交直流电流传感器测量不确定度评定（示例）

1 直流电流测量不确定度评定

1.1概述

环境条件：温度：21℃，相对湿度：60%；

测量标准：直流标准电流源（52120A跨导放大器）、直流标准电压表（8508A型数字多用表）、适配单元（CTPS-U/B型电流传感器适配单元）；

被测对象：DS50ID零磁通电流传感器；

测量方法：标准源表法（标准装置法），见7.2.3.2。

1.2 测量模型及不确定度来源

1.2.1 测量模型

被校传感器的基本误差可表示为：



式中：



由于传感器的误差以引用误差方式表示，且被校传感器的引用值是标称常量，可令，式（ 1）改写为：



测量方法采用标准源表法时，被校传感器输入一次测量电流测得值是直流标准电压表的读数*U*S与变换比的乘积，于是式（ 2）改写为：



实际上，传感器的误差综合了零点输出、热漂移、非线性误差和迟滞误差等。此外，传感器在测量电流时，还存在载流导体的偏心位置影响及杂散磁场干扰。

根据传感器的静态测量模型，这些误差包含在重复性测量中。

1.2.2 不确定度来源分析

根据测量模型，基本误差的不确定来源包括以下几个部分：

1）被校传感器测量重复性引入的不确定度；

2）直流标准电流源准确度引入的不确定度；

3）直流标准电流源稳定度引入的不确定度；

4）直流标准电压表准确度引入的不确定度；

5）直流标准电压表分辨力引入的不确定度；

6）适配单元引入的不确定度。

1.3 标准不确定度分量的评定

1.3.1 被校传感器直流电流测量重复性引入的标准不确定度*u*1

在重复性测量条件下，对被校传感器满量程点（50 A）开展独立重复测量，结果如表 1所示。

表 1 重复性测量数据

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 测量次数 | 直流标准源设定值/(A) | 直流标准表示值/(V) | 变换比 | 被校传感器测得值/(A) |
| 1 | 50 | 1.000172 | 50 | 50.0086 |
| 2 | 50 | 1.000173 | 50 | 50.0087 |
| 3 | 50 | 1.000172 | 50 | 50.0086 |
| 4 | 50 | 1.000172 | 50 | 50.0086 |
| 5 | 50 | 1.000172 | 50 | 50.0086 |
| 6 | 50 | 1.000173 | 50 | 50.0087 |
| 7 | 50 | 1.000173 | 50 | 50.0087 |
| 8 | 50 | 1.000173 | 50 | 50.0087 |
| 9 | 50 | 1.000173 | 50 | 50.0087 |
| 10 | 50 | 1.000173 | 50 | 50.0087 |

测量结果的平均值：50.00863 A；单次测量值的实验标准偏差：0.00003 A。

1.3.2 直流标准电流源准确度引入的标准不确定度*u*2

直流标准电流源经上级校准，给出的扩展不确定度*U*为0.02%，在区间内认为服从均匀分布，则：



1.3.3直流标准电流源稳定度引入的标准不确定度*u*3

直流标准电流源稳定度优于0.001%，因此引入的不确定度分量可以忽略。

1.3.4直流标准电压表准确度引入的标准不确定度*u*4

直流标准电压表8508A直流电压2V档相对于校准标准的不确定度为1ppm，因此引入的不确定度分量可以忽略。

1.3.5直流标准电压表分辨力引入的标准不确定度*u*5

查阅直流标准电压表8508A技术手册，其2 V档的分辨力为10 nV，因此引入的不确定度分量可以忽略。

1.3.6 适配单元引入的不确定度*u*6

校准用适配单元经上级计量机构校准，其误差限：±0.01%，则区间半宽度为：a=0.01%，区间内服从均匀分布，则：



1.4 合成标准不确定度

不确定度分量汇总表见表 2。表 2 标准不确定度汇总表

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 标准不确定度来源 | 概率分布 | 评定方法 | 灵敏系数 | 不确定度分量 |
| 被校传感器测量重复性引入的不确定度 | 正态分布 | A类评定 | 1 | 0.00003A |
| 直流标准电流源准确度引入的不确定度 | 均匀分布 | B类评定 | 1 | 0.0058A |
| 直流标准电流源稳定度引入的不确定度 | 均匀分布 | B类评定 | / | / |
| 直流标准电压表准确度引入的不确定度 | 均匀分布 | B类评定 | / | / |
| 直流标准电压表分辨力引入的不确定度 | 均匀分布 | B类评定 | / | / |
| 适配单元引入的不确定度。 | 均匀分布 | B类评定 | 1 | 0.0029A |

