



## 基于深度特征的煤矿冲击地压和煤与瓦斯突出图像感知报警方法

程继杰 刘毅

### 引用本文:

程继杰, 刘毅. 基于深度特征的煤矿冲击地压和煤与瓦斯突出图像感知报警方法[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(3): 245–257.  
CHENG Jijie, LIU Yi. Coal mine rock burst and coal and gas outburst image perception alarm method based on depth characteristics[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(3): 245–257.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1848>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 我国东北矿区冲击地压发生特征及防治现状

Characteristics and prevention and control status quo of rock burst in Northeastern Mining Area of China  
煤炭科学技术. 2021, 49(3): 49–56 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.03.005>

#### 基于改进DeeplabV3+和迁移学习的煤岩界面图像识别方法

Coal-rock interface image recognition method based on improved DeeplabV3+ and transfer learning  
煤炭科学技术. 2023, 51(S1): 429–439 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1392>

#### 基于煤样破坏声发射特征的冲击地压评价预警研究

Early-warning evaluation and warning of rock burst using acoustic emission characteristics of coal sample failure  
煤炭科学技术. 2023, 51(2): 116–129 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1720>

#### 煤与矸石图像特征分析及试验研究

Image characteristics analysis and experimental study of coal and gangue  
煤炭科学技术. 2022, 50(8): 236–246 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/f854e5d9-a0bc-415a-be8c-183bfd2c65c5>

#### 基于Transformer和自适应特征融合的矿井低照度图像亮度提升和细节增强方法

An illuminance improvement and details enhancement method on coal mine low-light images based on Transformer and adaptive feature fusion  
煤炭科学技术. 2024, 52(1): 297–310 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0112>

#### 基于声谱图和SVM的煤矿瓦斯和煤尘爆炸识别方法

Recognition method of coal mine gas and coal dust explosion based on sound spectrogram and SVM  
煤炭科学技术. 2023, 51(2): 366–376 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-2050>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息





移动扫码阅读

程继杰, 刘 毅. 基于深度特征的煤矿冲击地压和煤与瓦斯突出图像感知报警方法[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(3): 245–257.

CHENG Jijie, LIU Yi. Coal mine rock burst and coal and gas outburst image perception alarm method based on depth characteristics[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(3): 245–257.

## 基于深度特征的煤矿冲击地压和煤与瓦斯突出 图像感知报警方法

程继杰, 刘 毅

(中国矿业大学(北京)人工智能学院, 北京 100083)

**摘 要:** 冲击地压和煤与瓦斯突出容易造成煤矿重特大事故。针对目前煤矿冲击地压和煤与瓦斯突出事故发生主要靠人工发现, 结合灾害造成不同于正常工况下采掘工作面和巷道空间的颜色和深度特征, 提出了一种基于深度特征的煤矿冲击地压和煤与瓦斯突出图像感知报警方法: 在煤矿井下巷道顶板、巷帮靠近顶板以及采掘工作面液压支架顶部或靠近顶部等位置多点布置带有补光灯的彩色双目摄像机, 实时采集采掘工作面和巷道空间彩色图像和深度图像; 以煤矿井下与灾害抛出煤岩有着鲜明颜色差别的生产设备作为背景, 监测识别是否出现彩色图像颜色发生较大变化; 如果掘进巷道端头、巷道中间、巷道入口, 或回采工作面, 或进风巷道入口、巷道中间, 或回风巷道入口、巷道中间, 或主运输、辅助运输大巷等位置彩色双目摄像机监测到图像颜色发生较大变化, 则监测彩色图像平均亮度是否小于设定的亮度阈值; 如果平均亮度小于设定的亮度阈值, 则以与灾害抛出煤岩有鲜明颜色差别的生产设备为背景, 监测深度图像是否发生较大变化; 如果深度图像发生较大变化, 那么监测导致深度图像发生较大变化物体的移动速度是否大于设定的速度阈值( $v > 13$  m/s); 当移动速度大于设定速度阈值时, 利用多点布置的甲烷传感器监测监视区域内甲烷浓度, 当采煤工作面、掘进工作面、进风巷道、回风巷道、总回风巷道等多个不同地点均监测到甲烷浓度大幅升高或达到报警值, 那么进行煤与瓦斯突出报警, 反之, 则进行冲击地压报警。提出了彩色双目摄像机感知灾害最佳倾角的确定方法, 以及导致深度图像发生较大变化物体移动速度的确定方法。在确保安全性的前提下, 简化了灾害模拟试验, 设计了一套煤矿冲击地压和煤与瓦斯突出颜色和深度特征模拟试验装置: 采用与煤岩颜色和比重相近的 10 mm 橡胶球替代灾害抛出煤岩; 利用直径 315 mm PVC 管模拟煤矿井下巷道受限空间以及与抛出煤岩有着鲜明颜色差异的背景设备; 利用轴流式高压鼓风机作为动力装置, 进行模拟冲击地压和煤与瓦斯突出发生时大量煤岩抛出造成的采掘工作面 and 巷道空间颜色和深度异常特征; 利用 3.4 mm 焦距、30FPS、 $71^\circ \times 55^\circ$  视场角的彩色双目摄像机, 完成对整个灾害模拟过程的监视与彩色双目图像采集。研究分析表明, 提出的方法可识别出灾害发生时颜色和深度特征, 验证了基于深度特征的煤矿冲击地压和煤与瓦斯突出图像感知报警方法的可行性与有效性。

**关键词:** 冲击地压; 煤与瓦斯突出; 颜色特征; 深度特征; 速度特征; 图像识别

中图分类号: TD324; TD76

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2024)03-0245-13

### Coal mine rock burst and coal and gas outburst image perception alarm method based on depth characteristics

CHENG Jijie, LIU Yi

(School of Artificial Intelligence, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

收稿日期: 2023-12-05

责任编辑: 周子博

DOI: 10.12438/cst.2023-1848

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2016YFC0801800)

作者简介: 程继杰 (1992—), 男, 河北玉田人, 博士研究生。Tel: 010-62331929, E-mail: 18613361589@163.com



**Abstract:** Rock burst and coal and gas outburst are easy to cause serious accidents in coal mines. In view of the current coal mine rock burst and coal and gas outburst accidents occurring by manual discovery, combined with the color and depth characteristics of mining face and roadway space cause by the disaster that are different from normal working conditions, a coal mine rock burst and coal and gas outburst image perception alarm method based on depth characteristics is proposed. Firstly, visible light binocular cameras with supplementary light lamps are arranged at multiple points in the roof of the roadway, near the roof of the laneway's side and in or near the top of the hydraulic support of the mining face to collect real-time color and depth images of working face and roadway; Secondly, the production equipment in coal mines with distinct color differences to the coal rocks thrown out by disasters is used as the background equipment to monitor and identify whether there is a significant change in the color of the color image; Third, when the end, the middle and the entrance of the driving roadway, or the mining face, or the entrance and the middle of the air inlet roadway, or the entrance and the middle of the return air roadway, or the main transportation and auxiliary transportation roadway and other positions of the visible light binocular camera to monitor the image color changes greatly, then monitor whether the average brightness of the color image is less than the set brightness threshold; Fourthly, when the average brightness is less than the set brightness threshold, the depth image is monitored with the production equipment that has a distinct color difference from the coal rocks thrown by the disaster as the background. Fifth, when the depth image changes greatly, whether the moving speed of the object resulting in a large change in the depth image is greater than the set speed threshold ( $v > 13$  m/s) is monitored; Sixth, When the moving speed is greater than the set speed threshold, methane sensors arranged at multiple points are used to monitor the methane concentration in the monitoring area, and when the methane concentration of coal mining face, driving face, inlet roadway, return roadway, total return roadway and other different locations were detected increased significantly or reached the alarm value, then the coal and gas outburst alarm is carried out, otherwise, the rock burst alarm is carried out. A method to determine the optimum dip angle of visible light binocular camera is proposed, and a method to determine the moving speed of objects that cause great changes in depth image is proposed. On the premise of ensuring security, simplifying the disaster simulation experiment, a set of experimental equipment to simulate the color and depth characteristics of rock burst and coal and gas outburst is designed: the 10 mm rubber balls with similar color and specific gravity of coal rock is used to replace the disaster throwing coal rocks; and the 315 mmPVC tubes is used to simulate the confined space of the roadway and the background equipment with distinct color difference from the coal rock thrown from the coal mine; and the axial flow high pressure blower is used as the power device to simulate the abnormal characteristics of color and depth of mining face and roadway caused by a large number of coal and rock during the occurrence of rock burst and coal and gas outburst; and the visible binocular camera with focal length of 3.4 mm, 30FPS and field of view angle of  $71^\circ \times 55^\circ$  is used to complete the whole disaster simulation process monitoring and visible binocular image acquisition. Research and analysis show that the proposed method can identify the color and depth characteristics when the disaster occurs, and verify the feasibility and effectiveness of the image perception alarm method of rock burst and coal and gas outburst based on depth characteristics.

