

[文章编号] 1003- 5729(2012) 08- 0039- 03

砝码测量能力 (CMC) 评定

江苏省计量科学研究院 王 玲, 刘 炜, 常 红

[摘 要] 质量是七大物理基本量之一, 从质量可以导出许许多多物理量。而砝码是承载质量量值的载体, 对它的计量控制关系到量值传递的准确性。本文以对 1mg~500mg 进行预评估为例来确定 E₂ 等级砝码标准装置 (1mg~500mg) 段的最佳测量能力。

测量依据: JJG99- 2006 《砝码检定规程》。

工作原理: 通过衡量仪器, 按照一定的测量顺序, 分别接收标准砝码与被检砝码的质量信息, 对标准砝码与被检砝码的质量量值进行比较后, 得到质量差值, 已知标准砝码的质量值, 按照折算质量的修正公式计算得到被检砝码的质量值。

[关键词] 测量能力; 评定; 砝码

[中图分类号] TH715.1*1

[文献标识码] B

Weight measurement capability evaluation

Article abstract: Quality is the fundamental physical quantity, from which can be derived from the many physical quantity. While the weight bearing quality value carrier, its measurement and control in relation to the accuracy of value transfer. Based on the 1mg~500mg pre assessment as an example to determine the E₂ level of weight standard device (1mg~500mg) section of the best measurement capability.

According to JJG99- 2006 measurements: "Verification regulation of weights"

Working principle: According to the certain measuring sequence, respectively receive the standard weight and test weight of the quality of information. the standard weight and test weight of quality value comparison, quality difference, known weight standard quality value, according to the translation quality correction formula test weight.

Key words: measurement capability; evaluation; weight

1 数学模型

采用双次替代衡量法, 建立起在空气中比较时的平衡方程式:

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

式中: Δm_c ——被检砝码与标准砝码的折算质量差值;

V_t ——被检砝码的体积;

V_r ——标准砝码的体积;

ρ_a ——空气的实际密度;

ρ_0 ——空气的参考密度;

m_{cw} ——添加小砝码的质量值;

ΔI ——天平的显示差值;

m_{cs} ——灵敏度砝码的折算质量值;

ΔI_s ——由于灵敏度砝码引起的天平示值变化。

当采用直接比较法时, 通常用被检砝码与一个或多个标准砝码比较进行检定。被检砝码的折算质量修正值为: $m_t = m_r + \Delta m_c$ 。

2 不确定度分量的评定

2.1 对检定 1mg~500mg 的不确定度评定

2.1.1 标准砝码的不确定度分量 $u(m_{cr})$

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

选用 E₂ 等级的 1mg 及 500mg (Y374#) 为标准砝码, 量值传递中使用了修正值, 其扩展不确

2012 年 第 41 卷 第 8 期

定度分别为 $U=0.002$ ， $U=0.008\text{mg}$ ($k=2$)。为考察其稳定性，使用其 4 个周期的检定数据按均匀分布来评估。

$$U_{inst}(m_{cr}) = \frac{m_{cr}(\max) - m_{cr}(\min)}{2 \times \sqrt{3}}$$

检定数据如下表所示： (mg)

标称值	2008.1	2009.1	2009.12	2010.12	$u_{inst}(m_{cr})$	$u(m_{cr})$
500mg	0.021	0.016	0.015	0.013	0.0023	0.0046
1mg	-0.002	-0.002	-0.002	-0.001	0.0003	0.0010

2.1.2 空气浮力修正引入的标准不确定度分量 u_b

①空气密度：

$$\rho_a = \frac{0.34848 \times p - 0.009 \times RH \times \exp(0.062 \times t)}{273.15 + t} = 1.2 \text{mg/cm}^3$$

式中： p ——实验室平均大气压力 (101.07kPa)；
 RH ——实验室平均相对湿度 (50.0%)；

t ——实验室平均温度 (20.0°C)。

②空气密度测量的不确定度：

$$u(\rho_a) = \sqrt{\left(\frac{u_p}{p}\right)^2 + \left(\frac{u_{RH}}{RH}\right)^2 + \left(\frac{u_t}{t}\right)^2 + \left(\frac{u_{\rho_a}}{\rho_a}\right)^2}$$

