

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2022.03.024

全方位实时可视爆破安全警戒 监控搜索系统应用研究^{*}

罗 鹏^{1,2,3}, 谢先启^{2,3}, 陈德志^{2,3}, 陈 晨⁴, 周祥磊⁴, 孙金山², 王 威^{2,3}

(1. 武汉科技大学 理学院, 武汉 430065; 2. 江汉大学 精细爆破国家重点实验室, 武汉 430056;
3. 武汉爆破有限公司, 武汉 430056; 4. 中钢集团 武汉安全环保研究院有限公司, 武汉 430081)

摘 要: 金婺大桥位于浙江金华, 是横跨三区的重要交通枢纽, 爆破工作量大, 周边环境复杂。为保障3天2夜爆破作业期间爆炸物品安全及高效可靠地在清晨低能见度情况下完成大范围爆破安全警戒疏散工作, 首次结合AR(增强现实 Augmented Reality)实景监控、无人机、红外热成像仪三者各自优势, 将高空球机设置在制高点覆盖整个爆破警戒范围, 球机设置在路口动态监控各路口情况, 枪机固定监控装药部位, 无人机机动地巡视, 红外热成像仪搜索隐蔽部位, 连同社会探头视频信号一起全部传输至AR后台。经智能化信息处理后, 将所有重要信息直观展示在全局监控画面中, 构建以AR实景监控为主, 无人机机动监控为辅, 红外热成像仪搜索补充的纵览全局和掌控细节的全方位立体实时可视爆破安全警戒监控搜索系统, 配合常规方法实施爆破安全警戒。该系统实时在线60 h, 监控范围373 140 m², 发现非法闯入事件18起, 协助爆破安全警戒工作在1 h内完成, 圆满完成爆破安全警戒工作。该系统的构建以及成功地应用于复杂环境下的城市拆除爆破安全警戒疏散工作中, 解决了爆炸物品昼夜安全存放问题, 解决了低能见度复杂环境下人员疏散工作的问题。

关键词: 城市拆除爆破; 爆破安全警戒; 监控搜索系统; AR实景监控; 无人机; 红外热成像仪

中图分类号: TD235; X924.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2022)03-0158-07

Research on Application of All-round Real-time Visual Blasting Safety Warning Monitoring and Search System

LUO Peng^{1,2,3}, XIE Xian-qi^{2,3}, CHEN De-zhi^{2,3}, CHEN Chen⁴,
ZHOU Xiang-lei⁴, SUN Jin-shan², WANG Wei^{2,3}

(1. College of Science, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China;
2. State Key Laboratory of Precision Blasting, Jiangnan University, Wuhan 430056, China;
3. Wuhan Explosions & Blasting Co., Ltd., Wuhan 430056, China; 4. SINOSTEEL Wuhan
Safety & Environmental Protect Research Institute Co., LTD., Wuhan 430081, China)

Abstract: Jinwu Bridge is located in Jinhua, Zhejiang Province, which is an important transportation hub spanning three districts with large blasting workload and complex surrounding environment. In order to guarantee the safety of explosives during the 3-day and 2-night blasting operation and to complete the large-scale blasting security warning and evacuation work efficiently and reliably in the early morning with low visibility, for the first time, we combined the respective advantages of real-view monitoring by AR (Augmented Reality), drone and infrared thermal imager. Spherical cameras were set at a commanding height and the crossing of roads to cover the whole blasting security warning range. Gun cameras were fixed to monitor the charging operations. The drone maneuvered around and the infrared thermal imager searched hidden parts. All the signals together with the social probe video signals were transmitted to the AR back end. After intelligent signal processing, all important information could be displayed visu-

ally in the global monitoring screen to build a comprehensive three-dimensional real-time visual blasting security warning monitoring and search system with AR live-view monitoring as the main method. In the monitoring system, UAV mobile monitoring and infrared thermal imager search were used as the supplement measures to scan the overall situation and control the details. Blasting security warning could be conducted by this novel system together with conventional methods. The system was online for 60 hours with 373,140 m² covered and 18 illegal intrusions reported. The task of blasting security warning was successfully completed within one hour by the assistance of the monitoring system. The construction of the system and its successful application in urban demolition solved the problem of safe storage of explosives around the clock and the problem of evacuation work of personnel in complex environment with low visibility.

