

T/JXEA

江西省工程师联合会团体标准

T/JXEA 270—2026

水库坝体安全监测多源数据融合分析标准

Standard for Multi-source Data Fusion Analysis in Dam Safety Monitoring of
Reservoirs

（征求意见稿）

2026 - XX - XX 发布

2026 - XX - XX 实施

目 录

前 言	3
引 言	4
1. 范围	5
2. 规范性引用文件	5
3. 术语和定语	5
4. 基本技术原则	6
5. 多源监测数据分类	6
6. 监测数据采集规范	7
7. 监测数据预处理要求	7
8. 多源数据时空配准	8
9. 经典融合算法应用	8
10. 机器学习融合算法	9
11. 物理模型融合方法	9
12. 混合驱动融合技术	10
13. 变形监测融合分析	10
14. 渗流监测融合分析	10
15. 应力监测融合分析	11
16. 渗压监测融合分析	11
17. 水位响应融合分析	12
18. 异常数据识别处理	13
19. 安全评价指标体系	13
20. 安全分析评价流程	14
21. 数据可视化要求	15
22. 数据存储管理规范	16
23. 预警阈值确定方法	17
24. 分级预警响应机制	18
25. 监测系统集成要求	19
26. 标准实施监督要求	20
27. 报告编制要求	21
28. 效果验证评估方法	22

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。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由江西省工程师联合会提出并归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

引言

水库坝体作为水利工程的关键设施，其安全状况直接关系到下游地区人民生命财产安全和社会经济的稳定发展。水库坝体在长期运行过程中，受到多种复杂因素的影响，如水位变化、地震作用、地质条件变化等，可能出现裂缝、渗漏、滑坡等安全隐患。因此，对水库坝体进行全面、实时、准确的安全监测至关重要。

传统的水库坝体安全监测通常采用单一类型的数据，如位移监测、渗流监测等。然而，单一数据源提供的信息有限，难以全面反映坝体的实际安全状况。多源数据融合技术通过整合不同类型、不同来源的数据，如传感器监测数据、卫星遥感数据、无人机巡检数据等，可以获取更丰富、更全面的坝体信息，从而更准确地评估坝体的安全状态，及时发现潜在的安全隐患。

制定水库坝体安全监测多源数据融合分析标准具有重要意义。一方面，该标准可以规范多源数据的采集、传输、处理和分析过程，确保数据的准确性和可靠性。另一方面，标准的制定有助于统一多源数据融合分析的方法和流程，提高分析结果的科学性和可比性。此外，标准的实施还可以促进水库坝体安全监测技术的推广和应用，提升水库坝体安全管理整体水平。

水库坝体安全监测多源数据融合分析标准

1. 范围

本文件规定了水库坝体安全监测多源数据融合分析的适用水库坝型、监测场景及多源数据融合分析技术要求。

本标准适用于混凝土坝、土石坝等常见水库坝型的安全监测。对于不同坝型，其坝体结构、材料特性等存在差异，本标准可针对各自特点，指导多源数据的有效融合与分析。

监测场景涵盖水库日常运行期、洪水期、地震等特殊工况。在日常运行期，通过对多源数据的融合分析，可及时发现坝体的细微变化；洪水期可实时掌握坝体的承受压力情况；地震等特殊工况下能快速评估坝体的安全状态。

多源数据融合分析技术要求方面，包括对位移、渗流、应力应变等不同类型监测数据的采集、传输、存储和处理。采用先进的数据融合算法，将多种数据进行有机整合，挖掘数据背后的潜在信息，提高对坝体安全状况的评估准确性。本标准适用于水库管理单位、监测设备制造商、科研机构等在水库坝体安全监测多源数据融合分析中的技术与管理实践。

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 50201—2014 防洪标准

GB 50487—2008 水利水电工程地质勘察规范

SL 551—2012 土石坝安全监测技术规范

SL 601—2013 混凝土坝安全监测技术规范

GB/T 3358.1—2009 统计学词汇及符号 第1部分：一般统计术语与用于概率的术语

GB/T 20288—2006 信息安全技术 公钥基础设施 数字证书格式

3. 术语和定语

下列术语和定义适用于本文件。

1 多源监测数据

指通过多种监测手段获取的，反映水库坝体安全状况的不同类型数据集合。

2 数据融合

将多源监测数据进行整合处理，以获取更全面、准确信息的过程。

3 水库坝体安全监测

对水库坝体的位移、渗流、应力等参数进行持续观测的活动。

4 特征提取

从多源监测数据中提取能反映坝体安全特征信息的操作。

5 数据质量评估

对多源监测数据的准确性、完整性、一致性等进行评价的工作。

6 融合分析模型

用于对多源监测数据进行融合分析的数学模型或算法。

4. 基本技术原则

遵循 GB/T 51019-2014《水利水电工程安全监测规范》相关要求，明确多源数据融合分析的总体原则、数据质量控制基本要求。

4.1 总体原则

数据一致性原则，确保多源监测数据基准统一；可靠性原则，优先选用经校准的有效监测数据；实时性原则，满足坝体安全动态预警需求；可追溯原则，完整留存数据处理全流程信息。

4.2 数据质量控制

数据完整性控制，确保监测数据无缺失、无断档；数据准确性控制，定期开展设备校准与数据校核；数据一致性控制，消除不同数据源间的基准偏差；数据时效性控制，严格按照采集周期完成数据更新。

4.3 二级标准

数据基准统一规范；设备校准周期标准；数据完整性校验规则；数据准确性校核流程；实时性预警触发阈值；可追溯信息存储要求；多源数据基准对齐方法；质量控制记录归档规范

4.4 三级标准

数据基准统一规范采用 GB/T 51019-2014 规定的高程、平面基准进行数据对齐；设备校准周期标准按照监测设备类型设定每 3 个月至 12 个月的校准周期；数据完整性校验规则检查监测数据采样率是否达到设计要求的 95%以上；数据准确性校核流程对比标准试样数据与监测数据偏差值不超过 $\pm 0.5\%$ ；实时性预警触发阈值设定数据延迟超过 10 分钟触发预警提示；可追溯信息存储要求留存数据采集、处理、融合全流程操作日志；多源数据基准对齐方法采用坐标转换参数完成不同传感器数据基准统一；质量控制记录归档规范将质量检查记录保存至工程竣工后 10 年以上

5. 多源监测数据分类

划分水库坝体监测的传感器类型、数据类别及采集维度，明确各类监测数据的归属范畴。

5.1 传感器类型

包括位移类传感器、渗流类传感器、应力类传感器、气象类传感器、视频类传感器；数据类别包括静态监测数据、动态监测数据、报警监测数据；采集维度包括空间维度数据、时间维度数据、物理量维度数据。