式中： $u_p = 2 \times 10^{-4} \rho_a$ $\frac{u_p}{p} = 10^{-5} Pa^{-1} \rho_a$
 $\frac{u_{RH}}{RH} = 3.4 \times 10^{-3} K^{-1} \rho_a$ $\frac{u_{RH}}{RH} = 10^{-2} \rho_a$

根据实验室使用的测量空气密度所配备的设备情况，大气压力、温度、湿度三个气象参数仪器的测量标准不确定度分别为：

$$U_p = 14\text{Pa}, U_t = 0.3^\circ\text{C}, U_{RH} = 0.9\% (k=2)$$

由空气密度不确定度公式得到： $u(\rho_a) = 6.6 \times 10^{-4} \text{mg/cm}^3$

③空气浮力修正引入的标准不确定度

$$u_b = \sqrt{\left(\frac{V_{ref} - V_{test}}{V_{ref}}\right)^2 u_{\rho_a}^2 + \left(\frac{V_{ref} - V_{test}}{V_{ref}}\right)^2 u_{\rho_a}^2 + 2 \frac{V_{ref} - V_{test}}{V_{ref}} \frac{u_{\rho_a}}{\rho_a} u(m_{ref}, V_{ref})}$$

式中： $2 \frac{u_{m_{ref}}}{m_{ref}} \frac{u_{m_{test}}}{m_{test}} u(m_{ref}, V_{ref}) = 2(V_{ref} - V_{test})(V_{ref} - V_{test}) u_{\rho_a}^2$
 $2 \frac{u_{m_{ref}}}{m_{ref}} \frac{u_{m_{test}}}{m_{test}} u(m_{ref}, V_{ref}) = 2 \frac{u_{\rho_a}^2}{\rho_a V_{ref}}$

由于标准砝码为奥氏体不锈钢砝码，而被检砝码为普通不锈钢砝码，因此取 $\rho_r = 7.85\text{g/cm}^3$ 、 $\rho = 7.95\text{g/cm}^3$ ，从而得到数据值如表 1 所示。

表 1

名称	标称值	500mg	1mg
标准砝码体积(cm^3)	V_r	0.0637	1.27×10^{-4}
被检砝码体积(cm^3)	V_t	0.0629	1.26×10^{-4}
标准砝码体积不确定度(cm^3)	u_{vr}	5.58×10^{-4}	1.12×10^{-6}
被检砝码体积不确定度(cm^3)	u_{vt}	5.45×10^{-4}	1.09×10^{-6}
上级砝码体积(cm^3)	V_{ref}	0.0625	1.25×10^{-4}
空气密度(mg/cm^3)	ρ_a	1.2	1.2
空气密度不确定度(mg/cm^3)	$u(\rho_a)$	6.6×10^{-4}	6.6×10^{-4}
空气浮力修正引入的不确定度(mg)	u_b	1.41×10^{-4}	2.82×10^{-7}

注：由于实测空气密度与标准空气密度相同，所以空气浮力修正量为 0。

2.1.3 衡量仪器的标准不确定分量 u_{ba}

衡量仪器选用了质量比较仪 UMx5，读数能力为 0.0001mg。

①衡量过程的不确定度 $u_w(m_c)$

在对本衡量仪器进行周期检定时，给出的重复性为 0.0012mg，由于日常对砝码进行检定用 ABA 的测量模式时，最少测量 2 次取平均值作为最终结果。因此：

$$u_w(m_c) = 0.0012 / \sqrt{2} = 0.0008\text{mg}$$

②分辨力引起的不确定度 u_d

$$d = 0.0001\text{mg}$$

$$u_d = \frac{d/\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \times \sqrt{2} = 4.08 \times 10^{-5}\text{mg}$$

③偏载引起的不确定度 u_E

由于 UMx5 的称盘很小，因此在进行相邻两次测量时，当两次标准砝码与被检砝码之间的示值差 $\Delta I_1 \neq \Delta I_2$ ，可认为是由偏载造成的误差。

$$u_E = \frac{|\Delta I_1 - \Delta I_2|_{\max}}{2} = 0.003/2 = 0.0015\text{mg}$$

④灵敏度引起的不确定度 u_s

$$u_s = \frac{\sqrt{\left(\frac{\Delta m}{m_s}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I_s}{I_s}\right)^2}}$$

