



中华人民共和国工业和信息化部
有色金属计量技术规范

JJF（有色金属）011—20XX

金属粉末振实密度测定仪校准规范
(讨论稿)

Calibration Specification for Metal powder uncompacted density tester

20xx-xx-xx 发布

20xx-xx-xx 实施

中华人民共和国工业和信息化部 发布

金属粉末振实密度测定仪 校准规范

Calibration Specification for Metal
powder uncompacted density tester

JJF（有色金属）011—20XX

归口单位：中国有色金属工业协会

主要起草单位：厦门厦钨新能源材料股份有限公司

参加起草单位：

本规范主要起草人：

本规范委托有色金属行业计量技术委员会负责解释

目录

引 言 II

1 范围 1

2 引用文件 1

3 概述 1

4 计量特性 2

4.1 量筒容量允差 2

4.2 振幅 2

4.3 振动次数 2

5 校准条件 2

5.1 环境条件 2

5.2 校准项目和测量标准 2

6 校准项目和校准方法 2

6.1 校准项目 2

6.2 校准方法 3

7 校准结果表达 3

8 复校时间间隔 4

附录 A 金属粉末振实密度测定仪校准记录参考格式 5

附录 B 金属粉末振实密度测定仪校准记录参考格式 6

附录 C 量筒示值误差的测量不确定度评定示例 7

附录 D 振幅次数示值误差的测量不确定度评定示例 12

附录 E 振动次数示值误差的测量不确定度评定示例 14

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》和JJF 1059.1《测量不确定度评定与表示》共同构成支撑校准规范制修订工作的基础性系列规范。

本规范参考了 GB/T 5162-2021《金属粉末振实密度的测定》、GB/T 31057.2-2018《颗粒材料 物理性能试验第2部份：振实密度测量》的技术内容。

本规范为首次发布。

金属粉末振实密度测定仪校准规范

1 范围

本规范适用于100g以下范围金属粉末振实密度测定仪（以下简称振实密度测定仪）的校准。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

GB/T 5162 金属粉末 振实密度的测定

GB/T 31057.2 颗粒材料 物理性能测试第2部份：振实密度测量

JJG 196 常用玻璃容器检定规程

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 概述

振实密度测定仪是测试金属粉末材料振实密度性能的试验仪器，振实密度测定仪工作原理是将装有一定质量的粉末的刻度量筒固定在机械振动装置上，振动电机带动机械振动装置垂直上下振动，刻度量筒随机械振动装置而发生有节拍的振动，随着振动次数的增加，量筒内的粉末逐渐被振实，振动次数达到设定的次数或设定的时间后，机械振动装置停止振动，从刻度量筒上读出粉末的体积，根据密度的定义，计算出振实后的密度。

振实密度测定仪结构示意图如图1所示。

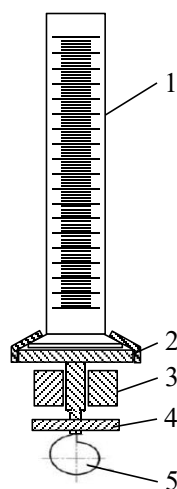


图1 金属粉末振实密度测定仪装置示意图。

1—量筒；2—带有导杆的夹座；3—铁砧（钢砧）；4—凸轮

4 计量特性

4 计量特性

4.1 量筒容量允差

5mL $\pm$ 0.05mL、10mL $\pm$ 0.10mL、25mL $\pm$ 0.25mL。

4.2 振幅

3mm $\pm$ 0.2mm。

4.3 振动次数

(250 $\pm$ 15)次/分钟

5 校准条件

5.1 环境条件

试验机应在（25 $\pm$ 5）℃、相对湿度不大于80%的条件下校准。校准环境周围无腐蚀性介质，附近无影响实验结果的振源。

5.2 校准项目和测量标准

校准项目和测量标准见表1。

表 1 校准项目和测量标准

校准项目	测量标准	技术指标
量筒体积	电子天平	测量范围：120g，精度等级 I 级
振幅	千分表	测量范围：（0~12）mm，最大允许误差（MPE）： $\pm$ 0.012mm
振动次数	数字转速计	测量范围：（20~8000）r/min，精度等级 0.5 级

