

湖北省计量技术规范规程制修订

《摆锤敲入仪校准规范》  
不确定度评定报告

武汉市计量测试检定（研究）所

2024 年月

## 锤头质量测量结果的不确定度评定

### A.1 概述

A.1.1 被测对象：摆锤敲入仪的锤头质量，技术要求： $(2 \pm 0.02)$  kg。

A.1.2 测量标准：电子天平，测量范围（5~34100）g，准确度等级 Ⅱ 级。

A.1.3 测量方法：依据 7.2 所述方法对被摆锤敲入仪的锤头质量进行测量。

### A.2 测量模型

摆锤敲入仪锤头质量的测量模型：

$$M = \overline{M_i} \quad (\text{A.1})$$

式中：

$M$ ——锤头质量的测得值，kg；

$M_i$ ——锤头质量的单次测量值，kg。

### A.3 不确定度来源

a) 电子天平引入的标准不确定度  $u(M_s)$ ；

b) 测量重复性引入的标准不确定度  $u(M_R)$ ；

c) 电子天平的分辨力引入的标准不确定度  $u'(M_R)$ 。

### A.4 标准不确定度评定

#### A.4.1 电子天平引入的标准不确定度 $u(M_s)$

本次测量中测量标准是一台测量范围（5~34100）g，准确度等级 Ⅱ 级的电子天平，其在 2kg 测量点的最大允许误差为  $\pm 0.5$ g，按均匀分布，其区间半宽  $a = 0.5$ g，取  $k = \sqrt{3}$ 。则电子天平引入的标准不确定度  $u(M_s)$  为：

$$u(M_s) = \frac{a}{k} = 0.29\text{g} \quad (\text{A.2})$$

#### A.4.2 测量重复性引入的标准不确定度 $u(M_R)$

对被测摆锤敲入仪的锤头质量重复测量 3 次，记录锤头质量 3 次示值分别为 2.0016、2.0016、2.0014（单位：kg）。校准过程中，取 3 次测量值的平均值作

为测量结果，用极差法计算，则测量重复性引入的标准不确定度  $u'(M_R)$  为：

$$u'(M_R) = \frac{s(M_R)}{\sqrt{n}} = \frac{M_{i\max} - M_{i\min}}{C_n \times \sqrt{n}} = 0.068\text{g} \quad (\text{A. 3})$$

式中：

$M_{i\max}$  —— 锤头质量的单次测量值的最大值，kg；

$M_{i\min}$  —— 锤头质量的单次测量值最小值，kg；

$n$  —— 测量次数，取  $n = 3$ ；

$C_n$  —— 极差系数， $n = 3$  时， $C_n$  取 1.69。

#### A. 4. 3 分辨力引入的标准不确定度 $u'(M_R)$

测量标准电子天平的分辨力为 0.1g，按均匀分布， $k = \sqrt{3}$ ，则电子天平分辨力引入的标准不确定度  $u'(M_R)$  为：

$$u'(M_R) = \frac{r}{2\sqrt{3}} = 0.029\text{g} \quad (\text{A. 4})$$

式中： $r$  —— 测量标准电子天平的分辨力，g。

#### A. 5 合成标准不确定度评定

各个分量的标准不确定度汇总见表 A. 1。

表 A. 1 各个分量的标准不确定度汇总见表

| 标准不确定度分量 $u(x_i)$ | 标准不确定度来源 | 标准不确定度类型 | 标准不确定度 | 灵敏系数 $c(x_i)$ | $ c(x_i)  \times u(x_i)$ |
|-------------------|----------|----------|--------|---------------|--------------------------|
| $u(M_s)$          | 电子天平引入   | B类       | 0.29g  | 1             | 0.29g                    |
| $u(M_R)$          | 测量重复性引入  | A类       | 0.068g | 1             | 0.068g                   |
| $u'(M_R)$         | 分辨力引入    | B类       | 0.029g | 1             | 0.029g                   |

由测量重复性引入的标准不确定度  $u(M_R)$  和分辨力引入的标准不确定度

$u'(M_R)$  两者取大，所以合成不确定度  $u_c(M)$  按公式 A.4 计算：

$$u_c(M) = \sqrt{c^2(M_s) u^2(M_s) + c^2(M_R) u^2(M_R)} = 0.3g \quad (\text{A.5})$$

