

黑龙江省地方计量技术规范

JJF（黑）XX—2025

径流泥沙自动监测仪校准规范

Calibration Specification for Automatic Runoff Sediment Monitor

(审定稿)

2025-XX-XX 发布

2025-XX-XX 实施

黑龙江省市场监督管理局 发布

径流泥沙自动监测仪

校准规范

Calibration Specification for

Automatic Runoff Sediment Monitor



归口单位：黑龙江省市场监督管理局

主要起草单位：黑龙江省计量检定测试研究院

本规范委托黑龙江省计量检定测试研究院负责解释

本规范主要起草人：

刘 勇	黑龙江省计量检定测试研究院
魏 琳	黑龙江水利科学研究院
张 成	大庆油田有限责任公司技术监督中心
王玉博	大庆油田有限责任公司技术监督中心
伍 琳	哈尔滨市计量检定测试院
鞠敏睿	黑龙江省江河流域保护中心
张 凯	大庆油田有限责任公司技术监督中心

参加起草人：

李英杰	大庆油田有限责任公司技术监督中心
张鸿鹏	大庆油田有限责任公司技术监督中心
赵 鹏	黑龙江省计量检定测试研究院

目 录

引言 (II)

1 范围 (错误！未定义书签。)

2 引用文件 (1)

3 术语和计量单位 (1)

4 概述 (2)

5 计量特性 (2)

6 校准条件 (3)

7 校准项目和校准方法 (3)

8 校准结果表达 (6)

9 复校时间间隔 (7)

附录 A 土样密度的试验方法..... (8)

附录 B 校准记录的参考格式..... (9)

附录 C 校准证书内页参考格式..... (10)

附录 D 校准结果不确定度评定示例..... (11)

引 言

JJF 1001—2011《通用计量术语及定义》、JJF 1008—2008《压力计量名词术语及定义》、JJF 1059.1—2012《测量不确定度评定与表示》、JJF 1071—2010《国家计量校准规范编写规则》共同构成支撑校准规范制定工作的基础性系列规范。

本规范参考了 JJG 259《标准金属量器》、GB/T 20465《水土保持术语》、GB/T 50159《河流悬移质泥沙测验规范》和 SL 277《水土保持监测技术规范》的部分内容，并结合我省径流泥沙自动监测仪检定装置的生产、使用和校准情况进行制定。

本规范为首次发布。

径流泥沙自动监测仪规范

1 范围

本规范适用于质量体积法测量原理的径流泥沙自动监测仪（包含便携式）的校准，其他原理的径流泥沙自动监测仪也可参考本规范执行。

2 引用文件

JJG 259—2005 标准金属量器

GB/T 50159—2015 河流悬移质泥沙测验规范

GB/T 20465—2006 水土保持术语

SL 277—2017 水土保持监测技术规范

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 径流泥沙自动监测仪 Automatic Runoff Sediment Monitor

径流泥沙自动监测仪是一种自动监测记录地表坡面径流小区降雨过程径流量和含沙量的设备或系统。

[来源：JJF 1008—2008 定义 1.2]

3.1.2 集流桶 Collecting Tanks

集流桶是径流泥沙自动监测仪收集雨水的容器，采用镀锌铁皮或钢板等材料制作，设计规格应根据当地的降雨及产流情况确定，以一次降雨产流过程中不溢流为准，如产流量大，可采用一级或多级分流通进行分流。

[来源：JJF 1008—2008 定义 1.2]

3.1.3 标称容积 nominal volume

径流泥沙自动监测仪在触发换向时集流桶的容积值。

[来源: JJF 1008—2008 定义 1.2]

3.1.4 径流量 Runoff

某一产流时段通过某一过水断面的径流体积, 径流量为标称容积的累计值。

[来源: JJF 1008—2008 定义 1.2]

3.1.5 含沙量 sediment concentration

一般是单位体积的浑水中所含干沙的质量。

[来源: JJF 1008—2008 定义 1.2]

