



煤炭科学技术 COAL SCIENCE AND TECHNOLOGY

煤炭科学技术

基于暗通道先验的矿井粉尘质量浓度智能检测技术

王伟峰 李高爽 齐景峰 商小鹏 李煜

引用本文:

王伟峰, 李高爽, 齐景峰, 等. 基于暗通道先验的矿井粉尘质量浓度智能检测技术[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(10): 187–200.

WANG Weifeng, LI Gaoshuang, QI Jingfeng. Intelligent detection technology of dust concentration in mines based on dark channel prior[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(10): 187–200.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2024-1498>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

暗环境适应性的基于SLAM的煤矿井下机器人定位方法

SLAM-based localization method of coal mine underground robot with adaptability to dark illumination environment
煤炭科学技术. 2025, 53(5): 349–361 <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0181>

基于深度学习的矿井智能目标检测技术研究综述

Research review on intelligent object detection technology for coal mines based on deep learning
煤炭科学技术. 2025, 53(S1): 284–296 <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0428>

煤自燃特征温度与微观结构变化及关联性分析

Correlation analysis between characteristic temperature and microstructure of coal spontaneous combustion
煤炭科学技术. 2023, 51(4): 80–87 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021-0907>

基于改进YOLOv8n的立井刚性罐道接头错位检测算法

An improved yolov8n based dislocation detection algorithm for shaft rigid tank channel joint
煤炭科学技术. 2024, 52(S2): 236–248 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0788>

基于LMIENet图像增强的矿井下低光环境目标检测方法

LMIENet enhanced object detection method for low light environment in underground mines
煤炭科学技术. 2024, 52(5): 222–235 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0675>

基于注意力机制和特征融合的井下轻量级人员检测方法

A lightweight personnel detection method for underground coal mines
煤炭科学技术. 2025, 53(4): 383–392 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1617>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

王伟峰, 李高爽, 齐景峰, 等. 基于暗通道先验的矿井粉尘质量浓度智能检测技术[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(10): 187-200.

WANG Weifeng, LI Gaoshuang, QI Jingfeng, *et al.* Intelligent detection technology of dust concentration in mines based on dark channel prior[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(10): 187-200.

基于暗通道先验的矿井粉尘质量浓度智能检测技术

王伟峰¹, 李高爽², 齐景峰³, 商小鹏¹, 李煜⁴

(1. 西安科技大学 安全科学与工程学院, 陕西 西安 710000; 2. 西安科技大学 电气与控制工程学院, 陕西 西安 710000; 3. 陕西陕煤榆北煤业有限公司 榆林信息化运维分公司, 陕西 榆林 719051; 4. 西安科技大学 通信与信息工程学院, 陕西 西安 710000)

摘要: 矿井粉尘是危害矿井人员和设备的重要原因之一, 矿井粉尘质量浓度检测是煤炭安全管理的重要工作内容。由于煤矿井下环境较为复杂, 传统矿用粉尘质量浓度传感器检测范围小、误报率高。现有视频粉尘质量浓度检测算法无法消除光度对粉尘质量浓度检测的影响且无法定位检测分布不均的粉尘质量浓度, 导致检测精度低、检测范围有限。针对以上问题, 提出一种基于暗通道先验的矿井粉尘质量浓度智能检测技术。搭建粉尘质量浓度智能检测试验平台, 采集不同光度下的粉尘图像, 采用暗通道先验算法提取粉尘图像暗通道图, 并计算图像透射率; 采用皮尔逊相关系数法, 计算不同光度下图像透射率与粉尘质量浓度的相关性; 设计一种环境光检测算法, 检测环境光度, 建立不同光度下粉尘质量浓度与图像透射率的数学模型, 计算粉尘质量浓度; 围绕环境中粉尘质量浓度分布不均的问题, 提出粉尘区域定位算法, 区分处理不同区域的粉尘质量浓度。为验证本文算法的实用性和准确率, 使用该算法检测采集到的不同光度下不同粉尘质量浓度的图像, 并与粉尘质量浓度传感器和图像相关特征模型算法、图像透射率算法、YOLO 系列算法等现有视频检测算法进行对比。结果表明, 提出的粉尘质量浓度智能检测算法可有效降低环境光度对粉尘质量浓度检测的影响, 可有效定位和计算分布不均的粉尘质量浓度。环境光检测算法, 可在不同粉尘质量浓度下由低到高检测光度, 准确度达 92.4%。粉尘质量浓度检测准确度达 93.36%, 平均误差率为 6.64%。粉尘质量浓度定位区域与实际粉尘区域交并比(IoU)大于 0.5 的占比为 66.7%。选用金鸡滩煤矿现场粉尘图像验证本文算法的可行性, 其有效改善了粉尘区域定位和浓度检测问题, 研究结果为矿井粉尘质量浓度图像智能检测提供了技术支撑, 对矿井粉尘质量浓度精准检测预警具有重要的现实意义。

关键词: 暗通道先验; 皮尔逊相关系数; 粉尘区域定位; 环境光度检测; 拟合模型

中图分类号: TD714 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2025)10-0187-14

Intelligent detection technology of dust concentration in mines based on dark channel prior

WANG Weifeng¹, LI Gaoshuang², QI Jingfeng³, SHANG Xiaopeng¹, LI Yu⁴

(1. School of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710000, China; 2. School of Electrical and Control Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710000, China; 3. Yulin Information Operation and Maintenance Branch, SHCCIG Yubei Coal Industry Co., Ltd., Yulin 719051, China; 4. School of Communication and Information Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710000, China)

Abstract: Mine dust is one of the important reasons that endanger mine personnel and equipment. Mine dust concentration detection is an important work content of coal safety management. Due to the complexity of the coal mine environment, the traditional mine dust concentration sensor has a small detection range and a high false alarm rate. The existing video dust concentration detection algorithm cannot

收稿日期: 2024-10-21 策划编辑: 朱恩光 责任编辑: 黄小雨 DOI: 10.12438/cst.2024-1498

基金项目: 陕西省重点研发计划资助项目 (2021SF-472, 2022QCY-LL-70); 陕西省秦创原“科学家+工程师”队伍建设资助项目 (2023KXJ-052)

作者简介: 王伟峰(1982—), 男, 河南周口人, 教授, 博士。E-mail: wangwf@xust.edu.cn

通讯作者: 李高爽(1999—), 男, 陕西榆林人, 硕士研究生。E-mail: 2053846109@qq.com

eliminate the influence of luminosity on dust concentration detection and cannot locate the unevenly distributed dust concentration, resulting in low detection accuracy and limited detection range. In view of the above problems, an intelligent detection technology of mine dust concentration based on dark channel prior is proposed. An intelligent detection test platform for dust concentration was built to collect dust images under different luminosity. The dark channel prior algorithm was used to extract the dark channel image of the dust image, and the image transmittance was calculated. Pearson correlation coefficient method was used to calculate the correlation between image transmittance and dust concentration under different luminosity. An ambient light detection algorithm is designed to detect the ambient luminosity, and a mathematical model of dust concentration and image transmittance under different luminosity is established to calculate the dust concentration value. Aiming at the problem of uneven distribution of dust concentration in the environment, a dust area location algorithm is proposed to distinguish and process the dust concentration in different areas. In order to verify the practicability and accuracy of the algorithm in this paper, the algorithm is used to detect the images of different dust concentrations under different luminosity, and compared with the dust concentration sensor and the existing video detection algorithm. The results show that the proposed intelligent detection algorithm of dust concentration can effectively reduce the influence of environmental luminosity on the detection of dust concentration, and can effectively locate and calculate the uneven distribution of dust concentration. The ambient light detection algorithm can detect the luminosity from low to high under different dust concentrations, and the accuracy is 92.4%. The detection accuracy of dust concentration is 93.36%, and the average error rate is 6.64%. The proportion of the intersection and union ratio (IoU) greater than 0.5 between the dust concentration positioning area and the actual dust area was 66.7%. The dust image of Jinjitan Coal Mine is selected to verify the feasibility of the algorithm in this paper, which effectively improves the problem of dust area location and concentration detection. The research results provide technical support for intelligent detection of mine dust concentration image, and have important practical significance for accurate detection and early warning of mine dust concentration.