6 校准项目和校准方法

6.1 校准项目

校准项目见表 2。

表 2 校准项目

序号	校准项目	说明
1	量筒容量示值误差	—
2	振幅示值误差	—
3	振动次数示值误差	—

6.2 校准方法

6.2.1 通用技术要求

被校仪器应有完整的下列标识：仪器名称、型号、出厂编号、制造厂商、制造日期等。

6.2.2 量筒容量示值误差

玻璃量筒的校准参照JJG 196《常用玻璃量器检定规程》中7.3.5.1衡量法校准。

6.2.3 振幅示值误差

将千分表安装在固定支架上,使千分表测量杆的测量面垂直放置于金属粉末振实密度测定仪夹座平面上,将千分表归零,启动金属粉末振实密度测定仪,读取千分表测量数据一分钟以最大值为单次的示值,以重复测量三次算术平均值作为振实密度测定仪振幅示值。

计算方法见公式(1)。

$$\Delta l = L - \bar{l} \quad (1)$$

式中:

Δl ——振幅示值误差, mm;

L ——振幅标称值, mm;

$\bar{l}$ ——振幅算数平均值, mm。

6.2.3 振动次数示值误差

6.2.3.1 校准点为250次/分钟,也可依据客户要求进行选择。

6.2.3.2 将反光带贴在金属粉末振实密度测定仪振动装置侧面,打开数字转速计开关,使用FUNC键,将模式调整为RPM光学式测量,将数字转速计对准反光带,且两者之间的距离保持在500mm以内。

6.2.3.3 启动金属粉末振实密度测定仪,按测量键激活红外光束,重复校准3次。

6.2.3.4 振动次数示值误差

$$\Delta m = M - \bar{m} \quad (2)$$

式中:

Δm ——振动次数示值误差, 次;

M ——振动次数标称值, 次;

$\bar{m}$ ——振动次数算数平均值, 次。

7 校准结果表达

经校准的金属粉末振实密度测定仪出具校准证书，校准结果应在校准证书上反映，校准证书至少应包括以下信息：

- a) 标题：“校准证书”；
 - b) 实验室的名称和地址；
 - c) 实施校准活动的地点，包括客户设施、实验室固定设施以外的地点；
 - d) 证书的唯一性标识（如编号），每页及总页数的标识；
 - e) 客户的名称和联络信息；
 - f) 被校对象的描述和明确标识；
 - g) 进行校准活动的日期，如果与校准结果的有效性和应用有关时，应说明被校对象的接收日期和证书发布日期；
 - h) 校准所依据的技术规范的标识，包括名称及代号；
 - i) 本次校准所用的测量标准和溯源性及有效性说明；
 - j) 校准环境的描述；
 - k) 校准结果及其测量不确定度的说明（给出整个测量范围校准结果测量不确定度的最大值）；
 - l) 对校准规范偏离的说明；
 - m) 校准证书签发人的签名、职务或等效标识，以及签发日期；
 - n) 校准人和核验人签名；
 - o) 校准结果仅对被校对象有效的声明；
 - p) 未经校准实验室书面批准，不得部分复制校准证书的声明。
- 校准原始记录参考格式见附录A，校准证书内页参考格式见附录B。

8 复校时间间隔

复校时间间隔的长短取决于其使用情况，使用单位可根据实际使用情况自主决定复校的时间，建议复校时间间隔为1年。

附录 A

金属粉末振实密度测定仪校准记录参考格式

证书编号：_____接收日期：_____校准日期：_____

发布日期：_____委托单位：_____校准依据：_____

被校设备信息					
器具名称			出厂编号		
型号/规格			设备编号		
制造厂			环境条件		°C %RH
校准地点					
测量标准信息					
名称	型号	设备编号	证书编号	准确度等级/ 最大允许误差/不确定度	有效期
校准结果					
1 外观检查					
2 量筒容量校准					
标称值（mL）		实测值（mL）			平均值（mL）
25ml	校准点	1	2	3	
扩展不确定度：					
3 振动幅度校准					
振幅（mm）		实测值（mm）			平均值（mm）
		1	2	3	
扩展不确定度：					
4 振动次数校准					
振动次数（次/分）		实测值（次/分）			平均值（次/分）
		1	2	3	
扩展不确定度：					