3.2 计量单位

3.2.1 质量: 克、千克, 符号 g、kg。

3.2.2 径流量: 升、立方米, 符号 L、m³。

3.2.3 含沙量: 千克每立方米, 符号 kg/m³。

4 概述

径流泥沙自动监测仪(以下简称监测仪)包括径流泥沙测量、数据存储及传输、供电等装置, 其基本功能是测量径流过程所产生的径流量、含沙量, 主要由称重传感器、体积测量单元、数据采集单元等部分组成, 如图 1 所示。

在正常工作模式下, 当接收到降雨信号后, 将地表雨水导入第一集流桶中, 称重传感器采集重量值, 液位传感器采集液位值并计算容积。当雨水的体积达到监测仪标称容积时, 换向系统将雨水换向至第二集流桶中, 同时监测仪根据第一集流桶采集到的数据得到含沙量并完成排水。第二集流桶继续收集雨水得到含沙量, 双桶交替运行, 直至降雨结束, 最后根据交替次数与标称容积值获得本次测量径流量值。

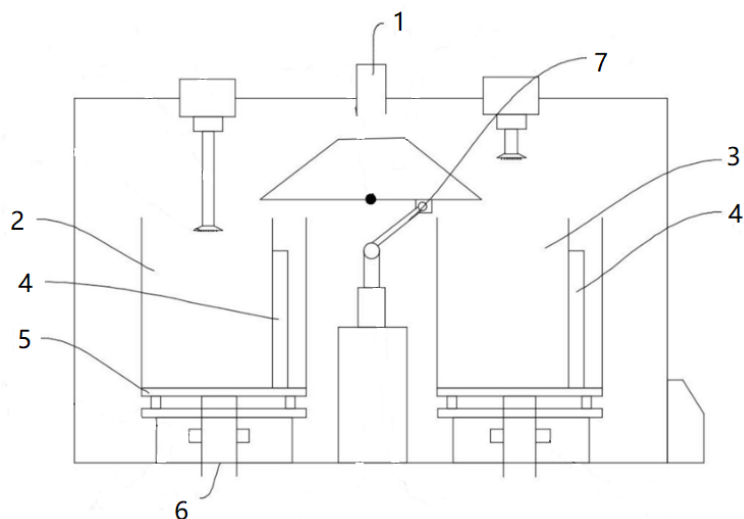


图1 径流泥沙监测仪示意图

1-入水口；2-第一集流桶；3-第二集流桶；4-液位传感器；5-称重传感器；6-排水口；7-换向系统

5 计量特性

5.1 标称容积的最大允许误差为 $\pm 5\%$ 。

5.2 标称容积重复性一般不超过最大允许误差绝对值的 $1/3$ 。

5.3 含沙量示值的最大允许误差为 $\pm 10\%$ 。

5.4 含沙量示值的重复性一般不超过最大允许误差绝对值的 $1/3$ 。

注：以上数据仅供参考，不作为合格判定。

6 校准条件

6.1 环境条件

6.1.1 环境温度：（5~45）℃。

6.1.2 无影响仪器正常工作的电磁干扰和机械振动。

6.2 校准介质

需现场制备标准土样，同时获得标准含沙量，由用户推荐土样和洁净水混合构成。

6.3 测量标准及其他设备。

6.3.1 主标准器。

测量标准的主要技术指标见表 1：

表 1 主标准器

序号	测量标准名称	技术要求	用途
1	电子天平	测量范围通常为 (0.5~3000) g, 准确度等级不低于Ⅱ级。	称重土壤密度
2	电子秤	测量范围通常为 (0~60) kg, 准确度等级不低于Ⅱ级。	称重土壤质量
3	标准金属量器组	配备标准容积 (10~100) L、准确度等级不低于二等若干金属标准量器。	称量水容量
4	量筒	标称容量(500~2000) mL, MPE=±5.0%。	测量土壤密度 称量水容量
5	温度计	量程为 (0~50) °C, 分度值为 0.1 °C。	径流量测量

