# 矿井下多工作面爆破工序智能管控体系研究*

崔太浩[1],李龙福[1,2],王春[1],李梦[1],饶安[1]

(1.河南理工大学 能源科学与工程学院, 河南 焦作市 454003;
2.马鞍山矿山研究院爆破工程有限责任公司, 安徽 马鞍山市 243000)

**摘要**:以某铁矿穿孔与爆破工序分离的实际情况为工程背景,针对穿爆分离引发的生产组织协调难度大、工序间信息传递滞后、爆破工序信息孤岛、风险频发及生产成本偏高等突出性问题开展研究。采用爆破事故案例分析与爆破工序事故树风险评估方法,构建了多工作面爆破工序智能管控思路,并采用Vue+Django框架设计并开发了具备实时交互、工序任务分配、爆破器材精准管理及人员多级管控等功能的爆破工序智能管控系统。测试结果表明:系统在弱信号环境下信息传输延迟约为250 ms、丢包率为0.3%、重连时间在3 s以内;并发用户数达1 000人时,平均响应时间小于1 s,事务成功率超98%;现场应用后,各爆破工序风险频数显著降低,节约了大量资金并提高了爆破作业效率,有效解决了穿爆不协同的难题。研究结果为矿山爆破工序智能化升级提供了可行技术方案。

**关键词**:穿爆分离;事故树风险评估;多工作面爆破工序;智能管控系统

**中图分类号**:TD679 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)06-0209-09

**Research on Intelligent Management and Control System of Blasting Operations in Multiple Working Faces Under Mines**

*Cui Taihao*[1], *Li Longfu*[1,2], *Wang Chun*[1], *Li Meng*[1], *Rao An*[1]

(1.School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454003, China;
2.Maanshan General Institute of Mining Research Blasting Engineering Co., Ltd., Maanshan, Anhui 243000, China)

**Abstract**: Based on the practical engineering background of separation of drilling and blasting operations in an iron mine, research was carried out on prominent problems induced by the separation of drilling and blasting operations, including difficulties in production organization and coordination, lagged inter-process information transmission, information silos in blasting operations, frequent operational risks, and high production costs. Using blasting accident case analysis and fault-tree-based risk assessment method for blasting operations, an intelligent management and control scheme for blasting operations in multiple working faces was established. Based on the Vue+Django framework, an intelligent blasting operation management and control system featuring real-time interaction, process task allocation, precise management of blasting materials, and multi-level personnel control was designed and developed. Results show that, under weak-signal conditions, the system maintains an information transmission delay of approximately 250 ms, a packet loss rate of 0.3%, and a reconnection time of less than 3 s. Under a concurrency level of 1 000 users, the system maintains an average response time of less than 1 s and a transaction success rate exceeding 98%. Following field application, the risk frequency of blasting operations is significantly reduced, considerable costs are saved, and blasting efficiency is improved, thereby effectively solving the coordination problems between drilling and blasting operations. The obtained results provide a feasible technical approach for the intelligent upgrading of mine blasting operations.

**Key words**: Separation of drilling and blasting, Fault-tree-based risk assessment, Blasting operations in multiple working face, Intelligent management and control system

---

* **收稿日期**:2025-06-16

**基金项目**:河南省优秀青年科学基金项目(242300421070);中国博士后科学基金项目(2023M733279)

**作者简介**:崔太浩(2000—),男,河南南阳人,硕士研究生,主要从事矿山开采方法与技术方面的研究工作。E-mail:212302020056@home.hpu.edu.cn

**通信作者**:王春(1986—),男,安徽淮南人,博士,副教授,主要从事深部岩石冲击动力学、金属矿山采矿工艺、地热能可持续开采等方面的研究工作。E-mail:wangchun@hpu.edu.cn

## 0 引言

随着金属矿山开采工艺的日益进步,井下有轨智能无人运输系统[1]、遥控采矿技术[2]和三维建模及虚拟现实技术[3]等大量智能化设备与系统被广泛应用于金属矿床开采,不仅降低了人工成本,还显著提升了矿山设计与建设效率。然而,受限于复杂的井下自然环境,在掘进过程中仍需要通过凿岩爆破作业来破碎坚硬岩体。因此,凿岩爆破依然是金属矿床开拓掘进中不可或缺的关键环节[4-5]。

目前,我国金属非金属矿山等民用起爆领域广泛采用导爆管雷管作为起爆器材,且金属矿山矿床开采对爆破技术的依赖程度极高[6-7]。金属矿山井下工作面爆破具有严格的爆破工序要求,各爆破工序间需要紧密衔接并实时传递信息,若爆破工序衔接不及时或信息反馈不准确,易形成信息孤岛从而诱发安全事故。因此,研发高效智能的多工作面爆破工序管控体系,对保障金属矿山安全、提升开采效率等具有重要的工程实践意义。传统井下爆破研究多聚焦于爆破参数优化[8]、爆破器材改良,以及工艺创新,如大直径深孔爆破[9-10]、电子雷管代替传统雷管[11-12]、地下矿山井巷掘进新技术[13-14]等领域已经备受关注。然而,针对井下多工作面爆破工序的协同管控方面的研究仍相对匮乏。

