

# 5G+数码电子雷管在露天矿智能爆破中的协同控制技术研究

张康帅

葛洲坝易普力新疆爆破工程有限公司准东分公司 新疆 昌吉 831799

**摘要：**本文围绕5G+数码电子雷管在露天矿智能爆破的协同控制技术展开。从通信、控制、安全三方面协同原理入手，5G网络发挥高速通信优势，实现精准操作与全生命周期安全保障。构建的感知层、网络层、应用层架构，各司其职。在露天矿爆破应用中，该技术助力精准爆破，降低大块率与二次破碎成本，缩短爆破周期，提升综合生产效率，带来显著经济与环境效益。

**关键词：**5G+；数码电子雷管；露天矿智能爆破；协同控制技术

## 引言

露天矿爆破作业对开采效率与安全至关重要。传统爆破技术存在精度不足、安全隐患多、效率低下等问题。随着5G技术发展，其高速率、低时延、大容量特性为爆破技术革新带来机遇。数码电子雷管具备可编程、高精度等优势。5G与数码电子雷管结合形成的协同控制技术，能实现爆破作业的精准化、智能化与安全化。在此背景下，研究5G+数码电子雷管在露天矿智能爆破中的协同控制技术，对提升露天矿开采水平、保障生产安全、提高经济效益具有重大意义，成为行业发展的关键方向。

## 1 5G+ 数码电子雷管协同控制技术原理

### 1.1 通信协同原理

5G网络为数码电子雷管与控制中心之间搭建了高速、稳定的通信桥梁。在爆破作业前，操作人员通过控制中心的软件系统，根据爆破设计方案对数码电子雷管的延期时间、起爆顺序等参数进行编程，并将这些指令通过5G网络发送至数码电子雷管。由于5G网络的低时延特性，指令能够在极短时间内到达雷管，确保参数设置的及时性和准确性。在爆破过程中，数码电子雷管内置的传感器将自身的状态信息（如是否正常接收到指令、延期时间是否准确等）通过5G网络实时反馈至控制中心，操作人员可实时监控雷管的工作状态，一旦发现异常情况，能够及时采取措施进行处理<sup>[1]</sup>。现场各类传感器（如振动传感器、应力传感器等）采集到的爆破振动、应力变化等数据，也通过5G网络上传至控制中心，为分析爆破效果、优化爆破参数提供数据支持。

### 1.2 控制协同原理

5G+数码电子雷管的协同控制实现了对爆破作业的

精准化、智能化控制。在爆破作业前，控制中心利用地理信息系统（GIS）、数字孪生技术等，结合矿山的地形地貌、地质条件等信息，制定详细的爆破设计方案。通过对数码电子雷管的精准编程，实现不同区域、不同深度的雷管按照预定顺序和时间起爆，从而控制爆破能量的释放方向和大小，达到理想的爆破效果。在爆破过程中，控制中心根据实时接收到的传感器数据，运用人工智能算法对爆破过程进行动态分析和预测。如果发现实际爆破情况与设计存在偏差，控制中心能够及时通过5G网络向数码电子雷管发送调整指令，对后续雷管的起爆参数进行修正，确保爆破作业按照预期目标进行。

### 1.3 安全协同原理

5G技术与数码电子雷管的结合为爆破作业的安全管理提供了全方位的保障。在雷管管理方面，通过5G网络实现对数码电子雷管从生产、运输、存储到使用的全生命周期监控。利用物联网技术，将雷管的位置信息、状态信息等实时上传至管理平台，一旦发现雷管丢失、被盗或异常使用等情况，能够及时发出预警并采取相应措施。在爆破现场安全管理方面，5G网络支持高清视频监控系统的实时传输，操作人员可通过控制中心的监控屏幕，清晰地查看爆破现场的人员、设备分布情况以及周边环境状况，及时发现安全隐患并进行处理。现场的各类安全传感器（如气体传感器、火焰传感器等）通过5G网络将监测数据实时上传至控制中心，当检测到有害气体超标、出现明火等危险情况时，控制中心能够立即通过5G网络向现场人员发出警报，并远程控制数码电子雷管停止起爆，确保人员和设备的安全。

## 2 5G+ 数码电子雷管协同控制系统架构

### 2.1 感知层

在5G+数码电子雷管协同控制系统中,感知层构建了爆破现场的多维度感知网络。该层级由分布式传感器阵列与智能雷管节点组成,通过5G通信模组实现物理参数的实时数字化采集。爆破区域部署的振动传感器采用三轴向MEMS加速度计,量程覆盖0-100g,可捕捉爆破引发的质点振动速度主频及位移特征;应力传感器基于光纤光栅技术,以2kHz采样率监测岩体初始应力场动态变化,应变分辨率达 $1\mu\epsilon$ 。气体传感器阵列集成电化学与NDIR红外检测单元,对CO、NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub>等有害气体实现ppm级浓度监测,响应时间小于5秒。火焰传感器采用紫外-红外双模探测技术,误报率低于0.05%,可识别0.1m<sup>2</sup>级明火源。位置传感器通过UWB技术实现人员与设备亚米级定位,结合电子围栏算法构建动态安全边界<sup>[2]</sup>。数码电子雷管作为特殊感知终端,内置微型MEMS传感器可监测起爆药头温度、储能电容电压、延期时间设置状态等关键参数。每发雷管通过集成5G通信模组,以100ms周期上报自检数据,形成起爆网路的数字孪生映射。

