

差压式液体密度计的校准方法研究

——方法说明及不确定度评定示例

沈友弟, 黄彦捷*, 蓝曦白, 张华东

广东省计量科学研究院, 广东省现代几何与力学计量技术重点实验室, 广东 广州

收稿日期: 2021年10月26日; 录用日期: 2021年11月26日; 发布日期: 2021年12月6日

摘要

差压式液体密度计广泛应用于各类液体密度的精确测定, 亟需依照国家计量技术规范进行校准以保证量值准确且可溯源。经全国质量密度计量技术委员会委托, 编写了《差压式液体密度计校准规范》, 对示值误差和重复性等计量特性的校准方法展开研究, 并给出了相关量值的不确定度示例, 保证液体密度计的检测结果准确可比, 切实维护消费者的权益。

关键词

差压式液体密度计, 校准, 计量, 不确定度

Research on Calibration Method of Differential Pressure Liquid Density Meters

—Method Instructions and Examples of Uncertainty Evaluation

Youdi Shen, Yanjie Huang*, Xibai Lan, Huadong Zhang

Guangdong Provincial Key Laboratory of Modern Geometric and Mechanical Metrology Technology, Guangdong Provincial Institute of Metrology, Guangzhou Guangdong

Received: Oct. 26th, 2021; accepted: Nov. 26th, 2021; published: Dec. 6th, 2021

Abstract

Differential pressure liquid densitometer is widely used in the accurate measurement of various liquid densities. It is urgent to calibrate it according to the national measurement technical specifications to ensure that the quantity value is accurate and traceable. Entrusted by the national mass density measurement technical committee, the calibration specification of differential pressure liquid densitometer is prepared to study the calibration methods of measurement characteristics such as indication error and repeatability, and give an example of the uncertainty of rele-

*通讯作者。

vant quantities, so as to ensure the accuracy and comparability of the detection results of liquid densitometer and effectively safeguard the rights and interests of consumers.

Keywords

Differential Pressure Liquid Densitometer, Calibration, Measurement, Uncertainty

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

差压式液体密度计主要由上下压力传感器、温度传感器、数据处理单元和显示单元等组成,广泛应用于各类液体密度的精确测定[1] [2]。计量是以实现单位统一、量值准确可靠为目的的测量[3] [4] [5]。近年来,量值的准确测定方法日新月异,新型仪器设备层出不穷,但是如何实现计量保障仍是重大难题[6] [7] [8]。目前不同品牌不同型号的压差式液体密度计之间无法实现量值溯源,测量数据无法对比和互认,导致出现各实验室或者各仪器结果的明显差异,呈现出产品质量良莠不齐的现状。不仅滞缓快速检测技术的创新发展,也可能损害消费者利益,影响安全监管检测结果。

因此,经过市场调研和科研需求调研,确认了衡量该仪器的重要计量指标为示值误差和重复性。相关计量指标的校准方法均经过严密的实验论证,考量了不同分量引入的不确定度,也根据标准器配备方法给出了不同的校准方法。经全国质量密度计量技术委员会委托,编写了《差压式液体密度计》国家计量技术校准规范,对测量范围为(650~2000) kg/m³静态下差压式液体密度计的示值误差和重复性等计量特性的校准方法展开研究,并评定了相关量值的不确定度。目前该校准规范已送至国家市场监督管理总局报批,即将正式公开施行。其中示值误差的校准可采用密度标准物质校准法、密度标准物质与台式振动管密度仪校准法或标准密度计组校准法,供不同计量机构根据自身标准器配备情况进行选取,具有较大的自主性。

2. 校准项目及方法

差压式液体密度计测定函数关系可简单描述如下:

$$\rho = \frac{\Delta p}{g \cdot h} \quad (1)$$

式中: ρ ——液体密度, kg/m³; Δp ——差压, Pa; g ——重力加速度, m/s²; h ——压力传感器之间的距离, m。

其中计量性能要求如下:

Table 1. Metrological performance requirements for liquid densitometers

表 1. 液体密度计计量性能要求

校准项目	分辨力(kg/m ³)	
	0.1	1
示值误差	±2.0	±5
重复性	0.5	3

校准时, 室温需控制在 $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$, 湿度不大于 80% RH。实验室内应避光、防热, 无强电磁场干扰, 无强的机械振动, 通风良好, 应装有水源和防火设施。所校准的液体密度计的计量性能要求如表 1 所示。

校准时所用的测量标准可以为密度标准物质、密度标准物质与台式振动管密度仪、标准密度计组。测量标准的主要技术指标应优于表 2。

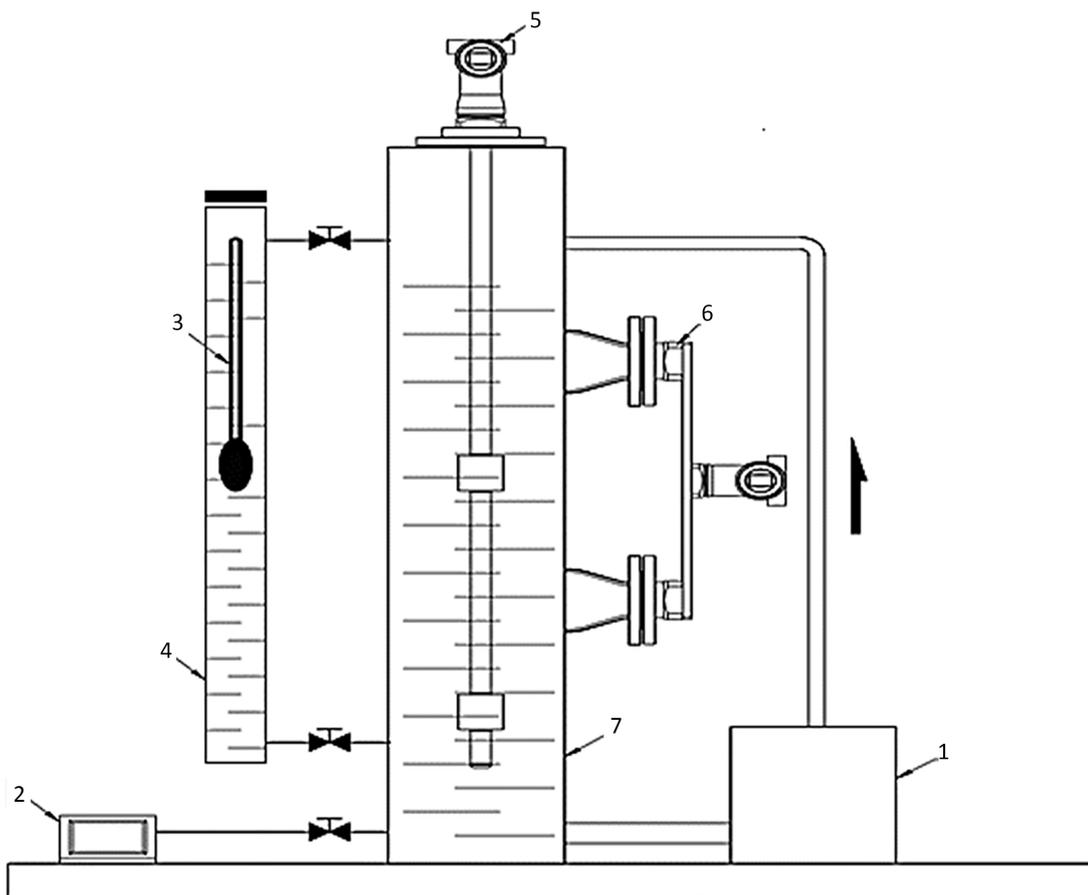
Table 2. Measurement standard for calibration

表 2. 校准用测量标准

测量标准	测量范围(kg/m^3)	扩展不确定度($k=2$)
密度标准物质	650~2000	$U=5 \times 10^{-2}$
密度标准物质与台式振动管密度仪	650~2000	$U=5 \times 10^{-2}$ (适用于被校仪器分辨力 0.1) $U=5 \times 10^{-1}$ (适用于被校仪器分辨力 1)
标准密度计组	650~2000	$U=2 \times 10^{-1}$