5.2 二级标准

位移类监测数据分类；渗流类监测数据分类；应力类监测数据分类；气象类监测数据分类；视频类监测数据分类；静态监测数据分类；动态监测数据分类；空间维度数据分类

5.3 三级标准

位移类监测数据分类包含坝体表面位移、内部位移、坝基位移三类数据；渗流类监测数据分类包含渗压、渗流量、渗流水温三类监测数据；应力类监测数据分类包含坝体应力、坝基应力、钢筋应力三类数据；气象类监测数据分类包含气温、风速、降雨量三类监测数据；视频类监测数据分类包含坝面巡检、重点区域监控两类数据；静态监测数据分类包含定期校准数据、初始状态数据两类；动态监测数据分类包含实时采集数据、间歇采集数据两类；空间维度数据分类包含平面坐标数据、高程坐标数据两类

6. 监测数据采集规范

规定各类监测数据的采集频率、精度要求及设备校准标准，统一监测数据采集的技术要求。

6.1 采集频率

根据监测数据类别设定不同的采集周期，静态数据每月采集 1 次，动态数据每 1 分钟至 1 小时采集 1 次；精度要求位移监测精度不低于 0.1mm，渗压监测精度不低于 1Pa；设备校准标准按照 GB/T 51019-2014 要求定期开展传感器校准。

6.2 二级标准

位移监测采集频率；渗流监测采集频率；应力监测采集频率；气象监测采集频率；位移监测精度要求；渗流监测精度要求；应力监测精度要求；设备校准标准

6.3 三级标准

位移监测采集频率坝体表面位移每 15 分钟采集一次，内部位移每小时采集一次；渗流监测采集频率渗压每 5 分钟采集一次，渗流量每 30 分钟采集一次；应力监测采集频率坝体应力每 10 分钟采集一次，钢筋应力每 20 分钟采集一次；气象监测采集频率气温每 1 小时采集一次，降雨量每 5 分钟采集一次；位移监测精度要求采用全站仪监测时精度控制在 $\pm 0.05\text{mm}$ 以内；渗流监测精度要求渗压传感器校准后误差不超过 $\pm 0.3\%FS$ ；应力监测精度要求应变片监测数据误差控制在 $\pm 5\mu\epsilon$ 以内；设备校准标准每年至少开展 1 次全项目传感器校准工作

7. 监测数据预处理要求

说明数据清洗、去噪、归一化等预处理的技术流程与标准，规范监测数据预处理的操作步骤。

7.1 数据清洗

剔除监测数据中的异常值、缺失值与错误值，采用插值法补充缺失数据；数据去噪采用小波变换、滑动平均法去除监测数据中的噪声信号；数据归一化将不同量纲的监测数据转换为统一的无量纲数据。

7.2 二级标准

异常值识别标准；缺失数据补全流程；噪声信号去除方法；数据归一化处理规范；预处理数据校验规则；

预处理记录归档要求；预处理参数设定标准；异常值处理流程

7.3 三级标准

异常值识别标准采用 3σ 准则识别超出 3 倍标准差的异常监测数据；缺失数据补全流程采用线性插值法补充连续缺失不超过 3 个采样点的数据；噪声信号去除方法采用 db4 小波对监测数据进行 5 层分解去噪处理；数据归一化处理规范将监测数据映射至 $[0, 1]$ 区间完成归一化操作；预处理数据校验规则对比预处理前后数据偏差不超过 $\pm 2\%$ ；预处理记录归档要求留存预处理操作日志与参数设置记录；预处理参数设定标准根据传感器类型设定滑动平均窗口大小为 $5 \sim 10$ ；异常值处理流程直接剔除异常值并标注异常数据产生时间

8. 多源数据时空配准

介绍多源监测数据的时空坐标统一、时间对齐技术，实现不同数据源的空间与时间统一。

8.1 时空坐标统一

采用大地坐标系完成不同传感器的空间坐标转换，统一至 WGS84 或北京 54 坐标系；时间对齐采用时间戳匹配法完成不同采集频率数据的时间对齐，统一至 UTC 标准时间。

8.2 二级标准

空间坐标转换规范；时间戳匹配方法；坐标系统一标准；时间对齐校验规则；多源数据配准流程；配准精度控制标准；配准记录归档要求；坐标转换参数设定

8.3 三级标准

空间坐标转换规范采用七参数法完成不同坐标系间的坐标转换；时间戳匹配方法以最高采集频率数据为基准对齐其他数据源时间；坐标系统一标准所有监测数据统一转换至 WGS84 大地坐标系；时间对齐校验规则对齐后数据时间偏差不超过 ± 1 秒；多源数据配准流程依次完成空间坐标转换与时间对齐操作；配准精度控制标准配准后空间坐标误差不超过 $\pm 5\text{cm}$ ；配准记录归档要求留存配准参数与精度检验报告；坐标转换参数设定根据测区位置确定七参数转换模型

9. 经典融合算法应用

阐述加权平均、卡尔曼滤波等传统融合算法的适用场景与流程，明确传统融合算法的应用规范。

9.1 加权平均算法

适用于静态监测数据的融合分析，根据数据精度设定不同的权重系数；卡尔曼滤波算法适用于动态监测数据的融合分析，实现实时数据的最优估计。

9.2 二级标准

加权平均算法适用场景；卡尔曼滤波算法适用场景；加权平均权重设定；卡尔曼滤波参数设定；算法流程规范；算法精度检验标准；算法应用记录归档；融合结果校验方法

9.3 三级标准

加权平均算法适用场景用于多台同类型传感器静态监测数据融合；卡尔曼滤波算法适用场景用于动态位移、

渗压等实时监测数据融合;加权平均权重设定根据传感器校准误差设定权重系数为 $1/\sigma^2$;卡尔曼滤波参数设定设定过程噪声协方差 Q 与观测噪声协方差 R ;算法流程规范依次完成初始化、预测、更新三步融合流程;算法精度检验标准融合后数据误差较单传感器降低 30%以上;算法应用记录归档留存算法参数与融合结果数据;融合结果校验方法对比融合数据与实测数据偏差不超过 $\pm 1\%$

