

55XX 系列校准器的溯源问题探讨

一、引言

在直流低频电学校准实验室，多产品校准器发挥着重要作用，例如福禄克的 5500 系列多产品校准器。这种校准器一台就是一个小型的校准实验室，帮助工程技术人员检定各类仪表，例如数字多用表，记录仪，功率表，欧姆表，板表，钳形表，示波器，热工二次仪表等等。对于校准器本身的性能，也需要定期检查和校准，以保障日常工作的可信度。本文阐述了福禄克 55XX 系列校准器溯源问题，尤其是一直受困扰的电流溯源问题。

二、现状

福禄克校准器在国内有数千台，服务于各级计量校准实验室以及研究机构，对于校准器本身的量值溯源，一直是个比较复杂的问题。目前我国国家还没有出台校准器相应的检定规程或校准规范，校准器的检定/校准有些实验室依据原厂说明书进行，有些参考类似仪器例如过程校验仪的校准规范。校准水平参差不齐。

随着校准实验室能力的提高和技术水平的不断改进，以及更高等级新仪器新设备开发面世，校准器本身的溯源要求更加规范和严格。要求逐点报告测量不确定度，显然一台仪器设备不一定满足所有测试点的校准要求，需要多台设备组成的校准系统来帮助完成。

ISO 17025 明确要求报告校准不确定度。校准实验室或测试实验室做所有校准测量时，应该拥有并使用固定的程序来评估测量的不确定度。中国国家实验室认可委员会 CNAS 最近要求确实执行 ISO17025，在校准结果中正确报告校准不确定度，目的是说明本实验室的校准能力是否达到 TUR 比率 ≥ 3 的要求。

如下是某实验室校准 8508A 的校准证书：

名 称： 数字多用表标准装置

NAME:

测 量 范 围：DCV： $\pm(10\text{mV} \sim 1100\text{V})$, ACV： $10\text{mV} \sim 1100\text{V}(10\text{Hz} \sim 1\text{MHz})$, DCI： $\pm(10\mu\text{A} \sim 11\text{A})$, ACI： $10\mu\text{A} \sim 11\text{A}(10\text{Hz} \sim 10\text{kHz})$, OHM： $1\Omega \sim 100\text{M}\Omega$

MEASURING RANGE:

扩展(或合成标准)不确定度(或准确度): DCV: $U = 5.1 \times 10^{-6}$; ACV: $U = 7.4 \times 10^{-5}$; DCI: $U = 4.9 \times 10^{-5}$; ACI: $U = 3.2 \times 10^{-4}$; OHM: $U = 7.8 \times 10^{-6}$; ($k=2$)

EXPANDED (OR COMBINE STANDARD) UNCERTAINTY(OR ACCURACY):

以上看出，每个校准项目只给出了一个典型点的测量不确定度，送检单位无法判断这是测量系统最优点的不确定度，还是最差点的不确定度。无法确信每个测试点是否都满足准确度的要求。

目前，中国计量院等国家级标准计量机构已经开始在校准证书中逐点报告测量不确定度了，并且此活动已经展开几年。由此来看，对整个测量活动的要求更加严格，对标准器等级要求更高更严谨了。

满足逐点报告测量不确定度需要提升设备能力，不能期望用一台高精度仪器满足所有校准的要求。

三、校准器溯源

我们以使用量最大的 FLUKE 5500A 和 5520A 校准器举例，来看一下具体的校准项目和实施过程。

5500A/5520A 最主要的校准项目有如下几项。

- 直流电压
- 交流电压
- 直流电流
- 交流电流
- 电阻

以往，很多实验室校准 5500A/5520A 用最简单的方法，就是使用 8508A 八位半高精度数字多用表直接测量。操作虽然简单，但实际计算每个校准点的测量不确定度，我们会发现有些参数，尤其是电流测量不能满足对标准器的准确度要求。

下面，我们逐一阐述一下五大项目的校准方法。

1. 直流电压（以 5500A 为例）

5500A 直流电压输出从 330mV 量程至 1050V，8508A 的直流电压测量功能可满足 3 倍的准确度关系，可以直接测量。

5500A 校准点 (V)	5500A 年指标	8508A 年指标	TUR
3	0.0052%	0.00043%	11.9
-3	0.0048%	0.00043%	11.1
0.3	0.0070%	0.00433%	16.1
30	0.0052%	0.00058%	8.8
300	0.0057%	0.00062%	9.1
1000	0.0057%	0.00050%	11.4

表 1 8508A 校准 5500A 的直流电压

校准之前，仪器按照要求预热足够的时间，8508A 和 5500A 都要进行校零工作，清除零点对测量结果的影响。一般校准 5500A 输出 3V 以内的小电压时，建议使用低热电势测试导线，以消除接触点热电势不平衡对测量结果带来的测量误差，从而进一步提高测量准确度。



图 1 8508A 校准 5520A/5522A 直流电压

另外校准 5500A 的-1000V 输出接线时，8508A 输入高低端不可以反接。这是由于 8508A 的电压输入低端最高承受电压为 920V，坏。超过此电压输入可能会对电路造成不同程度的损坏。

2. 交流电压（以 5500A 为例）

5500A 交流电压输出指标采用 8508A 不能满足指标要求，几个主要校准点以表 2 举例说明。例如：5500A 输出 0.3V，100Hz 的交流电压年指标为：0.017%，而 8508A 年指标为 0.013%，TUR 比率仅为 1.3，不能满足 3 倍以上的准确度要求。校准 5500A 交流电压可以使用准确度更高的 5790A。5790A 是一个高准确度的交流电压测量标准，它既有热电转换标准的优异准确度，又有数字多用表易于使用的特点。

