煤矿顶板灾变智能预警与三端协同可视化系统

灵瞳勘顶

SENSING / INFERENCE / ACTION

参赛编号： AIC-2026-56292356

可解释预警 · 智能体协同 · 数字孪生



目录

1. 核心痛点与场景需求
2. 总体技术路线
3. 数据集与知识库构建
4. 技术创新与验证
5. 作品展示
6. 应用前景

研究背景：政策与事故

政策依据



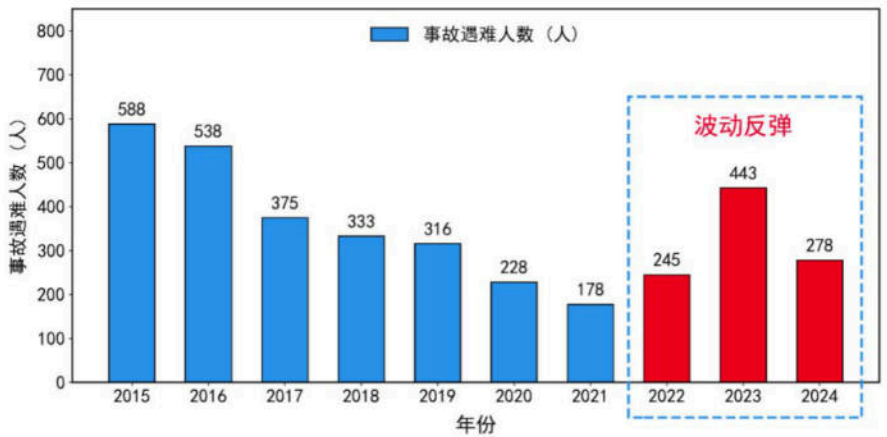
2024 年 推进矿山智能化建设

强化重大灾害风险智能预警。

2020 年 加快煤矿智能化发展

提升感知与分析决策能力，
加强动态预测与协同控制。

全国煤矿事故遇难人数



近年典型顶板事故（官方调查报告口径）

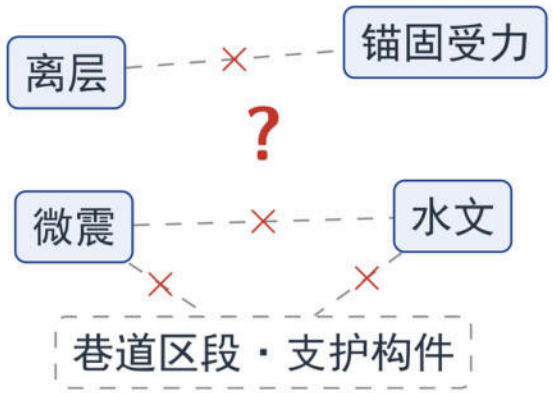
事故	遇难/受伤	直接经济损失
三河顺勋煤矿 2022	14 人遇难	2,288 万元
钱家营矿 2024	4 人遇难 2 伤	950 余万元
布尔台煤矿 2025	3 人遇难	787 万元
北崖煤矿 2023	1 人遇难 1 伤	198 万元

四起合计：**22 人遇难** 直接经济损失超 **4,200 万元**

顶板灾害智能预警与可信研判，是政策要求与现实需求的交汇点。

来源：国家矿山安全监察局及省级监察局公开的事故调查报告（2022—2025）

核心痛点与创新对策





原因多解，核验靠经验



知识沉睡，建议无据

痛点一：数据孤岛，证据分散

离层、锚固受力、微震、水文分散在各自系统，难以关联到巷道区段与支护构件，告警落不到具体对象。

痛点二：告警之后，研判困难

同样的压力增大，可能是顶板载荷变化，也可能是支架操作。异常在哪、先查什么，依赖专家经验。

痛点三：知识沉睡，经验难续

历史案例与规程沉睡在文档里，大模型建议常无出处可查，处置反馈难以沉淀为可复用经验。

创新一：三维数字底座

创新二：预测反馈诊断

创新三：跨域知识增强

场景调研与需求



模拟矿井巷道与支护结构研学



模拟矿井环境与监测流程调研



矿业、算法、智能体与平台方向联合研讨



依托学校平台，接受专家技术指导

总体技术路线

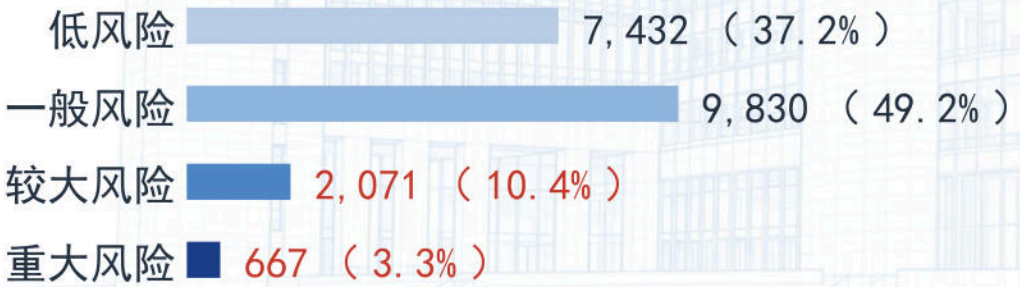

阶段1：收集现场数据
顶板离层速率
微震能量
锚杆轴力增量
支架阻力
锚索轴力增量
涌水量
距水体或岩溶体的距离
阶段2：三维空间投影
1. 矿井总览
定位异常区段
2. 局部剖视
岩层与支护测点关系
3. 构件查询
传感、锚杆锚索与支架
阶段3：XGBoost模型筛查
低风险
一般风险
较大风险
重大风险
四级风险概率 $p_t = f_\theta(x_t)$
阶段4：SHAP特征归因
$f(x) = \varphi_0 + \sum_{i=1}^{m} \varphi_i$
分解模型输出的特征贡献
历史归因，原因核验
阶段5：多证据联合核验
比较预期响应
力学或时序模型
$(K_b + K_s)u = F$
分析异常原因
核查顶板与支护
$r_{i,t} = x_{i,t} - x_{i,t}$
检索案例与规程
核对适用条件
汇总证据与工具结果
形成候选研判
阶段6：智能体协同
A1 感知预警
A2 知识检索
A3 调度决策
A5 资源评估
A4 协同管控
A6 反思迭代
阶段7：人工复核
企业
协同复核
专家
监管
阶段8：反馈闭环
保存反馈
处置记录与监测变化
审核案例
人工复核后归档
补充知识库
用于后续检索

