

基于图像顺滑度的矿井外因火灾识别 及抗干扰方法研究

孙继平, 李小伟

(中国矿业大学(北京) 人工智能学院, 北京 100083)

摘要: 图像监测是矿井火灾火焰主要感知方法, 但受矿井光源干扰. 图像圆形度和矩形度方法受摄像机安装位置、拍摄目标图像角度影响大, 难以排除矿井光源的干扰. 本文揭示了圆形灯、正方形灯和长方形灯等矿井光源图像实际边界周长近似等于其等面积矩形图像边界周长, 火焰图像实际边界周长明显大于其等面积矩形图像边界周长的特点. 提出图像顺滑度计算方法, 用形状与外接矩形图像相似、面积与目标图像面积相等的相似矩形周长, 除以图像实际边界周长的比值, 表示图像顺滑度. 目标图像顺滑度数值越小, 说明图像边界越不顺滑、凸凹越严重. 提出基于图像顺滑度的矿井外因火灾识别及抗干扰方法, 计算目标图像顺滑度, 根据矿井光源图像顺滑度数值较大, 而火焰图像顺滑度数值较小, 区分火焰与矿井光源. 本方法不受矿井光源形状、摄像机距检测目标距离和图像大小、摄像机安装位置及其拍摄检测目标的角度等影响, 适应范围广, 识别准确率高. 试验研究表明, 顺滑度识别火灾火焰图像准确率为 98.1%, 召回率为 97.9%; 矩形度识别准确率为 81%, 召回率为 78.9%; 圆形度识别准确率仅为 33.3%, 召回率为 28.9%.

关键词: 矿井火灾; 图像顺滑度; 图像边界; 火灾监测; 图像识别

中图分类号: TD 752.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1964(2025)01-0215-12

Research on identification and anti-interference method of mine external fire based on image smoothness

SUN Jiping, LI Xiaowei

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

Abstract: Image monitoring is the main sensing method for mine fire, but it is interfered by the light source in the mine. Image roundness and rectangularity methods are greatly affected by the camera installation position and the angle of the target image, and it is difficult to exclude the interference of the light source in the mine. It is revealed that the perimeter of the actual boundary of the image of the mine light source, such as circular lamp, square lamp and rectangular lamp, is approximately equal to the perimeter of the boundary of the rectangular image of the same area, while the perimeter of the actual boundary of the flame image is obviously larger than that of the boundary of the rectangular image of the same area, and other charac-

收稿日期: 2024-05-20 修回日期: 2024-09-05 DOI: 10.13247/j.cnki.jcmt.20240217

基金项目: 国家自然科学基金项目(52364017); 国家重点研发计划项目(2016YFC0801800)

通信作者: 李小伟(1991—), 男, 河南省商丘市人, 博士研究生, 从事矿井监控与灾害报警方面的研究.

E-mail: lxwcumtb@163.com Tel: 18813137095

引用格式: 孙继平, 李小伟. 基于图像顺滑度的矿井外因火灾识别及抗干扰方法研究[J]. 中国矿业大学学报, 2025, 54(1): 215-226.

SUN Jiping, LI Xiaowei. Research on identification and anti-interference method of mine external fire based on image smoothness[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2025, 54(1): 215-226.

teristics. The proposed image smoothness calculation method, with the shape and external rectangular image similar to the area of the target image area equal to the perimeter of the similar rectangle, divided by the image of the actual boundary perimeter of the ratio of the smoothness of the image. The smaller the value of the target image smoothness, the less smooth the image boundary is, and the more serious the convexity and concavity are. An image smoothness-based identification and anti-interference method for mine external fires is proposed, which calculates the smoothness of the target image and distinguishes the flame from the mine light source based on the large smoothness value of the mine light source and the small smoothness value of the flame image. This method is not affected by the shape of the mine light source, the distance of the camera from the detection target and the image size, the installation position of the camera and the angle of the camera and the detection target, etc. It has a wide range of adaptability and high recognition accuracy. The experimental study shows that the accuracy of recognizing the fire flame image by smoothness is 98.1%, and the recall rate is 97.9%; the accuracy of recognizing rectangularity is 81%, and the recall rate is 78.9%; and the accuracy of recognizing roundness is only 33.3%, and the recall rate is 28.9%.

Key words: mine fire; image smoothness; image boundaries; fire monitoring; image recognition

矿井外因火灾(以下简称矿井火灾)是煤矿重大特事故之一,严重威胁着矿工生命安全^[1-8]. 例如,2020年9月27日重庆能投渝新能源有限公司松藻煤矿发生重大火灾事故,造成16人死亡、42人受伤;2020年12月4日重庆市永川区吊水洞煤矿发生重大火灾事故,造成23人死亡;2023年9月24日,贵州盘江精煤股份有限公司山脚树煤矿井下发生皮带着火事故,造成16人死亡.火焰是矿井火灾的早期特征之一,因此,尽早感知矿井火灾的早期火焰,及时灭火,对避免或减少人员伤亡和财产损失具有重要意义^[9-12]. 图像监测^[13-17]是矿井火灾火焰的主要感知方法,具有监测范围广、不受日光、月光、星光及闪电等自然光源干扰等优点,但会受矿井巷道灯、矿灯、车灯、信号灯和指示灯等矿井光源影响.因此,排除矿井光源干扰,提高目标图像识别准确率,是矿井火灾火焰图像监测必须解决的问题.文献[4]提出了使用近红外与可见光相机结合,基于图像圆形度和矩形度的矿井火灾识别方法.文献[5]提出了使用近红外双目或可见光双目相机结合,基于图像圆形度和矩形度的矿井火灾识别方法.文献[4-5]均提出了采用图像圆形度和矩形度排除矿井光源干扰的方法,但无法排除非理想圆形和矩形光源图像的干扰.文献[18]提出了使用YOLOv5算法识别矿井火灾的方法,但需大量数据训练,算力要求较高,泛化能力差,当摄像机安装地点发生变化时,需再次补充训练.文献[19-23]研究了火焰与矿井光源的紫外

图像特征、近红外图像特征、单目可见光图像特征以及双目可见光图像特征,均提出了使用图像圆形度和矩形度排除矿井光源干扰的方法,虽可以排除理想圆形和矩形光源的干扰,但无法排除非理想圆形和矩形光源的干扰.在实际工程中,因摄像机的安装位置和拍摄目标图像角度不同,会导致矿井光源图像变形,不会呈现理想的圆形或矩形轮廓.因此,圆形度和矩形度方法受摄像机安装位置、拍摄目标图像角度影响大,难以排除矿井光源的干扰,难以满足实际工程应用需求.因此,研究受摄像机拍摄角度和距离影响小、受矿井光源干扰小、识别准确率高、识别速度快、模型迁移及泛化能力强、算力要求低的矿井火灾图像监测方法十分重要.

