**《电感工作基准检定规程》**

**测量不确定度评定**

电感工作基准检定规程修订小组

2024年06月

适用于电感工作基准检定规程的测量不确定度的评定与表示。依据JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》进行评定。

采用麦克斯韦电桥法，根据数学模型，电感基准复现电感量值的测量结果可表示为：

 （1）

考虑各影响量后的电感测量结果可表示为：

 （2）

式中： α—七盘感应分压器IVDα的示值

*R*2、*R*4—桥臂电阻

*C*s—标准电容器

—影响电桥测量的其它不确定度分量

δ—七盘感应分压器IVD对测量的影响

δCs—10nF标准电容测量不确定度的影响

δu(R2)、δu(R4)—电阻*R*2、*R*4测量不确定度的影响

δt(R2)、δt(R4)—温度对测量桥臂电阻*R*2、*R*4的影响

δS(R2)、δS(R4)—电阻*R*2、*R*4稳定性的影响

δA/D(R2)、δA/D(R4)—电阻*R*2、*R*4交直流转换误差的影响。

根据式（2）模型，各输入量之间不相关，电感基准复现电感量值的测量不确定度传播可用下式表示：

 （3）

式中： 为七盘感应分压器引入的不确定度分量；

为桥臂电阻*R*2、*R*4引入的不确定度分量；

为标准电容引入的不确定度分量；

为影响电桥测量的其它因素引入的不确定度分量；

为测量重复性引入的不确定度分量。

**1． 100 µH/10 kHz测量不确定度评定**

**（1）A类测量不确定度评定：**

电感重复性的标准不确定度的评定，该项不确定度分量可以通过连续测量得到测量列(测量10次)获得。测试数据见表1.1所示。100 µH重复性实验，测量重复性引入的标准不确定度为1.0×10-5 。

表1.1 电感基准电桥量值传递重复性实验（100 µH）

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 次数 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 测量结果 | 99.959 | 99.957 | 99.958 | 99.957 | 99.959 | 99.956 | 99.958 | 99.959 | 99.957 | 99.958 |

可得， ，

 。

**（2）B类不确定度评定：**

1. 感应分压器IVD引入的不确定度分量

根据中国计量科学研究院音频电压比率标准装置测试，项目研制的双7盘双级感应分压器的IVDα比率误差限是5×10-6 ，它所引入的标准不确定度（按均匀分布计算）。

感应分压器IVD引入的不确定度分量为2.9×10-6，灵敏系数为1。

1. 电阻*R*2、*R*4引入的不确定度分量

根据表1.2电阻*R*2测量不确定度分量汇总表，包含溯源不确定度、标准电阻温度系数、稳定性估计、交直流转换不确定度分量、跟随器跟随精度影响。可得标准电阻的相对不确定度分量为5.9×10-6，灵敏系数为1。

表1.2 *R*2电阻不确定度分量汇总表

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 输入量 | 估计值 | 标准 不确定度 | 概率分布 | 不确定度 类型 | 灵敏系数 | 不确定度 分量 |
| / *Xi* | / *xi* | / *u(xi)* | / *c*i | / *ui(y)* |
|  |  | ppm | (A,B) |  | ppm |
| 溯源不确定度 | - | 4.0 | 正态 | B | 1 | 4.0 |
| 温度系数 | - | 1.0 | 均匀 | B | 1 | 1.0 |
| 稳定性影响 | - | 3.0 | 均匀 | B | 1 | 3.0 |
| 交直流转换 | - | 0.58 | 均匀 | B | 1 | 0.58 |
| 跟随器精度 | - | 2.9 | 均匀 | B | 1 | 2.9 |
|  |  | 合成标准不确定度 / *uc(y)* ppm : | | | | 5.9 |

电阻*R*4测量不确定度分量可参考表1.2，包含溯源不确定度、标准电阻温度系数、稳定性估计、交直流转换不确定度分量（不包含跟随器精度项）。可得标准电阻的相对不确定度分量为5.1×10-6，灵敏系数为1。

1. 标准电容*C*引入的的不确定度分量

根据表1.3标准电容*C* 10 nF测量不确定度分量汇总表，包含溯源至计算电容基准的不确定度、温度系数、稳定性估计、引线补偿以及前置跟随器器引入的不确定度分量。可得标准电容*C*s的相对不确定度分量为4.9×10-6，灵敏系数为1。

