

精密衡量法校准力学专用砝码及其测量不确定度评定

□罗曼¹ 陈露² 何成² 彭煜² 王昱² 陈航²

(1. 武汉市计量测试(检定)研究所; 2. 湖北省计量测试技术研究院)

【摘要】力学专用砝码的校准是确保其量值传递准确性的关键环节, 本文对力学专用砝码的分类和校准方法进行了分析, 详细给出了精密衡量法的校准过程。以0.05级活塞压力计专用砝码测量不确定度评定为例, 详细分析了测量不确定度的四大来源(重复性、标准砝码、空气浮力及衡量仪器), 并通过试验数据计算得出合成标准不确定度为0.54 mg, 扩展不确定度为1.1 mg ($k=2$), 相对扩展不确定度为0.0002%。研究表明, 精密衡量法可有效提升力学专用砝码校准的精度和可靠性。

【关键词】力学专用砝码; 质量计量; 精密衡量法; 测量不确定度

文献标识码: A 文章编号: 1003-1870 (2025) 04-0024-05

Calibration of Special Mechanical Weights by Precision Measurement Method and Evaluation of Measurement Uncertainty

【Abstract】The calibration of special mechanical weights is a key link to ensure the accuracy of their measurement transfer. In this paper, the classification and calibration methods of special mechanical weights are analyzed, and the calibration process of precision measurement method is detailed. Taking the measurement uncertainty evaluation of the special weight for the 0.05-class piston pressure gauge as an example, the four major sources of measurement uncertainty (repeatability, standard weight, air buoyancy and measuring instrument) are analyzed in detail, and through experimental data calculation, the resultant standard uncertainty is 0.54 mg, the expanded uncertainty is 1.1 mg ($k=2$), and the relative expanded uncertainty is 0.0002%. Studies have shown that the precision measurement method can effectively improve the accuracy and reliability of the calibration of special mechanical weights.

【Keywords】special mechanical weight; mass measurement; precision measurement method; measurement uncertainty

引言

力学专用砝码是与专用仪器设备配套使用的, 由质量单位导出的其他量值单位的砝码。它属于非标准砝码, 其结构和形状区别于标准砝码, 由设计确定。常见的力学专用砝码有力值专用砝码、压力专用砝码等, 一般与活塞压力计、力标准机、扭矩标

准机、材料试验机、张力计、扭矩测量仪、测功机等仪器配套使用^[1]。

力学专用砝码广泛应用于航空航天、工业检测和科学研究等领域, 其校准精度直接影响测量结果的可靠性。由于力学专用砝码与标准砝码无论在规格、形状、尺寸等方面均不同, 同时, 不同用途专

用砝码其溯源要求也各不相同。例如，力值砝码的校准不是执行JJG 2053-2016《质量计量器具》检定系统表，而是按JJG 2045-2007《力值（≤1MN）计量器具》检定系统表等进行校准，其量值溯源到质量、密度与重力加速度。国内针对力学专用砝码的溯源没有一个统一的标准。

随着测量技术的进步，力学专用砝码的校准需求日益复杂化，本文以0.05级活塞压力计专用砝码为对象，系统分析其校准过程及不确定度来源。

1 力学专用砝码分类

力学专用砝码种类很多，大致可以分为有标称值的专用砝码和无标称值的专用砝码。有标称值的专用砝码主要为牛值砝码、公斤力砝码等，无标称值的专用砝码是没有标称值的砝码^[2]。

专用砝码所配套使用的专用仪器设备的使用原理不同，其配套的专用砝码结构也不同。常见的结构包括：饼状、球状、圆柱体、骑码、钩码等。部分力学专用砝码如图1所示。

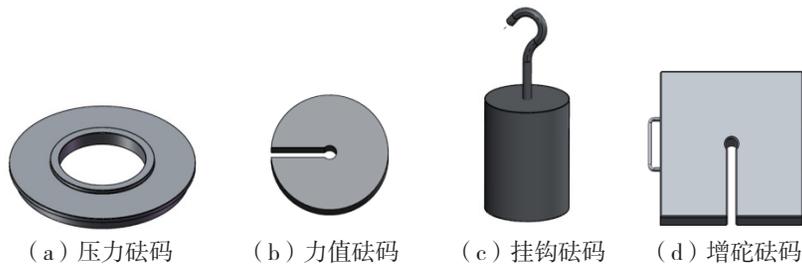


图1 部分力学专用砝码图

2 精密衡量法

精密衡量法即使用和JJG 99-2022《砝码》检定规程中标准砝码检定相同的校准方法^[3]。对于允差范围相当于F1等级及以上的专用砝码，采用单次替代法ABBA（E2等级2次、F1等级1次）或ABA（2次）进行校准（“A”代表参考标准，“B”代表被检砝码）。对于允差范围相当于F2等级、M1等级的专用砝码，采用单次替代法ABA（1次）进行校准，对M1等级的多个数量的专用砝码可以采用连续替代法（ $AB_1 \cdots B_n A$ ），其中n为砝码个数，n的最大取值不超过5。

