



天津市地方计量技术规范

JJF(津) 102—2023

冰雹试验机校准规范

Calibration Specification of Hail Testing Machines

2023—08—30 发布

2023—11—30 实施

天津市市场监督管理委员会 发布

冰雹试验机校准规范

Calibration Specification of
Hail Testing Machines

JJF(津) 102-2023

归口单位：天津市市场监督管理委员会

主要起草单位：天津市计量监督检测科学研究院电
子仪表实验所

本规范由天津市计量监督检测科学研究院电子仪表实验所负责解释

本规范主要起草人：

任 晟 （天津市计量监督检测科学研究院电子仪表实验所）

柳云秀 （天津市计量监督检测科学研究院电子仪表实验所）

马新新 （天津市计量监督检测科学研究院电子仪表实验所）

参加起草人：

翟家强 （天津市计量监督检测科学研究院电子仪表实验所）

周 超 （天津市计量监督检测科学研究院电子仪表实验所）

目 录

引 言.....	(II)
1 范围.....	(1)
2 引用文件.....	(1)
3 术语和计量单位.....	(1)
3.1 光电测速系统.....	(1)
3.2 冰球初速度.....	(1)
3.3 温度偏差.....	(1)
4 概述.....	(2)
5 计量特性.....	(2)
5.1 冰球直径.....	(2)
5.2 冰球质量.....	(2)
5.3 冰球存储容器温度.....	(2)
5.4 冰球初速度.....	(2)
6 校准条件.....	(3)
6.1 环境条件.....	(3)
6.2 测量标准及其它设备.....	(3)
7 校准项目和校准方法.....	(4)
7.1 外观及工作正常性.....	(4)
7.2 校准前准备.....	(4)
7.3 冰球直径偏差.....	(4)
7.4 冰球质量偏差.....	(4)
7.5 冰球存储容器温度偏差.....	(5)
7.6 冰球初速度示值误差.....	(6)
8 校准结果的表达.....	(7)
9 复校时间间隔.....	(7)
附录 A 冰雹试验机校准原始记录参考格式.....	(9)
附录 B 冰雹试验机校准证书内页格式.....	(12)
附录 C 主要项目测量不确定度评定示例.....	(15)

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》和 JJF 1059《测量不确定度评定与表示》进行编写。在编制过程中参考了 JJF 1101-2019《环境试验设备温度、湿度参数校准规范》、GB/T 9535-1998《地面用晶体硅光伏组件-设计鉴定和定型》、JJF (闽) 1104-2020《冰雹试验机校准规范》、IEC 61215-2《地面用光伏组件-设计鉴定和定型-第 2 部分：测试程序》(Terrestrial photovoltaic (PV) modules - Design qualification and type approval - Part 2: Test procedures)。

本规范为首次发布。

冰雹试验机校准规范

1 范围

本规范适用于光伏用冰雹试验机的校准。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

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

IEC 61215-2 地面用光伏组件-设计鉴定和定型-第 2 部分： 测试程序

(Terrestrial photovoltaic (PV) modules - Design qualification and type approval - Part 2: Test procedures)

凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用本规范；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 光电测速系统 Photoelectric speed measuring system

用于对冰球进行速度测量，通常由 2 个相同的光电型位置传感器组成，通过测量两个传感器之间的距离以及冰球通过两个传感器的时间，计算出冰球在通过第一个传感器时的速度。

3.2 冰球初速度 Initial speed of ice pellet

冰球通过光电测速系统第一个位置传感器时的瞬时速度，单位为米每秒（m/s）。

3.3 温度偏差 temperature deviation

冰球存储容器稳定状态下，工作空间各测量点在规定时间内实测最高温度和最低温度与设定温度的上下偏差。温度偏差包含温度上偏差和温度下偏差。

4 概述

冰雹试验机通常是采用光电测速原理，利用人工制作的冰球模拟冰雹气候，对光伏组件抗冰雹撞击的能力进行测试的设备。冰雹试验机主要由发射系统、光电测速系统、冰球导轨、光伏组件安装支架等构成。