当前,爆破工序智能化研究主要呈现两大趋势。一是聚焦单工序优化,Wu 等[15]开发的掘进数据库系统实现了爆破数据结构化存储;杨仁树等[16]基于数码电子雷管,应用孔内分段技术优化了装药工序,提高了巷道掘进效率;关开荣等[17]研究智能机器人在凿岩爆破中的应用,利用凿岩机器人提高了穿孔工序中钻孔的精度,同时提高了穿孔的效率,改善了作业条件等。这些研究虽然显著优化了单一爆破工序效果,但缺乏对爆破全流程协同的统一规划。二是趋向全流程集成,如李萍丰等[18-19]针对地质探测、爆破设计、现场混装炸药运输、炮孔智能填塞以及起爆等多方面爆破关键技术进行了智能化研究和应用,达到了矿山爆破智能化和少人化的目的;Bai 等[20]、Rabbani 等[21]采用深度神经网络对爆破参数与岩石破碎的关系进行研究,证明了遗传算法优化的神经网络在预测爆破结果参数方面精确度极高;Liu 等[22]研究发现,基于 DG-YOLOv3 的露天矿风险预警模型具有较好的精度和计算速度,其响应时间大幅减小;杨军等[23]开发了露天台阶爆破智能设计系统,实现了三维布孔、起爆网络连接和爆破参数选取等功能的自动化和智能化,提升了爆破作业的智能化水平。学者们针对爆破作业全流程集成进行了大量研究,并取得了丰硕成果,但现有研究普遍存在三方面局限:(1)多工序数据异构性导致系统耦合度不足;(2)动态任务分配缺乏风险量化支撑;(3)移动端实时交互存在延迟。

综上所述,爆破领域学者不仅在爆破参数优化、爆破器材改良等方面进行了深入研究,同时也对爆破作业的智能化发展进行了积极探索。然而,现有多数智能系统及爆破设计软件主要针对单一爆破工序进行设计与开发,即便部分研究实现了爆破作业的全流程集成,但仍缺乏对多中段、多工作面爆破工序的统一协同管控。为解决多工作面爆破工序协同困难等问题,本文结合某铁矿实际工程背景,研发了一种井下多工作面爆破工序智能管控系统。

## 1 矿井概况及井下爆破作业工序

### 1.1 矿井概况

某铁矿矿井生产规模为 200 万 t/a,属大型地下矿山,采用机械化盘区上向分层连续倾斜进路尾砂充填采矿法和机械化盘区点柱式上向分层充填采矿法回采矿石。为满足生产规模要求,矿山需实施多中段、多盘区同时作业,每日爆破工作面数量平均达 55 个以上,生产组织难度较大。为提高爆破作业的专业化水平,该矿山将原有穿爆一体化工序进行拆分,变为穿孔工序与爆破工序相对独立的作业模式,其中爆破工序由专业爆破公司承担。上述作业模式虽提高了矿山整体专业化程度,但穿爆作业人员分属不同岗位,致使各个工作面出现爆破工序协调工作复杂和穿孔爆破信息传递不及时等问题。

### 1.2 井下爆破作业工序

合理的爆破方案不仅能够有效降低生产成本,还可最大程度保障施工人员安全,提高工作面爆破效率,从而大幅提升矿井生产效率。针对矿井复杂的岩层条件,结合实际情况,确定了适合工作面掘进且满足大规模生产要求的爆破方案。该爆破方案所设计的爆破工序依照先后可划分为凿岩穿孔、装药、填塞、连接起爆网络和起爆等环节。工作面爆破作业工序流程如图 1 所示。

从图 1 可以看出,爆破作业工序衔接紧密、组织有序,是保障爆破作业顺利实施的关键。从凿岩穿孔、起爆实施到爆破结束,各工序间的交接都依赖前

一工序完成后的信息传递。因此,及时、准确地传递各个工序间的完成度信息,是保障井下爆破作业安全高效的基础。

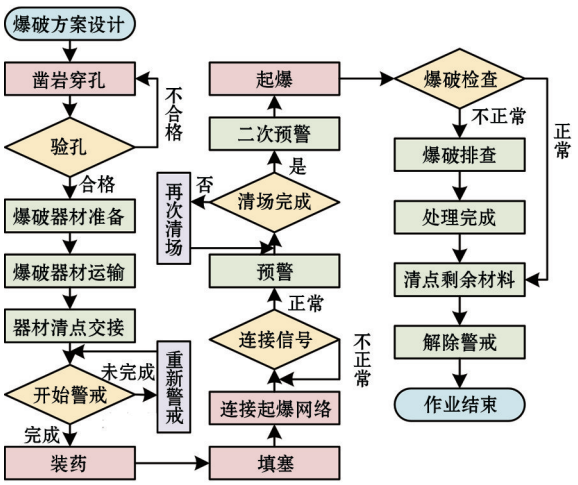



**图 1 某铁矿工作面爆破工序流程**

**Fig.1 Process flow of blasting operations in a certain iron ore working face**

### 1.3 面临的问题

某铁矿实施穿爆工序分离后,虽在一定程度上提高了爆破作业的专业化水平,但由于该矿井工作面数量较多、生产规模较大,该模式转变也造成了以下难题。

(1) 生产组织协调难度增大。在穿爆一体化模式下,穿孔人员同时承担爆破作业职责,可在穿孔作业即将完成时,安排人员及时准备民用爆破品,在穿孔结束后立即进行装药作业。在穿爆分离模式下,总包单位与爆破公司之间需建立联络机制,确保在穿孔作业完成后,能及时组织装药,实现工序衔接。然而,在具体实施过程中,受各单位间调度组织的时效性滞后和井下实时信息联络不畅等因素影响,穿孔工序与爆破工序之间难以实现无缝衔接,常出现穿孔、验孔不及时等现象。因此,生产组织衔接难度大,影响作业效率。