10. 机器学习融合算法

说明神经网络、随机森林等机器学习算法在融合中的应用,规范机器学习融合算法的操作要求。

10.1 神经网络算法

适用于非线性监测数据的融合分析,通过训练模型实现多源数据的最优融合;随机森林算法适用于多分类监测数据的融合分析,提高融合结果的可靠性与稳定性。

10.2 二级标准

神经网络算法应用场景;随机森林算法应用场景;神经网络模型训练;随机森林参数设定;算法数据预处理;模型精度检验标准;算法应用流程规范;融合结果输出要求

10.3 三级标准

神经网络算法应用场景用于非线性应力、应变监测数据融合;随机森林算法应用场景用于多类型渗流监测数据的分类融合;神经网络模型训练采用 80%监测数据作为训练集完成模型训练;随机森林参数设定设定决策树数量为 100~200 棵提升稳定性;算法数据预处理将监测数据标准化后输入机器学习模型;模型精度检验标准模型拟合优度 R^2 达到 0.9 以上;算法应用流程规范依次完成数据导入、模型训练、融合输出三步;融合结果输出要求输出融合后数据与置信度评分

11. 物理模型融合方法

介绍基于坝体力学模型的多源监测数据融合分析技术,明确物理模型融合的技术要求。

基于弹性力学、渗流力学建立坝体力学模型,将多源监测数据代入模型进行融合分析,实现坝体安全状态的精准评价。

11.1 二级标准

力学模型建立规范;模型参数校准流程;监测数据代入方法;模型迭代更新要求;模型精度检验标准;融合结果输出规范;模型存储归档要求;力学模型选择标准

11.2 三级标准

力学模型建立规范采用弹性力学模型模拟坝体应力应变分布;模型参数校准流程利用初始监测数据校准模型力学参数;监测数据代入方法将位移、渗压、应力数据同步代入力学模型;模型迭代更新要求每季度更新一次模型参数适配坝体状态变化;模型精度检验标准模型计算值与实测值偏差不超过 $\pm 5\%$;融合结果输出规范输出坝体应力分布、渗流场分布等结果;模型存储归档要求留存力学模型参数与计算结果文件;力学模型选择标准根据坝体结构类型选择对应力学模型

12. 混合驱动融合技术

规定物理模型与机器学习结合的混合融合分析方法要求，明确混合融合技术的应用规范。

结合物理模型的机理优势与机器学习的数据驱动优势，实现多源监测数据的高精度融合分析，提高坝体安全评价的准确性。

12.1 二级标准

物理模型与机器学习结合方式；混合融合流程规范；混合模型参数设定；融合数据预处理要求；模型精度检验标准；混合模型存储要求；融合结果输出规范；混合融合适用场景

12.2 三级标准

物理模型与机器学习结合方式以物理模型计算结果作为机器学习输入特征；混合融合流程规范依次完成物理模型计算、机器学习融合、结果校验；混合模型参数设定设定物理模型边界条件与机器学习超参数；融合数据预处理要求同步处理物理模型数据与监测数据；模型精度检验标准混合融合后数据误差较单一方法降低 20%以上；混合模型存储要求留存物理模型与机器学习模型参数文件；融合结果输出规范输出融合后安全评价等级与预警阈值；混合融合适用场景用于高坝、复杂坝体的安全监测融合分析

13. 变形监测融合分析

阐述多点位移、沉降等变形监测数据的融合分析流程，规范变形监测数据的融合操作。

将多点位移计、沉降仪等传感器的监测数据进行融合分析，实现坝体变形状态的全面评价，为坝体安全预警提供依据。

13.1 二级标准

多点位移数据融合流程；沉降监测数据融合方法；变形数据时空配准；融合结果校验标准；变形预警阈值设定；融合结果输出要求；变形监测数据归档；变形分析报告编制

13.2 三级标准

多点位移数据融合流程依次完成数据预处理、时空配准、加权平均融合；沉降监测数据融合方法采用卡尔曼滤波完成沉降监测数据的实时融合；变形数据时空配准统一多点位移与沉降数据的空间与时间基准；融合结果校验标准融合后变形数据误差不超过 $\pm 0.2\text{mm}$ ；变形预警阈值设定设定日沉降量超过 2mm 触发黄色预警；融合结果输出要求输出坝体变形分布与变形趋势预测结果；变形监测数据归档将融合后数据保存至工程安全监测数据库；变形分析报告编制每月编制一次变形监测融合分析报告

14. 渗流监测融合分析

说明渗流量、渗压等渗流监测数据的融合分析方法，规范渗流监测数据的融合操作。

将渗压计、渗流量仪等传感器的监测数据进行融合分析，实现坝体渗流状态的全面评价，为坝体渗流安全

预警提供依据。

14.1 二级标准

渗压数据融合流程；渗流量数据融合方法；渗流数据时空配准；融合结果校验标准；渗流预警阈值设定；融合结果输出要求；渗流监测数据归档；渗流分析报告编制

14.2 三级标准

渗压数据融合流程依次完成数据预处理、时空配准、神经网络融合；渗流量数据融合方法采用随机森林完成渗流量与渗压数据的分类融合；渗流数据时空配准统一渗压与渗流量数据的采集时间与空间基准；融合结果校验标准融合后渗流数据误差不超过 $\pm 3\%FS$ ；渗流预警阈值设定设定渗流量超过设计值 10%触发橙色预警；融合结果输出要求输出坝体渗流场分布与渗流趋势预测结果；渗流监测数据归档将融合后渗流数据保存至安全监测数据库；渗流分析报告编制每半月编制一次渗流监测融合分析报告

15. 应力监测融合分析

介绍应力、应变等监测数据的融合处理与安全评价方法，规范应力监测数据的融合操作。

将应力计、应变片等传感器的监测数据进行融合分析，结合力学模型实现坝体应力状态的全面评价，为坝体结构安全预警提供依据。

15.1 二级标准

应力数据融合流程；应变数据融合方法；应力数据时空配准；融合结果校验标准；应力预警阈值设定；融合结果输出要求；应力监测数据归档；应力分析报告编制

15.2 三级标准

应力数据融合流程依次完成数据预处理、时空配准、混合驱动融合；应变数据融合方法采用卡尔曼滤波与力学模型结合完成应变融合；应力数据时空配准统一应力与应变数据的空间与时间基准；融合结果校验标准融合后应力数据误差不超过 $\pm 5\mu\epsilon$ ；应力预警阈值设定设定坝体主应力超过设计值 80%触发红色预警；融合结果输出要求输出坝体应力分布与结构安全评价结果；应力监测数据归档将融合后应力数据保存至工程安全监测数据库；应力分析报告编制每月编制一次应力监测融合分析报告

