

J J F

中华人民共和国国家计量技术规范

JJF 1847—2020

电子天平校准规范

Calibration Specification of Electronic Balances

2020-07-02 发布

2021-01-02 实施

国家市场监督管理总局

发布

批准稿,稍后上传出版稿

电子天平校准规范

Calibration Specification of Electronic Balances

JJF 1847—2020

归口单位：全国质量密度计量技术委员会

主要起草单位：中国计量科学研究院

上海市计量测试技术研究院

梅特勒-托利多仪器（上海）有限公司

参加起草单位：梅特勒-托利多国际贸易（上海）有限公司

云南省计量测试技术研究院

新疆维吾尔自治区计量测试研究院

本规范委托全国质量密度计量技术委员会负责解释

主要起草人：

胡满红（中国计量科学研究院）

苏祎（上海市计量测试技术研究院）

葛天平（梅特勒-托利多仪器（上海）有限公司）

参加起草人：

李彤阳（梅特勒-托利多国际贸易（上海）有限公司）

黄坚（云南省计量测试技术研究院）

郭锐（新疆维吾尔自治区计量测试研究院）

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 符号表	2
3.3 计量单位	2
4 概述.....	2
4.1 原理	2
4.2 用途	3
5 计量特性.....	3
6 校准条件.....	3
6.1 标准砝码	3
6.2 替代载荷	4
6.3 其他有关测量用计量器具	4
6.4 校准环境条件	4
6.5 示值	4
7 校准项目和校准方法.....	4
7.1 校准项目	4
7.2 校准方法	4
8 校准结果.....	7
8.1 示值误差测量结果	7
8.2 重复性测量结果	7
8.3 载荷在不同位置测量结果	8
8.4 校准证书	8
9 复校时间间隔.....	9
附录 A 电子天平测量结果不确定度评定.....	10
附录 B 替代载荷.....	14

附录 C	电子天平测量结果不确定度评定（示例）	18
附录 D	电子天平校准记录格式（示例）	24
	电子天平校准证书内页（示例）	25

引 言

本规范依据 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》，参照国际法制计量组织国际建议 R76-1 《非自动衡器》第一部分：计量和技术要求-测试，(Non-automatic weighing instruments Part 1: Metrological and technical requirements - Tests)、国际法制计量组织国际建议 R76-2 《非自动衡器》第二部分：测试报告格式，(Non-automatic weighing instruments Part 2: Test report format)、欧盟校准指南第 18 号《非自动衡器校准指南》(Guidelines on the Calibration of Non-Automatic Weighing Instruments) 等规范编写。

《电子天平检定规程》用于电子天平的测量项目是否符合检定规程的要求，给出天平合格与否的判定，属于法制计量要求；《电子天平校准规范》用于电子天平其他类别的计量要求。

本校准规范给出了电子天平的校准条件、校准项目、校准方法及不确定度评定方法。本规范系首次制定。

电子天平校准规范

1 范围

本规范适用于各类电子天平的校准。

2 引用文件

本规范引用以下文件：

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 1071	《国家计量校准规范编写规则》
JJF 1181	《衡器计量名词术语及定义》
JJF 1229	《质量密度计量名词术语及定义》
GB/T 23111	《非自动衡器》
GB/T 27418	《测量不确定度评定与表示》

国际法制计量组织国际建议 R76-1 《非自动衡器》第一部分：计量和技术要求-测试，（Non-automatic weighing instruments Part 1: Metrological and technical requirements - Tests）

国际法制计量组织国际建议 R76-2 《非自动衡器》第二部分：测试报告格式，（Non-automatic weighing instruments Part 2: Test report format）

国际法制计量组织国际建议 R111 E₁, E₂, F₁, F₂, M₁₋₂, M₂, M₂₋₃ 和 M₃ 等级砝码第一部分：计量技术要求，第二部分：测量报告表格（R111 Weights of classes E₁, E₂, F₁, F₂, M₁₋₂, M₂, M₂₋₃ and M₃, Part1: Metrological and technical requirements and Part2: Test report format）

欧盟校准指南第 18 号《非自动衡器校准指南》（Guidelines on the Calibration of Non-Automatic Weighing Instruments）

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

相关术语参照 JJF 1001 《通用计量术语及定义》、JJF 1181 《衡器计量名词术语及定义》、JJF 1229 《质量密度计量名词术语及定义》。

3.2 符号表

表 1 符号说明

符号	说明	符号	说明
D	漂移, 数值随时间变化	m	物体质量
E	示值误差	m_k	砝码的标称质量
I	天平示值	m_{ref}	试验载荷的参考质量
I_{ref}	天平示值的参考值	MPE	砝码、天平的最大允许误差
L	载荷	n	重复性测量次数
Max	最大秤量	s	标准偏差
Max_1	最小实际分度值对应的局部称量范围的上限	t	温度 (°C)
T	温度 (单位 K)	u	标准不确定度
U	扩展不确定度	ν	自由度数
u_c	合成标准不确定度	ν_{eff}	合成标准不确定度的有效自由度
m_c	砝码的折算质量	ρ	密度
d	实际分度值	ρ_0	空气的参考密度, $\rho_0 = 1.2 \text{ kg/m}^3$
d_1	最小实际分度值	ρ_{ref}	砝码的约定密度, $\rho_{\text{ref}} = 8000 \text{ kg/m}^3$
k	包含因子	δ	偏差

表 2 符号下标说明

下标	说明	下标	说明
B	空气浮力 (校准时)	i, j	编号
D	漂移	max	最大值
N	标称值	min	最小值
St	标准 (质量)	ref	参考
T	试验	rep	重复性
adj	调整	sub	替代载荷
cal	校准	0	空载
ecc	载荷在不同位置	dig	数字化