**Key words:** rock burst; coal and gas outburst; color characteristic; depth characteristic; velocity characteristic; image recognition

## 0 引言

煤炭是我国主体能源,其能源主导地位短时间内不会改变<sup>[1-3]</sup>。我国煤矿以井工开采为主,采掘工作面作为破坏煤岩原有平衡前沿,更易发生冲击地压和煤与瓦斯突出,造成灾害附近区域工作人员被埋或被困,如不及时发现,易导致人员窒息或失血过多而死亡。目前,由于煤矿冲击地压和煤与瓦斯突出灾害诱因复杂、致灾机理尚不完全明确、煤炭开采深度和强度的增加,灾害监测预警防治尚未完全满足安全生产需要<sup>[1-2, 4-8]</sup>。煤矿冲击地压和煤与瓦斯突出仍时有发生,灾害事故发生主要靠人工发现。如能及时发现事故和应急救援,争取黄金救援时间,避免或减少填埋或被困造成的人员伤亡,及时疏通堵塞巷道,有效避免由于瓦斯积聚引发的瓦斯窒息、瓦斯和煤尘爆炸等严重次生灾害,造成大量人员伤亡<sup>[9-12]</sup>。因此,研究煤矿冲击地压和煤与瓦斯突出灾

害感知报警方法具有重要理论意义和实用价值<sup>[13-15]</sup>。

目前煤矿冲击地压和煤与瓦斯突出监测预警方法主要有钻屑法、应力监测法、电磁辐射监测法<sup>[16-17]</sup>、微震监测法、声发射监测法、煤岩电荷辐射监测法、电测法、声波探测法<sup>[18-20]</sup>、顶板离层观测法<sup>[21-25]</sup>、煤岩体变形测量法等<sup>[7-8, 26-30]</sup>。上述监测预警方法更适合用于灾害预警,但不能替代灾害报警;目前灾害预警方法主要是通过分析各个参数的趋势性变化特征来判断灾害发生的危险性和可能性<sup>[4, 6, 23, 31-33]</sup>,但还无法完全准确预报灾害发生时间、位置和强度等,而在灾害发生瞬间,可能无法及时报警;即便灾害预警方法观测到相关参数异常变化,被认为有冲击危险,但也不一定发生灾害,也不能判定已经发生煤矿冲击地压或煤与瓦斯突出。综上,目前灾害预警方法更适用于长期监测,可有效进行灾害预警,但不能替代煤矿冲击地压和煤与瓦斯突出灾害报警,可作为辅助手段来提高安全性,需要针对性的研究煤矿冲



击地压和煤与瓦斯突出监测报警方法。

针对目前灾后大量煤岩抛向采掘工作面和巷道空间的特征研究较少<sup>[34-38]</sup>,并且还未有利用彩色双目视觉技术直接识别灾害造成的颜色和深度特征来进行冲击地压和煤与瓦斯突出感知报警研究,所以笔者提出了基于深度特征的灾害彩色双目视觉感知报警方法,该方法具有监测范围广、成本低、非接触、使用维护方便和信息丰富等优点,可为煤矿冲击地压和煤与瓦斯突出感知报警提供新思路。

## 1 灾害特征与图像识别方法

冲击地压和煤与瓦斯突出均是由于巷道开拓以及工程扰动等因素破坏了巷道围岩原有平衡,突破了煤岩的承载极限,致使煤岩破碎抛向采掘工作面 and 巷道空间的煤矿井下严重自然灾害,严重威胁着煤矿的安全生产。

### 1.1 灾害典型特征

煤矿冲击地压和煤与瓦斯突出发生时能向巷道

空间和采掘工作面瞬间抛出大量破碎煤岩,严重破坏巷道和通风系统,造成灾害附近区域工作人员被埋或被困,如不及时发现,易导致人员窒息或失血过多而死亡,并且容易造成瓦斯窒息、瓦斯和煤尘爆炸等严重次生灾害,造成大量人员伤亡。所以冲击地压和煤与瓦斯突出虽然致灾机理不同,但外在显现特征具有明显相似性:

1)一般情况下,煤矿井下设备颜色与灾害抛出煤岩具有明显差异,例如采煤机、液压支架、掘进机、除尘风机、风筒、隔爆水袋、工作台、梭车、带式输送机等,一般外表主要呈橘黄色、灰白色、橙红色、蓝色或深红色等,而灾害抛出煤岩一般呈黑色。可根据上述颜色差异,以非黑色煤矿井下设备为背景,利用彩色双目摄像机进行灾害抛出煤岩捕捉,捕捉范围可限定为彩色图像中发生黑色面积较大增加区域。笔者在国家能源集团宁夏煤业有限责任公司双马煤矿、羊场湾煤矿,采集得到的煤矿井下典型设备颜色特征,如图1所示。

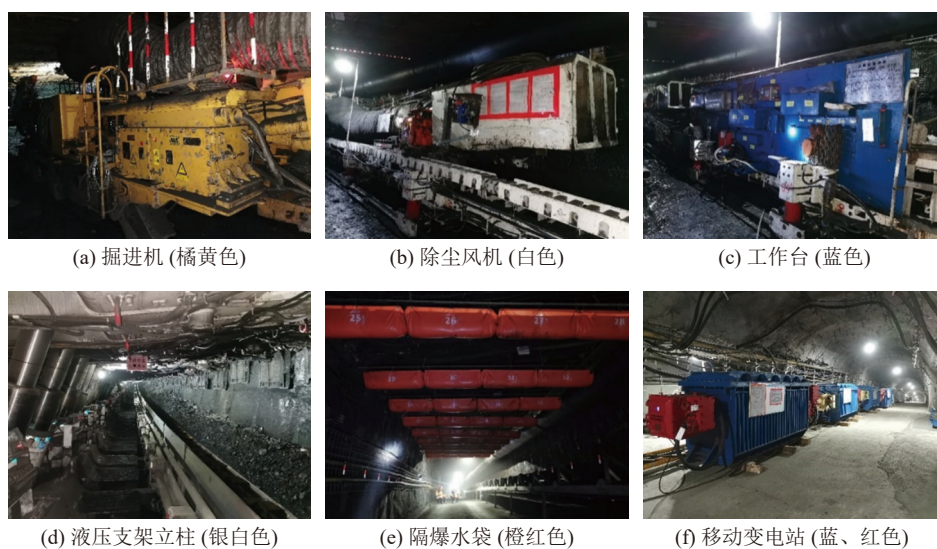


图1 煤矿井下典型设备颜色特征

Fig.1 Color characteristics of typical equipment in coal mine

2)冲击地压和煤与瓦斯突出均会抛出大量破碎煤岩,并且抛出煤岩的短时速度较大,可达  $50 \text{ m/s}$ <sup>[39-40]</sup>,远大于胶轮车、采煤机、掘进机、井下人员以及正常落煤速度(最大为  $13 \text{ m/s}$ )<sup>[37, 41]</sup>,可利用彩色双目摄像机识别上述速度差异特征进行灾害感知报警,可限定速度范围:  $v > 13 \text{ m/s}$ 。

3)瓦斯和煤尘爆炸会造成巷道空间和采掘工作面物体短时速度较高,但也会产生异常高亮<sup>[42]</sup>,可利用异常高亮来排除瓦斯和煤尘爆炸。

4)冲击地压和煤与瓦斯突出会造成采掘工作面

和巷道空间出现深度异常特征,主要包括巷道空间和采掘工作面物体深度异常、深度异常物体速度异常。可根据深度异常特征,利用彩色双目摄像机识别冲击地压和煤与瓦斯突出。

### 1.2 图像识别方法

由于煤矿井下设备长期积累粉尘容易造成瓦斯和煤尘爆炸,所以《煤矿安全规程》规定要及时清理煤矿井下设备上的粉尘<sup>[41]</sup>,使得煤矿井下设备颜色特征明显,有利于基于背景颜色提取煤矿冲击地压和煤与瓦斯突出特征。



冲击地压和煤与瓦斯突出可造成数百米范围内的巷道和设备损坏。为保证能很好地进行灾害感知报警,需对灾害感知装置进行多点布置:掘进工作面、回采工作面、进风巷道入口、回风巷道入口、巷道中间,以及主运输、辅助运输大巷等位置。由此,虽然灾源附近的灾害感知装置会遭到破坏,但远离灾源未被破坏的灾害感知装置仍能进行灾害的感知报警。

煤与瓦斯突出发生时的瓦斯释放量、浓度升高范围、浓度升高速度范围以及波及范围,都远大于冲击地压。所以当监测到采煤工作面、掘进工作面、进风巷、回风巷等多个地点甲烷浓度大幅升高或达到报警值,则说明发生煤与瓦斯突出事故,否则说明发生冲击地压事故。

