

仪器检测中衡器的不确定性评估研究

安丘市消费者权益保护中心（计量测试所） 程现斌

摘要：随着仪器制造精密度的提高，对校正质量的需求日益突显。研究针对仪器检测中衡器校正技术，旨在探讨校正过程中的不确定度评估方法及其对仪器准确度的影响。首先介绍了仪器校正的目的和重要性，强调了校正结果对仪器使用者的影响。随后详细阐述了仪器检测中衡器校正过程中的不确定度来源与评估方法，包括空气浮力修正、偏载效应和对流影响修正等。提出了仪器检测中衡器作为标准器使用时的不确定度评估方法，提出仪器检测中衡器作为标准器使用时的不确定度评估方法，可为仪器校正相关领域人员提供参考。

关键词：仪器衡器；校正技术；质量控制；计量原理

DOI： 10.12433/zgkjtz.20241906

随着时代的进步，仪器制作的精密度越来越高，对校正质量的要求也逐渐受到重视。从事仪器校正者，应致力追求降低校正不确定度的技术，以提供更高质量的校正服务。仪器使用者除需了解仪器的校正需求外，亦应掌握校正技术发展的相关知识，以便选择更适当的校正服务。

仪器送校的核心目的在于确保其测量结果与度量衡的基本单位之间存在可追溯性，并利用校正结果来传递标准。使用者不仅可以利用校正结果来调整仪器的精度参数，还可以通过校正结果来判断仪器的精度是否满足使用要求。在判断精度是否达标的过程中，除了依据仪器的验收标准和决策规则外，还需要参考校正结果中的偏差和测量不确定性等信息。尽管通常以偏差和验收标准之间的关系作为主要判断依据，但测量不确定性与验收界限区间的比例必须控制在合理范围内，否则可能会带来超出可接受范围的风险。这

也是使用者对校正质量要求不断提高的原因之一。为了减少判断风险，校正报告中的测量不确定性显得尤为重要。在仪器校正报告中，测量不确定性通常仅反映了因校正技术不完善而引起的误差，这与仪器作为标准器时的不确定性评估并不完全相同，但常常被仪器使用者误用。

一、仪器检测中衡器计量原理及校正不确定度评估

衡器主要应用于质量测量领域。根据使用的测量方法不同，仪器检测中衡器可以作为比较平台或标准器。在比较法中，仪器检测中衡器用于与砝码进行比较，以进行质量测量，其测量结果的相对不确定度可能在数亿分之一到数十万分之一之间。而在直接测量法中，经过校准仪器检测中衡器被用作标准器，直接测量物体的质量，这时相对不确定度在数百万分之一到数千分之一之间。

仪器检测中衡器作为比较平台时，由于其高分辨率，通常只测试重复性和偏载效应。如果仪器检测中衡器作为标准器使用，则需要定期进行现场校准，以评估其偏差。无论采用哪种方法，都需要考虑衡器的特性对测量过程可能带来的不确定度，这些特性的评估可以通过校准结果和仪器规格来获得。一些校准人员由于缺乏对校准技术的研究，为了降低校准结果的风险，常常使用较大的不确定度评估技术。对于精密的衡器来说，这导致其应有的准确度被低估，使得校准结果无法充分反映规格能力。以下为介绍如何有效利用校准技术合理评估测量不确定度。

仪器检测中衡器校准时的测量方程式如下：

$$E = I - m_{ref} \quad (1)$$

$$I = I_L + \delta I_{digL} + \delta I_{rep} + \delta I_{ecc} + \delta I_h - I_0 - \delta I_{dig0} \quad (2)$$

$$m_{ref} = m_N + \delta m_c + \delta m_B + \delta m_D + \delta m_{conv} \quad (3)$$

式中： E ——待校衡器器差； I ——待校衡器器示值； m_{ref} ——标准砝码参考值； I_L ——有荷重时的衡器读值； I_0 ——无荷重时的衡器读值； δI_{digL} ——有荷重时器示值分辨率的误差； δI_{dig0} ——无荷重时器示值分辨率的误差； δI_{rep} ——重复性误差； δI_{ecc} ——偏载效应误差； δI_h ——迟滞作用误差； m_N ——标准砝码标称值； δm_c ——标准砝码(组)追溯修正值； δm_B ——标准砝码(组)空气浮力修正值； δm_D ——标准砝码(组)漂移量； δm_{conv} ——对流影响修正量。

由式(1)~(3)可发现，待校衡器器差的不确定度来源包括因待校衡器本身特性所引起的分辨率、重复性、偏载效应与迟滞作用，与因标准砝码(组)所引起的追溯修正值、空气浮力修正值、漂移量与对流影响修正量，其中利用校正技术可以降低的不确定度为空气浮力修正值、偏载效应与对流影响修正量。以下针对这三项不确定度的评估方法进行进一步说明。