附录 B

金属粉末振实密度测定仪校准证书内页参考格式

被校设备信息					
器具名称			出厂编号		
型号/规格			设备编号		
制造厂			环境条件		°C %RH
校准地点					
测量标准信息					
名称	型号	设备编号	证书编号	准确度等级/ 最大允许误差 /不确定度	有效期
校准结果					
1、 外观					
2、 量筒容量校准					
校准点 (mL)					
容量偏差(mL)					
扩展不确定度:					
3 、 振幅校准					
标称值 (mm)			示值误差 (mm)		
扩展不确定度:					
4 、 振动次数校准					
标称值 (次/分)			示值误差 (次/分)		
扩展不确定度:					

附录 C

金属粉末振实密度测定仪

量筒示值误差的测量不确定度评定示例

C.1 概述

C.1.1 校准依据

本规范。

C.1.2 测量标准

电子天平：测量范围(0~120)g，精度等级 I 级。数字测温仪，分辨率 0.1℃。

C.1.3 被校对象

25mL量筒。

C.1.4 校准方法

采用衡量法校准量筒实际容量，测得纯水水温并将纯水装入被校量筒里，装至量筒被校点刻度凹液面处，然后用电子天平称量被校量筒的质量，纯水温度对应的 $K(t)$ 值与被校量筒质量之积为实际容量，被校量筒示值误差为实际容量与被校量筒标称值之差。

C.2 测量模型

量筒校准的测量模型见公式（C.1）。

$$V_{20} = m \cdot K(t) \quad (\text{C.1})$$

$$K(t) = \frac{\rho_B - \rho_A}{\rho_B(\rho_w - \rho_A)} [1 + \beta(20 - t)] \quad (\text{C.2})$$

式中：

V_{20} ——标准温度在20℃时的被检量筒的实际容量，mL；

m ——被检玻璃容器内所能容纳水的表观质量，g；

$K(t)$ ——系数；

ρ_B ——砝码密度，取8.00g/cm³；

ρ_A ——测定时实验室内的空气密度，取0.0012g/cm³；

ρ_w ——蒸馏水 t ℃的密度，g/cm³；

β ——被检玻璃容器的体胀系数，℃⁻¹；

t ——校准时蒸馏水的温度，℃；

C.2 测量不确定度的来源分析

量筒容量测量不确定度的来自输入量 m 和输入量 $K(t)$ ，其中输入量 m 主要影响因素有：

- a) 量筒重复性引入的不确定度 $u(m_1)$ ；
- b) 电子天平最大允许误差引入的不确定度 $u(m_2)$ ；
- c) 被测液面观察与调定引入的不确定度 $u(m_3)$ ；

其中输入量 $K(t)$ 主要影响因素有：

- a) 温度引入的不确定度 $u(K_1)$ ，包括体胀系数和温度测量引入的不确定度；
- b) 密度引入的不确定度 $u(K_2)$ ，包括砝码密度、空气密度、水的密度；

C.3 测量不确定度评定

C.3.1 由上述分析可知， $u(m)$ 引入量分别由 $u(m_1)$ 、 $u(m_2)$ 、 $u(m_3)$ 组成；

C3.1.1量筒重复性引入的不确定度分量 $u(m_1)$

根据实验方法要求，校准点25mL点进行测量，连续重复测量10次，测量数据见表C.1。

表C.1量筒重复性测量数据

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量值(g)	24.6882	24.6857	24.6781	24.6952	24.6863	24.6891	24.6872	24.6747	24.6839	24.6823
标准偏差	$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = 0.0058g$									