Key words: dark channel prior; Pearson correlation coefficient; dust area location; Ambient light intensity detection; fitting model

0 引 言

煤矿粉尘质量浓度直接影响矿工的职业健康,长期暴露于高浓度粉尘环境,易患尘肺病。此外,粉尘质量浓度过高可能引发煤尘爆炸事故,给矿井生产带来巨大安全隐患。因此,实时精准检测粉尘质量浓度对保障矿工健康和安全至关重要。传统粉尘质量浓度检测方法有光散射法、滤膜称重法、电荷感应法和 β 射线法等。姜勇^[1]设计出一款基于前向散射激光粉尘质量浓度测量仪,实现粉尘质量浓度测量。JIANG等^[2]提出了结合光消光和散射测量的方法,并引入白光池光学结构进一步提高测量的准确性。陈清华等^[3]基于滤膜称重法,建立温湿度补偿模型,检测误差为 $\pm 3.65\%$ 。颜鸽来等^[4]研究电荷感应法粉尘检测信噪比,检测误差为 $\pm 14.2\%$ 。贺振怀等^[5]建立 ^{14}C 原子核衰变 β 射线涨落模型,相对误差为 $\pm 10\%$ 。然而,上述方法存在设备复杂、响应时间长、受环境干扰大和使用成本高等问题,难以满足现代智能化矿山建设需求。近年来,随着计算机视觉技术的发展,基于图像处理的粉尘质量浓度检测方法逐渐受到关注,为矿井粉尘质量浓度智能检测提供了新思路。

李海滨等^[6]在YOLOv4-tiny中增加了SERes和XRes模块,平均检测精度为81.27%。程学珍等^[7]将YOLOv4算法与空间变换网络结合,使检测召

回率与准确率分别为88.63%和93.21%。赵欣然等^[8]采用Faster R-CNN(Region-based Convolutional Neural Networks)模型检测可燃性粉尘云,其检测平均精度为61.21%。余晓轲等^[9]拟合粉尘图像灰度和粉尘质量浓度平均值的函数曲线,得到粉尘质量浓度分布规律。纪大波等^[10]建立图像灰度与粉尘质量浓度的数学关系,获得粉尘质量浓度分布规律和空气中粉尘总量。陈锋^[11]建立了图像平均灰度与粉尘质量浓度的关系,检测到的粉尘质量浓度与实际粉尘质量浓度之间相对误差为6.1%。姜同林^[12]建立了基于CCD(Charge-Coupled Device)图像的粉尘质量浓度空间分布测量模型,粉尘平均浓度测量范围为 1.394 mg/m^3 ,相对测量精度为0.39%。贺安民等^[13]建立图像灰度与粉尘质量浓度间的XGBoost模型,模型的相关系数接近1。王野^[14]建立图像灰度与粉尘质量浓度的网络模型,误差小于 $\pm 8.56\%$ 。龚晓燕等^[15]选取与实测粉尘质量浓度相关性较大的图像特征建立回归数学模型,平均相对误差为 $\pm 12.37\%$ 。叶方平等^[16]通过图像透光率计算粉尘质量浓度,平均相对误差为 $\pm 7.77\%$ 。吴婕萍^[17]用于视觉的高精度粉尘质量浓度测量系统VBM(Vision-Based Measurement)建立基于图像透射率的粉尘质量浓度测量方法,相对误差为 $\pm 3\%$ 。刘伟华等^[18]通过粉尘图像得出粉尘相关几何特征,实现粉尘质量浓度和粒径分布的检测,检测误差小于 $\pm 5\%$ 。孔旭

辉^[19]通过粉尘后向散射图像,实现粉尘质量浓度空间分布的测量,回归模型的相关系数为 0.954 7。刘丹丹等^[20-21]建立粉尘质量浓度与 CCD 像元接收光通量间的关系,相对误差小于 15%,并探究了多因素环境下对测量的影响,提高该方法的准确性。张宸瑜等^[22]搭建一种基于 CCD 的光散射颗粒质量浓度测量系统,得到当散射角积分为 $0.03^\circ \sim 5.00^\circ$ 时,粉尘质量浓度测量相对误差小于 15%。WU 等^[23]利用图像传输技术结合光散射理论,实现粉尘质量浓度高精度测量和分布分析相对测量精度为 0.39%。ZHAO 等^[24]利用消光系数变化实时测量悬浮粉尘质量浓度。KONOSHONKIN 等^[25]研究了 2 个不同波长的全光散矩阵,得到光散消光系数与粉尘粒子空间取向数的关系。ARJOMANDI 等^[26]通过粉尘图像颜色和纹理特征,建立单变量和多变量模型,提高检测速度和精度。XIONG 等^[27]针对粉尘目标训练 Faster R-CNN、SDD(Single Shot MultiBox Detector)、YOLOv3 模型,表明 YOLOv3 检测效果最佳,可评估粉尘暴露的持续时间和频率。WANG 等^[28]基于 YOLOv7 引入 DCN(Data Communication Network)和 Wise-IoU(Wise-Intersection over Union),检测平均精度均值为 68.1%。BADDOCK 等^[29]通过案例研究,得出了能见度与粉尘质量浓度的关系。LI 等^[30]提出一种基于暗通道理论的粉尘质量浓度测量算法,考虑了光散射效应对测量精度的影响。尽管基于图像处理技术在粉尘检测领域取得了一定进展,但其应用于矿井粉尘质量浓度检测仍面临诸多挑战:矿

井光照不均导致图像质量下降,影响检测精度;粉尘质量浓度分布不均,无法定位和计算不同区域粉尘质量浓度。

针对上述问题,笔者提出基于暗通道先验的矿井粉尘质量浓度智能检测算法,采用暗通道先验求取粉尘图像透射率 $t(x)$ 。通过皮尔逊相关系数,分析不同光度下图像透射率与粉尘质量浓度的相关性,证明通过图像透射率计算粉尘质量浓度的可行性。采用环境光检测算法,预估不同粉尘质量浓度下环境光度,建立不同光度下粉尘质量浓度与图像透射率的数学模型。采用粉尘区域定位算法,通过矿井原有的摄像头区分处理不同区域粉尘质量浓度,可有效降低成本和操作难度。

1 矿井粉尘智能检测系统

为降低光度对粉尘质量浓度检测的影响,设计并搭建矿井粉尘智能检测试验平台,采集不同光度下不同粉尘质量浓度图像。

1.1 试验系统构成

研究搭建了矿井粉尘智能检测系统,结构如图 1 所示。该系统硬件部分主要有风速为 2.5 ~ 15.0 m/s 的可调风洞、1 台发尘器、1 台 24 V 电源、1 台 400 万像素摄像头、1 台电脑、1 台感光器、1 台 LED 调光控制器、1 条 LED 灯带、1 台主机和 1 台基于激光散射法的粉尘质量浓度传感器(试验范围: $100 \sim 1\,500 \text{ mg/m}^3$),粉尘平均粒径为 $10 \sim 50 \mu\text{m}$ 。

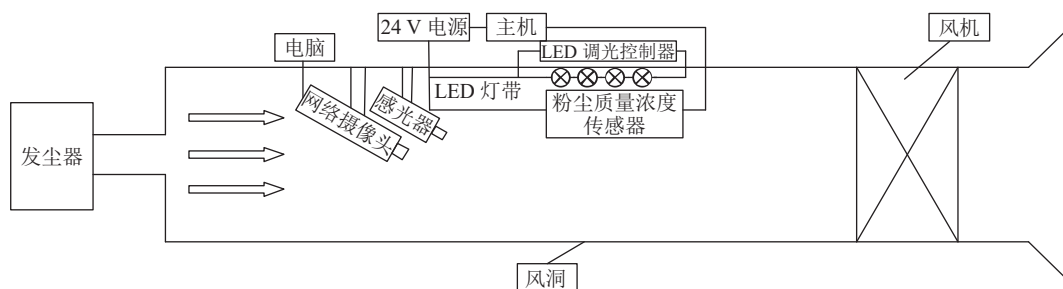


图 1 试验系统结构

Fig.1 Experimental system structure

1.2 试验方案

粉尘智能检测装置通过控制风洞风速使发尘器输出粉尘,沿风洞顶部 45° 安装 400 万像素摄像头,采集粉尘图像,上传到电脑。该风洞长约 4 m,故主要检测距离摄像头 1 ~ 4 m 内的粉尘质量浓度。摄像头旁安装 1 台感光器,用于检测风洞内光度。由于在井下巷道弱光环境下,距离光源 1 ~ 2 m 范围内,光度为 50 ~ 170 lx,考虑到井下摄像头与光源距离普

遍超过 2 m,主要研究光度 10 ~ 120 lx 对粉尘质量浓度检测的影响。检测区域安装 1 条发光二极管(LED)灯带,连接 LED 调光控制器,实现环境光度 10 ~ 120 lx 可调。检测区域安装矿用粉尘质量浓度传感器,由主机接收检测到的粉尘质量浓度。将粉尘图像输入图像处理程序,定位图像中粉尘区域并计算图像透射率,建立不同光度下图像透射率与粉尘质量浓度的数学模型。

