

ICS XXX
X. XX

T/CPSS

中国电源学会团体标准

T/CPSS XXXX-XXXX

代替：

核聚变装置用电流传感器检测规范

Specification test current sensors in fusion power supply

(征求意见稿)

(本稿完成日期：2017-6-30)

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

中国电源学会 发布

目 次

前言	III
引言	IV
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 电流传感器原理	2
5 试验条件	2
6 仪器设备	2
6.1 检测用标准电流传感器	2
6.2 测量仪器的选择	3
6.3 检测用电源	3
6.4 绝缘电阻表	3
6.5 耐压试验表	3
7 检测项目	3
8 外观检查	4
9 绝缘性能	4
9.1 绝缘电阻测试	4
9.2 绝缘强度测试	4
10 准确度等级检测试验	4
10.1 检测方法	4
10.2 直接检测法	4
11 频率响应特性的检测	6
11.1 检测项目	6
11.2 试验电流源和测量设备要求	6
11.3 检测方法	6
11.4 试验数据处理	7
12 环境影响试验	8
12.1 温升测试	8
12.2 运输过程中的振动与冲击	9
12.3 环境耐受测试	9
13 电磁兼容考核	10
13.1 电磁兼容要求	10
13.2 测试条件	10
13.3 测试结果的评估	10
附录 A（资料性附录） 直接比较法检测电流传感器比例系数测量不确定度评定	11
附录 B（资料性附录） 电流传感器校变比准值示值误差的符合性评定	16

附录 C（资料性附录）	电流传感器校变比准值示值误差的符合性评定示例.....	18
附录 D（资料性附录）	电流传感器校电磁兼容项目测试.....	24
参考文献	29

中国电源学会团体标准
征求意见稿

前 言

本标准依据GB/T 1.1-2009起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本标准由中国电源学会特种电源专业委员会提出并解释。

本标准起草单位：中国科学院等离子体物理研究所、合肥中科电器科学研究有限责任公司、北京森社电子有限公司、北京创四方电子股份有限公司。

本标准主要起草人：王林森、傅鹏、高格、武旭、李亚、左英。

中国电源学会团体标准
征求意见稿

引 言

核聚变装置电源系统主要包括：磁体电源、快控电源、波驱动和加热电源等，电源的特点是大电流输出、高准确度、宽电流调节和频率输出范围。同时恶劣的电磁环境对电流传感器的电磁兼容能力提出了严格要求。

目前，核聚变装置用电流传感器无相应的国家校准规范和国际标准。本标准参考国家计量校准规范编写规则、中科院合肥物质科学研究院大功率电气设备检测中心制定的大电流传感器检测要求及国内外部分大电流传感器生产厂商的技术资料。

本标准对核聚变装置用电流传感器的检测活动进行指导，采用计量领域误差分析、不确定度评价、符合性评定等方法，给予定量分析。对受控核聚变领域的电流传感器在延时时间、幅频响应、最大电流变化率等测量指标的测量、计算、评价分析给出操作说明。根据核聚变领域的电磁环境系统，对电磁兼容测试进行了明确的规定。

核聚变装置用电流传感器检测规范

1 范围

本标准规定了核聚变装置用电流传感器检测的术语和定义、传感器原理、试验条件、仪器设备、检测项目、外观检查、绝缘性能、准确度等级检测试验、频率响应特性的检测、环境影响试验、电磁兼容考核等内容。本标准适用于准确度等级（0.1-5.0）级核聚变装置用电流传感器检测活动。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 20840:8 互感器第 8 部分：电子式电流互感

JB/T 7490-2007 霍尔电流传感器

3 术语和定义

3.1

准确度等级 accuracy class

在规定工作条件下，符合规定的计量要求，使测量误差或仪器不确定度保持在规定极限内的测量仪器或测量系统的等级或级别。

3.2

最大允许测量误差 $\Delta(K_0)$ maximum permissible measurement error

电流传感器按规定给出在额定电流测量时测量误差的极限值。

3.3

电流传感器 current sensor

电流传感器是采用带有电流感应元件，利用二次转换器将一次电流转换成对应关系的电流或电压信号的测量设备。

3.4

电流传感器比例系数 K current sensor scale factor

电流传感器测量的一次侧电流 I_1 与输出二次电压 E_2 或二次电流 I_2 之比成为电流传感器比例系数。

3.5

测量频率范围 measurement frequency range

电流传感器在测量动态变化的信号时会有测量频率的限制，最大不失真测量频率即为测量频率范

围。

3.6

频率响应特性 frequency response characteristic

电流传感器输出信号随频率变化相关联的特性称为频率响应特性。

3.7

参比 R current ratio

电流传感器工作时，一次侧输入电流与传感器额定电流比为参比，

4 电流传感器原理

电流传感器是采用带有电磁感应元件的光学装置、磁感应元件、空心线圈（罗氏线圈）或采用互感器、分流器等器件，将一次电流 I_1 感应成一定对应关系的感应电流 I_2 或电压信号 E_2 。

电流传感器的比例系数 K 按照式1计算：

$$K = \frac{I_1}{E_2} \text{ 或 } K = \frac{I_1}{I_2} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

I_1 ——电流传感器输入电流，单位：A；

E_2 —— 电流传感器输出电压或电流，单位：V或A。

注：以下均假设传感器输出为电压源。

5 试验条件

试验条件应满足以下条件：

- a) 环境温度 $(25 \pm 10)^\circ\text{C}$ ；
- b) 相对湿度 $\leq 85\%$ ；
- c) 海拔不超过 1000 m；
- d) 被检电流传感器应保证使用工况是个相对静止，有独立固定装置，应避免开关操作或电流突变电动力产生振动对其影响；
- e) 检测环境应无尘、无腐蚀性气体；防阳光辐射并具备良好的照明，且照度 $\geq 250\text{lux}$ ；无较强的电磁辐射干扰；
- f) 被检电流传感器每台设备装置的座架应提供具有紧固螺丝或螺栓的可靠接地端子，供连接适合于规定故障条件的接地导体。

6 仪器设备

6.1 检测用标准电流传感器

检测时，标准电流传感器的选择应符合表1的要求，准确度应最低高于被检传感器准确度的1/3或1/5。如果标准电流传感器准确度等级不满足表1的规定，应规定相应的检测方法。

表1 检测用标准电流传感器准确度等级的选择

标准电流传感器 准确度等级	0.1级	0.2级	0.5级	1级
被检电流传感器 准确度等级	0.5级	1.0级	1.5级、2.0级、 5.0级	3级、5.0级

6.2 测量仪器的选择

传感器检测包括主要两方面的内容，一是与准确度等级的检测，二是与频率响应特性检测，可选择仪器如下：

- 6位半及以上高精度数字表；
- 高速数据采集仪，采样通道速率（5-100）K/s，采样精度（准确度等级）不低于0.2级；
- 根据检测侧重点，测量仪器上述清单可选。

6.3 检测用电源

检测用电源输出电流，能够覆盖被检电流传感器的电流范围；频率响应特性检测时，电源输出交变电流能够达到电流传感器的测量频率范围。

6.4 绝缘电阻表

应保证不低于1000V绝缘电阻测试能力。

6.5 耐压试验表

电压等级不低于交流1.5 kV，或直流2 kV。

7 检测项目

被检电流传感器的检测项目和方法见表2。

表2 电流传感器检测项目一览表

序号	检验项目		检测方法条款号
1	外观		8
2	绝缘性能	绝缘电阻	9.1
		绝缘强度	9.2
3	准确度等级		10
4	频率响应特性	延时时间	11.4
		幅频响应	11.4.2
		最大电流变化率	11.4.3
5	环境影响	温升限值	12
		运输过程中的振动与冲击	注：
		恒定湿热	12.3.1
		交变湿热	12.3.2
6	电磁兼容考核		13

8 外观检查

目测法检验。电流传感器外观应符合下列要求：

- a) 壳体表面光洁、完好，无划痕及其他损伤；
- b) 包括产品名称、型号、出厂编号(或设备编号)的产品铭牌、标牌等应正确、完整、清晰，并牢固地固定在外壳上；
- c) 接线端子齐全，标注正确、清晰，穿心式电流传感器设有极性标记；
- d) 无严重影响检测工作进行的其它缺陷。

确认外观检查无缺陷后，方可进行后续的试验和检测。

9 绝缘性能

9.1 绝缘电阻测试

在环境温度(25±10)℃和相对湿度≤85%RH的环境下，选用额定电压为1kV的绝缘电阻表。被检电流传感器电源输入端口、二次信号处理单元或信号输出端口用导线短路成等电位点，测量不通电的外露金属部件（接地）和等电位点之间的绝缘电阻，电阻值应不小于用户规定要求。如果绝缘电阻值小于规定值，不宜进行耐压试验并查找原因。

