LCR测量仪校准不确定度评定报告

**1. LCR测量仪电感（L）参数测量功能不确定度评定**

1.1 测量原理

使用标准电感器，采用直接测量法，对LCR测量仪电感参数测量功能进行校准。

1.2 校准步骤

（1）将标准电感器接入到LCR测量仪测量端。

（2）待稳定后，记录LCR测量仪示数。

（3）根据记录数据和标准电感器实际值计算LCR测量仪误差。

1.3 数学模型

被校LCR测量仪示值误差可表示为：

$∆\_{L}=L\_{X}-L\_{N}$ （1.1）

式中：

$∆\_{L}$ 被校LCR测量仪电感参数测量功能示值误差；

$L\_{X}$ 被校LCR测量仪电感参数测量功能示值；

$L\_{N}$ 标准电感器实际值。

$δ\_{L}=\frac{∆\_{L}}{L\_{N}}×100\%$ （1.2）

式中：

$δ\_{L}$ 相对示值误差。

1.4 不确定度分量

（1）LCR测量仪测量重复性u1

在校准条件不变的情况下，使用一台型号为7600，编号为7192313，准确度级别为0.05%的LCR测量仪对10mH标准电感器进行10次独立重复测量，得到的测量结果为：

（单位：mH）

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 测量次数 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 测量结果 | 9.9970 | 9.9967 | 9.9972 | 9.9968 | 9.9973 | 9.9971 | 9.9967 | 9.9969 | 9.9973 | 9.9968 |

则电感测量值X的最佳估计值可以用10次独立测量结果的平均值来表示：

$\overbar{x}=\frac{\sum\_{k=1}^{10}x\_{k}}{10}=9.99698$ mH （1.3）

使用贝赛尔公式可计算得到单次测量结果的标准差：

$s\left(x\_{k}\right)=\sqrt{\frac{\sum\_{k=1}^{10}\left(x\_{k}-\overbar{x}\right)^{2}}{10}}$=0.00023 mH （1.4）

因此，单次测量结果的相对标准不确定度u1可由式（1.5）计算得到：

$u\_{1}=\frac{s\left(x\_{k}\right)}{L\_{X}}=2.3×10^{-5}$ （1.5）

（2）标准电感器溯源引入的不确定度分量 *u*2

标准电感器的实际值由证书给出，其实际值的相对扩展不确定度为*U*L=3×10-5，且包含因子*k*=2。于是：

$u\_{2}=\frac{3×10^{-5}}{2}=1.5×10^{-5}$ （1.6）

（3）标准电感器年稳定性引入的不确定度分量 *u*3

标准电感器（组）的年稳定性由近两年的证书数值计算得出，10 mH标准电感器近两年由上级标准传递得到的实际值为9.9992mH、9.9993mH。相邻两年变化1×10-5，假定其在该范围内满足矩形分布，于是由标准电感器年稳定性引入的不确定度分量为：

$u\_{3}=\frac{2×10^{-5}}{\sqrt{3}}=1.2×10^{-5}$ （1.7）

（4）温湿度变化引入的不确定度分量 *u*4

在本院实验室条件下，温度变化半宽区间为1℃、湿度变化半宽区间为15%RH。标准电感器温度系数为10-6量级，可忽略不计；标准电感器湿度系数为RH。假定其满足矩形分布，于是标准不确定度为：

$u\_{4}=\frac{1.5×1.5×10^{-5}}{\sqrt{3}}=1.2×10^{-5}$ （1.8）

（5）其他影响因素

对于外界电磁场及测量线路耦合等因素引起的不确定度分量，若按照校准规范规定的实验环境及实验方法进行校准，其影响可忽略不计。

1.5、相关性

各影响量量之间未发现有相关性且灵敏系数为1。

1.6、不确定度概算

表1.1给出各不确定度分量的汇总表。

表1.1不确定度分量汇总表

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 不确定度分量名称 | 输入量 | 评定类型 | 标准不确定度 | 概率分布 | 灵敏度系数 | 不确定度分量 |
| 重复性 | *u*1 | A | 2.3×10-5 | 正态 | 1 | 2.3×10-5 |
| 标准器溯源 | *u*2 | B | 1.5×10-5 | 矩形 | 1 | 1.5×10-5 |
| 标准器年稳定性 | *u*3 | B | 1.2×10-5 | 矩形 | 1 | 1.2×10-5 |
| 温湿度变化 | *u*4 | B | 1.2×10-5 | 矩形 | 1 | 1.2×10-5 |