16. 渗压监测融合分析

16.1 渗压监测数据融合校正

采用线性校正法对不同传感器的渗压监测数据进行偏差修正，结合温度补偿模型消除环境温度对监测结果的影响；通过多传感器加权平均算法对同断面多点渗压数据进行融合处理，获取断面平均渗压值。

16.2 异常识别技术

基于 3σ 准则构建渗压监测数据异常识别模型，对偏离正常波动范围的数据进行初步筛选；结合滑动窗口算法对连续时段的渗压数据进行趋势分析，识别阶段性异常数据；采用互相关分析法对比渗压数据与水位数据的响应关系，定位异常数据的触发因素。

16.3 渗压监测数据融合流程

先对原始渗压数据进行预处理，包括剔除明显错误数据、补全缺失数据；再通过数据融合模型整合不同监测点的渗压信息；最后输出校正后的断面渗压序列，为后续分析提供基础数据。

16.4 渗压监测数据校正参数

设定渗压监测数据的校正阈值为 $\pm 5\%FS$ ，温度补偿系数范围为 $0.002\sim 0.005\%FS/^{\circ}C$ ；加权平均算法的权重系数依据传感器监测精度进行动态调整，精度越高权重占比越大。

16.5 异常数据判定规则

当渗压监测数据与历史同期均值的偏差超过20%时，判定为一级异常；偏差在10%~20%之间时，判定为二级异常；偏差小于10%时，判定为正常数据。

16.6 异常数据处理流程

对识别出的异常数据进行标记，分析异常产生的原因，包括传感器故障、线路干扰、环境突变等；根据异常原因采取数据修正、传感器校准、线路维护等措施；修正后的数据需再次进行异常识别验证，确认无误后纳入正常数据库。

17. 水位响应融合分析

17.1 水位与坝体变形响应关联

建立上游水位与坝体水平位移、垂直位移的响应关系模型，分析水位变化对坝体变形的滞后效应，确定变形响应的滞后时长范围为6~12小时；采用灰色关联分析法计算水位与不同位置坝体变形的关联度，识别变形敏感区域。

17.2 水位与坝体渗流响应关联

构建上游水位与坝体渗流量、浸润线埋深的耦合响应模型，分析水位变化速率对渗流参数的影响，确定渗流响应的临界水位阈值为设计水位的80%；通过多元线性回归分析建立水位-渗流响应的定量关系，为渗流预警提供依据。

17.3 多因素响应融合分析

整合上游水位、降雨量、坝体温度等多因素数据，采用偏最小二乘回归法分析多因素对坝体变形、渗流的综合影响；构建多因素响应耦合模型，量化各因素对坝体安全状态的贡献权重。

17.4 响应关系验证方法

采用交叉验证法对水位响应关系模型进行验证，将监测数据分为训练集和验证集，对比模型预测值与实际监测值的误差，误差范围控制在 $\pm 10\%$ 以内；采用残差分析法检验模型的拟合精度，确保响应关系的可靠性。

17.5 响应阈值设定

依据坝体设计参数和安全评价标准，设定上游水位变化速率的预警阈值为 $0.5m/h$ ，水位变化幅度的预警阈值为设计水位的15%；结合坝体变形响应特征，设定变形量的预警阈值为设计允许变形量的80%。

17.6 响应关系应用

将水位响应融合分析结果应用于坝体安全状态实时预警，当水位变化速率超过阈值时，触发初步预警信号；结合坝体变形、渗流响应数据，升级预警等级并采取相应处置措施。

18. 异常数据识别处理

18.1 异常监测数据识别方法

采用拉依达准则、格拉布斯准则两种方法结合的方式识别异常数据，提升识别准确率；基于时间序列预测模型对监测数据进行拟合，对比预测值与实际监测值的偏差，识别超出偏差范围的异常数据；结合多源数据交叉验证法，对比不同监测手段获取的同类数据，定位异常数据。

18.2 异常数据原因分析

建立异常数据原因分类体系，包括传感器故障、供电异常、通信干扰、环境突变、人为操作失误等类别；采用故障树分析法对异常数据的产生原因进行逐层拆解，定位具体故障点；结合历史监测数据和运维记录，匹配异常数据与历史故障的关联特征。

18.3 异常数据修正流程

对识别出的异常数据，根据其产生原因采取不同的修正方法，包括数据插值修正、传感器校准修正、环境参数补偿修正等；修正后的数据需进行合理性检验，确保修正后的数据符合监测数据的正常波动范围；修正过程需记录详细信息，包括修正原因、修正方法、修正人员等。

18.4 异常数据处置流程

发现异常数据后，第一时间标记并通知运维人员；运维人员在 2 小时内到达现场进行检查，确认异常原因；根据异常严重程度采取临时处置措施，包括暂停数据采集、切换备用传感器等；完成异常处理后，更新运维记录并进行效果验证。

18.5 异常数据分级标准

依据异常数据对坝体安全分析的影响程度，将异常数据分为一级异常、二级异常、三级异常三个等级；一级异常数据对安全分析影响重大，需立即处置；二级异常数据对安全分析有一定影响，需在 24 小时内处置；三级异常数据对安全分析影响较小，可在 72 小时内处置。

18.6 异常数据台账管理

建立异常数据台账，记录异常数据的发生时间、监测点位、异常类型、原因分析、处置措施、处置结果等信息；台账数据需定期进行汇总分析，形成异常数据月度报告，为运维决策提供依据。

18.7 异常数据预警机制

设定异常数据预警阈值，当异常数据出现频次超过设定阈值时，触发异常预警信号；预警信号通过运维管理系统推送至相关人员，提醒及时处理异常数据；建立异常数据预警的响应流程，确保异常数据得到及时处置。

19. 安全评价指标体系

19.1 安全评价指标构建原则

遵循科学性、系统性、可操作性、动态性原则，选取能够反映坝体安全状态的关键指标；指标体系应涵盖坝体渗流、变形、应力、环境等多个监测维度，确保评价结果的全面性；指标选取应结合坝体设计参数、地质条件、运行历史等因素，确保指标的针对性。

19.2 渗流安全评价指标

包括坝体渗流量、浸润线埋深、渗压水头、坝基渗漏量等指标；设定渗流量的安全阈值为设计允许渗流量的 120%，浸润线埋深的安全阈值为设计浸润线的 110%；采用层次分析法确定各渗流指标的权重，渗流量权重为 0.3，浸润线埋深权重为 0.4，渗压水头权重为 0.2，坝基渗漏量权重为 0.1。