2 矿井粉尘智能检测算法

2.1 暗通道先验原理

根据大气散射理论, 图像散射模型表示为

$$I(x) = J(x)t(x) + A[1 - t(x)] \quad (1)$$

式中: $I(x)$ 为粉尘图像; $J(x)$ 为清晰图像; $t(x)$ 为粉尘图像透射率, $t(x) = \exp[-\beta d(x)]$; β 为大气散射系数, 表示真实场景透过粉尘到达摄像头的能力; $d(x)$ 为场景深度; A 为环境大气光值, 是暗通道图亮度前 0.1% 像素, 反映散射光的光强分量; $J(x)t(x)$ 为部分散射的图像亮度; $A[1-t(x)]$ 为从大气光值得到的图像亮度; x 为图像位置。

暗通道先验原理指在非天空的无粉尘图像局部区域内, 每个颜色通道像素的最小值接近于 0, 清晰图像 J , 暗通道表示为

$$J^{\text{dark}}(x) = \min_{y \in \Omega(x)} \left(\min_{c \in \{R, G, B\}} J^c(y) \right) \rightarrow 0 \quad (2)$$

式中: $J^{\text{dark}}(x)$ 为粉尘图像中 x 位置的暗通道值; $J^c(y)$ 为清晰图像任意一个 R、G、B 颜色通道; c 为图像 R、G、B 3 个通道; $\Omega(x)$ 为大小 x 的滤波窗口。

将式 (1) 两边同除大气光值 A , 并计算暗通道:

$$\min_{y \in \Omega(x)} \left(\min_{c \in \{R, G, B\}} \frac{I^c(y)}{A} \right) = \min_{y \in \Omega(x)} \left(\min_{c \in \{R, G, B\}} \frac{J^c(y)}{A} \right) t(x) + (1 - t(x)) \quad (3)$$

其中, $I^c(y)$ 为粉尘图像任意一个 R、G、B 颜色通道。将式 (2) 代入式 (3), 可得暗通道透射率为

$$t(x) = 1 - \min_{y \in \Omega(x)} \left(\min_{c \in \{R, G, B\}} \frac{I^c(y)}{A} \right) \quad (4)$$

2.2 粉尘区域定位及浓度检测流程

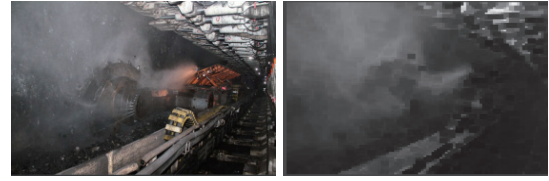
由于暗通道图中粉尘区域亮度普遍高于无尘区域。通过定位暗通道图明亮区域, 即可定位粉尘区域。

首先, 标记粉尘暗通道图亮度前 1% 像素块, 设被标记像素块为圆心, 半径为 r , 像素块个数阈值为 h , 计算每个像素块在 r 范围内包含被标记点个数 T , 判断 T 与 h 的大小。 $T \geq h$, 该点记为取 A 点; $T < h$, 删除该点。

然后, 对选出的取 A 点, 计算彼此之间的距离。若两取 A 点间距离小于等于 $2r$, 合并两区域。

最后, 待亮度前 1% 像素块取完, 计算各合并区域中横纵坐标最大和最小值, 即可实现对粉尘区域的定位。求各合并区域亮度前 0.1% 像素平均值, 计算环境大气光值 A , 代入式 (4) 计算各区域图像透射率, 根据图像透射率得到粉尘质量浓度。

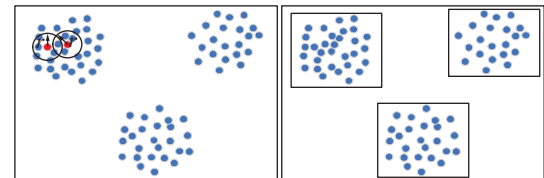
图 2 为暗通道先验结果。图 3a 为粉尘区域定位, 通过粉尘区域定位算法, 得图 3b 中 3 组粉尘区域。



(a) 粉尘原图 (b) 暗通道图

图 2 暗通道先验效果

Fig.2 Dark channel prior effect diagram



(a) 粉尘区域定位图 (b) 粉尘区域图

● 暗通道图亮度前 1% 像素块
● 选中用于判断是否满足取 A 点要求的点

图 3 粉尘区域定位流程

Fig.3 Dust area positioning flow chart

2.3 粉尘质量浓度与图像透射率相关性分析

皮尔逊相关系数反映两变量相关程度, 其值介于 $-1 \sim 1$, 1 为完全正相关, -1 为完全负相关, 0 为没有线性相关。用协方差矩阵法研究不同光度下粉尘质量浓度与图像透射率的相关性。选取光度在 10 ~ 120 lx 每 10 lx 下各 10 张不同粉尘质量浓度图像, 计算图像透射率。分别计算每 10 lx 光度下图像透射率与粉尘质量浓度的皮尔逊相关系数, 计算式为

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^{10} (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{10} (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^{10} (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5)$$

式中: r_{xy} 为粉尘质量浓度和图像透射率的皮尔逊相关系数; x_i 为第 i 个粉尘质量浓度; y_i 为第 i 个图像透射率; \bar{x} 为粉尘质量浓度平均值; \bar{y} 为图像透射率平均值; $\sum_{i=1}^{10} (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$ 为粉尘质量浓度与图像透射率

协方差; $\sqrt{\sum_{i=1}^{10} (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^{10} (y_i - \bar{y})^2}$ 为粉尘质量浓度与图像透射率标准差乘积。

如图 4 所示, 光度在 10 ~ 120 lx, 粉尘质量浓度与图像透射率负相关, 相关性大, 皮尔逊相关系数范围为 $-0.89 \sim -0.99$, 故分析图像透射率与粉尘质量浓度内在规律。

2.4 环境光检测算法

为得到光度对粉尘质量浓度检测的影响规律, 选取光度在 120、70 和 20 lx 下各 20 张不同粉尘质

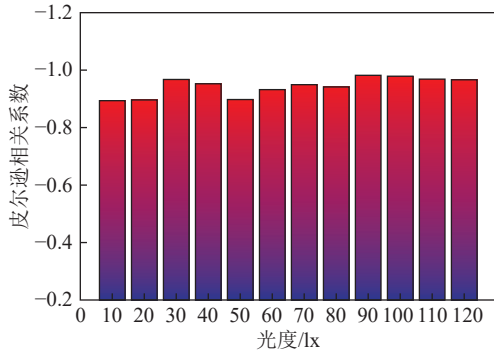


图 4 不同光度下粉尘质量浓度与图像透射率的皮尔逊相关系数

Fig.4 Pearson correlation coefficient between dust concentration and image transmittance under different light intensities

量浓度图像,计算图像透射率,结果如图 5 所示。光度越高输出图像透射率越低,光度每增大 50 lx,图像透射率下降约 2.5%。由此可知,光度会影响粉尘质量浓度检测结果,相同粉尘质量浓度下光度越高输出图像透射率越低,对应粉尘质量浓度越高。因此检测粉尘质量浓度时,应考虑光度的影响。

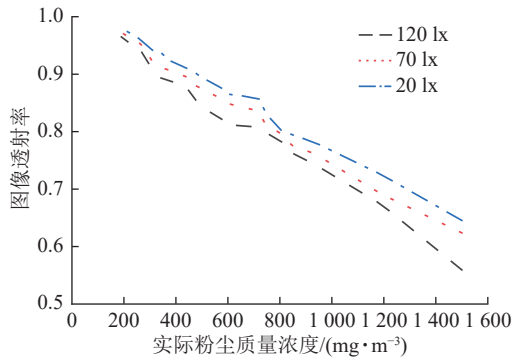


图 5 光度对粉尘质量浓度智能检测的影响规律

Fig.5 Influence of light intensity on the intelligent detection of dust concentration

2.4.1 计算光度问题分析

环境光度主要受环境光源影响,因此检测图像光源亮度可预估环境光度。

粉尘遮挡光源亮度,使检测值偏小,且粉尘质量浓度越大误差越大,故应在不同粉尘质量浓度下,相应提高含尘光源周围像素点亮度,降低检测误差。

通过试验发现,将亮通道图代入暗通道图像去雾计算式(2),可突出图像亮度最大区域,由于无法确定准确的透射率 $t(x)$,故不可直接通过去雾后的图计算光度,但可用于确定光源区域。计算式为

$$I^{\text{bright}}(x) = \max_{y \in \Omega(x)} (\max_{c \in \{R,G,B\}} I^c(y)) \quad (6)$$