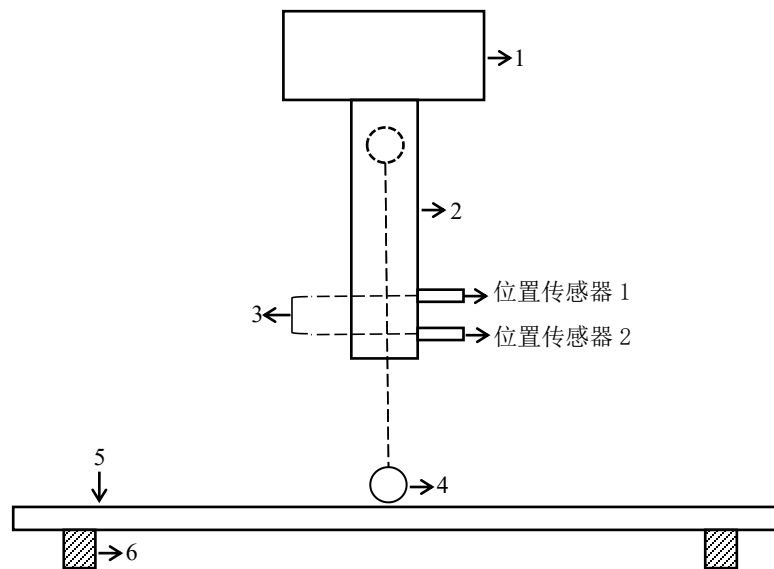


图 1 冰雹试验机结构示意图。

1-发射系统；2-冰球导轨；3-光电测速系统；4-冰球；5-光伏组件；6-光伏组件安装支架

5 计量特性

5.1 冰球直径

冰球直径标称值：25mm、35mm、45mm、55mm、65mm、75mm。其最大允许误差为 $\pm 5\%$ 。

5.2 冰球质量

冰球质量标称值：7.53g、20.7g、43.9g、80.2g、132.0g、203.0g。其最大允许误差为 $\pm 5\%$ 。

5.3 冰球存储容器温度

冰球存储容器的设定温度为 -4°C ，其最大允许误差为 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 。

5.4 冰球初速度

冰球初速度标称值：23.0m/s、27.2m/s、30.7m/s、33.9 m/s、36.7m/s、39.5m/s。

其最大允许误差为±5%。

注：以上指标不适用于合格性判别，仅供参考。

6 校准条件

6.1 环境条件

环境温度：(25±5)℃；

相对湿度：不大于85%；

其他：周围无影响冰雹试验机正常工作的机械振动、无较强电磁干扰。

6.2 测量标准及其它设备

6.2.1 卡尺

用于测量冰球的直径和冰雹试验机冰雹出口处两个位置传感器之间距离。

6.2.2 电子天平

用于测量冰球的质量。

6.2.3 温度巡检仪

用于测量储存冰球用容器的温度。

6.2.4 示波器

用于测量冰雹试验机冰雹出口处两个位置传感器触发信号产生的时间间隔。

6.2.5 技术要求

测量标准主要技术指标见表1

表1 测量标准主要技术指标

序号	测量标准及设备	技术要求
1	卡尺	分辨力：≤0.01mm 最大允许误差：±0.03mm
2	电子天平	I级或II级电子天平
3	温度巡检仪	分辨力：≤0.01℃ 最大允许误差：±0.5℃
4	示波器	时间分辨力：≤0.01ms 最大允许误差：±0.2%
注：以上测量标准需覆盖被校设备的测量范围。		

7 校准项目和校准方法

7.1 外观及工作正常性

目视和手动检查，设备铭牌应有制造厂名或商标、出厂编号、仪器名称及型号。设备各项功能应正常并确保操作人员能得到有效保护。

7.2 校准前准备

利用模具和冷冻箱制备试验所需足够数量的冰球，制备出的冰球应无肉眼可见裂纹。测量前，置冰球于存储容器中至少 1 小时。

7.3 冰球直径偏差

每个规格选取一个冰球进行测量。用手套将冰球取出，采用卡尺测量制备冰球的直径。每个冰球测量不同位置三次，大致测量位置如图 2 所示，记录卡尺的读数 (D_1 , D_2 , D_3)，分别计算偏差，本次测量需在 60 秒内完成。用此方法测量所有规格的冰球直径。

