

# 力值砝码计量校准与其测量不确定度研究

□王昊<sup>1</sup> 吴书清<sup>2</sup> 曾利民<sup>1,3</sup> 曹灏<sup>1</sup>

(1. 浙江省计量科学研究院 2. 中国计量科学研究院  
3. 浙江省声学振动精密测量技术研究重点实验室)

**【摘要】**力学计量中静重式力标准机、静重式扭矩标准机或活塞式压力计等都建立在专用砝码载体上，是基于重力作用由质量单位导出的其他物理量单位（如力值“牛顿”、扭矩“牛米”、压力“帕”）。文章分析标准测力杠杆中力值砝码质量标称值如何按使用地重力加速度、空气密度进行计算与其测量不确定评定。这种方法同样适用于扭矩扳子检定仪检定装置、活塞式压力计等计量标准中物理量对应专用砝码计量校准。只有确保力值砝码计量准确、可靠，才能提升力值、扭矩、压力、硬度等力学计量标准的准确性。

**【关键词】**力值砝码；质量计量；重力加速度；空气密度；测量不确定度

文献标识码：B 文章编号：1003-1870（2023）03-0017-05

## 引言

基于重力作用单独使用，或与静重式、杠杆式、液压式力标准机，或与静重式扭矩标准机和活塞式压力计等配套使用的专用砝码统称力值砝码。影响力值砝码标称质量的因素，一是重力加速度，如不同纬度最北省会哈尔滨、最南省会海口重力加速度相差0.21%。又如海拔高度不同东部青岛、西部拉萨两地重力加速度相差0.19%。二是空气密度，青岛、拉萨两地标称值相同力值砝码受空气密度影响其质量相差0.06%，从而力学计量中研究重力加速度、空气密度越来越重要<sup>[1][4][5][10]</sup>。

## 1 力值砝码分类与标称质量计算

砝码分为准确度等级 $E_1$ 、 $E_2$ 、 $F_1$ 、 $F_2$ 、 $M_1$ 、 $M_{12}$ 、 $M_2$ 、 $M_{23}$ 、 $M_3$ 砝码（又称标准砝码）与专用砝码。专用砝码与静重式力标准机、扭矩标准机或活塞式压力计等配套使用，是由质量单位导出的其它物理量

单位，分为检定标准轨道衡的专用砝码、力值专用砝码、压力专用砝码、扭矩专用砝码等<sup>[3]</sup>。

### 1.1 力值砝码分类

力值砝码分为流动使用、站位（固定）使用。流动使用力值砝码通常单独使用或与标准测力杠杆、扭矩仪检定装置等配套使用，要考虑使用地区重力加速度变化，如10N质量 $MPE \pm 0.1\%$ 等级力值砝码，在浙江长兴要求约定质量范围1020.15 ~ 1022.19g，在浙江苍南要求约定质量范围1020.45 ~ 1002.49g，如果约定质量控制在1020.45 ~ 1022.19g之间则在全省能通用。站位（固定）使用力值砝码通常准确度较高，如静重式力标准机、静重式扭矩标准机、活塞压力计标准装置中力值砝码。其准确度等级如表1所示，力值砝码最大允许误差不在表1中按相关技术标准执行<sup>[4]</sup>。

表1 力值砝码准确度等级

力值砝码分类	质量最大允许误差		
流动使用	MPE ± 0.1%	MPE ± 0.05% (0.06%)	MPE ± 0.03%
	MPE ± 0.02%	MPE ± 0.01%	/
站位 (固定) 使用	MPE ± 0.1%	MPE ± 0.05% (0.06%)	MPE ± 0.03%
	MPE ± 0.02%	MPE ± 0.01%	MPE ± 0.005% (0.006%)
	MPE ± 0.003%	MPE ± 0.002%	MPE ± 0.001%

1.2 力值砝码标称质量计算

单独使用或静重式力标准机中配套的力值砝码标称质量用当地重力加速度、空气密度，取  $T=1$  按照式 (1) 计算<sup>[1][2][7]</sup>。同样，液压式或杠杆式力标准机、静重式扭矩标准机、活塞式压力计等中配套力值砝码真空质量，也用当地重力加速度、空气密度按式 (1) 计算<sup>[2][4][5]</sup>，但  $T$  为放大比或转换因子。由于力值砝码准确度用相对误差表示，其符合性按照各相关标准中技术指标进行评判，而标准砝码准确度等级用绝对误差表示，因而同级别力值砝码可能是不同准确度等级质量砝码。