1 矿井光源和火焰图像特征

井下没有日光、月光、星光及闪电等自然光.巷道灯、矿灯、车灯、信号灯和指示灯等矿井光源影响矿井火灾图像识别^[13].矿井光源图像边界顺滑,主要有圆形、正方形、长方形等形状.矿井火灾火焰图像边界不顺滑且实时变化.因此,本文将研究火焰和矿井光源图像特征,提出受摄像机拍摄角度和距离影响小、受矿井光源干扰小、识别速度快、模型迁移及泛化能力强、算力要求低的矿井火灾图像感知方法.本文使用的矿井光源图像,为课题组采集自国家能源集团国神公司三道沟煤矿和国家能源集团宁夏煤业有限责任公司羊场湾煤矿

井下,采集区域包括井下巷道、综采工作面(以下简称采面)、硐室等区域。

1.1 矿井光源图像特征

矿井光源主要为圆形、正方形和长方形等形状的人造光源,光源设备轮廓固定无波动。但在矿井下,受摄像机安装位置、拍摄角度和拍摄距离影响,光源图像边界的形状和大小均发生了改变,如图1a、图2a和图3a所示。在工程实际中,火焰及矿井光源图像像素点值存在不均衡的情况;而火焰及矿井光源均是主动发光光源,其图像像素点值与环境背景像素点值差别较大。因此本文采用中值滤波对图像进行了平滑处理和噪声滤除。为得到边界清晰的图像,本文采用Otsu自动阈值选取法对图像进行二值化处理。图1a所示圆形光源图像经二值化处理后,得到边界清晰的二值化圆形光源图像,如图1b所示。圆形光源图像虽为非理想圆形形状,但图像边界具有顺滑、无内凹等特征。

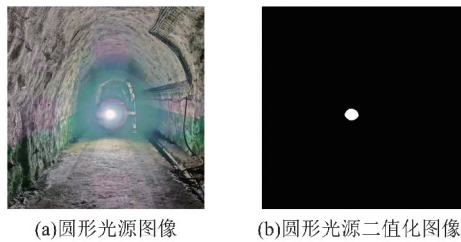


图1 圆形光源及图像特征

Fig. 1 Circular light source and image features

图2a所示正方形光源图像经二值化处理后,得到边界清晰的二值化正方形光源图像,如图2b所示。正方形光源图像虽为非理想正方形形状,但图像边界具有顺滑、无内凹等特征。

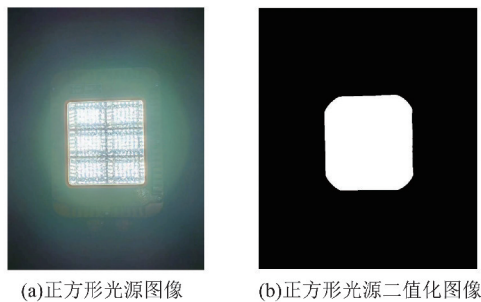


图2 正方形光源及图像特征

Fig. 2 Square light source and image features

图3a所示长方形光源图像经二值化处理后,得到边界清晰的二值化长方形光源图像,如图3b所示。长方形光源图像虽为非理想长方形形状,但图像边界具有顺滑、无内凹等特征。

其中,摄像机安装位置和摄像角度改变了光

源图像的形状,摄像距离的远近改变了光源图像的大小。但摄像机安装位置、摄像角度和距离,不会改变矿井光源图像边界顺滑、无内凹等特征。风流扰动^[24]不会改变光源的形状,更不会改变矿井光源图像边界顺滑、无内凹等特征。

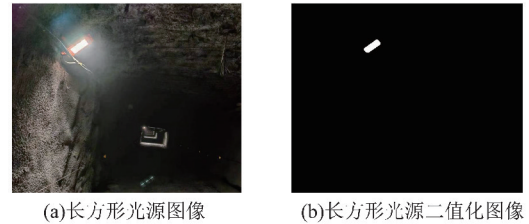


图3 长方形光源及图像特征

Fig. 3 Rectangle light source and image features

1.2 火焰图像特征

火灾早期火焰图像具有边界不顺滑、实时动态变化等特点,如图4a所示。火焰图像经二值化处理后,得到边界清晰的二值化火焰图像,如图4b所示。火焰图像具有边界不顺滑、明显凸凹、无规律变化等特征。

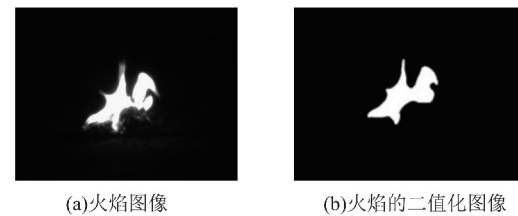


图4 火焰及图像特征

Fig. 4 Flame and image features

摄像机安装位置和摄像角度可改变火焰图像的形状,摄像距离的远近可改变火焰图像的大小。但摄像机安装位置、摄像角度和距离,不会改变火焰图像边界不顺滑、明显凸凹等特征。风流扰动能够改变火焰的形状,但不会改变火焰边界的凸凹和不顺滑特性。

2 矿井光源和火焰图像顺滑度计算

2.1 图像顺滑度计算方法

根据上述矿井光源和火焰图像特征,本文提出用形状和外接矩形图像相似、面积和目标图像面积相等的相似矩形周长(以下简称等面积矩形周长)与图像实际边界周长(以下简称图像周长)的比值(以下简称图像顺滑度),来区分火焰与矿井光源。目标图像顺滑度数值越小,说明图像边界越不顺滑、凸凹越严重。

本文提出图像顺滑度计算方法如下:

1)根据式(1)计算目标图像面积^[25]。

$$S = \frac{1}{2} [(x_1 y_2 - x_2 y_1) + (x_2 y_3 - x_3 y_2) + \cdots + (x_m y_1 - x_1 y_m)], \quad (1)$$

式中: S 为目标图像面积; $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \cdots, (x_m, y_m)$ 为图像边界上逆时针依次排列的所有坐标点, x_1, x_2, \cdots, x_m 为边界坐标点行坐标值, y_1, y_2, \cdots, y_m 为边界坐标点列坐标值。

2) 根据式(2)计算目标图像最小外接矩形的长宽比。

$$k = \frac{H}{Q}, \quad (2)$$

式中: k 为目标图像最小外接矩形的长宽比; H 和 Q 分别为目标图像最小外接矩形的长和宽。

3) 根据式(3)计算目标图像等面积矩形的长和宽。

$$\begin{cases} h = \sqrt{kS}, \\ q = \sqrt{\frac{S}{k}}, \end{cases} \quad (3)$$