每次测量以2次测量算术平均值作为测量结果，则 u_1 为：

$$u(m_1) = \frac{s}{\sqrt{2}} = \frac{0.0058}{\sqrt{2}} = 0.00408g$$

C.3.1.2 由电子天平最大允许误差引入的不确定度分量 $u(m_2)$

本次使用的电子天平量程为（0~120）g，分度值0.1mg，其在25g称量点最大允许误差为：±0.5mg，则区间半宽为 $a = 0.5mg$ ，假设为均匀分布，取 $k = \sqrt{3}$ ，则由电子天平最大允许误差引入的不确定度分量 u_2 为：

$$u(m_2) = \frac{s}{\sqrt{3}} = \frac{0.5}{\sqrt{3}} = 0.00029g$$

C.3.1.3 由被测量器液面观察与调定引入的不确定度分量 $u(m_3)$

被测量器液面观察与调定引入的不确定度，一般校准人员在调定液面时产生的读数误

差 h 估计为0.2mm, 即液面观察与调定引入的不确定度为 $u(m_3) = 1/4 \pi D^2 h$, 25mL量筒的内径约为: 13.5mm, 假设为均匀分布, 取 $k = \sqrt{3}$, 则由被测量器液面观察与调定引的不确定度分量 u_3 为:

$$u(m_3) = \frac{0.25\pi D^2 h}{\sqrt{3}} = \frac{0.25 \times 3.14 \times 13.5^2 \times 0.2}{\sqrt{3}} \times \frac{1}{1000} = 0.01652 \text{ cm}^3$$

即 $u(m_3)=0.01652\text{g}$

由于 $u(m_1)$ 、 $u(m_2)$ 、 $u(m_3)$ 各自独立, 则:

$$u(m) = \sqrt{u^2(m_1) + u^2(m_2) + u^2(m_3)} = \sqrt{0.00408^2 + 0.00029^2 + 0.01652^2} = 0.01701 \text{ g}$$

C3.2 由上述分析可知, $u(K)$ 的引入量分别由 $u(K_1)$ 、 $u(K_2)$ 组成;

C3.2.1 由温度引入的不确定度分量 $u(K_1)$

温度引入的不确定度影响因素包括体胀系数和温度测量, 见下式:

$$D_t = 1 + \beta(20 - t)$$

(1) 体积膨胀系数引入不确定度

体积膨胀系数引入的不确定度主要影响因素是室温变化, 根据 JJG196-2006《常用玻璃量器》检定规程, 室温变化不大于 $1^\circ\text{C}/\text{h}$, 因为 $\beta = 1.0 \times 10^{-5}^\circ\text{C}^{-1}$, 那么引入的误差约为 $1.0 \times 10^{-5} \text{ cm}^3/\text{g}$, 按照均匀分布考虑, 则:

$$u_\beta = \frac{1.0 \times 10^{-5}}{\sqrt{3}} = 0.58 \times 10^{-5} \text{ cm}^3/\text{g}$$

(2) 温度测量引入的不确定度

本次测量使用的数字温度计扩展不确定度: $U=0.20^\circ\text{C}$, $k=2$, 实测水温为 24.5°C , 根据 JJG196-2006《常用玻璃量器》检定规程附表, 在 $(24.4\sim 24.6)^\circ\text{C}$ 范围内对应的 $K(t)$ 值变化范围为 $(1.00381\sim 1.00386) \text{ cm}^3/\text{g}$, 波动幅度为 $0.00005 \text{ cm}^3/\text{g}$, 按均匀分布处理, 则

$$u(t) = \frac{0.00005}{\sqrt{3}} = 2.9 \times 10^{-5} \text{ cm}^3/\text{g}$$

因为 $u(\beta)$ 、 $u(t)$ 各自独立, 所以:

$$u(K_1) = \sqrt{u(\beta)^2 + u(t)^2} = \sqrt{(0.58 \times 10^{-5})^2 + (2.9 \times 10^{-5})^2} = 2.91 \times 10^{-5} \text{ cm}^3/\text{g}$$

C3.2.2 由密度引入的不确定度分量 $u(K_2)$

密度引入的不确定度的影响因素包括砝码密度、空气密度、水的密度, 见下式:

$$D_\rho = \frac{\rho_B - \rho_A}{\rho_B (\rho_w - \rho_A)}$$

ρ_B 砝码密度, 取 $8.00\text{g}/\text{cm}^3$ 为砝码密度; ρ_A 为空气密度, 取 $0.0012\text{g}/\text{cm}^3$; ρ_w 为蒸馏