$$m = \frac{F}{g_s T (1 - \rho_s / \rho_l)} \quad (1)$$

式中： $m$  为力值砝码标称质量（真空质量），单位：kg；

$F$  为力值砝码重力经放大后的作用力或其他物理量（如扭矩等），单位：N（如N.m 等）；

$T$  为放大比或转换因子（如力臂长度等），单

位：1（如m 等）；

$g_s$  为使用地重力加速度特征值，单位：m/s<sup>2</sup>；

$\rho_s$  为使用地年平均空气密度特征值，单位：kg/m<sup>3</sup>；

$\rho_l$  为力值砝码密度，单位：kg/m<sup>3</sup>。

1.2.1 使用地点（区）的重力加速度的确定

“2000 国家重力基准”基于IGSN71 国际重力网，由国家测绘地理信息局、原总参测绘局和中国地震局等共同建立，精度优于 ± 0.01 mGal（10<sup>-5</sup>m/s<sup>2</sup>）。由于潮汐作用引起的误差在 ± 0.3mGal（10<sup>-5</sup>m/s<sup>2</sup>），因而能满足准确度等级质量MPE ± 0.001% 力值砝码对重力加速度准确度 ± 1 mGal（10<sup>-5</sup>m/s<sup>2</sup>）的要求，重力加速度既可用相对法确定也可用绝对法测量确定<sup>[8]</sup>。相关国家技术标准中有的沿用数据还是基于波茨坦或维也纳国际重力网测量重力加速度，或还是按式（2）进行计算重力加速度。部分城市重力测量点位、重力加速度数据如表2 所示<sup>[4]</sup>。

表2 部分使用地区城市重力加速度数据

使用地区				重力加速度 (m/s <sup>2</sup> )		
重力点位		北纬	海拔高度	标准中沿用数据	按式 (3) 计算	实测值
哈尔滨	省测绘局	45.8 <sup>0</sup>	145m	9.8066	9.8065	9.80638
北京	西郊机场	40.0 <sup>0</sup>	50m	9.8015	9.8014	9.80132
海口	省计量院	20.0 <sup>0</sup>	8m	9.7863	9.7864	9.78640
青岛	天文台	36.1 <sup>0</sup>	79m	9.7985	9.7981	9.79823
西安	大地原点	34.0 <sup>0</sup>	630m	9.7944	9.7946	9.79412
拉萨	自治区地震局	29.6 <sup>0</sup>	3652m	9.7799	9.7818	9.78103

表2中拉萨重力加速度相关标准中沿用数据与实测值相差约0.012%，另外相关技术标准中重力加速度沿用数据与在浙江省计量院实测值相差近0.002%，在福建省计量院则相差更大达0.009%，都不能保证0.01级静重式力标准机技术要求或0.01级及以上活塞式压力计建标技术要求。鉴于国家基准重力点位已在国家计量院昌平基地建成，待省级标准重力点位建成后可用相对法测量重力加速度<sup>[7]</sup>，测量准确度达±1mGal（10<sup>-5</sup>m/s<sup>2</sup>）。流动使用力值砝码对应的重力加速度范围及准确度等级较低（如质量MPE±0.02%及以下）固定使用力值砝码对应的重力加速度准确度要求±10mGal（10<sup>-5</sup>m/s<sup>2</sup>）或更低，可用世界气象组织提供的重力场公式（3）进行计算，原因是世界气象组织的计算公式简单，并经公式变换与地球物理和大地测量联合会提供的重力场计算公式完全一致<sup>[4][5][6]</sup>。

$$g = \frac{9.80665(1-0.00265\cos 2\Phi)}{1+2H/R} \quad (2)$$

$$g = g_{\phi} - 0.000003086H + 0.000001118(H - \bar{h}) \quad (3)$$

式中： $g$ 为使用地重力加速度，单位：m/s<sup>2</sup>；

$R=6371000\text{m}$ ，为地球半径；

$H$ 为使用地海拔高度（或当地气象站海拔高度），单位：m；

$g_{\phi}=9.80620 [1-0.0026442\cos 2\phi + 0.0000058(\cos 2\phi)^2]$ ，单位：m/s<sup>2</sup>； $\Phi$ 为力值砝码使用地纬度，单位：0；

$\bar{h}$ 为使用地区周围150km的平均海拔高度，单位：m。

### 1.2.2 使用地点（区）平均空气密度的确定

空气密度与温度、压力与湿度相关，可按式（4）计算。空气密度随时间与空间变化<sup>[9][10]</sup>。使用地区室外空气密度变化大，室内由于温度、湿度相对稳定，空气密度变化要小些。

