

钳形电流表校准方法和测量不确定度分析

一、引言

钳形电流表，具有非接触测量和操作简单的特点，大量应用于科研生产和检修测试当中。现代钳形表，有的可以通过互感器原理测量交流电流，有的可以通过霍尔元件实现对交直流电流的测量。不仅成百上千安培的大电流可以测量，毫安级的环路小电流也可以用钳形表精确测量，同时不少钳形表还兼有电压、电阻测量功能，包括环路电流校准、通断测试等功能，所以其应用越来越广泛。

随着钳形表使用越来越多，送检量也越来越大。如何校准钳形表？有哪些方案可供选择？由于钳形表电流测量范围很宽，有些计量部门虽已具备一定范围的校准能力，如 1000A 以下，但对于一些新型钳形表，尤其是超过 1000A 的大电流钳形表，用什么标准可以覆盖呢？

按照 ISO17025 和 CNAS 标准，校准时，应该逐点报告测量不确定度。那么，钳形表的测量不确定度该如何分析呢？一般来说，钳形表校准时的测量不确定度可以划分为 A 类和 B 类不确定度，其中 A 类不确定度来源于对钳形表测量结果的抖动性和重复性的统计分析，B 类不确定度来源于校准时所用标准器的指标、被检表读数分辨力、线圈形状、环境温度影响等，但在具体校准过程中，钳形表测量不确定度分析计算过程还是有些复杂，尤其是标准器的不确定度分量会使一些人困惑。

本文将针对不同类型的钳形表提供几种可行的校准方法，并对其测量不确定度进行分析，判断测量不确定度比率 TUR 是否满足校准要求，即 $TUR > 3:1$ ，以帮助计量人员解决以上这些问题。

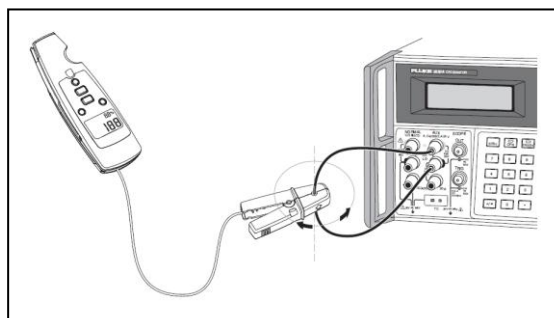


二、钳形表校准时标准器的不确定度

1. 毫安级直流钳形表的校准

1.1 校准方法

毫安级直流钳形表多用于工业生产现场变送器 4-20mA 直流电流的测量，例如福禄克的 771/772/773，它们一般采用霍尔元件进行测量，电流测量范围是从 0~100mA，钳口很小，可以选用比较流行的 Fluke 5500A、5502A、5520A、5522A 等多产品校准器直接校准。如图所示，将福禄克 55xxA 系列校准器的电流端的 HI 和 LO 端用一根导线直接连接起来，构成一个单匝线圈，然后用钳形表钳头直接夹住电流导线，设置 55xxA 输出钳形表测量范围的 mA 电流，就可以校准这些钳形表了。



1.2 标准器不确定度分析

我们以 Fluke 772 做被检钳形表，并选择 Fluke 5522A 做校准器来看一下它们之间的 TUR。查阅 Fluke 772 说明书可知它的直流电流测量准确度是 0.2% 读数 ± 5 个字 (0~20.99mA) 和 1% 读数 ± 5 个字 (21.0~100.0mA)。当校准点是直流 20mA 时，772 钳形表此时的分辨力是 0.01mA，1 年准确度是 $20 \times 0.2\% + 0.05 = 0.09\text{mA}$ 。由于 772 钳形表钳口的直径很小，刚好容纳下电流输出导线，此时导线构成的单匝线圈的不确定度可以忽略，标准器的不确定度主要是校准器 5522A 的直流电流输出不确定度。5522A 在输出 20mA 电流时的 1 年不确定度指标是 100ppm 输出 + 0.25 μA ，99% 置信度水平，即不确定度为 $100\text{ppm} \times 20\text{mA} + 0.25 \mu\text{A} = 0.00225\text{mA}$ 。