数据集与知识库构建

顶板灾害模拟监测数据

20,000 条 × 11 列（CSV）：时间、设备编号、七项监测特征、数据质量、四级风险标签

七项监测特征	
顶板离层速率	锚杆轴力增量
锚索轴力增量	支架阻力
涌水量	微震能量
距水体岩溶体距离	



跨域知识库（KG + RAG）

来源	规模 · 内容 · 格式
知识图谱	2,365 节点 · 13,636 关系 · 15 类实体
事故案例	21 个典型事故案例（报告 + 向量）
政策规程	《煤矿安全规程》等（网页/PDF）
专业文献	监测 · 力学 · 水岩耦合（论文摘录）

预处理与组织流程

原始资料分段（保留出处）

↓

实体关系三元组 + 案例向量化索引

↓

知识图谱 + 事件画像驱动检索

创新一：三维空间底座

对象关联与坐标变换

测点关联到对象、位置与诊断邻域：

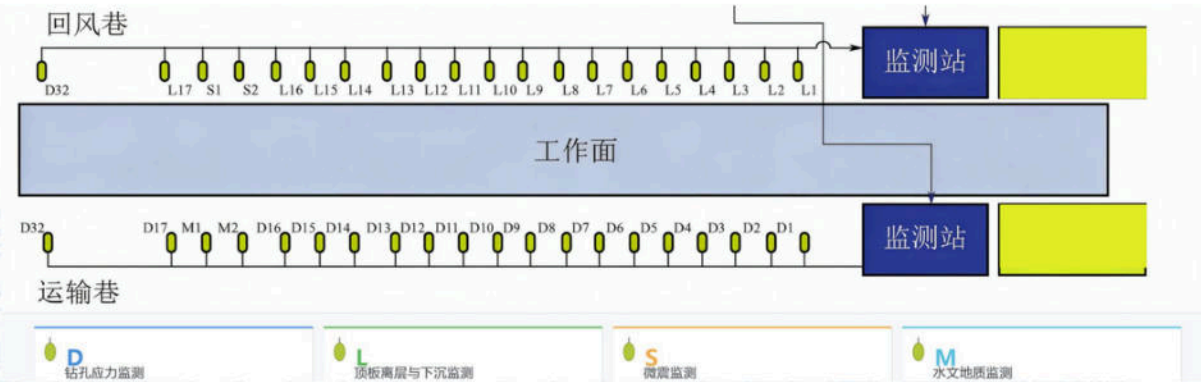
$$M:\ s_i \mapsto (o_j, \mathbf{p}_i, \mathcal{N}_i)$$

变换矩阵随模型版本保存：

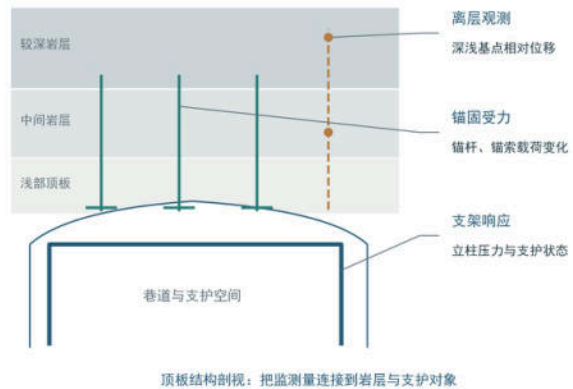
$$\begin{bmatrix} \mathbf{p}^{\text{scene}} \\ 1 \end{bmatrix} = T_{\text{survey}\to\text{scene}} \begin{bmatrix} \mathbf{p}^{\text{survey}} \\ 1 \end{bmatrix}$$