3.3 计量单位

使用的计量单位: 微克 (μg)、毫克 (mg)、克 (g)、千克 (kg)、吨 (t)。

4 概述

4.1 原理

电子天平 (以下简称“天平”) 是通过作用于物体上的重力来确定该物体质量, 并采用数字指示输出结果的计量器具。

4.2 用途

用于砝码质量量值传递、物体质量测量、体积测量及磁性测量等。也可以用于确定与质量相关的其他量值、数量、参数或特性。

5 计量特性

5.1 示值误差：天平任何单次测量的示值与对应输入的砝码参考量值之差。

5.2 重复性：同一载荷多次衡量结果之间的差值用标准偏差来表示。

5.3 同一载荷在不同位置的示值误差：载荷加在秤盘的不同位置，用各点示值与中间点示值之差绝对值中的最大值表示。

6 校准条件

6.1 标准砝码

6.1.1 标准砝码溯源性

6.1.1.1 经校准出具包含不确定度的校准证书的砝码，标准砝码的不确定度公式见附录 A.1.2.1.1。

6.1.1.2 经检定合格出具检定证书的砝码。

- a) 对于检定证书中只给出标称质量值的砝码，标准砝码的不确定度公式见附录 A.1.2.1.2；
- b) 对于检定证书中给出折算质量值的砝码，标准砝码的不确定度公式见附录 A.1.2.1.3。

6.1.2 砝码的选择

- a) $1000000 < Max/d$ 选择 E₂ 等级砝码，或不低于 E₂ 等级不确定度的砝码；
- b) $150000 < Max/d \leq 1000000$ 对于证书中只给出标称质量值的砝码，选择 F₁ 等级及以上砝码；对于证书中给出折算质量值的砝码，选择 F₂ 等级及以上砝码；
- c) $15000 < Max/d \leq 150000$ 对于证书中只给出标称质量值的砝码，选择 F₂ 等级及以上砝码；对于证书中给出折算质量值的砝码，选择 M₁

- 等级及以上砝码；
- d) $Max/d \leq 15000$ 对于证书中只给出标称质量值的砝码，选择 M_1 等级及以上砝码；对于证书中给出折算质量值的砝码，选择 M_2 等级及以上砝码。

6.1.3 砝码的其他要求需符合 JJG 99 《砝码》。

6.2 替代载荷

当校准最大称量为 1000 kg(含 1000 kg) 以上的天平时，若标准砝码不足以覆盖天平正常的校准范围，可以使用其他试验载荷作为替代载荷，详见附录 B。

6.3 其他有关测量用计量器具

- a) 分度值不大于 0.2°C 的温度计；
- b) 准确度不低于 5%RH 的湿度计。

6.4 校准环境条件

6.4.1 校准应在稳定的环境条件下进行，除特殊情况外，校准工作应在天平的工作温度范围内进行。

6.4.2 对于 $Max/d \geq 5 \times 10^5$ 以上的天平，校准期间的温度最大变化不应超过 1°C ；相对湿度最大变化不应超过 10%。

6.4.3 其他天平，校准期间的温度最大变化不应超过 2°C ；相对湿度变化最大变化不应超过 15%。

6.4.4 其他影响量

振动、大气中水汽凝结、气流、磁场等其他影响量不得对测量结果产生影响。

6.5 示值

对于任何试验载荷（包括无载荷），只有在天平示值稳定的情况下才能读取和记录天平示值。

7 校准项目和校准方法

7.1 校准项目

示值误差的测量及不确定度评定。

7.2 校准方法

7.2.1 校准范围

校准范围通常为天平的零点到最大称量，或依据客户要求的天平称量范围。

7.2.2 校准地点

7.2.2.1 校准通常在天平使用地点进行。

7.2.2.2 如果在校准后将天平移动至另一个地方，可能会出现以下的情况：

- a) 当地重力加速度的差异；
- b) 环境条件的变化；
- c) 运输期间所产生的影响。

注：以上均可能会导致天平的性能发生改变，因此，应尽量避免在校准后移动天平。
建议天平移动后重新校准。

7.2.3 校准前准备工作

7.2.3.1 天平应有铭牌或产品标识，应有型号、实际分度值、最大称量、编号、制造厂商等信息，检查型式批准标志信息。

7.2.3.2 天平在校准之前应经过适当时间的通电，如：天平说明书规定的预热时间，或用户设定的时间。若无以上规定，则天平预热时间应不少于 30 分钟。

7.2.3.3 天平应保持水平状态。

7.2.4 示值误差的测量

7.2.4.1 应在需校准的称量范围内均匀选取测量点，至少需有 6 个不同的试验载荷点，其中需包括零点、最大称量点或接近最大称量点。根据客户的需求可增加测量点。

7.2.4.2 在测量之前，应将示值设置为零，测量可以按照以下不同的方法选择进行：

方法一：从零载荷顺序增加至最大称量，在测量过程中的每一步都可以卸载载荷，卸载后需检查零点，如果零点示值不为零，应将示值设置为零。

方法二：从零载荷顺序增加至最大称量，在测量过程中不需要卸载载荷。

注 1：方法二可能会在结果中产生蠕变效应。

注 2：若客户要求，也可采用从最大称量顺序减小至零载荷的示值测量。

注 3：尽量采用单个砝码。

7.2.5 重复性的测量

7.2.5.1 在重复性条件下,以实际一致的方法将同一载荷多次地放置在天平承载器上,天平提供相互一致结果的能力,用标准偏差表示。

注: 重复性条件包括;

- 相同测量程序;
- 相同操作者;
- 相同测量系统;
- 相同操作条件和相同地点;
- 并在短时间内对同一或相类似被测对象重复测量的一组测量条件。

7.2.5.2 试验载荷必须由适当的标准砝码或附录 B 要求的替代载荷组成。试验载荷应尽可能由单个砝码或单个替代载荷组成。

7.2.5.3 选择载荷时,应合理考虑天平的最大称量和实际分度值。对于单分度天平,通常试验载荷在接近 50%最大称量到接近 100%最大称量之间选取。如客户有特殊测量点需求,可调整测量点。

