校数字源表直流电压输出设定值，V；

——数字多用表（纳伏表）实测值，V。

各不确定度（包括所有分量）之间不相关，不确定度传播律可用公式（2）表示。

  (2)

式中：

，

——被校数字源表直流电压输出示值误差的合成标准不确定度，V；

——被校数字源表引入的标准不确定度，V；

——数字多用表（纳伏表）引入的标准不确定度，V。

1.2 标准不确定度来源

1.2.1 的来源

a) 数字源表读数分辨力引入的标准不确定度。

1.2.2 的来源

a)测量重复性引入的不确定度。

b)数字多用表引入的标准不确定度。

c)数字多用表读数分辨力引入的标准不确定度。

1.3 标准不确定度的评定

1.3.1 数字源表引入的标准不确定度

数字源表读数分辨力为1×10-4V,采用B类方法进行评定，区间半宽度为a=5×10-5V。按均匀分布计算，数字源表读数分辨力引入的不确定度为：

3×10-5 V

数字源表引入的标准不确定度

==3×10-5 V

1.3.2 测量重复性引入的标准不确定度

测量重复性引入的标准不确定度，采用A类方法评定，通过多次重复测量，经计算得到。多次重复测量结果如表1所示。

表1 数字源表输出直流电压测量结果

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 次 数 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 数字多用表示值（V） | 1.00010 | 1.00008 | 1.00009 | 1.00009 | 1.00011 |
| 次 数 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 数字多用表示值（V） | 1.00010 | 1.00012 | 1.00012 | 1.00011 | 1.00007 |

用贝塞尔公式计算实验标准差，得：

= 1.7×10-5 V

测量重复性引入的标准不确定度为：

 1.7×10-5 V

1.3.3 数字多用表引入的标准不确定度

数字多用表说明书给出，直流电压2V量程测量1V的最大允许误差为±（4.0ppm×Read+0.25ppm×Rang）=±4.5×10-6V，按均匀分布计算，数字多用表引入的标准不确定度为：



1.3.4 数字多用表分辨力引入的标准不确定度

数字多用表读数分辨力为1×10-5V,采用B类方法进行评定，区间半宽度为a=5×10-6V。按均匀分布计算，数字多用表读数分辨力引入的不确定度为：

3×10-6 V

1.3.5 数字多用表引入的标准不确定度

因远小于，所以数字多用表分辨力引入的不确定度不予考虑。数字多用引入的标准不确定度为

=1.8×10-5V

1.4 标准不确定度分量一览表

标准不确定度分量汇总见表2。

表2 直流电压输出校准结果的不确定度分量一览表

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 不确定度分量 | 不确定度来源 | 灵敏系数 | 标准不确定度/V | /V |
|  | 数字源表引入 | 1 | 3×10-5  | 3×10-5  |
|  | 数字多用表引入 | -1 | 1.8×10-5 | 1.8×10-5 |

1.5 合成标准不确定度

各不确定度分量之间互不相关，故合成标准不确定度为：

=3.5×10-5V

1.6 扩展不确定度

取包含因子*k*=2，则扩展不确定度为：

=7×10-5V

2 直流电流输出示值误差测量结果的不确定度

2.1 不确定度来源和测量模型

按6.2.4.1条款方法，用数字多用表直接校准数字源表直流电流输出示值误差，测量模型可用公式（3）表示。

 （3）

式中：

——被校数字源表直流电流输出示值误差，A；

——被校数字源表的直流电流输出设定值，A；

——数字多用表实测值，A。

各不确定度（包括所有分量）之间不相关，不确定度传播律可用公式（4）表示。

  (4)

式中：

，

——被校数字源表直流电流输出示值误差的合成标准不确定度，A；

——被校数字源表引入的标准不确定度，A；

——数字多用表引入的标准不确定度，A。

2.2 标准不确定度来源

2.2.1 的来源

a) 数字源表读数分辨力引入的标准不确定度。

2.2.2 的来源

a)测量重复性引入的不确定度。

b)数字多用表引入的标准不确定度。

c)数字多用表读数分辨力引入的标准不确定度。

2.3 标准不确定度的评定

2.3.1 数字源表引入的标准不确定度

数字源表读数分辨力为1×10-4mA,采用B类方法进行评定，区间半宽度为a=5×10-5mA。按均匀分布计算，数字源表读数分辨力引入的不确定度为：

3×10-5 mA

数字源表引入的标准不确定度

==3×10-5 mA

2.3.2 测量重复性引入的标准不确定度

测量重复性引入的标准不确定度，采用A类方法评定，通过多次重复测量，经计算得到。多次重复测量结果如表3所示。

表3 数字源表输出直流电流测量结果

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 次 数 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 数字多用表示值（mA） | 1.00024 | 1.00018 | 1.00018 | 1.00022 | 1.00024 |
| 次 数 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 数字多用表示值（mA） | 1.00026 | 1.00021 | 1.00018 | 1.00015 | 1.00018 |