(一)空气浮力修正值

在调整砝码密度等于砝码密度参考值的假设下，空气浮力修正值的通用式可写成：

$$\delta m_B = -m_{cCal} [(\rho_{aCal} - \rho_0)(1/\rho_{cCal} - 1/\rho_c) + (\rho_{aCal} - \rho_{as})/\rho_c] \quad (4)$$

式中： m_{cCal} ——标准砝码(组)约定质量值； ρ_{aCal} ——校正当时的空气密度； ρ_{as} ——调整当时的空气密度； ρ_0 ——空气密度参考值=1.2kg/m³； ρ_{cCal} ——标准砝码(组)密度； ρ_c ——砝码密度参考值=8000kg/m³。

式(4)可以以加号作为区隔，可分成前后两项来解释，前项代表因校正时空气密度与空气密度参考值有异所引起的空气浮力修正值，后项代表因校正与调整时的空气密度有异所引起的空气浮力修正值。依据校正与调整时的环境条件又可简化分成A1、A2、B、C四种状况：

状况A1：校正前立即调整衡器，标准砝码(组)与衡器皆经过充分恒温(无温差)，且校正环境在空气密度参考值1.2kg/m³的状况下，则式(4)的前后项皆为0，无空气浮力修正值。状况A1系在最理想的环境下进行校正，但使用者需投入很大的成本在实验室温控设施上。

状况A2：校正前立即调整衡器，且标准砝码(组)与衡器皆经过充分恒温后才进行校正，则式(4)的后项为0。状况A2系衡器处于一般环境条件下进行校正，可使空气浮力影响降到最低的方式，但校正者需在校正前将标准砝码(组)送至实验室与衡器充分恒温。

状况B：校正前立即调整衡器，但标准砝码(组)与衡器皆未经充分恒温就进行校正。状况B系衡器处于一般环境条件下进行校正，且标准砝码(组)与衡器因恒温时间不足可能产生 $u(\delta\rho_{as})$ 的不确定度的状况，此时空气浮力修正值所引起的不确定度可简化成式(5)。

$$u(\delta m_B) \approx m_N (u(\delta\rho_{as})/\rho_c + mpe/4m_N)/\sqrt{3} \quad (5)$$

式(5)中： $\delta\rho_{as} = \rho_{aCal} - \rho_{as}$ ； m_N ——标准砝码(组)标称值； mpe ——OIMLR111-1中标准砝码(组)的最大允许误差。

状况C：在校准前无法立即调整衡器，以标准砝码(组)与衡器可能产生的最大温差作为评估条件。状况C是最为保守的评估方法。

由此可见，不同的校准方法会导致空气浮力的不确定度有显著差异。在状况B下，如果标准砝码(组)与衡器之间存在2℃的温差，由此引起的不确定度大约是状况C的1/10到1/5，状况A1和A2也会受到影响。

(二)偏载效应

偏载效应是由于测量时荷重的重心不在秤盘中心位置而产生的误差。通常认为，这种误差与荷重到秤盘中心的距离和荷重本身的值成正比。因此，可以根据荷重的实际放置位置和偏载测试的结果来评估偏载效应的不确定度。如果待校的衡器具备自动定位装置，那么这一不确定度可以忽略不计。

执行偏载效应测试时，校准人员会将衡器最大称量1/3的荷重放置于5个不同位置，并据此评估结果。但是，对于精度较高的衡器，如果将这种测试方式的数据纳入线性校正结果的不确定度评估，会导致评估结果过于保守。在校准结果的不确定度评估中，应考虑校准过程中产生的不确定度。在校准过程中，校准人员应能够熟练地将标准砝码(组)的重心准确放置在秤盘中心。

而校正者在线性校正过程中应能熟练地将标准砝码(组)的重心置于秤盘中心，故偏载效应的测试结果应仅需在校正报告中陈述，而不需纳入线性校正结果的不确定度评估中。由此可知，合理的评估方式亦是不确定度评估技术中重要的一环。

(三)对流影响修正量

当标准砝码被运送到校正现场时，它们可能与衡器及其所在环境的温度不一致。砝码放置在秤盘上时，这种温差会导致空气流动，产生作用力，从而在砝码的垂直表面形成摩擦力，在水平表面形成推力或拉力，这就是对流所造成的影响。对于高等级的砝码，如

OIMLR111-1 中的 E2 或 F1 等级砝码, 这种影响是显著的。因此, 在进行精密的衡器校正时, 应当考虑这种不确定度因素, 这一不确定度是一个较新的认识, 而空气对流通常不易被察觉。除非标准砝码与衡器能够充分恒温, 否则在未将这种不确定度纳入线性校正结果评估的情况下, 会导致不确定度被低估, 增加了线性校正结果的风险。

