交变磁场线圈校准规范

测量不确定度评定报告

国防科技工业弱磁专业计量站

二〇二五年八月

交变磁场线圈校准规范

测量不确定度评定报告

1 线圈常数校准（直接感应法）的测量不确定度评定

1.1 概述

根据JJF 1059.1规定的方法，对1 kHz频率点的线圈常数校准进行测量不确定度评定。选择的磁场校准点为90 μT；标准测量线圈在1kHz的测量线圈常数最大允许误差为±0.03%；交变电流源在1kHz的电流准确度为±0.015%；交流电压表的最大允许误差为±（0.007%读数+0.002%量程）；使用数字多用表测量频率，最大允许误差为±0.002%；1kHz点的最大干扰磁场为0.5nT。

1.2 测量模型

线圈常数的测量模型为：



各输入量间不相关，不考虑影响量时，线圈常数校准的相对不确定度为：



1.3 不确定度主要来源

a) 由测量重复性引入的不确定度分量*u*(*r*)

b) 由交流电压测量不准引入的不确定度分量*u*(*USW*)

c) 由频率测量不准引入的不确定度分量*u*(*f*)

d) 由交流电流源不准引入的不确定度分量*u*(*I*)

e) 由测量线圈常数不准引入的不确定度分量*u* (*KSW*)

f) 由磁轴对不准引入的不确定度分量*u*(*θ*)

g) 由干扰磁场引入的不确定度分量*u*(δ*B*)

1.4 标准不确定度分量评定

1.4.1 由测量重复性引入的不确定度分量

线圈常数的测量重复性用实验标准偏差表示，重复测量10次，用贝塞尔法计算实验标准偏差。线圈常数重复性测量数据见表1.1。

表1.1 线圈常数重复性测量数据

|  |  |
| --- | --- |
| 测量次数 | 线圈常数  *KB*/(μT/A) |
| 第1次 | 592.35 |
| 第2次 | 592.35 |
| 第3次 | 592.34 |
| 第4次 | 592.33 |
| 第5次 | 592.35 |
| 第6次 | 592.34 |
| 第7次 | 592.34 |
| 第8次 | 592.36 |
| 第9次 | 592.34 |
| 第10次 | 592.35 |
| 平均值 | 592.34 |

以单次测量值作为测量结果时，由测量重复性引入的不确定度分量为：



1.4.2 由交流电压测量不准引入的不确定度分量

交流电压测量用的最大允许误差为±（0.007%读数+0.002%量程），标准测量线圈的感应电压约为7.5V，使用10V档，按均匀分布考虑，取*k*=，则：



1.4.3 由频率测量不准引入的不确定度分量

数字多用表的频率档经过校准，最大允许误差不超过±0.002%，按均匀分布考虑，取*k*=，则：



1.4.4 由交流电流源不准引入的不确定度分量

交流电流源输出电流的最大允许误差为±0.015%，按均匀分布考虑，*k*=，则：



1.4.5 由测量线圈常数不准引入的不确定度分量

标准测量线圈的测量线圈常数测量不确定度为0.02%，*k*=2，则：



1.4.6 由磁轴对不准引入的不确定度分量

根据经验，经调节后，标准测量线圈与被校准交变磁场线圈的磁轴夹角不超过0.3°，按均匀分布考虑，*k*=，则：



1.4.7 由干扰磁场引入的不确定度分量

1kHz点的最大干扰磁场为0.5 nT，按均匀分布考虑，取*k*=，则：



1.5 标准不确定度分量一览表

从以上评定结果可以看出，由频率测量、磁轴不对准、干扰磁场引入的不确定度分量不到测量线圈常数不准引入的不确定度分量的十分之一，可忽略不计。则

表1.2 线圈常数校准的主要不确定度分量一览表

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 不确定度分量 | 不确定度来源 | 评定方法 | 分布 | *k*值 | *u*r |
| *u*r(*r*) | 测量重复性 | A | 正态 | 1 | 0.0081% |
| *u*r(*USW*) | 交流电压测量不准 | B | 均匀 |  | 0.0056% |
| *u*r(*f*) | 频率测量不准 | B | 均匀 |  | 0.0012% |
| *u*r(*I*) | 交变电流源不准 | B | 均匀 |  | 0.0087% |
| *u*r(*KSW*) | 测量线圈常数不准 | B | 均匀 | 2 | 0.01% |
| *u*r(*θ*) | 磁轴对不准 | B | 均匀 |  | 0.0027% |
| *u*r(δ*B*) | 干扰磁场 | B | 均匀 |  | 0.0003% |