Key words: city demolition blasting; blasting security warning; monitoring and searching system; AR real scene monitoring; UAV; infrared thermal imager

爆破安全警戒是城市控制爆破工程中的重要一环,装药爆破前控制各警戒点,疏散警戒范围内的人员,确保警戒范围内无人员滞留,直至爆破结束解除警戒。通常警戒疏散工作是依靠人力对警戒范围进行排查,该方法适用于爆区环境简单、人员稀少的情况。若爆破警戒范围地形复杂、障碍物多或光线昏暗、天气恶劣时,存在警戒盲点,造成疏散困难、遗漏等情况,且需耗费大量人力及时间,存在重大安全隐患。

金婺大桥东西向横跨武义江,是连接开发区、婺城区、金东区交通要道。警戒距离为倾倒方向不小于350 m,两侧及后方不小于200 m,实际警戒范围约373 140 m²。爆破规模大,涉及区域多、范围广,爆区周边人员多、路口交错车流大,建筑群密集、环境复杂,且该桥对金华发展历史意义重大,爆区周边多滨江公园,观看爆破视角佳,容易吸引大量人员聚集围观,爆破安全问题引起金华市高度重视。爆破作业分3天2夜完成,于第3日06点45分起爆。本工程装药警戒时间长,警戒疏散时间段视线昏暗、范围大,针对工程实际,结合AR(增强现实 Augmented Reality)实景监控、无人机、红外热成像仪,建立了一种全方位实时可视爆破安全警戒监控搜索系统来保障爆破警戒疏散工作的顺利进行。

1 城市控制爆破安全警戒

1.1 城市控制爆破安全警戒流程

爆破安全警戒是城市控制爆破中的重要一环,通常要成立爆破指挥部,全面指挥和统筹安排爆破工程的各项工作,流程分为7步:

(1)根据爆破规模、环境复杂程度、爆破有害效应范围确定装药警戒范围,爆破警戒范围,警戒点位置、数量。

(2)根据各警戒的重要程度、工作量分配警戒人数。

(3)警戒、疏散人员至少提前1天熟悉警戒点、疏散范围。

(4)爆破前,按规定发布爆破公告并设置警戒线、警示牌等。

(5)警戒人员按时按点上岗,开展警戒工作并封闭交通,禁止无关人员进入。

(6)疏散人员按疏散范围进行人员疏散,完成后向指挥部汇报疏散情况,并撤离至指定安全区域。

(7)爆破完成经检查确认无误后,警戒人员按警戒解除命令撤离、恢复交通,完成爆破安全警戒工作。

1.2 金婺大桥爆破安全警戒问题与需求

爆破作业3天2夜,秋冬季节清晨06点45分起爆,带来两个问题。其一,爆炸物品现场停留时间长,如何保证安全,尤其是夜间安全;其二,爆破警戒范围内地形复杂,公园内凉亭、卫生间、地下通道众多,沿江树密草深,如何在凌晨视野不明情况下,全面、有序、高效完成爆破警戒疏散工作。为此,爆破安全警戒需要做到以下3点:

(1)警戒范围广,需要监控全覆盖,确保警戒无死角,保证指挥部真正做到全面指挥。

(2)爆破位于交通枢纽,指挥部需要调动社会联网监控画面,扩大管控范围,防患于未然。

(3)消除夜间视线不明影响,确保人员疏散高效、无死角、不遗漏。

1.3 常规城市控制爆破安全警戒的局限性

(1)多数情况下,现场未安装视频监控,指挥部与各联络点沟通设备仅限于对讲机或手机,指挥不可视。

(2)少数情况下,现场安装了摄像头,指挥部能

收稿日期:2022-06-28

作者简介:罗鹏(1990-),男,工程师、博士研究生,主要从事工程爆破研究与实践工作,(E-mail)272886755@qq.com。

通讯作者:谢先启(1960-),男,中国工程院院士、教授,主要从事工程爆破理论与技术研究,(E-mail)xxqblast@163.com。

基金项目:湖北省自然科学基金重点项目(2020CFA043);湖北省重点研发计划项目(2020BCA084)