式中: h 和 q 分别为目标图像等面积矩形的长和宽。

4) 根据所求目标图像等面积矩形的长和宽, 计算目标图像等面积矩形周长, 如式(4)所示。

$$l = 2(h + q), \quad (4)$$

式中 l 为目标图像等面积矩形的周长。

将式(3)代入式(4), 得到目标图像等面积矩形周长计算公式(5):

$$l = 2(\sqrt{kS} + \sqrt{\frac{S}{k}}). \quad (5)$$

5) 根据式(6)计算目标图像周长^[26]。

$$L = \sum_{i=1}^m \sqrt{(x_i - x_{i+1})^2 + (y_i - y_{i+1})^2}, \quad (6)$$

式中: L 为目标图像周长; 当 $i = \max\{1, 2, 3, \cdots, m\}$, 则 $i+1=1$ 。

6) 根据目标图像等面积矩形周长 l 、图像周长 L 和式(7), 计算图像顺滑度 G 。

$$G = \frac{l}{L}. \quad (7)$$

2.2 矿井光源图像顺滑度计算

根据式(1)计算图 1b 所示矿井圆形光源图像面积 $S_y = 872.5$ (为便于计算, 面积采用无量纲值, 数值精确到小数点后一位, 下同)。矿井圆形光源图像最小外接矩形如图 5 所示。根据图像最小外接矩形长和宽及式(2)计算圆形光源图像最小外接矩形的长宽比 $k_y = 1.02$ (为便于计算, 长宽比数值精确到小数点后两位, 下同)。根据式(5)计算矿井圆形光源图像等面积矩形周长 $l_y = 118.2$ (为

便于计算, 周长采用无量纲值, 数值精确到小数点后一位, 下同)。根据式(6)计算矿井圆形光源图像周长 $L_y = 111.6$ 。根据式(7)计算矿井圆形光源图像顺滑度 $G_y = 1.059$ (为便于比较, 顺滑度采用无量纲值, 数值精确到小数点后三位, 下同)。由圆形光源图像顺滑度可知, 圆形光源图像周长近似等于其等面积矩形周长, 矿井圆形光源图像顺滑度数值较大。

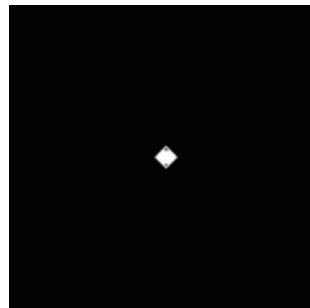


图 5 圆形光源图像最小外接矩形
Fig. 5 Minimum bounding rectangle of circular light sources image

根据式(1)计算图 2b 所示矿井正方形光源图像面积 $S_z = 77585.0$ 。矿井正方形光源图像最小外接矩形如图 6 所示。根据图像最小外接矩形长和宽及式(2)计算矿井正方形光源图像最小外接矩形的长宽比 $k_z = 1.08$ 。根据式(5)计算矿井正方形光源图像等面积矩形周长 $l_z = 1114.9$ 。根据式(6)计算矿井正方形光源图像周长 $L_z = 1060.4$ 。根据式(7)计算矿井正方形光源图像顺滑度 $G_z = 1.051$ 。由正方形光源图像顺滑度可知, 矿井正方形光源图像周长近似等于其等面积矩形周长, 矿井正方形光源图像顺滑度数值较大。



图 6 正方形光源图像最小外接矩形
Fig. 6 Minimum bounding rectangle of square light sources image

根据式(1)计算图 3b 所示矿井长方形光源图像面积 $S_c = 1248.0$ 。矿井长方形光源图像最小外接矩形如图 7 所示。根据图像最小外接矩形长和宽及式(2)计算长方形光源图像最小外接矩形的长

宽比 $k_c = 2.68$ 。根据式(5)计算矿井长方形光源图像等面积矩形周长 $l_c = 158.8$ 。根据式(6)计算矿井长方形光源图像周长 $L_c = 159.1$ 。根据式(7)计算矿井长方形光源图像顺滑度 $G_c = 0.998$ 。由长方形光源图像顺滑度可知,矿井长方形光源图像周长近似等于其等面积矩形周长,矿井长方形光源图像顺滑度数值较大。

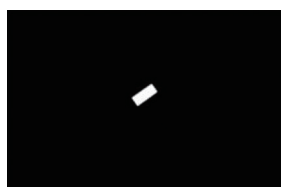


图 7 长方形光源图像最小外接矩形
Fig. 7 Minimum bounding rectangle of rectangular light sources image

2.3 火焰图像顺滑度计算

根据式(1)计算图 4b 所示火焰图像面积 $S_a = 8705.0$ 。火焰图像最小外接矩形如图 8 所示。根据图像最小外接矩形长和宽及式(2)计算火焰图像最小外接矩形的长宽比 $k_a = 1.57$ 。根据式(5)计算火焰图像等面积矩形周长 $l_a = 382.6$ 。根据式(6)计算火焰图像周长 $L_a = 647.8$ 。根据式(7)计算火焰图像顺滑度 $G_a = 0.591$ 。由火焰图像顺滑度可知,火焰图像周长明显大于其等面积矩形周长,火焰图像顺滑度数值较小。

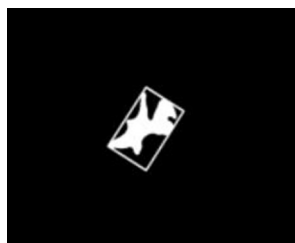


图 8 火焰图像最小外接矩形
Fig. 8 Minimum bounding rectangle of flame image

上述研究表明:圆形、正方形和长方形等矿井光源图像周长近似等于其光源等面积矩形周长,矿井光源图像顺滑度数值较大;火焰图像周长明显大于其等面积矩形周长,火焰图像顺滑度数值较小。

3 基于图像顺滑度的矿井外因火灾识别及抗干扰方法

根据火焰图像顺滑度数值较小,矿井光源图像顺滑度数值较大的特征,本文提出了基于图像顺滑度的矿井外因火灾识别及抗干扰方法,根据图像顺滑度大小区分火焰与矿井光源,如图 9 所示

(图中 N 为报警阈值)。

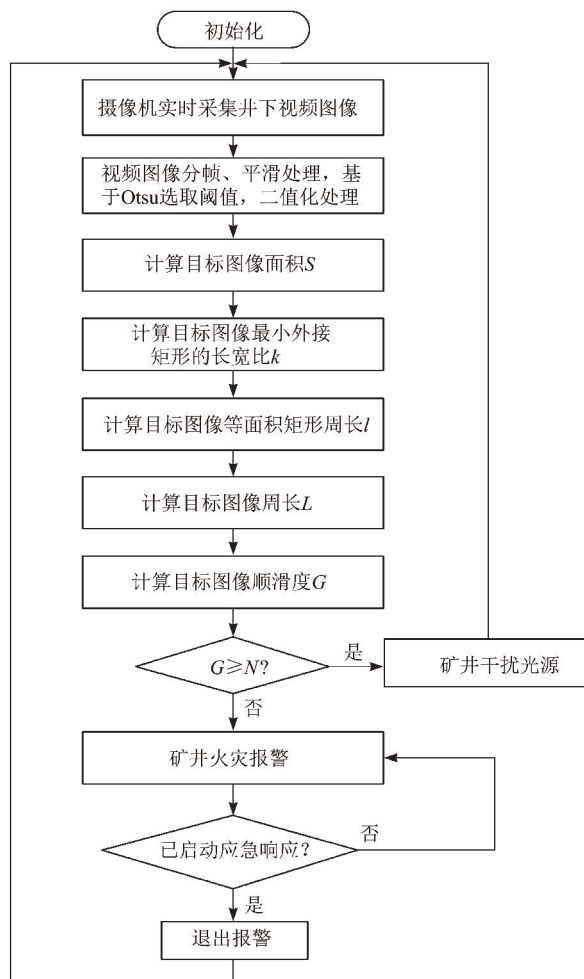


图 9 基于图像顺滑度的矿井外因火灾识别及抗干扰方法
Fig. 9 Recognition and anti-interference method of mine external fire based on image smoothness