7.2.5.4 对于多分度/多范围的天平,试验载荷通常在最小实际分度值对应的接近 50%最大局部称量到接近 100%最大局部称量之间选取。如客户有特殊测量点需求,可调整测量点。

7.2.5.5 在每次测量之前,应将天平示值置零,在天平称量盘中间加载试验载荷,稳定后记录天平的示值。照此方法至少重复测量 6 次。

7.2.6 载荷在不同位置的测量

7.2.6.1 同一载荷在不同位置的示值误差,用不同位置的示值与中间位置示值的最大差值表示。

7.2.6.2 测量包括将试验载荷放在承载器的不同位置,放置方式需确保施加的载荷的重心在图 1 中所示的位置,或尽可能接近的同等位置。根据承载器形状的不同,测量点数量及位置可以发生变化。除中心点外的其他测量点的位置按照图 1 所示,为中心点到秤盘边缘距离的 1/2 处。

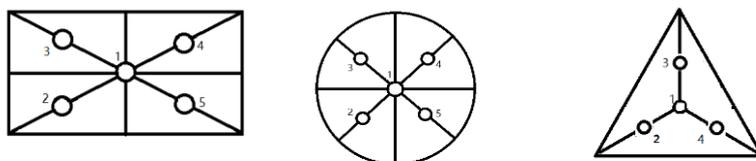


图 1 载荷位置

7.2.6.3 多分度/多范围天平或单分度天平, 试验载荷均优选约为最大秤量的三分之一的单个砝码。

7.2.6.4 测量可以按照以下不同的方法选择进行:

方法一: (用于单分度天平)

- a) 不易产生漂移的单分度天平: 在测量之前, 将示值置零。然后先将试验载荷放在位置 1 处, 再按顺序移动至其他位置。记录每个位置的示值;
- b) 易产生漂移的单分度天平: 在测量之前, 将示值置零。首先将试验载荷放在位置 1, 移除, 然后放在下一个位置, 又移除, 以此类推, 直至从最后一个位置移除, 每次去除载荷后可以置零。记录每个位置的示值。

方法二: (用于多分度/多范围天平)

- a) 不易产生漂移的多分度/多范围天平: 首先将试验载荷放在位置 1, 对天平进行去皮操作。然后将试验载荷按顺序移动至其他位置。记录每个位置的示值;
- b) 易产生漂移的多分度/多范围天平: 首先将试验载荷放在位置 1, 对天平进行去皮操作。接着将试验载荷移至下一个位置, 然后移回位置 1, 如显示不为零, 则需置零。以此类推直至从最后一个位置移除。记录每个位置的示值。

8 校准结果

8.1 示值误差测量结果

对于每一个试验载荷, 示值误差 (E) 计算方式如下:

$$E = I - m_{\text{ref}} \quad (1)$$

参考质量值可以是试验载荷的标称质量;

$$m_{\text{ref}} = m_N \quad (2)$$

也可以是试验载荷的折算质量。

$$m_{\text{ref}} = m_c = (m_N + \delta m_c) \quad (3)$$

8.2 重复性测量结果

根据重复性测量点试验载荷的示值计算标准偏差 (s)。

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (I_i - \bar{I})^2} \quad (4)$$

其中：

$$\bar{I} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i \quad (5)$$

式中：

s —— 标准偏差；

I_i —— 施加第*i*个载荷时的显示值；

\bar{I} —— n 个显示值的平均值。

8.3 载荷在不同位置测量结果

根据不同载荷位置中获得的示值来计算载荷在不同位置的误差 ΔI_{ecc_i} 。

$$\Delta I_{ecc_i} = I_{Li} - I_{L1} \quad (6)$$

式中：

I_{Li} —— 第*i*个位置显示值；($i = 2, 3, 4, 5$)

I_{L1} —— 中心位置示值。

8.4 校准证书

8.4.1 经校准的天平发给校准证书。

8.4.2 校准证书内容

校准证书应至少包括以下信息：

- 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) 证书的唯一性标识（如编号），每页及总页数的标识；
- e) 客户的名称和地址；
- f) 被校对象的描述和明确标识；
- g) 校准所依据的技术规范的标识，包括名称及代号；
- h) 本次校准所用试验载荷的溯源性及有效性说明；
- i) 校准环境的描述；

- j) 校准结果及其测量不确定度的说明;
- k) 校准证书签发人的签名或等效标识;
- l) 校准结果仅对被校对象有效的声明。

9 复校时间间隔

客户应根据校准结果、使用频次、使用条件等情况自行确定复校时间间隔。

附录 A

电子天平测量结果不确定度评定

A.1 示值误差的标准不确定度

被校天平的测量模型为：

$$E = I - m_{\text{ref}} \quad (\text{A. 1})$$

合成标准不确定度的计算公式：

$$u^2(E) = u^2(I) + u^2(m_{\text{ref}}) \quad (\text{A. 2})$$

公式(A. 2)只有在公式(A. 17)中各不确定度分量均不相关后才成立。

如果采用替代载荷，试验载荷的参考质量不确定度评定见附录 B。

A.1.1 标准不确定度评定

A.1.1.1 空载示值的化整误差引起的标准不确定度 $u(\delta I_0)$

δI_0 表示空载示值的化整误差。其区间半宽度为 $d_0/2$ ，服从矩形分布，其标准不确定度为：

$$u(\delta I_0) = d_0/(2\sqrt{3}) \quad (\text{A. 3})$$

A.1.1.2 加载示值的化整误差引起的标准不确定度 $u(\delta I_{\text{digL}})$

δI_{digL} 表示加载示值的化整误差。其区间半宽度为 $d_L/2$ ，服从矩形分布，其标准不确定度为：

$$u(\delta I_{\text{digL}}) = d_L/(2\sqrt{3}) \quad (\text{A. 4})$$

注：在多分度/多范围天平上， d_L 随示值发生变化。

A.1.1.3 重复性引起的标准不确定度 $u(\delta I_{\text{rep}})$

δI_{rep} 表示天平重复性的标准不确定度，用标准偏差来表示，其标准不确定度为：

$$u(\delta I_{\text{rep}}) = s(I) \quad (\text{A. 5})$$

如果只进行一组重复性测量，则该测量确定的重复性不确定度分量可代表天平整个量程的重复性不确定度。

对于多分度/多范围天平，如果在各局部称量范围分别进行重复性测量，则各范围测量确定的重复性不确定度可代表天平相应范围的重复性不确定度。

A.1.1.4 载荷在不同位置的测量引起的标准不确定度 $u(\delta I_{ecc})$

δI_{ecc} 表示由于试验载荷重心的偏离引起的误差。由多个砝码组成试验载荷时可能会出现这一影响。如果无法忽略这一影响，则可以基于以下假设：

公式 $\Delta I_{ecc i} = I_{Li} - I_{L1}$ 确定的差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。