B 类不确定度的一个分量 u_{B1} 来自于校准标准，此例即 5522A 的 20mA 输出的 1 年总不确定度，因此：

$$u_{B1} = 0.00225\text{mA} \quad (99\% \text{ 置信度})$$

$$TUR = \frac{0.09}{0.00225} = 40:1, \text{ 符合校准要求。}$$

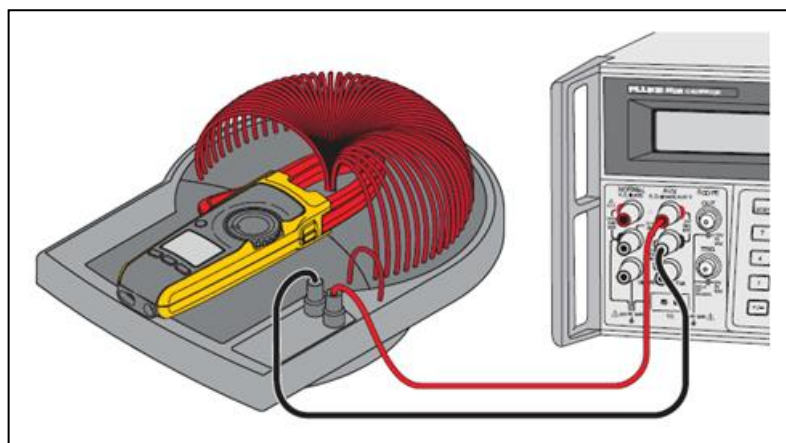
2. 1000A 以下钳形表的校准

2.1 校准方法:

在 1000A 以下测量范围的钳形表按测量原理分为两类，一类基于互感器原理进行测量，只能测量交流电流，钳形表的钳口中有铁芯，铁芯上缠绕有感应线圈，相当于互感器的副边，被测电流的导线相当于互感器的原边。当钳口闭合，原边输入的电流穿越铁芯磁场，就会在副边产生感应电流，通过测量副边的电流就可以获得原边输入的电流值；另一类钳形表基于霍尔效应原理，既可以测量交流电流，也可以测量直流电流，它是在钳头中嵌入了霍尔元件，当电流导线穿过磁场时，霍尔元件会产生与电流和磁场强度成正比的霍尔电压，通过测量霍尔电压，就可计算出电流的大小。

由于校准器的电流输出能力通常都比较小，例如福禄克 55xxA 系列校准器的电流输出最大只有 20A，和钳形表的量程相比相差很大。要校准这种类型的钳形表，需要通过外接多匝互感线圈即用等安匝法来校准。这种用绝缘导线或漆包线绕制而成的校准线圈，在结构上把校准器输出的电流以多匝形式沿同一方向多次穿过铁芯，因此在多匝线圈导线汇聚的一侧中产生的等效安匝电流是校准器输出电流的匝数倍，从而实现大电流钳形表的校准。

如图所示，校准器 5522A 电流输出端子连接至配套的 5500A/COIL 50 匝校准线圈，钳形表检测到的就是 50 倍于 5522A 的输出电流，这种线圈可输入的最大电流为 20.5A，等效安匝电流是 1025A。这种线圈不仅可以校准交流钳形表，也可以校准直流钳形表。校准时，因为接入了线圈，所以在分析标准器的不确定度时，必须考虑线圈测量不确定度的影响。



2.2 标准器不确定度分析

我们以 Fluke 381 做被检钳形表，它通过标准钳头测量交直流电流的量程为 999.9A。我们选择 Fluke 5522A 和 5500A/COIL 50 匝校准线圈做标准器，并选择接近测量上限的一个校准点 975A@50Hz 来看下 381 和标准器两者的 TUR。

