

F₁ 等级砝码约定质量测量结果的不确定度分析

□北京市海淀区计量检测所 张梦娇

【摘要】本文论述了常见情况下，F₁ 等级200g 砝码约定质量值测量结果不确定度的评定工作，计算不确定度，并对各项影响因素分别进行分析，研究标准砝码、衡量仪器以及空气浮力对被检砝码约定质量值测量结果不确定度的影响。

【关键词】砝码；不确定度；约定质量值

文献标识码：A

文章编号：1003-1870（2025）03-0029-03

Analysis on Uncertainty in Conventional Mass Measurement of Class F1 Weights

【Abstract】This paper discusses the evaluation of uncertainty in conventional mass measurement of class F1 200g weights under common circumstances, calculates the uncertainty, analyzes various influencing factors separately, and studies the influence of standard weights, measuring instruments and air buoyancy on the conventional mass measurement uncertainty of the tested weights.

【Keywords】weight; uncertainty; conventional mass

引言

对本研究对F₁ 等级砝码约定质量值测量结果的不确定度进行评定，并对可能影响较大的因素进行探究，分析各因素的变化对测量结果不确定度的影响。

测量标准：E₂ 等级砝码，出厂编号分别为：407，406，22929732，其中200g 砝码共6 个。

配套设备：电子天平，型号：XP505，最大称量Max=520g，实际分度值d=0.01mg。电子天平，型号：AL204，最大称量Max=210g，实际分度值d=0.1mg。电子温湿度计，型号：TR03D，温度扩展不确定度U=0.38℃（k=2），湿度扩展不确定度U=0.88%RH（k=2）。空盒气压表，型号：DYM3，最大允许误

差2hPa。

被测对象：F₁ 等级200g 砝码，编号：966。

1 约定质量值测量结果的不确定度评定

F₁ 等级砝码的质量测量一般使用直接比较法，被检砝码与标准砝码之间的约定质量值差值的计算公式为：

$$\Delta m_c = (V_t - V_r) \times (\rho_a - \rho_0) \pm \Delta I \times \frac{m_{cs}}{\Delta I_s} \pm m_{cw}$$

因使用电子天平为衡量仪器时不添加小砝码，取 $m_{cw}=0$ 。依据该数学模型，砝码的约定质量值测量结果的主要不确定度来源包括：测量过程的不确定度、标准砝码的不确定度、空气浮力引起的不确定度、衡量仪器的不确定度。下面计算使用407-200g 为标准砝码，XP505 电子天平为衡量仪器（方法一）

的各项不确定度。

1.1 测量过程的标准不确定度 u_w

对被检砝码做10次独立测量，此衡量循环采用ABBA的模式，被检砝码约定质量修正值的10次测量结果为0.28、0.26、0.25、0.28、0.27、0.29、0.31、0.30、0.29、0.31（单位：mg）。

计算约定质量值修正值的平均值：

$$\overline{\Delta m_c} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta m_{ci} = 0.284 \text{mg}$$

以及测量过程的标准不确定度：

$$u_w = s(\Delta m_c) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta m_{ci} - \overline{\Delta m_c})^2} = 0.020 \text{mg}$$

1.2 标准砝码的不确定度 $u(m_{cr})$

标准砝码质量的不稳定性引起的不确定度 $u_{\text{inst}}(m_{cr})$ 可以从对标准砝码多次检定之后的质量变化中估计得到。407-200g砝码近8次检定的约定质量值修正值分别为：0.18、0.17、0.18、0.18、0.23、0.20、0.19、0.21（单位：mg）。其约定质量值修正值的平均值为0.193mg。利用贝塞尔公式计算该标准砝码质量的不稳定性引起的不确定度：

$$u_{\text{inst}}(m_{cr}) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta m_{cri} - \overline{\Delta m_{cr}})^2} = 0.0198 \text{mg}$$

由于检定证书中未给出标准砝码的扩展不确定度，根据砝码检定规程可知其扩展不确定度的极限值 $U=0.10 \text{mg}$ （ $k=2$ ）， $\frac{U}{k} = \frac{0.10}{2} = 0.05 \text{mg}$ 。

该标准砝码的不确定度

$$u(m_{cr}) = \sqrt{\left(\frac{U}{k}\right)^2 + u_{\text{inst}}^2(m_{cr})} = 0.054 \text{mg}$$

1.3 空气浮力修正的不确定度 u_b

在 $p=1008 \text{ hPa}$ ， $t=22^\circ\text{C}$ ， $rh=35\%RH$ 条件下，根据被检砝码和标准砝码的体积数据，计算 $u_b=0.0567 \text{mg}$ ， $m_0|C|=0.0023 \text{mg}$ ，小于被检砝码的最大允许误差（1.0mg）的九分之一，无需进行空气浮力修正。而将此部分误差放入空气浮力不确定度进行计算，则空气浮力引起的不确定度由两部分组成：

$$\sqrt{u_b^2 + (m_{cr}C)^2} = 0.057 \text{mg}$$

由于 $m_{cr}C$ 远小于 u_b ，即使进行空气浮力的修正，也不能减小空气浮力引起的不确定度。

1.4 衡量仪器的不确定度 u_{ba}

衡量仪器的不确定度有多个分量，分别与天平的灵敏度、分辨力、偏载、磁性等因素有关。

采用1g的E₂等级标准砝码测量所使用的天平的灵敏度，计算得到灵敏度引起的不确定度 u_s 小于 $1 \times 10^{-4} \text{mg}$ ，可以忽略不计。

对于标尺分度值 d 的数字式衡量仪器，由于分辨力引起的不确定度 $u_d = \frac{d/2}{\sqrt{3}} \times \sqrt{2} = 0.00408 \text{mg}$