(2) 工序划分后爆破参数信息反馈不及时以及爆破效果控制难度大。受穿爆工序分离、工程地质和水文地质条件复杂,以及设备操作人员技能水平差异等因素影响,穿孔参数与设计方案往往存在偏差;若穿孔环节未及时采取纠偏措施,即使爆破员采用适当增加药量等补救措施,爆破效果仍难以得到改善。

(3) 生产成本增高。在穿爆分离模式下,穿孔人员与爆破人员属不同公司的员工,原穿孔单位人员数量未减少,同时新增爆破公司作业人员,导致现场施工人员总数增加,人工成本增大。此外,两方人员来自不同公司,导致穿孔工序与爆破工序间沟通不畅,影响爆破效果,额外增加穿孔成本、补炮成本或破碎成本。

综上,某铁矿穿爆工序分离后爆破工作面存在突出问题,为此,本文针对上述问题开展多工作面爆破工序智能管控体系的相关研究。

## 2 多工作面爆破工序智能管控

### 2.1 爆破工序管控事故案例分析

为构建合理的爆破工序智能管控思路,消除爆破实施过程中的安全隐患,针对爆破工序实施期间引发的重大安全事故进行深入分析,得出爆破工序智能管控的关键要素,进而合理设计出爆破工序智能管控系统。

近年来,我国爆破作业领域典型事故频发。首先是爆破信息协同失效问题。2023 年广西矿区事故中,矿山违规使用社会化爆破公司,导致信息协同失效,诱发巷道坍塌事故。事故调查结果表明,穿爆分离模式下工序衔接断层、多部门信息孤岛等问题普遍存在于国内大中型金属矿山。例如,山西某铜矿因工序交接滞后,导致爆破网络参数失效,造成重大经济损失;云南某磷矿因穿孔数据未实时共享,造成装药量计算偏差 12.7%,引发岩体过粉碎。其次是现场违规作业与安全距离缺失问题。2021 年 1 月,山东某金矿因违规混存民爆物品致气割熔渣引燃炸药包装物,致 11 人死亡,同时造成巨大经济损失;2022 年 4 月,宁夏某爆破公司因 PVC 炮棍静电引燃硝铵药尘,导致早爆,致 2 死 1 伤;2016 年 8 月,承德某铁矿因未达安全条件违规起爆,致 2 死 2 伤。

对上述典型案例进行分析,归纳事故存在以下共性特征。

(1) 违规操作普遍存在。所有事故均存在违反《爆破安全规程》(GB 6722—2022)的行为,如广西案例中爆破技术员越权使用微信群沟通,在未确认警戒完成时擅自起爆。

(2) 作业流程失控。如宁夏案例因外力撞击或静电引发早爆,承德案例则在未满足安全条件时强行起爆。上述案例均暴露出工序管控的严重缺失,事故直接原因集中于爆破器材管理不当(如混存、撞击)、人员职责错位(技术员越权操作)以及安全条件未达标即作业等。

(3) 后果严重性显著。上述事故造成大量人员

伤亡,经济损失巨大,均被认定为生产安全责任事故。调查结果显示,事故间接原因多涉及现场管理混乱、培训不足及监管缺位等。

此类事故的共性特征凸显出事故案例存在以下问题:(1)工序割裂易导致时空错位率高(超 35%),穿孔、装药环节平均间隔达 4.2 h,超出岩体稳定性临界阈值;(2)信息传递衰减率高达 62%,纸质工单传递造成参数失真,电子雷管延期时间设置误差波动为±15 ms;(3)多工作面协同失效概率倍增,当并行工作面超过 40 个时,任务冲突率呈指数增长;(4)人员培训及管控力度不足。

综合事故案例中存在的问题,明确爆破工序智能管控系统应满足以下要求:(1)保障爆破工序信息实时传递,解决因爆破工序信息孤岛引发的各类风险问题;(2)采用高性能的网络通信机制,确保爆破工序智能管控系统在信息传递方面能够满足低延时、低丢包率;(3)具备高并发处理能力,在多用户并行作业条件下仍能保持稳定运行,并通过高并发场景下的性能测试进行验证与优化;(4)爆破工序智能管控系统应当具备人员多级管控功能,提高作业安全管理水平。

## 2.2 爆破工序风险分析

通过对重大爆破事故案例进行分析,结合某铁矿井下多工作面爆破工序可能面临的问题,从多方面识别爆破工序管控过程中可能存在的风险,并采用事故树(FTA)法开展风险评估分析[24]。

根据事故树分析方法,首先将“爆破工序管控失误引发的爆破事故”确定为顶事件,随后分析其诱因,对各工序风险因素进行统计分析,具体概率统计见表 1。为保障爆破事故案例来源的权威性,所有案例均取自国家矿山安全监察局的公开信息。

基于统计结果,将中间事件(作业工序)划分为穿孔工序风险、验孔工序风险、装药工序风险、填塞工序风险、爆破网络风险和爆破信号风险,基本事件为造成各工序风险的风险因素。

根据上述对事故树顶事件、中间事件和基本事件的确定结果,绘制爆破工序风险事故树,如图 2 所示。统计导致爆破事故的风险因素,结合事故树所列出的基本事件,确定各因素引发爆破事故的风险概率。

