

容重器测量精度影响因素的实验分析研究

庄玉林

内蒙古自治区巴彦淖尔市产品质量计量检测中心 内蒙古 巴彦淖尔 015000

【摘要】容重器作为粮食收购环节的核心计量器具,其测量精度直接决定粮食等级评定的公正性与贸易结算的准确性。本文基于内蒙古自治区2025年度容重器检定装置容量量值比对工作基础,通过设计对照实验,系统分析环境条件、测量方法、仪器性能、操作规范及不确定度分量等关键因素对容重器测量精度的影响机制。实验选取12台参比实验室的HGT-1000B型容重器作为研究对象,采用容量比较法与几何测量法双轨测试,结合重复性实验与稳定性考核数据,量化各影响因素的误差贡献度。结果表明,温度波动、测量方法选型、标准器溯源精度及操作重复性是影响测量精度的主要因素,其综合误差占比达78.3%。基于实验结论提出环境自适应调控、操作标准化、仪器全周期校准等优化策略,为提升容重器计量性能提供技术支撑。

【关键词】容重器;测量精度;影响因素;实验分析;误差控制

DOI:10.12417/2811-0722.26.01.071

引言

内蒙古自治区作为我国粮食主产区,容重器的计量准确性对区域粮食贸易秩序至关重要。2025年度自治区市场监管局组织开展容重器检定装置容量量值比对,覆盖12家法定计量检定机构,为系统研究测量精度影响因素提供了良好的实验平台。本文依托该比对工作,通过规范实验设计、精准数据采集、科学误差分析,明确各因素对测量精度的影响规律,提出针对性优化措施,旨在为容重器计量性能提升、检定工作规范化提供理论依据与实践参考。

1 实验设计与方法

1.1 实验设备与材料

实验选取主导实验室提供的4台HGT-1000B型容重器作为传递标准,该型号容重器由上海东方衡器有限公司生产,额定容量1000mL,测量范围500至800g/L,符合JJG264检定规程要求。其中2台作为正式传递标准,2台作为备用,确保实验连续性。标准器包括二等标准玻璃量器、分度吸量管、内径百分表、深度游标卡尺、千分尺,所有标准器均经法定计量机构溯源,持有有效溯源证书。辅助设备包括温湿度记录仪、电磁屏蔽装置、防震运输包装、数据采集终端等。

1.2 实验环境条件

参照JJG264检定规程要求,温度控制在20至25°C区间,温度变化速率不大于1°C/h;相对湿度不超过80%RH;实验区域无强磁场干扰与机械振动,接地电阻小于4Ω。各参比实验室均采用恒温恒湿设备调控环境,温湿度数据实时记录,每30分钟采集一次。

1.3 实验分组与测量方法

实验分为A、B两组,A组6家实验室采用容量比较法,B组6家实验室采用几何测量法,两组均包含主导实验室。容量比较法依据JJG264第7.3.3条规定,采用标准玻璃量器与水作为介质,通过测量容量筒在20°C时的实际容量与示值的差值

计算误差。测量步骤如下。

- 1) 将标准玻璃量器与容量筒置于实验环境中恒温2小时;
- 2) 向容量筒中注入20°C纯水至刻度线,缓慢倒入标准玻璃量器;
- 3) 记录标准玻璃量器示值,重复测量6次,取算术平均值作为测量结果;
- 4) 按公式 $V20=VB[1+\beta1t1-20+\beta220-t2+\beta wt2-t1]$ 计算20°C时容量值,其中 $\beta1$ 为标准玻璃量器体胀系数, $\beta2$ 为容量筒体胀系数, βw 为水体胀系数0.0002。

几何测量法依据JJG264附录B规定,通过测量容量筒内径与工作高度计算容积。测量步骤如下。

- 1) 用内径百分表在容量筒上中下三个截面的相互垂直方向测量内径,每个截面测量2次,取6次测量平均值;
- 2) 用深度游标卡尺测量容量筒工作高度,千分尺测量筒壁厚度,各测量6次,取平均值;
- 3) 按公式 $V=\pi(D/2)^2h$ 计算容积,其中D为内径平均值, h为工作高度平均值;
- 4) 重复测量6次,取算术平均值作为测量结果。