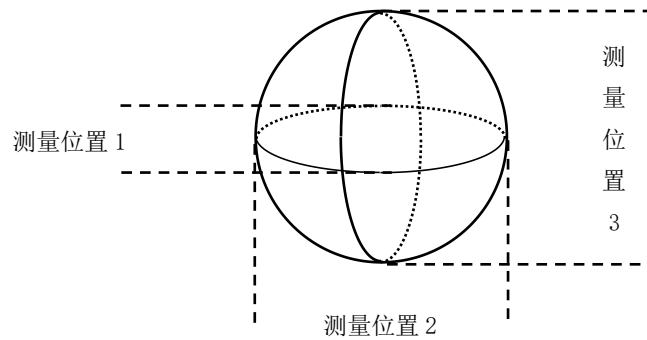


图 2 冰球测量位置示意图

按式 (1) 计算冰球直径偏差 ΔD_i 。

$$\Delta D_{im} = D_i - D_{im} \quad (1)$$

式中：

ΔD_{im} ——第 i 个规格冰球第 m 测量位置的直径偏差，mm；

D_i ——第 i 个规格冰球直径的标称值，mm；

D_{im} ——第 i 个规格冰球第 m 测量位置直径的测量值，mm。

取 $|\Delta D_{im}|$ 最大值作为该规格冰球直径偏差的结果。

7.4 冰球质量偏差

重新选取冰球，每个规格选取一个冰球进行测量。用手套将冰球取出，采用电子天平测量冰球的质量。每个冰球测量三次，每次测量时将一干净托盘置于电子天平上，并

将电子天平清零后测量冰球质量。记录电子天平的读数 (M_1, M_2, M_3), 采用式 (2) 计算平均值作为冰球质量测量值, 本次测量需在 60 秒内完成。用此方法测量所有规格的冰球质量。

$$\bar{M} = \frac{M_1 + M_2 + M_3}{3} \quad (2)$$

按式 (3) 计算冰球质量偏差 ΔM_i 。

$$\Delta M_i = M - \bar{M}_i \quad (3)$$

式中:

ΔM_i ——第 i 个规格冰球质量偏差, g;

M ——第 i 个规格冰球质量的标称值, g;

\bar{M}_i ——第 i 个规格冰球质量的测量值, g。

7.5 冰球存储容器温度偏差

用温度巡检仪测量冰球存储容器的温度, 可以根据存储容器容积选择传感器布放数量, 建议存储容器容积小于等于 0.2m^3 时布放至少 3 支传感器, 3 支温度传感器沿中轴线布放。当容积大于 0.2m^3 时可以适当增加传感器, 可根据客户需要布放。设定冰球存储容器温度为 -4°C , 待温度稳定 (10 分钟内温度相对变化率小于 5% 且无明显上升或下降趋势) 后每隔 2 分钟读取温度数据, 共读取 15 次, 按式 (4) (5) 计算冰球存储容器的温度偏差。

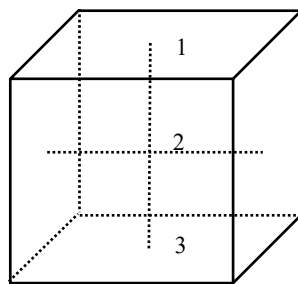


图 3 存储容器容积小于等于 0.2m^3 布点示意图。

1-上层布点; 2-中心布点; 3-下层布点

$$\Delta T_{\max} = T_{\max} - T_s \quad (4)$$

$$\Delta T_{\min} = T_{\min} - T_s \quad (5)$$

式中：

ΔT_{\max} ——温度上偏差，℃；

ΔT_{\min} ——温度下偏差，℃；

T_{\max} ——冰球存储容器各测量点规定时间内测量的最高温度，℃；

T_{\min} ——冰球存储容器各测量点规定时间内测量的最低温度，℃；

T_s ——冰球存储容器温度设定值，℃。

7.6 冰球初速度示值误差

用卡尺测量冰雹试验机两个位置传感器中心的距离，见图 1，测量三次，记录卡尺的读数 (L_1, L_2, L_3)，采用式 (6) 计算均值 \bar{L} 作为位置传感器的距离测量值。