6.3.2 主要配套设备及技术指标见表 2

表 2 测量标准

序号	测量标准名称	技术要求	用途
1	筛网	(2~5) mm	土壤取样
2	烘干机	105 °C	烘干土壤
3	秒表	分度值为 0.01 s	径流量测量

注：允许使用满足测量不确定度要求的其他设备。

7 校准项目和校准方法

7.1 校准项目

校准项目见表 3。

表 3 校准项目一览表

序号	校准项目
1	标称容积校准
2	标称容积重复性
3	含沙量示值误差
4	含沙量重复性

7.2 校准前准备

7.2.1 监测仪应有铭牌。铭牌应至少有以下标记：型号、编号、制造厂等信息。集流桶应有独立编号。

7.2.2 检查监测仪外表，不应有影响工作性能或使用安全的机械损伤；集流桶表面不得有凹凸现象；显示部件读数清晰、完整；各开关及按键接触良好，能正常工作，各紧固件无松动。

7.2.3 监测仪校准前应调整水平，并根据仪器使用说明书的要求进行预热。

7.2.4 具有自校功能的监测仪，按仪器使用说明书进行自校。

7.2.5 在每一个含沙量校准点校准前，应对监测仪集流桶进行冲洗，并执行置零操作。

7.2.6 经烘干设备烘干后的土壤按照附录 A 的试验方法进行土样密度测量，并记录密度值，也可采用其他方法进行密度测量。

7.2.7 将监测仪注满水，静止 5 min 以上，各连接处及外表面应无渗漏现象。

7.3 标称容积校准

根据监测仪标称容积，选用与其容积值相应的标准金属量器及量筒进行标称容积校准。

7.3.1 将标准金属量器置于集流桶上方，并调平。

7.3.2 用排液管将标准金属量器的排液口与被校集流桶的入水口相连，连接处不得有渗漏现象。

7.3.3 将水注入至标准金属量器标称容量刻线位置，测量并记录量器中的介质温度 t ，由式

(1) 计算得到标准容积值 V 。

$$V = V_{20}[1 + \beta(t - 20)] \quad (1)$$

式中：

V_{20} ——标准金属量器 20℃时的容积值，L；

β ——标准金属量器的体胀系数，℃⁻¹；

t ——量器中的介质温度，℃。

7.3.4 打开标准金属量器的放液阀门，将水排入到集流桶内，在滴流状态下等待 2min 后，关闭放液阀门。如未到达标称容积需用量桶注入相应体积的水直至监测仪容积刻度线，记录金属量器所排液体和量筒所注入水的体积。

7.3.5 读取并记录集流桶的容积示值 $V_{\text{示}}$ 。

7.3.6 标称容积示值误差按公式 (2) 计算：

$$E_V = \frac{V_{\text{示}} - V}{V} \times 100\% \quad (2)$$

7.3.7 重复执行 7.3.1-7.3.6 完成标称容积的 3 次校准。

7.4 标称容积重复性

标称容积的重复性按公式 (3) 计算：

$$u(E_V) = \frac{E_{V_{\text{max}}} - E_{V_{\text{min}}}}{C} \quad (3)$$

式中：

$u(E_V)$ ——标称容积的重复性；

$E_{V_{\text{max}}}$ ——标称容积示值误差最大值；

$E_{V_{\text{min}}}$ ——标称容积示值误差最小值；

C ——极差系数值见表 3。

表 3 d_n 数值表

n	2	3	4	5	6
C	1.13	1.69	2.06	2.33	2.53

7.5 含沙量示值误差

监测仪含沙量示值误差校准应包括以下校准点：(30%~80%)标称容积下的含沙量示值误差校准和标称容积下的含沙量示值误差校准，每个容积下的含沙量校准点为被校监测仪测量范围的 10%、50%和 90%，见表 4。实际配置标准样品的含沙量不超过设定校准点的 $\pm 10\%$ 。