9.2 绝缘强度测试

同9.1 条件，等电位点与接地金属外壳之间应能承受交流电压有效值1.4kV或直流2kV，历时1min的耐压承受能力，无击穿现象或电弧放电，不大于用户规定的最大漏电流等级。耐压试验后，重新测量绝缘电阻，绝缘电阻需满足用户要求。

10 准确度等级检测试验

10.1 检测方法

- 直接比较法要求单个标准电流传感器的量程能够覆盖被校电流传感器的量程，
- 如果不能满足直接比较法测量条件，则可以采用多支路并联迭加法检测。

10.2 直接检测法

10.2.1 试验电流调节

除非另有协议，参比按1kA/s上升到正向电流最大(电流传感器额定电流值)，维持1秒平台，再按相同电流变化率下降到零点；再从零点以同样电流变化率下降到负向电流最大(负向额定电流值)，维持1秒，然后从负向最大按同样电流变化率递减回到零点，完成一次循环测试。单向电流传感器，不必负向电流操作。

一共进行5次独立的重复测量。

注：独立的重复测量，要求每次测量电流传感器电源重启和对数字多用表指示调零。

10.2.2 检测点

- a) 单向电流传感器：设立参比为0.05，0.2，0.4，0.6，0.7，0.8，1.0共7个检测点，每个检测点分别记录上升下降段标准传感器输出值和被检传感器的输出值2组数据。

- b) 双向电流传感器：参比设立 0.05, 0.2, 0.4, 0.6, 0.7, 0.8, 1.0, -0.05, -0.2, -0.4, -0.6, -0.7, -0.8, -1.0 共 14 个检测点，每个检测点分别记录上升下降段标准传感器输出值和被检传感器的输出值 2 组数据。

10.2.3 试验数据处理

10.2.3.1 单向电流传感器误差分析

10.2.3.1.1 被检电流传感器比例系数检测值计算

直接比较法变比检测值按公式(2)计算：

$$K_{uRmj} = \frac{K_{sRj} E_{sRmj}}{E_{uRmj}} \begin{pmatrix} m=1,2 \\ j=1,2,\dots,7 \\ k=1,2,\dots,5 \end{pmatrix} \dots\dots\dots(2)$$

式中：

下角标 R —— 参比；

下角标 m —— 单次循环内同一参比下的检测数据；

下角标 j —— 参比 R 的序号；

下角标 k —— 参比 R 的循环次数。

K_{sRj} 是参比为 R 时的参比电流下的标准电流传感器比例系数。 K_{sRj} 可以是标准电流传感器的标称变比(标称值或名义值)，也可以是由校准证书查得的参比电流下的标准电流传感器比例系数校准值。

对于第一次循环中 ($k=1$)，对各检测点 ($j=1\sim 7$)，前后 2 次 ($m=1\sim 2$)，记录标准和被检电流传感器的输出电压，每个检测点 2 组数据 E_{sRmj1} 和 E_{uRmj1} 。用式(4)计算各检测点下前后 2 次被检电流传感器比例系数检测值 K_{uRmj1} (参比 R 依次为 0.05, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 对应于 $j=1, 2, \dots, 7$ 下同)：

$$K_{uRmj1} = \frac{K_{sRj} E_{sRmj1}}{E_{uRmj1}} \begin{pmatrix} m=1,2 \\ j=1,2,\dots,7 \end{pmatrix} \dots\dots\dots(3)$$

在第二次循环中 ($k=2$)，对每个参比电流检测点，同时记录标准和被检电流传感器的输出电压 E_{sRmj2} 和 E_{uRmj2} 。用式(4)计算各检测点下被检电流传感器比例系数检测值 K_{uRmj2} ：

$$K_{uRmj2} = \frac{K_{sRj} E_{sRmj2}}{E_{uRmj2}} \begin{pmatrix} m=1,2 \\ j=1,2,\dots,7 \end{pmatrix} \dots\dots\dots(4)$$

如此循环，至全部数据获取完毕，用式(5)计算各检测点下被检电流传感器比例系数平均检测值 \bar{K}_{uRj} ($j=1, 2, \dots, 7$)：

$$\bar{K}_{uRj} = \frac{1}{10} \sum_{k=1}^5 \sum_{m=1}^2 K_{uRmj} (j=1,2,\dots,7) \dots\dots\dots(5)$$

10.2.3.1.2 变比检测值示值误差计算

用式(6)计算各检测点下的被检电流传感器比例系数检测值示值误差 Δ_{Rj} ：

$$\Delta_{Rj} = \bar{K}_{uRj} - K_N (j=1,2,\dots,7) \dots\dots\dots(6)$$

式中, K_N 为被检电流传感器比例系数规定的标称值(名义值), 其有效位记录到个位。示值误差 Δ_{Rj} 末尾有效数字应与传感器比例系数平均检测值 $\overline{K_{uRj}}$ 的末尾有效数字一致。用式(7)计算7个参比电流检测点下的被检电流传感器比例系数检测值相对示值误差 δ_{Rj} :

$$\delta_{Rj} = \frac{\Delta_{Rj}}{\overline{K_{uRj}}} \times 100\% = \frac{K_N - \overline{K_{uRj}}}{\overline{K_{uRj}}} \times 100\% (j = 1, 2, \dots, 7) \dots\dots\dots(7)$$

相对示值误差 δ_{Rj} 有效数字位数与传感器最大允许误差有效数字位数相一致。

10.2.3.2 双向电流传感器误差分析

检测方法同10.2.3, 参比 R 按照 0.05, 0.2, 0.4, 0.6, 0.7, 0.8, 1.0, -0.05, -0.2, -0.4, -0.6, -0.7, -0.8, -1.0, 共14个检测点。

应用公式(3)~(8)时, $j = 1, 2, \dots, 14$, 对应于参比电流参比 R 等于 0.05, 0.2, 0.4, 0.6, 0.7, 0.8, 1.0, -0.05, -0.2, -0.4, -0.6, -0.7, -0.8, -1.0。

计算被检电流传感器的示值误差和相对误差。

10.2.3.3 不确定度评价

在各个参比等级进行电流传感器不确定度评价 $U_{95}(K_u)$ 计算, 具体见附录A。

10.2.3.4 符合性评价

利用示值误差 Δ_{Rj} 、不确定度 $U_{95}(K_u)$ 、最大允许误差 $\Delta(K_N)$ 三者之间的数值关系评价传感器是否合格。具体见附录B。

10.2.4 并联迭加法对大电流传感器的检测

附录C详细介绍了四支路并联方式求被检大电流传感器的不确定度评价方法。

11 频率响应特性的检测

11.1 检测项目

本项考核响应时间、幅频特性和最大电流变化率指标

11.2 试验电流源和测量设备要求

试验电流源和测量设备应达到以下要求:

- 实验前, 按照电流传感器标定的响应时间与频率特性, 配置回路参数。预期检测电流的频率不低于传感器标定最大的测量信号频率;
- 幅频特性与准确级精度有关, 要求检测用电流源放电电流的峰值不低于传感器额定电流的 20%;
- 依据被检电流传感器的量程和变比, 选择相应量程和变比的标准电流传感器, 其准确度等级应符合表 1 的规定要求且频率范围能完全被检电流传感器;
- 依据测试电流的幅值和频率, 选择数高速数据采集仪的量程和采样率。

11.3 检测方法

可采用震荡放电电路，电流幅值满足被测传感器参比 $R \geq 0.2$ 的条件，见图1输出电流波形，L1曲线是标准传感器的测量电流波形，L2曲线为被检电流传感器的测量电流波形。

记录标准传感器输出值和被检传感器的输出值。

作10次独立重复测量。

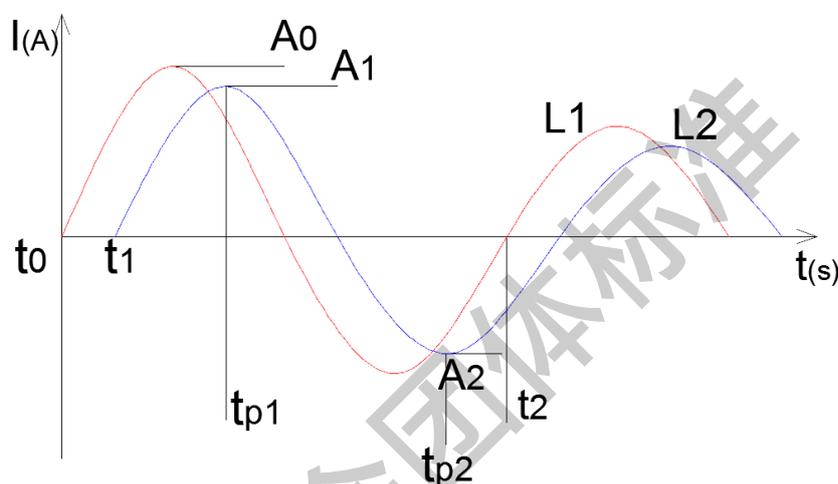


图1 电流传感器频率响应测试检测电流波形图

11.4 试验数据处理

11.4.1 延时时间

见图1，传感器的额定延时时间 T_d 按式(8)计算，取10次测量的最大值作为传感器的延时时间。

$$\left. \begin{aligned} T_{dj} &= t_{1j} - t_{0j} \quad (j = 1, 2, \dots, 10) \\ T_d &= (T_{dj})_{\max} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(8)$$