由于各不确定度分量独立不相关，且由于被校传感器以引用误差表示，则：



1.5 扩展不确定度

取包含因子*k*=2，则扩展不确定度：



1.6 测量结果的表述

在本实例中，被校传感器直流电流50A点的测量结果为50.0086 A，其扩展不确定度为：*U*=0.0130 A，（*k*=2）。

2 交流电流测量不确定度评定

2.1概述

环境条件：温度：21℃，相对湿度：60%；

测量标准：6100B（电能功率标准源）、52120A（跨导放大器）、8508A交流标准电压表、适配单元（CTPS-U/B型电流传感器适配单元）；

被测对象：CT7731 交直流电流传感器；

测量方法：标准源表法（标准装置法），见7.2.3.2。

2.2 测量模型及不确定度来源

2.2.1 测量模型

被校传感器的基本误差可表示为：



式中：



由于传感器的误差以引用误差方式表示，且被校传感器的引用值是标称常量，可令，式（ 4）改写为：



测量方法采用标准源表法时，被校传感器输入一次测量电流测得值是交流标准电压表的读数*U*S与变换比的乘积，于是式（ 5）改写为：



实际上，传感器的误差综合了热漂移、非线性误差、迟滞误差、载流导体的偏心位置影响及杂散磁场干扰等。这些误差包含在重复性测量中。

2.2.2 不确定度来源分析

根据测量模型，基本误差的不确定来源包括以下几个部分：

1）被校传感器测量重复性引入的不确定度；

2）交流标准电流源准确度引入的不确定度；

3）交流标准电流源稳定度引入的不确定度；

4）交流标准电压表准确度引入的不确定度；

5）交流标准电压表分辨力引入的不确定度；

6）适配单元引入的不确定度。

2.3 标准不确定度分量的评定

2.3.1 被校传感器交流电流测量重复性引入的标准不确定度*u*1

在重复性测量条件下，对被校传感器满量程点（100 A，50 Hz）开展独立重复测量，结果如表 3所示。

表 3 重复性测量数据

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 测量次数 | 交流标准源设定值/(A) | 交流标准表示值/(V) | 变换比（10mV/A） | 被校传感器测得值/(A) |
| 1 | 100 | 1.0166 | 100 | 101.66 |
| 2 | 100 | 1.0165 | 100 | 101.65 |
| 3 | 100 | 1.0167 | 100 | 101.67 |
| 4 | 100 | 1.0165 | 100 | 101.65 |
| 5 | 100 | 1.0165 | 100 | 101.65 |
| 6 | 100 | 1.0166 | 100 | 101.66 |
| 7 | 100 | 1.0164 | 100 | 101.64 |
| 8 | 100 | 1.0164 | 100 | 101.64 |
| 9 | 100 | 1.0164 | 100 | 101.64 |
| 10 | 100 | 1.0164 | 100 | 101.64 |

