

# 多源异构数据驱动的尾矿库智能管理系统的设计

## ——以商洛市为例

邢雪

商洛学院经济管理学院 陕西 商洛 726000

**【摘要】**：针对商洛市尾矿库管理面临的实时监测覆盖率低、跨部门协同效率低、预警适应性低及行政标准平台数据孤岛等困境，结合现有研究在多源异构数据整合、预警模型动态性与系统架构协同性方面的不足，本文设计了多源异构数据驱动的尾矿库智能管理系统。系统采用数据服务应用三层微服务架构，整合监测环境管理等多源异构数据，构建全域感知智能研判协同处置的功能模块。关键技术包括三级数据融合模型，动态风险评价体系与四级预警机制，以及阈值动态校准系统。该系统的设计可有效打破数据孤岛，提升预警准确率，控制误报率在较低水平，实现风险防控从被动响应向主动预见转变，为尾矿库安全管理提供系统化解决方案。

**【关键词】**：尾矿库智能管理系统；多源异构数据融合；动态风险预警

DOI:10.12417/3041-0630.26.02.009

### 1 商洛市尾矿库管理系统的现状

商洛市是陕西省重要矿产资源基地，有87座尾矿库，安全监管压力大。其管理系统面临“三低四孤岛”困境。数据采集上，实时监测覆盖率不足30%，多依赖人工巡检，数据时效性差；数据处理方面，应急、环保、自然资源等部门数据系统独立，格式标准不一，形成“行政孤岛”与“标准孤岛”，跨部门协同效率低；系统平台上，各企业监测系统品牌杂、接口不兼容，构成“平台孤岛”；风险预警上，现有系统多监测坝体位移单一参数，缺乏多因素耦合动态分析能力，预警模型基于历史统计，对突发事件适应性不足。2023年汛期，曾因监测数据滞后延误险情处置致经济损失。所以，构建整合多源数据、实现智能分析与协同预警的一体化管理平台，是破解商洛市尾矿库安全管理瓶颈的迫切需求。

### 2 国内外研究现状

国际上，尾矿库安全管理正朝着“智能感知”与“数字孪生”深度融合的方向发展。加拿大、澳大利亚等矿业发达国家已广泛应用高精度传感器网络、无人机激光扫描与InSAR等技术，实现了对坝体变形、浸润线等关键参数的分钟级高频监测与毫米级精度感知，并开始构建与物理实体实时同步的数字孪生模型，用于模拟推演与预测性维护。

国内研究在关键技术点上取得了显著突破，但在系统化集成与应用层面仍存在“碎片化”现象。北京科技大学、中南大学等机构在微震监测、多源数据融合算法等方面成果突出，将预

警准确率提升至89%，响应时间缩短至15分钟。然而，现有研究与实践普遍存在三方面局限：一是数据融合深度不足，多集中于同构的传感器时序数据，对视频、报告等非结构化数据的处理与价值挖掘能力较弱<sup>[2]</sup>；二是模型泛化与动态性欠缺，预警模型多依赖静态历史数据训练，难以适应复杂多变的实际工况与极端外部事件<sup>[3]</sup>；三是系统架构视角单一，大多面向单一企业或单项业务，缺乏支撑政府跨部门宏观监管、多主体协同的顶层架构设计<sup>[4]</sup>。

综上所述，当前研究在单点技术上已趋成熟，但亟需一个能够系统性解决多源异构数据整合、动态智能预警与跨层级协同管理的整体解决方案。本文的研究正是立足于这一缺口，旨在设计一个贴合地方监管实际、技术集成创新的智能管理系统。

### 3 系统分析与设计

#### 3.1 多源异构数据特征

尾矿库管理数据来源广、格式多、动态变化，异构性体现在结构、语义和时空三维。监测数据是系统感知神经末梢，涵盖坝体位移等物理参数，以时序数据流存在，采样频率分钟级到小时级不等；环境数据包含气象等生态指标，有传感器数据和实验室分析报告；管理数据囊括企业信息等文本资料，呈非结构化或半结构化。这些数据在采集精度等方面差异显著，形成复杂异构数据生态。尾矿库数据的多源异构性如下表1所示：

作者简介：邢雪（1982.12），女，汉，陕西山阳人，硕士，副教授，研究方向：信息系统设计。

基金项目：陕西省商洛市科技局项目：商洛尾矿资源大数据平台关键技术研究（编号：2020-Z-0010）。

表1 尾矿库数据的多源异构性

数据类型	主要来源	数据格式	异构表现	典型参数示例
监测数据	物联网传感器、无人机	数值型、图像	采样频率差异(1min-24h)、精度等级不同	坝体位移 (mm)、渗流量 (m³/h)
环境数据	气象站、水质监测点	数值型、文本	时空粒度不一、计量单位多样	降雨量 (mm)、pH 值
管理数据	企业上报、监管平台	文本、表格	字段定义冲突、编码规则差异	安全检查记录、企业资质证书