针对灾害发生时大量煤岩抛向采掘工作面和巷道空间的颜色和深度特征,提出基于深度特征的煤矿冲击地压和煤与瓦斯突出图像感知报警方法,如图2所示。

1)在煤矿井下掘进工作面顶部、采煤工作面液压支架顶部、巷道顶板以及靠近顶板等位置多点布置带有补光灯的彩色双目摄像机,以煤矿井下与灾害抛出煤岩有鲜明颜色差异的设备为背景,实时采集彩色图像和深度图像,并利用多点布置的甲烷传感器监测环境甲烷浓度;

2)监测彩色图像是否出现颜色变化;

3)如果掘进巷道工作面、回采工作面、进风巷道入口、回风巷道入口、巷道中间以及主运输、辅助运输大巷等位置监测到图像颜色发生较大变化,则监测彩色图像平均亮度是否小于设定的亮度阈值,否则持续监测彩色图像颜色变化;

4)如果平均亮度小于设定亮度阈值,监测深度图像是否发生较大变化,否则持续监测彩色图像颜色变化;

5)如果深度图像发生较大变化,监测导致深度图像较大变化物体速度是否大于设定速度阈值( $v > 13 \text{ m/s}$ ),否则持续监测彩色图像颜色变化;

6)如果物体速度大于设定速度阈值,利用多点布置甲烷传感器监测甲烷浓度是否迅速升高或达到报警值,否则持续监测彩色图像颜色变化;

7)如果监测到多个不同地点的环境甲烷浓度大幅升高或达到报警值,说明发生煤与瓦斯突出事故,否则说明发生冲击地压事故;

8)判断是否已启动应急响应,如果已启动,退出报警,否则继续报警。

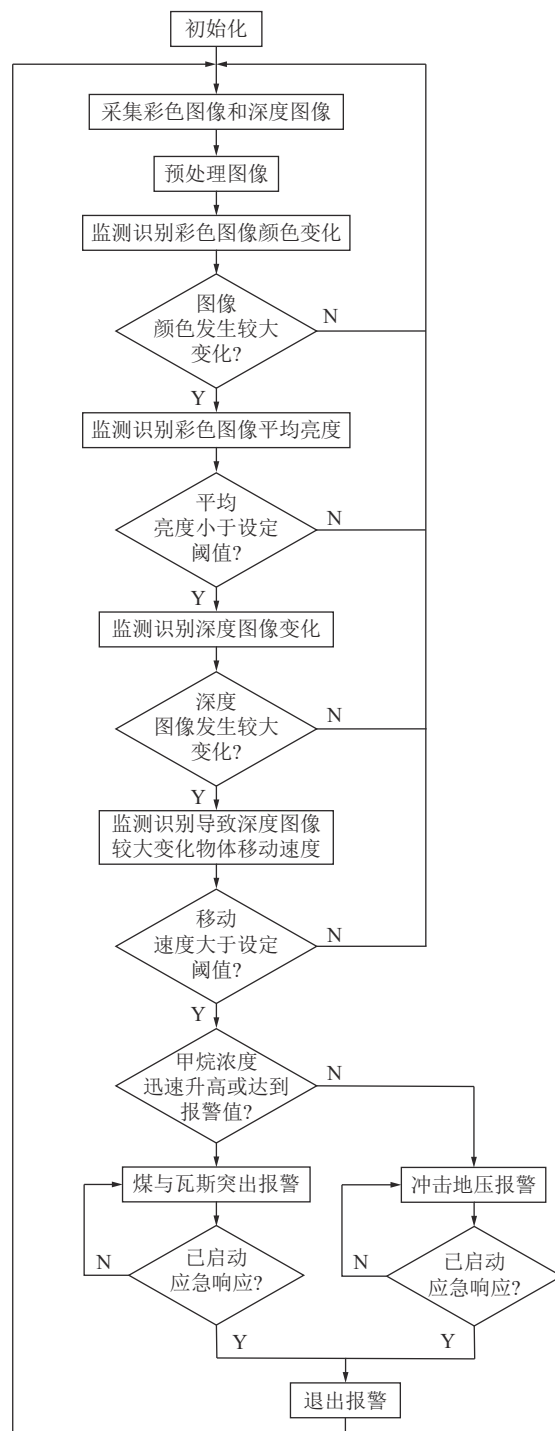


图2 基于深度特征的煤矿冲击地压和煤与瓦斯突出图像感知报警方法

Fig.2 Coal mine rock burst and coal and gas outburst image perception alarm method based on depth characteristics

## 2 图像识别方法具体实现

### 2.1 颜色变化特征识别

灾害发生时,煤矿井下设备被大量抛出煤岩覆盖、遮挡或掩埋,抛出煤岩主要为黑色,而煤矿井下设备主要为非黑色,存在明显颜色差异。本文利用HSV颜色模型<sup>[43]</sup>提取彩色图像黑色区域,利用



ViBe 算法<sup>[44]</sup>识别黑色区域面积是否较大增加,如果较大增加,则识别彩色图像平均亮度,否则持续利用 HSV 模型<sup>[43]</sup>和 ViBe 算法<sup>[44]</sup>监测彩色图像黑色区域面积是否出现较大增加。

HSV 是根据颜色直观特性由 A.R.Smith 在 1978 年创建的一种颜色空间,也称六角锥体模型<sup>[43]</sup>。该模型中有 3 个颜色参数:色调  $H$ 、饱和度  $S$ 、明度  $V$ 。彩色图像从 RGB 颜色模型转换到 HSV 颜色模型的关系式如下(式中  $R$ 、 $G$ 、 $B$  为归一化后的结果)<sup>[43]</sup>:

$$V = \max(R, G, B) \quad (1)$$

$$S = \begin{cases} \frac{V - \min(R, G, B)}{V}, & V \neq 0 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

$$H = \begin{cases} 60^\circ \times \frac{G - B}{V - \min(R, G, B)}, & V = R, S \neq 0 \\ 60^\circ \times \frac{B - R}{V - \min(R, G, B)} + 120^\circ, & V = G, S \neq 0 \\ 60^\circ \times \frac{R - G}{V - \min(R, G, B)} + 240^\circ, & V = B, S \neq 0 \end{cases} \quad (3)$$

通过设定 HSV 颜色模型<sup>[43]</sup>相应参数范围,以针对性地分割出图像黑色区域,然后利用 ViBe 算法<sup>[44]</sup>识别出监视范围内黑色面积变化的区域。

## 2.2 平均亮度特征识别

利用 HSV 颜色模型<sup>[43]</sup>的平均明度值是否小于设定明度阈值(设为 135,可根据实际情况进一步调整),来判断彩色图像亮度是否正常,如果平均明度小于设定明度阈值,说明图像亮度正常,进行深度图像变化特征识别,否则持续利用 HSV 颜色模型<sup>[43]</sup>和 ViBe 算法<sup>[44]</sup>监测彩色图像黑色区域面积是否出现较大增加,关系式如下:

$$B_{ave} = \frac{1}{N} \sum_{x,y} B(x, y) < B_T \quad (4)$$

式中,  $B_{ave}$  为图像平均明度值;  $N$  为图像像素总数;  $(x, y)$  为图像中像素点的坐标;  $B(x, y)$  为坐标点为  $(x, y)$  处的像素明度;  $B_T$  为设定的亮度阈值。

## 2.3 深度变化特征识别

采用彩色双目摄像机采集采掘工作面和巷道空间的深度图像,并利用 ViBe 算法<sup>[44]</sup>识别深度图像发生变化区域面积是否出现较大增加,如果出现较大增加,说明出现深度异常现象,进行深度异常区域扩散速度识别,否则持续利用 HSV 颜色模型<sup>[43]</sup>和 ViBe 算法<sup>[44]</sup>监测识别彩色图像黑色区域面积是否出现较大增加。

彩色双目立体视觉是利用立体匹配算法,通过 2 个彩色单目摄像机同时获取同一场景的 2 幅彩色

图像,根据三角原理计算视差信息并转换成深度信息,彩色双目摄像机成像模型如图 3 所示<sup>[45]</sup>。

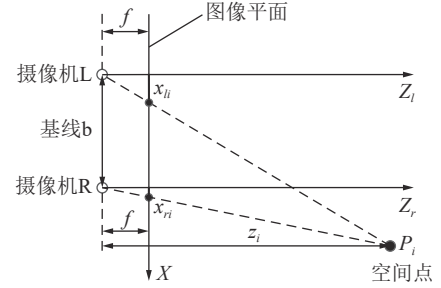


图 3 双目摄像机成像模型

Fig.3 Binocular camera imaging model

如图 3 所示,根据三角形相似原理可得:

$$Z_i = b \times \frac{f}{d}, d = x_{li} - x_{ri} \quad (5)$$

整理可得:

$$Z_i = \frac{b \times f}{x_{li} - x_{ri}} \quad (6)$$

其中,  $Z_i$  为空间点  $P_i$  离双目摄像机的距离,  $m$ ;  $b$  为双目摄像机基线长度,  $m$ ;  $f$  为左右单目摄像机焦距, 像素;  $x_{li} - x_{ri}$  为点  $P_i$  在左右单目摄像机的视差,  $px$ 。