表 4 含沙量示值误差校准点

含沙量校准点/kg/m ³				
容积点/L	(30%~80%)V	10%W	50%W	90%W
	V	10%W	50%W	90%W

对应容积点，含沙量示值误差校准步骤如下：

7.5.1 选用标称容量在(30%~80%)标称容积范围内的标准金属量器。

7.5.2 将标准金属量器内介质注入到集流桶中，在滴流状态下等待 2 min，记录标准金属量器容量值。

7.5.3 按照 10%含沙量校准点的值选取一定量的土壤在电子秤或电子天平上称重，记录土壤质量。

7.5.4 将土壤放置于集流桶中，并进行搅拌，使混合液体充分混合析出气泡，并静止 10 min，读取监测仪含沙量值并记录。

7.5.5 标准土样的含沙量按照公式（4）进行计算后得到含沙量标准值并记录。

$$W_s = \frac{m}{V_{\text{水}} + \frac{m}{\rho_{\pm}}} \quad (4)$$

式中：

m ——土壤质量，kg；

$\rho_{\pm}$ ——土壤密度，kg/m³；

$V_{\text{水}}$ ——标准金属量器的标称容量，m³；

W_s ——标准混合液体的含沙量，kg/m³。

7.5.6 10%含沙量校准点完成后，持续添加土壤至 50%、90%含沙量校准点并记录累积土壤质量和监测仪含沙量值。

7.5.7 重复执行 7.5.2-7.5.6 完成监测仪当前容积点的 3 次校准。

7.5.8 选用与标称容积相应的标准金属量器。

7.5.9 重复执行 7.5.2-7.5.6 完成监测仪当前容积点的 3 次校准。

7.5.10 示值误差计算

各校准点的示值误差按公式 (5) 计算：

$$E_{ij} = \frac{W_{ij} - W_{si}}{W_{si}} \times 100\% \quad (5)$$

式中：

E_{ij} ——径流泥沙自动监测仪在 i 校准点的第 j 次测量的示值误差；

W_{ij} ——在 i 校准点第 j 次测量的径流泥沙自动监测仪示值， kg/m^3 ；

W_{si} ——测量 i 校准点时第 j 次制备的标准水样含沙量， kg/m^3 。

取 3 次示值误差的平均值作为各校准点的示值误差。

7.6 含沙量重复性

各校准点的重复性按公式 (6) 计算：

$$u_i(E) = \frac{E_{i\max} - E_{i\min}}{C} \quad (6)$$

式中：

$u_i(E)$ ——径流泥沙自动监测仪在 i 校准点的重复性；

$E_{i\max}$ ——在 i 校准点示值误差最大值；

$E_{i\min}$ ——在 i 校准点示值误差最小值；

C ——在 i 校准点示值误差最小值。

极差系数值见表 3。

8 校准结果表达

8.1 校准记录

校准记录推荐格式参见附录 B。

8.2 校准结果的处理

校准证书由封面和校准数据组成。校准证书内页推荐格式见附录 E。证书上的信息至少包括以下内容：

- 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) 证书或报告的唯一性标识，每页及总页的标识；
- e) 客户的名称和地址；
- f) 被校对象的描述和明确标识；
- g) 进行校准日期，如果与校准结果的有效性应用有关时，应说明被校准对象的接收日期；
- h) 如果与校准结果的有效性和应用有关时，应对抽样程序进行说明；
- i) 对校准所依据的技术规范的标识，包括名称及代号；
- j) 校准环境的描述；
- k) 校准结果及测量不确定度的说明；
- l) 对校准规范的偏离的说明；
- m) 校准证书或校准报告签发人的签名；
- n) 校准结果仅对被校对象有效的声明；
- o) 未经实验室书面批准，不得部分复制证书的声明。

9 复校时间间隔

复校时间间隔建议为 12 个月。

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

土样密度的试验方法

将试验土样在 105 °C 烘干箱中烘烤（4~6）小时，冷却至室温后捣碎过 2 mm 筛网作为土壤样品使用。

试验方法：

1、选取 500 mL 量筒作为体积标准，加水至 300 mL，记作 $V_{\text{水}}$ ，在电子秤或电子天平上称重，得到量筒和水的总质量值 $M_{\text{水}}$ ；

2、取一定量土壤样品放入量筒中，混合后的液体液位高度尽量接近并不超过量筒 500 mL 容量线，搅拌使土壤与水充分融合并静止 10 分钟使气泡析出，读取混合液体体积 $V_{\text{混}}$ ，并在电子秤或电子天平上称重，得到量筒和混合液体的总质量值 $M_{\text{混}}$ ；