(1) 要输出 975A 等安匝电流，5522A 需要输出 19.5A 电流，此时量程为 20A，该量程的 1 年不确定度指标是 0.12% 输出 + 2000 μ A (LCOMP ON)，99% 置信度水平，则 19.5A@50Hz 输出时的不确定度指标是 0.12% * 19.5A + 2000 μ A = 0.0254A，相对于输出值 19.5A 的不确定度为 0.13%。

(2) 5500A/COIL 校准线圈的 1 年不确定度有两种，一种是针对互感器钳形表，一种是霍尔效应钳形表。381 的夹钳是霍尔效应的，故此线圈在 975A@50Hz 时的指标是 0.56% 安匝 + 0.9A，不确定度为 (0.56% * 975 + 0.9)A = 6.36A，相对于输出值 975A 的不确定度为 0.652%。

(3) 当 5522A 和 5500A/COIL 线圈最终输出 975A@50Hz 等效安匝电流时，标准器的不确定度为：

$$u_{B1} = \sqrt{5522A \text{ 电流输出不确定度}^2 + 5500A/COIL \text{ 线圈不确定度}^2}$$

即 $u_{B1} = \sqrt{0.13\% + 0.652\%} = 0.665\%$ ，或 $u_{B1} = 0.665\% * 975A = 6.486A$ 。

(4) Fluke 381 通过标准钳头测量时的交流电流测量准确度是 2% 读数 \pm 5 个字 (10~100Hz) 和 5% 读数 \pm 5 个字 (100~500Hz)，量程为 999.9A，分辨力 0.1A。当校准点是交流 975A@50Hz 时，381 的 1 年准确度是 975 * 2% + 0.5 = 20A。

因此 $TUR = \frac{20}{6.486} = 3.084: 1$ ，符合校准要求。

依此类推，我们也能计算得到 381 夹钳直流电流和交流电流校准时整个量程校准点的 TUR 表。可以看出，在 5522A 打开电感补偿输出的情况下，利用 5500A/COIL 线圈校准，除了有一个点 TUR 略小于 3 之外，其他校准点的 TUR 比均满足校准的要求。

UUT: 381 iFlex 柔性电流钳				标准器1: 5522A校准器			标准器2: 5500A/COIL线圈			标准器 总体不确定度		测量不 确定度 比率 TUR
功能	标称值	频率	不确定度	输出	不确定度	不确定度 相对值	安匝电流	不确定度	不确定度 相对值	不确定度 相对值	不确定度	
	A	Hz	A	A	A		A	A			A	
DCI	10	0	1.0	0.20	0.000023	0.011%	10.00	0.12	1.200%	1.200%	0.120	8.333
	100	0	2.5	2.00	0.000800	0.040%	100.00	0.64	0.640%	0.641%	0.641	3.899
	600	0	12.5	12.00	0.012750	0.106%	600.00	3.5	0.583%	0.593%	3.558	3.514
	975	0	20.0	19.50	0.020250	0.104%	975.00	5.375	0.551%	0.561%	5.470	3.657
ACI	10	50	0.7	0.2	0.000200	0.100%	10.00	0.086	0.860%	0.866%	0.087	8.085
	100	50	2.5	2.0	0.002600	0.130%	100.00	0.81	0.810%	0.820%	0.820	3.047
	600	50	12.5	12.0	0.016400	0.137%	600.00	4.26	0.710%	0.723%	4.338	2.881
	900	50	18.5	18.0	0.023600	0.131%	900.00	5.94	0.660%	0.673%	6.056	3.055
	975	50	20.0	19.5	0.025400	0.130%	975.00	6.36	0.652%	0.665%	6.486	3.084
	10	440	1.0	0.2	0.000200	0.100%	10.00	0.086	0.860%	0.866%	0.087	11.550