2.1 标准砝码选取原则

由于力学专用砝码的标称值通常为非整数，而标准砝码的量值是离散的成组形式（一般为5、2、2、1），所以力学专用砝码大多无法与标准砝码的标称值完全对应，则在进行标准砝码和专用砝码比较测量时，需明确标准砝码的选取量值及数量。标准砝码选取需要注意以下两点：①尽量选择数量少的标准砝码，即砝码组合数量越少越好。②标准砝码的组合标称质量值应与被校专用砝码的标称值尽可能接近。例如，标称值为523.46g的专用砝码，标准砝码的组合可选择500g+20g+2g+1g或者500g+20g。

2.2 校准步骤

根据力学专用砝码的精度，选择采用ABBA或ABA模式进行校准。

2.2.1 采用ABBA模式进行校准

①将标准砝码放置到衡量仪器上进行测量，得到标准砝码示值 I_1 ；

②将被校力学专用砝码放置到衡量仪器上进行测量，得到被校专用砝码示值 I_2 、 I_3 ；

③再次将标准砝码放置到衡量仪器上进行测量，得到标准砝码示值 I_4 。

按照公式（1）计算质量差值 ΔI 。

$$\Delta I = \frac{I_2 - I_1 + I_3 - I_4}{2} (\text{ABBA}) / \Delta I = I_2 - \frac{I_1 + I_3}{2} (\text{ABA}) \quad (1)$$

2.2.2 采用 $AB_1 \cdots B_n A$ 模式进行校准

①将标准砝码放置到衡量仪器上进行测量，得到标准砝码示值 I_{t1} ；

②依次将被校专用砝码放置到衡量仪器上进行测量，得到被校力学专用砝码示值 $I_{t(i)}$ ；

③最后将标准砝码放置到衡量仪器上进行测量，得到标准砝码示值 I_{t2} 。

按照公式（2）计算质量差值 ΔI_i 。

$$\Delta I_i = I_{t(i)} - \frac{I_{t1} + I_{t2}}{2} \quad (2)$$

式中: $i=1,2,\dots,n$ 。通常, 专用砝码的个数不能超过5个 ($n \leq 5$)。

3 力学专用砝码测量结果不确定度分析

以0.05级活塞压力计专用砝码(标称值为0.05MPa)为例, 依据JJG 59-2022《液体活塞式压力计》检定规程得到活塞压力计专用砝码的标称质量值为510.11g(武汉重力加速度: $g=9.7937\text{m/s}^2$)^[4]。采用实际分度值为1mg的质量比较仪作为衡量仪器, 对活塞压力计专用砝码(以下简称专用砝码)进行测量不确定度评定^[5]。

采用精密衡量法(ABA)利用E2等级标准砝码(1mg至500g)对被校力学专用砝码进行测量。

3.1 测量模型

$$m=m_A+\Delta m \quad (3)$$

其中: $\Delta m = \Delta l \times f + (V_t - V_r) \times (\rho_a - \rho_0)$ 。

式中: m ——被校专用砝码的约定质量值;

m_A ——标准砝码的约定质量值;

Δm ——被校专用砝码与标准砝码的约定质量差值;

Δl ——被测专用砝码和参考砝码对应的衡量仪器示值误差;

f ——所用质量比较仪的标尺因子;

V_t ——被测专用砝码的体积;

V_r ——标准砝码的体积;

ρ_a ——实际空气密度;

ρ_0 —— 1.2mg/cm^3 。

根据上述比较法质量测量的数学模型, 可知砝码的质量测量结果有4个不确定度来源, 即测量重复性、参考砝码、空气浮力和衡量仪器。根据测量模型, 合成标准不确定度的计算公式:

$$u_c^2 = u_w^2(\overline{\Delta m_c}) + u^2(m_{cr}) + u_b^2(m_t) + u_{ba}^2 \quad (4)$$