三尺度空间表达

- 整体定位：巷道、工作面、设备与地质对象同屏
- 局部剖切：揭示顶板岩层、锚杆锚索与离层基点
- 构件放大：显示趋势与诊断证据，可反查测量链路



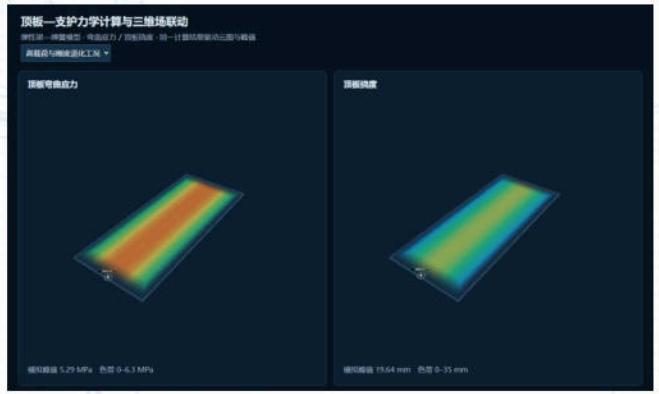
工作面多源监测网络与监测对象空间关联（技术方案报告）



顶板剖视：离层基点、锚杆锚索与岩层关系

创新一：力学辅助研判

研判问题：反力下降，是否意味着更安全？



梁—弹簧求解： Ku = F

同载荷工况	参考刚度	较低刚度
刚度（ MN/m ）	80	20
支护反力（ kN ）	455.52	359.55
顶板位移（ mm ）	5.69	17.98

简化模拟：载荷 100 kN/m，步 20，预计算工况。

数值与知识进入 AI 上下文

当前工况与同载荷参考值
↓ 梁弯曲、支护监测与安全资料
↓ 大模型生成并绑定证据 ID

已验证解释的核心含义

支护刚度降低伴随位移增大、反力下降；需联合观察载荷与变形，并结合现场条件复核。

场景价值：以可比较的数值证据，支持模型解释具体工程响应。

力学演示：同载荷支护响应



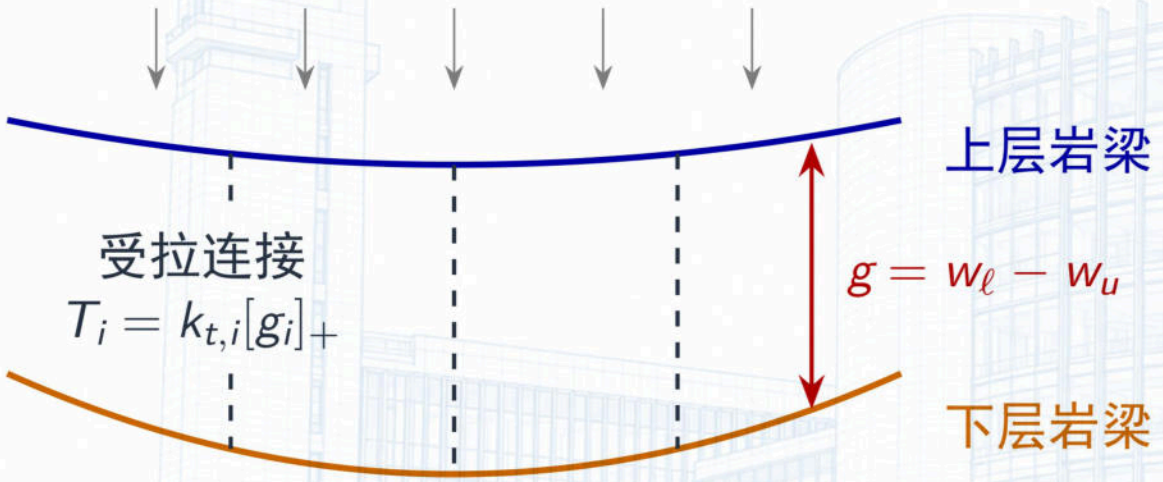
同载荷下，反力下降时，顶板位移怎么变？

固定载荷为 100 kN/m，只改变支护刚度，在三维场景中对照反力与位移。

支护反力 455.52 → 359.55 kN　　顶板位移 5.69 → 17.98 mm

专业建模：分层顶板

从整体挠度，走向层间张开与锚固受力



张开时接触不传力；闭合时法向受压接触

跨度 8 m、宽 1 m；上下层厚 0.6/0.3 m。

两层分别简支，三处受拉连接，中心等效支护。

岩梁分析背景：陈虎等，岩土力学，2020，41(4):1447–1454

专业计算关系

相对位移：$g = w_\ell - w_u$

层间张开：$d = [g]_+$

锚固拉力：$T = k_t[g]_+$

受压接触：$C = k_c \Delta x[-g]_+$

阻尼 Newton 求平衡，逐帧核验残差、竖向力与能量。

工况对照：离层与受力

同加载步，比较两类联合响应

工况	总载荷 kN	张开 mm	拉力 kN
参考锚固	96	2.082	44.62
载荷增加	144	3.123	66.93
连接刚度降低	96	**5.992**	**30.65**
上层受载	648	0	0

载荷增加：张开 ↑，拉力 ↑

同载荷连接柔化：张开 ↑，拉力 ↓

上层受载时层间受压接触，弹性重叠 0.0378 mm。

计算证据进入 AI 解释

选定工况与参考数值

↓ 检索顶板、支护与力学资料

↓ 候选解释、引用校验与人工复核

4 组工况 / 84 帧

新增力学测试 **8/8**；全量 Web**290/290**。

解析解、接触收敛、守恒与接口验证通过。

创新二：四级风险识别

模拟监测数据：交付随机划分流水线复现

真实 / 预测	低	一般	较大	重大
低风险	1,474	13	0	0
一般风险	7	1,957	2	0
较大风险	0	1	410	3
重大风险	0	0	1	132

