



中华人民共和国国家计量技术规范

JJF 2166—2024

电子固体密度天平校准规范

Calibration Specification for Electronic Solid Density Balances



2024-10-19 发布

2025-04-19 实施

国家市场监督管理总局 发布

电子固体密度天平校准规范

Calibration Specification for
Electronic Solid Density Balances

JJF 2166—2024

归口单位：全国质量密度计量技术委员会

主要起草单位：浙江省计量科学研究院

江苏省计量科学研究院

中国计量科学研究院

参加起草单位：北京市计量检测科学研究院

常州幸运电子有限公司

河南省计量科学研究院

吉林省计量科学研究院

本规范委托全国质量密度计量技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

葛 锐（浙江省计量科学研究院）

刘 炜（江苏省计量科学研究院）

许常红（中国计量科学研究院）

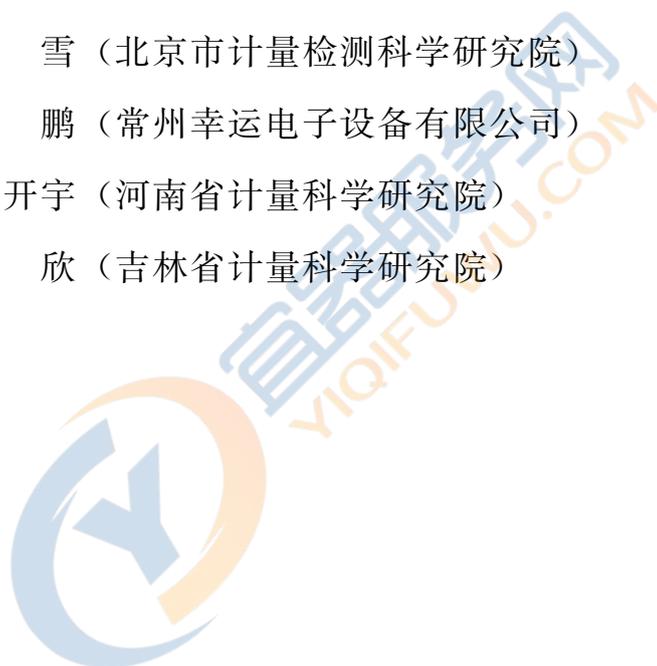
参加起草人：

陈 雪（北京市计量检测科学研究院）

张 鹏（常州幸运电子设备有限公司）

何开宇（河南省计量科学研究院）

富 欣（吉林省计量科学研究院）



目 录

引言	(III)
1 范围	(1)
2 引用文件	(1)
3 术语和计量单位	(1)
3.1 术语	(1)
3.2 计量单位	(1)
4 概述	(1)
5 计量特性	(2)
5.1 称量示值误差	(2)
5.2 称量重复性	(2)
5.3 称量偏载误差	(2)
5.4 密度示值误差	(2)
5.5 介质中重复性	(2)
6 校准条件	(2)
6.1 环境条件	(2)
6.2 测量标准及其他设备	(3)
6.2.1 砝码	(3)
6.2.2 固体密度标准样块	(3)
6.2.3 校准用介质	(3)
6.2.4 其他有关测量用计量器具	(3)
7 校准项目和校准方法	(3)
7.1 校准项目	(3)
7.2 校准方法	(3)
7.2.1 校准范围	(3)
7.2.2 校准前的准备	(4)
7.2.3 称量示值误差	(4)
7.2.4 称量重复性	(4)
7.2.5 称量偏载误差	(4)
7.2.6 密度示值误差	(5)
7.2.7 介质中的重复性测量	(6)
8 校准结果	(6)
9 复校时间间隔	(6)
附录 A 电子固体密度天平校准记录 (参考)	(7)
A.1 称量示值误差	(7)
A.2 称量重复性	(7)

A.3	称量偏载误差	(8)
A.4	密度示值误差及介质中重复性测量	(8)
附录 B	电子固体密度天平校准证书内页格式 (参考)	(9)
B.1	称量示值误差校准结果	(9)
B.2	密度示值误差校准结果	(9)
附录 C	电子固体密度天平校准结果不确定度评定方法及示例	(10)
C.1	电子固体密度天平校准概述	(10)
C.2	称量示值误差测量结果的不确定度评定	(10)
C.3	密度示值误差测量结果的不确定度评定	(11)
C.4	称量示值误差测量结果不确定度评定示例	(12)
C.5	密度示值误差测量结果不确定度评定示例	(15)



