

矿山开采安全管理信息化系统的设计与实施

张显均

四川中鼎爆破工程有限公司，四川省雅安市，625000；

摘要：围绕矿山开采安全管理信息化系统的目标、边界与实现路径展开纯理论探讨，构建由感知采集、数据治理、风险评估、协同决策与执行闭环组成的总体框架。文章强调以红线约束为底、以流程标准为纲、以数据为纽带，将计划、调度、设备、人员与环境信息在同一语义下互联互通，实现对隐患识别、作业许可、应急处置与绩效评估的统一管理。提出分层架构、规则库版本化与滚动优化的实现要点，给出可迁移的设计原则与验收准则，强调稳健。

关键词：矿山安全；信息化系统；风险管控；数据治理；数字孪生

DOI：10.69979/3060-8767.25.05.083

引言

矿山安全管理面临地质变异强、作业耦合深、空间跨度大的现实约束，传统纸质台账与人工巡检难以支撑高频决策与快速复盘。信息化系统的目的并非堆砌功能，而是把危险源、运行状态与管理动作置于同一数据模型之中，使感知可依赖、责任可追溯、处置可验证。要达成这一目标，需要在目标定义、数据标准、流程改造与平台架构之间建立一致性，明确安全红线与效率边界同层生效，确保任何优化不以牺牲底线为代价。本文以工程通用性为出发点，讨论体系架构、关键功能与实施方法，形成可复制的设计与运维规则集。设计与实施需兼顾老旧设备与新式平台的共存状态，通过标准接口与数据映射让异构系统在同一规则下运行，避免局部最优牺牲全局稳定。以小步快跑和灰度发布降低变更风险，使系统演进与现场接受度保持同步。规则库与阈值以版本管理和责任链条固化，每次变更都需记录来源、影响与回退条件，使系统演化透明可审计。

1 体系架构与总体目标

1.1 目标维度与约束边界

安全管理的信息化目标应覆盖事故预防、过程控制与事后复盘三个层面，并在产能、成本与合规之间建立可度量的权衡。现场层关注循环时间、等候时长、违章触发与就地处置，系统层关注产线平衡、能耗强度与在制库存，治理层关注事故率、未遂事件与响应时延^[1]。约束来自两个方向，一类是外部环境，如地压波动、边坡稳定、通风与渗流，一类是内部能力，如驱动与制动、导航可用性、通信时延与定位精度。目标与约束必须

映射到可观测量与数据来源，给出采样频次与精度底线，并把越界阈值固化为联锁规则，形成可执行的红黄绿分级策略。

为避免指标堆叠导致的治理失焦，应设立最小可行集合，用少量核心指标驱动动作。建议以循环时间、空等时长与能耗强度作为现场三元组，以在制库存与节拍偏差作为系统配平信号，以事故率与响应时延作为治理评价信号。权重按阶段滚动切换，成线阶段重成套与合规，稳态阶段重效率与能耗，收尾阶段重安全退出与生态修复。所有阈值条目版本化管理，生效与退出带有时间戳与责任人，任何临时变更均需记录与可回退，避免口令式管理带来的随意性与遗忘。指标表达避免口号化与名词化，禁止出现不可量化的模糊表述。每一项监控量都应明确触发动作、负责角色与记录位置，处置链路从告警到完成包括确认、隔离、处置与复核四步，任何一步缺失视为闭环失败。数据缺失与设备离线也应纳入阈值管理，通过降级策略自动收缩作业边界与速度上限，避免误判扩散。在治理节奏上，季度聚焦可快速兑现的改进项，年度聚焦结构性优化与标准更新。对难以短期量化的目标采用里程碑与清单式管理，以是否完成规则落地与流程改造为判据。对外部约束如社区与生态影响，设置静默窗口与绿色窗口，把噪声、粉尘与振动纳入调度约束。

1.2 分层架构与接口标准

系统宜采用分层分域的总体架构。上层负责任务编组与资源分配，中层负责路径规划与节拍协调，下层负责姿态控制与执行闭环。空间上以采场、运输通道与卸载节点划分功能域，时间上以爆破窗口、检修窗口与滚

