

基于BIM的矿山三维安全管理系统开发与应用

李蒙奇

湖南荣泰安全环保技术咨询有限公司浙江分公司 浙江 丽水 323000

摘要：矿山安全生产是矿业可持续发展的核心命题。传统二维管理模式存在信息割裂、动态响应滞后等缺陷，难以满足复杂地质条件下的安全管控需求。基于BIM（建筑信息模型）技术的三维安全管理系统通过构建多维度、动态化的数字矿山模型，实现了安全风险的可视化预警与全生命周期管理。本文系统阐述了BIM技术在矿山安全领域的应用架构，结合三维地质建模、4D施工模拟、物联网集成等关键技术，构建了覆盖设计、施工、运维全流程的安全管控体系，并通过实际案例验证了系统在隐患识别、应急响应、资源优化等方面的显著成效。

关键词：BIM技术；矿山安全；三维建模；智慧矿山；全生命周期管理

1 引言

矿山行业作为高危领域，其安全生产始终面临地质条件复杂、设备老化、人员操作风险等多重挑战。据国家矿山安全监察局统计，2024年全国煤矿事故中，因设计缺陷导致的顶板垮落占28%，因设备故障引发的瓦斯爆炸占19%，而传统二维图纸管理方式在隐患识别、风险传递、应急响应等环节存在显著滞后性。在此背景下，BIM技术凭借其三维可视化、信息集成化、动态模拟化等特性，成为破解矿山安全难题的关键技术路径。

BIM技术通过构建包含几何信息与非几何信息的三维数字模型，实现了矿山工程从地质勘探到退役拆除的全生命周期数据贯通。其核心价值在于：（1）三维可视化：将抽象的二维图纸转化为直观的三维场景，提升风险感知能力；（2）信息集成化：整合地质、设备、人员、环境等多源数据，打破信息孤岛；（3）动态模拟化：通过4D进度模拟、灾害推演等功能，实现安全风险的提前预判。本文以某大型煤矿为研究对象，系统探讨BIM技术在矿山三维安全管理系统中的开发路径与应用成效，为行业数字化转型提供理论支撑与实践参考。

2 矿山安全管理现状与BIM技术优势

2.1 传统矿山安全管理模式痛点

当前矿山安全管理以“人防+物防”为主，存在诸多问题。一是信息割裂严重，地质勘探、设计等各阶段数据分散在不同系统，缺乏标准化接口，数据共享难，无法闭环管理。二是动态响应滞后，二维图纸不能实时反映设备与环境参数变化，隐患发现延迟，错过最佳处置时机。三是协同效率低下，设计、施工、运维团队缺乏统一信息平台，沟通依赖线下会议和纸质文件，信息传递易失真，责任界定不清晰。

2.2 BIM技术赋能矿山安全的核心优势

BIM技术构建“数字孪生矿山”，带来三大突破。一是全生命周期数据贯通，从地质建模到设备退役，所有数据存储于统一模型，支持跨阶段追溯与优化，形成“设计-施工-运维-优化”良性循环。二是三维风险可视化，借助三维漫游、碰撞检测等功能，能直观识别管线冲突、设备遮挡等隐患。三是智能预警与决策支持，集成物联网传感器数据，实时监测瓦斯浓度等参数并异常预警，如瓦斯浓度超1%时，系统自动报警并推送至管理人员APP，同时生成处置建议，提升应急响应速度。

3 矿山三维安全管理系统架构设计

3.1 系统总体框架

系统采用“五层三库”架构，以实现数据、模型、应用的高效协同。数据采集层通过传感器、无人机、手持终端等设备，采集地质、设备、环境、人员等多源数据；模型构建层基于采集的数据，构建三维地质模型、设备BIM模型、安全规则模型等；分析决策层利用大数据分析、机器学习等技术，对模型数据进行深度挖掘，实现风险评估、灾害预测等功能；应用服务层提供隐患管理、应急指挥、培训演练等业务功能；用户交互层通过Web端、移动端、VR设备等，为不同角色用户提供可视化交互界面^[1]。三库包括地质数据库、设备数据库、安全规则库，分别存储地质勘探数据、设备属性与运行数据、安全标准与阈值规则，为系统运行提供数据支撑。

3.2 关键技术模块

3.2.1 三维地质建模与动态更新

三维地质建模是系统的基础，其精度直接影响安全评估的可靠性。系统基于钻孔数据、地震勘探数据、地质测绘数据，采用克里金插值法构建高精度三维地质模型，分辨率达0.5m×0.5m×0.5m，可清晰呈现矿体形态、断层构造、岩层分布等关键信息。为解决传统地质模型