训练 16,000 条；随机留出 4,000 条。

分类证据

99.325%

随机留出准确率

0.9910 Macro-F1

132 / 133 重大风险召回

评估范围：同一模拟数据的交付流水线复现；全量预处理、回顾性平滑与测试集早停均计入原协议。时序及跨矿推广按独立协议验证。

XGBoost 四级风险概率

$$z_c(\mathbf{x}) = \sum_{k=1}^{K} f_{k,c}(\mathbf{x}),$$

多棵树累加类别得分

$$p_c = \frac{e^{z_c}}{\sum_{j=1}^{4} e^{z_j}}$$

Softmax 计算类别概率

创新二：诊断与证据核验

风险证据进入对象明确的复核任务

模型结果：等级、概率与版本

↓

监测证据：原始值、统计偏离与趋势

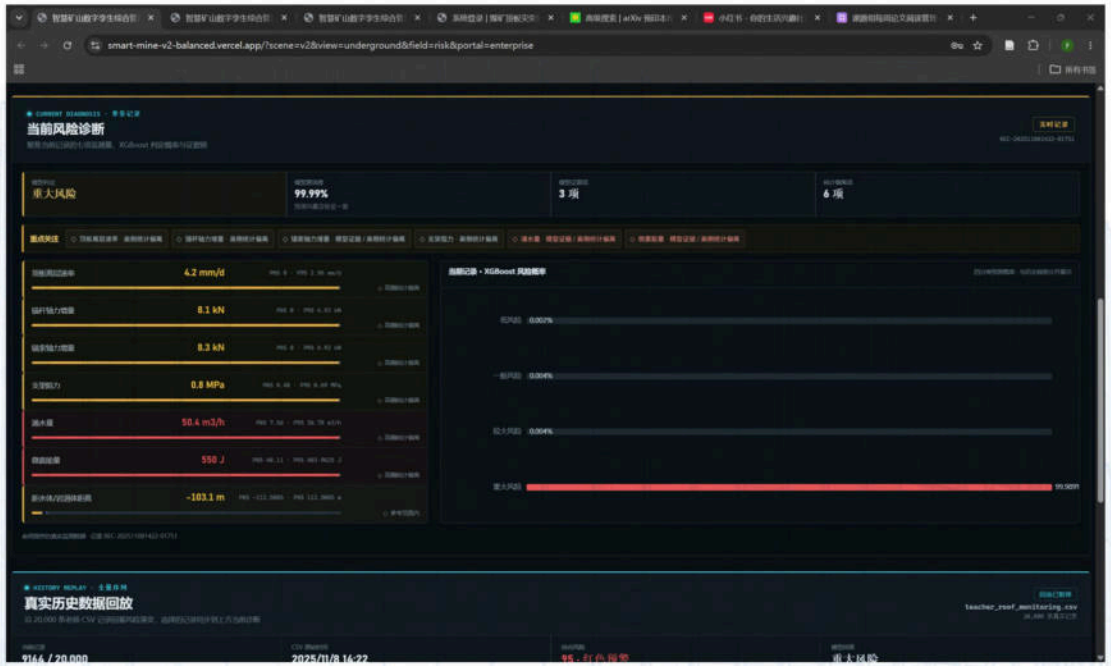
↓

对象关联：位置、支护与相关测点

↓

复核任务：检查异常、补充依据

解释口径：当前页面组织统计偏离与记录证据；SHAP 归因图按其对应模型版本引用。

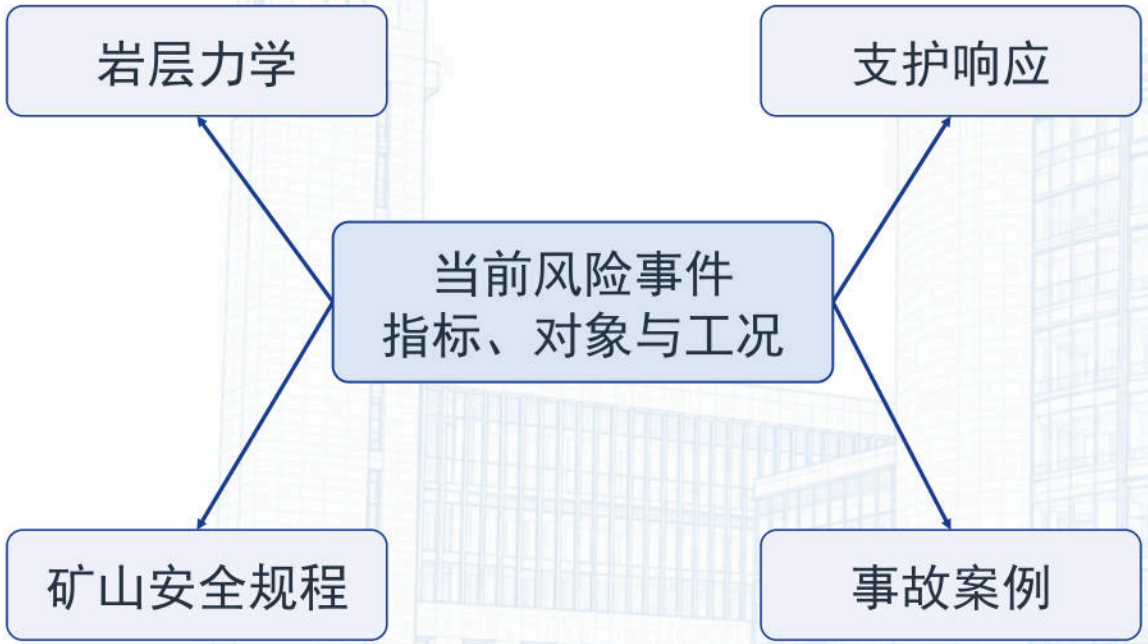


已有风险诊断页：指标、模型结果与历史窗口

场景价值：从“出现风险等级”推进到“核对哪个对象、哪些读数、哪些证据”。关联证据继续输入跨域检索与候选方案生成。

创新三：跨域知识增强

围绕顶板事件，连接不同专业依据



当前在线链路：字符双字组 TF-IDF 与余弦相似度检索；
跨域优先选取片段，携带出处与内容哈希交给 DeepSeek 。



前期领域知识图谱成果

2,365 节点　　**13,636** 关系

15 类实体　　21 个事故案例

图谱组织“对象—机理—条款—案例”关系；
混合检索效果采用前期独立案例评测。

场景适配点：让模型同时接触监测征兆、工程机理与行动约束。

检索增强生成机制

情景输入
风险类别、特征证据
→
跨域检索
相关片段、来源编号
→
DeepSeek 生成
摘要、候选建议、引用
→
结构与引用校验
JSON、证据
ID、输出约束

输入：监测事件

模型类别：重大风险

证据涉及离层、锚杆锚索、支架阻力、涌水与微震等指标。

检索补充：顶板巡查、支护载荷与围岩变形联合观察。

生成：实际候选建议

“当前指标显示顶板与支护异常并存，需人工复核并完善隐患闭环。”