**表 1 各工序风险因素概率统计**

**Table 1 Probabilistic statistical of risks in each process**

| 作业工序 | 风险因素 | 频数 | 概率/% |
|---|---|---|---|
| 穿孔 | 未按规定穿孔 | 5 | 4.59 |
| | 未配备防护用品 | 10 | 9.17 |
| | 非穿孔工穿孔 | 4 | 3.67 |
| 验孔 | 未检查炮眼 | 5 | 4.59 |
| | 未清理堵塞炮眼 | 3 | 2.75 |
| 装药 | 药量过多 | 4 | 3.67 |
| | 未将药卷紧密接触 | 6 | 5.50 |
| 填塞 | 未检查封孔是否合格 | 35 | 32.11 |
| 爆破网络 | 未按要求连接 | 15 | 13.76 |
| | 违章用发爆器检测网络 | 7 | 6.42 |
| 爆破信号 | 一次装药分次爆破 | 9 | 8.26 |
| | 连续爆破 | 6 | 5.50 |

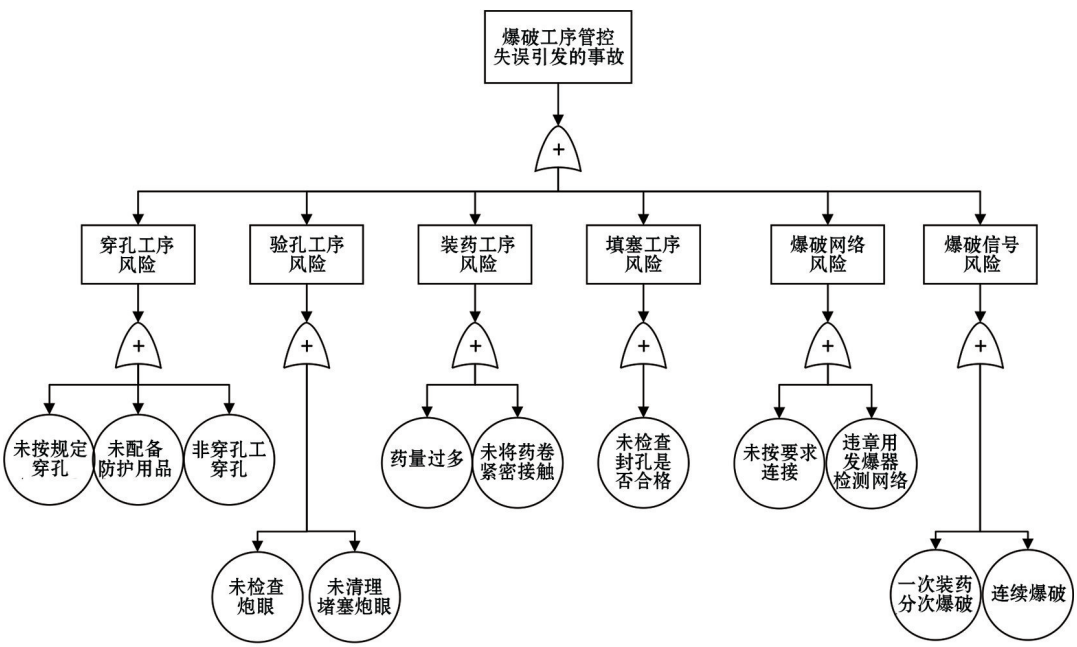



**图 2 爆破工序风险事故树**

**Fig.2 Risk accident tree for blasting process**

### 2.3 爆破工序智能管控思路

某铁矿生产规模较大,日均需对超过 50 个工作面实施爆破作业,工作面爆破需求较高。同时,穿爆工序分离后,工序间信息传递不及时、爆破成本增加等问题日益突出。因此,爆破工序智能管控思路的构建应以解决上述问题为基础,结合对重大爆破事故案例的分析以及各工序风险因素概率统计分析,进一步优化爆破工序智能管控思路。

爆破工序智能管控思路基于某铁矿多工作面爆破作业的具体流程,以井下各中段和工作面信息为基础,实现对穿孔、验孔、装药、填塞、爆破网络和爆破信号等关键工序的实时管控。同时,通过构建多级管理模式,实现爆破作业任务的多级管控,达到可视化智能组织与安全高效调度的目的。结合该铁矿爆破工序管控实际需求,进一步实现工作面爆破工序信息实时共享、任务分级分派与接收,以及爆破器材精细化监管等,从而实现爆破作业工序的智能管控。爆破工序智能管控思路如图 3 所示。

