

液体相对密度天平测量结果不确定度评定方法的探讨

□王洋¹ 吴晶² 刘新军³

1. 咸阳市计量测试所 2. 优利德（湖北）新材料有限公司

3. 威海市产品质量标准计量检验研究院

【摘要】液体相对密度天平测量结果的准确度取决于蒸馏水温度、人员操作、检定方法等因素，在其测量不确定度的评定过程中，横梁分度的间距差和天平变动性引入的标准不确定度往往引用该项目的最大允许误差进行计算。因每台仪器的计量性能不同，其示值误差也有所不同，引用最大允许误差来进行测量不确定度的评定，导致评定结果缺乏一定的合理性。本文利用重复性测量结果，探讨液体相对密度天平测量结果不确定度评定方法，以提高评定方法的科学性和合理性。

【关键词】液体相对密度天平；测量方法；不确定度评定

文献标识码：A

文章编号：1003-1870（2026）05-0035-03

Discussion on Evaluation Method for Measurement Uncertainty of Relative Density Balance for Liquid

【Abstract】The accuracy of measurement results obtained by a relative density balance for liquid depends on factors such as distilled water temperature, operator operation, and verification methods. In the evaluation of measurement uncertainty, the standard uncertainties introduced by the interval difference of the beam graduation and the variability of the balance are usually calculated based on the maximum permissible error of the instrument. Since the metrological performance varies among individual instruments, their indication errors also differ accordingly. Evaluating measurement uncertainty by referring to the maximum permissible error renders the evaluation results lacking rationality. This paper discusses the evaluation method for measurement uncertainty of relative density balances for liquid by using repeatable measurement results, so as to improve the scientificity and rationality of the evaluation method.

【Keywords】Relative density balance for liquid; Measurement method; uncertainty evaluation

引言

液体相对密度天平利用了阿基米德定律和杠杆原理。其测量结果的准确度取决于蒸馏水温度、人员操作、测量方法等因素，本文通过对横梁分度的间距差和天平变动性进行多次重复测量，利用重复

性测量结果评定各分量的标准不确定度，以提高不确定度评定方法的合理性和科学性。

1 依据文件

1.1 JJG 171-2016《液体相对密度天平检定规程》^[1]。

1.2 JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》^[2]。

2 计量标准器

骑码：4.5g, 5g, 495 mg, 490 mg, 485 mg, 480 mg, 475 mg, 各1个；5 mg 和50 mg, 各2个；500 mg 10个；

钩码：15 g 1个。

3 测量对象

液体相对密度天平。测量范围：0.1000~2.0000。
分度值：0.0001。

4 测量方法

将测锤挂到挂钩上，调整平衡指针尖与固定指针尖，使其保持在同一水平轴线上。将清洁的测锤浸没于玻璃量筒的液体中，天平的横梁因获得浮力而失去平衡，然后在天平的V型凹槽里放置500mg的骑码，直至平衡指针尖与固定指针尖保持在同一水平轴线上。根据V型凹槽里所放置骑码的数量值计算密度值，用密度值除以水的密度值，即为相对密度值。

5 数学模型

测量模型： $R=D+E+I$

灵敏系数： $C_1 = \frac{\partial R}{\partial D} = 1$ $C_2 = \frac{\partial R}{\partial E} = 1$ $C_3 = \frac{\partial R}{\partial I} = 1$

6 测量不确定度来源分析

6.1 测锤体积差引入的标准不确定度 $u(D)$ ；

6.2 横梁分度的间距差引入的标准不确定度 $u(E)$ ；

6.3 天平变动性引入的标准不确定度 $u(I)$ 。

7 输入量的标准不确定度评定

7.1 测锤体积差引入的标准不确定度的评定 $u(D)$

7.1.1 量筒中蒸馏水温度波动引入的标准不确定度分量 $u(D_1)$

温度是影响测量结果的关键因素，检定规程中要求，测量前后蒸馏水的温度波动不应超过0.5℃，由《(0~40.5)℃温度下蒸馏水相对密度对照表》可知，蒸馏水的温度每变化0.5℃，其相对密度值的变化值为0.0001，则半宽 $a=0.0001$ ，按均匀分布， $k=\sqrt{3}$ ，则蒸馏水温度波动引入的标准不确定度分量为：

$$u(D_1) = \frac{a}{k} = \frac{0.0001}{\sqrt{3}} \approx 0.000058$$

7.1.2 人为操作引入的标准不确定度分量 $u(D_2)$

在测锤体积差引入的相对密度误差测量过程中，由于人员视线位置不同、主观判断和环境条件（如光线）等因素，导致人员对平衡指针尖与固定指针尖在同一水平轴线上的判断有所差异，从而导致人为操作引入了标准不确定度。另外，因检定规程中规定，该项目以单次测量结果为最终测量结果，从而导致偶然性误差的存在，甚至出现人为读数错误。在进行测量不确定度的评定时，如果想减小偶然误差和人为错误引入的测量不确定度，应进行多次重复性测量，除去可疑数据，计算样本的标准偏差，作为人为操作引入的标准不确定度。