基于图像顺滑度的矿井外因火灾识别及抗干扰方法识别步骤如下:

- 1)采集图像并二值化处理:摄像机实时采集井下监控区域视频图像,然后对视频图像进行分帧预处理、平滑处理,并基于 Otsu 选取阈值,二值化处理帧图像,得到边界清晰的目标图像。
- 2)计算目标图像面积:根据式(1)计算目标图像面积 S 。
- 3)计算目标图像最小外接矩形的长宽比:作目标图像最小外接矩形,测量其长和宽,根据式(2)计算其长宽比 k 。
- 4)计算目标图像等面积矩形周长:根据式(3)计算目标图像等面积矩形的长和宽;根据式(5)计算目标图像等面积矩形的周长 l 。
- 5)计算目标图像周长:根据式(6)计算目标图像周长 L 。
- 6)计算目标图像顺滑度与报警判别:根据式

(7)计算目标图像顺滑度 G ;若目标图像顺滑度 $G < N$,则发出矿井火灾报警;若目标图像顺滑度 $G \geq N$,则判定为矿井干扰光源,返回继续监测。

7)应急响应:矿井火灾报警后,若没有启动应急响应,则持续进行矿井火灾报警.若已启动应急响应,则退出当前报警状态,返回继续监测。

由于噪声和矿井光源实际边界尺寸非理想等因素,矿井光源图像周长存在较小误差.因此,需设定一个合理的阈值 N ,减少噪声和矿井光源非理想等因素的影响. N 应按式(8)选取:

$$N_2 < N < N_1, \quad (8)$$

式中: N_1 为矿井光源图像顺滑度最小值; N_2 为火焰图像顺滑度最大值。

为提高抗干扰能力,报警阈值 N 应按式(9)计算:

$$N = \frac{(N_1 + N_2)}{2}. \quad (9)$$

本方法采用等面积矩形周长与图像周长的比值区分火焰与矿井光源.因此,本方法不受摄像机距检测目标距离、图像大小等因素影响.本方法根据圆形、正方形和长方形等矿井光源图像边界顺滑、无内凹的特点识别矿井光源;根据火焰图像边界不顺滑、明显凸凹的特点识别火焰.边界顺滑、无内凹的矿井光源图像,经旋转和缩放后,仍为边界顺滑、无内凹的图像.因此,摄像机安装位置及摄像角度,不影响本方法对矿井光源的识别.摄像机安装位置、摄像角度和距离,也不会改变火焰图像边界不顺滑、明显凸凹等特征.因此,本方法不受矿井光源形状、摄像机距检测目标距离和图像大小、摄像机安装位置及摄像角度、风流扰动等影响,适用范围广,识别准确率高。

4 试验研究与方法对比分析

4.1 矿井光源图像顺滑度试验

使用课题组在国家能源集团国神公司三道沟煤矿和国家能源集团宁夏煤业有限责任公司羊场湾煤矿,现场采集的煤矿井下不同拍摄角度和拍摄距离的真实矿井光源图像,进行图像顺滑度计算,以检验本方法抗矿井光源干扰的能力。

图10a为巷道圆形照明灯1的图像,摄像机距离灯约2 m拍摄,光源与摄像机镜头约成 30° 夹角.图10b,10c分别为计算机处理后的巷道圆形照明灯1图像面积、图像最小外接矩形.分别根据式(1),(2),(5),(6)和(7)计算得到,巷道圆形照明灯1图像面积 $S_y = 14779.5$,图像最小外接矩形的

长宽比 $k_y = 4.28$,图像等面积矩形周长 $l_y = 621.0$,图像周长 $L_y = 640.6$,图像顺滑度 $G_y = 0.969$ 。



图10 巷道圆形照明灯1及图像面积

Fig. 10 Circular lighting lamp 1 and image area in the tunnel

图11a为巷道圆形照明灯2图像,摄像机距离灯约4 m拍摄,光源与摄像机镜头约成 40° 夹角.图11b,11c分别为计算机处理后的巷道圆形照明灯2图像面积、图像最小外接矩形.分别根据式(1),(2),(5),(6)和(7)计算得到,巷道圆形照明灯2图像面积 $S_y = 11644.0$,图像最小外接矩形的长宽比 $k_y = 3.06$,图像等面积矩形周长 $l_y = 500.9$,图像周长 $L_y = 500.8$,图像顺滑度 $G_y = 1.000$ 。

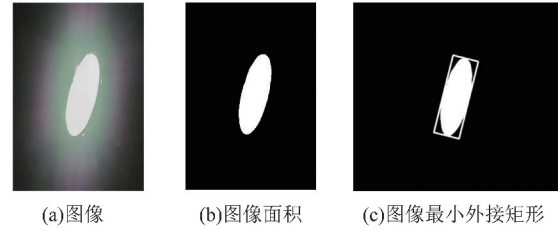


图11 巷道圆形照明灯2及图像面积

Fig. 11 Circular lighting lamp 2 and image area in the tunnel

图12a为巷道正方形照明灯图像,摄像机距离灯约7 m拍摄,光源与摄像机镜头约成 55° 夹角.图12b,12c分别为计算机处理后的巷道正方形照明灯图像面积、图像最小外接矩形.分别根据式(1),(2),(5),(6)和(7)计算得到,巷道正方形照明灯图像面积 $S_z = 6259.5$,图像最小外接矩形的长宽比 $k_z = 2.92$,图像等面积矩形周长 $l_z = 363.0$,图像周长 $L_z = 360.5$,图像顺滑度 $G_z = 1.007$ 。

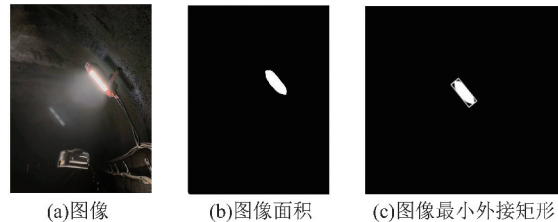


图12 巷道正方形照明灯及图像面积

Fig. 12 Square lighting and image area in the roadway

图13a为采面长方形照明灯图像,摄像机距离

灯约 6 m 拍摄,光源与摄像机镜头约成 80°夹角. 图 13b,13c 分别为计算机处理后的采面长方形照明灯图像面积、图像最小外接矩形. 分别根据式(1),(2),(5),(6)和(7)计算得到,采面长方形照明灯图像面积 $S_c = 1573.0$, 图像最小外接矩形的长宽比 $k_c = 4.84$, 图像等面积矩形周长 $l_c = 210.6$, 图像周长 $L_c = 210.4$, 图像顺滑度 $G_c = 1.001$.