建议：复核指标与支护状态；联合观察载荷与变形；按权限确认并记录核验。

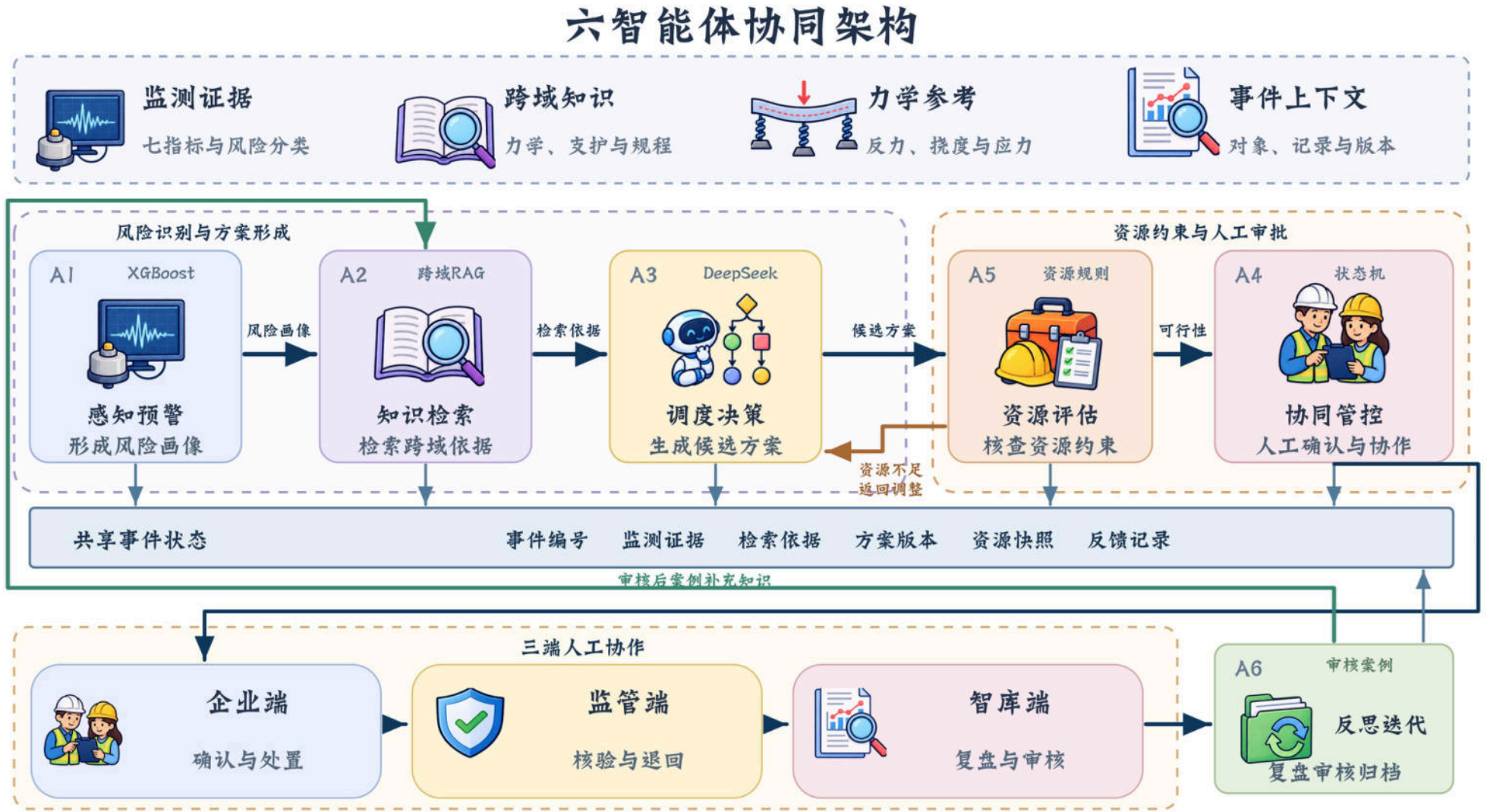
校验：引用与约束

evidence_ids 关联监测与知识片段。

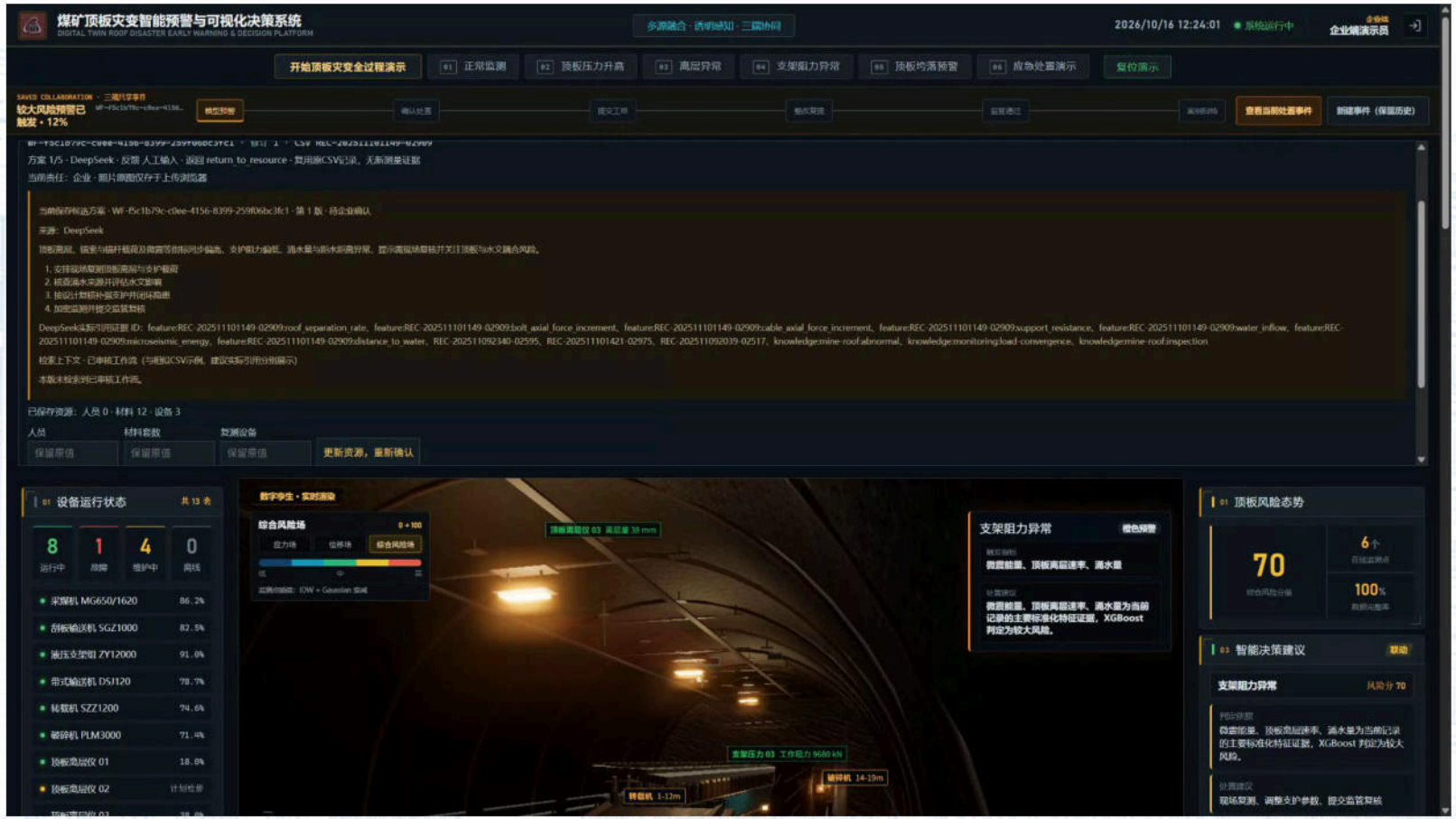
校验未通过：保留失败状态并返回规则建议。

现场处置：人工确认后进入协作流程。

创新三：六智能体协同


六智能体协同架构
监测证据
七指标与风险分类
跨域知识
力学、支护与规程
力学参考
反力、挠度与应力
事件上下文
对象、记录与版本
风险识别与方案形成
资源约束与人工审批
A1 XGBoost
感知预警
形成风险画像
风险画像
A2 跨域RAG
知识检索
检索跨域依据
检索依据
A3 DeepSeek
调度决策
生成候选方案
候选方案
A5 资源规则
资源评估
核查资源约束
可行性
A4 状态机
协同管控
人工确认与协作
资源不足
返回调整
共享事件状态
事件编号
监测证据
检索依据
方案版本
资源快照
反馈记录
审核后案例补充知识
三端人工协作
企业端
确认与处置
监管端
核验与退回
智库端
复盘与审核
A6 审核案例
反思迭代
复盘审核归档