$$\bar{L} = \frac{L_1 + L_2 + L_3}{3} \quad (6)$$

选择一个初速度进行测量，采用同样的方法依次进行其他初速度标称值时初速度误差的测量。

将示波器的两个通道的表笔连接到两个位置传感器的信号输出端，设定好自动触发模式。

重新选取冰球，每个规格选取一个冰球进行测量。让冰雹试验机正常发射冰球，记录示波器测得冰球通过两个位置传感器后传感器产生的信号时间差。重复此过程三次，以三次时间差的均值 $\Delta \bar{t}_i$ 作为冰球经过两个位置传感器时间差的测量值。

用距离测量值 \bar{L} 与冰球经过两个位置传感器时间差测量值 $\Delta \bar{t}_i$ ，根据式 (7) 计算冰球初速度 v_{0i} 。

$$v_{0i} = \frac{\bar{L} - 0.5 \times g \times \Delta \bar{t}_i^2}{\Delta \bar{t}_i} \quad (7)$$

式中， g 为重力加速度，天津地区一般取 9.80 m/s^2 。

按式 (8) 计算冰球初速度的示值误差 Δv_i 。

$$\Delta v_i = v_i - v_{0i} \quad (8)$$

式中：

Δv_i ——第 i 个规格冰球初速度示值误差， m/s ；

v_i ——第 i 个规格冰球初速度的设定值，m/s ；

v_{0i} ——第 i 个规格冰球初速度的测量值，m/s 。

8 校准结果的表达

校准结果应在校准证书上反映，校准证书应至少包含以下信息：

- a) 标题：“校准证书”；
- b) 实验室名称和地址；
- c) 进行校准的地点；
- d) 证书的唯一性标识，每页及总页数的标识；
- e) 客户的地址和名称；
- f) 被校对象的描述和明确标识；
- g) 校准的日期，若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；
- h) 若与校准结果的有效性应用相关时，应对被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) 本次校准所有测量标准的溯源性及有效性的说明；
- 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) 对校准规范的偏离说明；
- n) 校准证书或校准报告签发人的签名、职务或等效标识；
- o) 校准结果仅对被校对象有效的声明；
- p) 未经实验室书面批准，不得部分复制证书的声明。

校准原始记录格式见附录 A，格式上可依据实际情况做合理改动。校准证书内页格式见附录 B。

9 复校时间间隔

建议复校时间间隔为 1 年。由于复校时间间隔的长短是由仪器的使用情况、使用者、仪器本身质量等诸因素所决定的，因此送校单位可根据实际使用情况自主决定复校时间间隔。

附录 A

冰雹试验机校准原始记录参考格式

第 页 共 页

原始记录编码:																																																										
委托单位:																																																										
委托单位地址																																																										
环境温度: ℃			环境湿度: %RH																																																							
仪器名称 :			型号规格:																																																							
出厂编号:			校准日期:																																																							
制造厂:			设备状况:																																																							
校准地点:																																																										
校准依据:																																																										
主要 校准 设备	标准器 名称	编号	准确度等级/最 大允许误差/不 确定度	证书编号	证书有 有效期至	溯源机构																																																				
校准员			核验员																																																							
<p>1. 冰球直径偏差 单位: mm</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">标称值</th> <th colspan="3">3次读数</th> <th rowspan="2">最大值</th> <th rowspan="2">直径偏差</th> <th rowspan="2">测量不确定度 $U(k=2)$</th> </tr> <tr> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> </tbody> </table>							标称值	3次读数			最大值	直径偏差	测量不确定度 $U(k=2)$	1	2	3																																										
标称值	3次读数			最大值	直径偏差	测量不确定度 $U(k=2)$																																																				
	1	2	3																																																							