### 3.2 系统需求分析

基于对商洛市多家矿山企业的实地调研，系统功能性需求的核心为构建全域感知、智能研判以及协同处置的能力。具体涵盖以下方面：（1）多源数据接入：应兼容多种物联网协议，支持传感器数据、视频流、手工填报等多模态数据的实时接入与标准化处理。（2）智能监测与预警：需达成坝体位移、浸润线、库水位等关键参数的实时监控以及异常自动识别（延迟不超过 30 秒），并构建动态风险评价模型。（3）综合风险评价：需构建包含地质、运行、环境等 6 大类指标的体系，提供稳定性计算、溃坝模拟等专业分析工具。（4）应急协同指挥：需集成预案管理、资源调度、三维模拟推演等功能，支持多部门在线协同作业。

### 3.3 系统架构设计

本系统采用基于微服务的“数据-服务-应用”三层松耦合架构<sup>[4]</sup>，以实现高内聚、低耦合与弹性扩展。

**数据层：**作为基石，负责多源异构数据的汇聚、治理与存储。采用混合存储方案，高频传感器时序数据存入 InfluxDB 集群，业务关系数据（如企业信息、巡检记录）用 MySQL（主从架构），非结构化数据（如报告、图片）存入 MongoDB 分片集群。通过 Apache Kafka 构建实时数据总线进行数据集成，再利用 Apache Flink 进行流式清洗、转换与聚合。

**服务层：**是系统的业务能力中枢，采用 Spring Cloud Alibaba 微服务框架。将核心功能封装为独立的数据接入服务、分析计算服务、模型推理服务等 28 个微服务。通过 Spring Cloud Gateway API 网关统一对外提供服务，实现路由、负载均衡与安全认证。服务间通过轻量级协议通信，确保独立部署与弹性伸缩。

**应用层：**面向不同用户提供差异化交互界面。基于 Vue.js 开发响应式 Web 前端，针对政府监管人员提供宏观决策驾驶舱（风险热力图、统计报表），为企业管理人员提供精细化运营平台（设备监测、工单管理），为公众提供轻量化信息查询界面。利用 ECharts 与 Three.js 实现数据可视化与三维场景展示。

### 3.4 功能模块划分

系统功能架构包含五大核心模块，各模块既独立运行又协同联动，形成完整的业务闭环，见图 1 所示：



图1 系统功能模块图

（1）数据接入模块：作为系统入口，内置多协议适配引擎，支持各类传感器、视频设备、人工系统的数据接入。具备智能数据校验、格式转换与质量评估功能，将异构数据统一为标准化数据流。（2）安全监测模块：构建“空天地”一体化感知网络。实时采集坝体位移、内部变形、浸润线等参数；利用深度学习算法对视频流进行智能分析，自动识别违规作业、人员闯入等行为；结合无人机巡检数据，反演库区生态状况。（3）风险评价模块：系统智能核心。基于层次分析法与熵权法构建动态评价指标体系，权重可根据汛期、地震等情景动态调整。利用 LSTM 神经网络进行关键指标趋势预测，结合蒙特卡洛模拟进行风险概率分析。（4）应急指挥模块：实现平战结合。管理结构化应急预案库，支持根据险情类型自动匹配；集成应急资源（队伍、物资、设备）GIS 一张图，实现最优调度与路径规划；内置基于物理引擎的三维溃坝模拟推演功能，直观展示影响范围。（5）系统管理模块：提供后台支撑。基于 RBAC 模型实现用户、角色、权限的精细化管理；完整记录系统操作日志与安全事件；监控服务器资源状态，保障系统稳定运行。

### 3.5 数据库设计

系统采用混合存储架构满足多类型数据管理需求，构建“时序数据库+关系数据库+文件存储”的复合型数据存储体系。InfluxDB 专为时序数据优化，设置数据保留策略（RP）实现冷热数据分层。MySQL 业务库进行分表分库，按尾矿库 ID 水平分片。MongoDB 存储文档与文件，使用 GridFS 管理大体积巡检影像。所有数据库均部署在商洛市政务云，确保数据主权与基础资源弹性。

## 4 关键模块详细设计

多源数据融合与风险预警模块是系统的核心智能引擎，其设计质量直接决定尾矿库安全管理的智能化水平。

### 4.1 多源数据融合模块

该模块是系统智能的基石，旨在解决数据异构、冲突与价值密度低的问题。本设计使用 PSO-SVR-KF 三级融合模型<sup>[2]</sup>。

(1) 数据层融合 (PSO 优化)：针对原始数据存在的时空不一致与精度差异，采用改进的粒子群优化 (PSO) 算法进行配准与加权。算法动态优化不同来源、不同精度传感器的权重系数，实现多源监测数据在时空基准上的对齐与可信度融合，输出高质量的标准时序数据流。(2) 特征层融合 (SVR 映射)：将标准化数据与气象、地质等环境变量一同输入支持向量回归 (SVR) 模型。通过多核函数组合策略，挖掘坝体位移、浸润线、降雨量等跨模态参数间的深层非线性关联，提取出 128 维的高维特征向量，表征尾矿库的综合运行状态。(3) 决策层融合 (KF 滤波)：以前两层输出为基础，引入卡尔曼滤波 (KF) 框架进行动态状态估计与预测。将尾矿库系统建模为一个状态空间模型，通过“预测-更新”的迭代过程，融合实时观测数据 (特征向量) 与物理模型预测，最终输出坝体稳定性指数、风险发生概率及预警置信度三个核心决策指标。

