# 探测（测量）线圈常数测量不确定度评定示例

A.1 测量不确定度评定方法

根据JJF1059.1规定的方法,对探测（测量）线圈常数测量的校准结果进行测量不确定度评定。

A.2 采用冲击法校准探测（测量）线圈常数的测量不确定度

A.2.1 测量模型

$$K\_{SN}=\frac{Φ}{∆I×K}$$

式中：

$Φ$——磁通计示值，Wb；

$I$——数字多用表示值，A；

$K$——螺线管线圈常数，T/A。

A.2.2 测量不确定度的主要来源

磁通量示值误差的测量不确定度的主要来源包括：

1. 由测量重复性引入的不确定度分量*u*0；
2. 由磁通计的读数引入的不确定度分量*u*1；
3. 由数字多用表的读数引入的不确定度分量*u*2；
4. 由螺线管常数引入的不确定度分量*u*3；

由于各不确定度分量间不相关,所以合成标准不确定度的计算公式为：

$$u=\sqrt{c\_{0}^{2}u\_{0}^{2}+c\_{1}^{2}u\_{1}^{2}+c\_{2}^{2}u\_{2}^{2}+c\_{3}^{2}u\_{3}^{2}}$$

式中各灵敏系数分别为：

$$c\_{0}=1$$

$$c\_{1}=\frac{∂K\_{SN}}{∂Φ}=\frac{1}{IK}$$

$$c\_{2}=\frac{∂K\_{SN}}{∂I}=−\frac{Φ}{KI^{2}}$$

$$c\_{3}=\frac{∂K\_{SN}}{∂K}=−\frac{Φ}{IK^{2}}$$

A.2.3 各分量的标准不确定度评定

A.2.3.1由测量重复性引入的不确定度分量*u*0

重复性测量数据见表A.2.1。

探测（测量）线圈常数的测量重复性不确定度由实验标准差来表示，根据表A.2.1中的数据，连续测量10次探测（测量）线圈常数的实验标准偏差为：

$$s=5.007×10^{−6 } m^{2}$$

由测量重复性引入的标准不确定度为：

$$u\_{0}=s=5.007×10^{−6 } m^{2}$$

其灵敏系数为：

$$c\_{0}=1$$

表A.2.1 探测（测量）线圈常数重复性测量数据

|  |  |
| --- | --- |
| 测量次数 | 线圈常数(m2) |
| 第1次 | 0.082630  |
| 第2次 | 0.082617  |
| 第3次 | 0.082628  |
| 第4次 | 0.082630  |
| 第5次 | 0.082632  |
| 第6次 | 0.082629  |
| 第7次 | 0.082624  |
| 第8次 | 0.082633  |
| 第9次 | 0.082631  |
| 第10次 | 0.082634  |

A.2.3.2由磁通计的读数引入的不确定度分量*u*1

使用磁通计测量探测（测量）线圈上的磁通量，磁通计应经过校准，其在校准点按包含因子*k*=2 给出的扩展不确定度为$Φ$=0.000008 Wb，则由磁通计的读数引入的不确定度分量为：

$$u\_{1}=\frac{Φ}{k}=\frac{0.000008 Wb}{2}=0.000004 Wb$$

其灵敏系数为：

$$c\_{1}=\frac{1}{IK}=\frac{1}{7.83 A×0.012771 T/A}=10.0003 T^{−1}$$

A.2.3.3 由数字多用表的读数引入的不确定度分量*u*2

使用数字多用表测量探测（测量）线圈的电流值，数字多用表应经过校准，其在校准点按包含因子*k*=2 给出的扩展不确定度为*I*=0.004 A，由数字多用表的读数引入的不确定度分量为：

$$u\_{2}=\frac{I}{k}=\frac{0.004 A }{2}=0.002 A$$

其灵敏系数为：

$$c\_{2}=−\frac{Φ}{KI^{2}}=−\frac{0.008263 Wb}{0.012771 T/A×(7.83 A)^{2}}=−0.010553325 Wb/(T∙A)$$

A.2.3.4由螺线管常数引入的不确定度分量*u*3

螺线管常数的不确定度为*u*3=0.0000026 T/A(*k*=2)，由螺线管常数引入的不确定度分量为：

$$u\_{3}=\frac{K}{k}=\frac{0.0000026 T/A }{2}=0.0000013 T/A$$

其灵敏系数为：

$$c\_{3}=−\frac{Φ}{IK^{2}}=−\frac{0.008263 Wb}{7.83 A×(0.012771 T/A)^{2}}=−6.470326272 Wb∙A/T^{2}$$