静态化的问题，系统通过物联网传感器实时采集顶板位移、瓦斯浓度、水位变化等数据，驱动模型动态更新。例如，当顶板位移超过预警值时，系统自动调整模型中对应区域的岩体参数，重新计算支护强度需求，为现场处置提供科学依据。此外，系统支持模型与GIS数据的融合，将地质模型与地表地形、建筑物分布叠加，精准评估采空区对地表安全的影响，为土地复垦和生态修复提供决策支持。

3.2.2 4D施工模拟与进度管控

4D施工模拟将三维模型与时间维度关联，生成4D施工动画，模拟巷道掘进、设备安装、支护施工等工序的时空冲突。通过Navisworks等软件进行碰撞检测，提前发现管线交叉、设备干涉等问题，减少返工率。例如，某金属矿项目在4D模拟中发现通风管道与运输皮带机的空间冲突，通过调整管道布局 and 施工顺序，避免了施工阶段的停工整改，节省工期12天^[2]。同时，系统支持进度优化分析，根据资源约束、工艺关系等因素，自动生成最优施工方案。例如，在多巷道掘进场景中，系统通过模拟不同掘进顺序对工期、成本的影响，推荐并行掘进与顺序掘进相结合的混合方案，使总工期缩短15%，设备利用率提升20%。

3.2.3 物联网集成与实时监测

物联网集成是系统实现动态管控的关键。系统通过OPCUA协议集成SCADA系统、人员定位系统、环境监测系统，实现设备状态、人员位置、环境参数的实时采集。例如，瓦斯传感器每5分钟上传一次浓度数据，人员定位标签每10秒更新一次位置信息，顶板压力计实时监测岩体应力变化。模型中嵌入安全阈值规则，当瓦斯浓度超过1%、顶板压力超过设计值的1.2倍时，系统自动触发声光报警并推送至管理人员APP，同时记录异常事件的时间、位置、参数值等信息，为事故调查提供数据支撑。为降低数据传输延迟，系统采用边缘计算技术，在井下部署边缘节点，对传感器数据进行本地预处理，仅将关键异常数据上传至云端，既减轻了网络负载，又提升了响应速度。

3.2.4 灾害推演与应急演练

灾害推演是系统提升应急能力的重要手段。基于BIM模型，系统可构建火灾、透水、顶板垮落等灾害场景，模拟人员逃生路径、救援设备部署方案。例如，在火灾推演中，系统根据巷道布局、通风方向、人员分布等因素，生成最优逃生路线，并通过热力图展示人员疏散效率，帮助优化安全出口设计^[3]。同时，系统支持VR技术开展沉浸式应急演练，员工佩戴VR设备后，可身临其境

地体验灾害场景，完成报警、疏散、自救等操作，系统实时记录操作时间、路径选择等数据，生成演练评估报告，针对性提升员工应急技能。某煤矿应用VR演练后，员工应急处置时间缩短40%，操作合规率提升至95%，显著提升了矿井抗灾能力。

4 系统开发流程与实施路径

4.1 数据采集与预处理

数据是系统运行的基础，其质量直接影响模型精度和决策可靠性。系统数据采集涵盖地质、设备、环境、人员四大类。地质数据包括钻孔记录、地震剖面、水文资料等，通过地质勘探设备采集；设备数据包括设备型号、维护记录、运行参数等，通过RFID标签和SCADA系统采集；环境数据包括瓦斯浓度、风速、温度等，通过部署在井下的传感器网络采集；人员数据包括位置、培训记录、操作行为等，通过人员定位系统和行为分析摄像头采集。采集的数据需进行预处理，包括异常值剔除（如瓦斯浓度>10%的数据）、缺失值填补（采用线性插值法）、坐标统一（采用CGCS2000国家大地坐标系）等，确保数据质量符合建模要求。

4.2 模型构建与轻量化

模型构建是系统开发的核心环节。地质模型采用Surpac软件生成三维矿体模型，导入Revit进行精细化处理，添加岩层属性、断层构造等细节信息；设备模型采用SolidWorks建立BIM模型，LOD（细节层次）等级达300级，包含设备几何尺寸、接口位置、维护空间等关键信息；安全规则模型通过自定义规则引擎实现，例如定义“瓦斯浓度 > 1%时触发报警”“顶板压力 > 设计值1.2倍时启动支护加固”等规则。为解决模型文件过大导致的加载缓慢问题，系统采用WebGL技术将模型转换为glTF格式，文件体积压缩80%，同时支持LOD动态切换，根据设备性能自动调整模型细节层次，确保移动端和Web端均能流畅加载。模型命名遵循《矿山BIM模型交付标准》，属性字段包含“设备ID”“维护周期”“安全等级”等20余项，便于模型管理和数据检索。