引 言

JJF 1071《国家计量校准规范编写规则》、JJF 1001《通用计量术语及定义》、JJF 1059.1《测量不确定度评定与表示》共同构成支撑本规范指定工作的基础性系列规范。

本校准规范给出了电子固体密度天平的校准条件、校准项目和校准方法及不确定度评定方法及示例。

本规范为首次发布。



电子固体密度天平校准规范

1 范围

本校准规范适用于电子固体密度天平（以下简称密度天平）的校准。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

JJG 99 砝码

JJG 1036 电子天平

JJF 1001 通用计量术语及定义

JJF 1059.1 测量不确定度评定与表示

JJF 1229 质量密度计量名词术语及定义

JJF 1847 电子天平校准规范

GB/T 6682 分析实验室用水规格和试验方法

凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本规范；凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本规范。

3 术语和计量单位

3.1 术语

3.1.1 固体密度 solid density

ρ

固体单位体积 V 中所含物质的质量 m ， $\rho = \frac{m}{V}$ 。

3.1.2 固体密度标准样块 solid density standard sample

具有稳定的物理化学性质，赋予了密度值或同时赋予了质量值和体积值，用于校准固体密度天平密度示值的实物量具。

3.2 计量单位

使用的单位：毫克（mg）、克（g）、千克（kg），克每立方厘米（g/cm³）、千克每立方米（kg/m³）。

4 概述

密度天平的测量原理是通过电子天平分别测量固体在空气中和已知密度值的液体介质（如：纯水）中的质量值，基于阿基米德定律计算被测固体的密度值。

电子固体密度天平主要由电子天平、托盘、水槽（水桶）、密度架、吊篮和支架等几部分组成，有上置式和下挂式两种结构，如图 1 和图 2 所示。

5 计量特性

5.1 称量示值误差

质量称量示值与加载砝码的质量参考值之差。

5.2 称量重复性

质量进行重复测量所得示值间的一致程度。

5.3 称量偏载误差

偏离中心点的质量示值与中心点质量示值之差。

5.4 密度示值误差

密度测量示值与相应密度标准样块的参考值之差。

5.5 介质中的重复性

固体密度标准样块在介质中重复测量所得示值间的一致程度。

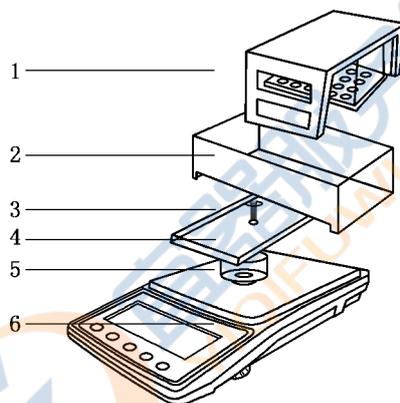


图1 上置式电子固体密度天平示意图

1—密度架；2—水槽；3—安装孔；4—托盘；5—衔接套；6—电子天平

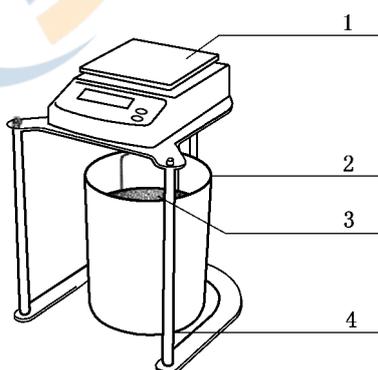


图2 下挂式电子固体密度天平示意图

1—电子天平；2—水桶；3—吊篮；4—支架

6 校准条件

6.1 环境条件

校准应在稳定的环境下进行，应满足如下要求：

a) 环境温度： $(20 \pm 5) ^\circ\text{C}$ ，校准期间变化不大于 $2 ^\circ\text{C}$ ；

- b) 相对湿度：30%~85%，校准期间变化不大于 15%；
- c) 液温与室温之差的绝对值不大于 2℃；
- d) 其他条件：校准时不得有影响校准结果的干扰源。

6.2 测量标准及其他设备

6.2.1 砝码

采用砝码进行密度天平质量称量示值误差校准，砝码应符合 JJG 99 的计量要求，其准确度等级为 F_1 等级或以上等级，砝码的选择应满足表 1 的要求。

表 1 砝码的准确度等级与实际分度数关系表

实际分度数(Max/d)	砝码准确度等级
$1 \times 10^6 < Max/d$	E_2 等级或以上等级
$Max/d \leq 1 \times 10^6$	F_1 等级或以上等级
Max 为密度天平质量的最大称量, d 为密度天平的实际分度值。	