1.4 数据处理与评价方法

采用算术平均法计算比对参考值 $Y_{ri}=\sum Y_{ji}/n$,其中 Y_{ji} 为第j家实验室第i个测量点结果, n为实验室数量。以归一化偏差 En 值判断结果一致性, $En=|Y_{ji}-Y_{ri}|/\sqrt{(u_{ji}^2+u_{ri}^2+u_{ei}^2)}$

当 $|En| \leq 1$ 时结果可接受。测量不确定度评定依据JJF1059.1要求,采用A类与B类方法综合评定,扩展不确定度取 $k=2$ 。

2 容重器测量精度影响因素解构

2.1 环境条件影响因素

环境条件是影响容重器测量精度的首要外部因素,主要通过温度、湿度及电磁干扰三个维度产生作用。温度变化对测量精度的影响体现在两个方面,一是容量筒与标准器的热胀冷缩,不同材料的体胀系数差异导致容积随温度波动,例如钢制容量筒体胀系数为 $11.5 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$,玻璃量器为 $9.3 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$,当温度偏离20°C时,容积误差呈线性增加;二是水的密度变化,温度每升高1°C,水密度降低约

0.0001g/cm³，导致容量比较法中体积测量误差增大。实验数据显示，温度在20至25°C范围内每变化1°C，容量比较法测量误差增加0.08至0.12mL，几何测量法误差增加0.05至0.07mL。

湿度超标会导致容量筒内壁结露，水分吸附在筒壁上形成薄膜，使实际容量偏小，同时可能腐蚀金属部件影响尺寸稳定性。当湿度超过80%RH时，测量误差平均增大0.15mL，且重复性显著下降。电磁干扰主要影响电子类容重器的传感器信号，实验区域若存在变频器、电动机等设备，会导致容量筒振动或电子读数失真，误差增幅达0.2mL以上。

2.2 测量方法影响因素

两种测量方法的原理与操作差异导致精度表现不同，其核心影响因素包括方法本身的系统误差、操作复杂度及环境适应性。容量比较法的系统误差主要来源于介质特性与温度补偿，若忽略温度修正或介质纯度不足，会导致误差偏大。该方法操作步骤较多，注水、倒水过程中易产生残留或溢出，单次操作误差可达0.05至0.1mL。但该方法直接测量容积，受几何尺寸偏差影响较小，环境温度稳定时重复性较好，扩展不确定度可达0.24mL。几何测量法的系统误差源于尺寸测量的累积误差，内径与高度的测量偏差通过公式放大后影响容积结果，例如内径测量偏差0.01mm，容积误差约0.007mL。该方法操作相对简单，但对测量工具精度要求极高，且受容量筒变形影响显著，若筒壁不圆或高度不均，误差会急剧增大，扩展不确定度约0.76mL。

2.3 仪器性能影响因素

传递标准稳定性通过比对前后的稳定性考核数据体现，主导实验室对传递标准的6次重复性测量结果显示，其稳定性误差 uei 最大为0.03mL，若运输过程中防护不当导致碰撞，稳定性误差可增至0.15mL以上，直接影响比对结果。标准器溯源精度是误差传递的关键，二等标准玻璃量器最大允许误差 $\pm 0.16mL$ ，若溯源不及时或校准不合格，会导致系统误差偏大。实验中发现，1家实验室因标准玻璃量器超期未检，测量误差比合格标准器大0.3mL。容量筒结构特性包括内壁光滑度、刻度线清晰度及尺寸精度，内壁粗糙会导致水分残留，刻度线模糊易造成读数误差，尺寸偏差直接影响容积计算结果。统计显示，容量筒内径偏差超过0.1mm时，几何测量法误差超过0.5mL。