1.7、合成标准不确定度



1.8、扩展不确定度

对合成标准不确定度，取其置信概率为p=95%，包含因子*k*=2,故扩展不确定度为：



1.9、结果报告

被校LCR测量仪电感参数测量功能测量结果扩展不确定度*U*rel=6.2×10-5（*k*=2）。

**2. LCR测量仪电容（C）参数测量功能不确定度评定**

2.1 测量原理

使用标准电容器，采用直接测量法，对LCR测量仪电容参数测量功能进行校准。

2.2 校准步骤

（1）将标准电容器接入到LCR测量仪测量端。

（2）待稳定后，记录LCR测量仪示数。

（3）根据记录数据和标准电容器实际值计算LCR测量仪误差。

2.3 数学模型

被校LCR测量仪示值误差可表示为：

$∆\_{C}=C\_{X}-C\_{N}$ （2.1）

式中：

$∆\_{C}$ 被校LCR测量仪电容参数测量功能示值误差；

$C\_{X}$ 被校LCR测量仪电容参数测量功能示值；

$C\_{N}$ 标准电容器实际值。

$δ\_{C}=\frac{∆\_{C}}{C\_{N}}×100\%$ （2.2）

式中：

$δ\_{C}$ 相对示值误差。

2.4 不确定度分量

（1）LCR测量仪测量重复性*u*1

在校准条件不变的情况下，使用一台型号为7600，编号为7192313，准确度级别为0.05%的LCR测量仪对1 nF标准电容器进行10次独立重复测量，得到的测量结果为：

（单位：nF）

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 测量次数 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 测量结果 | 1.00015 | 1.00014 | 1.00018 | 1.00014 | 1.00019 | 1.00013 | 1.00015 | 1.00014 | 1.00016 | 1.00015 |

则电容测量值X的最佳估计值可以用10次独立测量结果的平均值来表示：

$\overbar{x}=\frac{\sum\_{k=1}^{10}x\_{k}}{10}=1.00153$ nF （2.3）

使用贝赛尔公式可计算得到单次测量结果的标准差：

$s\left(x\_{k}\right)=\sqrt{\frac{\sum\_{k=1}^{10}\left(x\_{k}-\overbar{x}\right)^{2}}{10}}=0.000019$ nF （2.4）

因此，单次测量结果的相对标准不确定度u1可由式（2.5）计算得到：

$u\_{1}=\frac{s\left(x\_{k}\right)}{C\_{X}}=1.9×10^{-5}$ （2.5）

（2）标准电容器溯源引入的不确定度分量 *u*2

标准电容器的实际值由证书给出，其实际值的相对扩展不确定度为*U*C=2×10-5，且包含因子*k*=2。于是：

$u\_{2}=\frac{2×10^{-5}}{2}=1×10^{-5}$ （2.6）

（3）标准电容器年稳定性引入的不确定度分量 *u*3

标准电容器（组）的年稳定性由近两年的证书数值计算得出，1 nF标准电容器近两年由上级标准传递得到的实际值为1.00001 nF、1.00002 nF。相邻两年变化1×10-5，假定其在该范围内满足矩形分布，于是由标准电容器年稳定性引入的不确定度分量为：

$u\_{3}=\frac{1×10^{-5}}{\sqrt{3}}=0.58×10^{-5}$ （2.7）

（4）温湿度变化引入的不确定度分量 *u*4

在本院实验室条件下，温度变化半宽区间为1℃、湿度变化半宽区间为15%RH。在此范围内标准空气电容器受湿度影响可忽略不计；温度系数为小于。假定其满足矩形分布，于是标准不确定度为：

$u\_{4}=\frac{1×10^{-5}}{\sqrt{3}}=0.58×10^{-5}$ （2.8）

（6）其他影响因素

对于外界电磁场及测量线路耦合等因素引起的不确定度分量，若按照校准规范规定的实验环境及实验方法进行校准，其影响可忽略不计。

2.5、相关性

各影响量量之间未发现有相关性且灵敏系数为1。

2.6、不确定度概算

表2给出各不确定度分量的汇总表。

表2.1不确定度分量汇总表

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 不确定度分量名称 | 输入量 | 评定类型 | 标准不确定度 | 概率分布 | 灵敏度系数 | 不确定度分量 |
| 重复性 | *u*1 | A | 1.9×10-5 | 正态 | 1 | 1.9×10-5 |
| 标准器溯源 | *u*2 | B | 1.0×10-5 | 矩形 | 1 | 1.0×10-5 |
| 标准器年稳定性 | *u*3 | B | 0.58×10-5 | 矩形 | 1 | 0.58×10-5 |
| 温湿度变化 | *u*4 | B | 0.58×10-5 | 矩形 | 1 | 0.58×10-5 |