式中: $I^{\text{bright}}(x)$ 为粉尘图像中 x 位置亮通道值; x 为像素位置。

将 $I^{\text{bright}}(x)$ 代入暗通道去雾计算式(4)和式(1)中,计算去雾图像:

$$t^{\text{bright}}(x) = 1 - \left(\frac{I^{\text{bright}}(x)}{A^{\text{bright}}} \right) \quad (7)$$

$$J(x) = \frac{I(x) - A^{\text{bright}}}{t^{\text{bright}}(x)} + A^{\text{bright}} \quad (8)$$

式中: A^{bright} 为环境大气光值,是亮通道图中亮度前 0.1% 像素; $t^{\text{bright}}(x)$ 为图像透射率; $J(x)$ 为去雾后的图像; $I(x)$ 为原粉尘图像。

2.4.2 光度计算算法

图 6 为光度测量方法的流程。

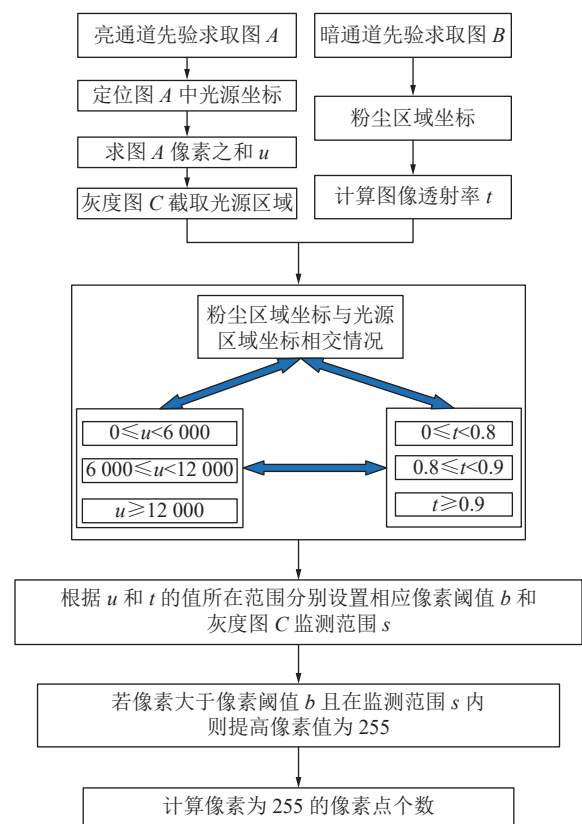


图 6 不同粉尘质量浓度下光度检测流程

Fig.6 Flow chart of light intensity monitoring under different dust concentrations

1) 采用笔者提出的亮通道先验去雾算法和暗通道先验算法,分别得到粉尘图像亮通道先验去雾图 A 和暗通道图 B,对图 A 计算亮度前 1% 像素块横纵坐标最大值和最小值确定光源坐标,对图 B 通过粉尘区域定位算法确定粉尘区域坐标及图像透射率。

2) 将原图转为灰度图 C,根据光源坐标截取图 C 的光源区域,为便于计算将所截图像像素转为 10×20 ,计算像素之和记为 u 。在 $0 \leq u < 6000$, $6000 \leq u < 12000$ 和 $u \geq 12000$ 内且图像透射率 t 在 $0 \leq t < 0.8$, $0.8 \leq t < 0.9$ 和 $t \geq 0.9$ 内,分别设置相应像素阈值 b 和

检测范围 s (s 为对所截取光源区域横纵坐标所增加值)。若像素点的值大于像素阈值 b 且在检测范围 s 内,则提高像素点的值为 255。

3) 判断光源区域与粉尘区域是否相交,若不相交,表示光源区域无粉尘,直接计算像素为 255 的像素点个数;若相交,表示光源区域有粉尘,将光源周围在检测范围 s 内且大于像素阈值 b 的像素点的值提高到 255,再计算像素为 255 的像素点数。

4) 根据图像中像素为 255 的像素点数,预估光度。

2.5 粉尘质量浓度与图像透射率模型建立

建立不同光度下,粉尘质量浓度与图像透射率的数学模型,选取光度 90 ~ 120 lx、50 ~ 90 lx 和 10 ~ 50 lx 各 90 张不同粉尘质量浓度图像,用本文算法求得不同光度和粉尘质量浓度图像透射率,分别建立线性拟合和非线性拟合的模型。

建立线性拟合模型,拟合曲线见图 7。

拟合结果如下:

$$y = \begin{cases} 3\,353.2 - 3\,281.1t, & 90 \sim 120 \text{ lx} \\ 3\,458.2 - 3\,391.1t, & 50 \sim 90 \text{ lx} \\ 3\,782.4 - 3\,668.3t, & 10 \sim 50 \text{ lx} \end{cases} \quad (9)$$

建立非线性拟合模型,拟合曲线见图 8。

拟合结果如下:

$$y = \begin{cases} -25.28 + \frac{609.49}{0.27}te^{0.62}, & 90 \sim 120 \text{ lx} \\ 99.05 + \frac{443.05}{0.21}te^{0.64}, & 50 \sim 90 \text{ lx} \\ -489.39 + \frac{1201.82}{0.39}te^{0.63}, & 10 \sim 50 \text{ lx} \end{cases} \quad (10)$$

根据回归系数两模型性能,均方误差 (MSE)、平均绝对误差 (MAE)、决定系数 (R^2) 3 个评价指标的计算式为

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (11)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (12)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (13)$$

式中: y_i 为第 i 个实际粉尘质量浓度; \hat{y}_i 为第 i 个预测后的粉尘质量浓度; \bar{y} 为所有实际粉尘质量浓度的平均值。 MSE 和 MAE 越小,模型预测误差越小; R^2 越接近 1,模型拟合效果越好。

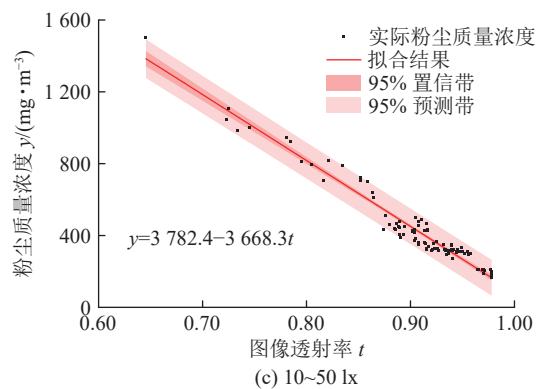
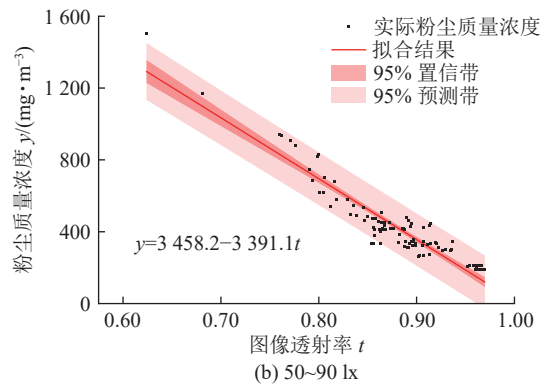
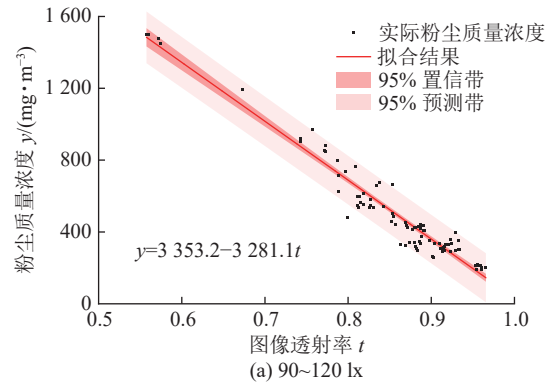


图 7 不同光度下粉尘质量浓度与图像透射率线性拟合关系图
Fig.7 Linear fitting relationship between dust concentration and image transmittance under different light intensities

由表 1 知,线性回归模型的 MSE 、 MAE 和 R^2 均优于非线性回归模型。因此选取线性回归模型作为粉尘质量浓度数学模型。由环境光检测算法预估图像中光度范围,将图像透射率代入相应数学模型,计算图像粉尘质量浓度,可降低光度对粉尘质量浓度检测的影响。