$$\rho_a = \frac{0.34848P - 0.009(rh) \cdot \exp(0.061t)}{273.15+t} \quad (4)$$

式中： $P$ 为使用地大气压（或当地气象站年平均大气压），单位：hPa；

$t$ 为使用地环境温度（或当地气象站年平均气温），单位：℃；

$rh$ 为使用环境相对湿度（或当地气象站年平均

相对湿度），单位：%；

一方面固定使用力值砝码可用环境温度或当地年平均温度 $t$ 、环境相对湿度或当地年平均相对湿度 $rh$ 、当地年平均大气压 $P$ 按式（4）计算使用地的年平均空气密度 $\rho_a$ ，如东部地区年平均空气密度特征值取约定空气密度，即 $\rho_s = 1.2\text{kg/m}^3$ ，力值砝码材质密度 $\rho_t = 7800\text{kg/m}^3$ ，使用地平均空气密度 $\rho_a$ 计算值与约定空气密度 $\rho_0$ 相差不超过±10%时，其相对影响量±0.0015%，质量MPE±0.01%力值砝码可不考虑空气浮力影响。使用地点平均空气密度 $\rho_a$ 计算值与约定空气密度 $\rho_0$ 相差不超过±5%时，其相对影响量±0.0008%，质量MPE±0.005%力值砝码可不考虑空气浮力影响。使用地点平均空气密度 $\rho_a$ 计算值与约定空气密度 $\rho_0$ 相差不超过±2.5%时，其相对影响量±0.0004%，质量MPE±0.003%等级力值砝码可不考虑空气浮力影响。否则，如质量MPE±0.002%力值砝码可用浮力法或按最新空气密度CIPM-2007计算公式测量使用地平均空气密度 $\rho_a$ ，并计算其特征值 $\rho_s$ 。另一方面流动使用力值砝码可以简化，用海拔高度按式（5）计算室内年平均空气密度<sup>[1][9]</sup>，如使用地按（5）计算年平均空气密度结果 $\rho_a$ 与年平均空气密度特征值 $\rho_s$ 相差不超过±10%时可不考虑空气密度影响，否则按式（4）计算使用地年平均空气密度 $\rho_a$ 为平均空气密度特征值 $\rho_s$ 。

$$\rho_a = 1.2 \exp(-0.000116H) \quad (5)$$

## 2 力值砝码质量计量校准

首先将标称质量（真空质量）按式（6）换算成约定质量。再将力值砝码最大相对允许误差换算为最大绝对允许误差，参照砝码检定规程确定力值砝码相应等级校准。由于力值砝码校准不存在对应的标准质量砝码，只能通过标准质量砝码组合成与力值砝码的标称质量近似的约定质量进行计量校准，对高级别（相当于E或F等级）力值砝码应采用双次替代法ABBA进行校准，对低级别（相当于M等级）力值砝码可采用连续替代法AB<sub>1</sub>…B<sub>n</sub>A或者单次替代法ABA进行校准，力值砝码的约定质量计量按式（7）计算<sup>[3]</sup>。

$$m_c = \frac{(1-\rho_0/\rho_t)m_0}{0.99985} \quad (6)$$

$$m_{ct} = m_{cr} + \Delta I \frac{m_{cs}}{\Delta I_s} + \delta_a + \delta_M \quad (7)$$

式中： $m_0$  为力值砝码某一物理量对应的标称质量（真空质量计算值），单位：kg；

$m_c$  为力值砝码某一物理量对应的约定质量，单位：kg；

$m_{ct}$  为力值砝码约定质量测量值，单位：kg；

$m_{cr}$  与力值砝码质量近似的标准砝码组合的约定质量之和，单位：kg；

$\Delta I = I_{r1} - (I_{r1} + I_{r2})/2$ ，衡量仪器读数的约定质量差值，单位：kg；

$m_{cs}$  衡量仪器灵敏度所添加标准小砝码的约定质量，单位：kg；

$\Delta I_s = (I_{r2+ms} + I_{r2+ms} - I_{r1} - I_{r1})/2$ ，灵敏度标准小砝码引起的衡量仪器读数变化量；

由于力值砝码空气浮力的修正量  $\delta_a$ 、力值砝码的磁性影响量  $\delta_M$  通常比较小，测量中可以忽略，将其放入不确定度评定中。力值砝码质量计量校准项目如表3所示<sup>[3]</sup>。

表3 力值砝码校准项目

校准项目		密度或体积	表面粗糙度	磁化率	极化强度	约定质量
流动使用	首次	*	√	-	+	+
	后续	-	√	-	*	+
固定使用	空气浮力不修正	首次	*	√	-	+
		后续	-	√	-	*
	空气浮力修正	首次	+	√	+	+
		后续	*	√	*	*
备注		- 不进行校准；+ 要求校准；* 有怀疑要求校准；√ 目测检查				

### 3 力值砝码约定质量校准测量结果不确定度分析

以0.1级标准测力杠杆为例，使用地杭州重力加速度 $9.7934\text{m/s}^2$ ，年平均空气密度 $1.2\text{kg/m}^3$ ，力值砝码密度 $7800\text{kg/m}^3$ ，力值砝码约定质量计量校准标准不确定度分量如表4所示。