6.2.2 固体密度标准样块

采用单只固体密度标准样块，如材质为不锈钢、铝合金、石英玻璃和聚丙烯树脂等的固体密度标准样块进行密度示值误差测量。固体密度标准样块具有包含密度值，或同时包含质量值和体积值的有效溯源证书，其密度值的扩展不确定度应不大于 0.002 g/cm^3 ($k=2$)。固体密度标准样块的质量应满足表 2 的要求。

表 2 固体密度标准样块质量要求

标准密度样块材质	质量/最大称量
聚丙烯树脂、石英玻璃	$>1/32 \sim 1/8$
不锈钢、黄铜、铝合金	$>1/8 \sim 1/2$

注：当砝码用作固体密度标准样块时，不得用于其他目的。

6.2.3 校准用介质

采用纯水作为介质，其应符合 GB/T 6682《分析实验室用水规格和试验方法》要求的三级及以上蒸馏水或去离子水。

6.2.4 其他有关测量用计量器具

- a) 最大允许误差不大于 $\pm 0.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 的温度计；
- b) 扩展不确定度不大于 5% 的湿度计。

7 校准项目和校准方法

7.1 校准项目

- a) 称量示值误差；
- b) 密度示值误差。

7.2 校准方法

7.2.1 校准范围

- a) 质量：校准范围为密度天平的空载至最大称量；
- b) 密度：校准范围选择密度标准样块提供的测量点。

7.2.2 校准前的准备

- a) 调整密度天平水平；
- b) 密度天平通电、开机、预热；
- c) 校正密度天平。

7.2.3 称量示值误差

应在称量范围内均匀地选择测量点，测量点不少于 5 点。测量时，应从零载荷开始加载直至密度天平的最大称量，每次加载完成后待显示稳定记录密度天平示值，称量示值误差用公式 (1) 计算。

$$E = I - L \quad (1)$$

式中：

- E —— 称量示值误差；
 I —— 密度天平的质量示值；
 L —— 标准砝码参考质量值 m_{ref} 。

7.2.4 称量重复性

7.2.4.1 重复性测量步骤如下：

- a) 选择接近 50%~100% 最大称量的单个砝码，测量次数不少于 10 次；
- b) 测量中每次加载前可以置零；
- c) 如具有自动置零或零点跟踪装置，使其处于运行模式；
- d) 加载所选砝码放至在密度天平的称盘上，待显示稳定后读取示值并记录。

7.2.4.2 重复性以标准偏差表示，按照公式 (2) 计算。

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (I_i - \bar{I})^2}{n - 1}} \quad (2)$$

式中：

- s —— 标准偏差；
 I_i —— 第 i 次称量示值；
 \bar{I} —— n 次称量示值的平均值；
 n —— 重复测量次数。

7.2.5 称量偏载误差

a) 进行偏载误差测量时，按照秤盘的形状，将载荷加放在秤盘中心距离边缘的 1/2 处，位置如图 3 所示；

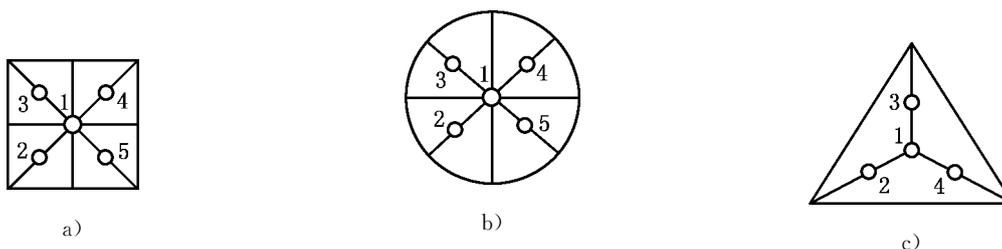


图 3 载荷位置示意图

- b) 选择试验载荷约为 1/3 最大秤量的单个砝码；
c) 偏载误差按照公式 (3) 计算。

$$\delta I_{\text{ecc}i} = I_{L_i} - I_{L1} \quad (3)$$

式中：

- $\delta I_{\text{ecc}i}$ —— 称量偏载误差；
 I_{L_i} —— 位置 i 的称量示值；
 I_{L1} —— 中心位置的称量示值。