通过投影监控现场情况,但观看视角通常固定,不能调节远近,无法全方位多角度跟踪事件发展,且反馈的仅为画面信息,需要人为分析数据,并转化为判断依据,再进行处理,全局把控能力低,智能程度低。

(3)无法利用已联网的社会监控探头。

(4)由于人眼视力局限,会产生防控死角,无法保证警戒范围绝对控制。

(5)夜间装药范围值班人员可能因自身或外界因素发生离岗或疏于职守情况,造成事故难以调查。

(6)由于光线昏暗、天气、障碍物等造成的视野不明,阻碍人员疏散工作的正常进行,不利于警戒范围彻底清场。

(7)下达起爆命令时,由于监控、通讯设备的限制,若发生非法闯入警戒范围等紧急状况,无法第一

时间收到现场反馈,可能会造成事故,时效性差。

2 安全监控搜索系统搭建

普通视频监控与无人机运用到工程爆破中已屡见不鲜^[1-4],但均不足以满足金婺大桥爆破安全警戒需求。为了解决实际困难,用高空球机覆盖整个爆破警戒范围,球机布置在路口,枪机固定拍摄装药部位,无人机机动巡视,连同社会探头视频信号一起传输至AR后台。所有重要信息都能在全局监控画面直观展示,加上红外热成像仪隐蔽部位搜索,形成以AR实景监控为主,无人机机动监控为辅,红外热成像仪隐蔽搜索补充的纵览全局和掌控细节的全方位立体实时可视监控搜索系统,配合常规爆破安全警戒,保证绝对安全,如图1所示。

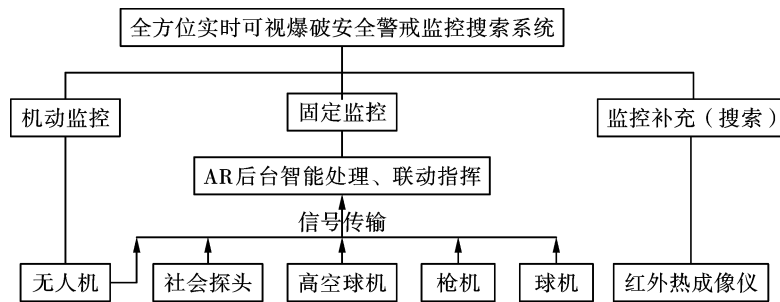


图1 全方位立体实时可视爆破安全警戒监控搜索系统构成

Fig. 1 The construction of omnidirectional stereoscopic real-time visualization blasting safety warning monitoring and searching system

2.1 AR实景监控

普通摄像机拍摄的影像,通过屏幕传达的画面,反映的仅仅是一帧一帧画面组成的“客观现实”,无任何附加性信息。AR技术将数字化的标签信息添加到实时视频的现实目标对象中,使安保人员在观看实时画面时能同步获得目标对象的相关信息,在“现实”的基础上进行“增强”,既“看得清”又“看得懂”。达到这种增强最行之有效的办法就是将名称、经纬度、方位角、距离、位置、历史案例描述、联系方式等信息标签化,添加到摄像机呈现的实时监控画面中^[5],如图2所示。捕捉到的现实中的异常和突发状况能在第一时间反映到屏幕画面中,极大地帮助屏目前的安保人员做出相应的处置。

在目标区域制高点与关键点安装摄像机,画面集中输送到指挥部同一大屏监控系统。通过高点摄像机的鸟瞰视角掌握监控区域整体情况,将高点视频内建筑物、街道、人、车等信息以点、线、面地图图层的方式,自动叠加在基于高点视频的“实景地图”上。通过调用低点摄像机,以画中画方式从不同角度查看监控区域细节,做到可查询、可搜索、可定位、