水密度, 水温 24.5℃时水的密度为 0.997107 g/cm³

(1) 砝码密度引入的相对标准不确定度

天平用 E₂ 等级砝码检定, 砝码密度的最大允许误差为 0.2mg/cm³, 按照均匀分布考虑,

$k = \sqrt{3}$, 则砝码密度不确定度为:

$$u(\rho_B) = \frac{0.0002}{\sqrt{3}} = 0.000116 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_B \text{ 的灵敏系数为: } c(\rho_B) = \frac{\rho_A}{\rho_B^2(\rho_w - \rho_A)} = 1.9 \times 10^{-5} (\text{g/cm}^3)^{-2}$$

砝码密度引入的标准不确定度为:

$$u(\rho_B) = c(\rho_B) \cdot u(\rho_B) = 2.2 \times 10^{-9} \text{ cm}^3/\text{g}$$

(2) 空气密度引入的标准不确定度

空气密度最大允许误差为 $\pm 1.2 \times 10^{-4} \text{ g/cm}^3$, 按照均匀分布考虑, 空气密度的不确定度为:

$$u(\rho_A) = \frac{0.00012}{\sqrt{3}} = 6.9 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_A \text{ 的灵敏系数为: } c(\rho_A) = \frac{\rho_B - \rho_w}{\rho_B(\rho_w - \rho_A)^2} = 0.9 (\text{g/cm}^3)^{-2}$$

空气密度引入的标准不确定度为:

$$u(\rho_A) = c(\rho_A) \cdot u(\rho_A) = 6.2 \times 10^{-5} \text{ cm}^3/\text{g}$$

(3) 水的密度引入的标准不确定度

因为在 24.5℃时, 0.997107 g/cm³, 水密度测量的最大允许误差为 $\pm 0.01\%$, 按照均匀分布考虑 $k = \sqrt{3}$, 水密度的不确定度为

$$u(\rho_w) = \frac{0.997107 \times 0.01}{\sqrt{3}} = 5.7 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_w \text{ 的灵敏系数为: } c(\rho_w) = -\frac{\rho_B - \rho_A}{\rho_B(\rho_w - \rho_A)^2} = -1.01 (\text{g/cm}^3)^{-2}$$

水密度引入的标准不确定度为:

$$u(\rho_w) = |c(\rho_w)| \cdot u(\rho_w) = 5.8 \times 10^{-5} \text{ cm}^3/\text{g}$$

因为 $u(\rho_B)$ 、 $u(\rho_A)$ 、 $u(\rho_w)$ 各自独立, 所以

$$\begin{aligned} u(K_2) &= \sqrt{u^2(\rho_B) + u^2(\rho_A) + u^2(\rho_w)} = \sqrt{(2.2 \times 10^{-9})^2 + (6.2 \times 10^{-5})^2 + (5.8 \times 10^{-5})^2} \\ &= 8.5 \times 10^{-5} \text{ cm}^3/\text{g} \end{aligned}$$

由于 $u(K_1)$ 、 $u(K_2)$ 、各自独立, 则:

$$u(m) = \sqrt{u^2(K_1) + u^2(K_2)} = \sqrt{(2.91 \times 10^{-5})^2 + (8.5 \times 10^{-5})^2} = 9.0 \times 10^{-5} \text{ cm}^3/\text{g}$$

C.5 合成标准不确定度计算

C.5.1 灵敏系数

灵敏系数为：

$$c_1 = \frac{\partial \Delta V_{20}}{\partial m} = K(t)$$

$$c_2 = \frac{\partial \Delta V_{20}}{\partial K(t)} = m$$

C.5.2 标准不确定度汇总表

输入量的标准不确定度汇总于 C.2

表C.2 标准不确定度汇总表

标准不确定度分量	不确定度来源	标准不确定度	C_i	$ C_i u(x_i)$
$u(m)$		0.01701		
$u(m_1)$	测量重复性引入的标准不确定度	0.00408		
$u(m_2)$	电子天平称量引入的不确定度	0.00029	1.00376 cm ³ / g	0.017cm ³
$u(m_3)$	液面观察与调定引入的不确定度	0.01652		
$u(K)$		9.0×10^{-5}		
$u(K_1)$	温度引入的标准不确定度	2.91×10^{-5}	24.68507g	0.0022cm ³
$u(K_2)$	密度引入的标准不确定度	8.5×10^{-5}		