式中：

t_0 ——标准传感器测量电流波形零时刻，单位：s；

t_1 ——被检传感器测量电流波形零时刻，单位：s；

j ——下角标，检测电流测量次数，单位：s。

试验结果应符合用户规定的延时时间。

11.4.2 幅频响应

标准传感器和被检传感器10次测量分别获得 A_{0j} 和 A_{1j} 电流峰值数据，对应电压 $E_{s,j}$ 和 $E_{u,j}$ 。传感器的标称变比 K_N 和 K_S 已知，被检传感器的幅频响应误差 Δ_{Af} 可通过式(9)计算，

$$\left. \begin{aligned} \bar{K}_u &= \frac{1}{10} \sum_{j=1}^{10} \frac{A_{0j}}{E_{uj}} \quad (j = 1, 2, \dots, 10) \\ \Delta_{Af} &= \bar{K}_u - K_N \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(9)$$

式中：

A_0 ——标准传感器测量最大放电电流，单位：A；

A_1 ——被检传感器测量最大放电电流，单位：A；

\bar{K}_u ——被检传感器测量检测 10 次的变比平均值，单位：A/V；

Δ_{Af} ——被检传感器测量变比平均值与传感器标称变比 K_N 的误差，单位：A/V

被检电流传感器比例系数数值相对误差率 δ_{Af} 按公式 (10) 计算：

$$\delta_{Af} = \frac{\Delta_{Af}}{K_u} \times 100\% \dots\dots\dots(10)$$

按照 10.2.3 节和附录 B，对被检电流传感器幅频特性的不确定度及对检测结果符合性进行评价，试验结果应符合用户规定最大测量频率时的幅值衰减度。

11.4.3 最大电流变化率测量

见图 1，传感器最大电流变化率 K_{cu} ，按照第一个周期内波形峰峰值除以对应的时间差值计算，见公式 (11)：

$$K_{cu} = \left| \frac{d_i}{d_t} \right|_{\min} = \left(\left| \frac{A_{1j} - A_{2j}}{t_{p2j} - t_{p1j}} \right| \right)_{\min} \quad (j = 1, 2, \dots, 10) \dots\dots\dots(11)$$

式中：

A_1 ——被检传感器在测量检测电流第一个波峰电流值，单位：A；

A_2 ——被检传感器在测量检测电流第一个波谷电流值，单位：A；

t_{p1} ——被检传感器在测量检测电流第一个波峰时对应的时间，单位：s；

t_{p2} ——被检传感器在测量检测电流第一个波谷时对应的时间，单位：s。

取 10 次测量的最小值，试验结果应不低于用户规定的最低限值。

11.4.4 频率响应的符合性评价

用户根据电源系统工作情况，选取不同的频率响应指标进行评价。

12 环境影响试验

12.1 温升测试

试验流程：

- a) 试验时，电流传感器应按实际使用情况的放置。传感器头及二次转换器外表都要布置热电偶，热电偶测量点不低于 8 个，所有并接入仪表并自动数据记录。
 - b) 被测电流传感器一次侧施加稳态额定电流使其处于最大热负荷状态。
 - c) 若所有热测量点温升变化值每小时不超过 1 K 时，可认为电流传感器已达到稳定温度，试验停止；若试验超过 8 个小时仍达不到稳定状态，即温升试验不合格。
 - d) 如果试验结果如下，则认为电流传感器通过本试验：
 - 1) 温升符合表 3 的规定；
 - 2) 冷却到室温后能满足下列要求：无可见损伤；绝缘性能达到 9.1 和 9.2 节要求
- 电流传感器的温升由所用技术的最低绝缘等级限定。各绝缘等级的最高温升列于表 3。

表 3 电流传感器的温升限值

绝缘等级	最高温升 (K)
------	----------

浸于油中的所有等级	60
浸于油中且全密封的所有等级	65
充填沥青胶的所有等级	50
不浸油或不充沥青胶的各等级	
Y	45
A	60
E	75
B	85
F	110
H	135

注：对某些材料（例如树脂），制造商指明其相当的绝对等级。

注：用户可根据自身电源系统的工作要求决定是否对电流传感器进行温升考核。

12.2 运输过程中的振动与冲击

12.2.1 运输过程的振动测试

随机振动试验条件：

——10Hz~200Hz: $1\text{m}^2/\text{s}^3$;

——200Hz~2000Hz: $0.3\text{m}^2/\text{s}^3$;

——振动方向：X、Y、Z 轴向；

——振动时间：每轴向 3h。

12.2.2 运输过程的冲击测试

冲击试验条件见表4和表5。

表4 冲击试验条件

方向	半正弦波		
	加速度	脉宽时间	次数
X、Y、Z	$100\text{m}/\text{s}^2$	11ms	每轴向 3 次，共 9 次

表5 冲击试验条件

方向	半正弦波		
	加速度	脉宽时间	次数
X、Y、Z	$300\text{m}/\text{s}^2$	6ms	每轴向 3 次，共 9 次

12.2.3 验收条件

试验结束后，对样品的外观、结构进行目视检查。样品外观应正常，结构完整，无变形、无裂痕。

12.3 环境耐受测试

12.3.1 恒定湿热

将非工作状态下传感器置于试验箱内，按以下条件作恒定湿热试验：

- 温度：(40 ± 2)℃；
- 相对湿度：(90~95)%RH；
- 试验的严酷等级：2d。

试验结束后，取出传感器，在5 检测条件下放置2h。绝缘性能达到9.1和9.2节要求，通电参比电流 (R=0.5) 轻载测试，数据正常即合格。

12.3.2 交变湿热

将非工作状态下传感器置于试验箱内，按以下条件作交变湿热试验：

- 高温：(40 ± 2)℃；
- 低温：(25 ± 3)℃；
- 相对湿度：(90~100)%RH；
- 试验的严酷等级：24h。

单次循环设置及循环次数可按实际情况进行预设。

试验结束后，取出传感器，在5 检测条件下放置2h。绝缘性能达到9.1和9.2节要求，通电参比电流 (R=0.5) 轻载测试，数据正常即合格。

13 电磁兼容考核

13.1 电磁兼容要求

评定电流传感器电磁兼容，从以下两个方面分别进行考核（具体考核指标见附录D）：

- a) 发射要求
- b) 抗扰度要求

13.2 测试条件

EMC测试过程中，应满足如下条件：

- a) 电流传感器处于正常工作状态，一次侧输入电流不低于 5%的额定电流，可以采用安匝法来等效一次电流；
- b) 准确级要求，测量仪器准确度应最低高于被检传感器准确度的 1/3 或 1/5；
- c) 测量仪器应避免检测过程中被干扰源影响。

13.3 测试结果的评价

应按照以下2个评价标准进行评估：

- a) 评价准则 A, 在试验期间和试验之后，设备应按预定方式连续运行。当设备按预定方式使用时，其性能降低或功能丧失不允许低于规定的性能水平。性能水平可以用允许的性能丧失来代替；
- b) 评价准则 B, 在试验之后，设备应按预定方式连续运行。允许电流传感器测量性能暂时下降，干扰撤除后，能自行恢复正常，不允许复位或重新启动。

附录 A (资料性附录)

直接比较法检测电流传感器比例系数测量不确定度评定

A.1 概述

A.1.1 直接比较法测量原理

直接比较法是将标准电流传感器与被检电流传感器串联在同一电流回路中，如图A.1所示。如果标准电流传感器的电流量程能够覆盖被检电流传感器的电流量程，采用该方法。测量仪器可以是同一台仪器也可能是两台不同仪器。由标准电流传感器的变比和标准电流传感器和被检电流传感器的输出电压，计算被检电流传感器比例系数并给出检测结果。