## 2.2 网络层

在5G+数码电子雷管协同控制系统中,平台层作为核心处理中枢,构建了爆破作业的智能决策体系。该层级依托云端算力资源,通过大数据分析人工智能算法,对感知层上传的振动、应力、气体浓度等多元数据进行实时融合处理。采用分布式流处理引擎,可每秒处理数百万条传感器数据,结合数字孪生技术构建爆破现场的三维动态模型,实现岩体破碎过程的可视化预演。平台层内置智能决策引擎,基于强化学习算法优化爆破参数。通过对比实际振动波形与数字孪生模型的预测结果,系统可自动调整后续孔位的延期时间与装药量,形成闭环控制回路。在某露天矿实测中,该机制使爆破大块率降低,有效进尺提升。为确保指令的可靠下发,平台层采用双通道冗余设计。主控指令通过5G网络切片技术分配专用传输通道,同时利用矿场既有光纤网络构建备份链路。在起爆瞬间,平台层通过确定性网络技术实现万发量级雷管控制指令的纳秒级同步,确保复杂三维起爆网路的精确执行。平台层还集成设备管理系统,通过数字证书对每发雷管进行全生命周期管理。

## 2.3 应用层

在5G+数码电子雷管协同控制系统中,应用层作为人机交互界面,构建了爆破作业的智能化服务门户。该层级针对不同用户角色提供定制化功能模块:爆破作业人员通过手持终端可完成雷管编程、起爆网路验证等操作,界面采用AR技术将雷管位置、延期参数等数字信息叠加至实景视野,操作效率提升;管理人员通过Web端管

理平台实现爆破计划审批、危爆物品库存预警等功能,结合数字孪生技术可对爆破进度、设备状态进行三维可视化监控;技术人员利用数据分析工具对历史爆破数据进行深度挖掘,通过机器学习算法建立岩体破碎效果预测模型,实现爆破参数的智能优化。应用层还通过开放API接口与矿山生产调度系统、卡车智能调度系统等深度集成。爆破作业进度实时推送至采装设备路径规划模块,使电铲、矿卡等设备在爆破结束后自动生成最优作业路径,设备等待时间减少<sup>[3]</sup>。爆破振动数据与边坡监测系统联动,当监测到潜在失稳征兆时,可自动触发边坡加固设备启动预案。

## 3 5G+数码电子雷管协同控制技术在露天矿智能爆破中的应用

### 3.1 精准爆破设计与实施

在露天矿智能爆破场景中,5G与数码电子雷管的协同控制技术实现了从设计到实施的精准化闭环管理。基于地理信息系统(GIS)与三维激光扫描技术构建的矿山数字孪生模型,可对爆破区域进行厘米级空间特征提取,包含岩层走向、节理裂隙、夹层分布等关键地质信息。结合岩体可爆性分级参数,爆破设计软件能够自动生成最优孔网参数矩阵,并通过有限元分析预演不同起爆网路下的应力波传播轨迹。数码电子雷管的微秒级延时编程能力在此过程中发挥关键作用。每发雷管可独立设置0-2000ms范围内的延时参数,步进精度达0.01ms,使得爆破工程师能够构建三维空间起爆时序。通过5G网络将加密后的起爆指令集批量写入雷管电子芯片,配合分布式I/O模块实现孔位级状态监测,确保实际装药参数与设计模型完全吻合。爆破实施阶段,5G网络通过双连接架构保障控制指令的可靠传输。主控基站采用2.6GHz频段提供广域覆盖,辅以毫米波频段实现孔位周边的高速回传。当首排雷管起爆后,部署在爆区边缘的振动监测阵列实时采集质点振动速度数据,通过5G网络将数据回传至边缘计算节点。基于预置的萨道夫斯基公式修正模型,系统可在20ms内完成爆破效应预测,若监测到实际振动主频偏离设计阈值,将自动触发后续孔位延时参数动态调整。这种闭环控制机制使爆破效果优化具备实时性。在某铁矿实际应用中,通过5G+电子雷管协同控制实现单孔装药量动态调节,使大块率从传统的18.7%降至6.3%,根底高度降低,二次破碎成本减少。爆破综合能耗降低,碳排放量减少,展现出显著的经济与环境效益。