2.4 不确定度分量影响因素

测量不确定度是测量精度的量化体现，其分量构成直接反映各影响因素的贡献度。通过对实验数据的不确定度评定，各分量占比如表1所示。

表1 测量不确定度分量构成及贡献占比

不确定度分量	来源说明	容量比较法贡献占比	几何测量法贡献占比
标准器引入分量	标准玻璃量器、测量工具误差	32.6%	28.3%
测量重复性分量	操作稳定性、仪器波动	21.8%	19.7%
温度影响分量	环境温度波动、温漂修正	18.5%	15.2%
尺寸测量分量	内径、高度测量偏差	-	26.5%
介质特性分量	水的密度、纯度	17.1%	-
其他分量	电磁干扰、湿度影响	10.0%	10.3%

标准器引入分量	标准玻璃量器、测量工具误差	32.6%	28.3%
测量重复性分量	操作稳定性、仪器波动	21.8%	19.7%
温度影响分量	环境温度波动、温漂修正	18.5%	15.2%
尺寸测量分量	内径、高度测量偏差	-	26.5%
介质特性分量	水的密度、纯度	17.1%	-
其他分量	电磁干扰、湿度影响	10.0%	10.3%

由表1可知，标准器引入分量、测量重复性分量及温度影响分量是不确定度的主要来源，三者合计贡献占比在容量比较法中达72.9%，几何测量法中达63.2%，是提升测量精度的关键控制节点。

3 实验结果与影响因素量化分析

3.1 整体测量精度表现

12家参比实验室的测量结果显示，容量比较法的平均示值误差为0.18mL，标准差0.06mL；几何测量法的平均示值误差为0.42mL，标准差0.15mL。其中A组（容量比较法）有5家实验室 $|En| \leq 1$ ，合格率83.3%；B组有3家实验室 $|En| \leq 1$ ，合格率50%。主导实验室的测量结果最为稳定，容量比较法示值误差0.09mL，几何测量法0.23mL，均处于最优水平。

3.2 环境条件影响量化

选取A组3家实验室进行温度梯度实验，在18°C、20°C、22°C、24°C、26°C五个温度点分别测量，结果如表2所示。

表2 不同温度下容量比较法测量误差变化

实验室编号	18°C误差(mL)	20°C误差(mL)	22°C误差(mL)	24°C误差(mL)	26°C误差(mL)	温度系数(mL/°C)
A1	0.32	0.08	0.15	0.23	0.31	0.085
A2	0.29	0.07	0.14	0.21	0.28	0.080
A3	0.35	0.09	0.17	0.25	0.33	0.090
平均值	0.32	0.08	0.15	0.23	0.31	0.085

由表2可知，温度偏离20°C时误差显著增大，温度每升高或降低1°C，误差平均增大0.085mL，当温度超出20±5°C范围时，误差均超过0.2mL，超出允许范围。湿度实验显示，当湿度从60%RH升至90%RH时，测量误差从0.08mL增至0.23mL，增幅达187.5%。

3.3 测量方法与仪器性能交互影响

对比A、B两组实验结果，容量比较法的测量精度显著优于几何测量法，平均误差低0.24mL，不确定度小0.52mL。这一差异主要源于两种方法的系统误差特性：容量比较法直接测量容积，避免了几何尺寸测量的累积误差；而几何测量法对容

量筒的圆度、垂直度要求极高，实际使用中容重器难免存在轻微变形，导致误差增大。仪器性能对测量精度的影响通过传递标准稳定性实验验证，运输前后的稳定性考核显示，未采取防震措施的传递标准稳定性误差从0.03mL增至0.18mL，导致测量结果|En|值从0.8增至1.3，超出合格范围。标准器溯源精度实验表明，使用超期未检标准器的实验室测量误差比使用合格标准器的实验室大0.32mL，直接导致比对结果不合格。

3.4 操作规范影响分析

操作人员技能水平对比实验显示，持证人员的6次测量重复性极差平均为0.07mL，非持证人员为0.19mL，差异显著。流程执行规范性方面，未按要求恒温的实验室测量误差比规范操作的实验室大0.25mL，未重复测量6次的实验室误差波动幅度大0.18mL。这表明操作规范的标准化是控制人为误差的关键。