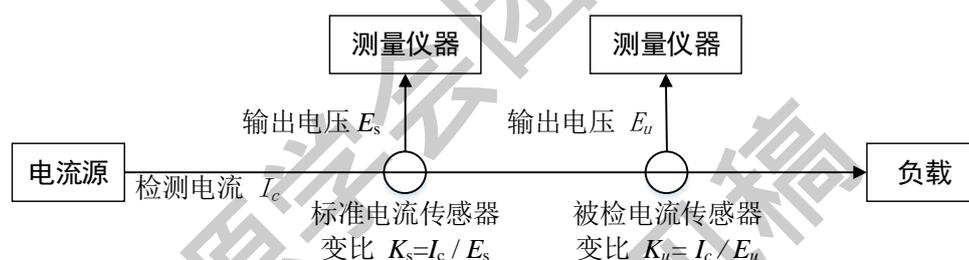


图 A.1 直接比较法检测电流传感器原理图

A.1.2 目的

直接比较法评定被检电流传感器比例系数 K_u 的测量不确定度。

本例以0.1级标准电流传感器在全电流130kA(参比电流参比 $R=1.00$)时检测0.5级电流传感器为例。

A.1.3 检测用标准传感器和配套设备

A.1.3.1 0.1级光纤电流传感器

电流 $I_s=130$ kA，变比 $K_s=1300\times 10$ A/V，最大允许误差 $\Delta(K_s)=\pm 0.1\%$ 。

检测证书给出其检测值的不确定度为 $U_c(K_s)=0.06\%$ ，包含因子 $k(U_c)=2$ 。

A.1.3.2 高速数据采集仪

HI_TECHNIQUES 高速数据采集仪器，采样通道速率(5-100) k/s，最大测量精度测量最大允许误差 $\pm 0.15\%$ 。

A.1.3.3 电流源

可控整流电源串联电感线圈负载，最大输出电压500V，回路最大输出电流130kA，稳态测试电流可维持在30kA。

A.1.4 被检电流传感器

0.5级电流传感器 $I_u=130$ kA，变比标称值(名义值) $K_N=6000 \times 10$ A/V，最大允许误差 $\Delta(K_N)=\pm 0.5\%$ 。

A.1.5 环境条件

环境温度：25±10℃；相对湿度：≤85%RH。

A.1.6 检测方法

检测方法参见正文10。

A.1.7 测量不确定度评定的应用

同一准确度级别电流传感器不同检测点的测量不确定度评定，以及不同准确度级别电流传感器检测的测量不确定度评定，可以参照本例进行评定。

A.2 测量模型

被检电流传感器比例系数检测值测量模型

$$K_u = \frac{K_s E_s}{E_u} \dots\dots\dots(A.1)$$

式中：

- E_s ——标准电流传感器二次输出电压，单位：V；
- K_s ——标准电流传感器比例系数，单位：A 或 kA/V；
- E_u ——被检电流传感器二次输出电压，单位：V；
- K_u ——被检电流传感器比例系数检测值，单位：A/V 或 kA/V。

A.3 不确定度传来源

- a) 测量重复性引起的标准不确定度 $u_A(K_0)$ ，用 A 类方法评定。
- b) 由标准传感器比例系数引起的标准不确定度 $u_r(K_s)$ ，采用 B 类方法评定。
- c) 高速数据采集仪测量 E_s 引起的标准不确定度 $u_r(E_s)$ ，采用 B 类方法评定。
- d) 高速数据采集仪测量 E_u 引起的标准不确定度 $u_r(E_u)$ ，采用 B 类方法评定。

表A.1给出了电流传感器比例系数 K_0 检测的测量不确定度预估。

表A.1 电流传感器比例系数检测值 K_0 检测的测量不确定度预估

序号 <i>i</i>	输入量标准不确定度							输出量标准不确定度		
	输入量	不确定度来源	类型	分布	包含因子	符号	数值 (%)	符号	数值 (%)	传播系数
1	K_0	测量重复性	A	正态	1	$u_A(K_0)$		$u_c(K_0)$		1
2	K_s	标准传感器比例系数不确定度	B	均匀	$\sqrt{3}$	$u_r(K_s)$		$u_{rc1}(K_s)$		1

序号 <i>i</i>	输入量标准不确定度							输出量标准不确定度		
	输入量	不确定度来源	类型	分布	包含因子	符号	数值 (%)	符号	数值 (%)	传播系数
3	E_s	仪器不确定度	B	均匀	$\sqrt{3}$	$u_r(E_s)$		$u_{rc2}(E_s)$		1
4	E_u	仪器不确定度	B	均匀	$\sqrt{3}$	$u_r(E_u)$		$u_{rc3}(E_u)$		1
5	输出量合成标准不确定度 $u_{rc}(K_u) = \sqrt{u_{rc1}^2(K_s) + u_{rc2}^2(E_s) + u_{rc3}^2(E_u) + u_{rA}^2(K_u)}$									
6	输出量扩展不确定度 ($k=2$) $U_{rc}(K_u) = 2 \times u_{rc}(K_u)$									

A.4 不确定度传播律

考察式(A.2)可知, 不确定度评定测量模型仅含有 E_s , K_s , E_u 和 K_u 的积和商, 可以用简化的方式计算合成标准不确定度。但输入量和输出量的标准不确定度必须采用相对标准不确定度。 E_s , K_s 和 E_u 三个量互不相关, 其不确定度传播律公式为

$$\begin{aligned}
 u_{rc}(K_u) &= \sqrt{u_{rc1}^2(K_s) + u_{rc2}^2(E_s) + u_{rc3}^2(E_u) + u_{rA}^2(K_u)} \dots\dots\dots(A.2) \\
 &= \sqrt{u_r^2(K_s) + u_r^2(E_s) + u_r^2(E_u) + u_{rA}^2(K_u)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{cases}
 u_{rA}(K_u) = u_A(K_u) / |K_u| \\
 u_{rc1}(K_u) = u_r(K_s) = u_r(K_s) / |K_s| \\
 u_{rc2}(K_u) = u_r(E_s) = u_r(E_s) / |E_s| \\
 u_{rc3}(K_u) = u_r(E_u) = u_r(E_u) / |E_u|
 \end{cases} \dots\dots\dots(A.3)$$

注: 虽然 E_s 和 E_u 使用同一台数字多用表测量, 因为其测量值相差较大, 甚至在数字多用表不同的量程上进行测量, 故可以认为输入量 E_s 和 E_u 是互不相关的。

A.5 输入量的标准不确定度评定

A.5.1 测量重复性引起的标准不确定度 $u_{rA}(K_u)$ 评定

测量重复性引起的标准不确定度 $u_{rA}(K_u)$ 可以通过 $n = 10$ 次独立的重复测量, 对测量列数据进行统计分析, 用贝塞尔公式计算得到。 $n = 10$ 次独立的重复测量结果列于表A.2。注意, 独立的重复测量, 要求每次测量都必须重新连接和对数字多用表指示调零, 即重复每个测量过程读取 E_{si} 和 E_{ui} , 并计算出变比值 K_{ui} 。

$$s(K_u) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (K_{ui} - \bar{K}_u)^2}{10-1}} \dots\dots\dots(A.4)$$

表A.2 被检电流传感器比例系数检测值 K_u 的 $n=10$ 次独立的重复测量数据

序号 i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
K_s (kA/V)	13									
$E_{s,i}$ (V)	10.0015	10.0007	9.9989	9.9972	9.9998	9.9983	9.9978	10.0015	9.9972	9.9992
$E_{u,i}$ (V)	2.1680	2.1650	2.1665	2.1674	2.1670	2.1683	2.1695	2.1691	2.1668	2.1644
$K_{u,i}$ (kA/V)	59962.6	60045.3	60005.5	59980.6	59992.2	59956.2	59922.1	59931.8	59995.4	60063.8
\bar{K}_u (kA/V)	59985.5									
实验标准偏差	45.4									

测量重复性引起的标准不确定度为

$$\left. \begin{aligned} u_A(K_u) &= s(K_u) = 45.4 \text{ kA/V} \\ u_{rA}(K_u) &= \frac{u_A(K_u)}{|\bar{K}_u|} = \frac{45.4}{59985.5} = 0.076\% \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(A.5)$$

A.5.2 输入量 K_s 标准不确定度 $u_r(K_s)$ 评定

由A.3.2节可知，标准传感器比例系数 K_s 引起的标准不确定度 $u_r(K_s)$ 采用B类方法评定。 $u_r(K_s)$ 的评定通常有2种方法：(1) 测量模型式(A.2)中直接引用其标称变比 $K_s=1300 \times 10 \text{ kA/V}$ ，由其最大允许误差 $\Delta(K_s)$ 评定标准不确定度；(2) 测量模型式(A.2)中引用其检测证书给出的检测值 K_s ，由检测证书给出的检测值的不确定度 $U_r(K_s)$ [包含因子 $k(K_s)=2$] 评定标准不确定度。后者评定出的标准不确定度 $u_r(K_s)$ 通常要比前者小得多。