1.6 相对合成标准不确定度的计算

各个不确定度分量独立不相关，则线圈常数校准的相对合成标准不确定度为：



1.7 相对扩展不确定度的评定

取*k*=2，线圈常数校准的相对扩展不确定度为：



2 线圈常数校准（感应补偿法）的测量不确定度评定

2.1 概述

根据JJF 1059.1规定的方法，对1 kHz频率点的线圈常数校准进行测量不确定度评定。选择的磁场校准点为90 μT；标准测量线圈在1kHz的测量线圈常数最大允许误差为±0.03%；交变电流源在1kHz的电流准确度为±0.015%；分压电阻箱电阻：*U*r=0.008%（*k*=2）；1kHz点的最大干扰磁场为0.5nT。

2.2 测量模型

线圈常数的测量模型为：



各输入量间不相关，不考虑影响量时，线圈常数校准的相对不确定度为：



2.3 不确定度主要来源

a) 由测量重复性引入的不确定度分量*u*(*r*)

b) 由分压系数不准引入的不确定度分量*u*(*A*)

c) 由标准互感器不准引入的不确定度分量*u*(*M*)

d) 由测量线圈常数不准引入的不确定度分量*u* (*KSW*)

e) 由磁轴对不准引入的不确定度分量*u*(*θ*)

2.4 标准不确定度分量评定

2.4.1 由测量重复性引入的不确定度分量

线圈常数的测量重复性用实验标准偏差表示，重复测量10次，用贝塞尔法计算实验标准偏差。线圈常数重复性测量数据见表2.1。

表2.1 线圈常数重复性测量数据

|  |  |
| --- | --- |
| 测量次数 | 线圈常数  *KB*/(μT/A) |
| 第1次 | 592.27 |
| 第2次 | 592.26 |
| 第3次 | 592.27 |
| 第4次 | 592.25 |
| 第5次 | 592.26 |
| 第6次 | 592.25 |
| 第7次 | 592.27 |
| 第8次 | 592.26 |
| 第9次 | 592.26 |
| 第10次 | 592.27 |
| 平均值 | 592.26 |

以单次测量值作为测量结果时，由测量重复性引入的不确定度分量为：



2.4.2 由分压系数不准引入的不确定度分量

分压用交流电阻箱经过校准，*U*r=0.02%，*k*=2，则：



2.4.3 由标准互感器不准引入的不确定度分量

标准互感器经过校准，*U*r=0.02%，*k*=2，则：



2.4.4 由测量线圈常数不准引入的不确定度分量

测量线圈常数经过校准，*U*r=0.02%，*k*=2，则：



2.4.5 由磁轴对不准引入的不确定度分量

根据经验，经调节后，标准测量线圈与被校准交变磁场线圈的磁轴夹角不超过0.3°，按均匀分布考虑，*k*=，则：



2.5 标准不确定度分量一览表

表2.2 线圈常数校准的主要不确定度分量一览表

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 不确定度分量 | 不确定度来源 | 评定方法 | 分布 | *k*值 | *u*r |
| *u*r(*r*) | 测量重复性 | A | 正态 | 1 | 0.0075% |
| *u*r(*A*) | 分压系数不准 | B | 均匀 | 2 | 0.01% |
| *u*r(*M*) | 互感器不准 | B | 均匀 | 2 | 0.01% |
| *u*r(*KSW*) | 测量线圈常数不准 | B | 均匀 | 2 | 0.01% |
| *u*r(*θ*) | 磁轴对不准 | B | 均匀 |  | 0.0027% |

2.6 相对合成标准不确定度的计算

各个不确定度分量独立不相关，则线圈常数校准的相对合成标准不确定度为：



2.7 相对扩展不确定度的评定

取*k*=2，线圈常数校准的相对扩展不确定度为：



3 线圈常数校准（交变磁强计法）的测量不确定度评定

3.1 概述

根据JJF 1059.1规定的方法，对1 kHz频率点的线圈常数校准进行测量不确定度评定。选择的磁场校准点为90 μT；交变磁强计在1kHz的测量线圈常数最大允许误差为±0.5%；交变电流源在1kHz的电流准确度为±0.015%；1kHz点的最大干扰磁场为0.5nT。