具体评定以相对密度小于1的情况为例，对液体相对密度天平的测锤体积差重复测量10次($n=10$)，测量结果分别如下：0.0001, 0.0002, 0.0002, 0.0001, 0.0001, 0.0002, 0.0002, 0.0002, 0.0001, 0.0002。

样本标准偏差的计算结果为：

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \approx 0.000052$$

实际工作中，以单次测量结果为最终测量结果，故 $n=1$ ，则其重复性测量引入的标准不确定度分量为：

$$u(D_2) = \frac{s}{\sqrt{n}} \approx 0.000052$$

7.1.3 测锤体积差引入的标准不确定度分量合成

量筒中蒸馏水温度波动引入的标准不确定度分量和人为操作引入的标准不确定度分量彼此间不相关，故其合成标准不确定度为：

$$u(D) = \sqrt{u^2(D_1) + u^2(D_2)} \approx 0.000078$$

7.2 横梁分度的间距差引入的标准不确定度的评定 $u(E)$

密度分度值的间距差，指横梁上任意两个V型凹槽之间的实际间距与理论设计间距之间的偏差。由于天平横梁上的任意两个V型凹槽之间的实际间距不相等，因此引入了标准不确定度。在此不确定度的评定过程中，往往引用横梁分度间距差的最大允许误差(± 4 分度)，按均匀分布， $k=\sqrt{3}$ ，进行标准不

确定度的评定。此方法使用同一数值代表所有任意相邻两个V型凹槽之间的间距误差，缺乏一定的合理性。因此，可对1、3、5、7、9号凹槽口($n=5$)分别进行10次重复性测量，各V型凹槽口的密度误差测量结果分别如下：

V型凹槽口1：0.0001,0.0001,0.0001,0.0000,0.0001,0.0001,0.0001,0.0000,0.0000,0.0000；V型凹槽口3：0.0002,0.0002,0.0003,0.0002,0.0002,0.0001,0.0003,0.0002,0.0003,0.0003；V型凹槽口5：0.0002,0.0002,0.0001,0.0001,0.0000,0.0001,0.0002,0.0001；V型凹槽口7：0.0003,0.0002,0.0003,0.0002,0.0003,0.0001,0.0003,0.0002,0.0003,0.0000；V型凹槽口9：0.0002,0.0003,0.0002,0.0002,0.0003,0.0002,0.0002,0.0002,0.0002,0.0002。

样本总体标准偏差的计算结果为：

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}{N}} \approx 0.00010$$

实际工作中，以单次测量结果为最终测量结果，故 $n=1$ ，则横梁分度的间距差引入的标准不确定度为：

$$u(E) = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \approx 0.00010$$

7.3 天平变动性引入的标准不确定度的评定 $u(I)$

此测量过程实际上是在测量天平的横梁及挂钩吊环在机械性活动以后对液体相对密度天平密度示值造成的影响程度。因检定规程中规定，此项目检定的次数为1次，以单次测量结果为最终测量结果，不进行重复性测量，此检定方法存在一定的偶然性。在进行不确定度评定时，如果想减小偶然因素引入的测量不确定度，应进行多次重复性测量，以单次实验标准偏差评定其标准不确定度。按照检定规程中规定的方法，重复测量10次，得到天平变动性测量结果如下：0.0003,0.0002,0.0002,0.0001,0.0003,0.0001,0.0001,0.0002,0.0003,0.0002。

样本标准偏差的计算结果为：

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \approx 0.000082$$

实际工作中，以单次测量结果为最终测量结果，故 $n=1$ ，则液体相对密度天平天平变动性引入的

标准不确定度分量为：

$$u(I) = \frac{s}{\sqrt{n}} \approx 0.000082$$

8 合成标准不确定度的评定

8.1 标准不确定度分量汇总表

表1 标准不确定度分量汇总表

不确定度符号	不确定度来源	不确定度结果
$u(D)$	测锤体积差	0.000078
$u(E)$	天平横梁分度的间距差	0.00010
$u(I)$	天平变动性	0.00010

8.2 合成标准不确定度的评定

输入量 D 、 E 和 I 彼此独立不相关，则其合成标准不确定度为：

$$u(R) = \sqrt{u^2(D) + u^2(E) + u^2(I)} \approx 0.00015$$

9 扩展不确定度的评定

取包含因子 $k=2$ ，其扩展不确定度为：

$$U = 0.00015 \times 2 = 0.0003$$

10 结语

液体相对密度天平测量结果的准确度取决于蒸馏水温度、人员操作、检定方法等因素，在其测量不确定度的评定过程中，应对各标准不确定度分量的来源进行合理的分析，选择科学的评定方法，以减小系统误差和偶然性误差引入的测量不确定度，从而提高液体相对密度天平测量结果的准确度。

参考文献

- [1] JJG 171-2016 液体相对密度天平检定规程[S].
- [2] JJF 1059.1-2012 测量不确定度评定与表示[S].

作者简介

王洋，工程师，任职于咸阳市计量测试所，担任总工。

吴晶，一级注册计量师/质量安全总监，现任职于优利德（湖北）新材料有限公司。研究方向：化工计量。

刘新军，中级工程师，现任职于威海市产品质量标准计量检验研究院。研究方向：力学计量检定/校准。