(5) 对于1000A以下钳形表校准, 还有一种校准线圈Fluke 9100-200可供选择, 它包括两个线圈, 一个10匝, 一个50匝。10匝线圈口径较细, 特别适合校准钳口小的钳形表, 测量范围可以到200A。50匝的线圈也可以像5500A/COIL线圈一样校准到1000A。这种线圈也可以和55xxA校准器联用, 而且其准确度较5500A/COIL更高, 在0~500Hz范围内均可达到0.2%, 因此校准时可以获得更好的TUR比。如果遇到5500A/COIL 线圈校准TUR不足的时候, 可以考虑用9100-200替换。

按照上面相同的校准步骤, 代入9100-200线圈的技术指标, 我们便能计算出381夹钳直流电流和交流电流校准时整个量程校准点的TUR表, 可以看出所有校准点的TUR均符合校准要求。



UUT: 381 iFlex 柔性电流钳				标准器1: 5522A校准器			9100-200线圈			标准器 总体不确定度		测量不 确定度 比率 TUR
功能	标称值	频率	不确定度	输出	不确定度	不确定度 相对值	安匝电流	不确定度	不确定度 相对值	不确定度 相对值	不确定度	
	A	Hz	A	A	A		A	A			A	
DCI	10	0	1.0	0.20	0.000023	0.011%	10.00	0.02	0.200%	0.200%	0.020	49.921
	100	0	2.5	2.00	0.000800	0.040%	100.00	0.2	0.200%	0.204%	0.204	12.257
	600	0	12.5	12.00	0.012750	0.106%	600.00	1.2	0.200%	0.226%	1.359	9.199
	975	0	20.0	19.50	0.020250	0.104%	975.00	1.95	0.200%	0.225%	2.197	9.103
ACI	10	50	0.7	0.2	0.000200	0.100%	10.00	0.02	0.200%	0.224%	0.022	31.305
	100	50	2.5	2.0	0.002600	0.130%	100.00	0.2	0.200%	0.239%	0.239	10.481
	600	50	12.5	12.0	0.016400	0.137%	600.00	1.2	0.200%	0.242%	1.453	8.600
	900	50	18.5	18.0	0.023600	0.131%	900.00	1.8	0.200%	0.239%	2.152	8.595
	975	50	20.0	19.5	0.025400	0.130%	975.00	1.95	0.200%	0.239%	2.327	8.594
	10	440	1.0	0.2	0.000200	0.100%	10.00	0.02	0.200%	0.224%	0.022	44.721

3. 1000A 以上大电流钳形表的校准

3.1 大电流钳形表的应用及校准解决方案

目前, 工业生产现场还有很多电流钳电流测量范围远远超过 1000A, 如 Fluke 345 基于互感器原理可以测量到 2000A, 还有一些钳形表利用柔性电流钳可以测量更大的电流, 如 Fluke 381 配套的柔性电流钳测量范围达到 2500A 电流。这种柔性电流钳实质上是一种缠绕在非铁磁性材料上的环形电流互感器, 具有响应快, 不会磁饱和等特点, 可以测量较大的电流, 因此得到了广泛的应用。

校准这些大电流钳形表, 以前比较困难, 因为没有合适的校准线圈和校准源。当校准器的电流大小仍然只有几十安培时, 要输出上千安培的等效安匝电流, 毫无疑问就需要增加校准线圈的匝数。而线圈的电感量和匝数呈平方倍的关系, 当线圈匝数增加时, 电感量增加的更快, 当电感量过大, 很多电流校准源就带不动了, 因此用单纯增加线圈匝数的方法去校准是行不通的。