7.2.6 密度示值误差

在配套的容器中注入纯水，首先密度标准样块在空气中进行测量，随后将该密度标准样块放入纯水中测量，在密度天平上读取密度显示示值，密度示值误差为密度示值与密度标准样块参考值之差，按照公式 (4) 计算。

$$E_{\rho} = \rho_t - \rho_r \quad (4)$$

式中：

- E_{ρ} —— 密度示值误差；
 ρ_t —— 密度示值；
 ρ_r —— 密度标准样块参考值。

注：密度标准样块加放到纯水中时，应确保密度标准样块、吊篮及其附件完全浸没于纯水中，并且同时避免纯水从容器中溢出。

纯水温度不在 20 °C 时，应对密度标准样块的参考值进行温度修正。体膨胀系数见表 3，温度修正按照公式 (5) 计算。

表 3 固体密度标准样块体膨胀系数表

标准密度样块材质	体膨胀系数/°C ⁻¹
不锈钢	50×10^{-6}
JF1 不锈钢	35×10^{-6}
石英玻璃	15×10^{-7}
黄铜	53×10^{-6}
聚丙烯树脂	24×10^{-5}
铅合金	82×10^{-6}

$$\rho_r = \frac{\rho(t_{\text{ref}})}{1 + \gamma(t_{\text{meas}} - t_{\text{ref}})} \quad (5)$$

式中：

- $\rho(t_{\text{ref}})$ —— 参考温度 20 °C 的标准样块密度；
 γ —— 固体密度标准样块的体膨胀系数，°C⁻¹；
 t_{meas} —— 纯水的温度，°C；
 t_{ref} —— 参考温度，20 °C。

7.2.7 介质中的重复性测量

介质中的重复性测量可以与密度示值误差测量同时进行。在密度示值误差测量过程中，用密度标准样块在空气中进行测量后，在该密度标准样块始终保持在纯水中的情况下重复进行3次测量，分别记录密度天平的显示值。介质中的重复性测量值为密度天平对纯水中密度标准样块进行测量的最大值与最小值之差，按照公式（6）计算。

$$\delta_I = I_{\max} - I_{\min} \quad (6)$$

式中：

δ_I ——介质中质量测量重复性；

I_{\max} ——介质中质量测量最大值；

I_{\min} ——介质中质量测量最小值。

8 校准结果

校准结果应在校准证书上反映。校准证书至少包括以下信息：

- a) 标题：“校准证书”；
- b) 实验室名称和地址；
- c) 进行校准的地点（如果与实验室的地址不同）；
- d) 证书或报告的唯一性标识（如编号），每页及总页数的标识；
- e) 送校单位的名称和地址；
- f) 被校对象的描述和明确标识；
- g) 进行校准的日期，如果与校准结果的有效性及应用有关时，应说明被校对象的接收日期；
- h) 如果与校准结果的有效性及应用有关时，应对被校样品的抽样程序进行说明；
- i) 校准所依据的技术规范的标识，包括名称及代号；
- j) 本次校准所用测量标准的溯源性及有效性说明；
- k) 校准环境的描述；
- l) 校准结果及其测量不确定度的说明；
- m) 校准证书或校准报告签发人的签名、职务或等效标识，以及签发日期；
- n) 校准结果仅是对被校对象有效的声明；
- o) 未经实验室书面批准，不得部分复制证书或报告的声明；
- p) 经校准的电子固体密度天平，发给校准证书或校准报告，加盖校准印章。

9 复校时间间隔

客户根据校准结果、使用频次和使用条件等情况确定复校时间间隔。

附录 A

电子固体密度天平校准记录 (参考)

委托单位: _____ 证书编号: _____
 委托单位地址: _____ 校准地点: _____
 型号/规格: _____ 编号: _____ 最大称量 (Max): _____ 实际分度值 (d): _____
 制造厂商: _____ 实验室温度: _____ °C ~ _____ °C
 实验室相对湿度: _____ % ~ _____ % 纯水温度: _____ °C ~ _____ °C
 校准员: _____ 核验员: _____ 受理日期: _____ 校准日期: _____
 校准依据: JJF 2166—2024《电子固体密度天平校准规范》

校准所用主要测量设备					
名称	测量范围	不确定度/准确度等级/ 最大允许误差	溯源机构	证书编号	有效期至

A.1 称量示值误差

试验载荷 L	示值 I	示值误差 E	扩展不确定度 U ($k=2$)