2.1. 示值误差

液体密度计传感器放置示意图如下图 1。



注: 1——恒温水槽; 2——台式振动管密度仪; 3——标准密度计; 4——透明视窗; 5——被校液体密度计 A; 6——被校液体密度计 B; 7——测量筒。

Figure 1. Schematic diagram of liquid densitometer sensor placement

图 1. 液体密度计传感器放置示意图

2.1.1. 密度标准物质校准法

根据被校仪器的使用范围均匀选取 2 至 3 种密度标准物质, 分别进行以下测量:

1) 将液体密度计安装在测量装置上, 再将密度标准物质倒入测量装置中。如图 1 所示, 测量装置中液体无泄漏现象。

2) 接通液体密度计电源, 并根据仪器使用说明书的要求进行预热。

3) 将密度标准物质的温度调整到 $(20 \pm 0.1)^\circ\text{C}$ 范围内(可根据用户需求选择其它温度进行校准), 密度标准物质应搅拌均匀, 无气泡。

4) 保持传感器稳定, 严禁摇晃传感器。关闭恒温水浴循环系统, 等待测量数据稳定, 按每 1 min 记录一次液体密度计显示的密度值, 分别记录 3 次。

5) 测量完成后, 按公式(2)、(3)计算液体密度计示值误差。清洗被校液体密度计传感器及测量筒后重复 1)~4), 进行下一密度点的测量。

$$\bar{\rho}_{t1} = \frac{\sum_{i=1}^3 \rho_{ti}}{3} \quad (2)$$

$$\Delta\rho = \bar{\rho}_{t1} - \rho_{s1} \quad (3)$$

式中: ρ_{ti} ——第 i 次测量时液体密度计的示值, kg/m^3 ; $\bar{\rho}_{t1}$ ——被校液体密度计测量 3 次的密度平均值, kg/m^3 ; ρ_{s1} ——密度标准物质的密度值, kg/m^3 ; $\Delta\rho$ ——被校液体密度计的示值误差, kg/m^3 。

2.1.2. 密度标准物质与台式振动管密度仪校准法

校准前使用与校准用液体密度值接近的密度标准物质对台式振动管密度仪进行校准, 根据被校仪器的使用范围均匀选取 2 至 3 种校准介质, 分别进行以下测量:

1) 将液体密度计安装在测量装置上, 再将校准介质倒入测量装置中。如图 1 所示, 测量装置中液体无泄漏现象。

2) 接通液体密度计电源, 并根据仪器使用说明书的要求进行预热。

3) 将校准介质的温度调整到 $(20 \pm 0.1)^\circ\text{C}$ 范围内(可根据用户需求选择其它温度进行校准), 校准介质应搅拌均匀, 无气泡。

4) 将台式振动管密度仪的温度设定为校准用液体的温度, 从取样口抽取测量筒内校准介质, 注入台式振动管密度仪中, 如果有气泡, 需将气泡排出, 待温度稳定后, 记录台式振动管密度仪的密度。

5) 保持传感器稳定, 严禁摇晃传感器。关闭恒温水浴循环系统, 等待测量数据稳定, 按每 1 min 记录一次台式振动管密度仪和液体密度计显示的密度值, 分别记录 3 次。

6) 测量完成后, 按公式(4)、(5)、(6)计算液体密度计示值误差。清洗被校液体密度计传感器及测量筒后重复 1)~5), 进行下一次测量。

$$\bar{\rho}_{t2} = \frac{\sum_{j=1}^3 \rho_{tj}}{3} \quad (4)$$

$$\bar{\rho}_{s2} = \frac{\sum_{j=1}^3 \rho_{s2j}}{3} \quad (5)$$

$$\Delta\rho = \bar{\rho}_{t2} - \bar{\rho}_{s2} \quad (6)$$

式中: ρ_{tj} ——第 j 次测量时液体密度计的示值, kg/m^3 ; ρ_{s2j} ——第 j 次测量时台式振动管密度仪的示值,

kg/m^3 ; $\bar{\rho}_{s2}$ ——台式振动管密度仪 3 次示值的平均值, kg/m^3 ; $\bar{\rho}_{l2}$ ——被校液体密度计 3 次示值的平均值, kg/m^3 ; $\Delta\rho$ ——被校液体密度计的示值误差, kg/m^3 。