可描述、可报警、可联动,以直观便捷的视频实景图应对各种潜在治安防控问题,统一融合联动指挥爆破安保工作各环节,实现高低联动的立体实时可视指挥调度,大大改善监控体验、指挥效率^[6],如图2所示。通过管理员手动添加工作人员信息(姓名、身份证号、面部信息)、车辆信息(牌照)及警戒范围坐标信息,将实拍信息与后台信息对比管控警戒区域,发现非法闯入,发出警报,显示目标坐标信息。确保突发事件第一时间发现,第一时间处理,把突发事件压制在萌芽状态。记录的高清影像不仅可为突发事件倒查留下证据,而且有利于多点、多角度分析爆破过程,进行爆破总结。

2.2 无人机

无人机安防实行“空间安防”理念,弥补了平面安防体系的空白,通过空中的侦查、预警、响应等一系列措施来调动地面安防资源予以配合响应,形成立体化的监控防御体系^[7]。无人机在空中不受地域限制,快速高效、质轻灵活、操作简便、获取影像的时空精度高,可以大范围监控地面情况,同时能快速到达人员不容易涉及的地方,降低了人员风险^[8]。

运用在爆破安全警戒中,完成以下任务:

(1)俯瞰巡视警戒范围,补充监控系统。出现突发事件,可迅速到达目的地,对某个区域或者某个人进行追踪录像^[9]。

(2)沿爆破警戒范围低空飞行进行人员疏散,携带小型扩音器,呼吁围观群众远离爆区,有利于缩短爆破警戒时间,减少警戒、疏散人员工作量。

(3)爆破后可迅速飞抵保护对象,辅助检查安全情况。

(4)根据爆破技术人员需要,从专业角度记录爆破过程,为爆破工作总结提供高清视频支持。



图2 全方位立体实时可视指挥界面
Fig. 2 Ominidirectional stereo real-time visual command interface

2.3 红外热成像仪

红外热成像技术在安防方面的应用包括防盗监控、伪装及隐蔽目标识别,夜间及恶劣气候条件下的治安巡逻,重点部门、建筑、仓库的安保工作,防火监控,路上和港通安全保障等领域^[10]。传统的安防监控多为可见光监控,在极端条件下(雨雪雾天气,烟雾环境,无光黑夜,高反差、逆光条件,树林草丛中)监控效果差。将红外热成像仪投入到爆破安保工作中辅助人员疏散工作,主要优势如下:

(1)红外热成像仪适用于各种恶劣天气条件,不受光线影响,与气候条件无关,无论白天黑夜均可以正常工作,克服雨、雪、雾的能力较强,适用于任何条件的爆破安全警戒工作。

(2)红外热成像仪被动接受目标自身的热辐射,对于躲避在树木、草丛、墙壁等隐蔽处,不易被肉眼观察到的热目标识别度高,确保人员疏散无死角、不遗漏。

(3)红外热成像仪的识别时间短、探测能力强、作用距离远,人员疏散时采用大面积扫视目标区域,短时间便可完成人员疏散工作。

可见光监控在视频监控领域起着重要作用,但恶劣天气、昼夜交替、人为伪装等极端情况,在一定

程度上限制了可见光监控设备的正常发挥,而红外热成像监控设备完美的补充了可见光监控的局限性,适合高安全级别区域的入侵防范,是视频信息中对可见光图像的重要补充手段,运用在人员疏散中,针对躲避在警戒范围内掩体中,未被监控探头发现的人员。

3 监控搜索系统实施效果

爆破安全警戒一般分为装药警戒、爆破警戒、人员疏散,目的是保证爆破作业期间人员及爆炸物品的安全。结合AR实景监控、无人机、红外热成像仪三种技术手段,在金婺大桥爆破安全警戒这项特殊的安防工作中发挥各自优势,形成全方位立体实时可视监控搜索系统,配合常规爆破安全警戒。