双目立体视觉测量方法,可在瞬间完成图像的获取,具有系统结构简单、精度合适、效率高、成本低等优点。设摄像机感光器件的单个像素物理尺寸为  $d_x \times d_y$ , 图像坐标系中的坐标  $(x, y)$  与像素坐标系中的坐标  $(u, v)$  之间关系如图 4 所示:

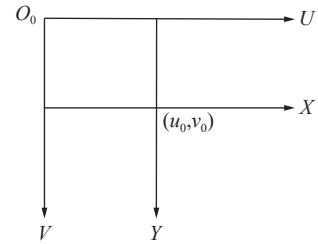


图 4 图像坐标系与像素坐标系关系

Fig.4 Relation between image coordinate system and pixel coordinate system

可表示为:

$$\begin{cases} u = u_0 + \frac{x}{d_x} \\ v = v_0 + \frac{y}{d_y} \end{cases} \quad (7)$$

设  $S$  为图像坐标系下每毫米的像素个数,则:

$$\begin{cases} u_{li} = u_0 + x_{li} \times S \\ u_{ri} = u_0 + x_{ri} \times S \end{cases} \quad (8)$$

两式进行相减运算:



$$x_{li} - x_{ri} = \frac{u_{li} - u_{ri}}{S} \quad (9)$$

将  $Z_i$  代入上式:

$$Z_i = \frac{b \times f \times S}{u_{li} - u_{ri}} \quad (10)$$

由此可知,只要能够获取至少一个像素的像素差,结合摄像机的焦距和基线距离,就可获取到对应物体的深度。并且在  $X$ 、 $Y$  方向上相机坐标系和图像坐标系有相似关系:

$$\begin{cases} x = \frac{f \times X_i}{Z_i} \\ y = \frac{f \times Y_i}{Z_i} \end{cases} \quad (11)$$

同理可得:

$$\begin{cases} X_i = \frac{b \times (u_{li} - u_0)}{u_{li} - u_{ri}} \\ Y_i = \frac{f \times (v_{li} - v_0)}{u_{li} - u_{ri}} \\ Z_i = \frac{b \times f \times S}{u_{li} - u_{ri}} \end{cases} \quad (12)$$

综上,如果知道空间点  $P_i$  在左右摄像机的对应关系,可求得视差  $(u_{li} - u_{ri})$ ,就能恢复图像在相机坐标系下的三维坐标,进而根据四大坐标系关系,映射出在世界坐标系的位置,即物体在真实世界的坐标。

深度图像又称距离影像,在深度数据流的图像帧中,每个像素点的灰度值可用于表征场景中某一点距离摄像机的远近。利用 ViBe 算法<sup>[44]</sup>识别深度图像发生变化区域面积是否出现较大增加,如果出现较大增加,说明出现灾害发生时的深度异常现象,进行深度异常区域扩散速度识别。

## 2.4 深度异常扩散识别

利用彩色双目摄像机采集深度图像,结合深度图像和巷道空间深度异常物体的数学关系,识别深度异常物体速度,如果出现深度异常物体速度大于设定阈值,说明出现灾害速度异常,进行灾害综合判识报警,否则持续利用 HSV 模型<sup>[43]</sup>和 ViBe 算法<sup>[44]</sup>监测彩色图像黑色区域面积是否出现较大增加,测速方法示意图如图5所示。

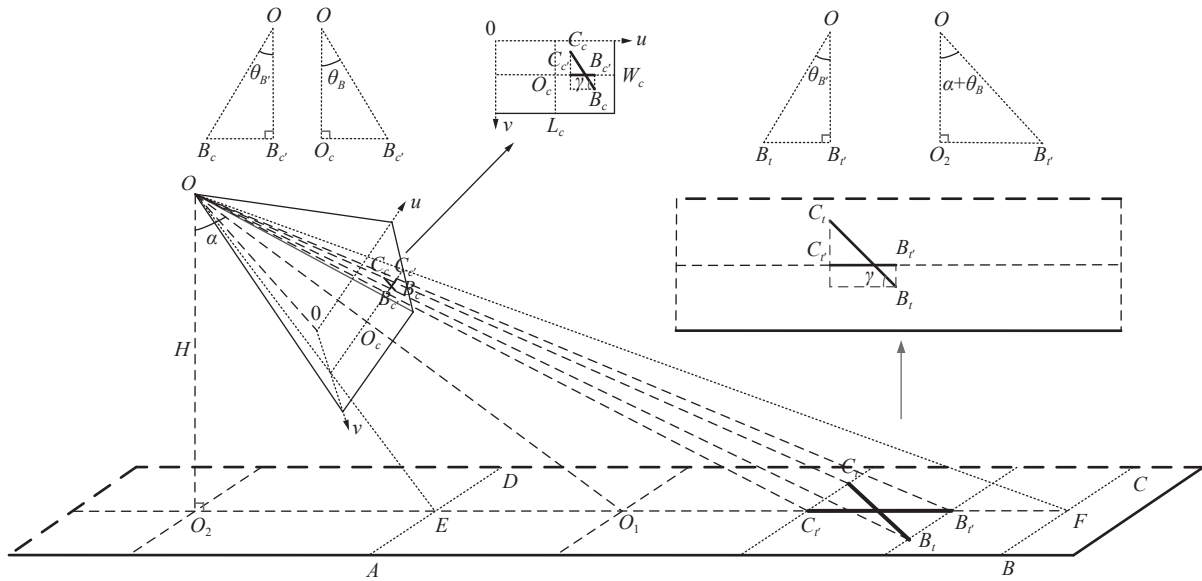


图5 彩色双目摄像机测速方法示意

Fig.5 Schematic of color binocular camera speed measurement method

如图5所示,彩色双目摄像机由两个参数相同的彩色单目摄像机组成,并安装巷道顶板  $O$  点,彩色双目摄像机等效光轴  $OO_1$  与深度图像成像平面相交于  $O_c$ 、与巷道底板平面相交于  $O_1$ ,则  $\angle O_1OO_2$  为彩色双目摄像机倾角  $\alpha$ ,彩色双目摄像机巷道走向方向的视场角  $2\theta_L = 2\angle O_1OE = 2\angle O_1OF$ ,四边形  $ABCD$  为巷道底板区域,当大面积深度异常物体从  $B_i$  移动到  $C_i$  时,对应的深度图像中从  $B_c$  移动到  $C_c$ ,那么大面积

深度异常物体轨迹  $B_iC_i$  映射到巷道底板中轴线方向上为线段  $B_rC_r$ ,深度图像中  $B_cC_c$  映射到巷道底板中轴线方向为线段  $B_cC_c$ 。

设当物体从  $B_i$  经过一段时间  $\Delta t$  移动到  $C_i$  时,双目摄像机监测到对应的深度分别为  $Z_B$  和  $Z_C$ 。在像素坐标系中,设  $B_c(x_B, y_B)$ ,  $C_c(x_C, y_C)$ , 并且  $O_c\left(\frac{L_c}{2}, \frac{W_c}{2}\right)$ , 那么  $B_c\left(x_B, \frac{W_c}{2}\right)$ ,  $C_c\left(x_C, \frac{W_c}{2}\right)$ 。由图5可知:



$$\begin{cases} OB_{C'} = \sqrt{f^2 + \left(x_B - \frac{L_c}{2}\right)^2} \\ \tan\theta_{B'} = \frac{B_c B_{C'}}{OB_{C'}} \\ B_c B_{C'} = \left|y_B - \frac{W_c}{2}\right| \\ OB_{B'} = OB_t \times \cos\theta_{B'} \\ OB_t = Z_B \\ \tan\theta_B = \frac{\left|x_B - \frac{L_c}{2}\right|}{f} \\ OB_2 B_{B'} = OB_{B'} \times \sin(\alpha + \theta_B) \end{cases} \quad (13)$$

由上式可得:

$$\begin{aligned} O_2 B_{B'} = Z_B \times \cos \left( \tan^{-1} \left[ \frac{\left|y_B - \frac{W_t}{2}\right|}{\sqrt{f^2 + \left(x_B - \frac{L_c}{2}\right)^2}} \right] \right) \times \\ \sin \left( \alpha + \tan^{-1} \left[ \frac{\left|x_B - \frac{L_c}{2}\right|}{f} \right] \right) \end{aligned} \quad (14)$$

同理, 可得:

$$\begin{aligned} O_2 C_{C'} = Z_C \times \cos \left( \tan^{-1} \left[ \frac{\left|y_C - \frac{W_c}{2}\right|}{\sqrt{f^2 + \left(x_C - \frac{L_c}{2}\right)^2}} \right] \right) \times \\ \sin \left( \alpha + \tan^{-1} \left[ \frac{\left|x_C - \frac{L_c}{2}\right|}{f} \right] \right) \end{aligned} \quad (15)$$