按照 8.3 确定的最大差值，服从矩形分布，其标准不确定度为：

$$u(\delta I_{ecc}) = I |\Delta I_{ecc i}|_{max} / (2L_{ecc} \sqrt{3}) \quad (\text{A.6})$$

A.1.1.5 示值的标准不确定度可以通过以下公式获得

$$u^2(I) = u^2(\delta I_0) + u^2(\delta I_{digL}) + u^2(\delta I_{rep}) + u^2(\delta I_{ecc}) \quad (\text{A.7})$$

A.1.2 参考质量的标准不确定度

参考质量测量模型为：

$$m_{ref} = m_N + \delta m_c + \delta m_B + \delta m_D \quad (\text{A.8})$$

A.1.2.1 标准砝码的标准不确定度 $u(\delta m_c)$

A.1.2.1.1 如果标准砝码校准证书中给出了砝码的折算质量、扩展不确定度 U 及包含因子 k ，其标准不确定度为：

$$u(\delta m_c) = U/k \quad (\text{A.9})$$

A.1.2.1.2 如果标准砝码有检定证书，且在校准过程中仅使用砝码标称值，服从矩形分布，其标准不确定度为：

$$u(\delta m_c) = |\text{MPE}|/\sqrt{3} \quad (\text{A.10})$$

A.1.2.1.3 如果标准砝码有检定证书，且在校准过程中仅使用折算质量值，其标准不确定度为：

$$u(\delta m_c) = |\text{MPE}|/6 \quad (\text{A.11})$$

A.1.2.1.4 如果试验载荷由多个标准砝码组成，其标准不确定度为各个标准砝码的标准不确定度的算术和。

A.1.2.2 空气浮力引起的标准不确定度 $u(\delta m_B)$

A.1.2.2.1 如果在校准之前对天平进行调整，空气浮力的标准不确定度为：

$$u(\delta m_B) \approx |\text{MPE}|/(4\sqrt{3}) \quad (\text{A.12})$$

A.1.2.2.2 如果在校准之前不对天平进行调整，空气浮力的标准不确定度为：

$$u(\delta m_B) \approx (0.1m_N\rho_0/\rho_{\text{ref}} + |\text{MPE}|/4)/\sqrt{3} \quad (\text{A.13})$$

A.1.2.2.3 如果可以获得天平校准场地温度变化的信息，则公式（A.14）可以替换为：

$$u(\delta m_B) \approx \sqrt{1.07 \times 10^{-4} + 1.33 \times 10^{-6} K^{-2} \Delta T^2} \cdot m_N \cdot \rho_0/\rho_{\text{ref}} + |\text{MPE}|/(4\sqrt{3}) \quad (\text{A.14})$$

其中 ΔT 为对该地点假设的环境温度的最大变化。

A.1.2.3 砝码不稳定性引起的标准不确定度 $u(\delta m_D)$

A.1.2.3.1 砝码的不稳定性引入的不确定度可以从对标准砝码近期连续多次检定/校准之后的质量变化中估计出来。可采用最近两个检定/校准周期中砝码折算质量值的差值或近期连续多次检定/校准周期中砝码折算质量值的差值的平均值。

A.1.2.3.2 在没有标准砝码不稳定性信息的情况下，砝码的不稳定性的值将根据 JJG 99 选择标准砝码相应的最大允许误差的三分之一。

A.1.2.3.3 砝码不稳定性标准不确定度为：

$$u(\delta m_D) = |\text{MPE}|/(3\sqrt{3}) \quad (\text{A.15})$$

A.1.2.4 参考质量的标准不确定度

参考质量的标准不确定度可以通过以下公式获得

$$u^2(m_{\text{ref}}) = u^2(\delta m_c) + u^2(\delta m_B) + u^2(\delta m_D) \quad (\text{A.16})$$

如果试验载荷由附录 B 中的替代载荷组成，请参照附录 B。

A.1.3 合成标准不确定度

公式（A.17）中的全部不确定度分量均不相关。

$$u_c^2(E) = u^2(I) + u^2(m_{\text{ref}}) = u^2(\delta I_0) + u^2(\delta I_{\text{digL}}) + u^2(\delta I_{\text{rep}}) + u^2(\delta I_{\text{ecc}}) + u^2(\delta m_c) + u^2(\delta m_B) + u^2(\delta m_D) \quad (\text{A. 17})$$

A.2 示值误差的扩展不确定度

A.2.1 示值误差的扩展不确定度为：

$$U_p(E) = k_p u_c(E) \quad (\text{A. 18})$$

A.2.2 包含因子 k 的选取

A.2.2.1 当重复性测量次数 ≥ 10 次时，通常采用包含因子 $k=2$ 。

A.2.2.2 当重复性测量次数 < 10 次时，需计算有效自由度并通过查表 3 选取相应的 k 值。

A.2.2.2.1 自由度计算公式：

$$v_{\text{eff}} = \frac{u_c^4(E)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(E)}{v_i}} \quad (\text{A. 19})$$