3.2 测量模型

线圈常数的测量模型为：



各输入量间不相关，不考虑影响量时，线圈常数校准的相对不确定度为：



3.3 不确定度主要来源

a) 由测量重复性引入的不确定度分量*u*(*r*)

b) 由交变磁强计示值不准引入的不确定度分量*u* (*B*)

c) 由交流电流源不准引入的不确定度分量*u*(*I*)

d) 由磁轴对不准引入的不确定度分量*u*(*θ*)

e) 由干扰磁场引入的不确定度分量*u*(δ*B*)

3.4 标准不确定度分量评定

3.4.1 由测量重复性引入的不确定度分量

线圈常数的测量重复性用实验标准偏差表示，重复测量10次，用贝塞尔法计算实验标准偏差。线圈常数重复性测量数据见表3.1。

表3.1 线圈常数重复性测量数据

|  |  |
| --- | --- |
| 测量次数 | 线圈常数  *KB*/(μT/A) |
| 第1次 | 593.1 |
| 第2次 | 593.1 |
| 第3次 | 593.2 |
| 第4次 | 593.2 |
| 第5次 | 593.1 |
| 第6次 | 593.1 |
| 第7次 | 593.2 |
| 第8次 | 593.3 |
| 第9次 | 593.3 |
| 第10次 | 593.2 |
| 平均值 | 593.2 |

以单次测量值作为测量结果时，由测量重复性引入的不确定度分量为：



3.4.2 由交变磁强计示值不准引入的不确定度分量

交变磁强计在1kHz处的最大允许误差为±0.5%，*k*=，则：



3.4.3 由交流电流源不准引入的不确定度分量

交流电流源输出电流的最大允许误差为±0.015%，按均匀分布考虑，*k*=，则：



3.4.4 由磁轴对不准引入的不确定度分量

根据经验，经调节后，交变磁强计探头与被校准交变磁场线圈的磁轴夹角不超过0.3°，按均匀分布考虑，*k*=，则：



3.4.5 由干扰磁场引入的不确定度分量

1kHz点的最大干扰磁场为0.5 nT，按均匀分布考虑，取*k*=，则：



3.5 标准不确定度分量一览表

表3.2 线圈常数校准的主要不确定度分量一览表

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 不确定度分量 | 不确定度来源 | 评定方法 | 分布 | *k*值 | *u*r |
| *u*r(*r*) | 测量重复性 | A | 正态 | 1 | 0.0088% |
| *u*r(*B*) | 交变磁强计示值不准 | B | 均匀 |  | 0.29% |
| *u*r(*I*) | 交变电流源不准 | B | 均匀 |  | 0.0059% |
| *u*r(*θ*) | 磁轴对不准 | B | 均匀 |  | 0.0027% |
| *u*r(δ*B*) | 干扰磁场 | B | 均匀 |  | 0.0003% |

3.6 相对合成标准不确定度的计算

各个不确定度分量独立不相关，则线圈常数校准的相对合成标准不确定度为：



3.7 相对扩展不确定度的评定

取*k*=2，线圈常数校准的相对扩展不确定度为：



4 磁场均匀度校准的测量不确定度评定

4.1 概述

根据JJF 1059.1规定的方法，在1 kHz频率点对磁场均匀度校准进行测量不确定度评定。选择的磁场校准点为90 μT；交流电压表的短期稳定性为0.002%；交变电流源在1kHz的电流短期稳定性0.01%/10 min；1kHz点的最大干扰磁场为0.5nT。

4.2 测量模型

交变磁场线圈磁场均匀区的测量模型为：



式中：

**――被校准交变磁场线圈的磁场均匀度；

*KBi*──被校交变磁场线圈均匀区内不同位置的线圈常数，T/A；

*KB*,O──被校交变磁场线圈均匀区中心点的线圈常数，T/A。

*KBi*、*KB*0强相关，且*Ki*≈*K*0。则不考虑影响量时，均匀区的测量不确定度为0，因此只需要考虑各种影响量。

4.3 测量不确定度主要来源

1. 由交流电压表短期稳定性引入的不确定度分量*u*(*U*S)
2. 由交流电流源的短期稳定性引入的不确定度分量*u*(*I*S)
3. 由标准测量线圈与被校交变磁场线圈磁轴不一致引入的不确定度分量*u*(*θ*)
4. 由干扰磁场引入的不确定度分量*u*(*δB*)