3、计算得到土壤的质量 $M_{\pm}$ ：

$$M_{\pm} = M_{\text{混}} - M_{\text{水}} \quad (\text{A. 1})$$

计算得到土壤的体积 $V_{\pm}$ ：

$$V_{\pm} = V_{\text{混}} - V_{\text{水}} \quad (\text{A. 2})$$

4、计算得到土壤的密度 $\rho_{\pm}$ ：

$$\rho_{\pm} = M_{\pm} / V_{\pm} \quad (\text{A. 3})$$

5、重复试验 3 次，取平均值作为土壤样品的密度。

注：在对测量结果影响很小的情况下，也可采用土壤常用密度值：2.65g/cm³。

校准记录的参考格式

记录（证书）编号：

原始记录格式编号：No. JLGS/LL-1040-2022

委托单位名称：

第 1 页 共 1 页

样品名称：

型号规格：

出厂编号：

生产厂商：

校准依据：

校准地点：

环境湿度：

校准人员：

校准人员：

标准器名称：

测量范围：

最大允许误差/准确：

溯源证书号：

有效期至：

土壤类型

$V_{\text{水}}$ (mL)

$V_{\text{瓶}}$ (L)

$m_{\pm}$ (g)

ρ (g/L)

$\rho_{\pm}$

土壤密度

$V_{\text{水}}$ (mL)

$V_{\text{瓶}}$ (L)

$m_{\pm}$ (g)

ρ (g/L)

$\rho_{\pm}$

一、标称容积

校准结果

测量次数	介质温度 t (°C)	标准容积值 V (L)	集流桶的容积示值 $V_{\text{示}}$	示值误差 E_V (%)	示值误差 $\bar{E}$	重复性 (%)
1						
2						
3						

二、含沙量

容积点 (L)	$V_{\text{水}}$ (L)	仪器含沙量量程10%				仪器含沙量量程50%				仪器含沙量量程90%				
		$m_{\pm}$ (kg)	$V_{\pm}$ (L)	标准含沙量 (kg/L)	仪器示值 (kg/L)	示值误差 (%)	重复性	$m_{\pm}$ (kg)	$V_{\pm}$ (L)	标准含沙量 (kg/L)	仪器示值 (kg/L)	示值误差 (%)	重复性	
1														
2														

注：容积点1对应标称容积的 (30%—80%)，容积点2对应标称容积

附录 C

校准证书内页参考格式

C.1 校准证书内页格式

表 C.1 误差和重复性校准记录

产品名称				型号规格	
样品编号				土样类型	
土样密度 kg/m³:			标称容积 L:		
测量点	测得值				
	测量量 kg/m³	标准值 kg/m³	相对误差 %	平均误差 %	重复性 %
1					
2					
3					
4					
5					
6					

以下空白。

附录 D

校准结果不确定度评定示例

D.1 标称容积测量结果示值误差的不确定度评定示例

以 1 号送交监测仪第一集流桶标成容积校准为例，标称容积 30 L。

D.1.1 校准介质

洁净水

D.1.2 主标准器及配套设备

排液法主标准器：标准金属量器组：

标称容量：30 L

准确度等级：二等

主要配套设备：温度计

量程：(0~50) °C

分度值：0.1 °C

D.1.3 校准结果

对标称容积进行 6 次测量，示值误差见表 D.1。

表 D.1 重复性实验数据

日期	样品	测量次序	介质温度	标称容积	仪器示值	误差	平均误差	重复性
单位			℃	L	L	%	%	%
2022.5.27	1 号样品 第一集 流桶	1	23.2	30.00317	30.12	0.39	0.19	0.24
		2	23.2	30.00317	30.06	0.19		
		3	23.2	30.00317	30.00	-0.01		
2022.6.4	1 号样品 第一集 流桶	1	23.8	30.00376	30.06	0.19	0.30	0.24
		2	23.8	30.00376	30.05	0.15		
		3	23.8	30.00376	30.17	0.55		
		2	25.1	30.00505	30.19	0.62		
		3	25.1	30.00505	30.00	-0.02		

D.1.4 测量模型

D.1.4.1 数学公式

考虑温度的影响，则有：

$$\Delta = V - V_{20}[1 + \beta(t - 20)]$$

(D.1)