3.2 不确定度来源

根据上述测量模型, 可知专用砝码的质量测量结果有4个不确定度来源, 即测量重复性、参考砝码、空气浮力、衡量仪器。

(1) 被校专用砝码重复性测量引入的标准不确定度 $u_w(\overline{\Delta m_c})$ (A类);

(2) 标准砝码的标准不确定度 $u(m_{cr})$ (B类);

(3) 空气浮力引入的标准不确定度 $u_b(m_t)$ (B类);

(4) 衡量仪器的标准不确定度 u_{ba} (B类)。

3.3 标准不确定度评定

3.3.1 被校专用砝码重复性测量引入的标准不确定度分量 $u_w(\overline{\Delta m_c})$

将被校专用砝码与E2等级标准砝码按单次替代法在质量比较仪上重复测量, 测量循环ABA。在重复性条件下, 连续测量得到的质量差值的算术平均值作为测量结果。以重复测量10次为例, 采用贝塞尔公式计算标准偏差, 数据见表1。

$$u_w(\overline{\Delta m_c}) = s(\overline{\Delta m_c}) = \frac{s(\Delta m_c)}{\sqrt{n}} \quad (5)$$

表1 重复性测量

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Δm_c (mg)	-37	-36	-35	-37	-37	-38	-37	-38	-38	-38

$$\overline{\Delta m_c} = -37\text{mg}$$

$$u_w(\overline{\Delta m_c}) = \frac{1.0395}{\sqrt{10}} = 0.3\text{mg}$$

3.3.2 标准砝码引入的标准不确定度分量 $u(m_{cr})$

$$u(m_{cr}) = \sqrt{\left(\frac{U}{k}\right)^2 + u_{inst}^2(m_{cr})} \quad (6)$$

式中:

u ——标准砝码的扩展不确定度;

k ——包含因子, 通常取2;

$u_{inst}(m_{cr})$ ——标准砝码质量的修正值周期变化引起的标准不确定度, 按极差法评估。

标准砝码检定证书中给出的扩展不确定度: $U=0.27\text{mg}$ 。

标准砝码质量的不稳定性引起的不确定度 $u_{inst}(m_{cr})$ 可以从对标准砝码多次检定之后的质量变化中估计出来。以下为历年标准砝码的质量变化数据, 见表2。

表2 历年标准砝码的质量变化数据

次数	1	2	3	4
质量变化 (mg)	0.31	0.31	0.30	0.30

因样本量较小, 结合该砝码的使用频率, 认为该砝码稳定性较好, 假定该砝码的质量不稳定性估计为均匀分布, 则:

$$u_{\text{inst}}(m_{cr}) = \frac{(X_{\text{max}} - X_{\text{min}})}{2\sqrt{3}} = \frac{0.01}{2\sqrt{3}} \text{mg} = 0.0\text{mg} \quad (7)$$

标准砝码引入的标准不确定度:

$$u(m_{cr}) = \sqrt{\left(\frac{0.27}{2}\right)^2 + 0^2} = 0.2\text{mg} \quad (8)$$

3.3.3 空气浮力引入的标准不确定度分量

依据本规范, 实际空气密度按约定空气密度计算, 约等于1.2mg/cm³。考虑到专用砝码等级属于低等级砝码 (相当于F2级), 和其他不确定度分量相比, 空气浮力引入的标准不确定度近似为0。

$$u_b(m_i) = 0.0\text{mg} \quad (9)$$

3.3.4 衡量仪器^[6]引入的标准不确定度分量

$$u_{ba} = \sqrt{u_s^2 + u_d^2 + u_e^2} \quad (10)$$

表3 测量数据

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量结果 (g)	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000

代入数据计算:

$$u_s^2 = (-37)^2 \times \left(\frac{0.013^2}{2000.02^2} + \frac{0^2}{2000.00^2} \right) \quad u_s = 0.0\text{mg} \quad (12)$$

3.3.4.2 衡量仪器分辨力引入的不确定度

$$u_d = \left(\frac{d}{\sqrt{3}}\right) \times \sqrt{2} = \left(\frac{1/2}{\sqrt{3}}\right) \times \sqrt{2} = 0.4\text{mg} \quad (13)$$

式中:

d ——衡量仪器的实际分度值。

3.3.4.3 衡量仪器偏载引入不确定度 (见表4)

表4 衡量仪器偏载测量数据

载荷的位置	测量值 (试验载荷500 g)
中间	500.000 g

式中:

u_s ——灵敏度引入标准不确定度;

u_d ——分辨力引入标准不确定度;

u_e ——偏载引入标准不确定度。

3.3.4.1 衡量仪器灵敏度引入不确定度分量

$$u_s^2 = (\overline{\Delta m_c})^2 \left(\frac{u^2(m_s)}{m_s^2} + \frac{u^2(\Delta I_s)}{\Delta I_s^2} \right) \quad (11)$$