3.1 警戒前准备

(1)设立现场指挥部,投入大屏监控系统、无线电通讯系统、无人机等。

(2)在金婺大桥两岸高耸建筑物设置超清高空球机4套,如图3所示。爆破点及各进出口按需设置球机与枪机16套,连同周边交管部门的交通监控信号,一起连接至指挥部,建立AR实景指挥系统,实现爆破警戒范围全覆盖,如图4所示。



图3 东西两侧高空球机监控画面
Fig. 3 Monitoring screen of high-altitude spherical camera on the east and west sides



图4 指挥部AR实景指挥系统
Fig. 4 AR real scene command system in command post

(3)在主桥东西两侧连接处摆放水码,设置单一通道,实行实名登记制度,供爆破作业人员进出。

(4)将所有工作人员身份信息录入后台处理

器,此外,爆破作业人员及爆破监理由公安机关统一发放防伪工作证,作为进入装药警戒范围出入证。

(5)在各重点区域无围墙处设置硬隔离,避免群众进入封控区域,保证现场爆破工程的正常进行。

(6)装药前1天张贴爆破公告,送温馨提示上门,对临近建筑物录像拍照存档,并由指挥部组织爆破警戒与人员疏散演练。

3.2 装药警戒

装药警戒范围为金婺大桥主桥两侧连接处以内范围,如图5所示。自爆炸物品进入现场,直至爆破警戒开始,实行三班倒不间断装药警戒,警戒人员穿制服,配备对讲机(带耳机)。装药现场由内至外设置三层警戒,第一层为爆破作业人员,4个装药点各2人,共8人;第二层为保安,主桥两侧连接处及桥墩外围各4人,共12人;第三层为公安民警,桥两侧

工地大门口各2人,共4人,配备巡逻警车2辆。指挥部由监视人员将所有摄像头调整位置,重点监控装药点、装药警戒范围入口及相关路口。现场三层警戒与指挥部监控同步进行、紧密结合,24小时全天候监控警戒,控制进入装药点的道路、隐蔽入口及易翻越区域,确保爆炸物品安全。同时,安全员可通过监控画面监督现场装药、联网工作是否按照《爆破安全规程》严格执行。

3.3 爆破警戒

爆破警戒范围根据爆破规模、周边环境、爆破有害效应范围,根据警戒范围设计要求,按实际地形划分,共设置3个交通管制点,19个警戒点,警戒点设置在路口、出入口位置,相邻警戒点间要求通视,警戒范围及警戒点位置如图5所示。