本例以直接引用标准电流传感器标称变比 $K_s=13000 \times 10 \text{ A/V}$ 为例进行评定。

0.1级标准电流传感器，其最大允许误差 $\Delta(K_s)=\pm 0.1\%$ 。使用时直接引用其标称变比 $K_s=1300 \times 10 \text{ kA/V}$ 。

故 K_s 包含区间的半宽的度为 $a(K_s)=0.1\%$ ，服从均匀分布，其包含因子 $k(K_s)=\sqrt{3}$ 。由此引起的标准不确定度 $u_r(K_s)$ 为

$$u_r(K_s) = \frac{a(K_s)}{k(K_s)} = \frac{0.1\%}{\sqrt{3}} = 0.058\% \dots\dots\dots(A.6)$$

A.5.3 输入量 E_s 、 E_u 标准不确定度 $u_r(E_s)$ 和 $u_r(E_u)$ 评定

E_s 和 E_u 标准不确定度 $u_r(E_s)$ ， $u_r(E_u)$ ，由高精度数据采集仪测量 E_s 和 E_u 所引起，最大允许误差为 0.15% ，且 E_s 服从均匀分布，其包含因子 $k(E_s) = k(E_u) = \sqrt{3}$ 。由此引起的标准不确定度 $u_r(E_s)$ ， $u_r(E_u)$ 为：

$$u_r(E_s) = u_r(E_u) = \frac{a(E_s)}{k(E_s)} = \frac{0.15\%}{\sqrt{3}} = 0.087\% \quad \dots\dots\dots(A.7)$$

A.6 输出量 K_0 的合成标准不确定度 $u_c(K_0)$ 评定

由A.4节不确定度传播律可知，将式(A.5) (A.6)和(A.7)代入式(A.2)可求出输出量 K_0 的合成标准不确定度 $u_c(K_0)$

$$\begin{aligned} u_{rc}(K_u) &= \sqrt{u_r^2(K_s) + u_r^2(E_s) + u_r^2(E_u) + u_{rA}^2(K_u)} \quad \dots\dots\dots(A.8) \\ &= \sqrt{0.076^2 + 0.058^2 + 0.087^2 + 0.087^2} \% = 0.16\% \end{aligned}$$

A.7 输出量 K_u 的扩展不确定度 $U_{rc}(K_u)$ 评定

依据JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》，扩展不确定度 $U_{rc}(K_0)$ 直接由包含因子 $k(K_0)=2$ 乘以合成标准不确定度 $u_c(K_0)$ 给出。

$$U_r(K_u) = k(K_u)u_{rc}(K_u) = 2 \times 0.16\% = 0.32\% \quad \dots\dots\dots(A.9)$$

A.8 0.5级电流传感器比例系数检测值 K_u 测量结果报告

0.5级电流传感器在电流 $I_u=130$ kA时，变比检测值 K_u 其扩展不确定度 $U_{rc}(K_0) = 0.32\%$ ，包含因子 $k(K_0)=2$ ，或写成 $U_{95}(K_u)=0.32\%$ 。

A.9 其他参比电流测量重复性引起的扩展不确定度 $U_{95}(K_u)$

其他参比电流的重复性进行了测量，相应的扩展不确定度 $U_{95}(K_0)$ 建议参照表A.3格式。

表A.3 不同参比电流变比较准值 K_0 的扩展不确定度 $U_{95}(K_0)$

参比电流 (参比 R)	0.05	0.20	0.40	0.60	0.7	0.80	1.0
$U_{95}(K_0) / \%$							
参比电流 (参比 R)	-0.05	-0.20	-0.40	-0.60	-0.7	-0.80	-1.0
$U_{95}(K_0) / \%$							

附录 B
(资料性附录)

电流传感器校变比准值示值误差的符合性评定

B.1 测量结果

电流传感器比例系数校准值示值误差符合性评定，实际上就是测量结果的符合性评定。由测量结果定义可知，电流传感器比例系数的测量结果 K 可以表示为：

$$K = K_u \pm U_{95}(K_u) \dots\dots\dots (B.1)$$

式中， K_u 是变比 K 的测得量值(检测值)， $U_{95}(K_u)$ 是其扩展不确定度。

电流传感器比例系数校准值示值误差 Δ_R 为其测得量值 K_u 减去其规定的标称值 K_N ，可表示为：

$$\Delta_R = K_u - K_N \dots\dots\dots (B.2)$$

电流传感器比例系数的符合性依据其最大允许误差 $\Delta(K_N)$ 的上下限来评定，即

$$K_N \pm \Delta(K_N) \dots\dots\dots (B.3)$$

B.2 最大允许误差要求

B.2.1 0.1 - 1级误差要求

传感器在0.1 - 1级见表B.1 所列限值。

表B.1 电流传感器准确度等级及其对应的最大允许误差

准确度等级	±对应的最大允许误差 $\Delta(K_N)$ %			
	参比电流 R			
	0.05	0.20	1.0	1.2
0.1	0.4%	0.1%	0.1%	0.1%
0.2	0.75%	0.2%	0.2%	0.2%
0.5	1.5%	0.5%	0.5%	0.5%
1.0	3.0%	1.0%	1.0%	1.0%

注：参比电流下 $R < 0.2$ 时，输出信号的信噪比明显变小，可适当降低对最大允许误差的要求。

B.2.2 3 - 5级误差要求

传感器在3 - 5级见表B.2所列限值。

表B.2 3-5 级的最大允许误差

准确度等级	±对应的最大允许误差 $\Delta(K_N)$ %	
	参比电流 R	
	0.5	1.2
3	3%	3%
5	5%	5%

B.3 电流传感器比例系数校准值示值误差符合性评定的基本要求

被检电流传感器比例系数检测值 K_u 的示值误差 Δ_R 的测量不确定度 $U_{95}(K_u)$ ，与电流传感器比例系数的最大允许误差绝对值 $|\Delta(K_N)|$ 应满足：

$$U_{95}(K_u) \leq \frac{1}{3} |\Delta K_N| \dots\dots\dots(B.4)$$

- 当示值误差 Δ_R 处于最大允许误差 $\Delta(K_N)$ 内时，可评定为合格，即 $|\Delta_R| \leq |\Delta K_N|$ ；
- 当示值误差 Δ_R 超出最大允许误差 $\Delta(K_N)$ 内时，可评定为不合格，即 $|\Delta_R| > |\Delta K_N|$ 。

B.4 电流传感器比例系数检测值示值误差符合性评定出现模糊区(待定区)的情况

如果被检电流传感器比例系数检测值 K_u 的示值误差 Δ_R 的测量不确定度 $U_{95}(K_u)$ ，与电流传感器比例系数的最大允许误差绝对值 $|\Delta(K_N)|$ 出现以下情况：

$$U_{95}(K_u) > \frac{1}{3} |\Delta K_N| \dots\dots\dots(B.5)$$

- 合格判据，示值误差 Δ_R 的绝对值小于或等于最大允许误差 $\Delta(K_N)$ 绝对值与示值误差的扩展不确定度 $U_{95}(K_u)$ 之差时，可评定为合格，即

$$|\Delta_R| \leq |\Delta K_N| - U_{95}(K_u) \quad \text{或} \quad |\Delta_R| + U_{95}(K_u) \leq |\Delta K_N|;$$

- 不合格判据，示值误差 Δ_R 的绝对值大于最大允许误差 $\Delta(K_N)$ 绝对值与示值误差的扩展不确定度 $U_{95}(K_u)$ 之和时，可评定为不合格，即

$$|\Delta_R| > |\Delta K_N| - U_{95}(K_u) \quad \text{或} \quad |\Delta_R| + U_{95}(K_u) > |\Delta K_N|。$$

附录 C
(资料性附录)

电流传感器校变比准值示值误差的符合性评定示例

C.1 概述

C.1.1 目的

评定迭加(Build-up)比较法500kA检测电流传感变比 K_0 的测量不确定度。
本例以4台并联的已检测的0.5级标准电流传感器，检测 $I_0=500\text{kA}$ 的5.0级电流传感器为例。

C.1.2 检测用标准传感器和配套设备

C.1.2.1 4个0.5级电流传感器

电流 $I_{s,i}=130\text{ kA}$ ，标称(名义)变比 $K_{s,i}=60\text{ kA/V}$ ，最大允许误差 $\Delta(K_{s,i})=\pm 0.5\%$ ($i=1, 2, 3, 4$)。