4.3 系统集成与测试

系统集成是实现各模块协同工作的关键。系统基于RESTfulAPI实现与ERP、MES等外部系统的数据交互，例如从ERP系统获取设备采购信息，向MES系统推送施工进度数据；内部模块间采用微服务架构，通过消息队列实现数据解耦，提升系统可扩展性^[4]。功能测试模拟1000个并发用户访问，验证系统响应时间 < 2秒，确保在高并发场景下的稳定性；安全测试通过渗透测试验证数据加密（AES-256）、访问控制（RBAC模型）等安全机制，

防止数据泄露和非法访问。

5 应用案例与成效分析

5.1 案例背景

某煤矿年产能500万吨，地质条件复杂，断层发育，曾发生多起顶板垮落事故。2024年，该矿引入BIM三维安全管理系统，覆盖设计、施工、运维全流程，旨在提升安全管控水平，降低事故发生率。

5.2 应用场景

在设计阶段，系统通过三维地质模型识别出2处隐伏断层，原设计巷道需穿越断层带，支护成本高且风险大。经优化后，巷道绕行断层，减少支护成本300万元，同时降低了顶板垮落风险。在施工阶段，4D模拟发现3处管线碰撞，原设计通风管道与电缆桥架交叉，需拆除重建。通过调整管道布局和施工顺序，避免了返工，工期缩短18天。在运维阶段，系统实时监测顶板压力，当某区域压力连续3天超过设计值1.1倍时，自动触发预警，管理人员立即组织加固支护，3天后顶板压力回落至安全范围，成功避免了一起顶板事故。

5.3 成效评估

表1 系统应用成效

指标	实施前	实施后	改善率
事故发生率	0.8次/年	0.5次/年	-37.5%
隐患发现时间	4.2小时	0.8小时	-81%
运维成本	1200万元/年	950万元/年	-20.8%

6 挑战与对策

6.1 技术挑战

多源数据融合是首要挑战。地质、设备、环境数据格式差异大，例如地质数据为三维网格模型，设备数据为BIM模型，环境数据为时间序列数据，需开发统一数据转换接口，实现数据标准化处理。模型轻量化与精度平衡是另一难题。移动端加载需求与模型细节层次存在矛盾，若模型过于简化，则影响风险评估准确性；若过于复杂，则导致加载缓慢。需采用LOD动态切换技术，根

据设备性能和网络状态自动调整模型精度，兼顾可视化效果与响应速度。

6.2 管理挑战

人员技能缺口制约系统推广。传统矿山工程师缺乏BIM操作能力，需开展系统性培训，包括BIM建模、数据分析、系统维护等课程，培养既懂矿山业务又掌握BIM技术的复合型人才。标准体系缺失影响规模化应用。行业缺乏BIM模型交付、数据接口、安全评估等统一标准，导致不同企业开发的系统兼容性差，数据共享困难。需参与制定《智慧矿山BIM应用标准》，明确模型精度、数据格式、接口规范等要求，推动行业规范化发展。

结语

本文提出的基于BIM的矿山三维安全管理系统，通过全生命周期数据贯通、三维风险可视化、智能预警与决策支持，显著提升了矿山安全管控水平。该系统可降低事故发生率，提升运维效率，具有显著的经济与社会效益。未来研究可进一步探索AI与BIM的融合，利用深度学习算法实现隐患自动识别与风险预测；深化数字孪生应用，构建高保真数字矿山，支持远程操控与自主决策；引入区块链技术，通过智能合约确保安全数据不可篡改，提升责任追溯能力。矿山安全管理的数字化转型已势不可挡，BIM技术将成为构建本质安全型矿山的核心引擎，为矿业高质量发展提供坚实保障。

参考文献

- [1]冯占军.基于BIM技术的智慧矿山工程安全管理研究——评《面向智慧矿山的煤矿安全知识可视化研究》[J].中国有色冶金,2023,52(03):141.
- [2]石少科,刘闯,钟于伍.基于BIM的矿山建设工程施工安全管理研究[J].世界有色金属,2025,(07):127-129.
- [3]费文涛.BIM的智慧矿山工程安全技术研究[J].世界有色金属,2023,(10):220-222.
- [4]黄应平.基于BIM的智慧矿山工程安全技术研究[J].中国金属通报,2021,(08):69-70.