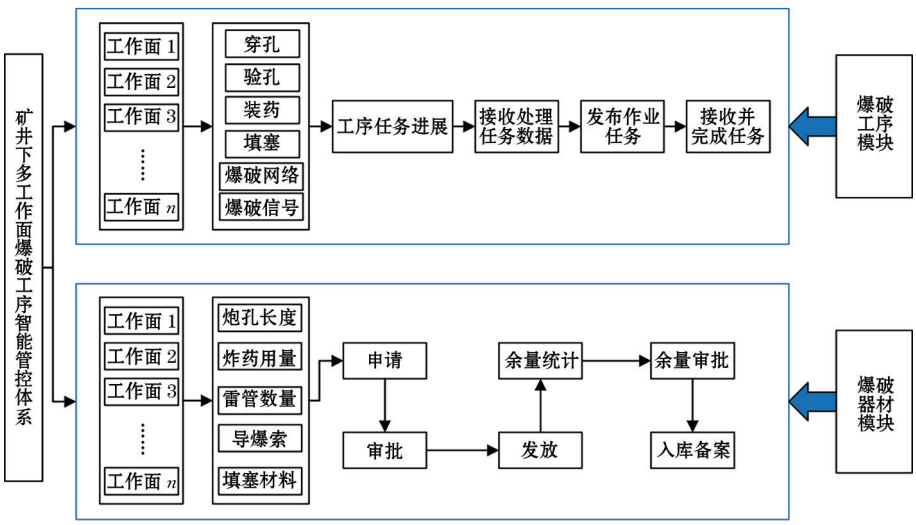



**图 3 爆破工序智能管控思路**

**Fig.3 Intelligent management and control ideas for blasting process**

## 3 爆破工序智能管控系统设计和实现

### 3.1 爆破工序智能管控系统设计

爆破工序智能管控系统设计从不同中段的各工作面的爆破工序流程及信息传递出发,对多工作面爆破工序实施统一监督与管理,确保穿孔、验孔、装药、填塞等爆破工序信息能够及时传递并有序衔接,从而提高爆破作业效率。

为保障爆破工序信息的及时性,制定了针对信息传递方面的设计原则,具体包括:(1)实时响应性,系统需要在 2 s 内完成工序状态更新与指令推送;(2)多级冗余机制,建立服务器集群与本地缓存双保险模式;(3)低延时通信,井下环境需保障端到端通信延迟低于 500 ms;(4)故障报警能力,关键模块具备心跳检测功能。

针对实时响应性原则,系统采用 WebSocket 协议技术代替传统的 HTTP 协议,WebSocket 协议能够在一次连接后,允许双方在全双工通道中及时交换数据,有效解决了传统 HTTP 协议在实时通信场景下的滞后问题。

针对多级冗余机制原则,系统采用服务器集群部署方案,即将系统部署到多台服务器上,多台服务器之间利用 Nginx 服务进行负载均衡,即使一台服务器出现故障,其他服务器仍能正常工作,保障爆破工序作业的正常进行。同时,系统设置本地缓存数据功能,为爆破工序智能管控系统中的数据建立提供双保险,确保系统的稳定性。

针对低延时通信原则,井下 5G 信号基本实现全覆盖,低延时通信可以得到保障。

针对故障报警能力原则,系统对各个工序管理模块设置心跳检测功能,该功能主要通过周期性地发送简短的信号来确认服务是否存活、网络是否通畅以及延迟是否在可接受范围内。一旦系统检测出上述问题,立即向管理人员发送报警通知,管理人员可快速定位并及时解决问题,保障爆破工序智能管控系统正常运行。爆破工序智能管控系统设计架构如图 4 所示。

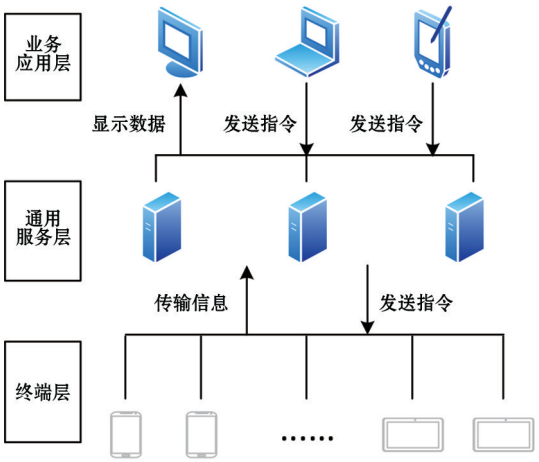



图 4 爆破工序智能管控系统设计架构

**Fig.4 Design architecture of the intelligent management and control system for blasting process**

### 3.2 爆破工序智能管控系统实现

爆破工序智能管控系统采用主流的前后端分离设计开发模式,整体划分为后端服务系统、前端交互系统以及移动端应用三大模块,具体开发框架如图 5 所示。

基于 Python 语言的网页开发框架较多,主要包括 Django、Flask 和 FastAPI 等。其中,Django 是一个全栈型 Web 框架,内置了完善的用户认证系统、表单处理模块、管理后台及 ORM(对象关系映射)等核心功能,适合快速开发复杂的应用。此外,Django 拥有成熟且庞大的生态社区,能够轻松提供强大的第三方功能。Django 框架功能丰富、管理方便,且具有高效的数据库交互机制,因此,可采用 Django 框架进行爆破工序智能管控系统开发。