A.2.4 不确定度分量汇总表

表 A.2.2 不确定度分量汇总表

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 不确定度分量 | 不确定度来源 | 量值 | 灵敏系数 | 标准不确定度 |
| *u*0 | 测量重复性 | 5.007×10-6 m2 | 1 | 5.007×10-6 m2 |
| *u*1 | 磁通计的读数 | 4.00×10-6 Wb | 10.0003 T-1 | 4.00×10-5 m2 |
| *u*2 | 数字多用表的读数 | 2.00×10-3 A | -1.06×10-2 Wb/（T▪A） | 2.11×10-5 m2 |
| *u*3 | 螺线管常数 | 1.30×10-6 T/A | -6.47 Wb▪A/T2 | 8.41×10-6 m2 |

A2.5 合成标准不确定度

探测（测量）线圈常数测量的合成标准不确定度：

$$u=\sqrt{c\_{0}^{2}u\_{0}^{2}+c\_{1}^{2}u\_{1}^{2}+c\_{2}^{2}u\_{2}^{2}+c\_{3}^{2}u\_{3}^{2}}=0.0000463 m^{2}$$

A.2.6 扩展不确定度

探测（测量）线圈常数测量的扩展不确定度：

*U*=*k*×*u*

式中：

*k*—包含因子。

取*k*=2,则探测（测量）线圈常数的扩展不确定度：

*U*=2×*u* =0.0000926 m2 =0.93 cm2

A.3 采用抽拉法校准探测（测量）线圈常数的测量不确定度

A.3.1 测量模型

$$K\_{SN}=\frac{Φ}{B}$$

式中：

$Φ$——磁通计示值，Wb；

*B*——磁通密度，T。

A.3.2 测量不确定度的主要来源

磁通量示值误差的测量不确定度的主要来源包括：

a)由测量重复性引入的不确定度分量*u*0；

b)由磁通计的读数引入的不确定度分量*u*1；

c)由特斯拉计的读数引入的不确定度分量*u*2；

由于各不确定度分量间不相关,所以合成标准不确定度的计算公式为：

$$u=\sqrt{c\_{0}^{2}u\_{0}^{2}+c\_{1}^{2}u\_{1}^{2}+c\_{2}^{2}u\_{2}^{2}}$$

式中各灵敏系数分别为：

$$c\_{0}=1$$

$$c\_{1}=\frac{∂K\_{SN}}{∂Φ}=\frac{1}{B}$$

$$c\_{2}=\frac{∂K\_{SN}}{∂B}=−\frac{Φ}{B^{2}}$$

A.3.3 各分量的标准不确定度评定

A.3.3.1由测量重复性引入的不确定度分量*u*0

重复性测量数据见表A.3.1。

探测（测量）线圈常数的测量重复性不确定度由实验标准差来表示，根据表A.3.1中的数据，连续测量10次探测（测量）线圈常数的实验标准偏差为：

$$s=1.44×10^{−5} m^{2}$$

由测量重复性引入的标准不确定度为：

$$u\_{0}=s=1.44×10^{−5} m^{2}$$

其灵敏系数为：

$$c\_{0}=1$$

表A.3.1 探测（测量）线圈常数重复性测量数据

|  |  |
| --- | --- |
| 测量次数 | 线圈常数(m2) |
| 第1次 | 0.08268  |
| 第2次 | 0.08269  |
| 第3次 | 0.08270  |
| 第4次 | 0.08270  |
| 第5次 | 0.08270  |
| 第6次 | 0.08270  |
| 第7次 | 0.08272  |
| 第8次 | 0.08272  |
| 第9次 | 0.08272  |
| 第10次 | 0.08272  |

A.3.3.2由磁通计的读数引入的不确定度分量*u*1

使用磁通计测量探测（测量）线圈上的磁通量，磁通计应经过校准，其在校准点按包含因子*k*=2 给出的扩展不确定度为$Φ$=0.000166 Wb，则由磁通计的读数引入的不确定度分量为：

$$u\_{1}=\frac{Φ}{k}=\frac{0.000166 Wb}{2}=0.000083 Wb$$

其灵敏系数为：

$$c\_{1}=\frac{1}{B}=\frac{1}{1T}=1.00 T^{−1}$$

A.3.3.3 由特斯拉计的读数引入的不确定度分量*u*2

使用特斯拉计测量电磁铁产生的磁通密度，特斯拉计应经过校准，其在校准点按包含因子*k*=2 给出的扩展不确定度为*B*=0.0002 T，由特斯拉计的读数引入的不确定度分量为：

$$u\_{2}=\frac{B}{k}=\frac{0.0002 T }{2}=0.0001 T$$

其灵敏系数为：

$$c\_{2}=−\frac{Φ}{B^{2}}=−\frac{0.08271 Wb}{(1 T)^{2}}=−0.08271 Wb/T^{2}$$

A.3.4 不确定度分量汇总表

表A.3.2 不确定度分量汇总表

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 不确定度分量 | 不确定度来源 | 量值 | 灵敏系数 | 标准不确定度 |
| *u*0 | 测量重复性 | 1.44×10-5 m2 | 1 | 1.44×10-5 m2 |
| *u*1 | 磁通计 | 8.3×10-5 Wb | 1 T-1 | 8.30×10-5 m2 |
| *u*2 | 特斯拉计 | 1×10-4 T | -0.08271 Wb/T2 | -8.27×10-6 m2 |