3 试验与结果分析

3.1 光度检测结果

3.1.1 光度检测数值结果分析

选取光度为 10 ~ 50、50 ~ 90、90 ~ 120 lx 下各 50 张不同粉尘质量浓度图像,采用环境光检测算法计算图像光度,结果如图 9 所示。

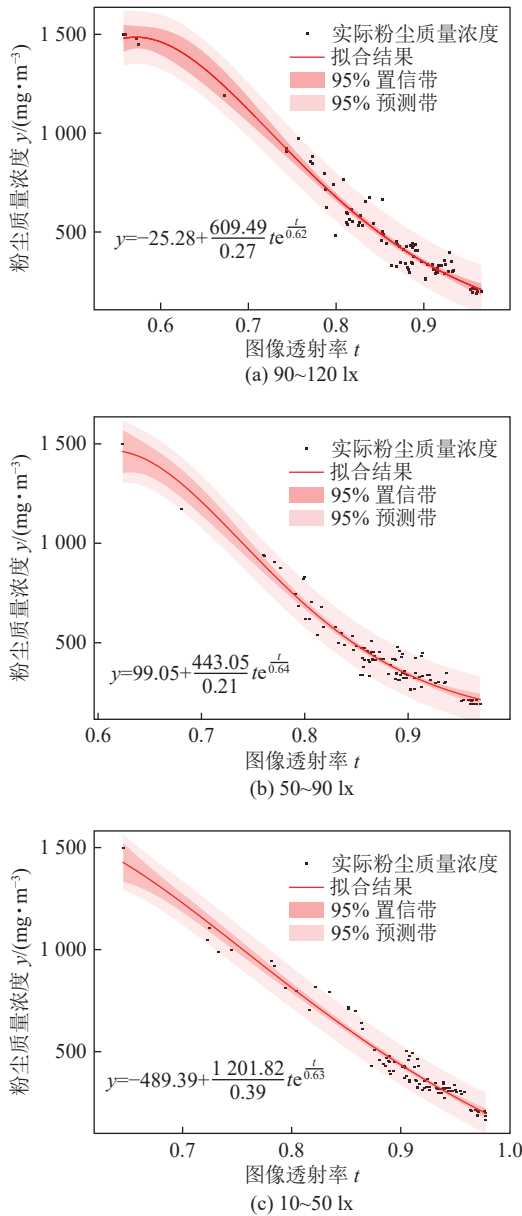


图 8 不同光度下粉尘质量浓度与图像透射率非线性拟合关系
Fig.8 Nonlinear fitting relationship between dust concentration and image transmittance under different light intensity

表 1 数学模型的回归系数

Table 1 Regression coefficient of mathematical model

模型	MSE	MAE	R ²
线性	1 886.71	43.195	0.985 6
非线性	2 065.94	45.785	0.955 2

由图 9 可知, 粉尘质量浓度介于 100 ~ 1 500 mg/m³ 内, 光度在 10 ~ 50 lx 的输出值介于 600 ~ 1 000; 光度在 50 ~ 90 lx 的输出值介于 1 350 ~ 1 550; 光度在 90 ~ 120 lx 的输出值介于 1 750 ~ 1 950, 检测准确度为 92.4%。其中, 输出值为图像中像素为 255 的像素点数。在光度区间边缘处(如 50 和 90 lx)可

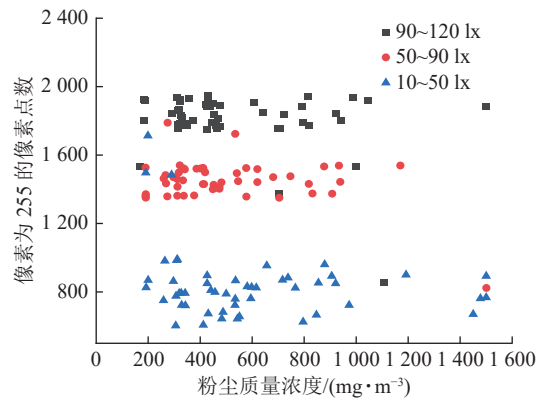


图 9 不同粉尘质量浓度下光度检测结果
Fig.9 Monitoring results of light intensity under different dust concentrations

能导致结果突变, 但检测结果可控制在本区间或相邻区间内, 对粉尘质量浓度检测误差可控制在一定范围。因此, 可通过输出值判断环境光度。

3.1.2 光度检测图像结果分析

采用提出的环境光检测算法计算不同光度和粉尘质量浓度下图像光度。

图 10—图 12 为粉尘质量浓度 100、400 和 1 000 mg/m³ 下, 光度为 90 ~ 120 lx、50 ~ 90 lx 和 10 ~ 50 lx, 采用环境光检测算法计算光度结果。如图可知, 环境光检测算法可在不同粉尘质量浓度下检测光度范围。图 10c、图 11c 和图 12c 中数字为对应灰度图像中像素之和 u 的值; 图 10d、图 11d 和图 12d 中数字为图像中像素为 255 的像素点数。

3.2 粉尘质量浓度检测结果对比试验

选取光度 90 ~ 120、50 ~ 90 和 10 ~ 50 lx 各 60 张不同粉尘质量浓度图像, 对比不同光强有无采用提出的粉尘质量浓度数学模型的检测结果。如图 13 可得, 采用数学模型检测到的粉尘质量浓度更接近真实值。

是否采用模型粉尘质量浓度智能检测结果分析见表 2。由表可知, 不同光度下采用模型粉尘质量浓度检测的 MSE、MAE 和 R² 均优于未采用模型粉尘质量浓度检测值。由实际粉尘质量浓度与检测粉尘质量浓度之差, 除以实际粉尘质量浓度计算检测的准确度, 可得未采用该模型系统准确度为 88.76%, 采用该模型后系统准确度为 93.36%。由此, 本文建立的粉尘质量浓度数学模型可有效提高视频粉尘质量浓度检测精度。

将采用粉尘质量浓度数学模型的本文粉尘质量浓度检测算法与先进粉尘质量浓度传感器(如 GC1000J 型矿用粉尘质量浓度传感器)及其他算法比较, 结果由表 3 知, 本文算法平均相对误差

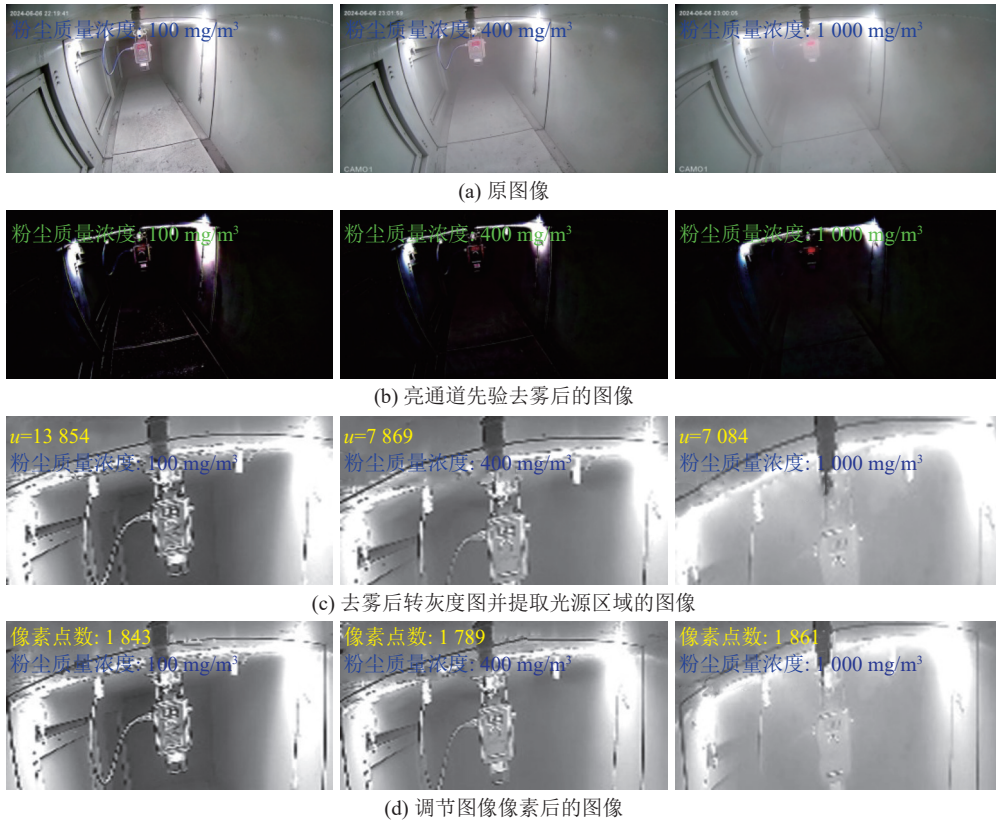


图 10 光度 90~120 lx 不同浓度下光度检测结果

Fig.10 Light intensity 90~120 lx light intensity monitoring results at different concentrations

