

500kgF₂等级砝码的检定及不确定度评定

国家轨道衡计量站 安爱民

【摘要】 本文依据JJG99-2006《砝码》检定规程的要求,阐述了500kgF₂等级砝码的检定方法,并分析了其检定过程中的不确定度来源及评定方法。

【关键词】 砝码; 检定; 不确定度

引言

由于我站量值传递的需要,现有500kgF₂等级砝码6块,材料为不锈钢,最大允许误差为±8g,用于传递检定500kg~3000kg M₁₂等级砝码。这6块500kgF₂等级砝码采用25块20kgF₁等级砝码作为标准在500kg/1000kg两档Ⅰ₄级天平上进行检定,20kgF₁等级砝码的最大允许误差为±0.1g,组合为500kg砝码的最大允许误差为±2.5g,材料为不锈钢。

一、检定设备及方法

1、检定设备

检定设备采用我站500kg/1000kg两档Ⅰ₄级天平,该天平的主要技术指标在500kg档时为:最大称量:500kg;分度值 $e \leq 0.5g$ 。

2、检定方法

根据JJG99-2006《砝码》检定规程,对F₂等级砝码检定室有如下基本要求是:检定室不允许有容易察觉的振动和气流,应尽量远离振源和磁源,检定室内的天平和砝码应避免阳光直接照射。检定室温度波动每4小时不得大于3.5℃,室内空气的相对湿度应在30%~70%,每4小时最大变化15%,砝码的温度应与室温相一致,存放时间不得少于4小时等。

检定过程采用替代称量法,测量循环为ABA,循环次数为一次,具体操作过程为:先在500kg/1000kg两档Ⅰ₄级标准天平左盘加25块20kgF₁等级标准砝码,右盘为平衡砝码,读取平衡位置,卸下标准砝码,然后在天平左盘加上一块500kgF₂等级被检砝码,读取其平衡位置,将测分度值的标准小砝码放入左盘内,读取平衡位置,取下标准砝码和标准小砝码。由一人检定一次。

二、数学模型的建立

选择检定500kgF₂等级砝码的质量测量为评定对象,即评定被测砝码折算质量的测量不确定度,测量方法为替代称量法,即在天平分别放上标准砝码及被测砝码,获得相应的质量差,经计算得到被测砝码的折算质量。

砝码的测量数学模型可表示为下列形式:

$$m_i = m_r + \overline{\Delta m} = m_r + (V_i - V_r) \times (\rho_a - \rho_0) \pm \Delta I \times \frac{m_{cs}}{\Delta I_s} \pm m_{cw} \quad (1)$$

式中 m_t 表示被测 500kgF₂等级砝码的折算质量； m_r 表示 25 块 20kgF₁等级砝码组合的总折算质量； Δm 为被测砝码和标准砝码对应的质量差； ρ_a 为空气密度，一般采用近期平均空气密度或年空气密度； ρ_0 为参考空气密度，为 1.2kg/m³； V_t 、 V_r 为被检砝码和标准砝码的体积， m_{cs} 为测分度值灵敏度砝码的折算质量， m_{cw} 为平衡小砝码的折算质量，在本检定过程中未添加此砝码，故该项为零。

三、不确定度来源及分量的评定

根据数学模型，可知测量结果有 4 个不确定度来源，即测量重复性、标准砝码、空气浮力、天平。这 4 个不确定度来源带来的标准不确定度分别说明如下：

1、测量重复性引入的标准不确定度 $u_w(m_t)$

这类不确定度可根据天平的示值重复性，即全称量示值重复性 Δ_p 来确定，此处 Δ_p 取天平的分度值 0.5g，所以

$$u_w(m_t) = 1/3 \times \Delta_p = 1/3 \times 0.5 = 0.17 \text{ (g)}$$

2、标准砝码引入的标准不确定度 $u(m_r)$

对应于标准砝码质量 m_r 的不确定度分量。计算公式为：

$$u(m_r) = \sqrt{u_0^2(m_r) + u_{inst}^2(m_r)} \quad (2)$$

其中 $u_0(m_r)$ 表示标准砝码上次检定时的标准不确定度； $u_{inst}(m_r)$ 表示标准砝码质量不稳定性引入的标准不确定度，取为相应砝码质量最大允许误差 $\delta(m_r)$ 的 $\frac{1}{3\sqrt{3}}$ 。其标准砝码总质量的允差

$\delta(m_r) = \pm 2.5\text{g}$ ，故

$$u(m_r) = \sqrt{\left(\frac{\delta(m_r)}{6}\right)^2 + \left(\frac{\delta(m_r)}{3\sqrt{3}}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{2.5}{6}\right)^2 + \left(\frac{2.5}{3\sqrt{3}}\right)^2} = 0.64 \text{ (g)} \quad (3)$$