19.3 变形安全评价指标

包括坝顶水平位移、坝顶垂直位移、坝坡位移、坝基沉降等指标；设定坝顶水平位移的安全阈值为设计允许位移的 120%，坝顶垂直位移的安全阈值为设计允许位移的 110%；采用熵权法确定各变形指标的权重，坝顶水平位移权重为 0.4，坝顶垂直位移权重为 0.3，坝坡位移权重为 0.2，坝基沉降权重为 0.1。

19.4 应力安全评价指标

包括坝体混凝土应力、坝基应力、钢筋应力等指标；设定混凝土应力的安全阈值为设计允许应力的 120%，钢筋应力的安全阈值为设计允许应力的 110%；采用专家打分法确定各应力指标的权重，混凝土应力权重为 0.5，坝基应力权重为 0.3，钢筋应力权重为 0.2。

19.5 环境安全评价指标

包括上游水位、降雨量、坝体温度、库水水质等指标；设定上游水位变化速率的安全阈值为 0.5m/h，降雨量的安全阈值为 50mm/24h；采用组合赋权法确定各环境指标的权重，上游水位权重为 0.4，降雨量权重为 0.3，坝体温度权重为 0.2，库水水质权重为 0.1。

19.6 综合安全评价指标

采用加权综合评价法构建坝体安全综合评价指数，计算公式为 $SI = \sum (W_i \times I_i)$ ，其中 W_i 为第 i 个指标的权重， I_i 为第 i 个指标的标准化值；设定综合安全评价指标的安全阈值为 0.8，当 $SI \geq 0.8$ 时，坝体安全状态为正常，当 $0.6 \leq SI < 0.8$ 时，坝体安全状态为预警，当 $SI < 0.6$ 时，坝体安全状态为危险。

19.7 指标体系动态调整机制

根据坝体运行状态、监测数据变化、工程改造等情况，定期对安全评价指标体系进行调整；调整周期为每年一次，当坝体发生重大工程变更时，及时调整指标体系；调整过程需记录详细信息，包括调整原因、调整内容、调整时间等。

20. 安全分析评价流程

20.1 安全分析评价准备

收集坝体监测数据、设计参数、地质资料、运行历史等基础数据；对收集到的数据进行预处理，包括数据清洗、格式统一、缺失值补全、异常值处理等；建立安全分析评价数据库，将预处理后的数据存储至数据库中，便于后续分析调用。

20.2 多源数据融合处理

采用数据融合算法对不同监测手段获取的多源数据进行整合，包括渗压监测数据、变形监测数据、应力监测数据、环境监测数据等；通过数据校准、坐标统一、时间同步等处理，确保多源数据的一致性和可比性；构建多源数据融合模型，实现不同类型数据的有机整合，为安全分析提供完整的数据支撑。

20.3 安全评价指标计算

依据安全评价指标体系，对预处理后的监测数据进行标准化处理，消除不同指标量纲的影响；计算各单项评价指标的数值，包括渗流量、位移量、应力值等；根据各指标的权重，计算单项指标的加权值，为综合评价提供基础。

20.4 安全状态综合评价

采用加权综合评价法计算坝体安全综合评价指数 SI；依据 SI 值对坝体安全状态进行分级判定，分为正常、预警、危险三个等级；结合多源数据融合分析结果，对坝体安全状态进行综合分析，确定安全状态的成因和发展趋势。

20.5 评价结果可视化展示

将安全分析评价结果以图表、报表等形式进行可视化展示，包括安全评价指标变化曲线、各指标权重分布饼图、安全状态分级热力图等；可视化展示应符合数据可视化要求的标准，确保展示内容清晰、准确、直观。

20.6 评价报告编制

依据安全分析评价结果，编制坝体安全评价报告，报告内容包括评价背景、评价方法、评价指标、评价结果、成因分析、建议措施等；评价报告应符合报告编制要求的标准，确保报告内容完整、规范、准确。

20.7 评价流程优化

定期对安全分析评价流程进行审查和优化，结合实际运行情况和新技术应用，改进数据处理方法、评价模型、展示方式等；优化周期为每半年一次，当坝体运行条件发生重大变化时，及时优化评价流程；优化过程需记录详细信息，包括优化原因、优化内容、优化效果等。

21. 数据可视化要求

21.1 可视化展示格式标准

采用国家现行标准规定的图表格式，包括折线图、柱状图、饼图、热力图、等值线图；不同类型的数据应采用合适的图表形式进行展示，如时间序列数据采用折线图，分类数据采用柱状图，占比数据采用饼图；可视化展示的图表应包含标题、坐标轴标签、数据单位、图例、数据来源等基本要素，确保图表的完整性和可读性。

21.2 可视化展示色彩标准

采用符合视觉舒适度的色彩方案，避免使用高对比度的色彩组合；同一指标的不同数据系列应采用统一的色彩和线型；预警等级的可视化展示应采用规定的色彩标准，正常状态为绿色，预警状态为黄色，危险状态为红色；色彩搭配应符合国家现行有关色彩标准的规定。

21.3 可视化展示分辨率标准

静态可视化展示的分辨率应不低于 300dpi，动态可视化展示的分辨率应不低于 1080p；可视化展示的文件格式应采用通用格式，包括 PDF、PNG、JPEG、HTML 等，便于不同平台的查看和使用。

21.4 可视化展示交互标准

交互式可视化展示应具备数据缩放、平移、点击查看详情等交互功能；交互功能应简单易用，符合用户操作习惯；交互式可视化展示的响应时间应不超过 2 秒，确保用户操作的流畅性。

21.5 可视化展示更新标准

实时监测数据的可视化展示应每 5 分钟更新一次，日监测数据的可视化展示应每日更新一次，月监测数据的可视化展示应每月更新一次；可视化展示的更新应自动触发，确保展示数据的及时性和准确性。

21.6 可视化展示权限标准

不同权限的用户应具备不同的可视化展示访问权限，管理员具备全部访问权限，普通用户仅具备查看权限；可视化展示的权限管理应符合数据存储管理规范的要求，确保数据的安全性和保密性。

21.7 可视化展示模板标准

制定统一的可视化展示模板，包括图表格式、色彩方案、字体样式、布局方式等；模板应便于修改和使用，提高可视化展示的工作效率；可视化展示模板应定期进行更新和完善，确保符合最新的标准和要求。

22. 数据存储管理规范

22.1 监测数据存储格式标准

采用结构化数据格式存储监测数据，包括 CSV、JSON、Parquet 等格式；结构化数据应包含监测点位编号、监测时间、监测值、传感器编号、数据状态等基本字段；存储格式应符合国家现行有关数据存储标准的规定，确保数据的兼容性和可扩展性。