#### A.6 扩展不确定度评定

取包含因  $k = 2$ ，则摆锤敲入仪的锤头质量测量结果的扩展不确定度为：

$$U = k \times u_c(M) = 0.6g \quad (\text{A.6})$$

## 摆杆直径测量结果的不确定度评定

### B.1 概述

B.1.1 被测对象：摆锤敲入仪的摆杆直径，技术要求： $(10 \pm 0.1)$  mm。

B.1.2 测量标准：数显卡尺，测量范围（0~200）mm，分辨力 0.01mm。

B.1.3 测量方法：用数显卡尺直接测量摆杆直径，取同一位置、同一方向重复测量 3 次。

### B.2 测量模型

摆锤敲入仪摆杆直径的测量模型：

$$D = \overline{D_i} \quad (\text{B.1})$$

式中：

$D$ ——摆杆直径的测得值，mm；

$D_i$ ——摆杆直径的单次测量值，mm。

### B.3 不确定度来源

a) 数显卡尺引入的标准不确定度  $u(D_s)$ ；

b) 测量重复性引入的标准不确定度  $u(D_R)$ ；

c) 数显卡尺的分辨力引入的标准不确定度  $u'(D_R)$ 。

### B.4 标准不确定度评定

#### B.4.1 数显卡尺引入的标准不确定度 $u(D_s)$

本次测量中测量标准是一把测量范围（0~200）mm，分辨力 0.01mm 的数显卡尺，0~70mm 内，最大允许误差为  $\pm 0.02$ mm，按均匀分布，其区间半宽  $a = 0.02$ mm，取  $k = \sqrt{3}$ 。则数显卡尺引入的标准不确定度  $u(D_s)$  为：

$$u(D_s) = \frac{a}{k} = 0.012\text{mm} \quad (\text{B.2})$$

#### B.4.2 测量重复性引入的标准不确定度 $u(D_R)$

对被测摆锤敲入仪同一位置、同一方向重复测量 3 次，记录摆杆直径 3 次示值分别为 9.95、9.93、9.94（单位：mm）。实际校准过程中，取单次测量值作为

测量结果，用极差法计算，则测量重复性引入的标准不确定度  $u'(D_R)$  为：

$$u'(D_R) = s(D_R) = \frac{D_{i\max} - D_{i\min}}{C_n} = 0.012\text{mm} \quad (\text{B. 3})$$

式中：

$D_{i\max}$  ——摆杆直径的单次测量值的最大值，mm；

$D_{i\min}$  ——摆杆直径的单次测量值最小值，mm；

$C_n$  ——极差系数， $n=3$  时， $C_n$  取 1.69。

#### B. 4. 3 分辨力引入的标准不确定度 $u'(D_R)$

测量标准数显卡尺的分辨力为 0.01mm，按均匀分布， $k = \sqrt{3}$ ，则数显卡尺分辨力引入的标准不确定度  $u'(D_R)$  为：

$$u'(M_R) = \frac{r}{2\sqrt{3}} = 0.003\text{mm} \quad (\text{B. 4})$$

式中： $r$ ——测量标准数显卡尺的分辨力，mm。

#### B. 5 合成标准不确定度评定

各个分量的标准不确定度汇总见表 B. 1。

表 B. 1 各个分量的标准不确定度汇总表

| 标准不确定度分量 $u(x_i)$ | 标准不确定度来源 | 标准不确定度类型 | 标准不确定度  | 灵敏系数 $c(x_i)$ | $ c(x_i)  \times u(x_i)$ |
|-------------------|----------|----------|---------|---------------|--------------------------|
| $u(D_s)$          | 数显卡尺引入   | B类       | 0.012mm | 1             | 0.012mm                  |
| $u(D_R)$          | 测量重复性引入  | A类       | 0.012mm | 1             | 0.012mm                  |
| $u'(D_R)$         | 分辨力引入    | B类       | 0.003mm | 1             | 0.003mm                  |