2.1.3. 标准密度计组校准法

根据被校仪器的分辨力和测量范围选取相应的标准密度计和 2 至 3 种校准介质, 分别进行以下测量:

1) 将液体密度计安装在测量装置上, 再将校准介质倒入测量装置中。如图 1 所示, 测量装置中液体无泄漏现象。

2) 接通液体密度计电源, 并根据仪器使用说明书的要求进行预热。

3) 将标准密度计放入测量筒, 浮计在液体中应自由漂浮, 不得与任何物体接触。

4) 将校准介质的温度调整到 $(20 \pm 0.1)^\circ\text{C}$ 范围内(可根据用户需求选择其它温度进行校准), 校准介质应搅拌均匀, 无气泡。

5) 保持传感器稳定, 严禁摇晃传感器。关闭恒温水浴循环系统, 将校准介质上下搅拌均匀, 等待测量数据稳定, 按每 1 min 记录标准密度计和液体密度计显示的密度值, 分别记录 3 次。

6) 测量完成后, 按公式(7)、(8)、(9)计算密度计示值误差。清洗被校液体密度计传感器及测量筒后重复 1)~5), 进行下一次测量。

$$\bar{\rho}_{l3} = \frac{\sum_{k=1}^3 \rho_{lk}}{3} \quad (7)$$

$$\bar{\rho}_{s3} = \frac{\sum_{k=1}^3 \rho_{s3k}}{3} \quad (8)$$

$$\Delta\rho = \bar{\rho}_{l3} - \bar{\rho}_{s3} \quad (9)$$

式中: ρ_{lk} ——第 k 次测量时液体密度计的示值, kg/m^3 ; ρ_{s3k} ——第 k 次测量时标准密度计修正后的实际密度值, kg/m^3 ; $\bar{\rho}_{s3}$ ——标准密度计 3 次示值的平均值修正后的实际密度值, kg/m^3 ; $\bar{\rho}_{l3}$ ——被校液体密度计 3 次示值的平均值, kg/m^3 ; $\Delta\rho$ ——被校液体密度计的示值误差, kg/m^3 。

2.2. 重复性

根据所选用的测量方法及测量范围, 分别测量 3 次液体密度计示值的最大值与最小值的差值为仪器重复性。按公式(10)计算重复性。

$$\Delta\rho_s = \rho_{\max} - \rho_{\min} \quad (10)$$

式中: $\Delta\rho_s$ ——被校液体密度计的重复性, kg/m^3 ; ρ_{\max} ——校准点的最大值示值, kg/m^3 ; ρ_{\min} ——校准点的最小值示值, kg/m^3 。

2.3. 数据处理

当选用标准密度计作为标准器时, 应对标准密度计的测量结果进行毛细常数修正。修正后的示值 ρ_{s3} 见式(11)。

$$\rho_{s3} = \rho_v + \Delta\rho_c + \Delta\rho_t + \Delta\rho_a \quad (11)$$

式中: ρ_v ——标准密度计的示值, kg/m^3 ; $\Delta\rho_c$ ——标准密度计的证书修正值, kg/m^3 ; $\Delta\rho_t$ ——标准密度计的温度修正值, kg/m^3 ; $\Delta\rho_a$ ——标准密度计的毛细常数修正值, kg/m^3 ; ρ_{s3} ——标准密度计修正后密度值, kg/m^3 。