测量结果的平均值：101.650 A；单次测量值的实验标准偏差： 0.011 A。

2.3.2 交流标准电流源准确度引入的标准不确定度*u*2

交流标准电流源经上级校准，给出的扩展不确定度*U*为0.03%，在区间内认为服从均匀分布，则：



2.3.3交流标准电流源稳定度引入的标准不确定度*u*3

交流标准电流源稳定度优于0.01%，服从均匀分布，则：



2.3.4交流标准电压表准确度引入的标准不确定度*u*4

交流标准电压表8508A测量1 V时相对于校准标准的不确定度为0.007%，服从均匀分布，被校传感器的变换比为10 mV/A，则：



2.3.5交流标准电压表分辨力引入的标准不确定度*u*5

查阅交流标准电压表8508A技术手册，其2 V档的分辨力为1 μV，因此引入的不确定度分量可以忽略。

2.3.6 适配单元引入的不确定度*u*6

校准用适配单元经上级计量机构校准，其误差限：±0.01%，则区间半宽度为：*a*=0.01%，区间内服从均匀分布，则：



2.4 合成标准不确定度

不确定度分量汇总表见表 4。

表 4 标准不确定度汇总表

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 标准不确定度来源 | 概率分布 | 评定方法 | 灵敏系数 | 不确定度分量 |
| 被校传感器测量重复性引入的不确定度*u*1 | 正态分布 | A类评定 | 1 | 0.011 A |
| 交流标准电流源准确度引入的不确定度*u*2 | 均匀分布 | B类评定 | 1 | 0.017 A |
| 交流标准电流源稳定度引入的不确定度*u*3 | 均匀分布 | B类评定 | 1 | 0.006 A |
| 交流标准电压表准确度引入的不确定度*u*4 | 均匀分布 | B类评定 | 1 | 0.004 A |
| 交流标准电压表分辨力引入的不确定度*u*5 | 均匀分布 | B类评定 | 1 | / |
| 适配单元引入的不确定度*u*6 | 均匀分布 | B类评定 | 1 | 0.006 A |

由于各不确定度分量独立不相关，且由于被校传感器以引用误差表示，则：



2.5 扩展不确定度

取包含因子*k*=2，则扩展不确定度：



2.6 测量结果的表述

在本实例中，被校传感器交流电流100 A点的测量结果为101.650 A，其扩展不确定度为：*U*=0.044 A，（*k*=2）。

3 阶跃响应时间测量不确定度评定

3.1概述

环境条件：温度：21℃，相对湿度：60%；

测量标准：5502A（多功能标准源）、52120A（跨导放大器）、A40B（同轴分流器）MSO7052A数字示波器、适配单元（CTPS-U/B型电流传感器适配单元）；

被测对象：DS50ID 交直流电流传感器；

测量方法：由5502A输出标准方波信号至52120A，52120A输出标准方波电流，按图4a接好校准线路，A40B同轴分流器的电压检测端子接至示波器的Ch1通道作为参考通道，被校电流传感器经适配单元变换后的电压接至示波器的Ch2通道作为比较通道。由示波器截取两个通道的响应波形，使用示波器的游标截取参考通道和比较通道的响应时间*t*1和*t*2，二者之差即为被校传感器的响应时间。校准方法详见7.2.7。

3.2 测量模型及不确定度来源

3.2.1 测量模型

被校传感器的响应时间可表示为：



式中：



3.2.2 不确定度来源分析

根据测量模型和测量方法，响应时间的不确定度主要来源包括以下几个部分：

1）被校传感器测量重复性引入的不确定度；

2）同轴分流器响应时间引入的不确定度；

3）示波器时间测量准确度引入的不确定度；

4）示波器通道延迟引入的不确定度；

5）适配单元采样电阻响应时间引入的不确定度。

3.3 标准不确定度分量的评定

3.3.1 被校传感器响应时间测量重复性引入的标准不确定度*u*1

在重复性测量条件下，对被校传感器的响应时间开展独立重复测量，结果如表 5所示。

表 5 响应时间测量结果

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 测量次数 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 响应时间/（μs） | 0.31 | 0.28 | 0.35 | 0.32 | 0.26 | 0.27 | 0.29 | 0.32 | 0.33 | 0.29 |