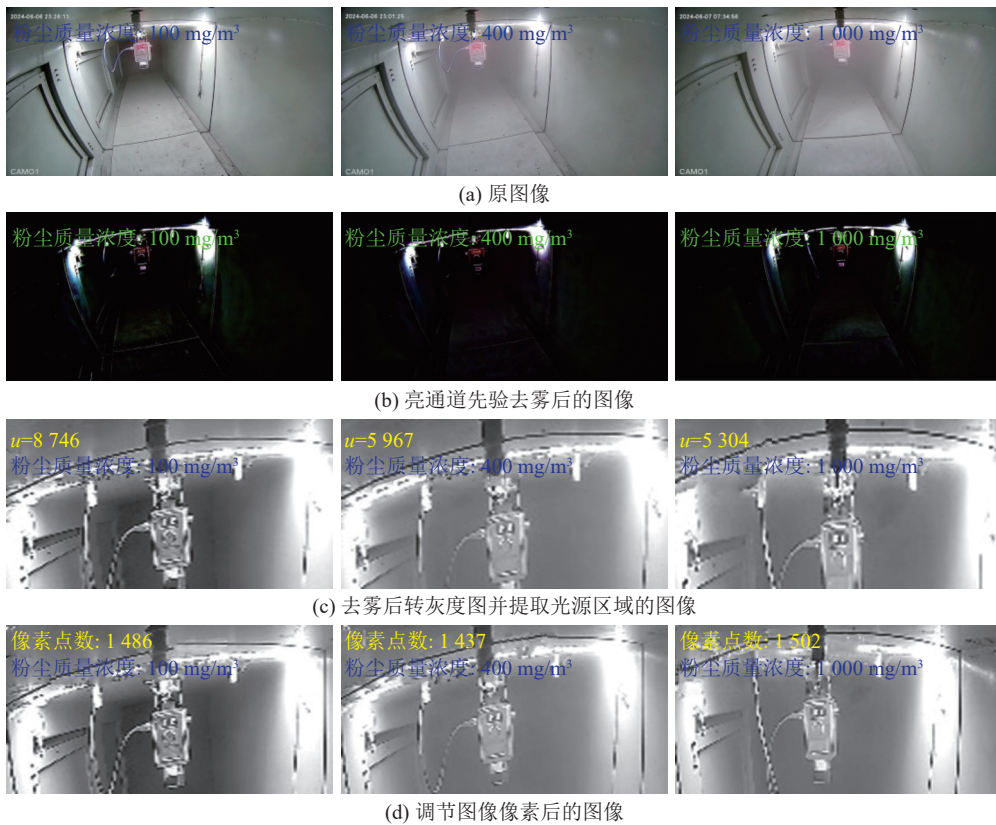


图 11 光度 50~90 lx 不同浓度下光度检测结果

Fig.11 Light intensity 50-90 lx light intensity monitoring results at different concentrations

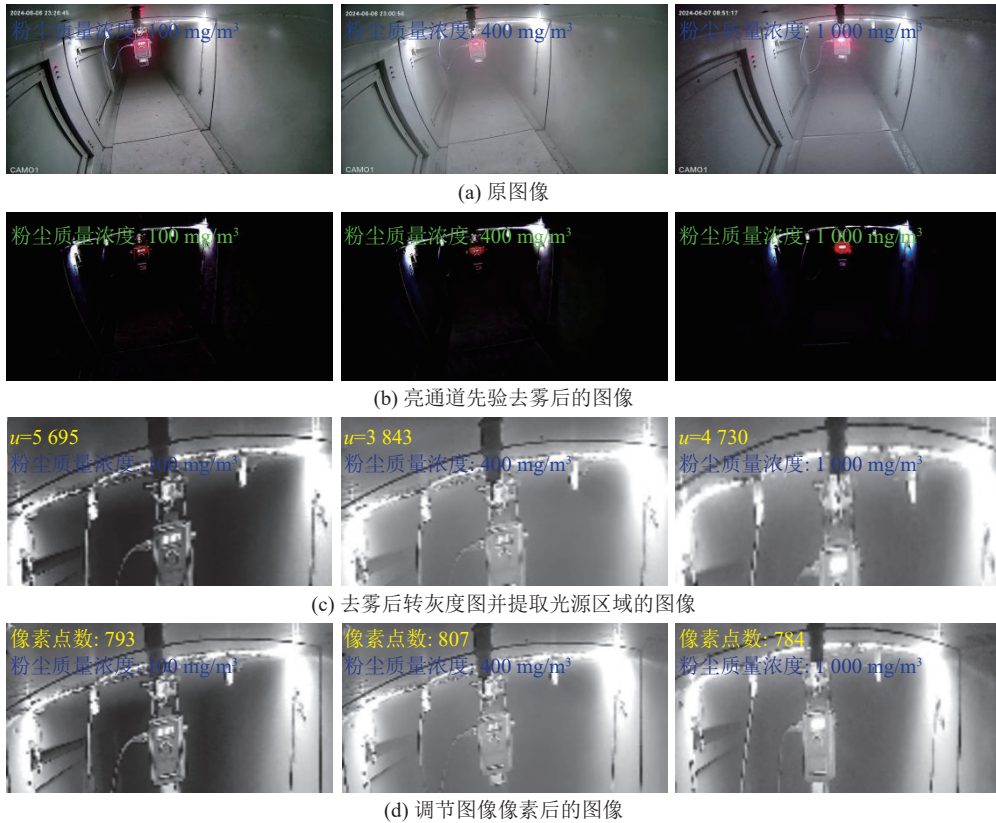


图 12 光度 10~50 lx 不同浓度下光度检测结果

Fig.12 Light intensity 10-50 lx light intensity monitoring results at different concentrations

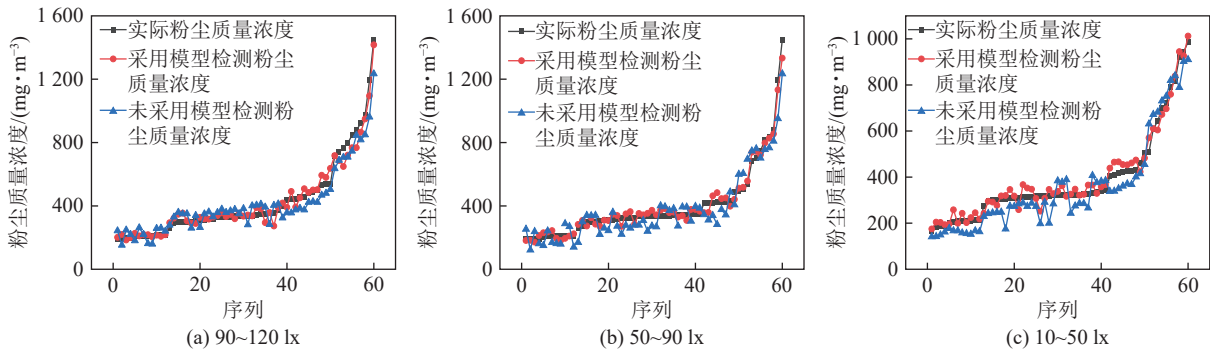


图 13 不同光度是否采用模型粉尘质量浓度检测对比

Fig.13 Whether to use model dust concentration detection for different lighting conditions

表 2 是否采用模型粉尘质量浓度智能检测误差分析

Table 2 Whether to adopt intelligent error analysis for model dust concentration detection

光度/lx	检测算法	MSE	MAE	R ²
90~120	采用模型	1 886.71	43.194	0.985 5
	未采用模型	2 862.65	53.583	0.915 2
50~90	采用模型	1 976.69	44.582	0.988 8
	未采用模型	3 070.23	55.417	0.889 2
10~50	采用模型	1 886.71	43.108	0.978 8
	未采用模型	3 267.47	57.867	0.907 2

为±6.64%，比 GC1000J 型矿用粉尘质量浓度传感器检测误差降低 7.93%，比主动荷电电荷感应^[4]检测误

差降低 7.56%，比 β 射线吸收法^[5]检测误差降低 3.36%，比图像相关特征模型算法^[15]的误差降低

表 3 本文算法与其他检测算法对比结果

Table 3 Comparison results of this algorithm with other detection algorithm

测量方法	平均相对误差/%	质量浓度测量范围/($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)
GC1000J型矿用粉尘质量浓度传感器	± 14.57	100 ~ 1 500
主动荷电电荷感应 ^[4]	± 14.20	100 ~ 1 500
β 射线吸收法 ^[5]	± 10.00	100 ~ 1 500
图像相关特征模型算法 ^[15]	± 12.37	100 ~ 1 500
图像透光率算法 ^[16]	± 7.77	100 ~ 1 500
本文算法	± 6.64	100 ~ 1 500