由测量重复性引入的标准不确定度  $u(D_R)$  和分辨力引入的标准不确定度  $u'(D_R)$  两者取大，所以合成不确定度  $u_c(D)$  按公式 B. 4 计算：

$$u_c(D) = \sqrt{c^2(D_s) u^2(D_s) + c^2(D_R) u^2(D_R)} = 0.017\text{mm} \quad (\text{B. 5})$$

#### B.6 扩展不确定度评定

取包含因  $k = 2$ ，则摆锤敲入仪的摆杆直径测量结果的扩展不确定度为：

$$U = k \times u_c(D) = 0.04\text{mm} \quad (\text{B. 6})$$

## 轴承中心到锤头中心的距离测量结果的不确定度评定

### C.1 概述

C.1.1 被测对象：轴承中心到锤头中心的距离，技术要求： $(223 \pm 2)$  mm。

C.1.2 测量标准：数显卡尺，测量范围（0~500）mm，分辨力 0.01mm。

C.1.3 测量方法：轴承中心到锤头中心的距离采用数显卡尺分段间接测量的方法，先用数显卡尺测量锤头外侧至轴承远端的距离  $l_1$ ，然后用数显卡尺测量轴承直径  $d$  和锤头内侧至锤头外侧的距离  $l_2$ ，轴承中心到锤头中心的距离  $l$  按公式 (C.1) 计算。

### C.2 测量模型

轴承中心到锤头中心的距离测量模型：

$$l = l_1 - \frac{(d + l_2)}{2}$$

(C.1)

式中：

$l$ ——轴承中心到锤头中心的距离，mm；

$l_1$ ——锤头外侧至轴承远端的距离，mm；

$d$ ——轴承直径，mm；

$l_2$ ——锤头内侧至锤头外侧的距离，mm。

### C.3 不确定度来源

- 锤头外侧至轴承远端的距离引入的标准不确定度  $u(l_1)$ ；
- 轴承直径引入的标准不确定度  $u(d)$ ；
- 锤头内侧至锤头外侧的距离引入的标准不确定度  $u(l_2)$ 。

### C.4 标准不确定度评定

#### C.4.1 锤头外侧至轴承远端的距离引入的标准不确定度 $u(l_1)$

锤头外侧至轴承远端的距离引入的标准不确定度由以下 3 个分量组成：

- 数显卡尺引入的标准不确定度  $u(I_{1B})$ 。
- 测量重复性引入的标准不确定度  $u(I_{1s})$ 。
- 数显卡尺分辨力引入的标准不确定度  $u(I_{1d})$ 。



#### C. 4. 1. 1 数显卡尺引入的标准不确定度 $u(I_{1B})$

本次测量中测量标准是一把测量范围(0~500) mm, 分辨力 0.01mm 的数显卡尺, 0~70mm 内, 最大允许误差为 $\pm 0.02$ mm, (70~200) mm 内, 最大允许误差为 $\pm 0.03$ mm, (200~300) mm 内, 最大允许误差为 $\pm 0.04$ mm,  $I_1$  测量值约为 260mm, 按均匀分布, 其区间半宽  $a = 0.04$ mm, , 取  $k = \sqrt{3}$ 。则数显卡尺引入的标准不确定度  $u(I_{1B})$  为:

$$u(I_{1B}) = \frac{a}{k} = 0.023\text{mm} \quad (\text{C. 2})$$

#### C. 4. 1. 2 测量重复性引入的标准不确定度 $u(I_{1s})$

对被测摆锤敲入仪锤头外侧至轴承远端的距离重复测量 3 次, 记录 3 次示值分别为 260.67、260.54、260.89 (单位: mm)。校准过程中, 取单次测量值作为测量结果, 用极差法计算, 则测量重复性引入的标准不确定度  $u(I_{1s})$  为:

$$u(I_{1s}) = s(I_i) = \frac{I_{1\max} - I_{1\min}}{C_n} = 0.20\text{mm} \quad (\text{C. 3})$$

式中:

$I_{1\max}$  ——摆杆直径的单次测量值的最大值, mm;

$I_{1\min}$  ——摆杆直径的单次测量值最小值, mm;