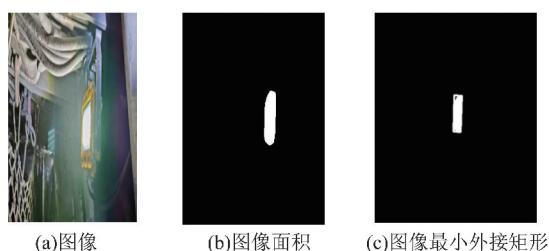


图 13 采面长方形照明灯及图像面积

Fig. 13 Rectangular light and image area of fully mechanized mining face

图 14a 为硐室长方形照明灯图像,摄像机距离灯约 3 m 拍摄,光源与摄像机镜头约成 65°夹角. 图 14b,14c 分别为计算机处理后的硐室长方形照

明灯图像面积、图像最小外接矩形. 分别根据式(1),(2),(5),(6)和(7)计算得到,硐室长方形照明灯图像面积 $S_c = 6566.0$, 图像最小外接矩形的长宽比 $k_c = 7.89$, 图像等面积矩形周长 $l_c = 512.9$, 图像周长 $L_c = 556.9$, 图像顺滑度 $G_c = 0.921$.

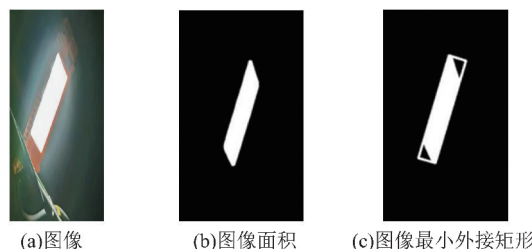


图 14 硐室长方形照明灯及图像面积

Fig. 14 Rectangular lighting and image area in the chamber

如图 10~14 所示,圆形、正方形及长方形光源图像边界因摄像角度发生了明显变化,但本文提出的顺滑度方法仍然很好地识别了光源图像,如表 1 所示(为便于比较,计算数值均采用无量纲值),光源图像顺滑度最大为 1.007,最小为 0.921.

表 1 矿井光源图像顺滑度

Table 1 The smoothness of mine light source image

图像类别	拍摄角度/(°)	拍摄距离/m	图像面积 S	图像外接矩形长宽比 k	图像等面积矩形周长 l	图像周长 L	图像顺滑度 G
巷道圆形灯 1	30	2	14 779.5	4.28	621.0	640.6	0.969
巷道圆形灯 2	40	4	11 644.0	3.06	500.9	500.8	1.000
巷道正方形灯	55	7	6 259.5	2.92	363.0	360.5	1.007
硐室长方形灯	65	3	6 566.0	7.89	512.9	556.9	0.921
采面长方形灯	80	6	1 573.0	4.84	210.6	210.4	1.001

4.2 火焰图像顺滑度试验

图 15a 为明火火焰图像,摄像机距光源约 5 m 拍摄,火焰与摄像机镜头平行. 图 15b,15c 分别为计算机处理后的火焰图像面积、火焰图像最小外接矩形. 分别根据式(1),(2),(5),(6)和(7)计算得到,火焰图像面积 $S_a = 11522.5$, 图像最小外接矩形的长宽比 $k_a = 1.57$, 图像等面积矩形周长 $l_a = 440.4$, 图像周长 $L_a = 804.9$, 图像顺滑度 $G_a = 0.547$.



图 15 明火火焰及图像面积

Fig. 15 Open flame and image area

4.3 报警阈值选取与识别试验结果分析

4.3.1 报警阈值选取

根据式(8)可知,报警阈值 N 需小于矿井光源图像顺滑度最小值 N_1 , 大于火焰图像顺滑度最大值 N_2 . 本试验分别选取多组火焰和矿井光源图像,计算其图像顺滑度,并根据式(9)计算阈值 N . 图像顺滑度如表 2 所示,其中火焰图像顺滑度最大值为 $N_2 = 0.725$. 矿井光源图像顺滑度最小值为 $N_1 = 0.921$. 因此,根据式(9)计算可得火灾火焰图像的报警阈值 $N = 0.823$.

4.3.2 识别结果分析

4.1 节及 4.2 节数据样本试验结果如表 3 所示(为便于比较,计算数值均采用无量纲值),将报警阈值设为 $N = 0.823$,通过计算机进行火灾识别和报警. 计算机识别火焰图像顺滑度 $G_a = 0.547$, 满足火灾报警条件,被正确识别为火灾图像. 巷道

圆形照明灯 1、巷道圆形照明灯 2、巷道正方形照明灯、硐室长方形照明灯、采面长方形照明灯等矿井光源图像的顺滑度分别为 0.969, 1.000, 1.007,

0.921, 1.001, 均不满足火灾报警条件, 被正确识别为矿井火灾干扰源图像。

表 2 火灾火焰报警阈值选取
Table 2 Selection of fire flame alarm threshold

图像类别	图像顺滑度									
	图像 1	图像 2	图像 3	图像 4	图像 5	图像 6	图像 7	图像 8	图像 9	图像 10
火焰	0.591	0.547	0.581	0.725	0.677	0.643	0.701	0.522	0.714	0.707
矿井光源	1.059	1.051	0.988	0.969	1.000	1.007	1.001	0.921	0.961	0.994

表 3 火焰及其干扰光源图像识别结果
Table 3 Image recognition results of flame and its interference light sources

图像类别	拍摄角度/(°)	等面积矩形周长 l	图像周长 L	图像顺滑度 G	G 与 N 比较	识别结果
火焰	0	440.4	804.9	0.547	$G < N$	火焰
巷道圆形灯 1	30	621.0	640.6	0.969	$G > N$	干扰光源
巷道圆形灯 2	40	500.9	500.8	1.000	$G > N$	干扰光源
巷道正方形灯	55	363.0	360.5	1.007	$G > N$	干扰光源
硐室长方形灯	65	512.9	556.9	0.921	$G > N$	干扰光源
采面长方形灯	80	210.6	210.4	1.001	$G > N$	干扰光源

4.4 本方法与圆形成度和矩形度识别方法消融对比

4.4.1 算法结构对比

本文算法流程为:1)采集视频图像;2)对视频图像分帧;3)对帧图像进行去噪、二值化处理;4)计算目标图像面积;5)计算目标图像周长、最小外接矩形长宽比和目标图像等面积矩形周长;6)计算目标图像顺滑度;7)进行条件判定;8)输出报警信号;9)启动应急响应及退出报警,返回继续监测。

矩形度算法流程为:1)采集视频图像;2)对视频图像分帧;3)对帧图像进行去噪、二值化处理;4)计算目标图像面积;5)计算目标图像最小外接矩形面积;6)计算目标图像矩形度;7)进行条件判定;8)输出报警信号;9)启动应急响应及退出报警,返回继续监测。