5.73%，比图像透光率算法^[16]的误差降低 1.13%。检测粉尘质量浓度范围 100 ~ 1 500 mg/m^3 。由此可知，采用粉尘质量浓度数学模型的本文粉尘质量浓度检测算法对比其他算法可有效降低光度对粉尘质量浓度检测的影响，提高检测精度。

3.3 粉尘质量浓度智能检测结果分析

3.3.1 不同光照粉尘质量浓度智能检测结果分析

为验证视频粉尘质量浓度检测效果，选取不同

光度和粉尘质量浓度的图像，通过本文算法，定位粉尘区域和计算粉尘质量浓度。如图 14—16 分别为光度 10 ~ 50、50 ~ 90 和 90 ~ 120 lx 条件下对粉尘质量浓度为 100 ~ 400、400 ~ 800 和 800 ~ 1 500 mg/m^3 这 3 种低中高不同粉尘质量浓度智能检测结果。计算定位粉尘区域与实际标定区域交并比

$$P = \frac{A \cap B}{A \cup B} \quad (14)$$

式中： P 为交并比(IoU)； A 为标定粉尘区域绿色框面积； B 为算法定位粉尘区域红色框面积。

图 14—图 16 中定位粉尘区域后，计算图像透射率和光度，利用粉尘质量浓度数学模型，减弱光度对粉尘质量浓度智能检测的影响，精确计算各区域粉尘质量浓度(各图小图名所示为传感器测量的粉尘质量浓度)。统计检测的粉尘质量浓度及粉尘定位区域与真实粉尘区域 P ，表 4 中 $P > 0.5$ 的占比为 66.7%，且 P 全大于 0.4，可以有效定位图中粉尘区域及检测粉尘质量浓度。

3.3.2 不同区域粉尘质量浓度智能检测结果分析

为验证不同区域粉尘质量浓度智能检测效果，

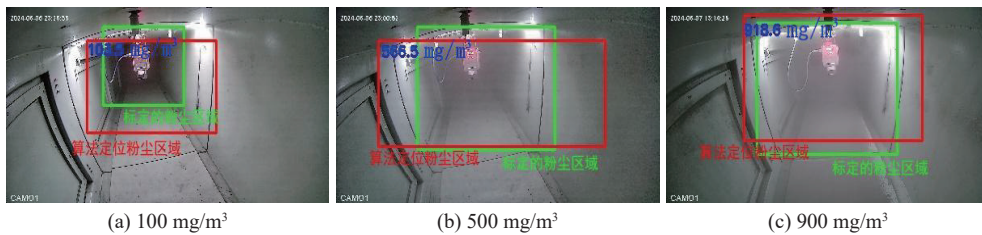


图 14 光度 10 ~ 50 lx 粉尘质量浓度智能检测结果

Fig.14 Light intensity 10 ~ 50 lx dust concentration intelligent detection result

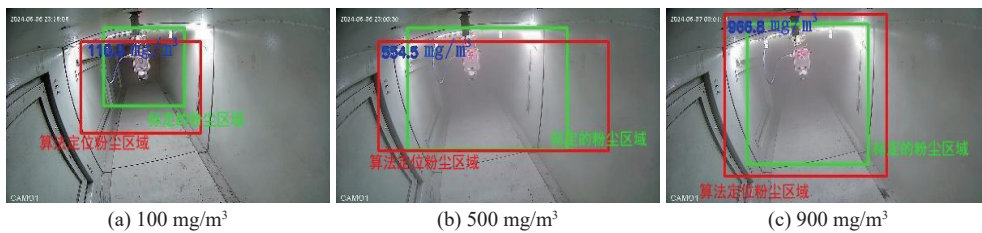


图 15 光度 50 ~ 90 lx 粉尘质量浓度智能检测结果

Fig.15 Light intensity 50 ~ 90 lx dust concentration intelligent detection result

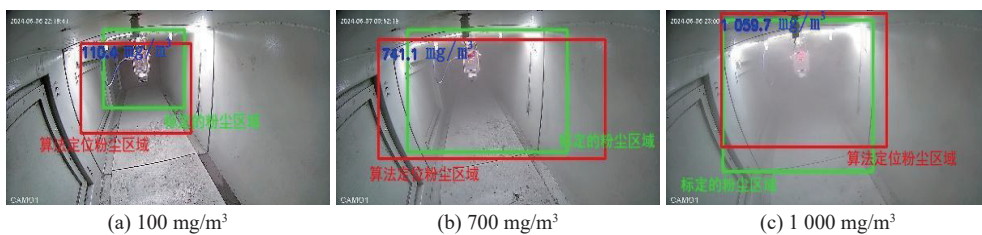


图 16 光度 90 ~ 120 lx 条件下粉尘质量浓度智能检测结果

Fig.16 Light intensity 90 ~ 120 lx dust concentration intelligent detection result

表 4 粉尘定位区域与真实区域 P 及粉尘质量浓度检测结果
Table 4 Detection results of P and dust concentration value in dust positioning area and real area

测量对象	粉尘质量浓度/($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)		P	$P > 0.5$ 所占比例/%	
	实际	检测			
图14	(a)	116.5	103.5	0.401 5	66.7
	(b)	556.3	566.5	0.572 8	
	(c)	967.4	918.6	0.627 1	
图15	(a)	119.8	110.3	0.431 1	
	(b)	577.1	554.5	0.695 3	
	(c)	934.3	966.8	0.564 2	
图16	(a)	92.7	110.4	0.474 4	
	(b)	717.4	741.1	0.627 1	
	(c)	1 104.3	1 059.7	0.738 1	

将不同光度和粉尘质量浓度的图像组合为样本图像和井下粉尘图像进行粉尘区域定位和粉尘质量浓度检测,如图 17 所示。通过粉尘区域定位算法定位不同区域粉尘质量浓度,并计算粉尘质量浓度。数字为检测到粉尘质量浓度,计算定位粉尘区域与实际标定区域 P 。

定位图 17 粉尘区域后,计算各粉尘区域图像透

射率和光度,利用粉尘质量浓度数学模型,降低光度对粉尘质量浓度智能检测的影响,精确计算各区域粉尘质量浓度,结果见表 5。

表 5 中由实际粉尘质量浓度与检测粉尘质量浓度之差,除以实际粉尘质量浓度计算粉尘质量浓度检测的准确度为 94.97%,大于试验阶段的 93.36%。 $P > 0.5$ 的占比为 71.4%,大于试验阶段的 66.7%,且

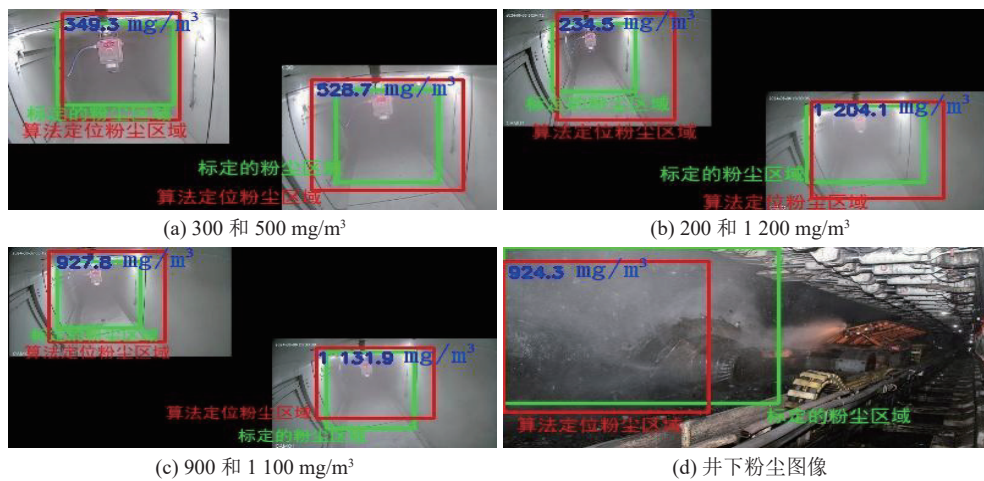


图 17 粉尘区域定位结果

Fig.17 Dust area positioning result diagram

表 5 粉尘定位区域与真实区域 P 及粉尘质量浓度检测结果
Table 5 Detection results of P and dust concentration value in dust positioning area and real area