那么, 可得:

$$\begin{cases} B_r C_r = |O_2 B_r - O_2 C_r| \\ \cos \gamma = \frac{B_r C_r}{B_t C_t} \\ \tan \gamma = \frac{|y_B - y_C|}{|x_B - x_C|} \end{cases} \quad (16)$$

则:

$$\begin{aligned} v = \frac{B_t C_t}{\Delta t} = \frac{B_t C_r}{\Delta t \times \cos \gamma} = \\ \frac{\left| \frac{b \times f}{x_{lb} - x_{rb}} \times \cos \left( \tan^{-1} \left[ \frac{\left|y_B - \frac{W_c}{2}\right|}{\sqrt{f^2 + \left(x_B - \frac{L_c}{2}\right)^2}} \right] \right) \times \sin \left[ \alpha + \tan^{-1} \left( \frac{\left|x_B - \frac{L_c}{2}\right|}{f} \right) \right] - \frac{b \times f}{x_{lc} - x_{rc}} \times \cos \left( \tan^{-1} \left[ \frac{\left|y_C - \frac{W_c}{2}\right|}{\sqrt{f^2 + \left(x_C - \frac{L_c}{2}\right)^2}} \right] \right) \times \sin \left[ \alpha + \tan^{-1} \left( \frac{\left|x_C - \frac{L_c}{2}\right|}{f} \right) \right] \right|}{\Delta t \cos \left( \tan^{-1} \left( \frac{|y_B - y_C|}{|x_B - x_C|} \right) \right)} \end{aligned} \quad (17)$$

式中,  $v$  为物体从移动起点  $B_t$  经过一段时间  $\Delta t$  后移动到终点  $C_t$  位置的移动速度, m/s;  $x_{lb} - x_{rb}$  为彩色双目摄像机监测到物体移动起点  $B_t$  在左右彩色单目摄像机的视差, px;  $x_{lc} - x_{rc}$  为彩色双目摄像机监测到物体移动起点  $C_t$  在左右彩色单目摄像机的视差, px;  $x_B, y_B$  分别为在像素坐标系中物体移动起点的横纵坐标, px;  $x_C, y_C$  分别为在像素坐标系中物体移动终点的横纵坐标, px;  $f$  为彩色双目摄像机中单目彩色摄像机的焦距, px;  $L_c, W_c$  分别为双目摄像机所成的深度图像像素尺寸的长和宽, px;  $\alpha$  为彩色双目摄像机相对于竖直向下的前倾角度, (°)。

为增大彩色双目摄像机的监视范围, 并且还能很好的识别灾害速度特征, 彩色双目摄像机最佳倾角为:

1) 在掘进工作面彩色双目摄像机覆盖范围为满足下述条件的最大倾角:

①监视区域只覆盖巷道的底部和两帮; ②监视区域内最远目标, 在深度图像中一像素/帧的速度对应真实速度的  $n$  倍等于设定阈值。

$$\begin{cases} \alpha + \theta_L < \frac{\pi}{2} \\ v = \frac{H}{f} \times \frac{\cos \theta_L}{\cos^2(\alpha + \theta_L)} \times \frac{\Delta s_1}{\Delta t_1} = \frac{v_T}{n} (n \in Z^+) \end{cases} \quad (18)$$

其中,  $\alpha$  为彩色双目摄像机的前倾角度, (°);  $\theta_L$  为彩色双目摄像机在沿巷道轴线方向的视场角的一半, (°);  $H$  为彩色双目摄像机安装高度, m;  $f$  为彩色双目摄像机中单目摄像机的焦距, m;  $v_T$  为设定的速度阈值, m/s;  $\Delta t_1$  为一帧的时间;  $\Delta s_1$  为一个像素长度;  $v$  为在深度图像中, 覆盖区域最远目标移动一个像素长度每帧时目标真实速度, m/s。

在回采工作面彩色双目摄像机监视范围为同时满足下述条件的最大倾角: ①监视区域只覆盖回采工作面底部和液压支架区域 (不包括采煤工作面); ②监视区域内最远目标, 在深度图像中一像素/帧的速度对应真实速度的  $n$  倍等于设定阈值。

$$\begin{cases} 0 < H \times \tan(\alpha + \theta_L) \leq \Delta w \\ v = \frac{H}{f} \times \frac{\cos \theta_L}{\cos^2(\alpha + \theta_L)} \times \frac{\Delta s_1}{\Delta t_1} = \frac{v_T}{n} (n \in Z^+) \end{cases} \quad (19)$$

其中,  $\Delta w$  为彩色双目摄像机在垂直巷道轴线方向上与采煤面的距离, m。

为了能够识别灾害发生时大量煤岩抛出的较高速度, 可综合彩色双目摄像机的视场角、前倾角度、帧频以及安装高度, 来估算能识别的最大速度:



$$v_{\max} = \frac{H \times (\tan(\alpha + \theta_L) - \tan(\alpha - \theta_L))}{\Delta t_1} \quad (20)$$

式中,  $v_{\max}$  为彩色双目摄像机能识别的最大速度, m/s;  $H$  为彩色双目摄像机安装高度, m;  $\Delta t_1$  为一帧的时间, s;  $\alpha$  为彩色双目摄像机的前倾角度, ( $^\circ$ );  $\theta_L$  为彩色双目摄像机沿摄像机光轴方向的视场角的一半, ( $^\circ$ )。

由于冲击地压和煤与瓦斯突出抛出的大量破碎煤岩, 形状不规则并有不可预知性, 可利用深度图像发生较大变化区域的最大轮廓中心点作为灾害抛出煤岩的特征点, 根据灾害抛出煤岩特征点的移动速度可得出灾害抛出煤岩速度。

综上所述, 结合深度图像和巷道空间深度异常物体的数学关系, 如果识别到深度异常物体速度大于设定阈值, 说明出现灾害速度异常现象, 进行灾害综合判别报警。

## 2.5 灾害综合判别报警

当识别到灾害发生时的颜色、亮度、深度和速度特征, 那么判断甲烷浓度是否迅速升高或达到报警值, 如果采煤工作面、掘进工作面、进风巷道、回风巷道等多个地点环境甲烷浓度均大幅升高或达到报警值, 说明发生煤与瓦斯突出事故, 否则说明发生冲击地压事故。

## 3 模拟试验以及结果分析

为验证提出的基于深度特征的煤矿冲击地压和煤与瓦斯突出图像感知报警方法的可行性与有效性, 设计了灾害颜色和深度异常变化特征模拟试验装置, 采用 HNY-CV-002 可变基线彩色双目摄像机参数: 80 mm 基线值, 30FPS, 3.4 mm 焦距,  $71^\circ \times 55^\circ$  视场角。设定彩色双目摄像机识别物体移动速度阈值  $v_T=13$  m/s。采用 Python3.7 编程, 在 Intel i7、8G 内存、6 核 2.6GHz、Pycharm2019 上进行了模拟灾害发生时颜色、亮度、深度、速度特征的识别。

### 3.1 试验方案总体思想

由于灾害的特殊性, 目前无法通过真实灾害, 来验证基于深度特征的煤矿冲击地压和煤与瓦斯突出感知报警方法的可行性。在确保安全性的前提下, 简化了灾害模拟试验, 利用比重、颜色相近的橡胶球替代灾害抛出煤岩; 利用 PVC 管模拟煤矿井下受限空间; 利用在 PVC 管内布置煤矿井下设备图片来模拟与抛出煤岩有着鲜明颜色差异的设备; 利用高压鼓风机作为动力装置, 通过高速气流冲击橡胶球使其高速抛向 PVC 管内, 来模拟灾害大量煤岩抛出过程; 利用彩色双目摄像机进行图像采集。灾害模拟试验装置示意图如图 6 所示。

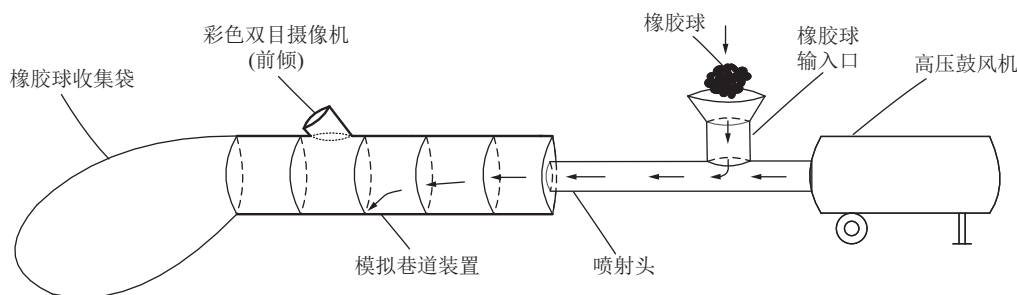


图 6 灾害模拟试验装置示意

Fig.6 Schematic of the disaster simulation experiment device

### 3.2 摄像机类型的选择

煤矿井下巷道净断面最低高度为  $1.8\text{ m}^{[41]}$ , 以此为彩色双目摄像机安装高度:

1) 根据式(18)可得彩色双目摄像机在掘进工作面的最佳倾角为  $30^\circ$ , 根据式(20)可得在最佳倾角下彩色双目摄像机监测的最大速度为  $82\text{ m/s}$ , 远大于设定的速度阈值  $v_T=13\text{ m/s}$ 。

2) 根据式(19)并结合  $\Delta w=2.8\text{ m}$  可得彩色双目摄像机在采煤工作面的最佳倾角为  $30^\circ$ , 进一步根据式(20)可得在最佳倾角下彩色双目摄像机监测的最大速度为  $82\text{ m/s}$ , 远大于设定的速度阈值  $v_T=13\text{ m/s}$ ;

根据式(19)并结合  $\Delta w=1.55\text{ m}$  可得彩色双目摄像机在采煤工作面的最佳倾角为  $13^\circ$ , 进一步根据式(20)可得在最佳倾角下彩色双目摄像机监测的最大速度为  $60\text{ m/s}$ , 也远大于设定的速度阈值  $v_T=13\text{ m/s}$ 。

综上所述, 无需高速彩色双目摄像机, 即用普通彩色双目摄像机可满足识别灾害抛出煤岩速度特征要求。

### 3.3 模拟巷道尺寸选取

为简化复杂度与确保安全性, 在满足灾害特征模拟与识别效果的情况下, 应减小模拟装置尺寸。以掘进工作面为例, 模拟掘进巷道尺寸需同时满足



式(18)和式(20),即:

$$\begin{cases} \alpha + \theta_L < \frac{\pi}{2} \\ v = \frac{H}{f} \times \frac{\cos \theta_L}{\cos^2(\alpha + \theta_L)} \times \frac{\Delta s_1}{\Delta t_1} = \frac{v_T}{n} (n \in \mathbb{Z}^*) \\ v_{\max} = \frac{H \times (\tan(\alpha + \theta_L) - \tan(\alpha - \theta_L))}{\Delta t_1} > v_T \end{cases} \quad (21)$$

为求出  $h$  和  $\alpha$  的对应关系, 根据  $\theta_L=27.5^\circ$ 、 $f=0.0034 \text{ m}$ 、 $\Delta s_1=2.646 \times 10^{-4} \text{ m/像素}$ 、 $\Delta t_1=\frac{1}{30} \text{ s}$ 、 $v_T=13 \text{ m/s}$ 。当  $h=0.2 \text{ m}$ 、 $\alpha \approx 52^\circ$  时, 可识别的最大速度  $v_{\max} \approx 30 \text{ m/s}$ , 远大于设定速度阈值。选取  $\phi 0.315 \text{ m}$  的 PVC 管模拟煤矿井下巷道, 即当  $h=0.3 \text{ m}$  (安装高度),  $\alpha \approx 50^\circ$ , 可识别的最大速度  $v_{\max} \approx 37 \text{ m/s}$ , 远大于设定速度阈值, 满足试验要求, 此种情况下巷道模拟装置长度最少应为  $L_{\text{lan}} = H \times [\tan(\alpha + \theta_L) - \tan(\alpha - \theta_L)] = 1.23 \text{ m}$ 。

### 3.4 模拟试验现场情况

基于彩色双目视觉来识别灾害模拟试验装置模拟灾害发生时的颜色和深度异常变化特征, 并进一步结合多点监测到的甲烷浓度是否正常, 来区分冲击地压和煤与瓦斯突出。试验装置情况如图 7 所示。



图 7 试验装置情况

Fig.7 Experimental device situation

如图 7 所示, 在灾害模拟装置中, 采用彩色双目摄像机进行彩色图像和深度图像采集, 来识别灾害的颜色和深度异常变化特征, 以很好地模拟真实巷道环境、图像采集位置以及视频采集效果。其中采用长约  $1.4 \text{ m}$ 、直径  $0.315 \text{ m}$  的 PVC 管模拟巷道与受限空间; 采用  $\phi 10 \text{ mm}$  的黑色橡胶球来模拟灾害抛出的破碎煤岩; 采用高压轴流鼓风机 (最大功率  $5.5 \text{ kW}$ 、最大风速  $69.5 \text{ m/s}$ ) 作为模拟灾害动力装置; 利用 IQ 型  $10.5 \text{ GHz}$  多普勒测速雷达测得试验装置抛出橡胶球的最大速度大于  $15 \text{ m/s}$ , 可满足速度要求; 采用将彩色双目摄像机监视的 PVC 内管区域视为煤矿井下与灾害抛出煤岩有鲜明颜色差异的设备; 采用将彩色双目摄像机安装于 PVC 管顶部以模拟煤矿井下巷道顶板监视位置。

其中彩色双目摄像机监视的 PVC 内管区域, 贴有煤矿井下设备图片, 以更好地模拟煤矿井下背景设备区域, 如图 8 所示。

### 3.5 模拟试验结果分析

在现有试验装置和彩色双目摄像机参数下, 彩

色双目摄像机最佳倾角为  $50^\circ$ , 并确定为灾害模拟试验彩色双目摄像机倾角。模拟灾害发生过程中的深度变化特征, 如图 9 所示。

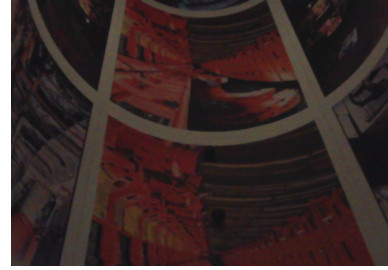


图 8 监视区域背景颜色特征

Fig.8 Monitoring area background color characteristics

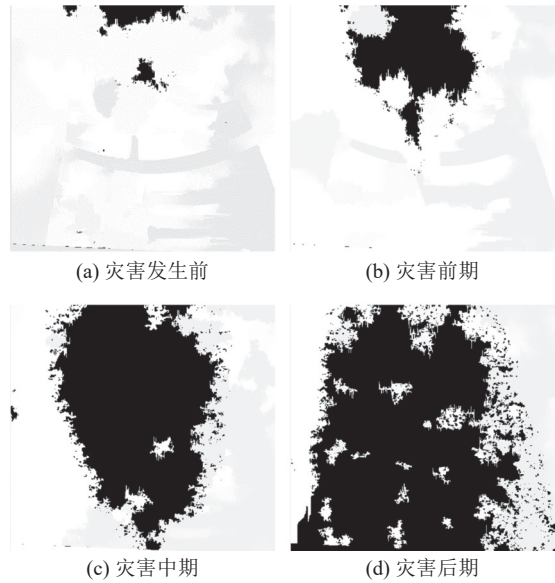


图 9 灾害发生过程中的深度变化特征

Fig.9 Characteristics of depth variation in the process of disaster occurrence

如图 9 所示, 深度图像中颜色变化区域即为灾害抛出煤岩造成的深度变化区域, 颜色变化区域增加即表示灾害抛出煤岩扩散过程。

对灾害识别方法进行了代码实现。当模拟灾害发生时, 可识别出模拟灾害发生时的颜色、亮度、深度和速度特征。并且当深度变化区域扩散速度大于设定速度阈值时, 灾害报警并且保存了灾害瞬间的彩色图像, 其中利用绿色轮廓框选出满足灾害发生时颜色、亮度、深度和速度变化特征的区域, 识别效果如图 10 所示。

综上可知, 提出的基于深度特征的灾害图像感知报警方法能够识别到灾害发生时颜色、亮度、深度、速度变化特征, 可进一步根据多点监测到的环境甲烷浓度是否迅速升高或达到报警值, 来判别冲击地压和煤与瓦斯突出。即利用灾害颜色和深度异常变



化特征模拟试验验证了本文提出的基于深度特征的灾害图像感知报警方法的可行性与有效性,并且能够很好地排除瓦斯和煤尘爆炸等产生异常高亮灾害的干扰。

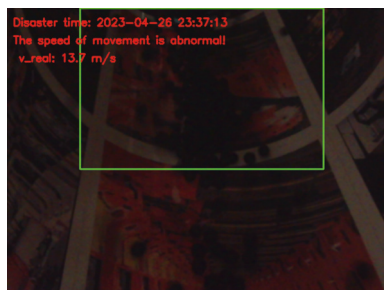


图10 深度变化区域扩散速度大于设定阈值的识别效果  
Fig.10 Recognition effect image for depth-varying regions with diffusion rate greater than the set threshold value

在工程应用中,可根据实际工况进一步优化灾害发生时颜色、亮度、深度以及速度特征识别方法。其中:

1)灾害发生时产生的尘埃可能会遮挡摄像机的视线,导致图像模糊或失真;湿度和气体浓度可能会改变摄像机的性能,影响图像的清晰度和深度信息的准确性。在实际应用中,我们可采取以下措施:采用抗干扰能力强的摄像机,能够在复杂的井下环境中稳定地采集高质量的彩色图像和深度图像;在系统中增加环境感知模块,实时监测井下的环境因素,如尘埃浓度、湿度和气体浓度等,当环境因素超过一定阈值时,系统会自动调整摄像机的参数或启动相应的保护机制;采用先进的图像后处理技术,对采集到的彩色图像和深度图像进行去噪、增强等处理,提高图像的质量;建立实时反馈机制,当系统检测到环境因素对图像质量产生严重影响时,能够及时向操作员发送警报,以便采取相应的措施。