如果校准用液体的温度与标准密度计的标准温度不同时,应按公式(12)对标准密度计示值进行温度修正。

$$\Delta\rho_t = \rho_{t_1}\beta(t_1 - t_2) \quad (12)$$

式中: ρ_{t_1} —— t_1 ℃时,标准密度计的示值, kg/m^3 ; β ——标准密度计的体膨胀系数(通常为 $25 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$); t_1 ——标准密度计的标准温度, $^\circ\text{C}$; t_2 ——校准用液体的温度, $^\circ\text{C}$ 。

如选用的校准介质与标准密度计证书实际使用的介质不同时,需要进行毛细常数修正,修正值的计算如公式(13):

$$\Delta\rho_a = \frac{(\alpha_2 - \alpha_1) \times \pi \times D \times \rho^2}{m} \times 1000 \quad (13)$$

式中: α_1 ——证书上给出工作液体的毛细常数, mm^2 ; α_2 ——所选校准介质的毛细常数, mm^2 ; D ——标准密度计的干管在校准点处的平均直径, mm ; ρ ——标准密度计示值, g/cm^3 ; π ——圆周率; m ——标准密度计的质量, mg 。

3. 示值误差校准不确定度评定

示值误差测量模型如下:

$$\Delta\rho = \bar{\rho}_t - \rho_s \quad (14)$$

式中: $\Delta\rho$ ——被校液体密度计示值误差, kg/m^3 ; $\bar{\rho}_t$ ——被校液体密度计测量 3 次的密度平均值, kg/m^3 ; ρ_s ——密度标准物质的密度值, kg/m^3 。

选用的标准物质为超纯水,标准值为 $998.204 \text{ kg}/\text{m}^3$,标准不确定度为 $0.020 \text{ kg}/\text{m}^3$,测量一台差压式液体密度计。

3.1. 密度标准物质法测量结果不确定度评定

密度标准物质的标准不确定度分量 u_1 : 密度标准物质的扩展不确定度 $U = 2.0 \times 10^{-2} \text{ kg}/\text{m}^3$, $k = 2$, 则: $u_1 = 2.0 \times 10^{-2} / 2 \text{ kg}/\text{m}^3 = 0.01 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。

密度标准物质温度波动时引入的不确定度分量 u_2 : 恒温槽作为标准物质的控温设备,温度波动为 $\pm 0.2 \text{ } ^\circ\text{C}$,按每变化 $\pm 1 \text{ } ^\circ\text{C}$ 导致的密度变化约为 $0.21 \text{ kg}/\text{m}^3$,按均匀分布,将其换算成密度则为: $u_2 = (0.21 \times 0.2) / \sqrt{3} \text{ kg}/\text{m}^3 = 0.024 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。

被测液体密度计测量重复性引入的不确定度分量 u_3 : 根据差压式液体密度计校准规范,用被校液体密度仪重复测量 6 次。测得以下数据: $998.2 \text{ kg}/\text{m}^3$; $998.4 \text{ kg}/\text{m}^3$; $998.3 \text{ kg}/\text{m}^3$; $998.0 \text{ kg}/\text{m}^3$; $998.1 \text{ kg}/\text{m}^3$; $998.2 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。根据公式计算: $u_A(\bar{x}) = \rho_{\max} - \rho_{\min} = 0.4 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。根据极差法计算测量重复性引入的不确定度分量时,应该除以极差系数,测量 6 次的极差系数是 $C = 2.53$,则 $u_R = 0.4 / 2.53 \text{ kg}/\text{m}^3 = 0.158 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。实际校准取 3 次测量的平均值。 $u_3 = 0.158 / \sqrt{3} \text{ kg}/\text{m}^3 = 0.091 \text{ kg}/\text{m}^3$,由以上公式得出仪器的重复性 $u_3 = 0.091 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。

以上 3 个不确定度分量互不相关,则 $u_{c1} = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} \approx 0.124 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。取 $k = 2$,即 $U = 2 \times 0.124 \text{ kg}/\text{m}^3 \approx 0.3 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。

3.2. 密度标准物质与台式振动管密度仪测量结果不确定度评定

密度标准物质的标准不确定度分量 u_1 仍为 $0.01 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。密度标准物质温度波动时引入的不确定度分量 u_2 仍为 $0.024 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。被测液体密度计测量测量重复性引入的不确定度分量 u_3 仍为 $0.091 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。