22.2 监测数据备份策略

制定定期备份和实时备份相结合的备份策略，实时备份用于保存最新的监测数据，备份频率为每小时一次；定期备份用于保存历史监测数据，备份频率为每日一次，每周进行一次全量备份，每日进行一次增量备份；备份数据应存储在不同的存储介质上，包括本地磁盘、云存储、异地备份服务器等，确保数据的安全性和可靠性。

22.3 监测数据权限管理

建立数据权限管理制度，明确不同用户角色的数据访问权限，包括管理员、运维人员、技术人员、普通用户等；管理员具备全部数据的访问和修改权限，运维人员具备监测数据的查看和录入权限，技术人员具备监测数据的分析和处理权限，普通用户仅具备监测数据的查看权限；权限管理应采用身份认证和授权机制，确保数据的安全性和保密性。

22.4 监测数据存储容量规划

根据监测点位数量、监测频率、数据存储周期等因素，规划监测数据的存储容量；监测数据的存储周期为至少 10 年，对于重要监测点位的数据，存储周期应延长至 20 年；存储容量规划应预留 30% 的冗余空间，确保

存储系统的稳定性和可扩展性。

22.5 监测数据存储安全要求

采用数据加密技术对存储的监测数据进行加密，包括数据传输加密和数据存储加密；存储系统应具备防火、防潮、防雷、防盗等物理安全措施；定期对存储系统进行安全检查和漏洞扫描，及时发现和处理安全隐患；存储系统应具备数据恢复功能，确保在数据丢失或损坏时能够及时恢复数据。

22.6 监测数据查询与调用规范

建立数据查询与调用接口，支持按监测点位、监测时间、数据类型等条件进行数据查询；查询与调用接口应具备身份认证和权限验证功能，确保数据的安全性；查询与调用的响应时间应不超过 5 秒，确保用户操作的流畅性。

22.7 监测数据归档与销毁

定期对监测数据进行归档处理，将历史数据存储至离线存储介质上；归档数据应进行压缩处理，减少存储空间占用；当存储数据超过存储周期时，应按照规定的流程进行数据销毁，销毁过程应记录详细信息，确保数据的安全性和保密性。

23. 预警阈值确定方法

23.1 统计分析确定预警阈值

采用均值-标准差法对历史监测数据进行统计分析，计算监测数据的均值和标准差，确定预警阈值的初步范围；采用百分位数法对历史监测数据进行分析，确定不同预警等级对应的百分位数阈值，如 95%百分位数为一级预警阈值，90%百分位数为二级预警阈值；结合坝体安全评价标准，对统计分析得到的预警阈值进行修正和优化。

23.2 模型推演确定预警阈值

建立坝体安全响应模型，包括渗流响应模型、变形响应模型、应力响应模型等；通过模型推演分析不同工况下监测数据的变化范围，确定预警阈值的理论值；结合实际监测数据对模型推演的结果进行验证和修正，确保预警阈值的合理性和可靠性。

23.3 多因素耦合预警阈值确定

考虑上游水位、降雨量、坝体温度等多因素的影响，采用多因素耦合模型确定预警阈值；通过正交试验法分析各因素对预警阈值的影响程度，确定各因素的最优组合；结合多源数据融合分析结果，对多因素耦合预警阈值进行调整和优化。

23.4 预警阈值分级标准

依据坝体安全评价指标体系，将预警阈值分为一级预警、二级预警、三级预警三个等级；一级预警阈值对应坝体安全状态为危险，二级预警阈值对应坝体安全状态为预警，三级预警阈值对应坝体安全状态为注意；不同监测指标的预警阈值应分别确定，确保阈值的针对性和准确性。

23.5 预警阈值动态调整机制

根据坝体运行状态、监测数据变化、工程改造等情况，定期对预警阈值进行调整；调整周期为每年一次，当坝体发生重大工程变更或监测数据出现异常变化时，及时调整预警阈值；调整过程需记录详细信息，包括调整原因、调整内容、调整时间等。

23.6 预警阈值验证方法

采用历史监测数据对确定的预警阈值进行验证，对比预警阈值触发时坝体的实际安全状态，验证阈值的准确性和可靠性；采用交叉验证法将历史监测数据分为训练集和验证集，验证预警阈值的泛化能力；验证结果需形成验证报告，为预警阈值的应用提供依据。

23.7 预警阈值应用规范

明确预警阈值的应用范围和使用方法，包括预警阈值的触发条件、预警等级的判定标准、预警信号的发布流程等；预警阈值应在安全分析评价流程中应用，为坝体安全状态实时预警提供依据；预警阈值的应用应符合数据可视化要求的标准，确保预警信号的清晰展示。

表 1 统计分析法

方法	操作步骤	技术要点
均值-标准差法	<ul style="list-style-type: none">计算历史数据均值（μ）和标准差（σ）初步阈值：<ul style="list-style-type: none">一级预警：$\mu + 2\sigma$二级预警：$\mu + 1.5\sigma$	<ul style="list-style-type: none">适用于近似正态分布数据需剔除异常值（如施工期、极端天气数据）
百分位数法	<ul style="list-style-type: none">对历史数据排序设定：<ul style="list-style-type: none">一级预警（重大风险）：95%百分位数二级预警（较大风险）：90%百分位数	<ul style="list-style-type: none">不依赖数据分布形态更适用于偏态分布或存在突变点的数据
标准修正	结合《水库大坝安全评价导则》（SL 258）中的允许变形量、渗流量限值等强制性指标，对统计结果进行安全边界校核	确保阈值不突破工程设计安全底线

24. 分级预警响应机制

24.1 预警等级划分标准

依据坝体安全综合评价指数 SI 和各单项监测指标的预警阈值，将预警等级分为一级预警、二级预警、三级预警三个等级；一级预警对应 $SI < 0.6$ ，坝体安全状态为危险，需立即采取处置措施；二级预警对应 $0.6 \leq SI < 0.8$ ，坝体安全状态为预警，需采取加强监测和分析措施；三级预警对应 $SI \geq 0.8$ ，坝体安全状态为正常，仅需进行日常监测。

24.2 一级预警响应措施

当触发一级预警时，立即发布红色预警信号，通过运维管理系统、短信、电话等方式通知相关人员；立即组织专业技术人员进行现场检查，分析预警原因，制定处置方案；采取应急处置措施，包括限制水库水位变化、增加监测频次、启动应急抢险预案等；一级预警响应的责任主体为坝体管理单位的主要负责人，响应时间应不超过 1 小时。