A.3.5 合成标准不确定度

探测（测量）线圈常数测量的合成标准不确定度：

$$u=\sqrt{c\_{0}^{2}u\_{0}^{2}+c\_{1}^{2}u\_{1}^{2}+c\_{2}^{2}u\_{2}^{2}}=0.0000846 m^{2}$$

A.3.6 扩展不确定度

探测（测量）线圈常数测量的扩展不确定度：

*U*=*k*×*u*

式中：

*k*—包含因子。

取*k*=2,则探测（测量）线圈常数的扩展不确定度：

*U*=2×*u* =0.000169 m2=1.7 cm2

A.4 采用低频交流法校准探测（测量）线圈匝面积的测量不确定度

A.4.1 测量模型

$$K\_{SN}=\frac{U\_{2}R}{2πfKU\_{1}}$$

式中：

*U*1—分流器上的电压有效值，V；

*U*2—探测（测量）线圈的感应电压有效值，V；

*R*—分流器电阻值，Ω；

*f*—电流的频率，Hz；

*K*—螺线管常数，T/A。

A.4.2 测量不确定度的主要来源

磁通量示值误差的测量不确定度的主要来源包括：

1. 由测量重复性引入的不确定度分量*u*0；
2. 由分流器上的电压有效值的示值误差引入的不确定度分量*u*1；
3. 由探测（测量）线圈的感应电压有效值的示值误差引入的不确定度分量*u*2；
4. 由分流器值引入的不确定度分量*u*3；
5. 由频率计的示值误差引入的不确定度分量*u*4；
6. 由螺线管常数引入的不确定度分量*u*5。

由于各不确定度分量间不相关,所以合成标准不确定度的计算公式为：

$$u=\sqrt{c\_{0}^{2}u\_{0}^{2}+c\_{1}^{2}u\_{1}^{2}+c\_{2}^{2}u\_{2}^{2}+c\_{3}^{2}u\_{3}^{2}+c\_{4}^{2}u\_{4}^{2}+c\_{5}^{2}u\_{5}^{2}}$$

式中各灵敏系数分别为：

$$c\_{0}=1$$

$$c\_{1}=−\frac{U\_{2}R}{2πfKU\_{1}^{2}}$$

$$c\_{2}=\frac{R}{2πfKU\_{1}}$$

$$c\_{3}=\frac{U\_{2}}{2πfKU\_{1}}$$

$$c\_{4}=−\frac{U\_{2}R}{2πf^{2}KU\_{1}}$$

$$c\_{5}=−\frac{U\_{2}R}{2πfK^{2}U\_{1}}$$

A.4.3 各分量的标准不确定度评定

A.4.3.1由测量重复性引入的不确定度分量*u*0

重复性测量数据见表A.4.1。

匝面积的测量重复性不确定度由实验标准差来表示，根据表A.4.1中的数据，连续测量10次匝面积的实验标准偏差为：

$$s=1.658×10^{−5} m^{2}$$

由测量重复性引入的标准不确定度为：

$$u\_{0}=s=1.658×10^{−5} m^{2}$$

其灵敏系数为：

$$c\_{0}=1$$

表A.4.1 探测（测量）线圈常数重复性测量数据

|  |  |
| --- | --- |
| 测量次数 | 线圈常数(m2) |
| 第1次 | 0.082834 |
| 第2次 | 0.082853 |
| 第3次 | 0.082868 |
| 第4次 | 0.082824 |
| 第5次 | 0.082846 |
| 第6次 | 0.082836 |
| 第7次 | 0.082868 |
| 第8次 | 0.082822 |
| 第9次 | 0.082858 |
| 第10次 | 0.082842 |

A.4.3.2由分流器上的电压有效值的示值误差引入的不确定度分量*u*1

使用数字多用表测量分流器上的电压有效值，数字多用表应经过校准，其在校准点按包含因子*k*=2 给出的扩展不确定度为*U*1=0.0011 mV，则由分流器上的电压有效值的示值误差引入的不确定度分量为：

$$u\_{1}=\frac{U\_{1}}{k}=\frac{0.0011 mV }{2}=0.00055 mV=5.5×10^{−7 } V$$

其灵敏系数为：

$$c\_{1}=−\frac{U\_{2}R}{2πfKU\_{1}^{2}}=−\frac{33.239 V∗0.1 Ω}{2∗3.1415926∗10 Hz∗0.012771 T/A∗（50 V）^{2}}$$