圆形度算法流程为:1)采集视频图像;2)对视频图像分帧;3)对帧图像进行去噪、二值化处理;4)计算目标图像面积;5)计算目标图像最小外接圆面积;6)计算目标图像圆形度;7)进行条件判定;8)输出报警信号;9)启动应急响应及退出报警,返回继续监测。

在算法流程上,本方法与同样采用单帧图像的矩形度和圆形度算法相比,关键步骤 5)和 6)进行了创新,与矩形度和圆形度算法完全不同。

4.4.2 识别效果对比分析

圆形度和矩形度是目前矿井火灾主要识别方法^[19]。

圆形度指目标图像轮廓接近于理想圆形的程度^[19],其计算公式如式(10)所示。理想圆形图像的圆形度 $Y=1$ 。火焰图像圆形度较小,非圆形矿井光源的圆形度也较小。因此,圆形度难以排除非圆形矿井光源对火焰识别的干扰。

$$Y = \frac{4\pi S}{L^2}, \quad (10)$$

式中: Y 为圆形度; S 为目标图像面积; L 为目标图像周长。

矩形度指目标图像轮廓接近于理想矩形的程度^[22],计算公式如式(11)所示。理想矩形图像的矩形度 $R=1$ 。火焰图像矩形度较小,非矩形矿井光源的矩形度也较小。因此,矩形度难以排除非矩形矿井光源对火焰识别的干扰。

$$R = \frac{S}{S_j}, \quad (11)$$

式中: R 为矩形度; S_j 为目标图像最小外接矩形的面积。

使用圆形度及矩形度方法识别上述矿井光源图像和火焰图像,经计算机程序自动处理后,得到图 10 所示巷道圆形灯 1 图像的圆形度为 45.3%,矩形度为 78.1%;图 11 所示巷道圆形灯 2 图像的

圆形度为 58.3%，矩形度为 78.1%；图 12 所示巷道正方形灯图像的圆形度为 60.5%，矩形度为 78.3%；图 13 所示采面长方形灯图像的圆形度为 44.6%，矩形度为 85.9%；图 14 所示硐室长方形灯图像的圆形度为 25.5%，矩形度为 78.0%；图 15 所示火焰图像的圆形度为 22.3%，矩形度为 41.3%。

根据圆形度、矩形度与顺滑度识别火焰及矿井光源图像，结果对比如表 4 所示。采用火焰识别方法计算得到的矿井光源与火焰各指标数值的差值越大，越便于区分矿井光源与火焰，抗干扰能力越强。采用圆形度、矩形度与顺滑度识别方法计算得到的矿井光源与火焰各指标的差值如图 16 所示。采用顺滑度识别方法计算得到的矿井光源与火焰图像顺滑度的差值最小为 37.4%，最大为 45.4%。

4%，平均差值为 43.3%，波动较小，平均差值最大，区分度最好，受摄像机拍摄角度及距离影响最小，抗干扰能力最强。采用矩形度识别方法计算得到的矿井光源与火焰图像矩形度的差值最小为 36.7%，最大为 44.6%，平均差值为 38.4%，波动较小，平均差值居中，区分度较好，受摄像机拍摄角度及距离影响较小，抗干扰能力一般。采用圆形度识别方法计算得到的矿井光源与火焰图像圆形度的差值最小为 3.2%，最大为 38.2%，平均差值为 24.5%，波动最大，平均差值最小，区分度最差，受摄像机拍摄角度影响大，抗干扰能力差。因此，本文提出的顺滑度识别方法，优于矩形度和圆形度识别方法，受摄像机拍摄角度及距离影响最小，抗干扰能力最强。

表 4 火焰及矿井光源图像顺滑度与圆形度、矩形度识别方法对比
Table 4 Comparison of recognition methods for circularity, rectangularity and smoothness of flame and mine light source images

图像类别	拍摄角度/(°)	圆形度/%	光源与火焰圆形度差值/%	矩形度/%	光源与火焰矩形度差值/%	顺滑度/%	光源与火焰顺滑度差值/%
火焰	0	22.3		41.3		54.7	
巷道圆形灯 1	30	45.3	23.0	78.1	36.8	96.9	42.2
巷道圆形灯 2	40	58.3	36.0	78.1	36.8	100.0	45.3
巷道正方形灯	55	60.5	38.2	78.3	37.0	100.7	46.0
硐室长方形灯	65	25.5	3.2	78.0	36.7	92.1	37.4
采面长方形灯	80	44.6	22.3	85.9	44.6	100.1	45.4

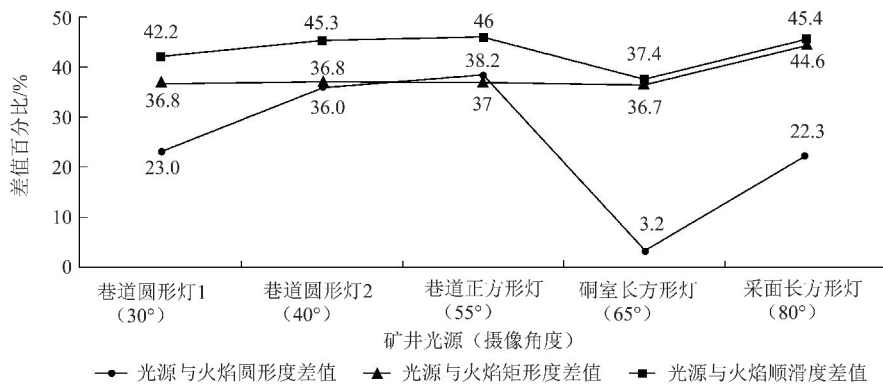


图 16 本方法与圆形度及矩形度识别方法比较

Fig. 16 Comparison of this method with circularity and rectangularity recognition algorithms

4.4.3 识别准确率及召回率对比分析

本文采用准确率及召回率^[27]对识别试验结果进行对比分析。

准确率是指所有样本中，预测正确的样本所占的比例，准确率 A 计算公式如式(12)所示。

$$A = \frac{C_{TP} + C_{TN}}{C_{TP} + C_{FP} + C_{TN} + C_{FN}}, \quad (12)$$

式中：C 为样本数量；下标“TP”表示正类样本被判定为正类；下标“FP”表示负类样本被判定为正类；下标“FN”表示正类样本被判定为负类；下标“TN”表示负类样本被判定为负类。

召回率是指所有正类样本中，被判定为正类的样本所占的比例。召回率 Z 计算公式如式(13)所示。

$$Z = \frac{C_{TP}}{C_{TP} + C_{FN}} \quad (13)$$

为验证本文提出的图像顺滑度识别火灾火焰图像的优势,笔者将火焰图像作为正类样本,矿井光源图像作为负类样本,计算该方法识别的准确率及召回率,并与现有识别方法的识别准确率及召回率进行对比分析。试验测试样本共 210 组,其中火焰图像 190 组,矿井光源图像 20 组。根据式(9)及表 4 数据样本,计算得到圆形度识别报警阈值为 0.239,矩形度识别报警阈值为 0.597。