C.1.2.2 高速数据采集仪

HI_TECHNIQUES 高速数据采集仪器，采样通道速率(5-100) k/s，最大测量精度 $\pm 0.15\%$ 。

C.1.2.3 电流源

本测试中心拥有500kA电流测试能力，测试平台由四套可控整流电源并联组成，调整导通角，即可实现电源输出幅值变化，改变电流的大小。单套电源电流等级最大至130kA，四条支路全部并联运行时，最大电流知道500kA以上。(C.1.2.1)所涉及四个电流传感器分别按照到电源的四个支路中。

C.1.3 被检电流传感器

5.0级电流传感器 $I_0=500\text{ kA}$ ，标称变比 $K_0=60\text{ kA/V}$ ，最大允许误差 $\Delta(K_0)=\pm 5.0\%$ 。

C.1.4 环境条件

环境温度： $25\pm 10^\circ\text{C}$ ；相对湿度： $\leq 85\%RH$ 。

C.1.5 检测方法

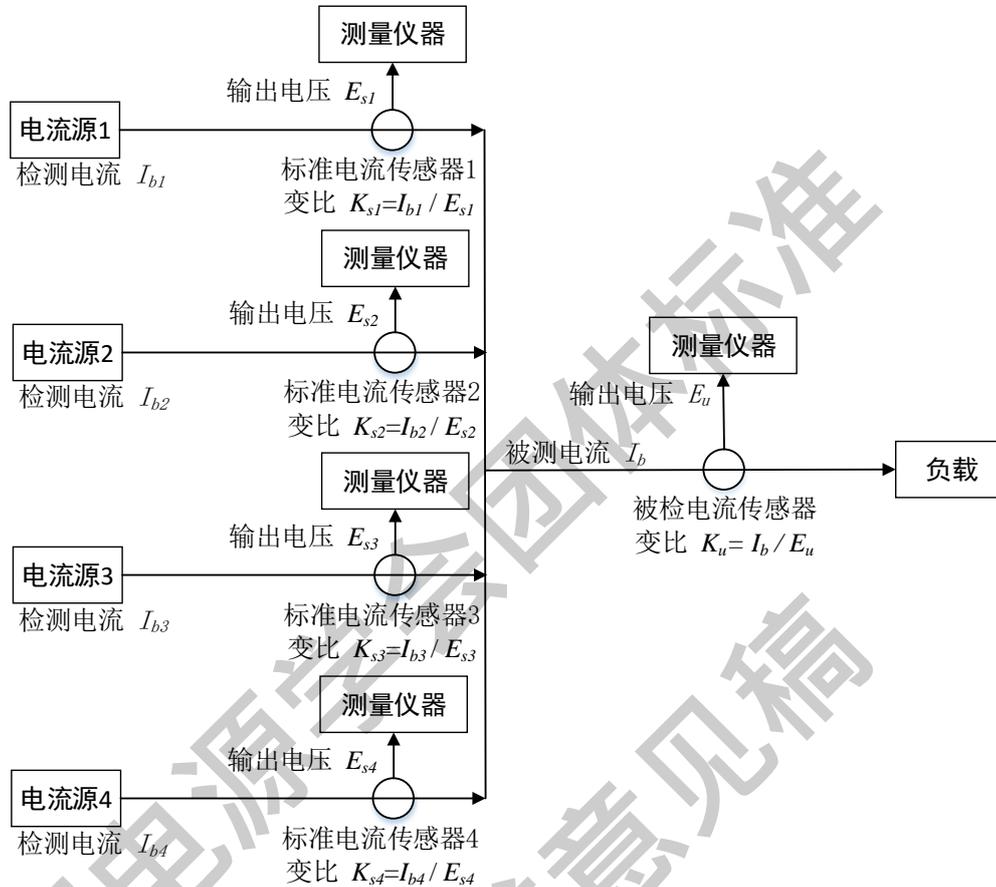
预先使用直接比较法检测四个支路电流传感器，检测结果符合性评定后，作为标准传感器。

C.1.6 测量不确定度评定的应用

同一准确度级别电流传感器不同检测点的测量不确定度评定、不同准确度级别电流传感器检测的测量不确定度评定，以及2台或3台电流传感器并联迭加的不确定度评定，可以参照本例进行评定。

C.2 测量模型

并联迭加电路原理如图C.1, 图中给出了四标准电流传感器并联迭加比较法的原理。\$I_{b1} < I_b\$, \$I_{b2} < I_b\$, \$I_{b3} < I_b\$, \$I_{b4} < I_b\$, 但 \$I_{b1} + I_{b2} + I_{b3} + I_{b4} \ge I_b\$。检测电流 \$I_b\$, 可以通过预置各并联支路标准传感器的参比电流, 使其等于被检电流传感器的最大额定电流值。



图C.1 四标准并联迭加比较法检测电流传感器原理图

$$I_b = \sum_{l=1}^4 I_{bl} \quad \dots\dots\dots (C.1)$$

式中, 四标准并联迭代, \$l=1, 2, 3, 4\$。

4台并联迭加检测, 被检电流传感器比例系数检测值的测量模型为:

$$K_u = \frac{K_{s1}E_{s1} + K_{s2}E_{s2} + K_{s3}E_{s3} + K_{s4}E_{s4}}{E_u} \quad \dots\dots\dots (C.2)$$

$$= \frac{K_{s1}E_{s1}}{E_u} + \frac{K_{s2}E_{s2}}{E_u} + \frac{K_{s3}E_{s3}}{E_u} + \frac{K_{s4}E_{s4}}{E_u}$$

式中:

\$K_u\$, 被检电流传感器比例系数检测值, kA/V;

\$E_u\$, 被检电流传感器二次输出电压, V;

\$E_{s1}, E_{s2}, E_{s3}, E_{s4}\$ 分别为标准电流传感器1, 2, 3, 4的二次输出电压, V;

\$K_{s1}, K_{s2}, K_{s3}, K_{s4}\$ 分别为标准电流传感器1, 2, 3, 4的变比, kA/V。

令

$$K_{u1} = \frac{K_{s1}E_{s1}}{E_u}, K_{u2} = \frac{K_{s2}E_{s2}}{E_u}, K_{u3} = \frac{K_{s3}E_{s3}}{E_u}, K_{u4} = \frac{K_{s4}E_{s4}}{E_u} \dots\dots\dots (C.3)$$

则有

$$K_u = \frac{K_{s1}E_{s1}}{E_u} + \frac{K_{s2}E_{s2}}{E_u} + \frac{K_{s3}E_{s3}}{E_u} + \frac{K_{s4}E_{s4}}{E_u} \dots\dots\dots (C.4)$$

$$= K_{u1} + K_{u2} + K_{u3} + K_{u4}$$

C.3 不确定度传来源及其预估

C.3.1 $u_c(K_0)$ 的不确定度分量

由式(C.4)可知,被检电流传感器比例系数 K_0 的不确定度包含四个分量 K_{u1} , K_{u2} , K_{u3} 和 K_{u4} 的合成标准不确定度 $u_{rc}(K_{u1})$, $u_{rc}(K_{u2})$, $u_{rc}(K_{u3})$ 和 $u_{rc}(K_{u4})$ 。

K_{uI} ($I = 1, 2, 3, 4$)的不确定度来源的分析,可以参见附录A《直接比较法检测电流传感器的测量不确定度评定示例》。

C.3.2 K_{uI} ($I = 1, 2, 3, 4$)的不确定度来源

由式(C.2)可知, K_{uI} 为

$$K_{uI} = \frac{K_{sI}E_{sI}}{E_u} (I=1,2,3,4) \dots\dots\dots (C.5)$$

每个 K_{uI} 为有3个输入量 K_{sI} , E_{sI} 和 E_u 。

E_{sI} 引起的标准不确定度 $u_{rc}(E_{sI})$ ($I=1, 2, 3, 4$)和 E_u 引起的标准不确定度 $u_{rc}(E_u)$,是由高速数据采集仪测量引起的。参照附录A,测量仪器带来的不确定度与0.5级标准传感器带来的不确定度相比,可以忽略不计。

