

T/GRM

中关村绿色矿山产业联盟团体标准

T/GRM XXXX—2026

超快响应湿度监测仪现场应用规范

On-site application guidelines for ultra-fast response humidity monitors

草案版次选择

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

2026 – XX – XX 发布

2026 – XX – XX 实施

中关村绿色矿山产业联盟 发布

目 次

前言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 核心技术参数要求 1

5 现场应用流程 2

6 数据采集与处理 4

7 性能验证方法 4

8 安全要求 6

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件由中关村绿色矿山产业联盟提出并归口。

本文件起草单位：西南石油大学、中国石油集团川庆钻探工程有限公司。

本文件主要起草人：夏文鹤。

超快响应湿度监测仪应用技术规范

1 范围

本文件规定了超快响应湿度监测仪（以下简称监测仪）应用的技术要求、现场应用、数据采集与处理、验证方法和安全。

本文件适用于气体钻井、油气生产等场景中，对瞬态湿度变化快速监测的监测仪应用。其他领域动态湿度快速监测场景可参照使用。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB/T 11605 湿度测量方法
- GB/T 15478 压力传感器性能试验方法
- GB/T 18268.1 测量、控制和实验室用的电设备电磁兼容性要求
- SY/T 6426 钻井井控技术规程

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

超快响应湿度监测仪 ultra-fast response humidity monitor

基于响应时间不大于2ms的湿度敏感元件，集成信号处理、数据传输与防护封装，快速捕捉和测量动态湿度变化的监测设备。

3.2

涉水复杂工况 water-involved complex working condition

油气勘探或工业生产过程中，存在液态水、水蒸气、地层水侵入或冷凝等多相流共存，且伴有压力、温度剧烈变化的动态工作环境。

3.3

绝对含水量 absolute water content

单位体积湿空气中含有的水蒸气质量，以克每立方米（g/m³）表示。

3.4

应用规模验证 application scale verification

在典型工况和不同地理位置下，累计部署和稳定运行的监测仪数量达到不小于2000只的规模统计证明技术可靠性、环境适应性和规模化应用可行性的过程。

3.5

多传感器集成系统 multi-sensor integrated system

将超快响应湿度传感器与温度、压力，O₂、H₂S等气体组分，流量、工程参数等传感器进行物理与数据层面融合，形成协同感知与监测的系统。

3.6

智能识别预警 intelligent identification and early warning

基于融合高动态湿度信息及其他多源传感器数据，通过算法模型自动辨识异常工况特征，并提前发出分级安全风险预警信息的功能。

4 技术要求

4.1 一般要求

监测仪应具备明确的产品标识、技术说明书，设计、制造与检验应符合国家现行产品标准的规定。

4.2 动态性能

- 4.2.1 监测仪核心湿度传感单元对阶跃湿度变化的响应时间不应大于 2ms。
- 4.2.2 在多传感器集成系统中，传感器数据采集的时间同步误差不应大于 10ms。
- 4.2.3 监测仪信号处理与补偿算法应具备实时性，采集的毫秒级湿度变化信号应进行快速修正与特征提取。
- 4.2.4 监测仪在持续工作条件下，动态响应特性应保持稳定，不应因长时间运行出现响应迟滞或性能衰减。
- 4.2.5 集成超快响应湿度传感器的实时感知系统，应在典型涉水复杂工况模拟或实际环境中，验证动态性能指标有效性。

4.3 测量性能

- 4.3.1 监测仪相对湿度测量范围应为 0% RH ~ 100% RH。
- 4.3.2 在 10% RH ~ 90% RH 内，相对湿度测量精度误差不应大于±2% RH。
- 4.3.3 监测仪应计算并输出绝对含水量，计算范围应覆盖 0 g/m³ ~ 150 g/m³，计算误差不应大于满量程的±3%。

4.4 环境适应性

- 4.4.1 监测仪工作温度应为-20 °C ~ +85 °C，存储温度应为-30 °C ~ +90 °C。
- 4.4.2 监测仪应根据应用场景，在 0.1 MPa ~ 10 MPa 的压力内正常工作。
- 4.4.3 外壳防护等级不应低于 IP67。
- 4.4.4 在潜在爆炸性环境中使用的监测仪，应取得国家认可的相应防爆认证。
- 4.4.5 监测仪应承受频率 10 Hz ~ 500 Hz、加速度 5 gn 的振动测试。

4.5 多传感器集成

- 4.5.1 监测仪应具备 RS-485、4 mA~20 mA、CAN 总线等标准工业数据接口，应支持与其他参数传感器数据交互与集成。
- 4.5.2 系统应具备数据融合处理能力，应实现湿度参数与钻压、扭矩、转速等工程参数，设备运行参数的实时关联分析。核心参数指标应符合表 1 的规定。