式中：

V ——标称容积，L；

V_{20} ——标准金属量器 20℃时的容积值，L；

β ——标准金属量器的体胀系数，℃⁻¹；

t ——量器中的介质温度，℃。

δ ——液位高度测量对标称容积的影响，L；

D.1.4.2 方差和灵敏度系数

$$u_c^2(\Delta) = c_1^2 u^2 V_0 + c_2^2 (u\beta)^2 + c_3^2 u^2 t + (c_4\delta)^2$$

(D.2)

其中:

$$c_1 = \frac{\partial \Delta}{\partial V_{20}} = 1 + \beta(t - 20) \approx 1 ;$$

$$c_2 = \frac{\partial \Delta}{\partial \beta} = V_{20}(t - 20) ;$$

$$c_3 = \frac{\partial \Delta}{\partial t} = V_{20} \times \beta ;$$

$$c_4 = \frac{\partial V}{\partial \delta} = 1 ;$$

$$c_5 = \frac{\partial \Delta}{\partial V} = 1 。$$

D.1.5 标准不确定度分量的确定

D.1.5.1 标准量器 V_{20} 的不确定度 $u(V_{20})$

标准量器的检测证书给出示值误差限是 $\pm 0.025\%$ ，因此标准不确定度为：

$$u(V_{20}) = \frac{25 \times 10^{-5} \times 30}{\sqrt{3}} = 4.33 \times 10^{-3} L$$

D.1.5.2 标准量器体胀系数的不确定度 $u(\beta)$

标准量器体胀系数 $\beta_1 = 50 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ，用界限 $\pm 6 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ，考虑其均匀分布，故：

$$u(\beta_1) = \frac{6 \times 10^{-6}}{\sqrt{3}} = 3.46 \times 10^{-6} (^\circ\text{C}^{-1})$$

D.1.5.3 标准量器的水温的不确定度 $u(t)$

水温的变化界限为 $\pm 0.1 \text{ } ^\circ\text{C}$ ，考虑其分布为均匀分布则标准不确定度为：

$$u(\Delta t) = 0.1 / \sqrt{3} = 0.058 \text{ } ^\circ\text{C}$$

D.1.5.4 由 V 的测量重复性引入的标准不确定度分量 $u(V)$

重复性引入的标准不确定度分量与含沙量测定仪显示值的分辨力引入的标准不确定度分

量属于同一种效应导致的不确定度，应取二者的较大者。

I) 测量重复性引入的标准不确定度分量 $u_1(V)$

对 1 号样品第一集流桶取不同时间，分别进行 2 次测量，示值误差和重复性见表 2。

$$u_1(V) = 0.24\% \times 30 = 72 \times 10^{-3} (L)$$

II) 集流桶液位高度测量对标称容积的影响 $u_2(V)$

被校集流桶液位的读数误差限 $\pm 0.1\text{mm}$ ，该值对容积的影响量：

$$u_2(V) = 0.001 \times 0.52 \times 5^3 \text{ L}$$

取重复性引入的标准不确定度与显示值的分辨力引入的标准不确定度的较大者作为标准不确定度分量 $u(V)$ 。由于 $u_2(V) < u_1(V)$ ，因此取重复性测量引入的标准不确定度分量作为被校准集流桶标称容积重复性引入的标准不确定度分量 $u(V) = u_1(V) = 72 \times 10^{-3} (L)$ 。

D.1.6 标准不确定度一览表

表 D.2 标准不确定度一览表

标准不确定度分量	不确定度来源	标准不确定度	$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i}$	$ c_i u(x_i)$
$u(V_{20})$	由量器标称容量引入的标准不确定度	$4.33 \times 10^{-3} \text{ L}$	1	$4.33 \times 10^{-3} \text{ L}$
$u(\beta)$	由量器膨胀系数引入的标准不确定度	$3.46 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	120 (°C×L)	$0.415 \times 10^{-3} \text{ L}$
$u(t)$	由介质温度引入的标准不确定度	$0.058 \text{ } ^\circ\text{C}$	$1.5 \times 10^{-3} (^\circ\text{C}^{-1} \times \text{L})$	$0.087 \times 10^{-3} \text{ L}$
$u(V)$	测量重复性引入的标准不确定度	$72 \times 10^{-3} \text{ L}$	1	$72 \times 10^{-3} \text{ L}$