$C_n$  ——极差系数,  $n = 3$  时,  $C_n$  取 1.69。

#### C. 4. 1. 3 数显卡尺分辨力引入的标准不确定度 $u(I_{1d})$

测量标准数显卡尺的分辨力为 0.01mm, 按均匀分布,  $k = \sqrt{3}$ , 则数显卡尺分辨力引入的标准不确定度  $u(I_{1d})$  为:

$$u(I_{1d}) = \frac{r}{2\sqrt{3}} = 0.003\text{mm} \quad (\text{C. 4})$$

式中:  $r$  ——测量标准数显卡尺的分辨力, mm。

#### C. 4. 1. 4 锤头外侧至轴承远端的距离的合成不确定度评定

各个分量的标准不确定度汇总见表 C. 1。

表 C. 1 各个分量的标准不确定度汇总表

| 标准不确定度分量<br>$u(x_i)$ | 标准不确定度来源 | 标准不确定度类型 | 标准不确定度  | 灵敏系数<br>$c(x_i)$ | $ c(x_i)  \times u(x_i)$ |
|----------------------|----------|----------|---------|------------------|--------------------------|
| $u(I_{1B})$          | 数显卡尺引入   | B类       | 0.023mm | 1                | 0.023mm                  |
| $u(I_{1s})$          | 测量重复性引入  | A类       | 0.20mm  | 1                | 0.20mm                   |
| $u(I_{1d})$          | 分辨力引入    | B类       | 0.003mm | 1                | 0.003mm                  |

由于重复性引入的标准不确定度  $u(I_{1s})$  和分辨力引入的标准不确定度  $u(I_{1d})$  两者取大，所以合成不确定度  $u_c(I_1)$  按公式 C. 4 计算：

$$u_c(I_1) = \sqrt{c^2(I_{1B}) u^2(I_{1B}) + c^2(I_{1s}) u^2(I_{1s})} = 0.20\text{mm} \quad (\text{C. 5})$$

#### C. 4. 2 轴承直径引入的标准不确定度 $u(d)$

轴承直径引入的标准不确定度由以下 3 个分量组成：

- a) 数显卡尺引入的标准不确定度  $u(d_b)$ ；
- b) 测量重复性引入的标准不确定度  $u(d_s)$ ；
- c) 数显卡尺分辨力引入的标准不确定度  $u(d_d)$ 。

##### C. 4. 2. 1 数显卡尺引入的标准不确定度 $u(d_b)$

本次测量中测量标准是一把测量范围 (0~500) mm，分辨力 0.01mm 的数显卡尺，0~70mm 内，最大允许误差为  $\pm 0.02\text{mm}$ ，(70~200) mm 内，最大允许误差为  $\pm 0.03\text{mm}$ ，(200~300) mm 内，最大允许误差为  $\pm 0.04\text{mm}$ ， $d$  测量值约为 21mm，按均匀分布，其区间半宽  $a = 0.02\text{mm}$ ，取  $k = \sqrt{3}$ 。则数显卡尺引入的标准不确定度  $u(d_b)$  为：

$$u(d_B) = \frac{a}{k} = 0.012\text{mm} \quad (\text{C.6})$$

#### C.4.2.2 测量重复性引入的标准不确定度 $u(d_s)$

对被测摆锤敲入仪轴承直径重复测量 3 次，记录 3 次示值分别为 21.00、20.99、21.00（单位：mm）。校准过程中，取单次测量值作为测量结果，用极差法计算，则测量重复性引入的标准不确定度  $u(d_s)$  为：

$$u(d_s) = s(d) = \frac{d_{\max} - d_{\min}}{C_n} = 0.006\text{mm} \quad (\text{C.7})$$