3、由空气浮力引入的标准不确定度 $u_b(m_t)$

表示空气浮力修正项 $(V_t - V_r) \times (\rho_a - \rho_0)$ 的不确定度分量。由于被检砝码与标准砝码都为不锈钢材料，在F₂等级砝码的检定中，相应的空气密度修正量相对于最大允许不确定度而言一般非常小。因此，一般不进行空气浮力修正。这时，通过估计空气浮力修正值的大小来评定该不确定度分量。首先，空气密度一般控制在 $(\rho_0 \pm 1.2)\text{kg/m}^3$ ；其次不锈钢砝码材料密度范围为 $(7800 \sim 7900)\text{kg/m}^3$ ，从而可计算出空气浮力修正。因此，空气浮力的标准不确定度 $u_b(m_t)$ 可取为：

$$u_b(m_t) = \frac{1}{\sqrt{3}} |(V_t - V_r) \times (\rho_a - \rho_0)| = \frac{1}{\sqrt{3}} \times 1.2 \times \left(\frac{500}{7800} - \frac{500}{7900}\right) = 0.56 \text{ (g)} \quad (4)$$

4、天平带来的标准不确定度 $u_b(m_t)$

这里考虑天平的分辨力、灵敏度和线性漂移 3 个方面的不确定度分量。下面分别讨论：

(1) 由于检定所用天平是机械天平，是通过天平指针摆动获取读数的，计算其平衡位置，因此分辨力引入的不确定度分量 $u_d(m_t)$ 为

$$u_d(m_t) = d/4 = 0.5/4 = 0.13g$$

(2) 天平灵敏度引起的不确定度 $u_s(m_t)$

$$u_s(m_t) = \sqrt{(\overline{\Delta m_c})^2 \left[\frac{u^2(m_s)}{m_s^2} + \frac{u^2(\Delta I_s)}{(\Delta I_s)^2} \right]} \approx |\Delta m| \cdot \frac{\delta_{\text{天平}}}{3m_s} \quad (5)$$

对于本检定过程， $\overline{\Delta m}$ 一般不大于 2.5g， $\delta_{\text{天平}}$ 为天平的分度值，此处取为 0.5g，灵敏度砝码 m_s 采用 2g F₂ 等级砝码，所以 $u_s(m_t) = 2.5 \times \frac{0.5}{3 \times 2} = 0.21g$ 。

(3) 线性漂移 $u_{\text{drift}}(m_t)$

首先估计天平的线性漂移速率。依据可以是示值重复性，对应的测量次数为 4 次，所以每次测量的漂移可取为示值重复性的 1/4，所以

$$u_{\text{drift}}(m_t) = \frac{\frac{1}{4} \times \Delta_p}{\sqrt{3}} = \frac{\frac{1}{4} \times 0.5}{\sqrt{3}} = 0.07(g) \quad (6)$$

综上所述，可以计算出 $u_{ba}(m_t)$ ：

$$\begin{aligned} u_{ba}(m_t) &= \sqrt{u_d^2(m_t) + u_s^2(m_t) + u_{\text{drift}}^2(m_t)} \\ &= \sqrt{0.13^2 + 0.21^2 + 0.07^2} = 0.26(g) \end{aligned} \quad (7)$$

四、合成标准不确定度

由于各不确定度分量互不相关，故合成标准不确定度可用下式计算：

$$\begin{aligned} u(m_t) &= \sqrt{u_w^2(m_t) + u^2(m_r) + u_b^2(m_t) + u_{ba}^2(m_t)} \\ &= \sqrt{0.17^2 + 0.64^2 + 0.56^2 + 0.26^2} = 0.91(g) \end{aligned} \quad (8)$$

五、扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，则扩展不确定度为：

$$U = k \times u(m_t) = 2 \times 0.91 = 1.82g$$

六、不确定度分量汇总

不确定度分量			合成标准不确定度 $u(m_t)$	扩展不确定度 (k=2)	最大可接受 不确定度 (k=2)
符号	不确定度来源	标准不确定度 (g)			
$u_w(m_t)$	测量重复性	0.17	0.91 g	1.82 g	2.4g
$u(m_r)$	标准砝码	0.64			
$u_b(m_t)$	空气浮力	0.56			
$u_{ba}(m_t)$	天平	0.26			

七、不确定度报告

以 1 块 500kgF₂等级砝码检定为例,其检定数据为 $I_{A1}=0.0$, $I_B=2.5$, $I_{A2}=0.0$, 实测分度值为 0.48g, 标准砝码的折算质量为 $m_r=499.9995\text{kg}$, 所以

$$m_t = m_r + \overline{\Delta m} = m_r + (I_B - \frac{I_{A1} + I_{A2}}{2}) \times \frac{m_{cs}}{\Delta I_s} \quad (9)$$

根据以上检定数据和公式 (9) 计算出的被测砝码质量为 $m_t=500.0007\text{kg}$; $U=1.82\text{g}$; $k=2$ 。

参考文献

1. JJG99-2006《砝码》检定规程。
2. 闫宝珠, 质量与密度测量不确定度评定[M], 北京: 中国计量出版社, 2002。
3. 倪育才, 实用测量不确定度评定[M], 北京: 中国计量出版社, 2008。
4. JJF 1059-1999《测量不确定度评定与表示》。