2.7、合成标准不确定度



2.8、扩展不确定度

对合成标准不确定度，取其置信概率为p=95%，包含因子*k*=2,故扩展不确定度为：



2.9、结果报告

被校LCR测量仪电容参数测量功能测量结果扩展不确定度*U*rel=4.6×10-5（*k*=2）。

**3. LCR测量仪电阻（R）参数测量功能不确定度评定**

3.1 测量原理

使用标准电阻器，采用直接测量法，对LCR测量仪电阻参数测量功能进行校准。

3.2 校准步骤

（1）将标准电阻器接入到LCR测量仪测量端。

（2）待稳定后，记录LCR测量仪示数。

（3）根据记录数据和标准电阻器实际值计算LCR测量仪误差。

3.3 数学模型

被校LCR测量仪示值误差可表示为：

$∆\_{R}=C\_{X}-C\_{N}$ （3.1）

式中：

$∆\_{R}$ 被校LCR测量仪电阻参数测量功能示值误差；

$C\_{X}$ 被校LCR测量仪电阻参数测量功能示值；

$C\_{N}$ 标准电阻器实际值。

$δ\_{R}=\frac{∆\_{R}}{R\_{N}}×100\%$ （3.2）

式中：

$δ\_{R}$ 相对示值误差。

3.4 不确定度分量

（1）LCR测量仪测量重复性u1

在校准条件不变的情况下，使用一台型号为7600，编号为7192313，准确度级别为0.05%的LCR测量仪对100 Ω标准电阻器进行10次独立重复测量，得到的测量结果为：

（单位：Ω）

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 测量次数 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 测量结果 | 100.027 | 100.023 | 100.024 | 100.026 | 100.029 | 100.028 | 100.024 | 100.022 | 100.023 | 100.026 |

则电阻测量值X的最佳估计值可以用10次独立测量结果的平均值来表示：

$\overbar{x}=\frac{\sum\_{k=1}^{10}x\_{k}}{10}=100.0252$ Ω （3.3）

使用贝赛尔公式可计算得到单次测量结果的标准差：

$s\left(x\_{k}\right)=\sqrt{\frac{\sum\_{k=1}^{10}\left(x\_{k}-\overbar{x}\right)^{2}}{10}}=0.00235$ Ω （3.4）

因此，单次测量结果的相对标准不确定度u1可由式（2.5）计算得到：

$u\_{1}=\frac{s\left(x\_{k}\right)}{R\_{X}}=2.4×10^{-5}$ （3.5）

（2）标准电阻器溯源引入的不确定度分量 *u*2

标准电阻器的实际值由证书给出，其实际值的相对扩展不确定度为*U*rel=5×10-5，且包含因子*k*=2。于是：

$u\_{2}=\frac{5×10^{-5}}{2}=2.5×10^{-5}$ （3.6）

（3）标准电阻器年稳定性引入的不确定度分量 *u*3

标准电阻器（组）的年稳定性由近两年的证书数值计算得出，相邻两年变化小于1E-6，引入的不确定度可忽略：

$u\_{3}=0$ （3.7）

（4）温湿度变化引入的不确定度分量 *u*4

在本院实验室条件下，温度变化半宽区间为1℃、湿度变化半宽区间为15%RH。在此范围内标准电阻器受湿度影响可忽略不计；温度系数为。假定其满足矩形分布，于是标准不确定度为：

$u\_{4}=\frac{1×10^{-5}}{\sqrt{3}}=0.58×10^{-5}$ （3.8）

（5）其他影响因素

对于外界电磁场及测量线路耦合等因素引起的不确定度分量，若按照校准规范规定的实验环境及实验方法进行校准，其影响可忽略不计。

3.5、相关性

各影响量量之间未发现有相关性且灵敏系数为1。

3.6、不确定度概算

表3给出各不确定度分量的汇总表。

表3.1不确定度分量汇总表

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 不确定度分量名称 | 输入量 | 评定类型 | 标准不确定度 | 概率分布 | 灵敏度系数 | 不确定度分量 |
| 重复性 | *u*1 | A | 2.4×10-5 | 正态 | 1 | 2.4×10-5 |
| 标准器溯源 | *u*2 | B | 2.5×10-5 | 矩形 | 1 | 2.5×10-5 |
| 标准器年稳定性 | *u*3 | B | 0×10-5 | 矩形 | 1 | 0×10-5 |
| 温湿度变化 | *u*4 | B | 0.58×10-5 | 矩形 | 1 | 0.58×10-5 |