台式振动管密度仪测量重复性引入的不确定度分量 $u_4 = \Delta\rho_s = \rho_{\max} - \rho_{\min} = 0.003 \text{ kg/m}^3$ 。

台式振动管密度仪分度值引入的不确定度 u_5 ：因为台式振动管密度仪分度值为 0.001 kg/m^3 ，因此由分辨力引入的不确定度为 $u_5 = d/2\sqrt{3} = 2.89 \times 10^{-4} \text{ kg/m}^3$ 。

以上 5 个不确定度分量互不相关，则 $u_{c2} = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2} \approx 0.128 \text{ kg/m}^3$ 。取 $k = 2$ ，即 $U = 2 \times 0.128 \text{ kg/m}^3 \approx 0.3 \text{ kg/m}^3$ 。

3.3. 标准密度计测量结果不确定度评定

为获得标准密度计的最佳测量能力，在处于最佳状态试验，本次试验分析考虑标准器量值传递、温度修正、数据修约、估读误差，毛细修正以及重复性等影响，因此公式(14)变形为：

$$\Delta\rho = (\rho_t + \Delta\rho_s) - (\rho_s + \Delta\rho_c + \Delta\rho_v + \Delta\rho_a) \quad (15)$$

标准密度计量传引入的不确定度分量 u_1 ：由证书获得一等到标准密度计的扩展不确定度 $U(U=0.4$ 个分度)和 $k = 3$ ，则： $u_1 = U/k = (0.4 \times 0.2)/3 \text{ kg/m}^3 = 0.027 \text{ kg/m}^3$ 。

标准密度计测量读数误差引入的不确定度分量 u_2 ：在实际检定时用目视估读数值，假设本实验室浮计的估读误差不超过 ± 0.2 个分度值，其不确定度符合三角分布 $u_2 = (0.2 \times 0.02)/\sqrt{6} \text{ kg/m}^3 = 0.0016 \text{ kg/m}^3$ 。

标准密度计数据修约引入的不确定度 u_3 ：校准结果要示修约到分度值的 $1/10$ ，该不确定度符合均匀分布 $u_3 = (0.1 \times 0.02)/2\sqrt{6} \text{ kg/m}^3 = 0.004 \text{ kg/m}^3$ 。

密度标准物质温度波动时引入的不确定度分量 u_4 仍为 0.024 kg/m^3 。

标准密度计毛细常数修正引入的不确定度分量 u_5 ：根据毛细常数修正公式： $\Delta\rho = (\alpha_2 - \alpha_1)\pi D\rho^2/m$ ，可得 $u_{cr}(\Delta\rho) = \sqrt{u_r^2(\Delta\alpha) + u_r^2(D) + 2u_r^2(\rho) + u_r^2(m)}$ 。则：

1) 与毛细常数差有关的不确定度分量 $u(\Delta\alpha)$ ：经验估计毛细常数 α 以均匀分布，区间为 $\pm 0.08 \text{ mm}^2$ 则 $u(\Delta\alpha) = 0.08/\sqrt{3} \text{ mm}^2 \approx 0.046 \text{ mm}^2$ 。毛细常数差 $\Delta\alpha$ 的不确定度为 $u(\Delta\alpha) = \sqrt{0.046^2 + 0.046^2} \text{ mm}^2 \approx 0.065 \text{ mm}^2$ 。

2) 与液体密度有关的不确定度分量 $u(\rho)$ ：测量时允许玻璃浮计在 2 个分度值上下波动，符合均匀分布 $u(\rho) = (2 \times 0.2)/\sqrt{3} \text{ kg/m}^3 = 0.23 \text{ kg/m}^3$ 。

3) 与浮计测量有关的不确定度分量 $u(D)$ ：干管直径测量准确到 0.05 mm ，千分尺的不确定度忽略不计，则可在 $\pm 0.05 \text{ mm}$ 范围内符合均匀分布。 $u(D) = 0.05/\sqrt{3} \text{ mm} \approx 0.029 \text{ mm}$ 。