合成不确定度计算公式为：

$$u_c = \sqrt{c_1^2 \cdot u^2(m) + c_2^2 \cdot u^2(K)} = \sqrt{0.017^2 + 0.022^2} = 0.017\text{cm}^3 = 0.017\text{mL}$$

C.6 扩展不确定度计算

取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度为：

$$U = k \cdot u_c = 0.018 \times 2 = 0.03\text{mL}$$

附录 D

金属粉末振实密度测定仪

振幅示值误差的测量不确定度评定示例

D.1 概述

D.1.1 校准依据

本规范。

D.1.2 测量标准

数显千分表：测量范围(0~12)mm，最大允许误差（MPE）：±0.012mm。

D.1.3 被校对象

金属粉末振实密度测定仪。

D.1.4 校准方法

将数显千分表安装在固定支架上，使千分表测量杆的测量面垂直放置于金属粉末振实密度测定仪夹座平面上，将千分表归零，启动金属粉末振实密度测定仪，读取千分表测量数据一分钟，以最大值的算术平均值作为金属粉末振实密度测定仪振幅示值。

D.1.5 测量模型

振幅校准的测量模型见公式（D.1）。

$$\Delta l = L - \bar{l} \quad (\text{D.1})$$

式中：

Δl ——振幅示值误差，mm；

L ——振幅标称值，mm；

$\bar{l}$ ——最大值振幅算数平均值，mm。

D.1.6 灵敏系数

灵敏系数为：

$$c_1 = \frac{\partial \Delta l}{\partial L} = 1, \quad c_2 = \frac{\partial \Delta l}{\partial \bar{l}} = -1$$

D.2 测量不确定度的来源分析

测量不确定度的来源有：

1) 数显千分表重复性引入的不确定度 u_1 ；

- 2) 数显千分表分辨力引入的不确定度 u_2 ;
- 3) 数显千分表最大允许误差引入的不确定度 u_3 ;

D.3 测量不确定度评定

D.3.1 由数显千分表重复性引入的不确定度分量 u_1

根据实验方法要求，在振幅为3mm点进行测量，连续重复测量10次，测量数据见表D.1。

表D.1 数显千分尺重复性测量数据

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量值 (mm)	3.117	3.091	3.023	2.992	3.081	2.982	3.073	3.039	3.133	3.174
标准偏差	$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = 0.062\text{mm}$									

根据6.2.3可知，每次校准对振幅进行3次测量则 u_1 为：

$$u_1 = \frac{s}{\sqrt{3}} = \frac{0.062}{\sqrt{3}} = 0.036\text{mm}$$

D.3.2 由数显千分表分辨力引入的不确定度分量 u_2

数显千分表的实际分度值为0.001mm，则区间半宽为 $a = \frac{\delta}{2} = 0.0005\text{mm}$ ，假设为均匀分布，取 $k = \sqrt{3}$ ，则由千分尺电分辨力引入的不确定度分量 u_2 为：

$$u_3 = \frac{s}{\sqrt{3}} = \frac{0.0005}{\sqrt{3}} = 0.00035\text{mm}$$

D.3.3 由数显千分表最大允许误差引入的不确定度分量 u_3

数显千分表的最大允许误差为0.012mm，则区间半宽为 $a = \frac{\delta}{2} = 0.006\text{mm}$ ，假设为均匀分布，取 $k = \sqrt{3}$ ，则由千分尺电分辨力引入的不确定度分量 u_3 为：

$$u_4 = \frac{s}{\sqrt{3}} = \frac{0.006}{\sqrt{3}} = 0.0034\text{mm}$$

D.5 合成标准不确定度计算

合成不确定度计算公式为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} = 0.036\text{mm}$$