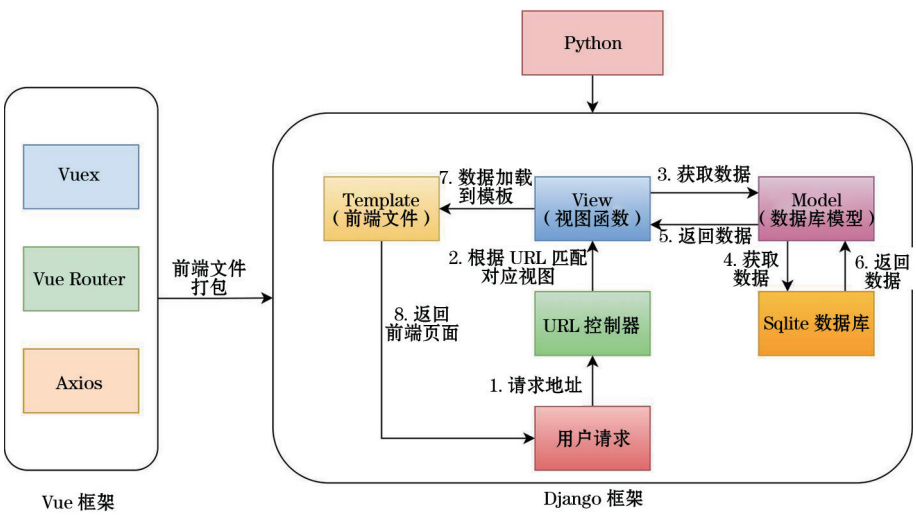



图 5 爆破工序智能管控系统开发框架

**Fig.5 Development framework of the intelligent management and control system for blasting process**

后端服务系统充分利用 Django 框架高效的开发性能与便捷的部署特性,结合爆破工序智能管控系统的设计需求进行开发。在架构模式上,系统遵循 MVT(Model-View-Template)设计模式。其中,模型(Model)设计主要为数据库设计,通过对象关系映射(ORM)机制,实现了面向对象语言与关系型数据库之间的数据转换,充当业务逻辑层和数据库之间的桥梁作用。视图(View)设计主要负责管理页面数据的请求和响应,负责页面的逻辑关系处理。模板(Template)设计则主要为前端页面设计,由于该系统采用前后端分离开发,因此模板设计使用 Vue 开发完成并打包处理后的前端文件。后端服务系统在数据存储方面,采用 SQLite 数据库进行数据持久化存储。

后端服务系统的主要功能包括:对“中段、工作面、穿孔、验孔、装药、填塞、爆破网络和爆破信号”等地点或工序进行创建和管理;管控各工序的任务人员分配,并传递各工序完成度信息,确保各工序紧密衔接;创建并划分管理人员等级,支持多级管理人员权限配置,实现高等级管理员对下级管理员及操作员的全职能调度,实现爆破工序的分级管控;通过管理各工序操作人员,实现精准的任务派发与执行;此外,系统还详细统计了不同爆破工序所需材料的总量、用量和余量,并实时接收现场回传的进度数据。

可视化页面功能按照前后端分离开发模式,前端采用主流的 Vue 框架构建。Vue 框架能够整合

多个组件以协助页面开发与管理,如 Vuex 组件可以对多个页面共用的数据进行存储,在本项目中主要存储人员登录状态等信息;Vue Router 组件负责对不同页面的 URL 地址进行管理;Axios 组件则用于实现不同页面对所需数据的异步请求等。

针对铁矿井下作业场景,操作员的任务接收与进度反馈、管理人员的任务派发与现场监督均需通过移动终端实现。移动端沿用 Vue 生态,采用 uni-app 跨平台开发框架实现,以确保高效的开发周期与跨设备兼容性。

### 3.3 爆破工序智能管控系统前后端整合测试及实际应用

某铁矿井下爆破工序智能管控系统使用前后端分离方式开发,前端基于 Vue 框架,后端基于 Django 框架。为验证系统的易部署性,将完整系统和依赖项打包,并依照安装部署文档将系统部署到新服务器中。

为检验爆破工序智能管控系统的功能完备性与抗压性能,制定了传输性能测试与压力测试两种测试场景。

#### 3.3.1 传输性能测试

传输性能测试通过对比爆破工序智能管控系统在传统 HTTP、WebSocket 和 MQTT 三种协议下的数据传输表现,评估系统的实时通信能力。以延迟、丢包率及重连时间作为衡量网络传输质量的关键指标,分别统计弱信号环境下使用不同协议的通信性能数据,见表 2。

**表 2 弱信号环境下使用不同协议的通信性能对比**

**Table 2 Comparison of communication performance using different protocols in weak signal environments**

| 协议 | 延迟时间/ms | 丢包率/% | 重连时间/s |
|---|---|---|---|
| 传统 HTTP | 1 200±300 | 8.7 | 15 |
| WebSocket | 250±50 | 0.3 | 3 |
| MQTT | 350±80 | 0.5 | 5 |

分析表 2 可知,相比其他两种协议,WebSocket 协议的网络通信延迟更低,丢包率最小,且重连时间很短。因此,系统采用 WebSocket 协议来进行网络通信以保障爆破工序信息的实时性。

#### 3.3.2 压力测试

压力测试主要检验系统在多用户、高消息并发场景下,爆破工序信息传递的响应时间、数据库事务成功率及系统资源占用率。测试采用 100,500,1 000 三个量级的并发用户数,统计对应条件下的平均响应时间、事务成功率及系统资源占用率,结果见表 3。

**表 3 系统压力测试结果**

**Table 3 Results of system pressure testing**

| 并发用户数 | 平均响应时间/ms | 事务成功率/% | 系统资源占用率/% |
|---|---|---|---|
| 100 | 320 | 99.98 | CPU 20<br>RAM 32 |
| 500 | 570 | 99.83 | CPU 36<br>RAM 41 |
| 1 000 | 860 | 98.65 | CPU 53<br>RAM 56 |

分析表 3 可知,在高并发用户(1 000)情况下,系统消息的平均响应时间仍小于 1 s,数据库事务成功率超 98%,系统资源占用率小于 60%,可见爆破工序智能管控系统能够正常应对高并发情况。