表C.1给出了四标准并联迭加比较法检测电流传感器比例系数 K_0 的测量不确定度预估。

表C.1 四标准并联迭加比较法检测电流传感器比例系数 K_0 的测量不确定度预估

序号	输入量标准不确定度							输出量标准不确定度			
	输入量	不确定度来源	类型	分布	包含因子	符号	数值 %	符号	数值 %	传播系数	
1	K_{u1}	K_{u1}	测量重复性	A	正态	1	$u_{rA}(K_{u1})$				
		K_{s1}	标准传感器比例系数标准不确定度	B	均匀	$\sqrt{3}$	$u_r(K_{s1})$				
		合成标准不确定度							$u_{rc}(K_{s1})$		1
									$u_{rc}(K_{b1})$		1
2	K_{u2}	K_{u2}	测量重复性	A	正态	1	$u_{rA}(K_{u2})$				
		K_{s2}	标准传感器比例系数标准不确定度	B	均匀	$\sqrt{3}$	$u_r(K_{s2})$				
		合成标准不确定度							$u_{rc}(K_{s2})$		1
									$u_{rc}(K_{b2})$		1

序号	输入量标准不确定度							输出量标准不确定度			
	输入量	不确定度来源	类型	分布	包含因子	符号	数值 %	符号	数值 %	传播系数	
3	K_{u3}	K_{u3}	测量重复性	A	正态	1	$u_{rA}(K_{u3})$				
		K_{s3}	标准传感器比例系数标准不确定度	B	均匀	$\sqrt{3}$	$u_r(K_{s3})$				
		合成标准不确定度							$u_{rc}(K_{s3})$		1
									$u_{rc}(K_{b3})$		1
4	K_{u4}	K_{u4}	测量重复性	A	正态	1	$u_{rA}(K_{u4})$				
		K_{s4}	标准传感器比例系数标准不确定度	B	均匀	$\sqrt{3}$	$u_r(K_{s4})$				
		合成标准不确定度							$u_{rc}(K_{s4})$		1
									$u_{rc}(K_{b4})$		1
5	输出量合成标准不确定度 $u_{rc}(K_u)=0.59\%$										
6	输出量扩展不确定度($k=2$) $U_{rc}(K_u)=2 \times u_{rc}(K_u)$										

C.4 不确定度传播律

考察式(C.3)可知, 不确定度评定测量模型是仅包含积与商模型与线性相加模型的组合形式, 可以用简化的方式计算合成标准不确定度。其不确定度传播律公式为

$$\begin{aligned}
 u_c^2(K_u) &= u_c^2(K_{u1}) + u_c^2(K_{u2}) + u_c^2(K_{u3}) + u_c^2(K_{u4}) \\
 u_{rc}(K_u) &= \sqrt{u_{rc}^2(K_{u1}) + u_{rc}^2(K_{u2}) + u_{rc}^2(K_{u3}) + u_{rc}^2(K_{u4})} \dots\dots\dots(C.6) \\
 &= \sqrt{u_{rc1}^2(K_u) + u_{rc2}^2(K_u) + u_{rc3}^2(K_u) + u_{rc4}^2(K_u)}
 \end{aligned}$$

式中,

$$\begin{cases}
 u_{rc}(K_{u1}) = \sqrt{u_{rc}^2(K_{s1}) + u_{rc}^2(E_{s1}) + u_{rc}^2(E_u) + u_{rA}^2(K_{u1})} \\
 u_{rc}(K_{u2}) = \sqrt{u_{rc}^2(K_{s2}) + u_{rc}^2(E_{s2}) + u_{rc}^2(E_u) + u_{rA}^2(K_{u2})} \dots\dots\dots(C.7) \\
 u_{rc}(K_{u3}) = \sqrt{u_{rc}^2(K_{s3}) + u_{rc}^2(E_{s3}) + u_{rc}^2(E_u) + u_{rA}^2(K_{u3})} \\
 u_{rc}(K_{u4}) = \sqrt{u_{rc}^2(K_{s4}) + u_{rc}^2(E_{s4}) + u_{rc}^2(E_u) + u_{rA}^2(K_{u4})}
 \end{cases}$$

$$\begin{cases}
 u_{rc}(K_u) = u_{rc}(K_b) = u_c(K_u) / |K_u| \\
 u_{rc1}(K_u) = u_{rc}(K_{u1}) = u_c(K_{u1}) / |K_{u1}| \\
 u_{rc2}(K_u) = u_{rc}(K_{u2}) = u_c(K_{u2}) / |K_{u2}| \dots\dots\dots(C.8) \\
 u_{rc3}(K_b) = u_{rc}(K_{u3}) = u_c(K_{u3}) / |K_{u3}| \\
 u_{rc4}(K_u) = u_{rc}(K_{u4}) = u_c(K_{u4}) / |K_{u4}|
 \end{cases}$$

C.5 输入量的标准不确定度评定

C.5.1 测量重复性引起的标准不确定度 $u_{rA}(K_{u1})$ 评定

测量重复性引起的标准不确定度 $u_{rA}(K_{u1})$ 可以通过 $n = 10$ 次独立的重复测量，对测量列数据进行统计分析，用贝塞尔公式计算得到，具体参照附录A (A.5)。

表C.2给出了四个并联支路 K_{u1} 测量重复性引起的标准不确定度 $u_{rA}(K_{u1})$ 评定结果。

表C.2 四个并联支路 K_{u1} 测量重复性引起的标准不确定度 $u_{rA}(K_{u1})$ 评定结果

$u_{rA}(K_{u1})$	$u_{rA}(K_{u2})$	$u_{rA}(K_{u3})$	$u_{rA}(K_{u4})$
0.045%	0.065%	0.066%	0.053%

C.5.2 K_{s1} 引起的标准不确定度 $u_r(K_{s1})$ 的评定 ($l = 1, 2, 3, 4$)

0.5级电流传感器的标称变比 $K_{s1} = 60000 \text{ A/V}$ ，最大允许误差 $\Delta(K_{s1}) = \pm 0.5\%$ 。则 K_{s1} 包含区间的半宽度为 $a(K_{s1}) = 0.5\%$ ，服从均匀分布，其包含因子 $k(K_{s1}) = \sqrt{3}$ 。由此引起的标准不确定度 $u_r(K_{s1})$ 为

$$u_r(K_{s1}) = \frac{a(K_{s1})}{k(K_{s1})} = \frac{0.5\%}{\sqrt{3}} = 0.29\% \quad (l = 1, 2, 3, 4) \quad \dots\dots\dots(C.9)$$

C.5.3 输入量 K_{u1} 合成标准不确定度 $u_{rc}(K_{u1})$ 评定 ($l = 1, 2, 3, 4$)

由式(C.7)计算可得

$$\begin{cases} u_{rc}(K_{u1}) = \sqrt{u_{rc}^2(K_{s1}) + u_{rA}^2(K_{u1})} = 0.29\% \\ u_{rc}(K_{u2}) = \sqrt{u_{rc}^2(K_{s2}) + u_{rA}^2(K_{u2})} = 0.30\% \\ u_{rc}(K_{u3}) = \sqrt{u_{rc}^2(K_{s3}) + u_{rA}^2(K_{u3})} = 0.30\% \\ u_{rc}(K_{u4}) = \sqrt{u_{rc}^2(K_{s4}) + u_{rA}^2(K_{u4})} = 0.29\% \end{cases} \quad \dots\dots\dots(C.10)$$

C.6 输出量 K_u 的合成标准不确定度 $u_{rc}(K_u)$ 评定

由C.4节不确定度传播律可知，将式(C.9)的4个合成分量的合成标准不确定度代入式(C.6)，可求出输出量 K_u 的合成标准不确定度 $u_{rc}(K_u)$

$$\begin{aligned} u_{rc}(K_u) &= \sqrt{u_{rc}^2(K_{u1}) + u_{rc}^2(K_{u2}) + u_{rc}^2(K_{u3}) + u_{rc}^2(K_{u4})} \\ &= \sqrt{u_{rc1}^2(K_u) + u_{rc2}^2(K_u) + u_{rc3}^2(K_u) + u_{rc4}^2(K_u)} \quad \dots\dots\dots(C.11) \\ &= \sqrt{0.29^2 + 0.30^2 + 0.30^2 + 0.29^2} \% = 0.59\% \end{aligned}$$

C.7 输出量 K_u 的扩展不确定度 $U_c(K_u)$ 评定

依据JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》，扩展不确定度 $U_{95}(K_u)$ 直接由包含因子 $k(K_u)=2$ 乘以合成标准不确定度 $u_{rc}(K_u)$ 给出

$$U_{95}(K_u) = k(K_u)u_{rc}(K_u) = 2 \times 0.59\% = 1.2\% \quad \dots\dots\dots(C.12)$$