采用 E_2 等级砝码 10mg 进行灵敏度测定，实

际折算质量值 m_s 为 10mg，其标准不确定度 $u(m_s)$ =0.001mg。

假设衡量仪器在不同载荷下的重复性相同，

在被检砝码 500mg 上加载灵敏度砝码 10mg 时，经测量 10 次读数变化如表 2 所示：(mg)

引起的读数变化平均值 ΔI_s 为 10.0005mg，标

表 2

10.001	10.000	10.001	10.001	10.000	10.002	10.000	10.001	9.999	10.000
--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	-------	--------

准偏差 $u(\Delta I_s)$ 为 0.0008mg。

检定 500mg 时，当被检砝码与标准砝码的差值 Δm_c 为 0.008mg 时： $u_s = 1.05 \times 10^{-6} \text{mg}$ ；

检定 1mg 时，当被检砝码与标准砝码的差值 Δm_c 为 -0.052mg 时： $u_s = 6.82 \times 10^{-6} \text{mg}$

⑤与衡量仪器有关的合成标准不确定分量 u_{ba}

$$(500\text{mg}) u_{ba} = \sqrt{u_w^2 + u_s^2 + u_d^2 + u_E^2} = 0.0017\text{mg}$$

$$(1\text{mg}) u_{ba} = \sqrt{u_w^2 + u_s^2 + u_d^2 + u_E^2} = 0.0017\text{mg}$$

2.1.4 不确定度分量汇总表

①检定 500mg 砝码，如表 3 所示。

②检定 1mg 砝码，如表 4 所示。

表 3

标准不确定度分量 $u(x_i)$	不确定度来源	标准不确定度	c_i	$ c_i u(x_i)$
$u(m_{cr})$	标准砝码	0.0046mg	1	0.0046mg
u_b	空气浮力	$1.41 \times 10^{-4} \text{mg}$	1	$1.41 \times 10^{-4} \text{mg}$
u_{ba}	衡量仪器	0.0017mg	1	0.0017mg

表 5

标称值	不确定度来源(mg)			合成标准不确定度 (mg)	扩展不确定度 (mg)
	标准砝码	空气浮力	衡量仪器		
500mg	0.0046	1.4×10^{-4}	0.0017	0.0049	0.010
200mg	0.0031	5.6×10^{-5}	0.0017	0.0036	0.008
100mg	0.0026	2.8×10^{-5}	0.0017	0.0031	0.007
50mg	0.0021	1.4×10^{-5}	0.0017	0.0027	0.006
20mg	0.0019	5.6×10^{-6}	0.0017	0.0023	0.005
10mg	0.0010	2.8×10^{-6}	0.0017	0.0020	0.004
5mg	0.0012	1.4×10^{-6}	0.0017	0.0021	0.005
2mg	0.0010	5.6×10^{-7}	0.0017	0.0020	0.004
1mg	0.0010	2.8×10^{-7}	0.0017	0.0020	0.004

定的准确度等级内，任何一个质量标称值为 m_0 的单个砝码。其折算质量的扩展不确定度 $U (k=2)$ ，应不大于相应准确度等级的最大允许误差的三分之一，因此本装置在 1mg~500mg 范围内能满足 F_1 等级的检定要求，且最佳测量能力为 $U = (0.004 \sim 0.010) \text{mg}(k=2)$ 。

标准砝码：www.famakg.com/

(作者通讯地址：南京光华东街 3 号
 邮政编码：210007
 收稿日期：2012-04-24)

[责任编辑 殷志虹]

2.1.5 合成标准不确定度

E_2 等级砝码检定 F_1 等级砝码 500mg：

$$u_{500\text{mg}} = \sqrt{u^2(m_{cr}) + u_b^2 + u_{ba}^2} = 0.0049\text{mg}$$

E_2 等级砝码检定 F_1 等级砝码 1mg：

$$u_{1\text{mg}} = \sqrt{u^2(m_{cr}) + u_b^2 + u_{ba}^2} = 0.0020\text{mg}$$

2.1.6 扩展不确定度

$$U_{500\text{mg}} = 0.0049 \times 2 = 0.0098\text{mg} \approx 0.010\text{mg} (k=2)$$

$$U_{1\text{mg}} = 0.0020 \times 2 = 0.004\text{mg} (k=2)$$

2.2 同理计算 1mg~500mg 范围内每个质量标称值相应折算质量的扩展不确定度，如表 5 所示。

根据 99-2006《砝码》检定规程中规定：在规