#### 3.3.3 现场应用测试

前后端功能整合测试通过后,开展爆破工序智能管控系统的实际应用测试。该铁矿日均爆破工作面数量超过 55 个,生产组织难度较大,因此,系统在该铁矿的实际应用需循序展开。将系统与待爆破工作面结合,综合统计系统应用前、后该铁矿爆破工序风险频数变化、各工序节约金额及生产效率提升情况,如图 6 所示。

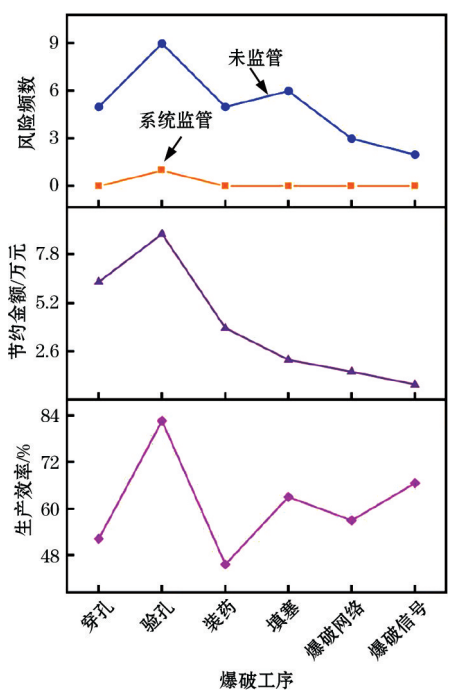



**图 6 智能管控系统接入前后各工序风险频数、节约金额和生产效率**

**Fig.6 Risk frequency, cost savings and production efficiency of each processes before and after integration of the intelligent management and control system**

从图 6 可以看出,引入爆破工序智能管控系统监管爆破工序后,极大地降低了爆破作业风险,节约了大量资金并提高了爆破作业效率,同时也为爆破人员的安全提供了保障。该系统的开发与应用,为矿山爆破工序的智能化升级提供了成功范例,对推动行业相关领域发展具有重要参考意义。

## 4 结论

针对某铁矿穿爆工序分离后暴露的生产组织协调难度大、工序信息传递滞后、爆破效果控制困难及生产成本增高等问题,结合爆破事故案例分析及爆破工序事故树风险评估,开展井下多工作面爆破工序智能管控系统研究,得出以下主要结论。

(1) 采用 Vue+Django 前后端分离框架,创新性地设计并开发出一款爆破工序智能管控系统。相较于传统模式,该系统具有显著优势,能够实现对井下爆破器材的透明化管理,对爆破任务进度与人员信息进行实时传递与记录,对存在风险的中段或工作面及时标记并限制爆破任务分配,能有效解决穿爆工序不协同的问题。

(2) 系统性能测试结果表明,在弱信号环境下,采用 WebSocket 协议可使信息传输延迟控制在 250 ms 左右、丢包率降至 0.3%、重连时间在 3 s 以内;在并发用户数达 1 000 时,系统平均响应时间低于 1 s,事务成功率超 98%,系统资源占用率低于 60%,满足井下多工作面高并发作业需求。

(3) 工程实践表明,爆破工序各环节风险频数显著降低,大幅节约了生产成本并提高了爆破作业效率,有效解决了穿爆不协同的难题。该智能管控系统为多中段、多工作面同时爆破作业提供了统一的信息化管理平台,实现了爆破器材透明化管控、任务进度实时追踪及风险工作面动态预警,对提升矿山爆破作业的安全性与智能化水平具有重要意义。

**参考文献(References):**


[1] 蔡美峰,谭文辉,吴星辉,等.金属矿山深部智能开采现状及其发展策略[J].中国有色金属学报,2021,31(11):3409-3421.
Cai Meifeng, Tan Wenhui, Wu Xinghui, et al. Current situation and development strategy of deep intelligent mining in metal mines[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2021,31(11):3409-3421.

[2] 郭奇峰,蔡美峰,吴星辉,等.面向 2035 年的金属矿深部多场智能开采发展战略[J].工程科学学报,2022,44(4):476-486.
Guo Qifeng, Cai Meifeng, Wu Xinghui, et al. Technological strategies for intelligent mining subject to multifield couplings in deep metal mines toward 2035[J]. Chinese Journal of Engineering,2022,44(4):476-486.

[3] 曾庆栋,底青云,薛国强,等.成矿模式与找矿模式研究的现代科学技术[J].地学前缘,2021,28(3):295-308.
Zeng Qingdong, Di Qingyun, Xue Guoqiang, et al. Modern science and technology in metallogenic and prospecting model studies[J]. Earth Science Frontiers, 2021, 28(3): 295-308.

[4] Zhao Li, Su Dengfeng, Li Zhengguo, et al. Research on optimization of an open-bench deep-hole blasting parameter using an improved gray wolf algorithm [J]. Applied Sciences,2024,14(8):3514.

[5] Li Chengxiao, Yang Renshu, Wang Yanbing, et al. Theory and numerical simulation of deep hole cut blasting based on dispersed charge and staged detonation[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2023, 169:105453.

[6] 孙春辉,李爱兵,马增,等.某新建矿山开采对两侧电力塔基稳定性影响分析研究[J].矿业研究与开发,2026,46(4):121-128.
Sun Chunhui, Li Aibing, Ma Zeng, et al. Analysis of the influence of mining at a new mine on the stability of power tower foundations on both sides[J]. Mining Research and Developmen,2026,46(4):121-128.