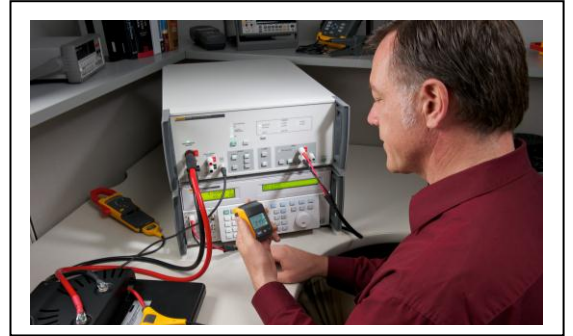
福禄克公司最新研制出的 52120A 大电流标准源, 为大电流钳形表的校准提供了比较完美的解决方案。该标准源可以输出 120A 的交流电流或 100A 的直流电流, 并配套推出了 3000A(25 匝)和 6000A(50 匝)两种校准线圈。52120A 具有开环控制和闭环控制两种工作模式, 在开环控制模式下, 它可以作为跨导放大器, 把前面板输入端的小电压转换为大电流输出, 也可以作为电流放大器, 把输入的小电流转换为大电流输出。52120A 可以与 Fluke 6105A 标准功

率源或最新推出的 Fluke 5730A 多功能校准器结合在一起作为这两种源的配套电流放大器，通过后面板的专用控制电缆以闭环模式工作，无需在前面板输入电压或电流，只需要在这两种源上直接设置 52120A 的输出电流即可，不仅方便，而且电流输出的不确定度更小。

3.2 用 52120A 开环模式校准

3.2.1 校准方法

如图所示，该钳形表校准装置中包含 5522A 校准器、52120A 大电流标准源和 52120A/3kA 校准线圈。Fluke 381 为被检钳形表，同时我们确定以 2500A@50Hz 作为校准点。校准时，首先要把 52120A 设置为电压输入模式，电流量程设为 120A 量程，之后让 5522A 输出 1V@50Hz 交流电压，并把这个电压加到 52120A 的输入端，再把 52120A 输出的电流连接到 52120A/3kA 的输入端，之后把 381 的柔性电流钳接入线圈测量读数。



3.2.2 标准器不确定度分析

标准装置的不确定度由以下三部分构成，一是 5522A 的 1V@50Hz 交流电压准确度，二是 52120A 在输出 100A@50Hz 时的交流电流准确度，三是 52120A/3kA 线圈输出的 2500A@50Hz 等效安匝电流的准确度。

另外，52120A 还需要考虑校准线圈在不同频率工作时的电感量影响，需要打开或关闭电感补偿，而电感补偿打开或关闭时 52120A 的电流输出不确定度是不同的，电感补偿打开时指标要略差一些。这三种不确定度都需要换算为相对于其标称输出值的不确定度再用方和根法合成。

(1) 5522A 输出 1V@50Hz 时的 1 年不确定度是 150ppm 输出 + 60 μV，不确定度为 $150 \times 0.000001 \times 1 + 60 \times 0.000001 = 0.00021$ V，相对于输出值 1V 的不确定度为 0.021%。

(2) 52120A 在输入 1V@50Hz 时，把量程定在 120A，输出值就是 100A@50Hz，LCOMP OFF 电感补偿关闭时指标为 0.015% 输出 + 0.02% 量程，即 $(0.015\% \times 100 + 0.02\% \times 120)A = 0.039A$ ，相对于输出 100A 的不确定度为 0.039%。

(3) 52120A/3kA 线圈在输入为 100A@50Hz 时，其等效安匝电流为 2500A@50Hz，其指标为 0.7% 安匝 + 0.7% * 52120A 量程，不确定度为 $(0.7\% \times 2500 + 0.7\% \times 120)A = 18.34$ A，相对于测量标称值 2500A 的不确定度为 0.734%。

(4) 以上标准系统在输出 2500A@50Hz 等效安匝电流时，标准器的不确定度为：

$$u_{B1} = \sqrt{5522A \text{ 电压不确定度}^2 + 52120A \text{ 电流不确定度}^2 + 52120A \text{ 3kA 线圈不确定度}^2}$$

$$u_{B1} = \sqrt{0.021\%^2 + 0.039\%^2 + 0.734\%^2} = 0.735\% \quad (52120A \text{ 在 LCOMP OFF 时})$$