24.3 二级预警响应措施

当触发二级预警时，发布黄色预警信号，通过运维管理系统、短信等方式通知相关人员；组织专业技术人员进行数据分析和现场检查，分析预警原因，制定处置方案；采取加强监测频次、增加监测项目、优化运行调度等措施；二级预警响应的责任主体为坝体管理单位的技术负责人，响应时间应不超过 4 小时。

24.4 三级预警响应措施

当触发三级预警时，发布绿色正常信号，仅需进行日常监测和数据分析；定期对监测数据进行汇总分析，评估坝体安全状态；当三级预警数据出现异常变化时，及时升级预警等级并采取相应措施；三级预警响应的责任主体为坝体管理单位的运维人员，响应时间应不超过 24 小时。

24.5 预警响应流程规范

建立预警响应流程，包括预警信号发布、现场检查、原因分析、处置措施制定、处置措施实施、效果验证、预警解除等环节；每个环节应明确责任主体、完成时限和工作要求；预警响应流程应定期进行演练，确保相关人员熟悉流程和职责。

24.6 预警响应记录管理

建立预警响应记录台账，记录预警等级、预警时间、响应人员、处置措施、处置结果、预警解除时间等信息；预警响应记录应定期进行汇总分析，形成预警响应月度报告，为运维决策提供依据；预警响应记录应保存至少 10 年，符合数据存储管理规范的要求。

24.7 预警响应培训与演练

定期组织预警响应培训，包括预警等级判定、响应流程、处置措施等内容，提高相关人员的应急处置能力；每半年组织一次预警响应演练，模拟不同预警等级的响应场景，检验响应流程的有效性和实用性；培训和演练记录应进行归档保存，确保培训和演练的效果。

25. 监测系统集成要求

25.1 监测系统集成原则

遵循兼容性、开放性、可靠性、安全性原则，确保监测系统与现有坝体管理系统的无缝对接；采用标准化的接口协议，包括 HTTP、MQTT、OPC UA 等，实现不同监测设备和系统的数据交互；监测系统集成应结合坝体安全监测的实际需求，确保集成后的系统能够满足安全分析评价的要求。

25.2 监测设备接入标准

制定监测设备接入规范，包括设备接入协议、数据格式、通信频率、电源要求等；监测设备应具备数据采集、数据传输、数据存储等基本功能，采集精度应符合国家现行有关监测标准的规定；监测设备接入系统前需进行兼容性测试和功能验证，确保设备能够正常接入系统。

25.3 系统数据交互标准

建立系统数据交互接口，实现监测数据、评价结果、预警信号等信息的交互；数据交互应采用加密传输协议，确保数据的安全性和保密性；数据交互的响应时间应不超过 2 秒，确保信息传递的及时性和准确性。

25.4 系统功能集成要求

集成监测数据采集、数据预处理、数据融合分析、安全评价、预警发布、可视化展示等功能模块；各功能模块应具备独立的运行能力，同时能够协同工作，形成完整的监测系统；系统功能集成应符合安全分析评价流程的要求，确保各个环节的无缝衔接。

25.5 系统部署标准

监测系统的部署应结合坝体的实际情况，包括地形条件、监测点位分布、网络环境等；监测系统的服务器应部署在安全可靠的环境中，具备防火、防潮、防雷、防盗等物理安全措施；监测系统的终端设备应部署在便于操作和查看的位置，包括中控室、运维办公室等。

25.6 系统运维管理要求

建立监测系统运维管理制度，明确运维人员的职责和工作内容；定期对监测系统进行检查和维护，包括设备检查、数据备份、系统升级等；监测系统的故障修复时间应不超过 4 小时，确保系统的正常运行；运维记录应进行归档保存，符合数据存储管理规范的要求。

25.7 系统兼容性测试要求

监测系统集成完成后，需进行兼容性测试，包括设备兼容性测试、系统兼容性测试、数据兼容性测试等；兼容性测试应覆盖所有监测设备和功能模块，确保系统的稳定性和可靠性；兼容性测试结果需形成测试报告，为系统的正式运行提供依据。

25.8 系统安全防护要求

监测系统应具备身份认证、权限管理、数据加密、防火墙等安全防护功能；系统应定期进行安全检查和漏洞扫描，及时发现和处理安全隐患；系统应具备数据备份和恢复功能，确保在系统故障或数据丢失时能够及时恢复系统和数据。

26. 标准实施监督要求

26.1 监督主体确定

明确坝体安全监测多源数据融合分析标准的实施监督主体为江西省工程师联合会和坝体管理单位；江西省工程师联合会负责标准的整体监督和评估，坝体管理单位负责标准的日常实施和监督；监督主体应具备相应的专业能力和资质，确保监督工作的有效性和权威性。

26.2 监督检查频次规定

日常监督检查由坝体管理单位每月进行一次，重点检查标准的实施情况、监测数据的质量、预警响应流程的执行情况等；专项监督检查由江西省工程师联合会每季度进行一次，重点检查标准的符合性、安全分析评价流程的规范性、数据存储管理的合规性等；年度监督评估由江西省工程师联合会每年进行一次，全面评估标准的实施效果和适用性。

26.3 监督检查内容规范

日常监督检查的内容包括监测设备运行状态、数据采集准确性、异常数据处理情况、预警响应执行情况等；

专项监督检查的内容包括标准的宣贯培训情况、安全评价指标体系的应用情况、数据融合分析方法的使用情况等；年度监督评估的内容包括标准实施的经济效益、社会效益、安全效益等。

26.4 监督检查方法规定

采用现场检查、数据核查、文档审查、人员访谈等方法进行监督检查；现场检查主要检查监测设备的运行状态和现场管理情况；数据核查主要检查监测数据的准确性和完整性；文档审查主要检查标准实施的相关记录和报告；人员访谈主要了解相关人员对标准的掌握情况和执行情况。

26.5 问题整改与闭环管理

对监督检查中发现的问题，应及时下达整改通知书，明确整改内容、整改时限和整改要求；整改责任主体应按照整改通知书的要求进行整改，整改完成后需提交整改报告；监督主体应对整改情况进行复查，确保问题得到有效解决，形成整改闭环；整改记录应进行归档保存，符合数据存储管理规范的要求。

26.6 标准实施评估方法

采用层次分析法、模糊综合评价法等方法对标准的实施效果进行评估；评估指标包括标准的符合性、实施的有效性、数据的准确性、预警的及时性等；评估结果应形成标准实施评估报告，为标准的修订和完善提供依据。