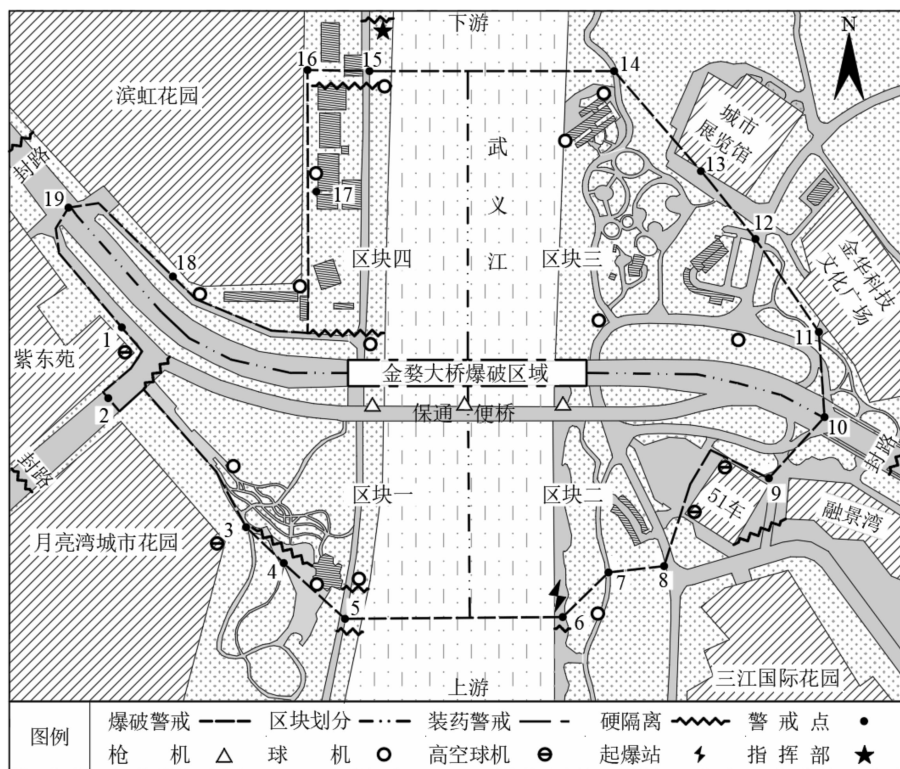


图5 金婺大桥安全警戒布置

Fig. 5 Security warning arrangement of Jinwu Bridge

警戒人员穿制服,按警戒点配备对讲机(带耳机),提前10 min到达各警戒点,清点人数后上报指挥部,指挥部确认后下达警戒命令。接到警戒命令后,禁止任何人员(除疏散人员)进入警戒范围,直至解除警戒。开始警戒后,投入2架无人机,由指挥部起飞至东西两侧警戒范围上空实时巡航,俯瞰警戒区域,将现场的图像传送至指挥部监控大屏,配合AR监控系统,辅助爆破警戒,如图6所示。

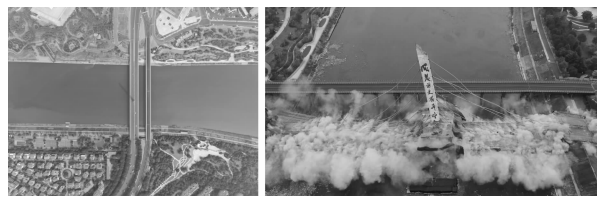


图6 无人机监控画面

Fig. 6 Monitoring screen of UAV

3.4 人员疏散

将爆破警戒范围划分为4个疏散区块,执行属地管理、分片包干责任制,如图2所示。各区块人员疏散前15min投入2架无人机,由指挥部起飞至东西两侧警戒区域,低空慢速飞行,来回清扫警戒范围,通过配备的喊话系统预先劝离晨练、摄影、观摩等无关人员。

疏散人员穿制服,配备对讲机(带耳机),提前10min到达集合地点(2、8、10、19警戒点),清点人数后上报指挥部,指挥部确认后下达疏散命令。接到疏散命令后,区块一、二、三、四疏散组分别向2、8、10、19警戒点报备进入人数,再按设计疏散路线展开疏散工作,装药警戒范围由爆破技术人员疏散。保安及街道工作人员配备手电沿途照射查看,并用扬声器进行喊话。民警持红外热成像仪垫后,对搜查过的地方进行二次搜查,特别是公园凉亭、卫生间、地下通道、沿江树林草丛、引桥桥洞等处易隐蔽处,如图7所示。发现无关人员,立即派专人负责带离警戒范围,清场结束后,疏散人员原路返回至报备警戒点,组长清点人数并上报报备警戒点与指挥部。疏散组民警配合警戒点警戒,保安沿安全封控背向大桥方向站立,配合控制警戒范围,街道工作人员于警戒范围外集中待命,直至警戒解除。



图7 红外热成像仪搜索

Fig. 7 Infrared Thermal Imager Search

4 结语

(1)装药警戒过程中,发现因好奇施工、借道通行,意图进入装药区域事件共16起,均在警戒范围外第一时间处理完成;爆破警戒、人员疏散1小时内完成,发现地下通道流浪者1人,随队撤离;起爆前10min,发现1人钻过围挡,攀爬上保通便桥,民警及时控制,未影响爆破。

(2)首次在爆破施工中,将AR实景监控、无人机、红外热成像仪相结合,形成全局实时可视监控搜索系统,实现了指挥部全局立体实时可视指挥,解决了爆炸物品昼夜安全存放问题,解决了低能见度复杂环境下人员疏散工作的问题,安全、智能、全面、有序地辅助完成了安全警戒工作,对重大城市爆破工