2. 冰球质量偏差

单位: g

标称值	3次读数			平均值	质量偏差	测量不确定度 $U(k=2)$
	1	2	3			

3. 冰球存储容器温度偏差

单位: °C

温度设定值	实测温度值		
次数	上层	中心	下层
	1		
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
最大值			
最小值			
上偏差		下偏差	
测量不确定度 $U(k=2)$			

4. 冰球初速度示值误差

校准项目	3次测量 (mm)			平均值 (mm)
	1	2	3	
传感器距离				

标称速度 (m/s)	触发时间差 (ms)			平均值 (ms)	传感器 距离 (mm)	冰球 初速度 (m/s)	示值误差 (m/s)	测量不确 定度 $U(k=2)$ (m/s)
	1	2	3					

附录 B

冰雹试验机校准证书内页格式

B.1

证书编号：XXXXXX-XXXX

校准机构授权说明					
校准所依据的技术文件（代号、名称）：					
校准所使用的主要计量器具：					
名称	编号	准确度等级/最大允许误差/不确定度	证书编号	证书有效期至	溯源机构
校准地点及其环境条件：					
地点：					
温度：		相对湿度：		其他：	

第 × 页 共 × 页

B.2 校准证书校准结果页格式

证书编号: XXXXXX-XXXX

校准结果

1. 冰球直径偏差

单位: mm

标称值	实测值	直径偏差	测量不确定度 $U(k=2)$

2. 冰球质量偏差

单位: g

标称值	实测值	质量偏差	测量不确定度 $U(k=2)$

校准结果

3. 冰球存储容器温度偏差

单位: °C

设定值	上偏差	下偏差	测量不确定度 $U(k=2)$

4. 冰球初速度示值误差

单位: m/s

标称值	冰球初速度	示值误差	测量不确定度 $U(k=2)$

以下空白

第 × 页 共 × 页

校准员: _____

核验员: _____

附录 C

主要项目测量不确定度评定示例

C.1 冰球直径测量不确定度

C.1.1 被校对象

冰雹试验机模具所制标称直径 25mm 的冰球。

C.1.2 测量标准

卡尺

C.1.3 校准方法

按照本校准规范，用卡尺测量制备冰球的直径。每个冰球测量不同位置三次，测量须在 60s 内完成。

C.1.4 测量模型

$$\Delta D = D - D_0 \quad (\text{C.1})$$

式中：

D —冰球直径的标称值，mm；

D_0 —冰球直径的测量值，mm。

不确定度来源：被校对象测量重复性引入的标准不确定度，卡尺示值误差引入的标准不确定度。

C.1.5 标准不确定度分量

C.1.5.1 测量重复性引入的标准不确定度分量 $u(d_1)$

在重复性条件下对标称直径 25mm 冰球直径进行测量，得到下列测量列。

表 C.1 重复性测量数据

第 i 次测量	1	2	3
长度示值 (mm)	24.95	25.16	25.06

计算极差 $R=25.16-24.95=0.21\text{mm}$

查表得极差系数 $C=1.69$ ；

得到单次测量实验标准差：

$$s = \frac{R}{C} = 0.124\text{mm}$$

$$\text{则 } u(d_1) = 0.124\text{mm}$$

C. 1. 5. 2 卡尺示值误差引入的标准不确定度分量 $u(d_2)$

根据 JJG 30-2012《通用卡尺检定规程》的要求，最大允许误差为 $\pm 0.02\text{mm}$ ，半宽为 0.02mm ，估计为均匀分布，取包含因子 $k=\sqrt{3}$ ，则：

$$u(d_2) = 0.02/\sqrt{3} = 0.012\text{mm}$$

C. 1. 6 标准不确定度分量汇总表见表 C. 2

表 C. 2 冰球直径标准不确定度分量汇总表

标准不确定度分量 $u(d_i)$	不确定度来源	标准不确定度
$u(d_1)$	重复性	0.124mm
$u(d_2)$	卡尺示值误差	0.012mm

C. 1. 7 合成标准不确定度

冰球直径合成标准不确定度 u_c 计算

由于 d_1 与 d_2 彼此独立不相关，所以合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u(d_1)^2 + u(d_2)^2} = 0.124\text{mm}$$