3.7、合成标准不确定度



3.8、扩展不确定度

对合成标准不确定度，取其置信概率为p=95%，包含因子*k*=2,故扩展不确定度为：



3.9、结果报告

被校LCR测量仪电阻参数测量功能测量结果扩展不确定度*U*rel=7.0×10-5（*k*=2）

**4. LCR测量仪测量频率不确定度评定**

4.1 测量原理

使用频率计，采用直接测量法，对LCR测量仪测量电压的频率进行校准。

4.2 校准步骤

（1）将被校LCR测量仪测量端（一般为高端电流测量端口）与频率计输入端连接。

（2）设置LCR测量仪的测量频率。

（3）待稳定后，记录频率计示数。

（4）根据记录数据和设置的频率值计算LCR测量仪测量频率误差。

4.3 数学模型

被校LCR测量仪测量频率误差可表示为：

$∆\_{f}=f\_{X}-f\_{N}$ （4.1）

式中：

$∆\_{f}$ 被校LCR测量仪测量频率误差；

$f\_{X}$ 被校LCR测量仪测量频率设置值；

$f\_{N}$ 频率计测得的LCR测量仪测量频率实际值。

$δ\_{f}=\frac{∆\_{f}}{f\_{N}}×100\%$ （4.2）

式中：

$δ\_{f}$ 测量频率相对误差。

4.4 不确定度分量

（1）频率计测量重复性u1

在校准条件不变的情况下，使用一台型号为GUC-2010G，编号为10750，准确度级别为0.01%的频率计对LCR测量仪设置为1000 Hz的测量频率进行10次独立重复测量，得到的测量结果为：

表4.1 被校LCR测量仪测量频率重复性测量数据

（单位：Hz）

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 测量次数 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 频率值（Hz） | 1000.00 | 1000.03 | 1000.05 | 1000.02 | 1000.00 |
| 测量次数 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 频率值（Hz） | 1000.02 | 1000.01 | 1000.01 | 1000.02 | 1000.00 |

则测量频率值X的最佳估计值可以用10次独立测量结果的平均值来表示：

$\overbar{x}=\frac{\sum\_{k=1}^{10}x\_{k}}{10}=1000.016$ Hz （4.3）

使用贝赛尔公式可计算得到单次测量结果的标准差：

$s\left(x\_{k}\right)=\sqrt{\frac{\sum\_{k=1}^{10}\left(x\_{k}-\overbar{x}\right)^{2}}{10}}=0.016$ Hz （4.4）

因此，单次测量结果的相对标准不确定度u1可由式（2.5）计算得到：

$u\_{1}=\frac{s\left(x\_{k}\right)}{R\_{X}}=1.6×10^{-5}$ （4.5）

（2）频率计溯源引入的不确定度分量 *u*2

根据频率计准确度指标得到最大允许误差为±0.01%，半区间内估计服从均匀分布，置信因子$k=\sqrt{3}$，则频率计最大允许误差引入的标准不确定度：：

$u\_{2}=\frac{1×10^{-4}}{\sqrt{3}}=5.8×10^{-5}$ （4.6）

（3）频率计分辨力引入的不确定度分量 *u*3

根据频率计测量说明书得到频率计的分辨力为0.01 Hz，按B类进行评定，那么其区间半宽度为a=0.005 Hz，为均匀分布，包含因子$k=\sqrt{3}$，则频率计分辨力引入的相对标准不确定度：

$u\_{3}=\frac{a}{k×1000Hz}=\frac{0.005Hz}{\sqrt{3}×1000Hz}=0.3×10^{-5}$ （4.7）

（4）其他影响因素

对于外界电磁场及测量线路耦合等因素引起的不确定度分量，若按照校准规范规定的实验环境及实验方法进行校准，其影响可忽略不计。

4.5 相关性

各影响量量之间未发现有相关性且灵敏系数为1。

4.6 不确定度概算

表4.2给出各不确定度分量的汇总表。

表4.2不确定度分量汇总表

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 不确定度分量名称 | 输入量 | 评定类型 | 标准不确定度 | 概率分布 | 灵敏度系数 | 不确定度分量 |
| 重复性 | *u*1 | A | 1.6×10-5 | 正态 | 1 | 1.6×10-5 |
| 频率计溯源 | *u*2 | B | 5.8×10-5 | 矩形 | 1 | 5.8×10-5 |
| 频率计分辨力 | *u*3 | B | 0.3×10-5 | 矩形 | 1 | 0.3×10-5 |