如果换算为绝对电流值，此钳形表校准系统的不确定度为：

$$u_{B1} = 2500A \times 0.735\% = 18.375A \quad (52120A \text{ 在 LCOMP OFF 时})$$

(5) Fluke 381 通过柔性电流钳测量交流电流时的准确度为 3% 读数 ± 5 个字 (量程 999.9A/2500A，频率 45Hz~500Hz)，在 2500A@50Hz 时准确度为 $(3\% \times 2500 + 5)A = 80A$ 。

$$TUR = \frac{80}{18.375} = 4.35:1 \quad (52120A \text{ 在 LCOMP OFF 时})$$

可以看出在电感补偿关闭时符合校准要求。

依此类推，我们通过计算得到 381 柔性电流钳校准时全部校准点的 TUR 表。可以看出，在 52120A 电感补偿关闭时，利用 52120A/3kA 线圈校准，各校准点的 TUR 比均满足校准的要求。

UUT: 381 iFlex 柔性电流钳				标准器1: 5522A 校准器			标准器2: 52120A 跨导放大器				标准器3: 52120A/3kA 校准线圈			标准器总体不确定度		测量不确定度比率 TUR
功能	标称值	频率	不确定度	输出	不确定度	不确定度相对值	输出	量程	不确定度	不确定度相对值	安匝电流	不确定度	不确定度相对值	不确定度相对值	不确定度	
	A	Hz	A	V	A		A	A	A		A	A		A		
ACI	10	50	5.3	0.40	0.000120	0.030%	0.40	2	0.00146	0.365%	10.00	0.084	0.840%	0.916%	0.092	57.837
	600	50	23.0	0.24	0.000043	0.018%	24.00	120	0.0276	0.115%	600.00	5.04	0.840%	0.848%	5.088	4.520
	1000	50	35.0	0.40	0.000120	0.030%	40.00	120	0.03	0.075%	1000.00	7.84	0.784%	0.788%	7.882	4.441
	2500	50	80.0	1.00	0.000210	0.021%	100.00	120	0.039	0.039%	2500.00	18.34	0.734%	0.735%	18.373	4.354
	10	440	5.3	0.40	0.000120	0.030%	0.40	2	0.00146	0.365%	10.00	0.084	0.840%	0.916%	0.092	57.837
	2500	440	80.0	1.00	0.000210	0.021%	100.00	120	0.039	0.039%	2500.00	18.34	0.734%	0.735%	18.373	4.354

(6) 52120A 也可以做电流放大器，把输入的小电流转换为大电流，进行钳形表的校准。不确定度计算方法与上述介绍类似，只需要把其中的 5522A 的电压不确定度分量换成电流不确定度分量即可。当然，这种小电压、小电流

信号也可以使用多种校准器，如 5500A\5502A\5520A\5700A\5720A 等，不确定度分析方法类似。

3.3 用 52120A 闭环模式校准

3.3.1 校准方法

52120A 可以与 5730A 或 6105A 一起构成闭环控制模式，这里具体分析一下以 5730A、52120A 及校准线圈组成钳形表校准系统时的不确定度。

5730A 是福禄克公司 2013 年最新研制的多功能校准源产品，具有交直流电压、交直流电流、电阻五项功能，是代替 5720A 的新一代校准数字多用表的理想校准器。其后面板具有专用接口和 52120A 直接相连，把 52120A 作为它的从属电流放大器使用，在 5730A 的前面板直接控制 52120A 的各项设置，输出高达 120A 的大电流，配合 3000A 和 6000A 的校准线圈，可完成对各种钳形表的校准。

3.3.2 标准器不确定度分析

当用 5730A 闭环控制 52120A 时，在 5730A 说明书中给出了 52120A 和 5730A 闭环控制时的合成不确定度，各量程的指标均比开环控制时要高。现在以前述的 2500A@50Hz 校准点示例来说明。



(1) 52120A 在量程为 120A，输出值为 100A@50Hz，并由 5730A 闭环控制时不确定度指标为 0.011% 输出 + 0.003% 量程，不确定度为 $(0.011\% \times 100 + 0.003\% \times 120)A = 0.0146A$ ，相对于输出值 100A 的不确定度为 0.015%。