程安全警戒有积极引导意义和实际借鉴作用。

(3)高清摄像机从整体到局部,完整、有效、真实、多方位的记录爆破过程。慢放镜头回放,重现爆破过程,为分析多爆点复杂高难度爆破工程倒塌模式提供了强有力的影像支撑,对类似爆破工程方案选择与爆破参数选取有指导意义。

参考文献 (References)

- [1] 曲广建,朱振海,汪旭光,等. 远程视频监控技术研究及在工程爆破中的应用[J]. 工程爆破,2012,18(3): 81-84.
- [1] QU Guang-jian, ZHU Zhen-hai, WANG Xu-guang, et al. Remote video surveillance technology research and application in engineering blasting[J]. Engineering Blasting, 2012, 18(3): 81-84. (in Chinese)
- [2] 蒙云琪,吴剑锋,张兆龙,等. 爆破工程现场监理视频监控系统的應用[J]. 爆破,2017,34(2): 148-151.
- [2] MENG Yun-qi, WU Jian-feng, ZHANG Zhao-long, et al. Application of video monitoring system in blasting engineering field[J]. Blasting, 2017, 34(2): 148-151. (in Chinese)
- [3] 谢先启,刘昌邦,贾永胜,等. 三维重建技术在拆除爆破中的应用[J]. 爆破,2017,34(4): 96-99, 119.
- [3] XIE Xian-qi, LIU Chang-bang, JIA Yong-sheng, et al. Application of three dimensional reconstruction in blasting engineering[J]. Blasting, 2017, 34(4): 96-99, 119. (in Chinese)
- [4] 陈金德. 无人机在工程爆破现场中的应用研究[J]. 上海电气技术,2017,10(3): 25-29.
- [4] CHEN Jin-de. Application and research of unmanned aerial vehicles in engineering blasting sites[J]. Shanghai Electric Technology, 2017, 10(3): 25-29. (in Chinese)
- [5] 周迪,徐爱华. AR助力视频监控拓展新应用与新市场[J]. 中国安防,2018(8): 77-80.
- [5] ZHOU Di, XU Ai-hua. AR helps video surveillance expand into new applications and new markets[J]. China Security&Protection, 2018(8): 77-80. (in Chinese)
- [6] 樊荣. AR实景指挥现状及优势[J]. 中国安防,2019(7): 67-70.
- [6] FAN Rong. Current status and advantages of AR live command[J]. China Security&Protection, 2019(7): 67-70. (in Chinese)
- [7] 于安丽. 开启空间立体资源开发新时代—无人机技术和安防技术有机结合[J]. 中国安防,2016(9): 24-27.
- [7] YU An-li. Open a new era of space three-dimensional resource development-the organic combination of UAV technology and security technology[J]. China Security & Protection, 2016(9): 24-27. (in Chinese)

- [8] 肖 武,胡振琪,张建勇,等. 无人机遥感在矿区监测与土地复垦中的应用前景[J]. 中国矿业, 2017, 26(6):71-78.
- [8] XIAO Wu, HU Zhen-qi, ZHANG Jian-yong, et al. The status and prospect of UAV remote sensing in mine monitoring and land reclamation[J]. China Mining Magazine, 2017, 26(6):71-78. (in Chinese)
- [9] 唐 伟,雷亚兰,张 洁,等. 无人机下变电站数据采集与监控系统的设计与实现[J]. 电子设计工程, 2019, 27(12):43-46.
- [9] TANG Wei, LEI Ya-lan, ZHANG Jie, et al. Design and implementation of data acquisition and monitoring system of the substation by UAV[J]. Electronic Design Engineering, 2019, 27(12):43-46. (in Chinese)
- [10] 张 敏,韩 芳,康 键,等. 红外热成像技术在民用领域的应用[J]. 红外, 2019, 40(6):35-43.
- [10] ZHANG Min, HAN Fang, KANG Jian, et al. Civilian application of infrared thermal imaging technology[J]. Infrared, 2019, 40(6):35-43. (in Chinese)