表1 核心参数指标

参数类别	参数名称	技术要求	备注
动态性能	湿度响应时间	≤ 2 ms	核心定义指标
	系统同步误差	≤ 10 ms	多传感器集成要求
测量性能	相对湿度范围	0% ~ 100% RH	全范围覆盖
	相对湿度精度	10%~90%RH下， ±2%RH	关键精度指标
	绝对含水量计算误差	≤ ±3% FS	用于工况定量分析
环境适应性	工作温度	-20 °C ~ +85 °C	宽温域要求
	防护等级	≥ IP67	防尘防水
	防爆认证	符合应用区要求	安全强制要求

5 现场应用

5.1 选型

- 5.1.1 监测仪应根据监测点最大预期湿度变化速率选择。
- 5.1.2 监测仪型号、防护材质及防爆等级应根据现场环境温度、压力、腐蚀性介质浓度，确定。
- 5.1.3 选型应满足气体钻井地层出水监测、井下燃爆预警等应用场景对湿度测量范围、精度及动态响应特征的核心需求。
- 5.1.4 选型时应评估监测仪的数据接口、通信协议与软件平台，应与现场复杂工况实时感知系统及预警平台无缝集成。
- 5.1.5 大规模部署应用中，选型应采用技术成熟、经稳定运行数量不小于 2000 只的规模化应用验证的产品。

5.2 安装

- 5.2.1 安装位置应选择在代表整体工况湿度特征、气流稳定、无机械遮挡和介质喷溅直接冲击的部位。气体钻井中，宜安装在排砂管线、注气管线等关键工艺节点。
- 5.2.2 安装应采用可靠的机械固定方式。传感探头应充分暴露于被测介质中。
- 5.2.3 在含尘、高湿或腐蚀性环境中，应安装专用过滤、防水溅或防腐蚀防护罩，且防护罩不得影响传感器响应速度。

5.3 调试与校准

- 5.3.1 安装后应进行通电检查，确认供电、自检及通信链路正常。
- 5.3.2 工况相对稳定时，应使用标准湿度发生器或经溯源的标准仪表进行现场零点与跨度校准，并记录校准数据。
- 5.3.3 对于集成系统，应验证湿度数据与压力、温度等其他参数采集的同步性及逻辑关联是否正确。
- 5.3.4 调试时，应验证监测仪内置信号处理与温度、压力补偿算法是否有效运行，输出的湿度值应根据环境条件修正。
- 5.3.5 典型稳定工况下，应记录并确认监测仪测得的绝对含水量等湿度基线值符合该工况下的理论或经验范围，作为后续异常预警的参考基准。
- 5.3.6 对于具备计算输出绝对含水量功能的监测仪，应通过对比已知温度、压力条件下的理论计算值，验证计算模型与输出结果的准确性。
- 5.3.7 调试过程中，应模拟或利用现场轻微波动，初步验证监测仪数据是否触发系统预警逻辑或异常检测模型产生预期响应。

5.4 运行维护

- 5.4.1 运行维护应制定并执行定期维护计划，应包括每日巡检设备状态、每月清洁防护装置、每季度精度核查等。
- 5.4.2 维护、校准、故障及处理情况均应记录，形成设备履历。
- 5.4.3 监测仪历史运行数据与预警记录应定期分析，评估长期性能趋势，并按分析结果对维护周期或预警阈值优化调整。
- 5.4.4 当监测仪作为融合高动态湿度信息的智能识别预警系统的一部分时，应对系统数据融合、模型运行及预警输出功能定期测试与维护。
- 5.4.5 维护过程中发现系统性能偏差或共性故障，应及时反馈至设备供应商或技术研发单位。
- 5.4.6 在传感器部署数量不小于 2000 只的大规模应用场景中，应建立统一的数字化维护管理平台，对设备运行状态、维护历史和性能数据集中监控与管理。

6 数据采集与处理

6.1 采集频率与传输

- 6.1.1 监测仪湿度数据采集频率不应低于 100 Hz。
- 6.1.2 数据传输应支持实时上传，至监控系统的网络延迟应小于 1s，通信协议宜采用开放的工业标准协议。
- 6.1.3 采集频率设定除 y 满足捕捉瞬态湿度变化外，还应满足融合高动态湿度信息的复杂工况智能识别模型对数据样本密度的最低计算需求。
- 6.1.4 在多传感器集成系统中，湿度数据采集时间戳应与关联的钻压、扭矩等工程参数及压力、温度等设备运行参数时间戳同步。
- 6.1.5 采集与传输系统应具备断线续传或本地缓存机制，并在通信恢复后应自动补传。