用贝塞尔公式计算实验标准差，得：

=3.6×10-5 mA

测量重复性引入的标准不确定度为：

 3.6×10-5 mA

2.3.3数字多用表引入的标准不确定度

数字多用表说明书给出，直流电流2 mA量程测量1mA电流的最大允许误差为±（15ppm×Read+2.0ppm×Rang）=±19×10-6mA，按均匀分布计算，数字多用表引入的标准不确定度为：



2.3.4 数字多用表分辨力引入的标准不确定度

数字多用表读数分辨率为1×10-5mA,采用B类方法进行评定，区间半宽度为a=5×10-6 mA。按均匀分布计算，数字多用表读数分辨力引入的不确定度为：

3×10-6 mA

2.3.3 数字多用表引入的标准不确定度

因远小于，所以数多用表分辨力引入的标准不确定度不予考虑，数字多用表引入的不确定度

==3.8×10-5 mA

2.4 标准不确定度分量一览表

标准不确定度分量汇总见表4。

表4 直流电流输出校准结果的不确定度分量一览表

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 不确定度分量 | 不确定度来源 | 灵敏系数 | 标准不确定度/mA | /mA |
|  | 数字源表引入 | 1 | 3×10-5  | 3×10-5  |
|  | 数字多用表引入 | -1 | 3.8×10-5 | 3.8×10-5 |

2.5 合成标准不确定度

各不确定度分量之间互不相关，故合成标准不确定度为：

=5×10-5 mA

2.6 扩展不确定度

取包含因子*k*=2，则扩展不确定度为：

=1.0×10-4 mA

3 直流电压测量示值误差测量结果的不确定度

3.1 测量模型

按6.2.3.1条款方法，用直流标准电压源校准数字源表直流电压测量示值误差，测量模型可用公式（5）表示。

 （5）

式中：

——被校数字源表直流电压测量示值误差，V；

——被校数字源表直流电压测量显示值，V；

——直流标准电压源设定值(标准电压值)，V。

各不确定度（包括所有分量）之间不相关，不确定度传播律可用公式（6）表示。

  (6)

式中：

，

——被校数字源表直流电压测量示值误差的合成标准不确定度，V；

——被校数字源表引入的标准不确定度，V；

——直流标准电压源引入的标准不确定度，V。

3.2 标准不确定度来源

3.2.1 的来源

a) 测量重复性引入的不确定度。

b）数字源表读数分辨力引入的标准不确定度。

3.2.2 的来源

a)直流标准电压源引入的标准不确定度。

3.3 标准不确定度的评定

3.2.1 测量重复性引入的标准不确定度

5520A多功能标准源输出1V的直流电压，2400型源表选择2V测量。在重复性条件下,连续进行10次测量，结果见表C.5。

表5 源表测量直流电压测量结果

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 次 数 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 源表显示值（V） | 0.99987 | 0.99989 | 0.99992 | 0.99995 | 0.99991 |
| 次 数 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 源表显示值（V） | 0.99987 | 0.99985 | 0.99988 | 0.99986 | 0.99990 |

 0.99989V

单次试验标准差3.1×10-5V

测量重复性引入的标准不确定度 =3.1×10-5V

3.2.2 多功能标准源输出不准引入的标准不确定度

5520A型多功能标准源，输出1V的最大允许误差为±（11ppm×Read+2μV）=±13×10-6V，按均匀分布计算，由数字多用表测量不准引入的标准不确定度分量



3.2.3 读数分辨率引入的标准不确定度

 该校准过程中，源表的读数分辨率为1×10-5V， 按均匀分布计算，由读数分辨率引入的标准不确定度分量



3.3 合成不确定度的评定

3.3.1 灵敏度系数

根据源表直流电测量示值误差的校准方法，以及测量模型公式（C.3）可得灵敏度系数

  

3.3.2标准不确定度分量汇总表

表C.6 源表测量直流电压标准不确定度汇总表

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 不确定度分量 | 不确定度来源 | 灵敏系数 | 标准不确定度 |  |
|  | 测量重复性 | 1 | 3.1×10-5V | 3.1×10-5V |
|  | 标准源输出不准 | -1 | 7.6×10-6V | 7.6×10-6V |
|  | 读数分辨率 | 1 | 2.9×10-6V | 2.9×10-6V |

3.4 计算合成标准不确定度

由于各项标准不确定度分量之间相互独立，所以合成标准不确定度为：

4×10-5V

3.5 扩展不确定度的评定

 取*k*=2 ，则扩展不确定度 *U*（*U*M）=*k u*c（*U*M）=8×10-5V

4 直流电流测量示值误差测量结果的不确定度

4.1 不确定度来源和测量模型

由本规范6.2.5.1可知，源表直流电流测量示值误差的测量模型可用公式（7）表示。测量结果不确定度来源包括测量重复性、多功能标准源输出电流不准、读数分辨率等。

 (7)