式中：

$d_{\max}$  ——轴承直径的单次测量值的最大值，mm；

$d_{\min}$  ——轴承直径的单次测量值最小值，mm；

$C_n$  ——极差系数， $n=3$  时， $C_n$  取 1.69。

#### C.4.2.3 数显卡尺分辨力引入的标准不确定度 $u(d_d)$

测量标准数显卡尺的分辨力为 0.01mm，按均匀分布， $k = \sqrt{3}$ ，则数显卡尺分辨力引入的标准不确定度  $u(d_d)$  为：

$$u(d_d) = \frac{r}{2\sqrt{3}} = 0.003\text{mm} \quad (\text{C.8})$$

式中： $r$  ——测量标准数显卡尺的分辨力，mm。

#### C.4.2.4 轴承直径的合成不确定度评定

各个分量的标准不确定度汇总见表 C.2。

表 C.2 各个分量的标准不确定度汇总见表

| 标准不确定度分量<br>$u(x_i)$ | 标准不确定度来源 | 标准不确定度类型 | 标准不确定度  | 灵敏系数<br>$c(x_i)$ | $ c(x_i)  \times u(x_i)$ |
|----------------------|----------|----------|---------|------------------|--------------------------|
| $u(d_B)$             | 数显卡尺引入   | B类       | 0.012mm | 1                | 0.012mm                  |

|          |         |    |         |   |         |
|----------|---------|----|---------|---|---------|
| $u(d_s)$ | 测量重复性引入 | A类 | 0.006mm | 1 | 0.006mm |
| $u(d_d)$ | 分辨力引入   | B类 | 0.003mm | 1 | 0.003mm |

由于重复性引入的标准不确定度  $u(d_s)$  和分辨力引入的标准不确定度  $u(d_d)$  两者取大, 所以合成不确定度  $u_c(d)$  按公式 C.9 计算:

$$u_c(d) = \sqrt{c^2(d_B) u^2(d_B) + c^2(d_s) u^2(d_s)} = 0.013\text{mm} \quad (\text{C.9})$$

#### C.4.3 锤头内侧至锤头外侧的距离引入的标准不确定度 $u(l_2)$

锤头内侧至锤头外侧的距离引入的标准不确定度由以下 3 个分量组成:

- a) 数显卡尺引入的标准不确定度  $u(l_{2B})$ 。
- b) 测量重复性引入的标准不确定度  $u(l_{2s})$ 。
- c) 数显卡尺分辨力引入的标准不确定度  $u(l_{2d})$ 。

##### C.4.3.1 数显卡尺引入的标准不确定度 $u(l_{2B})$

本次测量中测量标准是一把测量范围 (0~500) mm, 分辨力 0.01mm 的数显卡尺, 0~70mm 内, 最大允许误差为  $\pm 0.02\text{mm}$ , (70~200) mm 内, 最大允许误差为  $\pm 0.03\text{mm}$ , (200~300) mm 内, 最大允许误差为  $\pm 0.04\text{mm}$ ,  $l_2$  测量值约为 60mm, 按均匀分布, 其区间半宽  $a = 0.02\text{mm}$ , 取  $k = \sqrt{3}$ 。则数显卡尺引入的标准不确定度  $u(l_{2B})$  为:

$$u(l_{2B}) = \frac{a}{k} = 0.012\text{mm} \quad (\text{C.10})$$

##### C.4.3.2 测量重复性引入的标准不确定度 $u(l_{2s})$

对被测摆锤敲入仪锤头内侧至锤头外侧的距离重复测量 3 次, 记录 3 次示值分别为 60.13、60.12、60.12 (单位: mm)。校准过程中, 取单次测量值作为测量结果, 用极差法计算, 则测量重复性引入的标准不确定度  $u(l_{2s})$  为:

$$u(I_{2s}) = s(I_i) = \frac{I_{2\max} - I_{2\min}}{C_n} = 0.006\text{mm} \quad (\text{C. 11})$$