识别分类结果如表 5 所示。本文提出的顺滑度识别方法的识别准确率达到 98.1%,比矩形度法高 17.1%,比圆形度法高 64.8%。本文提出的顺滑度识别方法的识别召回率为 97.9%,比矩形度法高 19%,比圆形度法高 69%。综上分析,本文提出的顺滑度识别方法是对识别方法中最优的。

表 5 顺滑度与圆形度、矩形度识别准确率及召回率对比
Table 5 Comparison of recognition accuracy and recall between smoothness, circularity, and rectangularity

算法类别	准确率 A/%	召回率 Z/%
顺滑度	98.1	97.9
矩形度	81.0	78.9
圆形度	33.3	28.9

因此,通过消融对比试验可知:本文提出的顺滑度识别方法,识别准确率最高,区分度最好,受摄像机拍摄角度及距离影响最小,抗干扰能力最强。

近期火灾识别先进算法主要为基于深度学习网络模型 YOLO、CNN 等模型的系列算法^[18,28-31],该类算法模型需大量数据训练,算力要求较高,决策过程解释性差,泛化能力差,当摄像机安装地点发生变化时,需再次补充训练。本文提出的基于图像顺滑度的矿井外因火灾识别方法,采用单帧图像即可完成火灾火焰识别,具有识别速度快、模型迁移及泛化能力强、决策过程可解释性强、算力要求低、适用于云、边、端各种场景布置等优点。

矿井火灾早期点状火焰和电缆线状火焰的图像都具有边界不顺滑、明显凸凹的特点。因此,本方法不仅适用于矿井火灾早期点状火焰识别,还可用于电缆线状火焰识别。将本方法用于双目相机监测矿井火灾,不仅能够识别火灾火焰,还可判定火源位置与火源大小。

本文提出的顺滑度方法不但可用于煤矿和非煤矿山矿井火灾图像识别,还可用于公路隧道和铁路隧道等火灾图像识别。该方法还可减小火灾

巡检机器人因摄像机移动对火焰识别的影响。

5 结 论

1) 矿井火灾火焰图像监测受矿井巷道灯、矿灯、车灯、信号灯和指示灯等矿井光源影响。图像圆形度和矩形度识别方法受摄像机安装位置、拍摄目标图像角度影响大,难以排除矿井光源的干扰。

2) 圆形、正方形和长方形等矿井光源图像具有边界顺滑、无内凹等特征。火焰图像具有边界不顺滑、明显凸凹等特征。圆形灯、正方形灯和长方形灯等矿井光源图像实际边界周长近似等于其等面积矩形图像边界周长,火焰图像实际边界周长明显大于其等面积矩形图像边界周长。

3) 提出图像顺滑度计算方法,用形状与外接矩形图像相似、面积与目标图像面积相等的相似矩形周长,除以图像实际边界周长的值,表示图像顺滑度。目标图像顺滑度数值越小,说明图像边界越不顺滑、凸凹越严重。

4) 提出基于图像顺滑度的矿井外因火灾识别及抗干扰方法,计算目标图像顺滑度,根据矿井光源图像顺滑度数值较大,而火焰图像顺滑度数值较小,来区分火焰与矿井光源。本方法不受矿井光源形状、摄像机距检测目标距离和图像大小、摄像机安装位置及其拍摄检测目标的角度等影响,适应范围广,识别准确率高。

5) 本文提出的图像顺滑度方法识别火灾火焰图像准确率为 98.1%,召回率为 97.9%;矩形度识别准确率为 81%,召回率为 78.9%;圆形度识别准确率仅为 33.3%,召回率为 28.9%。本文提出的图像顺滑度方法优于图像矩形度和圆形度识别方法,受摄像机拍摄角度及距离影响最小,抗干扰能力最强。该方法不但可用于煤矿和非煤矿山矿井火灾图像识别,还可用于公路隧道和铁路隧道等火灾图像识别。

本文没有研究日光、月光、星光及闪电等自然光源对本文提出方法的影响。因此,不能将本文提出的方法直接用于地面露天火灾图像识别。需进一步研究日光、月光、星光及闪电等自然光源对本文提出方法的影响,以便确定本文提出的方法能否用于地面露天火灾图像识别。

参考文献:

- [1] 孙继平,钱晓红. 煤矿重特大事故应急救援技术及装备[J]. 煤炭科学技术,2017,45(1):112-116.

- SUN Jiping, QIAN Xiaohong. Emergency rescue technology and equipment of mine extraordinary accidents[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(1): 112-116.
- [2] 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]. Industry and Mine Automation, 2015, 41(3): 1-5.
- [3] 孙继平, 孙雁宇. 矿井火灾监测与趋势预测方法研究[J]. 工矿自动化, 2019, 45(3): 1-4.
- SUN Jiping, SUN Yanyu. Research on methods of mine fire monitoring and trend prediction[J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(3): 1-4.
- [4] 孙继平, 崔佳伟. 矿井外因火灾感知方法[J]. 工矿自动化, 2021, 47(4): 1-5.
- SUN Jiping, CUI Jiawei. Mine external fire sensing method [J]. Industry and Mine Automation, 2021, 47(4): 1-5.
- [5] 孙继平, 李月. 基于双目视觉的矿井外因火灾感知与定位方法[J]. 工矿自动化, 2021, 47(6): 12-16.
- SUN Jiping, LI Yue. Binocular vision-based perception and positioning method of mine external fire[J]. Industry and Mine Automation, 2021, 47(6): 12-16.
- [6] 孙继平, 孙雁宇, 范伟强. 基于可见光和红外图像的矿井外因火灾识别方法[J]. 工矿自动化, 2019, 45(5): 1-5.
- SUN Jiping, SUN Yanyu, FAN Weiqiang. Mine exogenous fire identification method based on visible light and infrared image [J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(5): 1-5.
- [7] 李增华, 苗国栋. 煤自燃大分子量气态产物生成规律研究[J]. 中国矿业大学学报, 2023, 52(6): 1119-1128.
- LI Zenghua, MIAO Guodong. Study of the emission law of higher-molecular-weight gases during coal spontaneous combustion[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2023, 52(6): 1119-1128.
- [8] 聂百胜, 张豪, 宫婕, 等. 煤粉爆炸宏细观四阶段反应机理[J]. 中国矿业大学学报, 2023, 52(6): 1129-1145.
- NIE Baisheng, ZHANG Hao, GONG Jie, et al. Macro and micro four-stage reaction mechanism of pulverized coal explosion [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2023, 52(6): 1129-1145.
- [9] 宋兆雪, 张伟, 侯玉亭, 等. 矿井火灾研究领域的知识图谱分析[J]. 煤炭科技, 2023, 44(4): 1-6.
- SONG Zhaoxue, ZHANG Wei, HOU Yuting, et al. Knowledge graph analysis in the field of mine fires research [J]. Coal Science & Technology Magazine, 2023, 44(4): 1-6.
- [10] 宋志强, 崔传波, 邓存宝. 巷道环境与产烟产热影响下的矿井火灾避灾路径选择[J]. 矿业安全与环保, 2023, 50(5): 130-136.
- SONG Zhiqiang, CUI Chuanbo, DENG Cunbao. Selection of mine fire avoidance path under the influence of the roadway environment and the production of smoke and heat [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2023, 50(5): 130-136.
- [11] 骆铁楠. 基于时间平滑多特征量火灾快速识别算法[J]. 煤炭技术, 2021, 40(5): 132-134.
- LUO Tienan. Fast recognition algorithm research of fire flame based on multifeatures longitude regression with temporal smoothing [J]. Coal Technology, 2021, 40(5): 132-134.
- [12] 郑学召, 回硕, 文虎, 等. 矿井火灾孕灾机制及防控技术研究进展[J]. 煤矿安全, 2017, 48(10): 148-151.
- ZHENG Xuezhao, HUI Shuo, WEN Hu, et al. Research progress on preventing and controlling technology and disaster-forming mechanism of mine fire [J]. Safety in Coal Mines, 2017, 48(10): 148-151.
- [13] 范伟强. 矿井外因火灾双光谱图像监测方法研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2022: 7-58.
- FAN Weiqiang. Research on dual-spectrum image monitoring method for mine external fire [D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2022: 7-58.
- [14] 熊昊, 李伟. 基于SVM的视频火焰检测算法[J]. 传感器与微系统, 2020, 39(1): 143-145.
- XIONG Hao, LI Wei. Video flame detection algorithm based on SVM [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2020, 39(1): 143-145.
- [15] 徐宏宇, 续婷. 一种基于颜色和纹理的优化SVM火灾识别方法[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2021, 38(4): 54-60.
- XU Hongyu, XU Ting. A color/texture-based improved SVM for fire recognition [J]. Journal of Shenyang Aerospace University, 2021, 38(4): 54-60.
- [16] 王思嘉, 裴海龙. 基于火焰图像红外动态特征的早期火灾识别算法[J]. 现代电子技术, 2010, 33(8): 104-105.
- WANG Sijia, PEI Hailong. Algorithm for early fire recognition based on infrared dynamic characteristics of flame images [J]. Modern Electronics Technique, 2010, 33(8): 104-105.
- [17] 郭军, 刘荫, 金永飞, 等. 矿井胶带火灾巷道环