二、仪器检测中衡器作为标准器使用的不确定度评估

校正报告中的扩充不确定度仅评估校正过程中所产生的不确定度。当衡器作为标准器使用时, 直接量测结果的不确定度应重新评估。因校正过程系属较为单纯的衡量模式, 而直接量测时则因待测物种类与量测环境的变化较大, 需评估的不确定度因子变多而使不确定度的评估较为复杂。使用者利用校正报告中的扩充不确定度当作直接量测时所产生的不确定度, 是一种误用, 且会造成不确定度低估的现象。衡器作为标准器使用时的量测方程式可表示如下:

$$W = R - E \quad (6)$$

$$\text{其中 } R = R_L + \delta R_{digL} + \delta R_{rep} - R_0 - \delta R_{dig0} + \delta R_{instr} + \delta R_{proc} \quad (7)$$

$$\delta R_{instr} = \delta R_{temp} + \delta R_{bouoy} + \delta R_{adj} \quad (8)$$

$$\delta R_{proc} = \delta R_{Tare} + \delta R_{time} + \delta R_{ecc} \quad (9)$$

式中: W ——衡量结果; R ——读值(在校正后得到的显示值); R_L ——衡量时的衡器读值; R_0 ——无衡量时的衡器读值; δR_{digL} ——有衡量时读值分辨率的误差; δR_{dig0} ——无衡量时读值分辨率的误差; δR_{rep} ——衡量时重复性误差; δR_{instr} ——衡量时环境影响造成的误差; δR_{proc} ——衡量时操作程序造成的误差; δR_{temp} ——衡器因环境温度改变造成调整的误差; δR_{bouoy} ——衡器因空气密度改变造成调整的误差; δR_{adj} ——衡器自校正后因老化与磨损造成调整的误差; δR_{Tare} ——衡器操作时因扣重造成的误差; δR_{time} ——衡器操作时因潜变和迟滞效应造成的误差; δR_{ecc} ——衡器操作时因偏载效应造成的误差。

由式(6)~(9)可发现, 衡器作为标准器使用的不确定度来源包括读值与衡器器差, 其中器差的不确定度可由校正报告得知。读值的不确定度又可细分成因分辨率、重复性、环境影响及操作程序所引起的不确定度, 因此衡器在校正与作为标准器使用时所考量的不确定度确有很大的差异, 甚至在量测会动的活体时, 重复性还需另外重新评估。建议在评估时, 使用者明确界定衡器使用时的环境与操作程序, 以便相关

不确定度因子可合理地进行评估。另外, 使用者亦可与校正者沟通, 缩小校正过程与使用过程的差异, 以便简化评估过程。当使用条件与校正条件相同时, 因不需再重复评估环境影响与操作程序所造成的误差, 不确定度评估可简化为方程式(10), 为最简单的评估方式。

$$u^2(W) = u^2(\delta R_{digL}) + u^2(\delta R_{dig0}) + u^2(\delta R_{rep}) + u^2(E) \quad (10)$$

三、结语

服务来自需求, 使用者的需求即为校正者提供服务的目标, 校正者应尽量将校正条件贴近使用条件, 以满足使用者的需求; 而使用者亦应尽量将使用条件贴近校正条件, 以使校正结果发挥最大效益。透过本文的叙述, 校正者可利用校正技术有效降低校正结果的不确定度, 以衡器为例, 校正前衡器的调整及标准砝码(组)与衡器的充分恒温, 可大幅降低校正时所产生的不确定度。而对使用者而言, 衡器是实验室的基础设备, 应对衡器校正与作为标准器使用的不确定度评估有基本的认识, 并应在使用前利用衡器的内校功能或外校砝码进行衡器的调整, 尽量将使用条件贴近校正条件, 以提高使用的准确度。

参考文献:

- [1]任志斌, 戚健民. 非自动衡器检定装置的计量比对分析[J]. 衡器, 2023, 52(07): 44-47.
- [2]Acero R, Santolaria J, Pueo M, et al. Uncertainty Estimation of an Indexed Metrology Platform for the Verification of Portable Coordinate Measuring Instruments[J]. Measurement, 2016, 82: 202-220.
- [3]OIMLR76-1:2006. Nonautomatic Weighing Instruments Part 1: Metrological and Technical Requirements -Tests[S].
- [4]Shengjie K, Xiang H, Xiao Z, et al. Entity Recognition Method for Airborne Products Metrological Traceability Knowledge Graph Construction[J]. Measurement, 2024.
- [5]Xiaohui M, Liping F, Xianping S, et al. A Fuzzy Evaluation Method of Road Vehicle Automatic Weighing Instrument in Dynamic Force Metrological Performance[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2020, 64(1-4): 1365-1372.
- [6]白杰, 胡红波. 计量中回归模型参数值及其不确定度评估[J]. 计量学报, 2022, 43(12): 1683-1688.

作者简介: 程现斌(1973), 男, 山东省潍坊市人, 本科, 工程师, 主要研究方向为电子秤、电子汽车衡、燃油加油机。