(2) 52120A/3kA 线圈在输入为 100A@50Hz 时，其等效安匝电流为 2500A@50Hz，其指标为 0.7% 安匝 + 0.7% * 52120A 量程，不确定度为 $(0.7\% \times 2500 + 0.7\% \times 120)A = 18.34A$ ，相对于输出值 2500A 的不确定度为 0.734%。

(3) 以上校准系统在输出 2500A@50Hz 等效安匝电流时，标准器的不确定度为：

$$u_{B1} = \sqrt{52120A \text{ 电流不确定度}^2 + 52120A \text{ 3kA 线圈不确定度}^2}$$

$$u_{B1} = \sqrt{0.015\%^2 + 0.734\%^2} = \pm 0.734\%$$

换算为绝对电流值为：

$$u_{B1} = 2500A \times 0.734\% = 18.344A$$

(4) Fluke 381 在 2500A@50Hz 时的准确度为 3% 读数 ± 5 个字 (量程 999.9A/2500A，频率 45Hz~500Hz)，

$$\text{即 } (3\% \times 2500 + 5)A = 80A, \quad \text{TUR} = \frac{80}{18.344} = 4.36:1$$

可以看出 52120A 在 5730A 闭环控制时在 2500A@50Hz 校准点完全符合校准要求。

同样的道理，也可计算出 5730A 在整个量程各校准点的 TUR 表，均符合校准要求。

UUT: 381 iFlex 柔性电流钳				标准器1: 52120A 跨导放大器 (5730A闭环控制下)				标准器2: 52120A/3kA 校准线圈			标准器 总体不确定度		测量不确定 度比率 TUR
功能	标称值	频率	不确定度	输出	量程	不确定度	不确定度 相对值	安匝电流	不确定度	不确定度 相对值	不确定度 相对值	不确定度	
	A	Hz	A	A	A	A		A	A			A	
ACI	10	50	5.3	0.40	2	0.000104	0.026%	10.00	0.084	0.840%	0.840%	0.084	63.065
	600	50	23.0	24.00	120	0.00624	0.026%	600.00	5.04	0.840%	0.840%	5.042	4.561
	1000	50	35.0	40.00	120	0.01	0.020%	1000.00	7.84	0.784%	0.784%	7.843	4.463
	2500	50	80.0	100.00	120	0.0146	0.015%	2500.00	18.34	0.734%	0.734%	18.344	4.361
	10	440	5.3	0.40	2	0.000104	0.026%	10.00	0.084	0.840%	0.840%	0.084	63.065
	2500	440	80.0	100.00	120	0.0146	0.015%	2500.00	18.34	0.734%	0.734%	18.344	4.361

三、钳形表测量不确定度的计算

前面我们已经分析了在钳形表校准时标准器的不确定度分量，下面我们再以 381 柔性电流钳 2500A@50Hz 校准点为例，进行全面的测量不确定度分析。

当 52120A/3kA 输出 2500A@50Hz 校准 Fluke 381 + i2500 柔性电流钳时，假定有 5 个测量读数，分别为 2510，2512，2511，2512，2510A，我们可以通过 CNAS-GL05:2011 中的下列公式计算出校准实例的 A 类不确定度。

首先计算出测量读数的平均值为：

$$\sum_{i=1}^N x_i = \frac{(2516 + 2514 + 2515 + 2513 + 2512)}{5} = 2514A$$

接着可以得出单次测量读数的标准偏差为：

$$s(x) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} = \sqrt{\frac{(2)^2 + 0^2 + 1^2 + (-1)^2 + (-2)^2}{5-1}} = 1.6A$$

之后计算出观测列平均值的标准不确定度，也就是 A 类不确定度

$$U_A = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} = \frac{1.6}{\sqrt{5}} A = 0.7A$$