D.1.7 合成标准不确定度 $u_c(\Delta)$

合成标准不确定度 $u_c(V)$ 为

$$u_c(\Delta) = \sqrt{c_1^2 u^2(V_{20}) + c_2^2 u^2(\beta) + c_3^2 u^2(t) + c_4^2 u^2(V)}$$

$$= 72.13 \times 10^{-3} L$$

D.1.8 扩展不确定度 U

取包含因子 $k=2$, 则扩展不确定

$$U = k \times u_c(\Delta) = 2 \times 72.13 \times 10^{-3} L = 0.144 L$$

$$U_{\text{rel}} = U/V = 0.144/30 \times 100\% = 0.48\%$$

D.2 含沙量示值误差测量结果的不确定度评定示例

径流泥沙自动监测仪的测量范围为 $(30 \sim 300) \text{ kg/m}^3$, 根据本规范的校准方法以 30 kg/m^3 校准点为例, 对监测仪进行校准。

D.2.1 测量标准

表 D.3 标准器及配套设备

序号	测量标准名称	测量范围	技术要求
1	电子天平	$(0.5 \sim 3000) \text{ g}$	准确度等级Ⅱ级。
2	电子秤	$(0 \sim 60) \text{ kg}$	准确度等级Ⅲ级。
3	标准金属量器组	$(10 \sim 100) \text{ L}$	准确度等级 2 级若干金属标准量器。
4	量筒	$(500 \sim 2000) \text{ mL}$	$\text{MPE} = \pm 5.0\%$ 。
5	温度计	$(0 \sim 50) ^\circ\text{C}$	分度值为 $0.1 ^\circ\text{C}$ 。

D.2.2 测量模型

D.2.2.1 标准装置流量示值误差计算公式:

$$\Delta = W_C - \frac{m_{\pm}}{V + \frac{m_{\pm}}{\rho_{\pm}}} \quad (\text{D.3})$$

式中:

W_C ——仪器显示值, kg/m^3 ;

$m_{\pm}$ ——土的质量, kg ;

$\rho_{\pm}$ ——土的密度, kg/m^3 ;

V ——标称容积, m^3 。

D.2.2.2 方差和灵敏度系数

$$u_c^2(\Delta) = c_1^2 u^2(m_{\pm}) + c_2^2 u^2(V_{\text{水}}) + c_3^2 u^2(\rho_{\pm}) + c_4^2 u^2(W_C) \quad (\text{D.4})$$

其中:

$$c_1 = \frac{\partial \Delta}{\partial m_{\pm}} = \frac{-V_{\text{水}}}{(V_{\text{水}} + \frac{m_{\pm}}{\rho_{\pm}})^2} ;$$

$$c_2 = \frac{\partial \Delta}{\partial V_{\text{水}}} = \frac{-m_{\pm}}{(V_{\text{水}} + \frac{m_{\pm}}{\rho_{\pm}})^2} ;$$

$$c_3 = \frac{\partial \Delta}{\partial \rho_{\pm}} = \frac{\frac{m_{\pm}^2}{\rho_{\pm}^2}}{(V_{\text{水}} + \frac{m_{\pm}}{\rho_{\pm}})^2} = \frac{m_{\pm}^2}{(\rho_{\pm} V_{\text{水}} + m_{\pm})^2} ;$$

$$c_4 = \frac{\partial \Delta}{\partial W_C} = 1 .$$

D.2.3 标准不确定度分量的确定

D.2.3.1 由土的质量的称量 $m_{\pm}$ 引入的标准不确定度分量 $u(m_{\pm})$

土的质量的称量过程中, 严格按照秤的操作规范执行, 其不确定度主要是由秤的最大允许误差引入的。

秤的准确度等级为Ⅲ级, 测量范围 (0~15) kg。秤的最大允许误差 MPE: $\pm 5\text{g}$, 区间半宽为 5g, 假设服从均匀分布, 由土的质量的称量引入的标准不确定度为