C. 1. 8 扩展不确定度

对应 p 约为 95% 包含概率，取 $k=2$ ，则扩展不确定度为： $U=0.25\text{mm}$

C. 2 冰球质量测量不确定度

C. 2. 1 被校对象

冰雹试验机模具所制标称直径 25mm 质量 7.53g 的冰球。

C. 2. 2 测量标准

电子天平

C. 2. 3 校准方法

按照本校准规范，采用电子天平测量冰球的质量。每个冰球测量三次，每次测量时将一干净托盘置于电子天平上，并将天平清零后测量冰球质量。

C. 2. 4 测量模型

$$\Delta M = M - M_0 \tag{C. 2}$$

式中：

M ——冰球质量的标称值，g；

M_0 ——冰球质量的测量值，g。

不确定度来源：被校对象测量重复性引入的标准不确定度，电子天平引入的标准不确定度。

C.2.5 标准不确定度分量

C.2.5.1 测量重复性引入的标准不确定度分量 $u(m_1)$

在重复性条件下对标称质量 7.53g 冰球质量进行测量，得到下列测量列。

表 C.3 重复性测量数据

第 i 次测量	1	2	3
质量示值 (g)	7.55	7.45	7.47

计算极差 $R=7.55-7.45=0.10\text{g}$

查表得极差系数 $C=1.69$ ；

得到单次测量实验标准差：

$$s = \frac{R}{C} = 0.059\text{g}$$

实际测量过程中测量三次取平均值，故

$$u(m_1) = \frac{s}{\sqrt{3}} = 0.034\text{g}$$

C.2.5.2 电子天平引入的标准不确定度分量 $u(m_2)$

根据 JJG1036-2008《电子天平检定规程》的要求，I 级天平的最大允许误差为 $\pm 0.5e$ ，由生产厂商给出 $e=0.001\text{g}$ ，估计为均匀分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，则：

$$u(m_2) = \frac{0.001}{2\sqrt{3}} = 0.0003\text{g}$$

C.2.6 标准不确定度分量汇总表见表 C.4

表 C.4 冰球质量标准不确定度一览表

标准不确定度分量 $u(m_i)$	不确定度来源	标准不确定度值
$u(m_1)$	重复性	0.034g
$u(m_2)$	电子天平	0.0003g

C. 2.7 合成标准不确定度

输入量 m_1 与 m_2 彼此独立不相关，所以合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u(m_1)^2 + u(m_2)^2} = 0.034\text{g}$$

C. 2.8 扩展不确定度的评定

对应 p 约为 95% 包含概率，取 $k=2$ ，则扩展不确定度为：

$$U = ku_c = 2 \times 0.034\text{g} = 0.07\text{g}$$

C. 3 冰球存储容器温度测量不确定度

C. 3.1 被校对象

试验机冰球存储容器，校准点 -4°C 。

C. 3.2 测量标准

温度巡检仪

C. 3.3 校准方法

用温度巡检仪测量冰球存储容器的温度，3 支温度传感器沿中轴线布放。设定冰球存储容器温度为 -4°C ，待温度稳定（10 分钟内温度相对变化率小于 5% 且无明显上升或下降趋势）后每隔 2 分钟读取温度数据，共读取 15 次。