4.7、合成标准不确定度



4.8、扩展不确定度

对合成标准不确定度，取其置信概率为p=95%，包含因子*k*=2,故扩展不确定度为：



4.9、结果报告

被校LCR测量仪测量频率的能测量结果扩展不确定度*U*rel=1.2×10-4（*k*=2）

**5. LCR测量仪测量电压不确定度评定**

5.1 测量原理

使用数字多用表，采用直接测量法，对LCR测量仪测量电压的幅值进行校准。

5.2 校准步骤

（1）将被校LCR测量仪测量端（一般为高端电流测量端口）与数字多用表输入端连接。

（2）设置LCR测量仪的测量电压。

（3）待稳定后，记录数字多用表示数。

（4）根据记录数据和设置的电压值计算LCR测量仪测量电压误差。

5.3 数学模型

被校LCR测量仪测量电压误差可表示为：

$∆\_{V}=V\_{X}-V\_{N}$ （5.1）

式中：

$∆\_{V}$ 被校LCR测量仪测量电压误差；

$V\_{X}$ 被校LCR测量仪测量电压设置值；

$V\_{N}$ 数字多用表测得的LCR测量仪测量电压实际值。

$δ\_{V}=\frac{∆\_{V}}{V\_{N}}×100\%$ （5.2）

式中：

$δ\_{V}$ 测量电压相对误差。

5.4 不确定度分量

（1）数字多用表测量重复性u1

在校准条件不变的情况下，使用一台型号为34410A，编号为MY47020211，准确度级别为0.01%的数字多用表对LCR测量仪设置为1 V的测量电压进行10次独立重复测量，得到的测量结果为：

表5.1 被校LCR测量仪测量电压重复性测量数据

（单位：V）

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 测量次数 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 频率值（Hz） | 1.00052 | 1.00073 | 1.00068 | 1.00053 | 1.00052 |
| 测量次数 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 频率值（Hz） | 1.00049 | 1.00047 | 1.00055 | 1.00048 | 1.00049 |

则测量频率值X的最佳估计值可以用10次独立测量结果的平均值来表示：

$\overbar{x}=\frac{\sum\_{k=1}^{10}x\_{k}}{10}=1.000546$ V （5.3）

使用贝赛尔公式可计算得到单次测量结果的标准差：

$s\left(x\_{k}\right)=\sqrt{\frac{\sum\_{k=1}^{10}\left(x\_{k}-\overbar{x}\right)^{2}}{10}}=0.000088$ V （5.4）

因此，单次测量结果的相对标准不确定度u1可由式（2.5）计算得到：

$u\_{1}=\frac{s\left(x\_{k}\right)}{R\_{X}}=8.8×10^{-5}$ （5.5）

（2）数字多用表溯源引入的不确定度分量 *u*2

根据数字多用表准确度指标得到最大允许误差为±0.01%，半区间内估计服从均匀分布，置信因子$k=\sqrt{3}$，则数字多用表最大允许误差引入的标准不确定度：：

$u\_{2}=\frac{1×10^{-4}}{\sqrt{3}}=5.8×10^{-5}$ （5.6）

（3）数字多用表分辨力引入的不确定度分量 *u*3

数字多用表分辨力为0.00001 V，按B类进行评定，那么其区间半宽度为a=0.000005 Hz，为均匀分布，包含因子$k=\sqrt{3}$，则频率计分辨力引入的相对标准不确定度：

$u\_{3}=\frac{a}{k×1V}=\frac{0.00005V}{\sqrt{3}×1V}=0.3×10^{-5}$ （5.7）

（4）其他影响因素

对于外界电磁场及测量线路耦合等因素引起的不确定度分量，若按照校准规范规定的实验环境及实验方法进行校准，其影响可忽略不计。

5.5 相关性

各影响量量之间未发现有相关性且灵敏系数为1。

5.6 不确定度概算

表5.2给出各不确定度分量的汇总表。

表5.2不确定度分量汇总表

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 不确定度分量名称 | 输入量 | 评定类型 | 标准不确定度 | 概率分布 | 灵敏度系数 | 不确定度分量 |
| 重复性 | *u*1 | A | 8.8×10-5 | 正态 | 1 | 8.8×10-5 |
| 频率计溯源 | *u*2 | B | 5.8×10-5 | 矩形 | 1 | 5.8×10-5 |
| 频率计分辨力 | *u*3 | B | 0.3×10-5 | 矩形 | 1 | 0.3×10-5 |

5.7、合成标准不确定度



5.8、扩展不确定度

对合成标准不确定度，取其置信概率为p=95%，包含因子*k*=2,故扩展不确定度为：



5.9、结果报告

被校LCR测量仪测量频率的能测量结果扩展不确定度*U*rel=2.2×10-4（*k*=2）