动排程形成节奏域,使策略与现场边界同频。层间以意图与能力作为通用语义交换信息,避免对特定设备厂家的私有协议产生依赖^[2]。

接口与数据结构标准化是跨设备协同的前提。几何与任务信息走逻辑通道,功率与力矩限制走安全通道,二者相互校验又彼此独立。平台内置地理围栏、限制区与临时封控机制,把禁入、限速与会车礼序固化为规则库条目。为应对不确定性,设计退化模式与容错机制,当上层不可达或传感缺失时,装备自动进入限速、限载与就近停车等安全状态,通信恢复后再并入集群。计算分工采取边缘优先与中心增益的思路,现场承担高速决策与数据预处理,中心承担趋势评估、策略评审与版本发布。为降低复杂耦合带来的振荡,将计划与执行的时间常数分离,长周期在上层滚动,短周期在下层闭环。路径与速度计划引入功率与热负荷约束,使能耗峰值受控。地图采用永久图层与临时图层分离管理,临时信息带有衰减因子,到期自动退出,减少历史残影对规划的干扰。安全策略实行白名单与黑名单并行管理,白名单内动作可快速下发,黑名单内动作需多重确认与延时生效。变更采用版本化与回退开关,任何升级先在小范围验证再分批放大,并保留旧版本以便随时切换。中心与边缘之间定义延迟与带宽红线,超过红线时自动启动本地自治,确保最小安全功能常驻。

2 核心功能与关键技术

2.1 感知采集与数据治理

感知采集以稳定一致为首要目标。对地形轮廓、料堆状态、设备姿态、载荷与环境参数进行多模态采集,通过时空对准与可信度评估抑制漏检与误报^[3]。采集策略遵循慢变量长周期、快变量短周期的原则,并对突发事件启用触发式加密采样。传感器布设坚持近端密集与远端稀疏,关键节点双通道冗余,并设置自检与标定周期,保证长期可用。在能见度受限与粉尘干扰场景下,通过多模态互补与目标先验筛选提升稳健性。对关键通道与交汇点布设识别与提示装置,构建人机双向提醒。感知结果以置信度形式输出给决策模块,置信度降低时自动缩小操作边界,必要时触发人工接管。

数据治理贯穿采集、传输、存储、建模与应用全过程。命名、时间与坐标体系统一,元数据记录来源、加工与责任链。数据质量以完整性、时效性与一致性三项为底线,异常通过自动校验与人工复核协同处置。为提升可用度,建立标签体系与特征字典,把危险源、工序

与设备状态抽象为可计算对象,供风险评估与调度调用。对隐私与合规设置访问分级与脱敏策略,确保共享与边界共存。数据生命周期以可追溯为原则,原始记录与处理结果双存,关键事件的短时数据保留足够时长以支撑复盘。对跨系统共享的数据建立一致性校验与冲突消解流程,杜绝一数多义。模型训练与更新采用灰度策略,先在沙箱验证,再在离线影子模式对比,达标后再切换到生产环境。为保障连续性,边缘节点承担就地裁决与缓存转发,网络抖动时以时间戳与序列号校正顺序,防止乱序引发连锁误触发。统一时钟与唯一标识贯穿感知到应用,任何数据的来源、加工与使用都可追溯,支撑事故复盘与责任认定。

2.2 风险评估与协同决策

风险评估以能量、强度与暴露三类因素为核心要素。把边坡与顶板稳定、瓦斯与粉尘异常、交通冲突与设备健康纳入同一评估框架,采用分层加权与证据合成生成风险等级与处置建议^[4]。对多源一致性给出强信号解释,对单源异常给出保守解释,减少误停与漏判。评估结果与路径规划、速度上限、作业许可与应急预案联动,形成可验证的闭环。评估方法与数据质量捆绑,缺测与延迟不能被忽略,应以不利原则进行保守判定。评估频率与作业节拍对齐,对稳态区间关注趋势,对非稳态区间关注恢复曲线。对极端事件设置旁路规则与一键应急模式,降低人工决策负担。

协同决策强调在安全边界内实现节拍对齐与资源消解。调度侧采用滚动优化与事件触发的双循环,稳态阶段按固定节拍分配任务,扰动发生时局部重排并保持红线优先。冲突化解依托区域路权与会车礼序,把让、绕、停与改道写成可验证的决策树。对通信不稳定设置本地退化策略,进入限速与就近停车模式,同时保留断点信息,恢复后平滑并网。群体层面的协同以资源稀缺为前提进行拍卖与优先级继承,避免长期占用导致饥饿。队列管理采用时间窗口化与间隔控制,装卸节点引入半自动交接,缩短空等。对危险区、窄通道与长坡道设置限制区与会车区,规则以图层形式下发到设备侧执行。为提高可验证性,建立安全方案库与处置脚本库,对高风险作业进行预演与桌面演练,形成从告警到解封的标准路径。对限制区与临时封控区实行图层次发布与到期清退,避免策略遗留。对关键节点设置旁路人工确认口,确保在特殊时刻具备人工裁量空间。