C. 3.4 测量模型

$$\Delta T = T - T_s \quad (\text{C.3})$$

式中：

T ——冰球存储容器内各测量点测量的温度测量值， $^\circ\text{C}$ ；

T_s ——冰球存储容器的温度设定值， $^\circ\text{C}$ 。

不确定度来源：被校对象测量重复性引入的标准不确定度，温度巡检仪引入的标准不确定度。

C. 3.5 标准不确定度分量

C. 3.5.1 重复性引入的标准不确定度分量 $u(t_i)$

采用 A 类方法进行评定。在重复性条件下连续对冰球存储容器温度测量并计算 15 次，得到下列测量列，以此进行不确定度分析。

表 C.5 重复性测量数据

第 i 次测量	1	2	3	4	5	6	7	8
温度示值 (°C)	-3.25	-3.26	-3.26	-3.25	-3.24	-3.25	-3.26	-3.26
第 i 次测量	9	10	11	12	13	14	15	——
温度示值 (°C)	-3.25	-3.24	-3.26	-3.26	-3.25	-3.24	-3.23	——

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} = 0.010^\circ\text{C}$$

$$u(t_1) = s = 0.010^\circ\text{C}$$

C.3.5.2 温度巡检仪引入的标准不确定度 $u(t_2)$

依据温度巡检仪说明书可知,其最大允许误差优于 $\pm 0.10^\circ\text{C}$,其半宽为 0.10°C ,估计为均匀分布,取包含因子 $k=\sqrt{3}$,则:

$$u(t_2) = 0.10/\sqrt{3} = 0.058^\circ\text{C}$$

C.3.6 标准不确定度分量汇总表见表 C.6

表 C.6 冰球存储容器温度标准不确定度分量汇总表

标准不确定度分量 $u(t_i)$	不确定度来源	标准不确定度
$u(t_1)$	重复性	0.010°C
$u(t_2)$	温度巡检仪	0.058°C

C.3.7 合成标准不确定度

合成标准不确定度 u_c 计算,由于 t_1 与 t_2 彼此独立不相关,所以合成标准不确定度为:

$$u_c = \sqrt{u(t_1)^2 + u(t_2)^2} = 0.059^\circ\text{C}$$

C.3.8 扩展不确定度

对应 p 约为 95% 包含概率,取 $k=2$

则扩展不确定度为: $U = 0.059 \times 2 = 0.12^\circ\text{C} \approx 0.2^\circ\text{C}$

C.4 冰球初速度测量不确定度

C.4.1 被校对象

冰雹试验机，其冰球初速度设定值为 23m/s。

C.4.2 测量标准

卡尺，示波器

C.4.3 校准方法

按照本校准规范，用卡尺测量冰雹试验机两个位置传感器中心的距离。将示波器的两个通道的表笔连接到两个位置传感器的信号输出端，设定好自动触发模式。让冰雹试验机正常发射冰球，记录示波器测得冰球通过两个位置传感器后传感器产生的信号时间差。

C.4.4 测量模型

$$\Delta v = v - v_0 \quad (\text{C.4})$$

式中：

v ——冰球初速度的设定值，m/s；

v_0 ——测量的实际值，m/s。

不确定度来源：距离测量重复性引入的标准不确定度，时间测量重复性引入的标准不确定度，卡尺示值误差引入的标准不确定度和示波器引入的标准不确定度。

C.4.5 标准不确定度分量

C.4.5.1 位置传感器距离测量不确定度

C.4.5.1.1 由测量重复性引入的标准不确定度分量 $u(d_1)$

在重复性条件下对冰雹试验机两个位置传感器中心距离进行连续测量，得到下列测量列。

表 C.7 重复性测量数据

第 i 次测量	1	2	3
长度示值 L (mm)	100.09	99.89	99.91

计算极差 $R=100.09-99.89=0.20\text{mm}$

查表得极差系数 $C=1.69$ ；

得到单次测量实验标准差：

$$s = \frac{R}{C} = 0.118\text{mm}$$

实际测量过程中测量三次取平均值，故

$$u(l_1) = \frac{s}{\sqrt{3}} = 0.069\text{mm}$$

C.4.5.1.2 卡尺示值误差引入的标准不确定度 $u(d_2)$

根据 JJG 30-2012《通用卡尺检定规程》的要求，最大允许误差为 $\pm 0.02\text{mm}$ ，半宽为 0.02mm ，估计为均匀分布，取包含因子 $k=\sqrt{3}$ ，则：