$=−1.66×10^{−3}$ m2/V

A.4.3.3 由探测（测量）线圈的感应电压有效值的示值误差引入的不确定度分量*u*2

使用数字多用表测量探测（测量）线圈的感应电压有效值，数字多用表应经过校准，其在校准点按包含因子*k*=2 给出的扩展不确定度为*U*2=0.0013 mV，由探测（测量）线圈的感应电压有效值的示值误差引入的不确定度分量为：

$$u\_{2}=\frac{U\_{2}}{k}=\frac{0.0013 mV }{2}=0.00065 mV=6.5×10^{−7} V$$

其灵敏系数为：

$$c\_{2}=\frac{R}{2πfKU\_{1}}=−\frac{0.1 Ω}{2∗3.1415926∗10 Hz∗0.012771 T/A∗50 V}$$

$$=2.50×10^{−3} m^{2}/V$$

A.4.3.4由分流器电阻值引入的不确定度分量*u*3

分流器电阻值的不确定度为*U*3=5×10-5 Ω(*k*=2 )，由分流器电阻值引入的不确定度分量为：

$$u\_{3}=\frac{U\_{3}}{k}=\frac{5×10^{−5 }Ω }{2}=2.5×10^{−5} Ω $$

其灵敏系数为：

$$c\_{3}=\frac{U\_{2}}{2πfKU\_{1}}=−\frac{33.239 V}{2∗3.1415926∗10 Hz∗0.012771 T/A∗50 V}$$

$$=−8.28×10^{−1} m^{2}/Ω$$

A.4.3.5由频率计的示值误差引入的不确定度分量*u*4

频率计应经过校准，其在校准点按包含因子*k*=2 给出的扩展不确定度为*u*4=$2×10^{−6}$ Hz，由频率计的示值误差引入的不确定度分量为：

$u\_{4}=1×10^{−6 } $Hz

其灵敏系数为：

$$c\_{4}=−\frac{U\_{2}R}{2πf^{2}KU\_{1}}=−\frac{33.239 V∗0.1 Ω}{2∗3.1415926∗10^{2} Hz∗0.012771 T/A∗50 V}$$

$$=−8.28×10^{−3 }m^{2}/Hz$$

A.4.3.6由螺线管常数引入的不确定度分量*u*5

螺线管常数的不确定度为*u*5=0.0026 mT/A(*k*=2 )，由螺线管常数引入的不确定度分量为：

$u\_{5}=1.3×10^{−6} $T/A

其灵敏系数为：

$$c\_{5}=−\frac{U\_{2}R}{2πfK^{2}U\_{1}}=−\frac{33.239 V∗0.1 Ω}{2∗3.1415926∗10 Hz∗(0.012771 T/A)^{2}∗50 V}$$

$$=−9.76 m^{2}▪A/T$$

A.4.4 不确定度分量汇总表

表A.4.2 不确定度分量汇总表

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 不确定度分量 | 不确定度来源 | 量值 | 灵敏系数 | 标准不确定度 |
| *u*0 | 测量重复性 | 1.658×10-5 m2 | 1 | 1.658×10-5 m2 |
| *u*1 | 分流器上的电压有效值 | 5.5×10-7 V | $$−1.66×10^{−3} m^{2}/V$$ | 9.11×10-10 m2 |
| *u*2 | 探测（测量）线圈的感应电压有效值 | 6.5×10-7 V | $$2.50×10^{−3} m^{2}/V$$ | 1.62×10-9 m2 |
| *u*3 | 分流器 | 2.5×10-5 $Ω$ | $$−8.28×10^{−1} m^{2}/Ω$$ | 2.07×10-5 m2 |
| *u*4 | 频率计 | 1×10-6 Hz | $$−8.28×10^{−3} m^{2}/Hz$$ | 8.28×10-9 m2 |
| *u*5 | 螺线管常数 | 1.3×10-6 T/A | $$−9.76 m^{2}▪A/T$$ | 1.27×10-5 m2 |

A4.5 合成标准不确定度

探测（测量）线圈匝面积测量的合成标准不确定度：

$$u=\sqrt{c\_{0}^{2}u\_{0}^{2}+c\_{1}^{2}u\_{1}^{2}+c\_{2}^{2}u\_{2}^{2}+c\_{3}^{2}u\_{3}^{2}+c\_{4}^{2}u\_{4}^{2}+c\_{5}^{2}u\_{5}^{2}}=0.0000294 m^{2}$$

A.4.6 扩展不确定度

探测（测量）线圈匝面积测量的扩展不确定度：

*U*=*k*×*u*

式中：

*k*—包含因子。

取*k*=2,则探测（测量）线圈匝面积的扩展不确定度：

*U*=2×*u* =0.0000588 m2=0.59 cm2