3 实施路径与运行维护

3.1 项目落地与组织保障

项目落地需要把技术、流程与组织三方面对齐。设计阶段明确边界条件与验收条目,围绕最小可行集合构建首套功能,先覆盖高频高风险场景,再逐步扩展。流程改造以作业许可与隐患治理为抓手,把纸面流程转化为可执行的电子票与策略白名单,做到动作可审计、越界可拦截。组织层面设立跨岗位小组,统一口径与变更路径,减少接口摩擦。需求管理遵循少做但做透的原则,先建立样板线和样板区,固化接口与验收条目,再向相邻场景复制。合同与制度同步更新,把数据质量、响应时延与闭环完整度写入考核与结算,形成外部约束与内部动力的同向性。

为降低不确定性,采用灰度发布与双轨运行。新旧流程按批次切换,任一批次出现异常即可回退。培训以角色为单元,面向值班、调度、设备与管理设置差异化内容,强调接管条件、异常处置顺序与复盘方法。供应链侧统一接口标准与质量验收,把第三方设备与系统纳入同一规则下运行,避免形成信息孤岛与操作孤岛。运作模式从人盯人转向人盯规则,关键动作改为策略触发与互锁执行。对易错环节布设防错机制,如非对称定位与强制顺序,把潜在差错在物理层面消解。异常事件统一进入工单系统,闭环结果自动沉淀为知识条目,定期清理失效条目,保持规则库精简而有效。治理层面构建从立项到运维的路线图与预算闭环,明确阶段目标与验收标准,按里程碑释放功能与资金。建立联合评审与例会机制,技术、生产与安全同屏共识,防止一项改造在另一个环节形成新的不确定性。对外协与供应商实施准入与退场机制,保持生态健康。

3.2 运维体系与绩效评价

运维体系应覆盖预防、预测与纠正三个层面。以里程、工时与载荷谱构建部件级寿命模型,设定状态阈值与窗口化检修节奏,减少临停对队列的扰动。健康监测围绕温度、振动、压力与噪声四类信号,结合趋势分析识别退化速度与剩余寿命,联动备件策略与资源排程,实现人力与物料的协同。对于高磨损部件实施健康因子加权的差异化保养,运行温度与震动水平越高权重越大。结合环境条件调整检修节奏,极端气候与湿度时段适当前移维护窗口,避免叠加风险。与调度平台共享设备可用度与健康等级,防止把隐患设备安排在高负荷任务。

绩效评价以安全、效率与成本三元目标为主轴,建

立红黄绿分级看板与滑动窗口趋势图。现场关注队列长度、循环时间与空等,系统关注产线平衡率与能源强度,治理关注事故率、未遂事件与恢复速度。评价要素与改进动作一一对应,任何指标越界必须绑定处置脚本与责任人,复盘结论写入规则库与采购条款,推动持续改进从经验走向标准。绩效度量避免一刀切,允许不同采场按地质条件与设备结构设定差异化权重。评价结果不止用于表彰与问责,还要反哺到设计与采购,对表现稳定的模块与规则形成白名单优先复用,对反复越界的设备与流程列入整改清单并限制扩散。可视化平台以看板呈现红黄绿分级与热力图,向现场暴露位置与时序信息,向管理暴露趋势与对比。对每一次越界与处置生成可审计记录,定期以小样本抽检核验真实性。通过季度评审固化有效做法,删除失效规则,使系统在约束内持续简化。对岗位培训建立以场景为单位的微课程与演练清单,新进与转岗必须完成考核。把改进建议与缺陷报告纳入同一通道,形成从发现到修复再到验证的闭环,确保制度与技术同频升级。

4 结语

矿山开采安全管理信息化不是单一软件的堆砌,而是以数据和规则重组安全治理链条的系统工程。通过明确目标与约束、落实分层架构与接口标准、夯实现场感知与数据治理、联动风险评估与协同决策,并以组织与运维机制保障闭环,可在复杂约束下形成稳定、可复制与可扩展的能力。未来应在场景参数自动更新、策略置信度自适应收缩与多目标滚动优化上持续迭代,并以标准与培训长期同步,使安全成为日常生产的内生能力。

参考文献

- [1]张涛,王宏远,房琦. 矿山工程开采技术设备及施工安全管理分析[J]. 世界有色金属,2025,(09):109-111.
- [2]王东. 智慧矿山背景下矿山智能化开采与建设技术分析[J]. 张江科技评论,2025,(03):98-100.
- [3]吴全付. 露天开采矿山中的采矿技术及安全问题分析[J]. 低碳世界,2025,15(03):76-78. DOI:10.16844/j.cnki.cn10-1007/tk.2025.03.018.
- [4]赵开林,保丹梅,张照伦,等. 浅谈煤炭开采过程中的开采技术与安全管理建议[J]. 内蒙古煤炭经济,2025,(05):94-96. DOI:10.13487/j.cnki.imce.026440.