式中：

v_{eff} —— 有效自由度；

$u_c(E)$ —— 合成标准不确定度；

v_i —— 为标准不确定度 $u_i(E)$ 的自由度。

A.2.2.2.2 计算出的有效自由度值应依据表 3 按向下舍入原则选择 k 值。例如：

经计算 $v_{\text{eff}} = 9.75$ ，由此选择表中 $v_{\text{eff}} = 8$ 的 k 值为 2.37。

表 3 不同有效自由度对应的包含因子 k

v_{eff}	1	2	3	4	5	6	7	8	10	20	50	∞
k	13.97	4.53	3.31	2.87	2.65	2.52	2.43	2.37	2.28	2.13	2.05	2.00

A.2.2.3 在所有情况下覆盖因子 k 的选择，应保证扩展的不确定度的测量覆盖率至少为 95.45%。

附录 B

替代载荷

B.1 替代载荷

B.1.1 当校准最大秤量为 1000 kg(含 1000 kg)以上的天平时,若标准砝码不足以覆盖天平正常的校准范围,可以使用其他质量稳定的试验载荷作为替代载荷。

B.1.2 替代载荷质量在校准期间应保持恒定,并便于处理。同时替代载荷密度、重心位置应易于确定。

B.1.3 标准砝码不得少于最大秤量的 1/5。由于替代载荷的不确定度会随着替代次数的增加而增大,因此为提高校准准确度,应尽量使用标准砝码,减少替代次数。

B.1.4 替代载荷要求

每次替代时,替代载荷应尽量接近所替代的标准砝码,与相应试验载荷的差值应不大于 $\pm 20d$ 。

B.2 替代载荷的使用

当标准砝码不足以覆盖校准天平的正常范围,或客户同意的范围,则可以使用满足 B.1 要求的其他试验载荷作为替代载荷。

B.2.1 替代载荷的产生

B.2.1.1 试验载荷由单个标准砝码组成

1) 第一试验载荷由标准砝码组成:

$$L_{T1} = m_{\text{ref}} \quad (\text{B.1})$$

在去除 L_{T1} 后,载入替代载荷,并进行调整,给出大约相同的示值:

$$I(L_{\text{sub1}}) \approx I(L_{T1}) \quad (\text{B.2})$$

这样:

$$L_{\text{sub1}} = m_{\text{ref}} + I(L_{\text{sub1}}) - I(m_{\text{ref}}) = m_{\text{ref}} + \Delta I_1 \quad (\text{B.3})$$

2) 第二个试验载荷 L_{T2} 为 L_{sub1} 与 m_{ref} 之和

$$L_{T2} = L_{\text{sub1}} + m_{\text{ref}} = 2m_{\text{ref}} + \Delta I_1 \quad (\text{B.4})$$

3) 采用替代载荷 L_{sub2} 替换 m_{ref} , 使得两个替代载荷之和与试验载荷 L_{T2} 大致相等。

$$I(L_{\text{sub1}} + L_{\text{sub2}}) \approx I(L_{T2}) \quad (\text{B.5})$$

这样:

$$\begin{aligned} L_{\text{sub1}} + L_{\text{sub2}} &\approx L_{T2} + I(L_{\text{sub1}} + L_{\text{sub2}}) - I(L_{T2}) \\ &= L_{T2} + \Delta I_2 = 2m_{\text{ref}} + \Delta I_1 + \Delta I_2 \end{aligned} \quad (\text{B.6})$$

同样:

$$L_{T3} = L_{\text{sub1}} + L_{\text{sub2}} + m_{\text{ref}} = 3m_{\text{ref}} + \Delta I_1 + \Delta I_2 \quad (\text{B.7})$$

4) 以上程序可以重复, 产生试验载荷 L_{T4}, \dots, L_{Tn}

$$L_{Tn} = nm_{\text{ref}} + \Delta I_1 + \Delta I_2 + \dots + \Delta I_{n-1} \quad (\text{B.8})$$

但是, 由于重复性和天平分辨率的影响, 在每次替换后, 总的试验载荷的不确定度会比仅由标准砝码组成的不确定度有显著增加。

B.2.1.2 试验载荷由多个标准砝码组成

如果试验载荷由多个标准砝码组成, 则可以首先使用标准砝码创建 N 个试验载荷 $m_{\text{ref},k}$ ($k=1, \dots, N$), 其中条件为:

$$m_{\text{ref},1} < m_{\text{ref},2} < \dots < m_{\text{ref},N} = m_{\text{ref}} = L_{T1} \quad (\text{B.9})$$

之后, 采用替代载荷 L_{sub1} 来替代 L_{T1} , 然后可以再次连续加上试验载荷 $m_{\text{ref},k}$ 。

试验载荷被称为 $L_{Tn,k}$, 其中:

$$L_{Tn,k} = (n-1)m_{\text{ref}} + m_{\text{ref},k} + \Delta I_1 + \Delta I_2 + \dots + \Delta I_{n-1} \quad (\text{B.10})$$

B.2.2 替代载荷扩展示例

以电子天平 ($Max = 1000 \text{ kg}$, $d = 0.1 \text{ kg}$), 1 个 200 kg 标准砝码为例。根据用户的要求, 选择了 5 个等比例的天平示值误差测量点。见表 4

表 4 替代载荷扩展示例

步骤	测量载荷 L_{Tj}	显示值 I_j	显示值偏差 E_j	替代载荷和测量砝码的显示差值 ΔI_j	计算出的替代载荷值	图形表述
0	0 kg	0 kg	0 kg	--	--	--
测量载荷1	$L_{T1} = m_{\text{ref}} = 200 \text{ kg}$	200.5 kg	200.5 kg - 200 kg = 0.5 kg	--	--	