2)灾害产生的震动对于双目摄像机采集的图片质量会产生影响,在实际应用中,为减轻这种影响,可采取以下措施:选择稳定性较高的双目摄像机,并对其进行抗震优化设计,以提高其在灾害环境下的稳定性;在采集图片时,采用快速曝光技术,以减少震动对图片质量的影响;对采集到的图片进行后处理,采用图像增强技术对模糊或失真的图片进行修复和改善,从而获得更为清晰、准确的图片信息。

## 4 结 论

1)揭示了煤矿冲击地压和煤与瓦斯突出的深度特征:灾害发生时大量煤岩抛向采掘工作面和巷道

空间,深度变化明显;煤矿井下胶轮车、采煤机、掘进机、井下人员以及正常落煤等,也会造成深度变化,但变化速度远低于冲击地压和煤与瓦斯突出;因此,灾害抛出煤岩深度变化与煤矿井下胶轮车、采煤机、掘进机、井下人员以及正常落煤等有明显差异。

2)提出了基于深度特征的煤矿冲击地压和煤与瓦斯突出图像感知报警方法:在煤矿井下掘进工作面顶部、采煤工作面液压支架顶部、巷道顶板以及靠近顶板等位置多点布置带有补光灯的彩色双目摄像机,以煤矿井下与灾害抛出煤岩有着鲜明颜色差别的设备为背景,实时采集采掘工作面 and 巷道空间彩色图像和深度图像;如果掘进工作面、回采工作面、进风巷道入口、巷道中间、回风巷道入口、主运输大巷、辅助运输大巷等位置监测到图像颜色发生较大变化、彩色图像平均亮度小于设定阈值、深度图像发生较大变化、导致深度图像发生较大变化物体的速度大于设定阈值( $V>13\text{ m/s}$ ),与此同时采煤工作面、掘进工作面、进风巷道入口和巷道中间、回风巷道的入口和巷道中间等多个位置均监测到甲烷浓度大幅升高或达到报警值,表明发生煤与瓦斯突出事故,否则表明发生冲击地压事故。

3)提出了彩色双目摄像机识别煤矿冲击地压和煤与瓦斯突出最佳倾角确定方法:监视区域只覆盖巷道底部和两帮;监视区域最远端物体一帧移动一个像素对应速度的 $n$ 倍等于速度阈值。提出了彩色双目摄像机的测速方法:利用深度异常区域的中心点作为识别深度异常物体移动速度的特征点,根据深度图像与巷道空间深度异常移动物体的数学关系,来识别深度异常物体的移动速度,可精简高效地识别出煤矿井下恶劣条件下灾害抛出煤岩移动速度。

4)设计了煤矿冲击地压和煤与瓦斯突出颜色、深度、速度和亮度特征模拟装置,验证了本文提出的基于深度特征的灾害图像感知报警方法的可行性与有效性。可更好地满足煤矿恶劣条件下冲击地压和煤与瓦斯突出感知报警的需求。可及时发现事故和应急救援,争取黄金救援时间,避免或减少填埋或被困造成的人员伤亡,并及时疏通堵塞巷道,有效避免由于瓦斯积聚引发的瓦斯窒息、瓦斯和煤尘爆炸等严重次生灾害,造成大量人员伤亡。

## 参考文献(References):

- [1] 袁 亮,吴劲松,杨 科.煤炭安全智能精准开采关键技术与应用[J].采矿与安全工程学报,2023,40(5):861-868.  
YUAN Liang, WU Jinsong, YANG Ke. Key technology and its ap-



- plication of coal safety intelligent precision mining[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2023, 40(5): 861–868.
- [2] 袁 亮. 我国煤炭主体能源安全高质量发展的理论技术思考[J]. *中国科学院院刊*, 2023, 38(1): 11–22.
- YUAN Liang. Theory and technology considerations on high-quality development of coal main energy security in China[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2023, 38(1): 11–22.
- [3] 潘一山, 宋义敏, 刘 军. 我国煤矿冲击地压防治的格局、变局和新局[J]. *岩石力学与工程学报*, 2023, 42(9): 2081–2095.
- PAN Yishan, SONG Yimin, LIU Jun. Pattern, change and new situation of coal mine rockburst prevention and control in China[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(9): 2081–2095.
- [4] 袁 亮. 煤矿典型动力灾害风险判识及监控预警技术研究进展[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(5): 1557–1566.
- YUAN Liang. Research progress on risk identification, assessment, monitoring and early warning technologies of typical dynamic hazards in coal mines[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(5): 1557–1566.
- [5] 袁 亮. 煤矿典型动力灾害风险判识及监控预警技术“十三五”研究进展[J]. *矿业科学学报*, 2021, 6(1): 1–8.
- YUAN Liang. Risk identification, monitoring and early warning of typical coal mine dynamic disasters during the 13th Five-Year Plan period[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2021, 6(1): 1–8.
- [6] 袁 亮, 姜耀东, 何学秋, 等. 煤矿典型动力灾害风险精准判识及监控预警关键技术研究进展[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(2): 306–318.
- YUAN Liang, JIANG Yaodong, HE Xueqiu, *et al.* Research progress of precise risk accurate identification and monitoring early warning on typical dynamic disasters in coal mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(2): 306–318.
- [7] 袁 亮, 王恩元, 马衍坤, 等. 我国煤岩动力灾害研究进展及面临的科技难题[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(5): 1825–1845.
- YUAN Liang, WANG Enyuan, MA Yankun, *et al.* Research progress of coal and rock dynamic disasters and scientific and technological problems in China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(5): 1825–1845.
- [8] 窦林名, 田鑫元, 曹安业, 等. 我国煤矿冲击地压防治现状与难题[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(1): 152–171.
- DOU Linming, TIAN Xinyuan, CAO Anye, *et al.* Present situation and problems of coal mine rock burst prevention and control in China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(1): 152–171.
- [9] 孙继平. 煤矿井下紧急避险关键技术[J]. *煤炭学报*, 2011, 36(11): 1890–1894.
- SUN Jiping. Research on key technologies of emergency refuge system in underground coal mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(11): 1890–1894.
- [10] 孙继平, 钱晓红. 煤矿事故与应急救援技术装备[J]. *工矿自动化*, 2016, 42(10): 1–5.
- SUN Jiping, QIAN Xiaohong. Coal mine accident and emergency rescue technology and equipment[J]. *Industry and Mine Automation*, 2016, 42(10): 1–5.
- [11] 孙继平, 钱晓红. 煤矿重特重大事故应急救援技术及装备[J]. *煤炭科学技术*, 2017, 45(1): 112–116, 53.
- SUN Jiping, QIAN Xiaohong. Emergency rescue technology and equipment of mine extraordinary accidents[J]. *Coal Science and Technology*, 2017, 45(1): 112–116, 53.
- [12] 孙继平. 煤矿事故分析与煤矿大数据和物联网[J]. *工矿自动化*, 2015, 41(3): 1–5.
- SUN Jiping. Accident analysis and big data and Internet of Things in coal mine[J]. *Journal of Mine Automation*, 2015, 41(3): 1–5.
- [13] 齐庆新, 潘一山, 舒龙勇, 等. 煤矿深部开采煤岩动力灾害多尺度分源防控理论与技术架构[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(7): 1801–1810.
- QI Qingxin, PAN Yishan, SHU Longyong, *et al.* Theory and technical framework of prevention and control with different sources in multi-scales for coal and rock dynamic disasters in deep mining of coal mines[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(7): 1801–1810.
- [14] 王恩元, 何学秋, 刘贞堂, 等. 煤岩动力灾害电磁辐射监测仪及其应用[J]. *煤炭学报*, 2003, 28(4): 366–369.
- WANG Enyuan, HE Xueqiu, LIU Zhentang, *et al.* Electromagnetic radiation detector of coal or rock dynamic disasters and its application[J]. *Journal of China Coal Society*, 2003, 28(4): 366–369.
- [15] 王恩元, 刘晓斐, 何学秋, 等. 煤岩动力灾害声电协同监测技术及预警应用[J]. *中国矿业大学学报*, 2018, 47(5): 942–948.
- WANG Enyuan, LIU Xiaofei, HE Xueqiu, *et al.* Acoustic emission and electromagnetic radiation synchronized monitoring technology and early-warning application for coal and rock dynamic disaster[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2018, 47(5): 942–948.
- [16] 王恩元, 刘晓斐, 李忠辉, 等. 电磁辐射技术在煤岩动力灾害监测预警中的应用[J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2012, 31(5): 642–645.
- WANG Enyuan, LIU Xiaofei, LI Zhonghui, *et al.* Application of electromagnetic radiation technology in monitoring and warning on coal and rock dynamic disasters[J]. *Journal of Liaoning Technical University(Natural Science)*, 2012, 31(5): 642–645.
- [17] 王国法, 潘一山, 赵善坤, 等. 冲击地压煤层如何实现安全高效智能开采[J]. *煤炭科学技术*, 2024, 52(1): 1–14.
- WANG Guofa, PAN Yishan, ZHAO Shankun, *et al.* How to realize safe-efficient-intelligent mining of rock burst coal seam[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(1): 1–14.
- [18] 肖晓春, 朱洪伟, 潘一山, 等. 瓦斯煤岩变形破裂过程声发射预警信号变化规律研究[J]. *中国安全科学学报*, 2013, 23(6): 122–127.
- XIAO Xiaochun, ZHU Hongwei, PAN Yishan, *et al.* Acoustic emission warning signals change law research during deformation and failure of gassy coal rock[J]. *China Safety Science Journal*, 2013, 23(6): 122–127.
- [19] 张庆贺, 袁 亮, 杨 科, 等. 深井煤岩动力灾害的连续卸压开采防治机理[J]. *采矿与安全工程学报*, 2019, 36(1): 80–86, 102.