4.4 标准不确定度分量评定

4.4.1 由交流电压表短期稳定性引入的不确定度分量

交流电压表的短期稳定性为0.002%/10min，按均匀分布考虑，*k*=，则：



4.4.2 由交流电流源短期稳定性引入的不确定度分量

交流电流源的短期稳定性为0.01%/10min，按均匀分布考虑，*k*=，则：



4.4.3 由磁轴对不准引入的不确定度分量

根据经验，经调节后，交变磁强计探头与被校准交变磁场线圈的磁轴夹角不超过0.3°，按均匀分布考虑，*k*=，则：



4.4.4 由干扰磁场引入的不确定度分量

1kHz点的最大干扰磁场为0.5 nT，按均匀分布考虑，取*k*=，则：



4.5 标准不确定度分量一览表

表4.1 磁场均匀度校准的主要不确定度分量一览表

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 不确定度分量 | 不确定度来源 | 评定方法 | 分布 | *k*值 | *u* |
| *u*(*U*S) | 交流电压表短期稳定性 | B | 均匀 |  | 0.0012% |
| *u*(*I*S) | 交变电流源不准 | B | 均匀 |  | 0.0059% |
| *u*(*θ*) | 磁轴对不准 | B | 均匀 |  | 0.0027% |
| *u*(δ*B*) | 干扰磁场 | B | 均匀 |  | 0.0003% |

4.6 合成标准不确定度的计算

各个不确定度分量独立不相关，则磁场均匀度校准的合成标准不确定度为：



4.7 扩展不确定度的评定

取*k*=2，磁场均匀度校准的扩展不确定度为：

5 磁场线性度校准的测量不确定度评定

5.1 概述

根据JJF 1059.1规定的方法，在1 kHz频率点对磁场线性度校准进行测量不确定度评定。选择的磁场校准点为90 μT；交流电压表的短期稳定性为0.002%；交变电流源在1kHz的电流短期稳定性0.01%/10 min；1kHz点的最大干扰磁场为0.5nT。

5.2 测量模型

交变磁场线圈的均匀区的数学模型为：



式中：

*Ux*──标准测量线圈在不同磁场校准点的感应电压测量值，V；

──标准测量线圈在不同磁场校准点的感应电压拟合值，V；

*U*max──标准测量线圈的最大感应电压，V。

由于*Ux*-＜＜*US*，因此可以只考虑*Ux*-引入的不确定度分量。*Ux*与强相关，因此只考虑影响量。

5.3 测量不确定度主要来源

1. 由交流电压表非线性引入的不确定度分量*u*(*U*L)
2. 由交变电流源的非线性引入的不确定度分量*u*(*I*L)
3. 由干扰磁场引入的不确定度分量*u*(*δB*)
4. 由线性拟合引入的不确定度分量

5.4 标准不确定度分量评定

5.4.1 由交流电压表的非线性性引入的不确定度分量

交流电压表的非线性性不超过0.002%，按均匀分布考虑，*k*=，则：



5.4.2 由交流电流源的非线性引入的不确定度分量

交流电流源的非线性不超过0.01%，按均匀分布考虑，*k*=，则：



5.4.3 由干扰磁场引入的不确定度分量

1kHz点的最大干扰磁场为0.5 nT，按均匀分布考虑，取*k*=，则：



5.4.4 由线性拟合引入的不确定度分量

由交流电压线性拟合引入的不确定度分量为：



根据经验，*r*一般大于0.9999，*n*=6，则，而，可取。

5.5 标准不确定度分量一览表

表5.1 磁场线性度校准的主要不确定度分量一览表

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 不确定度分量 | 不确定度来源 | 评定方法 | 分布 | *k*值 | *u* |
| *u*(*U*S) | 交流电压表非线性 | B | 均匀 |  | 0.0012% |
| *u*(*I*S) | 交变电流源非线性 | B | 均匀 |  | 0.0059% |
| *u*(δ*B*) | 干扰磁场 | B | 均匀 |  | 0.0003% |
|  | 线性拟合 | B | 均匀 |  | 0.007% |

5.6 合成标准不确定度的计算

各个不确定度分量独立不相关，则磁场线性度校准的合成标准不确定度为：



5.7 扩展不确定度的评定

取*k*=2，磁场线性度校准的扩展不确定度为：