式中：—源表直流电流测量示值误差；

 —源表显示测得电流值；

 —多功能标准源输出电流值。

4.2 标准不确定度的评定

4.2.1 测量重复性引入的标准不确定度

5520型多功能标准源输出1mA直流电流，用源表的测量功能对其进行测量。在重复性条件下,连续进行10次测量，结果见表C.7。

表7 源表测量直流电流测量结果

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 次 数 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 源表测得电流值（mA） | 0.99951 | 0.99949 | 0.99942 | 0.99947 | 0.99940 |
| 次 数 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 源表测得电流值（mA） | 0.99945 | 0.99957 | 0.99952 | 0.99950 | 0.99953 |

 0.99949mA

单次试验标准差5.2×10-5mA

测量重复性引入的标准不确定度 =5.2×10-5mA

4.2.2 多功能标准源的标准不确定度

5520A型多功能标准源输出DC1mA电流的最大允许误差为±（100ppm×Read+0.05μA）=±150×10-6mA，按均匀分布计算，由多功能标准源输出不准引入的标准不确定度分量



4.2.3 读数分辨率引入的标准不确定度

 该校准过程中，源表的读数分辨率为1×10-5mA， 按均匀分布计算，由读数分辨率引入的标准不确定度分量



4.3 合成不确定度的评定

4.3.1 灵敏度系数

根据源表直流电流测量示值误差的校准方法，以及测量模型公式（8）可得灵敏度系数

  

4.3.2标准不确定度分量汇总表

表8 源表测量直流电流标准不确定度汇总表

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 不确定度分量 | 不确定度来源 | 灵敏系数 | 标准不确定度 |  |
|  | 测量重复性 | 1 | 5.2×10-5mA | 5.2×10-5mA |
|  | 标准源输出不准 | -1 | 8.9×10-5mA | 8.9×10-5mA |
|  | 读数分辨率 | 1 | 0.29×10-5mA | 0.29×10-5mA |

4.4 计算合成标准不确定度

由于各项标准不确定度分量之间相互独立，所以合成标准不确定度为：

1.1×10-4mA

4.5 扩展不确定度的评定

 取*k*=2 ，则扩展不确定度 *U*（*I*M）=*k u*c（*I*M）=2.2×10-4mA

5 电阻测量示值误差测量结果的不确定度

5.1 不确定度来源和测量模型

由本规范6.2.9可知，源表电阻测量示值误差的测量模型可用公式（9）表示。测量结果不确定度来源包括测量重复性、多功能标准源输出电阻不准、读数分辨率等。

 (9)

式中：—源表电阻测量示值误差；

 —源表显示测得电阻值；

 —多功能标准源输出电阻值。

5.2 标准不确定度的评定

5.2.1 测量重复性引入的标准不确定度

5520型多功能标准源输出10kΩ电阻，用源表的测量功能对其进行测量。在重复性条件下,连续进行10次测量，结果见表9。

表9 源表测量10kΩ电阻测量结果

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 次 数 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 源表测得电阻值（kΩ） | 10.026 | 10.0027 | 10.0026 | 10.0028 | 10.0026 |
| 次 数 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 源表测得电阻值（kΩ） | 10.0028 | 10.0027 | 10.0028 | 10.0026 | 10.0028 |

 10.0027kΩ

单次试验标准差0.095Ω

测量重复性引入的标准不确定度=0.095Ω

5.2.2 多功能标准源的标准不确定度

5520A型多功能标准源输出10kΩ电阻的最大允许误差为±（28ppm×Read+1Ω）=±1.28Ω，按均匀分布计算，由多功能标准源输出不准引入的标准不确定度分量



5.2.3 读数分辨率引入的标准不确定度

 该校准过程中，源表的读数分辨率为0.1Ω， 按均匀分布计算，由读数分辨率引入的标准不确定度分量



5.3 合成不确定度的评定

5.3.1 灵敏度系数

根据源表电阻测量示值误差的校准方法，以及测量模型公式（C.5）可得灵敏度系数

  

5.3.2标准不确定度分量汇总表

表10源表测量电阻标准不确定度汇总表

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 不确定度分量 | 不确定度来源 | 灵敏系数 | 标准不确定度 |  |
|  | 测量重复性 | 1 | 0.095Ω | 0.095Ω |
|  | 标准源输出不准 | -1 | 0.74Ω | 0.74Ω |
|  | 读数分辨率 | 1 | 0.029Ω | 0.029Ω |

5.4 计算合成标准不确定度

由于各项标准不确定度分量之间相互独立，所以合成标准不确定度为：

0.75Ω

5.5 扩展不确定度的评定

 取*k*=2 ，则扩展不确定度 *U*（*R*M）=*k u*c（*R*M）=1.6Ω