测量结果的平均值：0.302 μs，单次测量值的实验标准偏差：0.029 μs。

3.3.2 同轴分流器响应时间引入的标准不确定度*u*2

同轴分路器经评估，上升时间为0.024 μs，服从均匀分布，则：



3.3.3 示波器时间测量准确度引入的标准不确定度*u*3

示波器的时间测量最大允许误差0.1%，扫描时基10 μs，服从均匀分布，则：



3.3.4 示波器通道延迟引入的标准不确定度*u*4

示波器的通道延迟经评估为900 ps，因此引入的不确定度可忽略。

3.3.5 适配单元引入的标准不确定度*u*5

适配单元内部采样电阻选用的是精密合金箔电阻，其上升时间小于1 ns，因此引入的不确定度可忽略。

3.4 合成标准不确定度

不确定度分量汇总表见表 6。

表 6 标准不确定度汇总表

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 标准不确定度来源 | 概率分布 | 评定方法 | 灵敏系数 | 不确定度分量 |
| 被校传感器测量重复性引入的不确定度 | 正态分布 | A类评定 | 1 | 0.029 μs |
| 同轴分流器响应时间引入的不确定度 | 均匀分布 | B类评定 | 1 | 0.014 μs |
| 示波器时间测量准确度引入的不确定度 | 均匀分布 | B类评定 | 1 | 0.006 μs |
| 示波器通道延迟引入的不确定度 | 均匀分布 | B类评定 | / | / |
| 适配单元采样电阻响应时间引入的不确定度 | 均匀分布 | B类评定 | / | / |

由于各不确定度分量独立不相关，则：



3.5 扩展不确定度

取包含因子*k*=2，则扩展不确定度：



3.6 测量结果的表述

在本实例中，被校传感器响应时间测量结果为0.30 μs，其扩展不确定度为：

*U*=0.07 μs，（*k*=2）。

4 频率附加误差（相移）测量不确定度评定

4.1概述

环境条件：温度：21℃，相对湿度：60%；

测量标准：5502A（多功能标准源）、52120A（跨导放大器）、A40B（同轴分流器）CD-HPSS同步标准采集装置、适配单元（CTPS-U/B型电流传感器适配单元）；

被测对象：DS50ID 交直流电流传感器；

测量方法：由5502A输出2kHz的正弦波电压信号至52120A，52120A输出2 kHz的正弦波电流，按图3a接好校准线路，A40B同轴分流器的电压检测端子接至同步标准采集装置的Ch1通道作为参考通道，被校电流传感器经适配单元变换后的电压接至同步标准采集装置的Ch2通道作为比较通道。由同步标准采集装置测量得到Ch2通道相对于Ch1通道的角差，即为被校传感器频率在2 kHz的相移。校准方法详见7.2.8。

4.2 测量模型及不确定度来源

4.2.1 测量模型

被校传感器的相移可表示为：





4.2.2 不确定度来源分析

根据测量模型和测量方法，相移的不确定来源包括以下两个部分：

1）被校传感器相移测量的重复性引入的不确定度；

2）同步标准采集装置相移测量准确度引入的不确定度。

4.3 标准不确定度分量评定

4.3.1 被校传感器相移测量重复性引入的标准不确定度*u*1

在重复性测量条件下，对被校传感器的相移进行独立重复测量，结果如表 7所示。

表 7 相移测量结果

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 测量次数 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 相移/（°） | -0.020 | -0.018 | -0.007 | -0.015 | -0.022 | -0.017 | -0.028 | -0.027 | -0.019 | -0.018 |

测量结果的平均值：-0.0191°，单次测量值的实验标准偏差：0.0060°。

4.3.2 同步标准采集装置相位测量准确度引入的标准不确定度*u*2

经校准，同步标准采集装置相位测量准确度为0.01°，服从均匀分布，则：



4.4 合成标准不确定度

不确定度分量汇总表见表 8。

表 8 标准不确定度汇总表

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 标准不确定度来源 | 概率分布 | 评定方法 | 灵敏系数 | 不确定度分量 |
| 被校传感器测量重复性引入的不确定度 | 正态分布 | A类评定 | 1 | 0.0060° |
| 同步标准采集装置相位测量准确度引入的不确定度 | 均匀分布 | B类评定 | 1 | 0.0058° |

由于各不确定度分量独立不相关，则：



4.5 扩展不确定度

取包含因子*k*=2，则扩展不确定度：



4.6 测量结果的表述

在本实例中，被校传感器在频率2kHz处相移的测量结果为-0.019°，其扩展不确定度为：*U*=0.018°，（*k*=2）。