A.2 称量重复性

试验载荷 L	次数	1	2	3	4	5
	示值 I					
	次数	6	7	8	9	10
	示值 I					
	标准偏差 s :					

A.3 称量偏载误差

试验载荷 L	位置	1	2	3	4	5
	示值 I_L					
	偏载误差 δI_{ecc}					
	$ \delta I_{\text{ecc}} _{\text{max}} =$					

A.4 密度示值误差及介质中重复性测量

密度标准样块	密度天平			
参考值 ρ_r	密度示值 ρ	示值误差 E_ρ		扩展不确定度 $U(k=2)$
	空气中示值 m			
	次数	1	2	3
	纯水中示值 I			
	示值重复性 δ_I			

附录 B

电子固体密度天平校准证书内页格式（参考）

B.1 称量示值误差校准结果

实际分度值 (d) =

最大称量 (Max) =

载荷	示值	示值误差	不确定度 $U(k=2)$

B.2 密度示值误差校准结果

参考值	示值	示值误差	不确定度 $U(k=2)$

附录 C

电子固体密度天平校准结果不确定度评定方法及示例

C.1 电子固体密度天平校准概述

C.1.1 测量标准：E₂等级、F₁等级标准砝码，固体密度标准样块。

C.1.2 校准依据：JJF 2166—2024《电子固体密度天平校准规范》。

环境温度：(20±5)℃，校准期间变化不大于2℃。

相对湿度：30%~85%，校准期间变化不大于15%。

液温与室温之差的绝对值不大于2℃。

C.1.3 测量对象：电子固体密度天平。

C.1.4 测量过程：按照校准规范要求，用标准砝码测量密度天平的称量示值误差，用固体密度标准样块测量密度天平的密度示值误差。

C.2 称量示值误差测量结果的不确定度评定

C.2.1 测量模型

测量模型公式：

$$E = I - L \quad (\text{C.1})$$

式中：

E —— 称量示值误差；

I —— 密度天平的质量示值；

L —— 标准砝码的参考质量值 m_{ref} 。

C.2.2 不确定度来源分析

a) 标准砝码引起的标准不确定度 $u(m_{\text{ref}})$ ；

b) 密度天平示值引起的标准不确定度 $u(I)$ 。

C.2.3 测量不确定度评定

C.2.3.1 标准砝码引起的标准不确定度 $u(m_{\text{ref}})$ C.2.3.1.1 标准砝码参考值的标准不确定度 u_m

标准砝码参考值的标准不确定度为其证书中扩展不确定度 U 与包含因子 k ($k=2$) 的商，按照公式 (C.2) 计算。

$$u_m = \frac{U}{2} \quad (\text{C.2})$$

C.2.3.1.2 空气浮力引起的标准不确定度 u_B

空气浮力引起的标准不确定度按照公式 (C.3) 计算。

$$u_B \approx |\text{MPE}| / 4\sqrt{3} \quad (\text{C.3})$$

C.2.3.1.3 标准砝码的不稳定性引起的标准不确定度 u_D

标准砝码的不稳定性引起的标准不确定度取其最大允许误差的三分之一，且服从矩形分布，按照公式 (C.4) 计算。

$$u_D = |\text{MPE}| / 3\sqrt{3} \quad (\text{C.4})$$

C.2.3.1.4 标准砝码引起的标准不确定度 $u(m_{\text{ref}})$

标准砝码引起的标准不确定度可以通过公式 (C.5) 计算获得。

$$u^2(m_{\text{ref}}) = u_m^2 + u_D^2 + u_B^2 \quad (\text{C.5})$$

C.2.3.2 密度天平示值 I 引起的标准不确定度 $u(I)$ C.2.3.2.1 由分辨力引起的标准不确定度 u_d

分辨力引起的标准不确定度按照公式 (C.6) 计算。

$$u_d = \frac{d/2}{\sqrt{3}} \times \sqrt{2} \quad (\text{C.6})$$

C.2.3.2.2 重复性引起的标准不确定度 u_r

重复性引起的标准不确定度用标准偏差来表示, 对密度天平进行 10 次重复性测量, 按照公式 (C.7) 和公式 (C.8) 计算。如果只进行了一组重复性测量, 该组重复性引起的标准不确定度可以作为其他载荷重复性引起的标准不确定度采用。

$$\bar{I} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i \quad (\text{C.7})$$

$$u_r = s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (I_i - \bar{I})^2}{n-1}} \quad (\text{C.8})$$