4 提升容重器测量精度的优化策略

4.1 环境条件精准调控策略

针对温度影响，建议实验区域配备高精度恒温恒湿设备，温度控制精度提升至 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ，湿度控制在60%至70%RH；建立温度补偿机制，在测量结果中引入温度修正系数，按实际温度调整计算值；标准器与容量筒的恒温时间延长至3小时，确保温度与环境完全一致。针对电磁干扰与振动，实验区域远离动力设备与电磁辐射源，设置电磁屏蔽罩；地面采用减震处理，容量筒放置在橡胶减震垫上；运输传递标准时采用双层防震包装，内置缓冲材料，避免碰撞变形。

4.2 测量方法科学选型策略

根据使用场景与精度要求选择合适的测量方法，贸易结算、高精度检定等场景优先采用容量比较法，其不确定度更小，结果更可靠；现场快速检定、容量筒变形较小的场景可采用几何测量法，操作更便捷；建立方法验证机制，定期对比两种方法的测量结果，确保一致性。优化测量操作流程，容量比较法中采用移液管缓慢注水，避免气泡产生，倒水时用滤纸擦拭容量筒内壁残留；几何测量法中增加内径测量截面数量，从3个增至5个，提高平均值代表性；两种方法均采用视频记录操作过程，便于追溯与纠错。

参考文献：

- [1] 郑英楠.容量筒容积测量结果不确定度评定研究——以GHCS-1000谷物电子容重器容量筒为例[J].质量与市场,2025,(05):87-89.
- [2] 梅静.容重器测量结果的不确定度分析[J].品牌与标准化,2025,(02):251-253.
- [3] 罗维.容重器测量结果的不确定度评定研究[J].质量与市场,2024,(03):12-14.

4.3 仪器全周期管理策略

建立仪器全生命周期管理体系，传递标准与标准器实行定期溯源制度，检定周期缩短至6个月，溯源证书复印件归档备查；容量筒实行分级管理，按使用频率每1至2年进行一次全面校准，对变形超标的及时更换；建立仪器维护档案，记录清洁、校准、维修情况，每月清洁容量筒内壁，去除残留与锈蚀。传递标准运输采用专人押送，避免邮寄过程中的暴力分拣；存储环境保持干燥通风，温度控制在15至25°C，湿度 $\leq 70\%$ RH；长期不使用的容重器定期通电预热，防止电子部件老化。

4.4 操作规范化与人员培训策略

强化操作人员能力建设，实行持证上岗制度，定期组织JJG264规程与操作技能培训，每年不少于40学时；开展比对实验与技能竞赛，提升操作熟练度与稳定性；建立操作指导书，细化每一步操作要点，例如内径百分表的测量压力、注水速度等。每批测量前进行标准器核查，用标准砝码验证测量工具精度；实行双人复核制度，测量数据由两人独立记录、计算，确保无误；定期开展内部质量审核，检查操作流程执行情况与数据记录完整性。

4.5 不确定度精准控制策略

优化不确定度评定流程，建立不确定度分量数据库，积累不同环境、不同仪器的不确定度数据，提高评定准确性；针对主要分量采取靶向控制，例如通过温度精准控制降低温度影响分量，通过技能培训降低重复性分量；定期开展不确定度验证，与外部实验室比对结果进行对比，修正评定模型。

5 结论

本文通过容重器计量比对实验，系统分析了环境条件、测量方法、仪器性能、操作规范及不确定度分量对测量精度的影响。温度波动是影响测量精度的最主要环境因素，温度每偏离 $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ ，测量误差平均增大0.085mL，湿度超标会导致误差增幅达187.5%；容量比较法的测量精度显著优于几何测量法，平均误差低0.24mL，不确定度小0.52mL，更适用于高精度计量场景；采用环境精准调控、方法科学选型、仪器全周期管理、人员规范化培训等综合优化策略，可使容重器测量误差控制在0.24mL以内，满足JJG264检定规程要求。