[7] Yu Jianyang, Ren Shijie. Prediction and analysis method of mine blasting quality based on GA-BP neural network[J]. Mobile Information Systems,2022(1):9239381.

[8] 牛帅,刘少伟,樊克松,等.灰岩矿溜井开挖支护与降段爆破参数优化[J].河南理工大学学报(自然科学版),2024,43(5):28-35.
Niu Shuai, Liu Shaowei, Fan Kesong, et al. Optimization of parameters of excavation support and down-section blasting in limestone ore pass[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science),2024,43(5):28-35.

[9] Wang Haibo, Zong Qi. Large diameter deep hole blasting in comprehensive hard rock roadway[J]. Electronic Journal of Geotechnical Engineering,2015,20(5):1717-1724.

[10] 安龙,张家华,李元辉,等.急倾斜薄矿脉夹制作用下中深孔爆破模拟与参数优化[J].东北大学学报(自然科学版),2022,43(4):567-574.
An Long, Zhang Jiahua, Li Yuanhui, et al. Simulation and parameters optimization of medium deep hole blasting in steeply narrow vein mine under confinement[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2022, 43(4): 567-574.

[11] 秦绍兵,许自栋,王道银,等.井下小断面开挖融合延时起爆网路试验研究[J].爆破,2024,41(4):174-180.
Qin Shaobing, Xu Zidong, Wang Daoyin, et al. Experimental study on fusion delay detonation network in small section excavation[J]. Blasting,2024,41(4):174-180.

[12] 冷振东,张程娇,邓小英,等.台阶爆破工业电子雷管精确延时爆破设计与应用[J].工程爆破,2024,30(5):216-225.
Leng Zhendong, Zhang Chengjiao, Deng Xiaoying, et al. Design and application of precise delayed blasting for bench blasting with industrial electronic detonators [J]. Engineering Blasting,2024,30(5):216-225.

[13] Luo Pingkuang, Fang Xugang, Li Diyuan, et al. Evaluation of excavation method on point load strength of rocks with poor geological conditions in a deep metal mine [J]. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources,2023,9:90.

[14] Wang Shaofeng, Wu Yumeng, Shi Xinlei. Non-explosive mechanized and intelligent mining/heading in underground mine[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China,2024,34(1):265-282.

[15] Wu Zhengyu, Luo Dayou, Chen Guan. Design and realization of the intelligent design system for tunnel blasting in mine based on database[J]. Geofluids,2020(1):8878783.

[16] 杨仁树,鲍舟琦,王雁冰,等.数码电子雷管在高瓦斯矿井岩巷爆破掘进中的应用[J].金属矿山,2022(7):27-34.
Yang Renshu, Bao Zhouqi, Wang Yanbing, et al. Application of digital electronic detonator in blasting excavation of rock roadway in high gas mine[J].Metal Mine, 2022(7):27-34.

[17] 关开荣,赵文琦.智能机器人在深井爆破中的应用及发展趋势[J].矿业研究与开发,2024,44(12):228-235.
Guan Kairong, Zhao Wenqi. Applications and development trends of intelligent robots in deep well blasting[J]. Mining Research and Development,2024,44(12):228-235.

[18] 李萍丰,张金链,徐振洋,等.智能无线远距离起爆系统在露天矿山爆破的应用分析[J].金属矿山,2022(4):72-78.
Li Pingfeng, Zhang Jinlian, Xu Zhenyang, et al. Application of intelligent wireless remote initiation system in open-pit mine blasting[J]. Metal Mine,2022(4):72-78.

[19] 李萍丰,范廷翔,许献磊,等.露天矿山智能爆破关键技术及应用[J].工程爆破,2024,30(5):171-182.
Li Pingfeng, Fan Tingxiang, Xu Xianlei, et al. Key technologies and engineering applications of intelligent blasting in open-pit mines[J]. Engineering Blasting,2024,30(5):171-182.

[20] Bai Runcai, Zhang Pengfei, Zhang Zhiqiang, et al. Optimization of blasting parameters and prediction of vibration effects in open pit mines based on deep neural networks[J]. Alexandria Engineering Journal, 2023, 70: 261-271.

[21] Rabbani Ahsan, Kumar Divesh Ranjan, Fissha Yewuhalashet, et al. Optimization of an artificial neural network using four novel metaheuristic algorithms for the prediction of rock fragmentation in mine blasting[J]. Journal of the Institution of Engineers (India), 2025, 106: 1261-1280.

[22] Liu Xiaobo, Yang Hangyuan, Jing Hongdi, et al. Research on intelligent risk early warning of open-pit blasting site based on deep learning [J]. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects,2021,47(1):6355-6371.

[23] 杨军,李立杰,刘红岩,等.露天台阶爆破设计智能化的探索[J].工程爆破,2024,30(5):183-192.
Yang Jun, Li Lijie, Liu Hongyan, et al. Exploration for intelligent bench blasting design in open-pit mine [J]. Engineering Blasting,2024,30(5):183-192.

[24] 董海佩,程贵海,牛虎,等.基于事故树分析法的控制爆破危害影响研究[J].爆破,2018,35(2):151-154+176.
Dong Haipei, Cheng Guihai, Niu Hu, et al. Research on hazard of controlled blasting based on fault tree analysis[J]. Blasting,2018,35(2):151-154+176.