表1.3 标准Cs不确定度分量汇总表

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 输入量 | 估计值 | 标准 不确定度 | 概率分布 | 不确定度 类型 | 灵敏系数 | 不确定度 分量  / *ui(y)*  ppm |
| / *Xi* | / *xi* | / *u(xi)* | / *c*i |
|  |  | ppm | (A,B) |  |
| 溯源不确定度 | - | 2.5 | 正态 | B | 1 | 2.5 |
| 温度系数 | - | 0.5 | 均匀 | B | 1 | 0.5 |
| 稳定性影响 | - | 3.0 | 均匀 | B | 1 | 3.0 |
| 引线补偿 | - | 0.5 | 均匀 | B | 1 | 0.5 |
| 跟随器精度 | - | 2.9 | 均匀 | B | 1 | 2.9 |
|  |  | 合成标准不确定度 / *uc(y)* ppm : | | | | 4.9 |

1. 其它不确定度分量

电阻时间常数、电桥灵敏度的影响极限为均为5.0×10-6，符合均匀分布，各自相对不确定度分量为2.9×10-6，灵敏度系数为1.

残余参数影响包括电桥中残余引线、端钮转端对补偿后残余影响等，不确定度分量为5.0×10-6，符合均匀分布，相对不确定度分量为2.9×10-6，灵敏度系数为1。

运放自动虚地的电源平衡，指零仪端分布参数不平衡造成泄漏的影响，不确定度分量为1.0×10-5，符合均匀分布，相对不确定度分量为5.8×10-6，灵敏度系数为1。

**（3）相关性**

各输入量之间不存在值得考虑的相关性。

**（4）不确定度分量汇总**

参见表1.4。

表1.4 电感工作基准100 µH/10 kHz测量不确定度分量汇总表

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 输入量 | 估计值 | 标准 不确定度 | 概率分布 | 不确定度 类型 | 灵敏系数 | 不确定度 分量 |
| / *Xi* | / *xi* | / *u(xi)* | / *c*i | / *ui(y)* |
|  |  | ppm | (A,B) |  | ppm |
| 感应分压比率 | - | 2.9 | 均匀 | B | 1 | 2.9 |
| *R*2不确定度 | - | 5.9 | 正态 | B | 1 | 5.9 |
| *R*4不确定度 | - | 5.1 | 正态 | B | 1 | 5.1 |
| *C*s不确定度 | - | 4.9 | 正态 | B | 1 | 4.9 |
| 残余参数影响 | - | 2.9 | 均匀 | B | 1 | 2.9 |
| 电桥灵敏度 | - | 2.9 | 均匀 | B | 1 | 2.9 |
| 指零仪平衡 | - | 5.8 | 均匀 | B | 1 | 5.8 |
| 时间常数 | - | 2.9 | 均匀 | B | 1 | 2.9 |
| 测量重复性 | - | 10.0 | 正态 | A | 1 | 10.0 |
|  |  | 合成标准不确定度 / *uc(y)* ppm : | | | | 15.9 |

**（5）合成标准不确定度**

根据表2.4各不确定度分量，可得100 µH/10 kHz电感测量合成标准不确定度为：

。

**2. 10 H/100 Hz测量不确定度的评定**

**（1）A类测量不确定度评定：**

电感重复性的标准不确定度的评定，该项不确定度分量可以通过连续测量得到测量列(测量10次)获得。测试数据见表2.1所示。10 H重复性实验，测量重复性引入的标准不确定度为2.4×10-5 。

表2.1 电感基准电桥量值传递重复性实验（10 H）

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 次数 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 测量结果 | 9.9990 | 9.9992 | 9.9994 | 9.9996 | 9.9991 | 9.9994 | 9.9997 | 9.9994 | 9.9994 | 9.9990 |

可得，，

。

**（2）B类不确定度评定：**

1. 感应分压器IVD引入的的不确定度分量

根据中国计量科学研究院工频电压比率标准装置测试，项目研制的双7盘双级感应分压器的IVDα比率误差限是5×10-6，测量不确定度为5×10-6，它所引入的标准不确定度（按均匀分布计算），灵敏系数为1。

b. 电阻*R*2、*R*4引入的不确定度分量

根据表2.2电阻*R*2测量不确定度分量汇总表，包含溯源不确定度、标准电阻温度系数、稳定性估计、交直流转换不确定度分量、跟随器跟随精度影响。可得标准电阻的相对不确定度分量为1.7×10-6，灵敏系数为1。