6.2 数据存储

- 6.2.1 采集的原始高频数据应至少本地保存 30 天，用于事后追溯与深度分析。
- 6.2.2 经处理的分钟级均值、报警事件等特征数据应长期归档保存。
- 6.2.3 用于事故追溯的原始数据等存储数据和关键预警事件记录，应建立可靠的备份机制。
- 6.2.4 数据存储应建立结构化的涉水复杂工况数据库，对存储的湿度及其关联的多源数据分类和管理。
- 6.2.5 存储数据应包含传感器编号、位置、时间戳、校准状态等完整元数据，并确保可被授权系统或工具高效访问与调用。

6.3 异常判定与预警

- 6.3.1 动态预警阈值应基于实时计算的绝对含水量及其变化率等特征参数，结合历史数据与工况模型设定。
- 6.3.2 预警信息应明确包含异常类型、等级、位置和时间，并通过声光、软件界面、短信等通道发布。
- 6.3.3 异常判定宜采用或兼容项目研发的基于双重注意力对比网络等智能算法模型。
- 6.3.4 异常判定与预警应建立预警效果的后评估与反馈机制，对已触发的预警事件应记录、分析与验证，并利用其结果持续优化预警阈值和智能识别模型。典型异常工况湿度特征与判定标准见表 2。

表2 典型异常工况湿度特征与判定标准

异常工况类型	核心湿度表征参数	判定阈值参考方向	说明
地层出水	环空绝对含水量变化率	大于5 (g/m³)/min的持续快速上升	需排除其他干扰
空压机后冷器故障	井口绝对含水量	较正常基线值激增100%以上	特征明显
井下燃爆风险	湿度骤降速率伴氧气变化	毫秒级响应捕捉到的骤降拐点	应与气体组分联动

7 验证方法

7.1 验证要求

- 7.1.1 验证方法应具有可操作性和可重复性。
- 7.1.2 监测仪在出厂、首次安装、大修后及定期维护时，应进行性能验证。
- 7.1.3 验证工作应包含对监测仪是否符合全部适用条款的确认。
- 7.1.4 性能验证方法、模型及阈值可采用相关技术研究成果、行业通用实践或制造商提供的验证方法，

可包括湿度响应机理模型、绝对含水量计算方法和异常工况智能识别模型。

7.1.5 验证结论应按监测仪在典型应用场景中的长期运行数据与预警实效综合评估。

7.2 响应速度测试

7.2.1 测试应在实验室或现场利用标准湿度阶跃发生装置确定。

7.2.2 测试应记录传感器输出从初始值变化到目标值 63% (τ_{63}) 的时间，应满足不大于 2ms 的要求。

7.3 测量精度校准

测量精度校准应按下列步骤执行：

- a) 将监测仪与可溯源的标准湿度发生器在恒温条件下连接；
- b) 在量程范围内均匀选取包括低、中、高湿度的至少 5 个校准点，待读数稳定后记录监测仪示值与标准值；
- c) 各点误差应符合 4.3.2 的要求；

7.3.1 校准过程中，应确认监测仪内置的对温度、压力的实时补偿算法有效运行。

7.3.2 对于具备输出绝对含水量功能的监测仪，应在校准中验证计算模型，通过输入经校准的标准温度、压力与湿度值，核验输出的绝对含水量值符合理论计算结果。

7.3.3 校准记录应包含校准时的环境温度、大气压力等工况参数。

7.4 长期稳定性验证

7.4.1 在稳定的温湿度环境下，应连续记录监测仪至少 7 天的输出数据，计算输出值标准差和最大漂移量，年化漂移量应符合产品说明书宣称的指标，宜优于 $\pm 1\%$ RH/年。

7.4.2 对于已实现规模化部署的应用，长期稳定性评估应按不小于 2000 只的大量设备集群运行数据分析，评估整体可靠性与批次一致性。

7.4.3 验证应利用在典型工况现场长期运行积累的历史数据，分析性能漂移与运行时间，温度循环、振动等环境应力间的关联关系。

7.4.4 长期稳定性验证结果应作为产品可靠性评估和改进设计的重要输入，并反馈至研发环节。

7.5 环境适应性验证

7.5.1 高低温工作试验时，应将监测仪置于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境中，各保持 2 小时，测试在该极端温度下的启动、测量和通信功能。

7.5.2 振动试验时，应按 4.4.5 的条件进行振动测试，试验后检查结构完整性并复测基本性能。

7.5.3 防护等级测试应符合 GB/T 4208 的要求，并不低于 IP67 等级。试验后，内部应无灰尘和水迹进入，且功能正常。

7.5.4 抗腐蚀性气体暴露测试时，应将监测仪置于规定浓度的硫化氢等腐蚀性气体环境中持续暴露规定时间后，测试外壳、接口的完整性及核心湿度测量功能是否正常。

7.5.5 电磁兼容性测试时，应监测仪应按 GB/T 18268.1 进行辐射发射、传导发射及抗扰度测试。

7.5.6 环境试验后核心性能复测时，应在完成 7.5.1 至 7.5.5 规定的环境适应性测试后，复测监测仪的响应时间及测量精度。性能验证项目与周期应符合表 3 的规定。