六智能体演示：资源核验



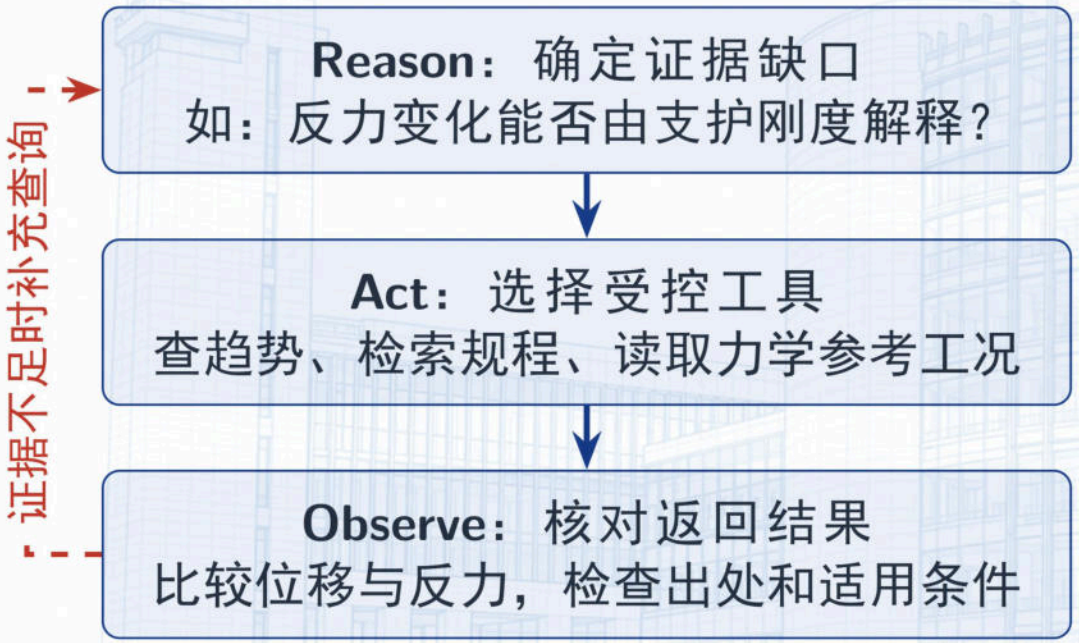
从已生成的候选方案开始演示。

将可用人员设为 0 后，流程退回资源评估。

补足人员后，系统重新开放人工确认入口。

ReAct 与 CoT 机制设计

扩展设计：围绕证据缺口，组织“分析—工具—观察”循环



CoT 启发的任务分解

以分步骤提示组织复杂研判；面向用户输出简洁的依据摘要：

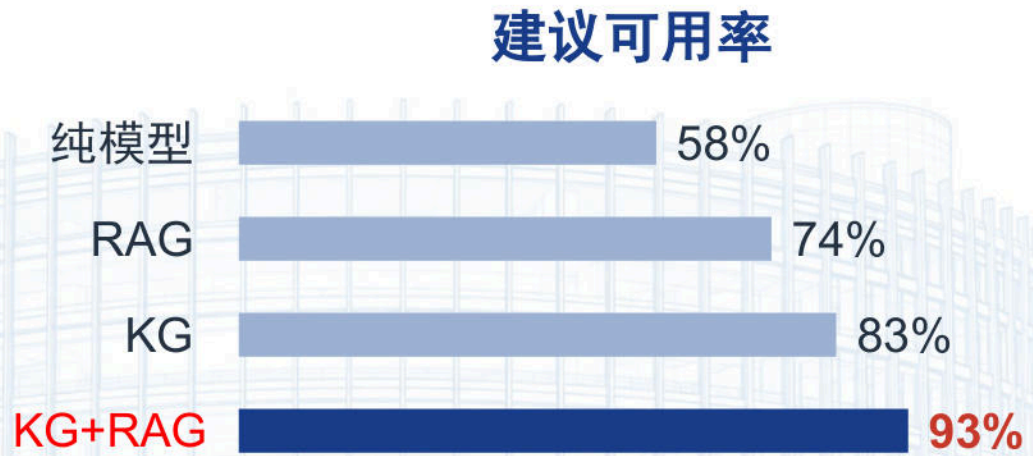
1. 观测事实：哪些指标与对象异常？
2. 机理假设：有哪些可检验解释？
3. 证据核验：哪些资料支持或待补？
4. 候选行动：检查什么，由谁确认？