C.2.3.2.3 偏载引起的标准不确定度 u_e

偏载误差 $\delta I_{\text{ecc}i} = I_{Li} - I_{L1}$, 其值与载荷重心到承载器中心的距离成比例, 与载荷值成比例, 服从矩形分布, 其标准不确定度按照公式 (C.9) 计算。

$$u_e = I |\delta I_{\text{ecc}i}|_{\text{max}} / (2L_{\text{ecc}i}\sqrt{3}) \quad (\text{C.9})$$

C.2.3.2.4 密度天平称量示值的标准不确定度 $u(I)$

称量示值的标准不确定度可以通过公式 (C.10) 计算获得。

$$u^2(I) = u_d^2 + u_r^2 + u_e^2 \quad (\text{C.10})$$

C.2.4 称量示值误差的合成标准不确定度 u_c

重复性不确定度分量评定属于 A 类评定, 其余的不确定度分量评定均属于 B 类评定。不确定度分量互不相关, 合成标准不确定度按照公式 (C.11) 计算

$$u_c = \sqrt{u_m^2 + u_D^2 + u_B^2 + u_d^2 + u_r^2 + u_e^2} \quad (\text{C.11})$$

C.2.5 称量示值误差测量结果的扩展不确定度

取包含因子 $k=2$, 则称量示值误差的扩展不确定度按式 (C.12) 计算。

$$U = k \times u_c = 2 \times u_c \quad (\text{C.12})$$

C.3 密度示值误差测量结果的不确定度评定

C.3.1 测量模型

测量模型公式:

$$E_\rho = \rho_t - \rho_r \quad (\text{C.13})$$

式中:

E_ρ —— 密度示值误差;

ρ_t —— 密度示值;

ρ_r ——密度标准样块参考值。

C.3.2 不确定度来源分析

- a) 密度标准样块引起的标准不确定度 u_1 ；
- b) 介质中质量测量重复性引起的标准不确定度 u_2 ；
- c) 密度显示分辨力引起的标准不确定度 u_3 ；
- d) 质量测量示值引起的标准不确定度 u_4 。

C.3.3 测量不确定度评定

C.3.3.1 密度标准样块参考值的标准不确定度 u_1 为证书中的扩展不确定度 U 与包含因子 $k(k=2)$ 的商，按照公式 (C.14) 计算。

$$u_1 = \frac{U}{2} \quad (\text{C.14})$$

C.3.3.2 介质中质量测量重复性引起的标准不确定度 u_2 按照公式 (C.15) 计算。

$$u_2 = \frac{I_a(\rho_1 - \rho_a)}{(I_a - I_1)^2} \times \frac{\delta I_1}{1.69} \quad (\text{C.15})$$

式中：

δI_1 ——介质中质量测量重复性；

I_a ——密度标准样块在空气中的质量测量值；

I_1 ——密度标准样块在纯水中的质量测量值；

ρ_a ——1.2 kg/m³；

ρ_1 ——998.2 kg/m³。

C.3.3.3 密度显示分辨力引起的标准不确定度 u_3 按照公式 (C.16) 计算。

$$u_3 = \frac{d_\rho}{2\sqrt{3}} \quad (\text{C.16})$$

式中：

d_ρ ——密度示值分辨力。

C.3.3.4 质量测量示值引起的标准不确定度 u_4 按照公式 (C.17) 计算。

$$u_4 = \frac{I_1(\rho_1 - \rho_a)}{(I_a - I_1)^2} \times u_a \quad (\text{C.17})$$

式中：

u_a ——密度标准样块在空气中质量测量值的标准不确定度。

C.3.4 密度示值误差的合成标准不确定度 u_c 按照公式 (C.18) 计算。

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2} \quad (\text{C.18})$$

C.3.5 密度示值误差测量结果的扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，则密度示值误差测量结果的扩展不确定度按照公式 (C.19) 计算。

$$U = k \times u_c = 2 \times u_c \quad (\text{C.19})$$

C.4 称量示值误差测量结果不确定度评定示例

C.4.1 有关数据

采用标准砝码对一台电子固体密度天平进行测量，得到的试验数据如表 C.1 所示。

电子固体密度天平、标准砝码信息如下：

- a) 固体密度天平最大称量：210 g；
- b) 固体密度天平质量测量分辨力：1 mg；
- c) 标准砝码的质量测量范围：(1~500) g；
- d) 标准砝码的准确度等级：E₂等级。