4) 与浮计质量测量有关的不确定度分量 $u(m)$ ：浮计质量 m 要求准确到 100 mg ，则它在 $\pm 100 \text{ mg}$ 范围内符合均匀分布。 $u(m) = 100/\sqrt{3} \text{ mg} \approx 57.74 \text{ mg}$ 。

换算为相对标准不确定度 $u_r(\Delta\alpha)$ 、 $u_r(D)$ 、 $u_r(\rho)$ 、 $u_r(m)$ 分别为 1.44% 、 0.58% 、 0.02% 、 0.09% 。

在本次试验，取 $D = 5.02 \text{ mm}$ ， $\Delta\alpha = 4.51 \text{ mm}^2$ ， $\rho = 998.20 \text{ kg/m}^3$ ， $m = 65410 \text{ mg}$ ， $\Delta\rho = 1.08 \text{ kg/m}^3$ 。则 $u_{cr}(\Delta\rho) = \sqrt{u_r^2(\Delta\alpha) + u_r^2(D) + 2u_r^2(\rho) + u_r^2(m)} = 1.56\%$ ， $u_5 = u_{cr}(\Delta\rho) \times \Delta\rho = 0.017 \text{ kg/m}^3$ 。

被测液体密度计测量测量重复性引入的有确定度分量 u_6 仍为 0.091 kg/m^3 。

以上 6 个不确定度分量互不相关，则 $u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2 + u_6^2} \approx 0.165 \text{ kg/m}^3$ 。取 $k = 2$ ，即 $U = 2 \times 0.165 \text{ kg/m}^3 \approx 0.4 \text{ kg/m}^3$ 。

4. 结论

本文依据计量学研究的评价方式及不确定度评估方法，对差压式液体密度计的示值误差和重复性等计量性能的校准方法进行了编写与说明，并给出典型不确定度分析案例。对于典型案例，示值误差的不确定度评定结果不大于 0.4 kg/m^3 ，这一结果满足了市面上大部分的差压式液体密度计的测试要求，给出了校准过程的书面示范，确保了检测结果的准确及计量溯源性。未来，《差压式液体密度计校准规范》

的发布和实施将为统一量值，保证测量结果的准确可靠发挥重要作用。

基金项目

本文感谢广东省市场监管局科技项目 2016CJ06，2020HBZ01 的支持。

参考文献

- [1] 鲍杰. 新型压差密度计的研制[J]. 内蒙古石油化工, 2011(4): 127-128.
- [2] 杨云涛, 向忠, 吴学进, 等. 基于 ZigBee 的智能压差式液体密度计的设计与实现[J]. 浙江理工大学学报, 2014, 31(1): 29-34.
- [3] 陈明华. 测量仪器准确度、最大允许误差和不确定度辨析[J]. 中国计量, 2003(6): 67-68.
- [4] 谢昭群, 张猛, 贾钠钧, 黄梓宸, 许俊斌, 黄彦捷, 周瑾艳, 等. 环氧乙烷检测仪的校准方法研究[J]. 仪器与设备, 2019, 7(1): 53-57. <https://doi.org/10.12677/iae.2019.71008>
- [5] 郭威, 黄彦捷, 花秀兵. 碳平衡法汽车燃料消耗量检测仪校准方法开发[J]. 仪器与设备, 2021, 9(2): 29-34. <https://doi.org/10.12677/iae.2021.92005>
- [6] 黄彦捷, 连超, 周瑾艳, 等. 由蚕砂制备的碳量子点在不同激发、pH、金属离子、温度及极性环境下的荧光性质研究[J]. 物理化学学报, 2019, 35(11): 1267-1275.
- [7] 黄彦捷, 李成辉, 周瑾艳, 等. 荧光光谱仪的校准方法研究及不确定度评定[J]. 化学试剂, 2019, 41(5): 495-501.
- [8] 黄彦捷, 关妍, 柯灿, 等. 一种非接触式稀土荧光自参比温度传感器[J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39(5): 1483-1488.