式中：

$I_{2\max}$  ——摆杆直径的单次测量值的最大值，mm；

$I_{2\min}$  ——摆杆直径的单次测量值最小值，mm；

$C_n$  ——极差系数， $n=3$ 时， $C_n$ 取1.69。

#### C. 4. 3. 3 数显卡尺分辨力引入的标准不确定度 $u(I_{2d})$

测量标准数显卡尺的分辨力为0.01mm，按均匀分布， $k = \sqrt{3}$ ，则数显卡尺分辨力引入的标准不确定度  $u(I_{2d})$ 为：

$$u(I_{2d}) = \frac{r}{2\sqrt{3}} = 0.003\text{mm} \quad (\text{C. 12})$$

式中： $r$ ——测量标准数显卡尺的分辨力，mm。

#### C. 4. 3. 4 锤头内侧至锤头外侧距离的合成不确定度评定

各个分量的标准不确定度汇总见表 C. 3。

表 C. 3 各个分量的标准不确定度汇总表

| 标准不确定度分量<br>$u(x_i)$ | 标准不确定度来源 | 标准不确定度类型 | 标准不确定度  | 灵敏系数<br>$c(x_i)$ | $ c(x_i)  \times u(x_i)$ |
|----------------------|----------|----------|---------|------------------|--------------------------|
| $u(I_{2B})$          | 数显卡尺引入   | B类       | 0.012mm | 1                | 0.012mm                  |
| $u(I_{2s})$          | 测量重复性引入  | A类       | 0.006mm | 1                | 0.006mm                  |
| $u(I_{2d})$          | 分辨力引入    | B类       | 0.003mm | 1                | 0.003mm                  |

由于重复性引入的标准不确定度  $u(I_{2s})$ 和分辨力引入的标准不确定度  $u(I_{2d})$ 两者取大，且因各分量彼此独立，所以合成不确定度  $u_c(I_2)$ 按公式 C. 4 计算：

$$u_c(I_2) = \sqrt{c^2(I_{2B}) u^2(I_{2B}) + c^2(I_{2S}) u^2(I_{2S})} = 0.013\text{mm} \quad (\text{C. 13})$$

### C.5 合成标准不确定度评定

轴承中心到锤头中心的距离采用分段间接测量的方法,用数显卡尺分别测量锤头外侧至轴承远端的距离  $I_1$ , 轴承半径  $d$ 和锤头内侧至锤头外侧的距离  $I_2$ , 各分量互不相关,可以根据公式之间合成得到轴承中心到锤头中心的距离测量结果的合成不确定度。

各个分量的标准不确定度汇总见表 C. 4。

表 C. 4 各个分量的标准不确定度汇总表

| 标准不确定度分量 $u(x_i)$ | 标准不确定度来源            | 标准不确定度  | 灵敏系数 $c(x_i)$ | $ c(x_i)  \times u(x_i)$ |
|-------------------|---------------------|---------|---------------|--------------------------|
| $u_c(I_1)$        | 锤头外侧至轴承远端的距离的合成不确定度 | 0.20mm  | 1             | 0.20mm                   |
| $u_c(d)$          | 轴承直径的合成不确定度         | 0.013mm | -0.5          | -0.007mm                 |
| $u_c(I_2)$        | 锤头内侧至锤头外侧距离的合成不确定度  | 0.013mm | -0.5          | -0.007mm                 |

因各分量彼此独立, 所以合成不确定度  $u_c(I)$ 按公式 C. 14 计算:

$$u_c(I) = \sqrt{c^2(I_1) u^2(I_1) + c^2(d) u^2(d) + c^2(I_2) u^2(I_2)} = 0.20\text{mm} \quad (\text{C. 14})$$

### C.6 扩展不确定度评定

取包含因  $k = 2$ , 则摆锤敲入仪的轴承中心到锤头中心的距离测量结果的扩展不确定度为:

$$U = k \times u_c(I) = 0.40\text{mm} \quad (\text{C. 15})$$

## 摆动角度测量结果的不确定度评定

### D.1 概述

D.1.1 被测对象：摆锤敲入仪的摆动角度，技术要求： $(175 \pm 1)^\circ$ 。

D.1.2 测量标准：数显倾角仪，测量范围 $(0 \sim 180)^\circ$ 。

D.1.3 测量方法：依据 7.5 所述方法对被摆锤敲入仪的摆动角度进行测量。

### D.2 测量模型

摆锤敲入仪摆动角度的测量模型：

$$A = \overline{A_i} \quad (\text{D.1})$$

式中：

$A$ ——摆动角度的测得值， $^\circ$ ；

$A_i$ ——摆动角度的单次测量值， $^\circ$ 。

### D.3 不确定度来源

a) 数显倾角仪引入的标准不确定度  $u(A_s)$ ；

b) 测量重复性引入的标准不确定度  $u(A_R)$ ；

c) 数显倾角仪的分辨力引入的标准不确定度  $u'(A_R)$ 。

### D.4 标准不确定度评定

#### D.4.1 数显倾角仪引入的标准不确定度 $u(A_s)$

本次测量中测量标准是一个测量范围 $(0 \sim 180)^\circ$ ，分辨力 $0.1^\circ$ 的数显倾角仪，其最大允许误差为 $\pm 0.2^\circ$ ，按均匀分布，其区间半宽 $a = 0.2^\circ$ ，取 $k = \sqrt{3}$ 。