表4 (续) 替代载荷扩展示例

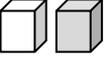
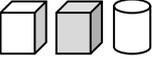
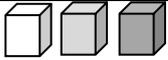
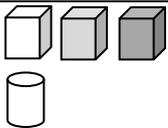
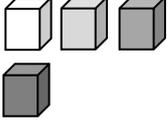
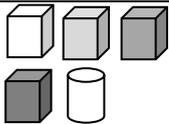
替代载荷1	---	199.6 kg	---	199.6 kg - 200.5 kg = -0.9 kg	$L_{\text{sub1}} = m_{\text{ref}} + \Delta I_1 = 200 \text{ kg} - 0.9 \text{ kg} = 199.1 \text{ kg}$	
测量载荷 2	$L_{T2} = L_{\text{sub1}} + m_{\text{ref}} = 199.1 \text{ kg} + 200 \text{ kg} = 399.1 \text{ kg}$	399.9 kg	399.9 kg - 399.1 kg = 0.8 kg	---	---	
替代载荷2	---	401.3 kg	---	401.3 kg - 399.9 kg = 1.4 kg	$L_{\text{sub1}} + L_{\text{sub2}} = 2m_{\text{ref}} + \Delta I_1 + \Delta I_2 = 400 \text{ kg} - 0.9 \text{ kg} + 1.4 \text{ kg} = 400.5 \text{ kg}$	
测量载荷 3	$L_{T3} = L_{\text{sub1}} + L_{\text{sub2}} + m_{\text{ref}} = 400.5 \text{ kg} + 200 \text{ kg} = 600.5 \text{ kg}$	600.3 kg	600.3 kg - 600.5 kg = -0.2 kg	---	---	
替代载荷 3	---	599.3 kg	---	599.3 kg - 600.3 kg = -1.0 kg	$L_{\text{sub1}} + L_{\text{sub2}} + L_{\text{sub3}} = 3m_{\text{ref}} + \Delta I_1 + \Delta I_2 + \Delta I_3 = 600 \text{ kg} - 0.9 \text{ kg} + 1.4 \text{ kg} - 1.0 \text{ kg} = 599.5 \text{ kg}$	
测量载荷 4	$L_{T4} = L_{\text{sub1}} + L_{\text{sub2}} + L_{\text{sub3}} + m_{\text{ref}} = 599.5 \text{ kg} + 200 \text{ kg} = 799.5 \text{ kg}$	798.8 kg	798.8 kg - 799.5 kg = -0.7 kg	---	---	
替代载荷 4	---	799.2 kg	---	799.2 kg - 798.8 kg = 0.4 kg	$L_{\text{sub1}} + L_{\text{sub2}} + L_{\text{sub3}} + L_{\text{sub4}} = 4m_{\text{ref}} + \Delta I_1 + \Delta I_2 + \Delta I_3 + \Delta I_4 = 800 \text{ kg} - 0.9 \text{ kg} + 1.4 \text{ kg} - 1.0 \text{ kg} + 0.4 \text{ kg} = 799.9 \text{ kg}$	

表4 (续) 替代载荷扩展示例

测量载荷 5	$L_{T5} = L_{sub1} +$ $L_{sub2} + L_{sub3} +$ $L_{sub4} + m_{ref} =$ $799.9 \text{ kg} +$ $200 \text{ kg} =$ 999.9 kg	998.2 kg	998.2 kg - 999.9 kg = - 1.7 kg	---	---	
--------	--	-------------	---	-----	-----	---

B.3 不确定度的计算

B.3.1 如果试验载荷由 B.2 中的替代载荷组成, 并且试验载荷按照公式 (B.8) 规定, 则通过以下表达给出 $L_{Tn} = nm_{ref} + \Delta I_1 + \Delta I_2 + \dots \Delta I_{n-1}$ 的标准不确定度。

$$u_c^2(L_{Tn}) = n^2 u^2(m_{ref}) + 2[u^2(I_1) + u^2(I_2) + \dots u^2(I_{n-1})] \quad (\text{B.11})$$

B.3.2 如果试验载荷由 B.2 中的替代载荷组成, 并且试验载荷按照公式 (B.10) 规定, 则通过以下表达给出 $L_{Tn,k} = (n-1)m_{ref} + m_{ref,k} + \Delta I_1 + \Delta I_2 + \dots \Delta I_{n-1}$ 标准不确定度。

$$u_c^2(L_{Tn,k}) = [(n-1)u(m_{ref}) + u(m_{ref,k})]^2 + 2[u^2(I_1) + u^2(I_2) + \dots u^2(I_{n-1})] \quad (\text{B.12})$$

附录 C

电子天平测量结果不确定度评定（示例）

C.1 校准的具体条件见表 5

表 5 校准的具体条件

项目	说明
最大称量 (Max)	220 g
实际分度值 (d)	0.0001 g
校准员进行的调整	校准前进行调整（内置砝码）
校准期间的温度	在校准开始时测量为 21 °C，校准过程中温度变化不大于 1 °C；相对湿度为 55 %，校准过程中相对湿度变化不大于 10 %
试验载荷	有校准证书的 E ₂ 级标准砝码，与室内等温。

在进行不确定度的计算过程中应采用不舍入的精确值，最终的计算结果所产生的数值末位需与天平的分辨率保持一致。

C.2 试验载荷为 200 g 的示值误差标准不确定度

校准的基本公式为：

$$E = I - m_{\text{ref}}$$

其中合成标准不确定度：

$$u_c^2(E) = u^2(I) + u^2(m_{\text{ref}})$$

C.2.1 标准不确定度评定

C.2.1.1 空载示值的化整误差引起的标准不确定度 $u(\delta I_0)$

δI_0 表示空载示值的化整误差。其区间半宽度为 $d_0/2$ ；服从矩形分布，其标准不确定度为：

$$u(\delta I_0) = d_0/(2\sqrt{3}) = 0.1 \times 10^{-3} \text{ g}/(2\sqrt{3}) = 0.000029 \text{ g}$$

C.2.1.2 加载示值的化整误差引起的标准不确定度 $u(\delta I_{\text{digL}})$

δI_{digL} 表示加载时的示值误差。其区间半宽度为 $d_L/2$ ，服从矩形分布，其标准不确定度为：

$$u(\delta I_{\text{digL}}) = d_L/(2\sqrt{3}) = 0.1 \times 10^{-3} \text{ g}/(2\sqrt{3}) = 0.000029 \text{ g}$$