通常都安置信度为 95% 报告扩展不确定度，若要准确报告测量不确定度，需要进行无限多次测量，但这是不现实的，一般情况下都会选择 5~10

次测量的结果计算测量不确定度。按照 CNAS-GL05:2011 3.3.1C，当测量次数较少时，要用学生 t 分布确定的安全因子 T 对 A 类不确定度进行修正，否则它的值可能会低估。本例中自由度 $\nu = n-1 = 4$ ，检索学生 t 分布表在置信度 95% 时的 t 分布系数为 2.78，则安全因子 $T=2.78/2=1.39$ ，修正后的 A 类不确定度为：

$$U_{A'} = T * \frac{s(x)}{\sqrt{n}} = 1.435 \times 0.7A = 1.0A$$

校准时，来自被检表的分辨力的影响无法用统计的方法去分析，属于 B 类不确定度的一个分量，但由于它的数字变化可以认为是从 0~9 呈均匀分布，因此可按经验公式取分布因子 k 为 $\sqrt{3}$ ，分辨力的影响取它的半宽度，由于当前量程的分辨力是 1A，计算得出：

$$u_{B2} = \frac{a}{k} = \frac{1}{2} \times \text{LSD} / \sqrt{3} = \frac{1}{2 \times \sqrt{3}} = 0.29A$$

由于重复性测量读数的波动中包括了分辨力的影响，此例中标准偏差为 1.6A，远大于分辨力的影响 0.29A，因此可以忽略分辨力 u_{B2} 的影响。

直接引用前面计算的在 5522A、52120A、52120A/3kA 三个标准器组成的校准装置中的标准器不确定度分量 u_{B1} ，其置信度水平为 99%，因此需要除以 2.58 的置信度因子折算为 66.7% 置信度水平的标准不确定度再与其它 B 类不确定度分量合成，

$$\text{故 } u_{B1} = \frac{u_{B1}}{k} = \frac{18.375}{2.58} = 7.1A$$

其他 B 类不确定度的来源可能还有线圈形状、钳形表放置位置、环境温度等影响，但由于本校准是在标准实验室进行，测试条件比较完善，测试过程比较规范，因此这些因素的影响也可以忽略不计。

故 B 类不确定度在各个分量合成后，有：

$$u_{B2} = \sqrt{u_{B1}^2 + u_{B2}^2 + \dots} = \sqrt{7.1^2} = 7.1A$$

合成标准不确定度为：

$$u_c(y) = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{1.0^2 + 7.1^2} = 7.2A$$

按 95% 置信度报告的扩展不确定度为：

$$U = k u_c(y) = 2 \times 7.2 = 14.4A$$

按照扩展不确定度取与标称值相同的单位量纲和两位有效数字，则扩展不确定度 $U = 14A$

因此，这台 Fluke 772 的 2500A@50Hz 校准点的最终校准结果为：**2500 ± 14 A, k=2**。

至于其他大电流钳形表的测量不确定度分析，只需将文中对应的标准器的不确定度分量代入，其他分量与上面示例类似，在此就不赘述了。

有效自由度	t分布系数					
	68.27	90	95	95.45	99	99.73
1	1.84	6.31	12.71	13.97	63.66	235.8
2	1.32	2.92	4.3	4.53	9.92	19.21
3	1.2	2.35	3.18	3.31	5.84	9.22
4	1.14	2.13	2.78	2.87	4.6	6.62
5	1.11	2.02	2.57	2.65	4.03	5.51
6	1.09	1.94	2.45	2.52	3.71	4.9
7	1.08	1.89	2.36	2.43	3.5	4.53
8	1.07	1.86	2.31	2.37	3.36	4.28
9	1.06	1.83	2.26	2.32	3.25	4.09
10	1.05	1.81	2.23	2.28	3.17	3.96
20	1.03	1.72	2.09	2.13	2.85	3.42
50	1.01	1.68	2.01	2.05	2.68	3.16
100	1.005	1.66	1.984	2.025	2.626	3.077
∞	1	1.645	1.96	2	2.576	3