- 境多参数时空演化规律[J]. 西安科技大学学报, 2019,39(1):21-27.
- GUO Jun, LIU Yin, JIN Yongfei, et al. Spatiotemporal evolution law of multiple parameters of roadway environment for rubber-belt fire in mine [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2019, 39(1): 21-27.
- [18] 王伟峰, 张宝宝, 王志强, 等. 基于 YOLOv5 的矿井火灾视频图像智能识别方法[J]. 工矿自动化, 2021, 47(9):53-57.
- WANG Weifeng, ZHANG Baobao, WANG Zhiqiang, et al. Intelligent identification method of mine fire video images based on YOLOv5 [J]. Industry and Mine Automation, 2021, 47(9): 53-57.
- [19] 徐旭. 矿井外因火灾紫外图像识别方法研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2022:1-76.
- XU Xu. Research on ultraviolet image recognition method based on external mine fire[D]. Beijing: China University of Mining and Technology(Beijing), 2022:1-76.
- [20] 李光宇, 李守军, 缪燕子. 基于机器视觉和灰色模型的矿井外因火灾辨识与定位方法[J]. 矿业安全与环保, 2023, 50(2):82-87.
- LI Guangyu, LI Shoujun, MIAO Yanzi. Identification and positioning method of mine external fire based on machine vision and grey model [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2023, 50(2): 82-87.
- [21] 孙雁宇. 基于图像的矿井火灾识别方法研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2019:2-60.
- SUN Yanyu. Research on image-based mine fire identification method[D]. Beijing: China University of Mining and Technology(Beijing), 2019:2-60.
- [22] 崔佳伟. 基于近红外和可见光图像的矿井外因火灾识别方法研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2021:1-55.
- CUI Jiawei. Recognition of external mine fire based on visible light image and near-infrared image[D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2021:1-55.
- [23] 李月. 基于双目视觉的矿井外因火灾监测与定位方法研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2021:10-75.
- LI Yue. Research on mine fire monitoring and location method based on binocular vision[D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2021:10-75.
- [24] 周福宝, 魏连江, 夏同强, 等. 矿井智能通风原理、关键技术及其初步实现[J]. 煤炭学报, 2020, 45(6):2225-2235.
- ZHOU Fubao, WEI Lianjiang, XIA Tongqiang, et al. Principle, key technology and preliminary realization of mine intelligent ventilation [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(6): 2225-2235.
- [25] 张汶贤. 计算不规则图形面积的一个新公式[J]. 江汉石油学院学报, 1989(4):83-88.
- ZHANG Wenxian. A new formula for calculating the area of irregular shapes [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 1989(4): 83-88.
- [26] FAROUKI R T, KNEZ M, VITRIH V, et al. Spatial C² closed loops of prescribed arc length defined by Pythagorean-hodograph curves[J]. Applied Mathematics and Computation, 2021, 391:125653.
- [27] 曹玉超, 范伟强. 基于不同深度识别算法的矿井水位标尺刻度识别性能分析与研究[J]. 煤炭学报, 2019, 44(11):3529-3538.
- CAO Yuchao, FAN Weiqiang. Performance analysis and research of mine water level scale recognition based on different depth recognition algorithms [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(11): 3529-3538.
- [28] 刘燕, 吴宇兴, 赵俊杰, 等. 引入 MobileNet 的轻量化森林火灾视频监测方法研究[J]. 微型电脑应用, 2024, 40(5):5-8.
- LIU Yan, WU Yuxing, ZHAO Junjie, et al. Research on the lightweight forest fire video monitoring method by MobileNet [J]. Microcomputer Applications, 2024, 40(5): 5-8.
- [29] 雷景生, 李顶, 俞云祥, 等. 基于改进 YOLOv7 的火焰烟雾识别[J/OL]. 计算机仿真: 1-7 (2024-03-28) [2024-07-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3724.TP.20240327.1720.008.html>.
- LEI Jingsheng, LI Ding, YU Yunxiang, et al. Flame smoke recognition based on improved YOLOv7 [J/OL]. Computer Simulation: 1-7 (2024-03-28) [2024-07-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3724.TP.20240327.1720.008.html>.
- [30] MUHAMMAD K, AHMAD J, LYV Z, et al. Efficient deep CNN-based fire detection and localization in video surveillance applications[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Systems, 2019, 49(7):1419-1434.
- [31] MAMADALIEV D, TOUKO P L M, KIM J H, et al. ESFD-YOLOv8n: Early smoke and fire detection method based on an improved YOLOv8n model[J]. Fire, 2024, 7(9):303.