C. 2. 1. 3 重复性引起的标准不确定度 $u(\delta I_{\text{rep}})$

δI_{rep} 表示天平的重复性误差。测量值见表 6:

表 6 重复性测量值

次数	1	2	3	4	5	6
测量值(g)	200.0002	200.0002	200.0003	200.0001	200.0002	200.0001

$$u(\delta I_{\text{rep}}) = s(I_j) = 0.000075 \text{ g}$$

C. 2. 1. 4 载荷在不同位置引起的标准不确定度 $u(\delta I_{\text{ecc}})$

δI_{ecc} 表示由于试验载荷重心的偏心位置引起的误差，见表7。

表 7 载荷在不同位置的测量值

载荷在不同位置的测量 按第 7. 2. 6. 4 方法一 a) 进行	载荷的位置	试验载荷 100 g
	中间	100.0001 g
	左下方	100.0002 g
	左上方	100.0003 g
	右上方	100.0001 g
	右下方	100.0001 g
最大偏差	$ \Delta I_{\text{ecc}i} _{\text{max}}$	0.0002 g

按照8.3确定的最大差值，其标准不确定度为：

$$\begin{aligned} u(\delta I_{\text{ecc}}) &= I |\Delta I_{\text{ecc}i}|_{\text{max}} / (2L_{\text{ecc}} \sqrt{3}) \\ &= 200.0003 \text{ g} \times 0.0002 \text{ g} / (2 \times 100 \text{ g} \times \sqrt{3}) = 0.000115 \text{ g} \end{aligned}$$

C. 2. 1. 5 示值的标准不确定度通过以下公式获得

$$\begin{aligned} u^2(I) &= u^2(\delta I_0) + u^2(\delta I_{\text{digL}}) + u^2(\delta I_{\text{rep}}) + u^2(\delta I_{\text{ecc}}) \\ &= d_0^2/12 + d_l^2/12 + u^2(\delta I_{\text{rep}}) + u^2(\delta I_{\text{ecc}}) \\ &= (0.000029 \text{ g})^2 + (0.000029 \text{ g})^2 + (0.000075 \text{ g})^2 \\ &\quad + (0.000115 \text{ g})^2 = 0.000000021 \text{ g}^2 \end{aligned}$$

$$u(I) = \sqrt{u^2(I)} = \sqrt{0.000000021 \text{ g}^2} = 0.000144 \text{ g}$$

C.2.2 参考质量的标准不确定度如下所示：

$$m_{\text{ref}} = m_N + \delta m_c + \delta m_B + \delta m_D$$

C.2.2.1 标准砝码的标准不确定度 $u(\delta m_c)$

标准砝码校准证书中给出了砝码的折算质量、扩展不确定度 U 及包含因子 k ，其标准不确定度为：

$$u(\delta m_c) = U/k = 0.040 \text{ g} \times 10^{-3}/2 = 0.000020 \text{ g}$$

C.2.2.2 空气浮力引起的标准不确定度 $u(\delta m_B)$

因在校准之前已对天平进行了内部调整，查 JJG 99 表 1 得最大允许误差为 0.3 mg，其标准不确定度为：

$$u(\delta m_B) \approx |\text{MPE}|/4\sqrt{3} = 0.3 \text{ g} \times 10^{-3}/4\sqrt{3} = 0.000043 \text{ g}$$

C.2.2.3 砝码不稳定性引起的标准不确定度 $u(\delta m_D)$

砝码的不稳定性值将根据 JJG 99 选择最大允许误差 0.3 mg 的三分之一，服从矩形分布，其标准不确定度为：

$$u(\delta m_D) = |\text{MPE}|/3\sqrt{3} = 0.3 \text{ g} \times 10^{-3}/(3\sqrt{3}) = 0.000058 \text{ g}$$

C.2.2.4 参考质量的标准不确定度通过以下公式获得

$$\begin{aligned} u^2(m_{\text{ref}}) &= u^2(\delta m_c) + u^2(\delta m_B) + u^2(\delta m_D) \\ &= (0.000020 \text{ g})^2 + (0.000043 \text{ g})^2 + (0.000058 \text{ g})^2 \\ &= 0.0000000056 \text{ g}^2 \\ u(m_{\text{ref}}) &= \sqrt{u^2(m_{\text{ref}})} = \sqrt{0.0000000056 \text{ g}^2} \\ &= 0.000075 \text{ g} \end{aligned}$$

C.2.3 示值误差的合成标准不确定度 $u_c(E)$

误差的标准不确定度根据以下计算：

$$\begin{aligned} u_c^2(E) &= u^2(\delta I_0) + u^2(\delta I_{\text{digL}}) + u^2(\delta I_{\text{rep}}) + u^2(\delta I_{\text{ecc}}) \\ &\quad + u^2(\delta m_c) + u^2(\delta m_B) + u^2(\delta m_D) = 0.000000021 \text{ g}^2 \\ &\quad + 0.0000000056 \text{ g}^2 = 0.0000000263 \text{ g}^2 \\ u_c(E) &= \sqrt{u_c^2(E)} = \sqrt{0.0000000263 \text{ g}^2} = 0.000162 \text{ g} \end{aligned}$$

C.2.4 扩展不确定度

因重复性测量次数为 6 次, 因此需通过计算有效自由度确认 k_p 值。除重复性不确定度分量属于 A 类评定外, 其余的不确定度分量评定均属于 B 类评定并作为准确已知的来处理, 因此其自由度均趋向 ∞ 。则:

$$v_{\text{eff}} = \frac{u_c^4(E)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(E)}{v_i}} = \frac{u_c^4(E)}{\frac{u^4(\delta I_{\text{rep}})}{v_{\text{rep}}}} = \frac{(0.000162 \text{ g})^4}{\frac{(0.000075 \text{ g})^4}{6-1}} = 107$$