则数显倾角仪引入的标准不确定度  $u(A_s)$  为：

$$u(A_s) = \frac{a}{k} = 0.115^\circ \quad (\text{D.2})$$

#### D.4.2 测量重复性引入的标准不确定度 $u(A_R)$

对被测摆锤敲入仪的摆动角度重复测量 3 次，记录摆动角度 3 次示值分别为 $175.6^\circ$ 、 $175.5^\circ$ 、 $175.6^\circ$ 。校准过程中，取 3 次测量值的平均值作为测量结果，用极差法计算，则测量重复性引入的标准不确定度  $u'(A_R)$  为：

$$u'(A_R) = \frac{s(A_R)}{\sqrt{n}} = \frac{A_{i\max} - A_{i\min}}{C_n \times \sqrt{n}} = 0.034^\circ \quad (\text{D. 3})$$

式中：

$A_{i\max}$  ——摆动角度的单次测量值的最大值， $^\circ$ ；

$A_{i\min}$  ——摆动角度的单次测量值最小值， $^\circ$ ；

$n$  ——测量次数，取  $n=3$ ；

$C_n$  ——极差系数， $n=3$  时， $C_n$  取 1.69。

#### D. 4. 3 分辨力引入的标准不确定度 $u'(A_R)$

测量标准数显倾角仪的分辨力为  $0.1^\circ$ ，按均匀分布， $k = \sqrt{3}$ ，则数显倾角仪分辨力引入的标准不确定度  $u'(A_R)$  为：

$$u'(A_R) = \frac{r}{2\sqrt{3}} = 0.029^\circ \quad (\text{D. 4})$$

式中： $r$  ——测量标准数显倾角仪的分辨力， $^\circ$ 。

#### D. 5 合成标准不确定度评定

各个分量的标准不确定度汇总见表 D. 1

表 D. 1 各个分量的标准不确定度汇总见表

| 标准不确定度分量 $u(x_i)$ | 标准不确定度来源 | 标准不确定度类型 | 标准不确定度        | 灵敏系数 $c(x_i)$ | $ c(x_i)  \times u(x_i)$ |
|-------------------|----------|----------|---------------|---------------|--------------------------|
| $u(A_s)$          | 数显倾角仪引入  | B类       | $0.115^\circ$ | 1             | $0.115^\circ$            |
| $u(A_R)$          | 测量重复性引入  | A类       | $0.034^\circ$ | 1             | $0.034^\circ$            |
| $u'(A_R)$         | 分辨力引入    | B类       | $0.029^\circ$ | 1             | $0.029^\circ$            |

由测量重复性引入的标准不确定度  $u(A_R)$  和分辨力引入的标准不确定度



$u'(A_R)$ 两者取大，所以合成不确定度 $u_c(A)$ 按公式D.4计算：

$$u_c(A) = \sqrt{c^2(A_s) u^2(A_s) + c^2(A_R) u^2(A_R)} = 0.12^\circ \quad (\text{D.5})$$