表 C.1 称量示值误差不确定度评定示例数据

试验载荷 L/g	示值 I/g		示值误差 E/mg			
0.000	0.000		0			
50.000	50.001		1			
100.000	100.003		3			
150.000	150.000		0			
200.000	199.998		-2			
210.000	209.998		-2			
试验载荷 L/g	序号	1	2	3	4	5
200.000	示值/g	199.999	200.003	200.003	200.005	200.004
	序号	6	7	8	9	10
	示值/g	200.003	200.007	200.005	200.004	200.002
标准偏差 s : 2.1 mg						
试验载荷 L/g	位置	1	2	3	4	5
100.000	示值/g	100.005	100.004	100.002	100.006	100.009
	偏载误差 $\delta I_{\text{ecc1}}/g$		-0.001	-0.003	0.001	0.004
	$ \delta I_{\text{ecc1}} _{\text{max}} = 4 \text{ mg}$					

C.4.2 试验载荷为 200 g 的不确定度分量的计算

C.4.2.1 标准砝码引起的标准不确定度 $u(m_{\text{ref}})$

(1) 标准砝码参考值的标准不确定度 u_m

标准砝码参考值的标准不确定度为其扩展不确定度 U 与包含因子 ($k=2$) 的商, 其不确定度为

$$u_m = \frac{U}{2} = \frac{0.10 \text{ mg}}{2} = 0.05 \text{ mg}$$

(2) 标准砝码的不稳定性引起的标准不确定度 u_D

标准砝码的不稳定性取其最大允许误差的三分之一, 且服从矩形分布, 其标准不确定度为

$$u_D = |\text{MPE}|/3\sqrt{3} = |\pm 0.3 \text{ mg}|/3\sqrt{3} = 0.06 \text{ mg}$$

(3) 空气浮力引起的标准不确定度 u_B

空气浮力引起的标准不确定度为

$$u_B \approx |\text{MPE}| / 4\sqrt{3} = |\pm 0.3 \text{ mg}| / 4\sqrt{3} = 0.04 \text{ mg}$$

(4) 标准砝码引起的标准不确定度 $u(m_{\text{ref}})$

标准砝码引起的标准不确定度为

$$u(m_{\text{ref}}) = \sqrt{u_m^2 + u_D^2 + u_B^2} = \sqrt{0.05^2 + 0.06^2 + 0.04^2} \text{ mg} = 0.1 \text{ mg}$$

C.4.2.2 密度天平示值 I 的标准不确定度 $u(I)$

(1) 由分辨力引起的标准不确定度 u_d

分辨力引起的标准不确定度为

$$u_d = \frac{d/2}{\sqrt{3}} \times \sqrt{2} = \frac{1 \text{ mg}/2}{\sqrt{3}} \times \sqrt{2} = 0.4 \text{ mg}$$

(2) 重复性引起的标准不确定度 u_r

重复性引起的标准不确定度用标准偏差 s 来表示，对密度天平进行 10 次重复性测量，其标准不确定度为

$$u_r = s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (I_i - \bar{I})^2}{n-1}} = 2.1 \text{ mg}$$

(3) 偏载引起的标准不确定度 u_e

偏载误差与载荷重心到承载器中心的距离成比例，与载荷值成比例，服从矩形分布，其标准不确定度为

$$u_e = I |\delta I_{\text{ecc}}|_{\text{max}} / (2L_{\text{ecc}}\sqrt{3}) = 199.998 \text{ g} \times 0.004 \text{ g} / (2 \times 100.000 \text{ g} \times \sqrt{3}) = 2.3 \text{ mg}$$

(4) 密度天平示值引起的标准不确定度 $u(I)$

称量示值的标准不确定度为

$$u(I) = \sqrt{u_d^2 + u_r^2 + u_e^2} = \sqrt{0.4^2 + 2.1^2 + 2.3^2} \text{ mg} = 3.1 \text{ mg}$$

C.4.3 称量示值误差测量结果的合成标准不确定度 u_c

称量示值误差测量结果的合成标准不确定度为

$$\begin{aligned} u_c &= \sqrt{u_m^2 + u_D^2 + u_B^2 + u_d^2 + u_r^2 + u_e^2} \\ &= \sqrt{0.05^2 + 0.06^2 + 0.04^2 + 0.4^2 + 2.1^2 + 2.3^2} \text{ mg} = 3.1 \text{ mg} \end{aligned}$$