表2.2 *R*2电阻不确定度分量汇总表

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 输入量 | 估计值 | 标准 不确定度 | 概率分布 | 不确定度 类型 | 灵敏系数 | 不确定度 分量 |
| / *Xi* | / *xi* | / *u(xi)* | / *c*i | / *ui(y)* |
|  |  | ppm | (A,B) |  | ppm |
| 溯源不确定度 | - | 0.5 | 正态 | B | 1 | 0.5 |
| 温度系数 | - | 1.0 | 均匀 | B | 1 | 1.0 |
| 稳定性影响 | - | 0.5 | 均匀 | B | 1 | 0.5 |
| 交直流转换 | - | 0.58 | 均匀 | B | 1 | 0.58 |
| 跟随器精度 | - | 1.0 | 均匀 | B | 1 | 1.0 |
|  |  | 合成标准不确定度 / *uc(y)* ppm : | | | | 1.7 |

电阻*R*4测量不确定度分量可参考表2.2，包含溯源不确定度、标准电阻温度系数、稳定性估计、交直流转换不确定度分量（不包含跟随器精度项）。可得标准电阻的相对不确定度分量为1.4×10-6，灵敏系数为1。

c. 标准电容*C*引入的的不确定度分量

根据表2.3标准电容*C* 10 nF在100 Hz测量不确定度分量汇总表，包含溯源至新一代计算电容的不确定度、温度系数、稳定性估计、引线补偿以及前置跟随器器引入的不确定度分量。可得标准电容*C*的相对不确定度分量为2.8×10-6，灵敏系数为1。

表2.3标准*C*不确定度分量汇总表

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 输入量 | 估计值 | 标准 不确定度 | 概率分布 | 不确定度 类型 | 灵敏系数 | 不确定度 分量  / *ui(y)*  ppm |
| / *Xi* | / *xi* | / *u(xi)* | / *c*i |
|  |  | ppm | (A,B) |  |
| 溯源不确定度 | - | 2.5 | 正态 | B | 1 | 2.5 |
| 温度系数 | - | 0.5 | 均匀 | B | 1 | 0.5 |
| 稳定性影响 | - | 1.0 | 均匀 | B | 1 | 1.0 |
| 引线补偿 | - | 0.5 | 均匀 | B | 1 | 0.5 |
| 跟随器精度 | - | 0.5 | 均匀 | B | 1 | 0.5 |
|  |  | 合成标准不确定度 / *uc(y)* ppm : | | | | 2.8 |

d. 其它不确定度分量

电阻时间常数影响不大于5.0×10-6，电桥灵敏度的影响不大于1.0×10-5,符合均匀分布，各自相对不确定度分量为2.9×10-6和5.8×10-6，灵敏度系数为1.

残余参数影响包括电桥中残余引线、端钮转端对补偿后残余影响等，不确定度分量为1.0×10-6，符合均匀分布，相对不确定度分量为0.6×10-6，灵敏度系数为1。

运放自动虚地的电源平衡，指零仪端分布参数不平衡造成泄漏的影响，不确定度分量为3.0×10-6，符合均匀分布，相对不确定度分量为1.8×10-6，灵敏度系数为1。

**（3）相关性**

各输入量之间不存在值得考虑的相关性。

**（4）不确定度分量汇总**

参见表2.4。

表2.4 电感工作基准10 H/100 Hz测量不确定度分量汇总表

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 输入量 | 估计值 | 标准 不确定度 | 概率分布 | 不确定度 类型 | 灵敏系数 | 不确定度 分量 |
| / *Xi* | / *xi* | / *u(xi)* | / *c*i | / *ui(y)* |
|  |  | ppm | (A,B) |  | ppm |
| 感应分压比率 | - | 0.11 | 均匀 | B | 1 | 4.1 |
| *R*2不确定度 | - | 1.03 | 正态 | B | 1 | 1.7 |
| *R*4不确定度 | - | 1.03 | 正态 | B | 1 | 1.4 |
| *C*s不确定度 | - | 0.36 | 正态 | B | 1 | 2.8 |
| 时间常数 | - | 2.9 | 均匀 | B | 1 | 2.9 |
| 电桥灵敏度 | - | 5.8 | 均匀 | B | 1 | 5.8 |
| 残余参数影响 | - | 0.6 | 均匀 | B | 1 | 0.6 |
| 指零仪平衡 | - | 1.8 | 均匀 | B | 1 | 1.8 |
| 测量重复性 | - | 0.4 | 正态 | A | 1 | 24.0 |
|  |  | 合成标准不确定度 / *uc(y)* ppm : | | | | 25.6 |

**（5）合成标准不确定度**

根据表2.4各不确定度分量，可得10 H/100 Hz电感测量合成标准不确定度为：

。