表3 性能验证项目与周期

验证项目	验证方法	验证周期	合格标准
响应速度	湿度阶跃测试，测 τ_{63} 时间	型式试验/大修后	$\leq 2\text{ ms}$
测量精度	与标准湿度源多点比对	每季度1次/异常后	符合4.3.2要求
长期稳定性	连续一周数据记录分析	每半年1次	符合宣称稳定性指标

环境适应性	高低温、振动、防护测试	型式试验/大修后	功能正常，符合第4章要求
-------	-------------	----------	--------------

7.6 应用规模验证

- 7.6.1 验证监测仪技术成熟度与规模化应用可行性时，应在不同地层、不同工艺的气体钻井现场等典型的涉水复杂工况现场进行大规模部署应用。
- 7.6.2 累计成功部署并实现稳定运行、数据有效的监测仪数量不应少于 2000 只。
- 7.6.3 规模应用验证实施过程、部署场景、运行效果及数据分析结论应形成完整的书面验证报告，作为评价技术成熟度与可行性的关键依据。
- 7.6.4 规模验证过程中应系统性采集、归档来自不同工况现场的长期运行数据与异常事件数据，为技术优化和智能识别模型的持续改进提供数据基础。
- 7.6.5 规模应用验证的成功标准，应包括在累计部署的监测仪中，不低于 95% 的设备的设备在考核周期内持续、稳定提供有效数据，并成功辅助或触发对地层出水、井筒积液等典型涉水复杂工况有效识别。

8 安全

8.1 设备防护安全

- 8.1.1 在爆炸危险区域使用的监测仪，防爆等级应覆盖该区域的气体组别和温度组别要求。
- 8.1.2 外部电气连接应符合防爆和防水要求，电缆入口应使用合格的防爆格兰头。
- 8.1.3 设备外壳应具备足够的机械强度与抗冲击设计。
- 8.1.4 监测仪的外壳接缝、线缆入口及调试接口应实现全密封。监测仪的外壳应达到 GB/T 4208 规定的防护等级要求，且不应低于 IP67。
- 8.1.5 为传感器配置的专用过滤、防水溅等现场防护罩，应结构牢固、便于拆卸更换，且不得因堵塞、结垢或损坏丧失防护功能或影响监测仪响应性能。

8.2 操作安全

- 8.2.1 安装、调试和维护人员应经专业培训，了解设备原理和现场安全规程。
- 8.2.2 在工艺装置不停运的情况下安装或检修时，应办理相关作业许可，并采取风险隔离措施。
- 8.2.3 在对多传感器集成系统安装、调试或维护操作时，应遵循系统联调规程，在接入或断开任一传感器时不应影响感知系统其他部分的正常运行与安全功能。
- 8.2.4 任何现场操作前，应确认目标监测仪及其防护装置处于安全、稳定的物理状态，并确认供电与通信链路正常，应避免在设备带故障或连接不稳状态下操作。
- 8.2.5 对监测仪及其集成的智能识别预警系统的软件参数、模型阈值及控制逻辑设置或修改时，应实行双人复核或授权审批制度，并记录完整的操作日志。
- 8.2.6 当监测系统发出预警后，操作人员应按既定规程进行现场确认或处置，不得擅自关闭、屏蔽或降低该监测通道的预警功能。
- 8.2.7 智能识别预警系统的软件平台应具有访问控制、操作审计和病毒防护能力。

8.3 应急处置

- 8.3.1 当监测仪发出高风险预警时，监控系统应自动触发或提示操作人员启动预定的应急处置程序。
- 8.3.2 监测仪发生故障时，应立即启用备用监测点或替代监测方案。
- 8.3.3 应急处置程序启动后，系统应确保预警事件前后全过程的湿度及其他关联参数等监测数据被完整记录并安全存储。

8.3.4 每次应急处置完成后，应对预警的准确性、响应程序的及时性和处置措施的有效性进行后评估，并将评估结论反馈用于优化预警阈值、识别模型及应急预案。

8.3.5 应急处置流程应针对高危的“燃爆”风险、中危的“地层出水”等不同风险等级预警制定，应明确不同级别预警下的响应权限、决策机制和行动范围。

8.3.6 智能识别预警系统及其触发的应急处置流程应定期模拟演练或桌面推演，相关人员应熟悉流程，并检验系统与人工响应的协同有效性。