C.4.4 称量示值误差的扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，则载荷为 200 g 的称量示值误差测量结果的扩展不确定度为

$$U = k \times u_c = 2 \times u_c = 2 \times 3.1 \text{ mg} = 6 \text{ mg}$$

采用上述方法，对测量范围内其他载荷质量示值误差测量结果的扩展不确定度进行评定，如表 C.2 所示。

表 C.2 称量示值误差不确定度分量、合成不确定度和扩展不确定度汇总表

载荷 g	u_m mg	u_D mg	u_B mg	u_d mg	u_r mg	u_e mg	u_c mg	$U(k=2)$ mg
0	0.00	0.00	0.00	0.4	2.1	0.0	2.1	4
50	0.01	0.02	0.02	0.4	2.1	0.6	2.2	4
100	0.02	0.03	0.02	0.4	2.1	1.2	2.5	5
150	0.04	0.06	0.04	0.4	2.1	1.7	2.7	6
200	0.05	0.06	0.04	0.4	2.1	2.3	3.1	6
210	0.06	0.07	0.05	0.4	2.1	2.4	3.2	6

C.5 密度示值误差测量结果不确定度评定示例

C.5.1 有关数据

用不锈钢砝码对一台电子固体密度天平的密度值进行测量，得到的密度测量数据如表 C.3 所示。固体密度天平、密度标准样块信息见表 C.3。

表 C.3 密度测量示值误差不确定度评定示例数据

密度标准样块	密度天平			
参考值 ρ_r	密度示值 $\rho=7.982 \text{ g/cm}^3$		密度示值误差 $E_\rho=0.025 \text{ g/cm}^3$	
7.957 1 g/cm^3	空气中示值		100.003 g	
	次数	1	2	3
	纯水中示值 I	87.477 g	87.474 g	87.476 g
	示值重复性 δ_I	0.003 g		

- 固体密度天平最大称量：210 g；
- 固体密度天平的密度测量分辨力：0.001 g/cm^3 ；
- 固体密度标准样块的名义质量值：100 g；
- 固体密度标准样块密度值及扩展不确定度：7.957 1 g/cm^3 ($U=0.001 7 \text{ g/cm}^3$, $k=2$)。

C.5.2 密度测量值不确定分量的计算

C.5.2.1 密度标准样块参考值的标准不确定度为其扩展不确定度 U 与包含因子 $k(k=2)$ 的商，其标准不确定度 u_1 ：

$$u_1 = \frac{U}{2} = \frac{0.001 7 \text{ g/cm}^3}{2} = 0.000 8 \text{ g/cm}^3$$

C.5.2.2 介质中质量测量重复性测量引起的标准不确定度 u_2 ：

$$u_2 = \frac{I_a(\rho_1 - \rho_a)}{(I_a - I_1)^2} \times \frac{\delta_I}{1.69} = \frac{100.003 \text{ g}(0.998 2 \text{ g/cm}^3 - 0.001 2 \text{ g/cm}^3)}{(100.003 \text{ g} - 87.477 \text{ g})^2} \times \frac{0.003 \text{ g}}{1.69} = 0.001 1 \text{ g/cm}^3$$

C.5.2.3 密度显示分辨力引起的标准不确定度 u_3 ：

$$u_3 = \frac{d_\rho}{2\sqrt{3}} = \frac{0.001 \text{ g/cm}^3}{2\sqrt{3}} = 0.0003 \text{ g/cm}^3$$

C.5.2.4 质量测量示值引起的标准不确定度 u_4 ：

$$u_4 = \frac{I_1(\rho_1 - \rho_a)}{(I_a - I_1)^2} \times u_a$$

$$= \frac{87.477 \text{ g} \times (0.9982 \text{ g/cm}^3 - 0.0012 \text{ g/cm}^3)}{(100.003 \text{ g} - 87.477 \text{ g})^2} \times 0.0025 = 0.0014 \text{ g/cm}^3$$

C.5.3 密度示值误差测量结果的合成标准不确定度 u_c

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2}$$

$$= \sqrt{0.0011^2 + 0.0008^2 + 0.0003^2 + 0.0014^2} \text{ g/cm}^3 = 0.0020 \text{ g/cm}^3$$

C.5.4 密度示值误差测量结果的扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，则密度示值误差测量结果的扩展不确定度为：

$$U = k \times u_c = 2 \times u_c = 2 \times 0.0020 \text{ g/cm}^3 = 0.004 \text{ g/cm}^3$$