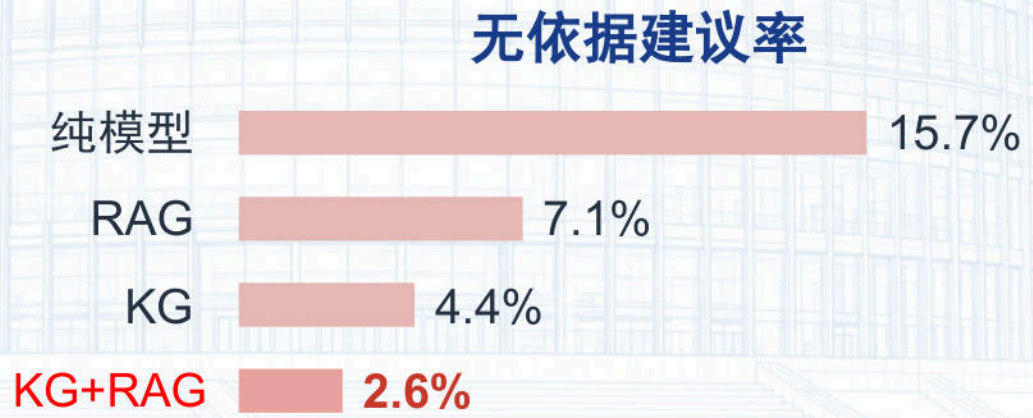
工具返回充分且约束通过后，提交候选解释与人工复核。

消融实验：知识增强效果

配置	建议可用率	无依据建议率
纯模型	58%	15.7%
RAG	74%	7.1%
KG	83%	4.4%
KG+RAG	**93%**	**2.6%**

- 混合检索较纯模型提升 35 个百分点
- 无依据建议率降至约六分之一
- 前期独立评测： 21 案例、四配置对照





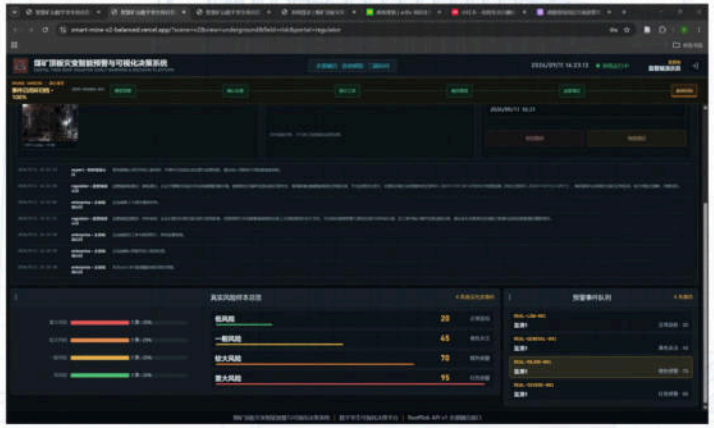
作品展示：监测与管理



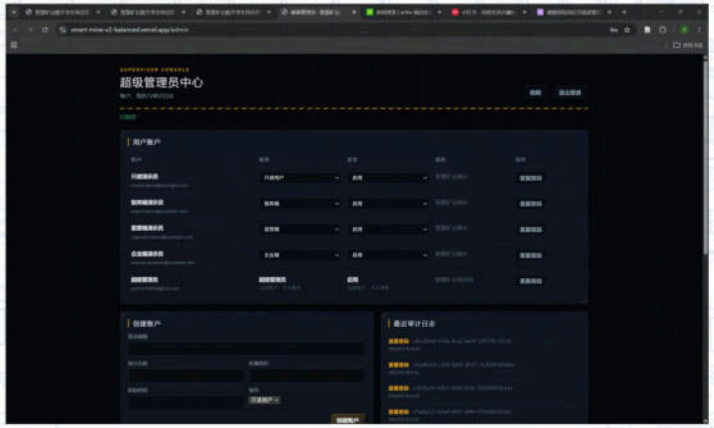
企业端总览：巷道、支护、监测与风险事件



历史回放：多源趋势与风险状态同窗对比



预警队列：按事件组织监测与处理状态



系统管理：角色、权限与平台配置

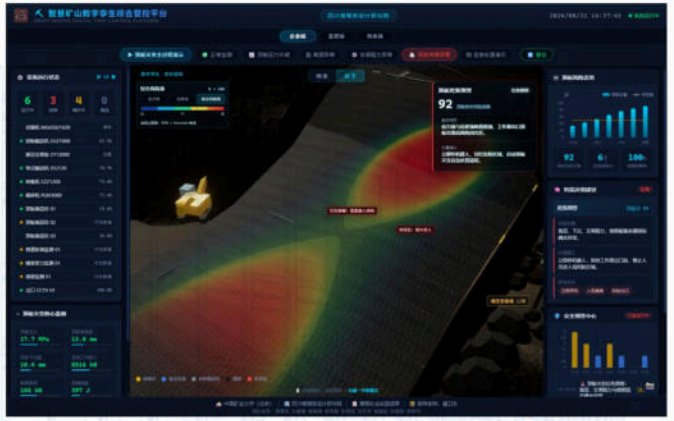
作品展示：六阶段演练



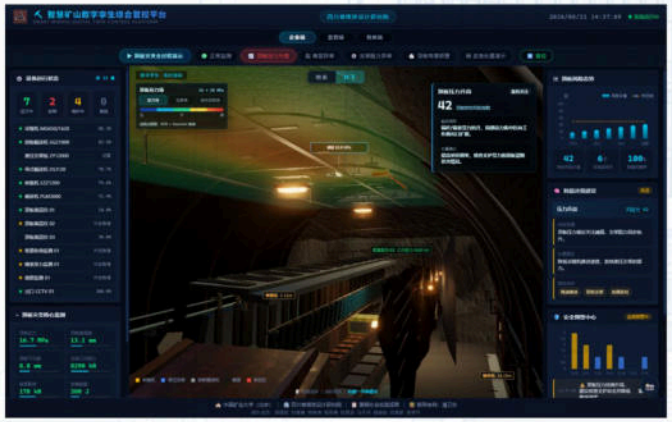
正常：定位对象与基准



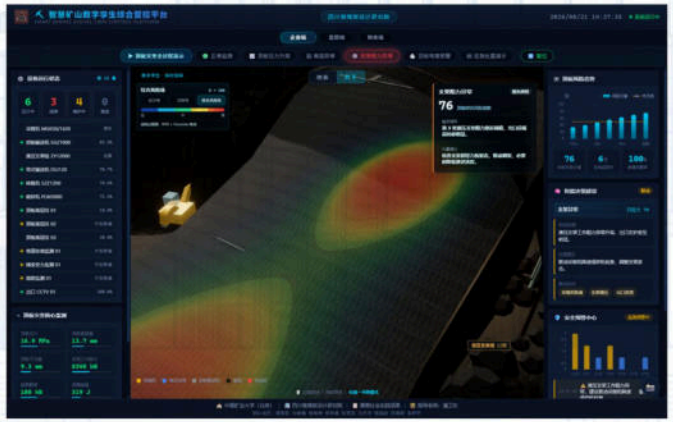
顶板离层：层间变形关联



失稳演练：灾变热点与影响



压力发展：支护受力变化

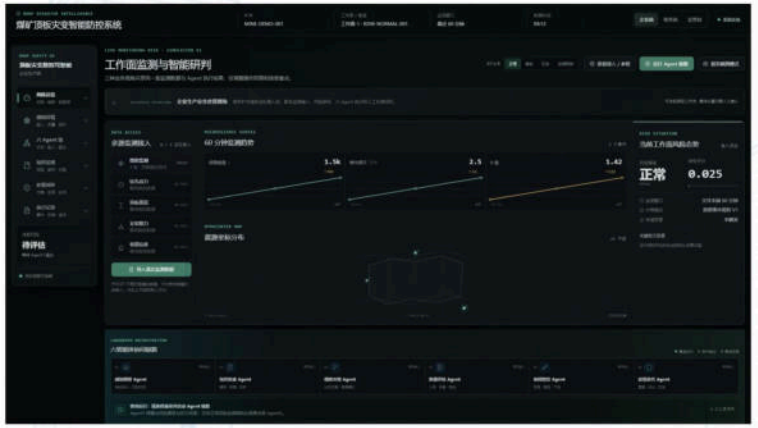


支护响应：构件联动



应急演练：区域与协作

作品展示：智能体工作台



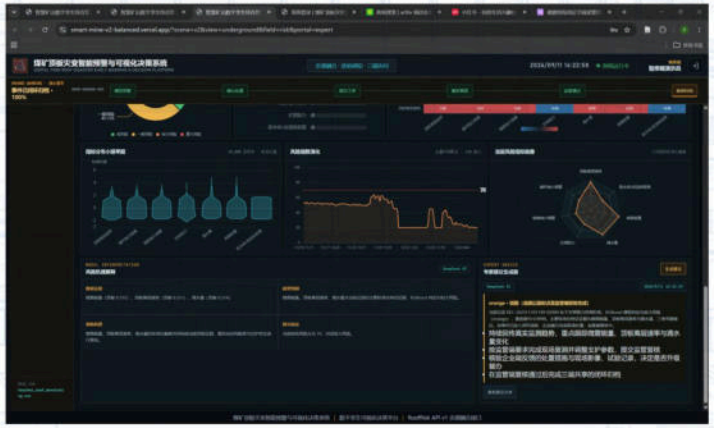
智能体工作台：监测、对象与节点联动



多源面板：趋势、状态与当前对象统一视图

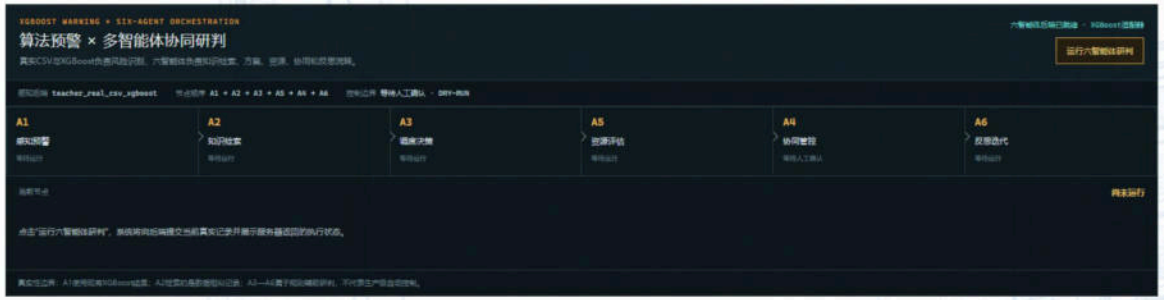


结构化监测输入与自然语言任务入口

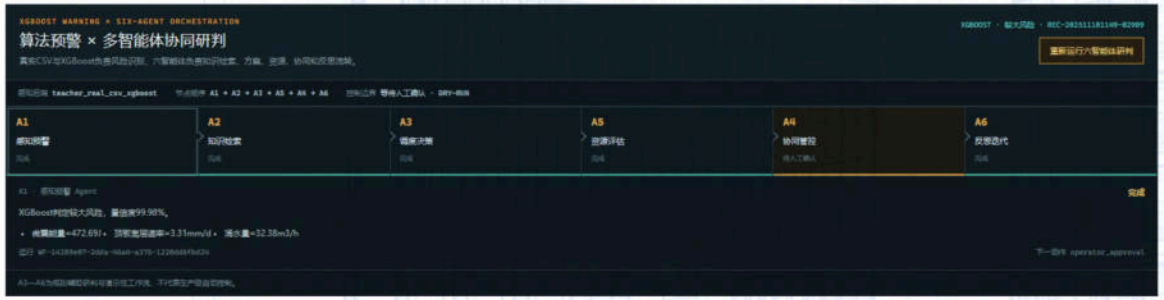


智能体建议：候选措施与依据呈现

智能体证据与协作确认