D.6 扩展不确定度计算

取包含因子 $k = 2$ ，扩展不确定度为：

$$U = k \cdot u_c = 0.072\text{mm}$$

附录 E

金属粉末振实密度测定仪

振动次数示值误差的测量不确定度评定示例

E.1 概述

E.1.1 校准依据

本规范。

E.1.2 测量标准

数字转速计。测量范围：（20~8000）r/min，精度等级 0.5 级。

E.1.3 被校对象

金属粉末振实密度测定仪。

E.1.4 校准方法

将反光带贴在金属粉末振实密度测定仪振动装置侧面，打开数字转速计开关，使用 FUNC 键，将模式调整为 RPM 光学式测量，将数字转速计对准反光带，且两者之间的距离保持在 500mm 以内。启动金属粉末振实密度测定仪，按测量键激活红外光束，重复校准 3 次。

E.1.5 测量模型

振动次数校准的测量模型见公式（E.1）。

$$\Delta m = M - \bar{m} \quad (\text{E.1})$$

式中：

Δm ——振动次数示值误差，次/分；

M ——振动次数标称值，次/分；

$\bar{m}$ ——振动次数算数平均值，次/分。

E.1.6 灵敏系数

灵敏系数为：

$$c_1 = \frac{\partial \Delta m}{\partial M} = 1, \quad c_2 = \frac{\partial \Delta m}{\partial \bar{m}} = -1$$

E.2 测量不确定度的来源分析

测量不确定度的来源有：

- 1) 被校金属粉末振实密度测定仪分辨力引入的不确定度 u_1
- 2) 数字转速计重复性引入的不确定度 u_2 ;
- 3) 数字转速计分辨力引入的不确定度 u_3 ;
- 4) 数字转速计最大允许误差引入的不确定度 u_4 。

E.3 测量不确定度评定

E.3.1 被校金属粉末振实密度测定仪分辨力引入的不确定度 u_1

被校金属粉末振实密度测定仪振动次数为 $m=1$ ，区间半宽 $a = \frac{m}{2} = 0.5$ 次，假设为均匀分布，取 $k = \sqrt{3}$ ，则由数字转速计分辨力引入的不确定度分量 u_1 为：

$$u_1 = \frac{a}{k} = \frac{0.5}{\sqrt{3}} = 0.289 \text{次/分}$$

E.3.2 由数字转速计重复性引入的不确定度分量 u_2

根据实验方法要求，在振动次数为250次/分进行测量，连续重复测量3次，测量数据见表E.1。

表E.1 数字转速计重复性测量数据

测量次数	1	2	3
测量值（次/分）	245.5	245.8	246.9
标准偏差	$s = \frac{R}{C} = 0.828 \text{ 次/分}$		

根据6.2.3可知，每次校准对振幅进行3次测量 u_2 为：

$$u_2 = \frac{s}{\sqrt{3}} = \frac{0.828}{\sqrt{3}} = 0.478 \text{次/分}$$

E.3.3 由数字转速计分辨力引入的不确定度分量 u_3

数字转速计分度值为 $r=0.1$ 次/分，区间半宽 $a = \frac{r}{2} = 0.05$ 次/分，假设为均匀分布，取 $k = \sqrt{3}$ ，则由数字转速计分辨力引入的不确定度分量 u_3 为：

$$u_3 = \frac{a}{k} = \frac{0.05}{\sqrt{3}} = 0.029 \text{次/分}$$

E.3.4 由数字转速计最大允许误差引入的不确定度分量 u_4

根据数字转速计说明书可知，仪器最大允许误差为 $\pm 0.5\%$ ，区间半宽为 $a=0.5\%$ ，假设为均匀分布，取 $k = \sqrt{3}$ ，则：

$$u_4 = \frac{a}{k} = \frac{0.5\%}{\sqrt{3}} = 0.0029$$

因数字转速计最大允许误差所引入的不确定度远小于重复性所引入的不确定度,最大允许误差所引入的不确定度忽略不计。

E.5 合成标准不确定度计算

合成不确定度计算公式为:

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} = \sqrt{0.289^2 + 0.478^2 + 0.029^2} = 0.56 \text{次/分}$$

E.6 扩展不确定度计算

取包含因子 $k = 2$, 扩展不确定度为:

$$U = k \cdot u_c = 2 \times 0.56 = 1.1 \text{次/分} \approx 1 \text{次/分}$$