C.8 5.0级500kA电流传感器比例系数检测值 K_u 测量结果报告

5.0级电流传感器在电流 $I_b=500$ kA时，变比检测值的测得量值由3次测得量值的平均值给出为

$$K_u = 59.99 \text{ kA/V} \dots\dots\dots(C.13)$$

其扩展不确定度 $U_{95}(K_u)=1.2\%$ ，包含因子 $k(K_u)=2$ 。

C.9 其他参比电流下，被检电流传感器的扩展不确定度 $U_{95}(K_u)$ 建议参考表C.3格式。

表C.3 不同参比电流变比校准值 K_u 的扩展不确定度 $U_{95}(K_u)$

参比电流 (参比R)	0.05	0.20	0.40	0.60	0.7	0.80	1.0
$U_{95}(K_u)/\%$							

附 录 D
(资料性附录)
电流传感器校电磁兼容项目测试

D.1 目的

为了评定电流传感器在此特定电磁环境中的特性，需要确定发射和抗扰度的适当限值。

D.2 发射要求

D.2.1 工业环境排放标准测试

本测试的目的是为在适用范围内定义的设备规定其电磁发射限值，这些设备的电磁发射可能干扰其他设备，见表D.1。

表D.1 工业环境排放标准测试要求

试验项目	基本标准	测试等级		限值
		测试端口	测试参数	
工业环境排放标准测试	IEC 61000-6-4	外壳端口	30-230 MHz	40dB ($\mu\text{V}/\text{m}$) 准峰值 测试距离 10m
			230-1000MHz	47dB ($\mu\text{V}/\text{m}$) 准峰值 测试距离 10m
		交流电源端口	0.15-0.5MHz	79dB (μV) 准峰值 66dB (μV) 平均值
			0.5-30MHz	73dB (μV) 准峰值 60dB (μV) 平均值

D.2.2 30Hz-150kHz 电源线传导发射

本测试方法用来测量受试设备输入电源线(包括回线)上的传导发射，测试依据标准 MIL STD 461F，测试方法分别为CE101、CE102-2007。其中CE101测试电流引线传导辐射频率在30Hz -10 kHz之间，CE102测试要求电流引线频率范围10 kHz -150 kHz。

D.3 D抗扰度要求

D.3.1 谐波和谐间波扰动

目的是检验电流传感器对其低压电源谐波和谐间波分量的抗扰度。本试验仅适用于采用交流电源的电流传感器，见表D.2。

表D.2 谐波和谐间波扰动试验要求

试验项目	基本标准	测试等级		评估标准
		端口	测试参数	
谐波和谐间波试验	IEC 61000-4-13	交流电源 端口	2级(总谐波畸变量10%)	A

D.3.2 电压慢变化电压暂降和短时中断

目的是检验电流传感器对其低压电源缓慢变化电源电压暂降和短时中断的抗扰度水平。本试验适用于交流或直流电源，见表D.3。

表D.3 电压慢变化、电压跌落和暂时中断试验规范

试验项目	基本标准	测试等级		评估标准
		端口	测试参数	
电压慢变化、电压跌落	IEC 61000-4-11	交流电源 端口	电压: +10%~-20%, 30%暂降 × 0.1s	A
和暂时中断			电压中断 × 0.02s	A

D.3.3 电快速瞬变 / 脉冲群

本试验目的是检验电流传感器对极快瞬变脉冲群的抗扰度，其起因是小感性负载切分、继电器接触颤动（传导干扰），或者高压开关操作或真空开关（发射干扰），见表D.4。

表D.4 电快速/脉冲群试验规范

试验项目	基本标准	测试等级		评估标准
		端口	测试参数	
电快速瞬变 / 脉冲群	IEC 61000-4-4	信号端口	±1kV(充电电压, 共模)	B
			5/50Tr/Th μ s	
			重复频率 5 kHz/100kHz	

		交流电源 端口	±2kV(充电电压,共模)	
			5/50Tr/Th μs	
			重复频率 5 kHz/100kHz	

D.3.4 静电放电

本试验目的是检验电流传感器对静电放电(ESD)的抗扰度,放电发生在操作者(直接或通过工具)触及设备或其邻近物。为了安全,电子器件通常装在与良好接地网牢固连接的金属箱内,这样使静电放电的概率非常小,见表D.5。

表D.5 静电放电试验规范

试验项目	基本标准	测试等级		评估标准
		端口	测试参数	
静电放电试验	IEC 61000-4-2	外壳端口	试验水平为2级 ±4(充电电压)kV	B

D.3.5 工频磁场抗扰度

本试验目的是检验电流传感器对工频磁场的抗扰度,此磁场是由邻近的电力线路、变压器等在正常运行或故障条件下产生,见表D.6。

表D.6 工频磁场试验规范

试验项目	基本标准	测试等级		评估标准
		端口	测试参数	
工频磁场 抗扰度	IEC 61000-4-6	外壳端口	50Hz, 60A/M (三分钟)	A
			50Hz, 1000A/M (3 秒)	

D.3.6 无线电频率辐射电磁场抗扰度

本试验目的是检验电流传感器对无线电发射机或其他装置发射电磁波所产生电磁场的抗扰度。对高压和中压设备最为严重的作用在于可能使用步谈机和移动电话,而附近广播电台或业余无线电的影响通常很低,见表D.7。

表D.7 射频场感应的传导骚扰抗扰度试验

试验项目	基本标准	测试等级		评估标准
		端口	测试参数	
射频场感应的传导骚扰	IEC 61000-4-6	信号端口	0, 15~80 MHz	A

扰抗扰度			10 V	A
			80%AM(1kHz)	
		交流电源 端口	0, 15~80 MHz	
			10 V	
			80%AM(1kHz)	

D.3.7 浪涌冲击试验

浪涌就是超出正常工作电压的瞬间过电压,本试验目的是检验电子式互感器对于因电网中操作和雷击(直接或间接)过电压引起单极性瞬变过程的抗扰度,见表D.8。

表D.8 浪涌冲击试验规范

试验项目	基本标准	测试等级			测试参数
		端口		测试参数	
浪涌冲击	IEC 61000-4-5	信号端口	线-地	±1kV(开路电压), 1.2/50(8/20) Tr/Th μs	B
		交流电源 端口	线-地	±2kV(开路电压), 1.2/50(8/20) Tr/Th μs	
			线-线	±1kV(开路电压), 1.2/50(8/20) Tr/Th μs	

D.3.8 射频场感应的传导骚扰抗扰度试验

电磁场会作用于电气、电子设备的电源线、通信线和接口电缆等连接线路上,这些连接引线的长度则可能与干扰频率的几个波长相当,因此,这些引线就变成被动天线,接受外界电磁场的感应,引线电缆就可以通过传导方式耦合外界干扰到设备内部(最终以射频电压和电流所形成的近场电磁骚扰到设备内部)对设备产生干扰,从而影响设备的正常运行,见表D.9。

表D.9 射频电磁场抗扰度试验规范

试验项目	基本标准	测试等级			评估标准
		端口	频率	测试参数	
射频电磁场抗扰度	IEC 61000-4-3	外壳端	80~1000	10 V/m, 80%AM(1kHz)	A

		口	MHz	3 V/m, 80%AM(1kHz)	
			1.4~2.0 GHz		
			2.0~2.7 GHz		

D.3.9 0~150kHz共模传导抗扰度试验

频率范围0~150kHz，此测试主要是验证设备对诸如来自线电流和接地系统中的回路泄露电流等传导共模骚扰的抗扰性能，见表D.10。

表D.10 共模传导抗扰度试验规范

试验项目	基本标准	测试等级			评估标准
		端口	类别	测试参数: 开路试验电压	
传导共模抗扰度	IEC 61000-4-16	信号、交流电源端口	工频持续骚扰	10V(rms)	A
			工频短时驻留骚扰	100V(rms)	
			15 Hz-150 kHz	10-1 V(rms)	
			150 Hz-1.5 kHz	1 V(rms)	
			1.5 kHz-15 kHz	1-10 V(rms)	
			15 kHz-150 kHz	10 V(rms)	

参考文献

- [1] IEC 60044-8 第 8 部分：电流传感器
 - [2] JB/T 7490-2007 霍尔电流传感器
 - [3] JJF:1059.1-2012 测量不确定度评定与表示
 - [4] JJF:1071-2010 国家计量校准规范编写规则
 - [5] JJF:1001-2011 通用计量术语及定义
 - [6] JJF 1094-2002 测量仪器特性评定
 - [7] GBT 16927.4-2014 高电压和大电流试验技术第 4 部分：试验电流和测量系统的定义和要求
 - [8] ITER 组织文档：ITER EDH Prat4：DH_Part_4_Electromagnetic_Compatibilit_4B523E_v3_0
 - [9] IEC 61000-6-2 通用标准--工业环境的抗扰度
 - [10] IEC 61000-6-4 通用标准-- 工业环境排放标准
-

中国电源学会团体标准
征求意见稿