式中:

Δm_c ——被校专用砝码与标准砝码之间的平均质量差;

m_s ——灵敏度砝码标称值;

$u(m_s)$ ——灵敏度砝码的标准不确定度;

ΔI_s ——灵敏度砝码引起的衡量仪器指示值的改变;

$u(\Delta I_s)$ —— ΔI_s 的不确定度。

用E2等级实际质量为2.00002g的砝码, 在质量比较仪上连续测量10次, 测量数据如下, 见表3。

续表

载荷的位置	测量值 (试验载荷500 g)
左前方	500.000 g
左后方	500.000 g
右后方	500.000 g
右前方	500.000 g

$$u_e = \frac{\frac{d_1 \times D}{d_2}}{2 \times \sqrt{3}} = 0.0 \text{mg} \quad (14)$$

表5 衡量仪器引入的标准不确定度分量表

u_s	u_d	u_e
0.0 mg	0.4 mg	0.0 mg
衡量仪器引入的标准不确定度: $u_{ba} = 0.4\text{mg}$		

3.4 标准不确定度分量（见表5）。

3.5 测量过程引入的标准不确定度分量见表6。

表6 标准不确定度分量表

序号	标准不确定度分量 u_i	标准不确定度分量值 (mg)
1	被校专用砝码重复性测量引入的标准不确定度分量 $u_w(\overline{\Delta m_c})$ (A类)	0.3
2	标准砝码引入的标准不确定度 $u(m_{cr})$ (B类)	0.2
3	空气浮力引入的标准不确定度分量 $u_b(m_t)$ (B类)	0.0
4	衡量仪器灵敏度引入不确定度分量 u_{ba} (B类)	0.4

3.6 合成标准不确定度 $u_c(m)$

上述4项标准不确定度分量相互独立，互不相关。

$$u_c = \sqrt{u_w^2(\overline{\Delta m_c}) + u^2(m_{cr}) + u_b^2(m_t) + u_{ba}^2} = 0.54 \text{ mg} \quad (15)$$

3.7 扩展不确定度 $U(m)$

取包含因子 $k=2$

$$U(m) = k u_c(m) = 1.1 \text{ mg} \quad (16)$$

3.8 相对扩展不确定度

$$u_{rel}(m) = \frac{u_c(m)}{m} = 0.0002\% \quad (17)$$

4 结语

对于没有明确标称值的专用砝码，则标称质量需要依照所配套使用的仪器技术规范等相关技术文件的规定。标称值以质量单位的导出单位表示的，则需根据相关数学公式转换成质量值，应用精密衡量法校准力学专用砝码具有可行性。本文采用精密衡量法对力学专用砝码进行校准，以0.05级活塞压力计专用砝码为例，详细分析了测量不确定度的来源及评定过程。结果表明：力学专用砝码测量不确定度主要来源于测量数据的重复性、标准砝码引入不确定度和衡量仪器引入不确定度，而空气浮力的影响可忽略。

当前，国内主要使用精密衡量法和直接称量法来对力学专用砝码进行校准。力学专用砝码的校准不仅涉及质量测量，还涉及力值的传递，尤其是重力加速度的影响。随着国家基准重力点位的建设和重力加速度量传体系的完善，力值砝码的校准将更加准确和可靠。建议未来制定统一的校准规范，以

保证量值溯源的准确性和可靠性。

参考文献

- [1] JJF 1229-2021 质量密度计量名词术语及定义[S]. 北京: 中国计量出版社, 2021.
- [2] 张莉莉, 刘昆, 孙鹏飞. 关于专用砝码的测量方法探讨[J]. 衡器, 2020, 49(01): 17-19+21.
- [3] JJG 99-2022 砝码检定规程[S]. 北京: 中国计量出版社, 2022.
- [4] JJG 59-2022 液体活塞式压力计检定规程[S]. 北京: 中国计量出版社, 2022.
- [5] JJF 1059.1-2012 测量不确定度评定与表示[S]. 北京: 中国计量出版社, 2012.
- [6] JJF 1847-2020 电子天平校准规范[S]. 北京: 中国计量出版社, 2020.

作者简介

罗曼, 女, 大学本科, 测控技术与仪器专业, 一级注册计量师。研究方向: 计量管理及计量检测。