#### D.6 扩展不确定度评定

取包含因 $k = 2$ ，则摆锤敲入仪的摆杆直径测量结果的扩展不确定度为：

$$U = k \times u_c(A) = 0.3^\circ \quad (\text{D.6})$$

## 最大摆动速度测量结果的不确定度评定

### E.1 概述

E.1.1 被测对象：摆锤敲入仪的最大摆动速度，技术要求：不小于 1.94m/s。

E.1.2 测量标准：线速度测量仪，MPE：±2%。

E.1.3 测量方法：依据 7.6 所述方法对被摆锤敲入仪的最大摆动速度进行测量。

### E.2 测量模型

摆锤敲入仪最大摆动速度的测量模型：

$$V = \overline{V_i} \quad (\text{E.1})$$

式中：

$V$ ——最大摆动速度的测得值，m/s；

$V_i$ ——最大摆动速度的单次测量值，m/s。

### E.3 不确定度来源

a) 线速度测量仪引入的标准不确定度  $u(V_s)$ ；

b) 测量重复性引入的标准不确定度  $u(V_R)$ ；

c) 线速度测量仪的分辨力引入的标准不确定度  $u'(V_R)$ 。

### E.4 标准不确定度评定

#### E.4.1 线速度测量仪引入的标准不确定度 $u(V_s)$

本次测量中线速度测量仪的最大允许误差为±2%，按均匀分布，取  $k = \sqrt{3}$ 。

最大摆动速度的测得值为 1.959 m/s 则数显倾角仪引入的标准不确定度  $u(V_s)$  为：

$$u(V_s) = \frac{| \text{MPE} |}{k} = 0.023\text{m/s} \quad (\text{E.2})$$

#### E.4.2 测量重复性引入的标准不确定度 $u(V_R)$

对被测摆锤敲入仪的最大摆动速度重复测量 3 次，记录最大摆动速度 3 次示值分别为 1.956、1.965、1.965（单位：m/s）。校准过程中，取 3 次测量值的平均值作为测量结果，用极差法计算，则测量重复性引入的标准不确定度  $u'(V_R)$  为：

$$u'(V_R) = \frac{s(V_R)}{\sqrt{n}} = \frac{V_{i\max} - V_{i\min}}{C_n \times \sqrt{n}} = 0.003\text{m/s} \quad (\text{E. 3})$$

式中：

$V_{i\max}$  ——最大摆动速度的单次测量值的最大值，m/s；

$V_{i\min}$  ——最大摆动速度的单次测量值最小值，m/s；

$n$  ——测量次数，取  $n = 3$ ；

$C_n$  ——极差系数， $n = 3$  时， $C_n$  取 1.69。

#### E. 4. 3 分辨力引入的标准不确定度 $u'(V_R)$

测量标准线速度测量仪的分辨力为 0.001m/s，按均匀分布， $k = \sqrt{3}$ ，则线速度测量仪分辨力引入的标准不确定度  $u'(V_R)$  为：

$$u'(V_R) = \frac{r}{2\sqrt{3}} = 0.0003\text{m/s} \quad (\text{E. 4})$$

式中： $r$ ——测量标准线速度测量仪的分辨力，m/s。

#### E. 5 合成标准不确定度评定

各个分量的标准不确定度汇总见表 E. 1。

表 E. 1 各个分量的标准不确定度汇总表

| 标准不确定度分量<br>$u(x_i)$ | 标准不确定度来源 | 标准不确定度类型 | 标准不确定度     | 灵敏系数<br>$c(x_i)$ | $ c(x_i)  \times u(x_i)$ |
|----------------------|----------|----------|------------|------------------|--------------------------|
| $u(V_s)$             | 线速度测量仪引入 | B类       | 0.023 m/s  | 1                | 0.023 m/s                |
| $u(V_R)$             | 测量重复性引入  | A类       | 0.003 m/s  | 1                | 0.003 m/s                |
| $u'(V_R)$            | 分辨力引入    | B类       | 0.0003 m/s | 1                | 0.0003 m/s               |

由测量重复性引入的标准不确定度  $u(V_R)$  和分辨力引入的标准不确定度

$u'(V_R)$ 两者取大，所以合成不确定度 $u_c(V)$ 按公式 E. 4 计算：

$$u_c(V) = \sqrt{c^2(V_s) u^2(V_s) + c^2(V_R) u^2(V_R)} = 0.023\text{m/s} \quad (\text{E. 5})$$

#### E. 6 扩展不确定度评定

取包含因 $k = 2$ ，则摆锤敲入仪的最大摆动速度测量结果的扩展不确定度为：

$$U = k \times u_c(V) = 0.046\text{m/s} \quad (\text{E. 6})$$