- ZHANG Qinghe, YUAN Liang, YANG Ke, *et al.* Mechanism analysis on continuous stress-relief mining for preventing coal and rock dynamic disasters in deep coal mines[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2019, 36(1): 80–86, 102.
- [20] 夏永学, 冯美华, 李浩荡. 冲击地压地球物理监测方法研究[J]. *煤炭科学技术*, 2018, 46(12): 54–60.
- XIA Yongxue, FENG Meihua, LI Haodang. Study on rock burst geophysical monitoring method[J]. *Coal Science and Technology*, 2018, 46(12): 54–60.
- [21] 姜福兴, 张翔, 朱斯陶. 煤矿冲击地压防治体系中的关键问题探讨[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(1): 203–213.
- JIANG Fuxing, ZHANG Xiang, ZHU Sitao. Discussion on key problems in prevention and control system of coal mine rock burst[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(1): 203–213.
- [22] 宋大钊, 何学秋, 邱黎明, 等. 区域和局部突出危险性动态实时监测预警技术研究[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(5): 110–119.
- SONG Dazhao, HE Xueqiu, QIU Liming, *et al.* Study on real time dynamic monitoring and early warning technology of regional and local outburst danger[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(5): 110–119.
- [23] 姜耀东, 赵毅鑫. 我国煤矿冲击地压的研究现状: 机制、预警与控制[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(11): 2188–2204.
- JIANG Yaodong ZHAO Yixin. State of the art: investigation on mechanism, forecast and control of coal bumps in China[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(11): 2188–2204.
- [24] 孙继平, 余星辰, 王云泉. 基于声谱图和SVM的煤矿瓦斯和煤尘爆炸识别方法[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(2): 366–376.
- SUN Jiping, YU Xingchen, WANG Yunquan. Recognition method of coal mine gas and coal dust explosion based on sound spectrogram and SVM[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(2): 366–376.
- [25] 齐庆新, 李一哲, 赵善坤, 等. 我国煤矿冲击地压发展70年: 理论与技术体系的建立与思考[J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(9): 1–40.
- QI Qingxin, LI Yizhe, ZHAO Shankun, *et al.* Seventy years development of coal mine rockburst in China: establishment and consideration of theory and technology system[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(9): 1–40.
- [26] 宋振骐, 卢国志, 彭林军, 等. 煤矿冲击地压事故预测控制及其动力信息系统[J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2006, 25(4): 1–5.
- SONG Zhenqi, LU Guozhi, PENG Linjun, *et al.* Forecast and control of rock burst in collieries and its dynamic information system[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)*, 2006, 25(4): 1–5.
- [27] 王桂峰, 刘阳, 曹安业, 等. 冲击地压的三参量能量致冲准则及多场监测预警和动态防治技术[J]. *采矿与安全工程学报*, 2021, 38(5): 895–901.
- WANG Guifeng, LIU Yang, CAO Anye, *et al.* Rock burst energy criterion with three parameters and multi-field monitoring, early warning, and dynamic control and prevention[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2021, 38(5): 895–901.
- [28] LEI Yang, CHENG Yuanping, WANG Liang, *et al.* Potential infrasonic tremors in coal seam systems: Implications for the prediction of coal and gas outbursts[J]. *Fuel*, 2022, 326: 125000.
- [29] VARDAR Onur, ZHANG Chengguo, CANBULAT Ismet, *et al.* A semi-quantitative coal burst risk classification system[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2018, 28(5): 721–727.
- [30] 陈结, 刘博, 朱超, 等. 基于煤样破坏声发射特征的冲击地压评价预警研究[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(2): 116–129.
- CHEN Jie, LIU Bo, ZHU Chao, *et al.* Early-warning evaluation and warning of rock burst using acoustic emission characteristics of coal sample failure[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(2): 116–129.
- [31] 姜福兴, 曲效成, 于正兴, 等. 冲击地压实时监测预警技术与发展趋势[J]. *煤炭科学技术*, 2011, 39(2): 59–64.
- JIANG Fuxing, QU Xiaocheng, YU Zhengxing, *et al.* Real time monitoring and measuring early warning technology and development of mine pressure bumping[J]. *Coal Science and Technology*, 2011, 39(2): 59–64.
- [32] 姜福兴, 杨光宇, 魏全德, 等. 煤矿复合动力灾害危险性实时预警平台研究与展望[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(2): 333–339.
- JIANG Fuxing, YANG Guangyu, WEI Quande, *et al.* Study and prospect on coal mine composite dynamic disaster real-time pre-warning platform[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(2): 333–339.
- [33] 赵旭生, 宁小亮, 张庆华, 等. 煤与瓦斯突出预警方法探讨[J]. *工矿自动化*, 2018, 44(1): 6–10.
- ZHAO Xusheng, NING Xiaoliang, ZHANG Qinghua, *et al.* Discussion on early warning method of coal and gas outburst[J]. *Industry and Mine Automation*, 2018, 44(1): 6–10.
- [34] 孙继平, 程继杰. 煤矿冲击地压和煤与瓦斯突出感知报警方法研究[J]. *工矿自动化*, 2022, 48(1): 1–6.
- SUN Jiping, CHENG Jijie. Study on the perception and alarm method of coal mine rock burst and coal and gas outburst[J]. *Industry and Mine Automation*, 2022, 48(1): 1–6.
- [35] 孙继平, 程继杰, 王云泉. 基于彩色图像的煤矿冲击地压和煤与瓦斯突出感知报警方法[J]. *工矿自动化*, 2022, 48(11): 1–5.
- SUN Jiping, CHENG Jijie, WANG Yunquan. Coal mine rock burst and coal and gas outburst perception alarm method based on color image[J]. *Industry and Mine Automation*, 2022, 48(11): 1–5.
- [36] 孙继平, 程继杰, 王云泉. 基于掩埋图像特征的煤矿冲击地压和煤与瓦斯突出感知报警方法[J]. *工矿自动化*, 2023, 49(5): 1–6, 21.
- SUN Jiping, CHENG Jijie, WANG Yunquan. A perception alarm method for coal mine rock burst and coal and gas outburst based on burial image features[J]. *Industry and Mine Automation*, 2023, 49(5): 1–6, 21.
- [37] 程继杰, 刘毅, 李小伟. 基于热红外图像的煤矿冲击地压和煤与瓦斯突出感知报警方法[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(5): 2236–2248.
- CHENG Jijie, LIU Yi, LI Xiaowei. Coal mine rock burst and coal and gas outburst perception alarm method based on thermal in-



- frared image[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(5): 2236–2248.
- [38] CHENG Jijie, LIU Yi, LI Xiaowei. Coal mine rock burst and coal and gas outburst perception alarm method based on visible light imagery[J]. *Sustainability*, 2023, 15(18): 13419.
- [39] 聂百胜, 马延崑, 孟筠青, 等. 中等尺度煤与瓦斯突出物理模拟装置研制与验证[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(5): 1218–1225.
- NIE Baisheng, MA Yankun, MENG Junqing, *et al.* Middle scale simulation system of coal and gas outburst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(5): 1218–1225.
- [40] 袁瑞甫, 李怀珍. 含瓦斯煤动态破坏模拟实验设备的研制与应用[J]. 煤炭学报, 2013, 38(S1): 117–123.
- YUAN Ruifu, LI Huaizhen. Development and application of simulation test apparatus for gassy coal dynamic failure[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(S1): 117–123.
- [41] 国家安全生产监督管理总局. 煤矿安全规程 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2022.
- [42] 张延松, 王德明, 朱红青. 煤矿爆炸、火灾及其防治技术 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2007.
- [43] 王开福. 图像处理技术及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [44] JIN ZHANG. 信息检索的可视化 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [45] 李荣华著. 双目立体视觉理论及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2020.