英文编辑:柯 波

(上接第 47 页)

- [11] 韩 亮,刘殿书,辛崇伟,等. 深孔台阶爆破近区振动信号趋势项去除方法[J]. 爆炸与冲击, 2018, 38(5):1006-12.
- [11] HAN Liang, LIU Dian-shu, XIN Chong-wei, et al. Removal method of vibration signal trend term in the near area of deep hole bench blasting[J]. Explosion and Impact, 2018, 38(5):1006-12. (in Chinese)
- [12] 贾 贝,凌天龙,侯仕军,等. 变分模态分解在爆破信号趋势项去除中的应用[J]. 爆炸与冲击, 2020, 40(4):123-31.
- [12] JIA Bei, LING Tian-long, HOU Shi-jun, et al. Application of variational modal decomposition in the removal of trend term in blasting signals[J]. Explosion and Shock, 2020, 40(4):123-31. (in Chinese)
- [13] 李启月,王宏伟,王靖博,等. 基于 EEMD 和小波阈值法的爆破振动信号预处理研究[J]. 矿冶工程, 2021, 41(3):5.
- [13] LI Qiyue, WANG Hong-wei, WANG Jing-bo, et al. Research on blasting vibration signal preprocessing based on EEMD and wavelet threshold method[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021, 41(3):5. (in Chinese)
- [14] 付晓强,杨仁树,刘纪峰,等. 冻结立井爆破近区井壁振动信号基线漂移校正和消噪方法[J]. 爆炸与冲击, 2020, 40(9):13.
- [14] FU Xiao-qiang, YANG Ren-shu, LIU Ji-feng, et al. Baseline drift correction and de-noising method of wellbore vibration signal near the blasting of frozen vertical shaft[J]. Explosion and Shock, 2020, 40(9):13. (in Chinese)
- [15] MET ★, MAC ★, GS ★, et al. A complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise[C]// IEEE International Conference on Acoustics. IEEE, 2011. DOI:10.1109/icassp.2011.5947265S.
- [16] 徐 朗,蔡德所. 基于最小二乘平滑滤波与 CEEM-DAN 的光纤陀螺信号处理研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(10):269-278.
- [16] XU Lang, CAI De-suo. Research on signal processing of fiber optic gyroscope based on least squares smoothing filter and CEEMDAN[J]. Vibration and Shock, 2020, 39(10):269-278. (in Chinese)
- [17] 张雪英,谢 飞,乔铁柱,杨 洋. 基于 EEMD 与改进小波阈值的磁记忆信号降噪研究[J]. 太原理工大学学报, 2015, 46(5):592-597.
- [17] ZHANG Xue-ying, XIE Fei, QIAO Tie-zhu, Yang Yang. Research on noise reduction of magnetic memory signal based on EEMD and improved wavelet threshold[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2015, 46(5):592-597. (in Chinese)
- [18] 费鸿禄,刘 梦,曲广建,等. 基于集合经验模态分解-小波阈值方法的爆破振动信号降噪方法[J]. 爆炸与冲击, 2018, 38(1):112-8.
- [18] FEI Hong-lu, LIU Meng, QU Guang-jian, et al. Noise reduction method for blasting vibration signal based on ensemble empirical mode decomposition-wavelet threshold method[J]. Explosion and Shock, 2018, 38(1):112-8. (in Chinese)
- [19] 余发军,周凤星. 基于 EEMD 和自相关函数特性的自适应降噪方法[J]. 计算机应用研究, 2015(1):206-209.
- [19] YU Fa-jun, ZHOU Feng-xing. Adaptive noise reduction method based on EEMD and autocorrelation function characteristics[J]. Computer Application Research, 2015(1):206-209. (in Chinese)
- [20] L  OPOLD Simar, VALENTIN Zelenyuk. Improving finite sample approximation by central limit theorems for estimates from data envelopment analysis[J]. European Journal of Operational Research, 2020, 284(3): DOI: 10.1016/j.ejor.2020.01.036.

英文编辑:柯 波