根据砝码宣贯教材中给出的方案，并估计 $\frac{d_1}{d_2} = \frac{1}{3}$ ，

由于偏载引起的不确定度 $u_E = \frac{\frac{d_1}{d_2} \times D}{2\sqrt{3}} = 0.00577 \text{mg}$

所用的标准砝码及被检砝码均经过了磁性的测量，满足规程要求，磁性引起的不确定度可假设为零。

合成上述四项不确定度分量为衡量仪器XP505的不确定度：

$$u_{ba} = \sqrt{u_s^2 + u_d^2 + u_E^2 + u_{ma}^2} = 0.0071 \text{mg}$$

1.5 合成标准不确定度 $u_c(m_{ct})$ 和扩展不确定度 U

计算被检砝码的约定质量值的合成标准不确定度：

$$u_c(m_{ct}) = \sqrt{u_w^2 + u^2(m_{cr}) + u_b^2 + u_{ba}^2} = 0.081 \text{mg}$$

采用覆盖因子 $k=2$ ，计算被检砝码的约定质量值的扩展不确定度： $U(m_{ct})=k_{uc}(m_{ct})=2 \times 0.081=0.16 \text{mg}$ ，小于F₁等级200g砝码的扩展不确定度极限值的要求（0.3mg），符合检定规程要求。

2 更换标准砝码和衡量仪器对不确定度的影响

2.1 更换标准砝码

若分别使用另外5个标准砝码，其他条件不变，此为方法二，将影响标准砝码和空气浮力引起的两项不确定度。用1.2和1.3的方法计算，其它五个标准砝码的 $u_{\text{inst}}(m_{cr})$ 在(0.014~0.044)mg之间， $u(m_{cr})$ 在(0.052~0.066)mg之间。空气浮力引起的不确定度在(0.056~0.057)mg之间。计算得到扩展不确定度 $U(k=2)$ 在(0.16~0.18)mg之间。

2.2 更换衡量仪器

若使用AL204天平为衡量仪器，其他条件不变，此为方法三，将影响测量过程和衡量仪器两项

不确定度。用1.1和1.4的方法计算， $\overline{\Delta m_c} = 0.30\text{mg}$ ，测量过程的不确定度 $u_w = 0.074\text{mg}$ 。对于该天平，由显示分辨力、偏载引起的不确定度分别为 0.0408mg 、 0.0385mg ，灵敏度和磁性引起的不确定度均可忽略，则衡量仪器AL204的不确定度 $u_{\text{ins}} = 0.056\text{mg}$ 。计算得到扩展不确定度 $U(k=2)$ 为 0.24mg 。

2.3 三种方法的不确定度的对比

以上三种方法的不确定度结果汇总见下表。

表 三种方法的不确定度分量及合成标准不确定度、扩展不确定度（单位：mg）

不确定度来源	方法一	方法二	方法三
测量过程的不确定度	0.020	0.020	0.074
标准砝码的不确定度	0.054	0.052~0.066	0.054
空气浮力引起的不确定度	0.057	0.056~0.057	0.057
衡量仪器的不确定度	0.0071	0.0071	0.056
①显示分辨力引起的不确定度	0.00408	0.00408	0.0408
②由于偏载引起的不确定度	0.00577	0.00577	0.0385
合成标准不确定度	0.081	0.079~0.090	0.12
扩展不确定度（ $k=2$ ）	0.16	0.16~0.18	0.24

3 结果与讨论

在方法一中，空气浮力引起的不确定度和标准砝码的不确定度两项分量较大，测量过程的不确定度较小，最小的是衡量仪器的不确定度。

对比方法二与方法一可以发现，使用不同标准砝码对空气浮力引起的不确定度几乎没有影响。在本例中，使用稳定性更高的标准砝码对于减小测量结果不确定度有较小贡献。这是由于标准砝码的不确定度是由 $\frac{U}{k}$ 和 $u_{\text{insl}}(m_{\text{cr}})$ 两部分合成得到的，虽然六个标准砝码的稳定性差异较大，但取固定数值的 $\frac{U}{k}$ 才是主要分量，即上等级标准砝码不确定度传递到 F_1 等级被检砝码的不确定度。

对比方法三与方法一可以发现，改用实际分度值 $d=0.1\text{mg}$ 的电子天平，对测量结果的不确定度有较大影响，会显著增加测量过程和衡量仪器两项不确定度分量，导致四项不确定度分量的数值处于同一

数量级并较为接近，但计算其扩展不确定度仍小于砝码规程要求的 0.3mg 的不确定度极限值。

4 结语

使用稳定性更高的标准砝码，可以略微减小标准砝码的不确定度。此处 U 采用的是规程中的扩展不确定度极限值，如果对标准砝码通过校准方式溯源，获得更小的 $\frac{U}{k}$ 值，可以有效减小标准砝码的不确定度分量。

使用实际分度值 $d=0.1\text{mg}$ 的天平，会显著增加测量过程和衡量仪器两项不确定度，从而使测量结果的不确定度增大。在本例中明显更接近不确定度极限值，因此测量时应尽量使用 $d=0.01\text{mg}$ 的天平。

参考文献

- [1] JJG99-2022, 砝码[S]. 国家市场监督管理总局.
- [2] 国家质量技术监督局计量司. 测量不确定度评定与表示指南[M]. 北京: 中国计量出版社. 2005.
- [3] 姚弘. 砝码宣贯教材[M]. 北京: 中国计量出版社. 2007.
- [4] JJF1059.1-2012 测量不确定度评定与表示[S]. 北京: 中国计量出版社. 2013.

作者简介

张梦娇，北京市海淀区计量检测所工程师。研究方向：质量计量。