26.7 标准宣贯培训要求

江西省工程师联合会负责组织标准的宣贯培训，包括标准的编写背景、主要内容、实施要求等；坝体管理单位负责组织本单位人员的培训，确保相关人员熟悉和掌握标准的内容和要求；培训记录应进行归档保存，符合数据存储管理规范的要求。

26.8 标准修订与完善机制

根据标准实施监督评估的结果、坝体运行状态的变化、新技术的应用等情况，定期对标准进行修订和完善；修订周期为每五年一次，当坝体发生重大工程变更或出现新的安全问题时，及时修订标准；标准修订过程应广泛征求相关单位和人员的意见，确保标准的科学性和实用性。

27. 报告编制要求

27.1 报告编制基本原则

遵循客观性、准确性、完整性、规范性原则，确保报告内容真实反映坝体安全监测融合分析的结果；报告编制应结合坝体安全评价指标体系和安全分析评价流程，确保报告内容符合标准要求；报告编制应采用简洁明了的语言和规范的格式，便于阅读和理解。

27.2 报告编制基本要素

报告应包含封面、目录、前言、正文、结论与建议、附件等基本要素；封面应包含报告名称、编制单位、编制日期、版本号等信息；目录应包含报告各章节的标题和页码；前言应包含编制背景、目的、范围等信息；正文应包含监测数据概况、数据融合分析方法、安全评价结果、预警情况等内容；结论与建议应包含坝体安全状态总结、存在的问题、改进措施等内容；附件应包含监测数据报表、图表、测试报告等相关资料。

27.3 监测数据概况编写

报告应详细描述监测数据的采集情况，包括监测点位分布、监测频率、采集时间范围等；对监测数据的质量进行评价，包括数据完整性、准确性、异常数据处理情况等；对监测数据的变化趋势进行分析，包括渗压、变形、渗流等数据的变化情况。

27.4 数据融合分析方法编写

报告应详细描述多源数据融合分析的方法和过程，包括数据预处理方法、融合算法、异常数据识别处理方法等；对融合分析的结果进行展示，包括融合后的数据序列、异常数据处理结果等；对融合分析的效果进行评价，包括数据可靠性、分析准确性等。

27.5 安全评价结果编写

报告应详细描述安全评价指标体系的应用情况，包括各指标的计算结果、权重分配情况等；对安全评价指标 SI 进行计算和分析，包括 SI 的变化趋势、当前值等；对坝体安全状态进行分级判定，包括正常、预警、危险三个等级，并说明判定依据。

27.6 预警情况编写

报告应详细描述预警情况，包括预警等级、预警时间、预警原因等；对预警响应措施的执行情况进行描述，包括处置措施、处置结果等；对预警响应的效果进行评价，包括预警信号的及时性、处置措施的有效性等。

27.7 报告格式规范

报告的格式应符合国家现行有关公文格式的规定，包括字体、字号、行距、页边距等；报告的图表应符合数据可视化要求的标准，包括图表格式、色彩方案、标注说明等；报告的文字应采用简体中文，专业术语应符合国家现行有关标准的规定。

27.8 报告审核与批准

报告编制完成后，需由编制单位的技术负责人进行审核，审核内容包括报告内容的准确性、完整性、规范性等；审核通过后，由编制单位的主要负责人进行批准；报告审核和批准记录应进行归档保存，符合数据存储管理规范的要求。

27.9 报告分发与归档

报告批准后，应按照规定的分发范围进行分发，包括坝体管理单位、上级主管部门、江西省工程师联合会等；报告的电子版和纸质版应进行归档保存，归档保存周期为至少 10 年，符合数据存储管理规范的要求。

28. 效果验证评估方法

28.1 验证评估基本原则

遵循科学性、客观性、可操作性、动态性原则，确保验证评估结果真实反映多源融合分析结果的准确性和可靠性；验证评估应结合坝体安全监测的实际需求，确保验证评估结果能够为坝体安全评价提供依据；验证评估应采用多种方法相结合的方式，提升验证评估的全面性和准确性。

28.2 历史数据验证方法

采用坝体运行历史中的监测数据和安全评价结果进行验证，对比多源融合分析结果与历史安全评价结果的一致性；历史数据验证的样本量应不少于 100 组，覆盖不同运行工况和安全状态；验证评估指标包括准确率、召回率、F1 值等，确保验证评估的科学性。

28.3 现场试验验证方法

选择典型的坝体监测点位进行现场试验，通过人工监测和自动化监测相结合的方式获取监测数据；对比多源融合分析结果与现场试验监测数据的一致性，验证融合分析结果的准确性；现场试验的周期应不少于 7 天，覆盖不同的环境条件和水位变化情况。

28.4 交叉验证方法

将监测数据分为训练集和测试集，采用训练集数据构建多源融合分析模型，采用测试集数据验证模型的准确性；交叉验证的折数应不少于 5 折，确保验证评估的可靠性；交叉验证的评估指标包括均方误差、决定系数 R^2 等，确保验证评估的科学性。

28.5 效果评估指标体系

建立效果评估指标体系，包括数据准确性指标、分析准确性指标、预警及时性指标、安全评价一致性指标等；数据准确性指标包括数据完整率、数据准确率、异常数据识别准确率等；分析准确性指标包括安全评价指标误差率、安全状态判定准确率等；预警及时性指标包括预警响应时间、预警准确率等；安全评价一致性指标包括与历史安全评价结果的一致性率等。

28.6 效果评估流程规范

建立效果评估流程，包括数据准备、模型构建、验证评估、结果分析、报告编制等环节；每个环节应明确责任主体、完成时限和工作要求；效果评估流程应定期进行优化，确保验证评估的有效性和实用性。

28.7 效果评估报告编制

依据效果评估结果，编制多源融合分析效果评估报告，报告内容包括评估背景、评估方法、评估指标、评估结果、问题分析、改进建议等；效果评估报告应符合报告编制要求的标准，确保报告内容完整、规范、准确。

28.8 效果评估结果应用

将效果评估结果应用于多源融合分析模型的优化和完善，调整融合算法、权重分配、预警阈值等参数；将效果评估结果应用于标准的修订和完善，为标准的改进提供依据；将效果评估结果应用于坝体安全管理决策，为坝体安全运行提供参考。

28.9 验证评估动态调整机制

根据坝体运行状态的变化、监测数据的更新、新技术的应用等情况，定期对验证评估方法和指标体系进行调整；调整周期为每年一次，当坝体发生重大工程变更或出现新的安全问题时，及时调整验证评估方法；调整过程需记录详细信息，包括调整原因、调整内容、调整时间等。