5500A 校准点 (V)	频率	5500A 年指标	8508A 年指标	TUR
0.03	100Hz	0.035%	0.011%	3.13
0.3	100Hz	0.017%	0.013%	1.30
0.3	500kHz	0.223%	7.667%	0.03
3.2999	100Hz	0.017%	0.013%	1.34
30	100Hz	0.017%	0.013%	1.29

表 2 8508A 直接校准 5500A 的交流电压

校准 5500A 的交流电压时，测试导线可使用普通的导线，高频时测试导线越短越好，以减少信号的衰减。

同样在校准前，也应注意对 5500A 进行正确的校零。



图 2 5790A 校准 5520A/5522A 交流电压

3. 电阻功能（以 5500A 为例）

5500A 校准器可以输出连续可调电阻 0-330M Ω ，校准时可采用 8508A，满足准确度的要求。

一般输出 100k Ω 以下的小电阻时，建议使用四线电阻的测量方式进行校准。这是由于两线电阻测量时，

测试引线电阻和接触电阻会带来一定的附加误差。对于小电阻测量时，不能忽略。采用四线电阻测量方式，将电流激励回路和被测电阻上电压测量分开，测量到的电压为真正的被测电阻两端电压。从而消除了测试引线及接触电阻带来的测量误差。

采用 8508A 作为标准器校准时，另外应注意应使用 8508A 的 Ω 测量功能，不要使用 $\text{HiV}\Omega$ ，防止测试电压过高对校准器造成损坏。

另外校准 5500A 的电阻功能时，8508A 应根据测试点使用电阻测量功能的手动量程，避免反复进行量程切换而无法得到正确测量结果。



图 3 8508A 校准 5500A 电阻功能（两线电阻）



图 4 8508A 校准 5500A 电阻功能（四线电阻）

4. 电流功能（以 5520A 为例）

校准器电流溯源问题一直是个难题。

利用高精度数字多用表电流测量功能直接检定，方法简单，是一般电流源的常规校准方法。数字多用表的电流测量功能，一般是内置分流器，被测电流流过已知分流器，通过监测分流器两端电压，从而测得输入电流。而一般数字多用表体积有限，内置分流器一般都做的比较小，一是准确度不是很高，二是空间有限，散热效果比较差，温度系数比较大。因此数字表测电流的准确度都不是很好。

我们以 Fluke5520A 校准器举例来说。电流输出的准确度指标比较高。直接用数字多用表校准，我们知道 8508A 标准数字多用表的电流量程是 200 μA ，2mA，20mA，直至 20A 量程，和 5520A 的电流校准点不是很匹配，误差较大，不能满足 3 倍以上准确度要求，因此测量不确定度比较大，我们以表 3 举例说明。

8508A 直接测量 5520A 交流电流 TUR，如表 3 所示：

5520A 校准点	频率	5500A 年指标	8508A 年指标	TUR
0.3mA	1kHz	0.158%	0.117%	1.3
3 mA	1kHz	0.105%	0.117%	0.9
30 mA	1kHz	0.0467%	0.116%	0.4
300 mA	1kHz	0.0467%	0.153%	0.3
2.9A	1kHz	0.129%	0.175%	0.7

表 3 8508A 直接校准 5520A 交流电流

我们再用 A40B+8508A 做电流测量标准，来看看达到的效果，以下表说明。TUR 比率可以实现 3:1 甚至更高，测量结果的不确定度大大降低，实现了可靠的校准。



图 5 A40B+8508A 校准 5520A 输出电流

A40B+8508A 校准 5520A 交流电流达到的 TUR 比率，如表 4 所示：

5520A 校准点	5520A 年指标	A40B+8508A	TUR
300uA, 1kHz	0.158%	0.0158%	10
3mA, 1kHz	0.105%	0.0151%	7
30mA, 1kHz	0.0467%	0.0124%	3.7
300mA, 1kHz	0.0467%	0.0125%	3.7
2.9A, 1kHz	0.129%	0.0112%	11

表 4 A40B+8508A 校准 5520A 交流电流

A40B 配合 5790A 交流电压测量标准可以实现更好的性能，TUR 比率如表 5 所示：



图 6 A40B+5790A 校准 5520A 交流电流

A40B+5790A 校准 5520A 交流电流实现 TUR，以表 5 所示：

5520A 校准点	5520A 年指标	A40B+5790A (ppm)	TUR
300uA, 1kHz	0.158%	64	24
3mA, 1kHz	0.105%	42	25
30mA, 1kHz	0.047%	41	11
300mA, 1kHz	0.047%	43	11
2.9A, 1kHz	0.129%	45	29

表 5 A40B+5790A 校准 5520A 交流电流

由上述可知，Fluke A40B 配合 高精度电压测量装置 8508A 或 5790A 是实现校准器电流溯源的最佳解决方案。

四、总结

任何一个规范的校准过程，测量不确定度非常重要，他代表了本次测量结果的可信度如何，是考察一个校准实验室能力的重要指标。ISO17025 明确提出校准过程要逐点报告测量不确定度。因此，为了对 5500A/5520A 等校准器实现规范的校准，需用一系列标准器来完成，例如：8508A，A40B，5790A 等。单独一台仪器是无法保证每项参数校准的不确定度要求的。