六节点工作流启动：任务与初始状态



A1 节点：汇集风险与监测证据



A4 节点：协作确认入口

人工核验授权后工作流才继续状态迁移；确认对象与原因保留在事件中，实现智能体建议与人员责任的衔接。

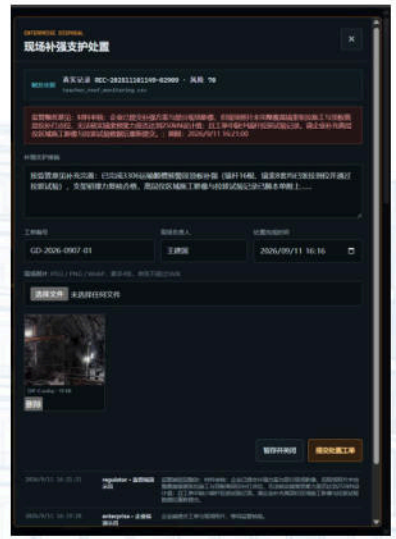
作品展示：三端处置闭环



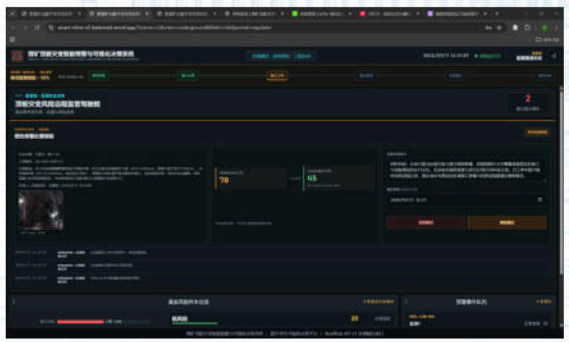
企业首次提交：
方案、责任与现场凭证



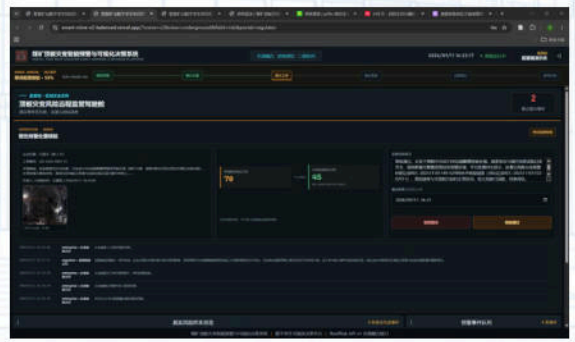
监管驳回：
保留意见与待补信息



补充材料后复提：
保留版本与差异



监管端核验：对照风险、证据与企业提交



核验通过：方案、证据与审核状态归档

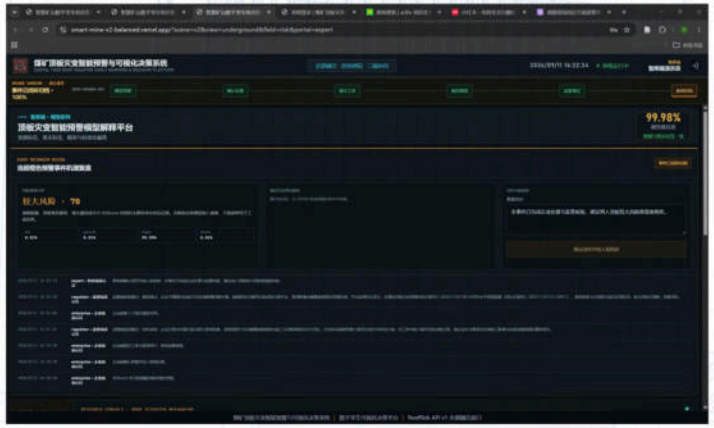
作品展示：监管与智库



监管端总览：风险态势、责任与处置进度



智库端总览：模型信息与专业研判入口



机理复盘：监测证据与风险解释对照



智库分析：风险分布、指标关联与画像

科研佐证与成果支撑



学术论文



发明专利



软件著作权与奖励材料

相关科研支撑：14 篇论文 · 11 项发明专利 · 9 项软件著作权 · 2 项奖励

应用前景

模拟演练与培训

六阶段灾变过程可回放，降低对象理解与培训成本

历史事件复盘

证据、方案与审核版本全程可追溯，支持机理复盘

辅助研判决策

告警定位到对象、建议绑定依据，复核路径清晰

受控现场应用

从典型工作面适配推广，高影响操作保留人工确认

核心成果一览

模拟监测数据	20,000 条 · 七项特征
风险模型	准确率99.325%
知识图谱	2,365节点
图谱关系	13,636条
决策可用率	93%（消融）
软件测试	290项通过（PR 版）
求解测试	分层8/8；原11/11

后续：完善预期响应与工况隔离评估，逐步走向受控应用。



Thanks!

敬请各位专家批评指正

灵瞳勘顶 · AIC-2026-56292356