#### (1) 质量计量测量不确定度

力值砝码质量计量是对力值砝码质量的调整和准确度等级确认，影响因素包括衡量过程衡量仪器重复性、标准砝码不确定度、衡量仪器不确定度（灵敏度、分辨力、非线性与偏载等）、空气浮力修正、磁性影响不确定度等。力值砝码质量计量各标准不确定度分量可以A类分项评定；也可用力值砝码质量最大允许误差，假设三角分布B类评定。

#### (2) 重力加速度测量不确定度

重力加速度用相对重力仪或绝对重力仪测量，对应最大误差 $1\text{mGal}$  ( $10^{-5}\text{m/s}^2$ )。用世界气象组织重力场公式(3)计算重力加速度，对应最大误差 $\pm 10\text{mGal}$  ( $10^{-5}\text{m/s}^2$ )；按均匀分布B类评定。

#### (3) 力值砝码密度测量不确定度

力值砝码材料密度  $\rho_t$  可通过实测获得，但通常查阅相关资料获得，如钢材  $\rho_t = 7800\text{kg/m}^3$ ，假设最大误差  $\Delta_{\rho_t}$ ，按均匀分布B类评定。

#### (4) 空气密度变化的测量不确定度

使用地空气密度与温度、压力与湿度相关，随时间与空间变化。假设计量校准时实际空气密度与年平均空气密度最大相差  $\Delta_{\rho_a}$ ，按均匀分布B类评定。

表4 标准测力杠杆中约定质量标准不确定度分量汇总

不确定度来源	影响量	包含因子	标准不确定度分量 (%)
力值砝码约定质量	$\delta_m = \pm 0.02\%$	三角分布, $k = \sqrt{6}$	$u_{r1} = \frac{\delta_m}{k} = 0.0082$
重力加速度	$\Delta_g = \pm 0.0001 m/s^2$	均匀分布, $k = \sqrt{3}$	$u_{r2} = \frac{\Delta_g}{g_s k} = 0.0006$
力值砝码材料密度	$\Delta_{\rho t} = \pm 100 kg/m^3$	均匀分布, $k = \sqrt{3}$	$u_{r3} = \frac{\rho_a \cdot \Delta_{\rho t}}{(\rho_t - \rho_a) \rho_t k} = 0.0001$
空气密度变化	$\Delta_{\rho a} = \pm 0.12 kg/m^3$	均匀分布, $k = \sqrt{3}$	$u_{r4} = \frac{\Delta_{\rho a}}{(\rho_t - \rho_a) k} = 0.0009$

标准测力杠杆中力值砝码约定质量计量合成标准测量不确定度  $u_{r,c} = \sqrt{u_{r1}^2 + u_{r2}^2 + u_{r3}^2 + u_{r4}^2} = 0.0083\%$ , 扩展测量不确定度  $U_r = 0.017\%$  ( $k=2$ )。

#### 4 结束语

力值砝码表征的物理量是其质量导出量, 由于质量是可靠的中间量, 因而提高使用地重力加速度、平均空气密度准确度可进一步提升力学计量水平。由于力值砝码校准没有对应的标准砝码, 因而在测量不确定度评定时应考虑衡量仪器非线性的影响。由于重力加速度、空气密度的确定方法不相同, 一方面建议在国家基准重力点位基础上加快省级标准重力点位建设, 并对相关国家技术标准中重力加速度数据进行厘定; 另一方面建议在静重式测力机、静重式扭矩机、活塞压力计等国家基准及高准确度力值砝码(质量级别及优于  $MPE \pm 0.003\%$ ) 计量标准开展空气密度监测, 并进一步研究重力加速度和空气密度确定方法, 以提高我国力学计量水平。

#### 参考文献

[1] GB/T 36412-2018. 力标准机的校验与校准

[S].

[2] JJG 734 — 2001. 力标准机 [S].

[3] JJG 99 — 2022. 砝码 [S].

[4] JJG 59 — 2022. 活塞式压力计 [S].

[5] JJG 769 — 2009. 扭矩标准机 [S].

[6] JJG 808 — 2014. 标准测力杠杆 [S].

[7] 张智敏, 张跃等. 全自动1MN 静重式力标准机[J]. 《计量学报》. 2008年: 第1期65-68.

[8] 吴书清, 吉望西等. 绝对重力仪数据计算及不确定度评定方法[J]. 《计量学报》. 2009年: 第3期212-215.

[9] 王肖磊, 王健等. 砝码质量测量中空气密度测量装置的研究[J]. 《计量学报》. 2011年: 第1期40-43.

[10] 国家计量总局教育处教材编写组. 质量计量基础[M]. 北京: 技术标准出版社. 1982.

#### 作者简介

王昊(1969-), 男, 汉族, 浙江金华人, 工程师, 主要从事力值硬度计量研究。