$$u(m_{\pm}) = \frac{5\text{g}}{\sqrt{3}} = 2.887 \times 10^{-3} \text{kg}$$

D.2.3.2 由标称容积的测量 V 引入的标准不确定度分量 $u(V)$

经过标称容积测量结果示值误差的不确定度评定, 得到标称容积的示值误差引入的不确

定度为 $u(V)=0.144 \times 10^{-3} \text{m}^3$ 。

D.2.3.3 由土的密度的测量 $\rho_{\pm}$ 引入的标准不确定度分量 $u(\rho_{\pm})$

经过对土的测量过程的分析, 评定得到土的密度的标准不确定度分量 $u(\rho_{\pm})=24 \text{kg/m}^3$ 。

D.2.3.4 由 W_c 的测量重复性引入的标准不确定度分量 $u(W_c)$

重复性引入的标准不确定度分量与含沙量测定仪显示值的分辨力引入的标准不确定度分量属于同一种效应导致的不确定度, 应取二者的较大者。

I) 测量重复性引入的标准不确定度分量 $u_1(W_c)$

对浓度为 2g/ml 的标准溶液进行 6 次测量, 示值见表 D.4。

表 D.4: 重复性实验数据

测量点/ kg/m^3	1	2	3	4	5	6
30	28.6	29.4	29.8	29.2	29.0	28.6

由于测量次数小于 10 次, 因此采用极差法计算重复性。 $n=6$, 查表得到

$C=2.53$, 依据 $s(x)=(x_{\max}-x_{\min})/C=R/C=(29.8-28.6)/2.53=0.47 \text{kg/m}^3$ 。

由于实际测量结果以单次测量作为测量结果, 所以, 重复性测量引入的标准不确定度为单次测量的实验标准差

$$u_1(W_c)=s(x)=0.51 \text{kg/m}^3$$

II) 含沙量测定仪的分辨力引入的标准不确定度分量 $u_2(W_c)$

含沙量测定仪的分度值为 0.1kg/m^3 , 则分辨力的区间半宽 $a=0.05 \text{kg/m}^3$, 服从均匀分布, 则由显示值的分辨力引入的标准不确定度分量

$$u_2(W_c)=\frac{0.005 \text{g/ml}}{\sqrt{3}}=0.03 \text{kg/m}^3$$

取重复性引入的标准不确定度与显示值的分辨力引入的标准不确定度的较大者作为标准不确定度分量 $u(W_c)$ 。由于 $u_2(W_c)<u_1(W_c)$, 因此取重复性测量引入的标准不确定度分量作

为被校准含沙量测定仪重复性引入的标准不确定度分量 $u(W_c) = u_1(W_c) = 0.51 \text{ kg/m}^3$

D.2.4 标准不确定度一览表

表 D.5 标准不确定度一览表

标准不确定度分量	不确定度来源	标准不确定度	$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i}$	$ c_i u(x_i)$
$u(m_{\pm})$	由土的质量 $m_{\pm}$ 引入的标准不确定度	$2.887 \times 10^{-3} \text{ kg}$	$32.39/\text{m}^3$	0.096 kg/m^3
$u(V_{\text{水}})$	由标称容积 V 引入的标准不确定度	$0.144 \times 10^{-3} \text{ m}^3$	1029.52 kg/m^3	0.15 kg/m^3
$u(\rho_{\pm})$	由土的密度 $\rho_{\pm}$ 引入的标准不确定度	24 kg/m^3	0.00022	0.0053 kg/m^3
$u(W_c)$	测量重复性引入的标准不确定度	0.47 kg/m^3	1	0.51 kg/m^3

D.2.5 合成标准不确定度 $u_c(W_s)$

合成标准不确定度 $u_c(W_s)$ 按公式 (2) 计算,

$$u_c(\Delta) = \sqrt{c_1^2 u^2(m_{\pm}) + c_2^2 u^2(V_{\text{水}}) + c_3^2 u^2(\rho_{\pm}) + c_4^2 u^2(W_c)}$$

$$= 0.50 \text{ kg/m}^3$$

D.2.6 扩展不确定度 U

取包含因子 $k=2$, 则扩展不确定

$$U = k \times u_c(W_s) = 2 \times 0.50 \text{ kg/m}^3 = 1.00 \text{ kg/m}^3$$

$$U_{\text{rel}} = U/W_c = 1.00/31.3 \times 100\% = 3.2\%$$