$$u(l_2) = 0.02/\sqrt{3} = 0.012\text{mm}。$$

C.4.5.1.3 位置传感器距离标准不确定度分量汇总表见表 C.8

表 C.8 位置传感器距离标准不确定度分量汇总表

标准不确定度分量 $u(l_i)$	不确定度来源	标准不确定度
$u(l_1)$	重复性	0.069mm
$u(l_2)$	卡尺示值误差	0.012mm

C.4.5.1.4 位置传感器距离合成标准不确定度

位置传感器距离合成标准不确定度 u_c 计算，由于 l_1 与 l_2 彼此独立不相关，所以合成标准不确定度为：

$$u_c(l) = \sqrt{u(l_1)^2 + u(l_2)^2} = 0.07\text{mm}$$

C.4.5.2 位置传感器触发时间差测量不确定度

C.4.5.2.1 由测量重复性引入的标准不确定度分量 $u(t_1)$

在重复性条件下对示波器测得冰球通过两个位置传感器后传感器产生的信号时间差进行连续测量，得到下列测量列。

表 C.9 重复性测量数据

第 i 次测量	1	2	3
时间示值 Δt (ms)	4.24	4.23	4.21

计算极差 $R=4.24-4.21=0.03\text{ms}$

查表得极差系数 $C=1.69$ ；

得到单次测量实验标准差：

$$s = \frac{R}{C} = 0.018\text{ms}$$

实际测量过程中测量三次取平均值，故

$$u(t_1) = \frac{s}{\sqrt{3}} = 0.010\text{ms}$$

C.4.5.2.2 示波器引入的不确定度分量 $u(t_2)$

依据示波器校准证书可知，数字示波器时基信号在毫秒级的测量结果不确定度为 $U_{\text{rel}}=0.3\%$ ， $k=2$ ，则 $U=0.0127\text{ms}$ ， $k=2$ 故：

$$u(t_2) = 0.0127/2 = 0.0063\text{ms}。$$

C.4.5.2.3 位置传感器距离标准不确定度分量汇总表见表 C.10

表 C.10 位置传感器触发时间差标准不确定度分量汇总表

标准不确定度分量 $u(t_i)$	不确定度来源	标准不确定度
$u(t_1)$	重复性	0.010ms
$u(t_2)$	示波器时基校准不确定度	0.0063ms

C.4.5.2.4 位置传感器触发时间差合成标准不确定度

位置传感器触发时间差合成标准不确定度 u_c 计算，由于 t_1 与 t_2 彼此独立不相关，所以合成标准不确定度为：

$$u_c(t) = \sqrt{u(t_1)^2 + u(t_2)^2} = 0.010\text{ms}$$

C.4.6 合成标准不确定度

由于初速度测量模型是

$$v_0 = \frac{\bar{L} - 0.5 \times g \times \Delta t^2}{\Delta t}$$

则对长度测量不确定度分量的灵敏度系数是 $c_l = \frac{1}{\Delta t} = 0.236\text{ms}^{-1}$

对时间测量不确定度分量的灵敏度系数是 $c_t = -\frac{\bar{L}}{\Delta t^2} - 0.5 \times g = -10.49\text{mm/ms}^2$

C.4.7 冰球初速度示值误差合成标准不确定度汇总表见表 C.11

表 C.11 冰球初速度示值误差标准不确定度分量汇总表

标准不确定度分量 u	不确定度来源	标准不确定度
$u(t)$	位置传感器触发时间差	0.010ms
$u(l)$	位置传感器距离	0.07mm

C.4.8 冰球初速度示值误差合成标准不确定度

$$u_c = \sqrt{(c_t u_t)^2 + (c_l u_l)^2} = 0.11\text{m/s}$$

C.4.9 扩展不确定度

对应 p 约为 95% 包含概率, 取 $k=2$, 则扩展不确定度为: $U=0.11 \times 2=0.22\text{m/s}$ 。