### 4.2 风险评价与预警模块

风险评价与预警模块构建“指标-模型-响应”三层技术体系，实现从静态评估到动态预警的跨越。

动态评价指标体系突破传统固定权重模式，采用“核心指标+情景系数”的动态调整机制<sup>[3]</sup>。核心指标层包含 6 个维度：坝体结构完整性 (权重 22%)、渗流场稳定性 (权重 20%)、水文气象条件 (权重 18%)、操作规范性 (权重 15%)、地质环境敏感性 (权重 15%)、应急能力 (权重 10%)。情景系数动态调整机制是根据实时监测数据自动修正指标权重。

三级预警机制构建立体响应体系，按风险分蓝色 (IV 级)、黄色 (III 级)、橙色 (II 级)、红色 (I 级) 四级预警，对应不同处置流程与响应级别，见表 2。预警触发用“指标阈值+趋势分析”双重判定逻辑：任一核心指标超阈值启动初级预警，结合神经网络预测未来 24 小时趋势，若风险升高则升级预警。预警信息通过系统消息推送引擎，实时发至相关责任人 PC 端与移动端，支持短信、APP 通知、微信公众号等多渠道触达。

表 2 三级预警机制

预警等级	触发条件	响应时间要求	责任主体	处置措施	解除条件
蓝色预警	单一二级指标轻微超标	2 小时内响应	企业安全部门	加强监测频次，开展专项检查	连续 24 小时指标恢复正常
黄色预警	两项以上二级指标超标或单项核心指标接近限值	1 小时内响应	企业主要负责人	启动应急预案 IV 级响应，停止生产作业	连续 48 小时指标稳定在安全范围
橙色预警	核心指标超标或预测 24 小时内将达危险值	30 分钟内响应	县级应急管理部门	启动区域应急预案，组织下游人员疏散	经专家评估确认风险消除
红色预警	出现明显险情征兆或预测 12 小时内可能发生事故	15 分钟内响应	市级应急指挥中心	启动市级应急预案，全面应急动员	险情彻底排除并经技术鉴定

阈值动态校准系统采用“离线训练+在线调整”双轨机制，确保预警模型持续优化。每月用新增监测数据对预警阈值离线重训练，通过遗传算法优化参数；实时运行时，系统自动记录预警与实际险情吻合度，连续 3 次误报或漏报时，触发阈值微调程序，依反馈数据动态修正判定边界。此外，预警模型有自解释功能，能自动生成预警依据报告，说明关键指标、数据来源和决策过程，增强预警可信度与可操作性。

## 5 总结

本文针对商洛市尾矿库管理面临的现实挑战，设计了一套

以多源异构数据驱动为核心的智能管理系统。系统通过“数据-服务-应用”微服务架构，有效整合了分散的监测、环境与管理数据，打破了长期存在的数据孤岛。核心的 PSO-SVR-KF 三级数据融合模型与动态风险预警机制，可以实现对复杂风险从感知、评估到预警的全流程智能化管理，将风险防控模式从被动响应转变为主动预见。

展望未来，系统将进一步与数字孪生等前沿技术结合<sup>[6]</sup>，深化对尾矿库全生命周期状态的仿真与推演能力，并向更广泛的智慧矿山与区域生态安全监管领域拓展<sup>[7]</sup>，为矿产资源开发与生态环境保护协调发展提供更强大的技术支撑。

### 参考文献：

[1] 王硕,叶旌,田祎,等.尾矿库安全监管跨部门协同机制研究[J].中国安全生产科学技术,2024(5):132-137.  
 [2] 吴伟,彭格,刘海洋,等.基于多源异构数据的尾矿库在线监测系统与预警方法[J].矿业工程,2025,23(1):76-80.  
 [3] 朱远乐,王淇萱,刘文岗,等.尾矿库灾害风险防控研究现状及发展态势[J].武汉大学学报(工学版),2024,57(8):1054-1064.  
 [4] 敬小非,毛菁鑫,李小双,等.基于微服务架构的尾矿库智能监管平台设计[J].金属矿山,2023(12):198-204.  
 [5] 陈静,周明,刘军,等.尾矿库预警阈值动态校准方法研究[J].工矿自动化,2023,49(9):56-61.  
 [6] 蒋水华,彭浩,余琦,等.尾矿库数字孪生技术应用研究进展[J].金属矿山,2024(3):156-163.  
 [7] 余琦,蒋水华,彭浩,等.尾矿库溃坝生态环境损失评估方法研究[J].环境科学与技术,2023,46(10):210-217.