根据向下舍入原则选择有效自由度为 50, 查表 3 得包含因子 $k = 2.05$, 扩展不确定度为:

$$U_p = k_p u_c(E) = 2.05 \times 0.000162 \text{ g} = 0.000332 \text{ g}$$

由于天平实际分度值为 0.0001 g, 因此:

$$U_{95} = 0.0003 \text{ g}$$

C.3 校准范围内不同载荷点的测量不确定度

根据上述的方法, 对校准范围内的其他 5 个载荷点的测量不确定度进行评定, 如表 8 所示。

表 8 不确定度计算汇总表

数量或影响	载荷、显示值、误差、不确定度, 单位 g						分布/自由度	公式编号	计算公式
试验载荷标称值 m_N/g	0	50	100	150	200	220	--	--	--
载荷 m_{ref}/g	0.0000	50.0000	100.0001	150.0001	200.0001	220.0001	--	--	--
示值 I/g	0.0000	50.0002	100.0003	150.0002	200.0003	220.0004	--	--	--
示值误差 E/g	0.0000	0.0002	0.0002	0.0001	0.0002	0.0003	--	A. 1	$E = I - m_{ref}$
重复性 $u(\delta I_{rep})/g$	0.000075						--	A. 5	$u(\delta I_{rep}) = s(I)$
空载示值误差 $u(\delta I_0)/g$	0.000029						矩形分布/ ∞	A. 3	$u(\delta I_0) = d_0/(2\sqrt{3})$
加载时示值误差 $u(\delta I_{digL})/g$	0.000000	0.000029					矩形分布/ ∞	A. 4	$u(\delta I_{digL}) = dL/(2\sqrt{3})$
载荷在不同位置误差 $u(\delta I_{ecc})/g$	0.000000	0.000029	0.000058	0.000087	0.000115	0.000127	矩形分布/ ∞	A. 6	$u(\delta I_{ecc}) = I \Delta I_{ecc} _{max}/(2L_{ecc}\sqrt{3})$
示值不确定度 $u(I)/g$	0.000081	0.000090	0.000103	0.000122	0.000144	0.000153	--	A. 7	$u^2(I) = u^2(\delta I_0) + u^2(\delta I_{digL}) + u^2(\delta I_{rep}) + u^2(\delta I_{ecc})$
砝码误差 $u(\delta m_c)/g$	0.000000	0.000010	0.000010	0.000020	0.000020	0.000029	矩形分布/ ∞	A. 9	$u(\delta m_c) = U/k$
空气浮力修正值误差 $u(\delta m_B)/g$	0.000000	0.000014	0.000023	0.000038	0.000043	0.000055	矩形分布/ ∞	A. 12	$u(\delta m_B) \approx MPE /(4\sqrt{3})$
砝码不稳定性误差 $u(\delta m_D)/g$	0.000000	0.000019	0.000031	0.000050	0.000058	0.000073	矩形分布/ ∞	A. 15	$u(\delta m_D) = MPE /(3\sqrt{3})$

表 8 (续) 不确定度计算汇总表

参考质量不确定度 $u(m_{\text{ref}})/g$	0.000000	0.000026	0.000040	0.00066	0.00075	0.000096	--	A. 16	$u^2(m_{\text{ref}}) = u^2(\delta m_c) + u^2(\delta m_B) + u^2(\delta m_D)$
标准误差不确定度 $u(E)/g$	0.000081	0.000094	0.000111	0.000138	0.000162	0.000181	--	A. 17	$u_c^2(E) = u^2(I) + u^2(m_{\text{ref}}) = u^2(\delta I_0) + u^2(\delta I_{\text{digL}}) + u^2(\delta I_{\text{rep}}) + u^2(\delta I_{\text{ecc}}) + u^2(\delta m_c) + u^2(\delta m_B) + u^2(\delta m_D)$
ν_{eff} (自由度)	6	12	23	57	107	166	--	A. 19	$\nu_{\text{eff}} = \frac{u_c^4(E)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(E)}{\nu_i}}$
k (95.45%)	2.52	2.28	2.13	2.05	2.05	2.05	--	表 3	--
扩展不确定度 U/g	0.0002	0.0002	0.0002	0.0003	0.0003	0.0004	--	A. 18	$U_p(E) = k_p u_c(E)$

注：包含概率至少为 95%

附录 D

电子天平校准记录格式（示例）

仪器名称		仪器接收编号	
型号/规格		校准依据	
最大称量 (Max)		实际分度值 (d)	
仪器编号		温度	湿度
校准日期		型式批准标志 (CPA)	有 <input type="checkbox"/> 无 <input type="checkbox"/>
主要计量 标准器	名称	证书号/有效期	测量范围/ 准确度等级
生产厂商			
送校单位名称			
送校单位地址			
校准地点			

示值误差

测量点	载荷	示值	示值误差	u	k	U

重复性（试验载荷）

序号	1	2	3	4	5	6
示值						

标准偏差(s) _____

载荷在不同位置（试验载荷）

位置	中间	左下	左上	右上	右下
示值					

载荷在不同位置误差 _____

电子天平校准证书内页（示例）

证书编号：xxxxxx

中国合格评定国家认可委员会实验室认可证书号：No. CNAS Lxxxx				
本次校准所依据的技术规范（代号、名称） JJFxxxx-xxxx 《电子天平校准规范》				
校准环境条件及地点：				
温度：		地点：		
湿度：		其他：		
校准使用的计量标准装置				
名称	测量范围	不确定度/ 准确度等级	证书编号/校准机构	证书有效期至

证书编号：xxxxxx

校准结果

 $Max =$ $d =$

测量点 ()	载荷 ()	示值 ()	示值误差 ()	不确定度 U ()	包含因子 k

校准结果内容结束

申明：

1. 本实验室仅对加盖“XXX校准专用章”的完整证书负责。
2. 本证书提供的结果仅对本次所校仪器有效。
3. 未经本实验室许可，部分采用本证书内容无效。