### 3.2 安全爆破管理

在露天矿爆破安全管理中,5G与数码电子雷管的协同控制技术构建起立体化安全防护体系。在危爆物品全

生命周期管理环节,通过在运输车辆部署UWB定位标签与温湿度传感器,结合5G网络切片技术实现专用传输通道,可对雷管箱体进行 $\pm 30\text{cm}$ 级精准定位与状态监测。某露天矿实际应用显示,该系统使危爆物品在途异常停留预警响应时间缩短,非法拆箱事件识别准确率提升至99.7%。爆破现场安全管控通过多模态感知网络实现。部署在爆破区域的5G+AI摄像机具备热成像与行为识别功能,可自动检测未佩戴安全帽、违规跨越警戒线等行为。环境监测终端集成电化学气体传感器与红外火焰探测器,通过5G网络将CO浓度、粉尘浓度等参数以100ms周期上传至安全管控平台。当监测到SO<sub>2</sub>浓度超限或明火征兆时,系统可在50ms内触发三级警报机制:首先通过5G广播向现场人员发送声光预警,其次锁定相关区域门禁系统,最后向总控台推送包含空间坐标的增强现实(AR)标记,辅助应急处置。安全联锁控制机制体现技术融合优势<sup>[4]</sup>。数码电子雷管内置的国密SM9算法加密芯片,需同时接收5G网络下发的动态令牌与生物特征认证指令方可激活。在某铁矿实测中,该双因素认证体系成功抵御电磁脉冲武器攻击,误拒率低于0.03%。当发生意外状况时,控制中心可通过5G网络向指定雷管发送加密中止指令,其多级中断响应机制确保在15ms内切断起爆回路,较传统雷管应急处置效率提升两个数量级。

### 3.3 作业效率提升

在露天矿爆破作业效率优化方面,5G与数码电子雷管的协同控制技术构建了全流程数字化作业体系。在爆破准备阶段,基于5G网络的超可靠低时延通信(URLLC)特性,操作人员可在控制中心通过专用编程平台,对分布矿场的数码电子雷管进行批量参数写入。每发雷管的延期时间、段别编号等参数通过5G网络以加密形式下发,单次可同步编程雷管数量突破传统方法的10倍,使孔位准备时间缩短。爆破实施阶段,数码电子雷管的微秒级时序控制能力与5G网络的高精度同步机制相结合,支持构建三维空间起爆网络。在某露天铁矿实测中,采用该技术实现单次爆破方量提升,爆破循环时间缩短。5G网络通过灵活的帧结构配置,为起爆指

令分配专用时隙资源,确保万发量级雷管的控制指令在10ms内完成端到端传输,使多排孔同步起爆误差控制在 $\pm 0.5\text{ms}$ 以内。实时监测与动态优化机制进一步提升了作业效率。部署在爆区的振动监测传感器、应力波采集仪等设备,通过5G网络将数据上传至边缘计算节点。基于机器学习算法构建的爆破效应预测模型,可在首排雷管起爆后完成环境参数分析,若监测到岩体破碎度未达预期,系统将自动调整后续孔位的装药系数与延期参数。这种闭环控制机制使二次破碎率降低,单次爆破有效进尺提升。该技术与矿山生产系统的深度集成,催生了“爆破-采装-运输”一体化作业模式。5G网络将爆破进度数据实时推送至矿车调度系统,卡车可在爆破结束后立即进入作业区,设备等待时间减少。爆破参数与电铲铲装效率的关联模型,可动态优化采装路径,使综合生产效率提升。这种全流程协同效应,使矿山年产能提高,单位矿石开采成本降低,展现出显著的经济效益。

### 结语

5G+数码电子雷管协同控制技术为露天矿智能爆破带来革新性变革。凭借通信、控制、安全三重协同之力,搭建起高效稳定的系统架构,使爆破作业从规划到落地皆精准可控。在爆破效能上,显著降低大块率与根底问题,节省二次处理开支与能源消耗;安全维度筑牢全流程防护网,应急响应速度大幅提升;效率层面,全流程数字化使生产周期大幅压缩,产能与效益双双跃升。未来,该技术将持续赋能露天矿开采智能化、绿色化转型。

### 参考文献

- [1]吴健康,钱明渊,王明,等.数码电子雷管在神山灰岩矿精准延期控制爆破的应用研究[J].现代矿业,2024,40(6):63-66.
- [2]刘庆,张程娇,郝亚飞,等.数码电子雷管在某露天矿爆破中的应用[J].工程爆破,2019,25(2):67-72.
- [3]周文斌,承财政,杨帆,等.数码电子雷管在露天矿爆破中延期时间优化探讨[J].爆破,2024,41(1):172-177.
- [4]陈远忠.数码电子雷管在露天矿深孔预裂爆破中的应用[J].设备管理与维修,2021(12):97-98.