粉尘区域	粉尘质量浓度/($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)		P	$P > 0.5$ 占比/%
	实际	检测		
图17a	335.5	349.3	0.497 3	71.4
	514.6	528.7	0.653 8	
图17b	219.1	234.5	0.432 2	
	1 232.8	1 204.1	0.866 3	
图17c	917.5	927.8	0.756 1	
	1 000.3	1 131.9	0.666 5	
图17d	910.7	924.3	0.677 2	

$P > 0.4$, 可有效定位粉尘区域及检测粉尘质量浓度。

3.3.3 井下粉尘质量浓度智能检测结果分析

为验证本文算法在矿井复杂环境中粉尘质量浓度检测效果, 选取金鸡滩煤矿不同工作区域的粉尘图像, 图题中实际粉尘质量浓度由矿井工作人员通过粉尘质量浓度传感器获得, 并将数据上传至

地面。通过本文提出的算法, 定位粉尘区域并计算粉尘质量浓度。图 18—图 21 中分别为采煤工作面-110 工作面、掘进工作面-112 破碎机、采煤工作面-113 落煤点和带式输送机机头不同粉尘质量浓度智能检测结果, 计算定位粉尘区域与实际标定区域 P 。

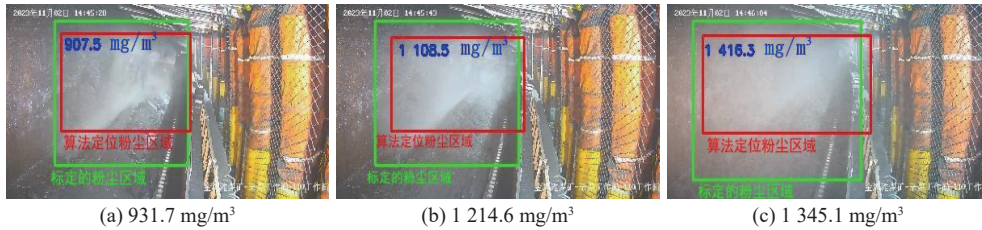


图 18 金鸡滩煤矿-采煤工作面-110 工作面
Fig.18 Jinjitan Coal Mine-coal mining face: 110 working face

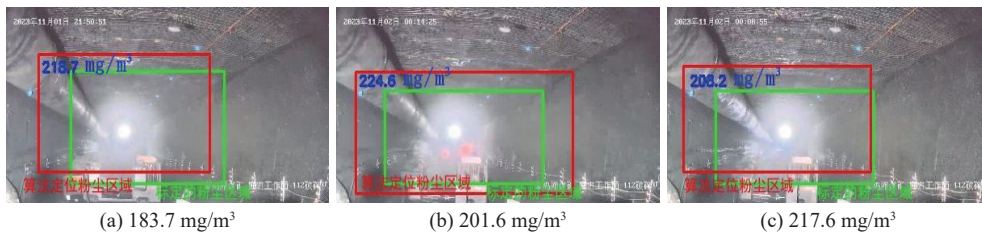


图 19 金鸡滩煤矿-掘进工作面-112 破碎机
Fig.19 Jinjitan Coal Mine-driving face: 112 crusher

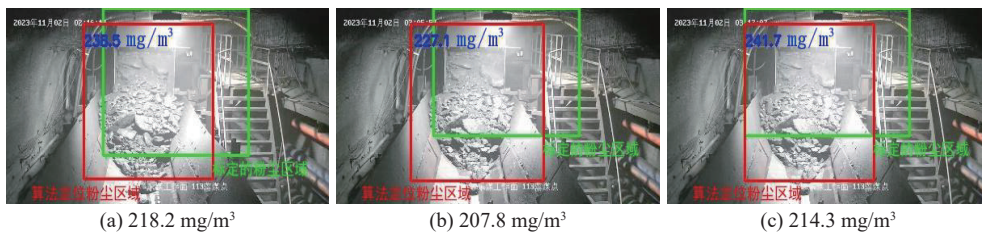


图 20 金鸡滩煤矿-采煤工作面-113 落煤点
Fig.20 Jinjitan Coal Mine-coal mining face: 113 coal drop point

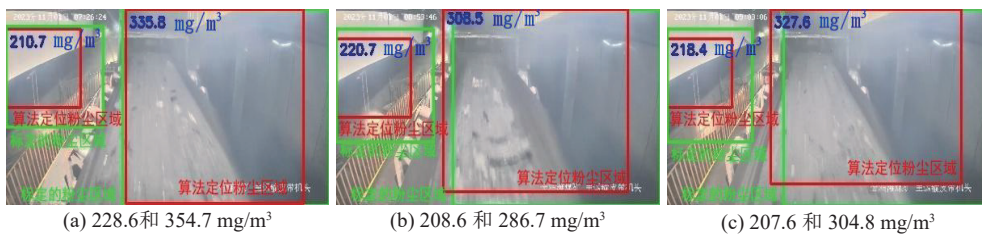


图 21 金鸡滩煤矿带式输送机机头
Fig.21 Jinjitan Coal Mine belt conveyor head

图 18—图 21 定位粉尘区域后, 计算图像透射率和光度, 利用粉尘质量浓度数学模型, 降低光度对粉尘质量浓度智能检测的影响, 精确计算各区域粉尘质量浓度见表 6。

表 6 中粉尘质量浓度检测准确度为 95.71%, 大

于采用本文所提粉尘质量浓度数学模型的准确度 (93.36%)。 $P > 0.5$ 的占比为 73.3%, 大于 66.7%。因此, 笔者提出的检测算法, 可适应矿井复杂环境, 对矿井不同区域粉尘质量浓度检测无需重新校准模型。

表 6 金鸡滩煤矿粉尘质量浓度检测结果
Table 6 Detection results of dust concentration value in Jinjitan Coal Mine

测量对象	粉尘质量浓度/(mg · m ⁻³)		P	P>0.5所占比例/%	
	实际	检测			
图18	(a)	931.7	907.5	0.646 5	
	(b)	1 214.6	1 108.5	0.553 7	
	(c)	1 345.1	1 416.3	0.557 2	
图19	(a)	183.7	218.7	0.593 6	
	(b)	201.6	224.6	0.451 6	
	(c)	217.6	208.2	0.574 7	
图20	(a)	218.2	238.5	0.535 1	73.3
	(b)	207.8	227.1	0.405 8	
	(c)	214.3	241.7	0.588 2	
图21	(a)	228.6	210.7	0.595 5	
		354.7	335.8	0.862 7	
	(b)	208.6	220.7	0.476 5	
		286.7	308.5	0.762 1	
	(c)	207.6	218.4	0.482 1	
		304.8	327.6	0.734 2	

4 结 论

1) 光度影响视频粉尘质量浓度检测, 光度每上升 50 lx, 图像透射率下降 2.5%, 环境光检测算法计算环境光度, 可在不同粉尘质量浓度下由低到高检测光度, 准确度达 92.4%。

2) 通过暗通道先验提取图像透射率, 利用不同光度下粉尘质量浓度与图像透射率的数学模型, 计算粉尘质量浓度, 有效降低了光度对检测结果的影响, 准确度从 86% 提高到 93.36%, 平均相对误差为 6.64%。

3) 利用粉尘区域定位算法, 定位粉尘区域, 定位区域与实际粉尘区域 P>0.5 的占比为 66.7%, 可适应井下范围大、粉尘分布不均的条件, 定位粉尘区域并计算粉尘质量浓度, 增强检测精度。

4) 通过检测煤矿井下不同区域粉尘质量浓度, 准确度为 95.71%, 粉尘定位区域与实际粉尘区域 P>0.5 的占比为 73.3%, 且 P 均大于 0.4, 表明该算法在井下复杂环境应用的可行性。

参考文献(References):

[1] 姜勇. 激光粉尘浓度测量仪的研制[J]. 石油化工自动化, 2023, 59(4): 85-87,91.
JIANG Yong. Development of laser dust concentration measuring instrument[J]. Petrochemical Automation, 2023, 59(4): 85-87,91.
[2] JIANG M, LIU X W, HAN J K, et al. Combined light extinction

and scattering measurement for measuring a low-particulate-mass concentration with a white cell-based optical system[J]. Energy & Fuels, 2020, 34(6): 7726-7734.

[3] 陈清华, 许曾生, 王小润, 等. 基于滤膜称重法的自动化粉尘质量浓度检测装置的研究[J]. 煤炭学报, 2024, 49(7): 2997-3006.
CHEN Qinghua, XU Zengsheng, WANG Xiaorun, et al. Research on automatic dust mass concentration detection device based on membrane weighing method[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(7): 2997-3006.
[4] 颜鸽来, 刘国庆. 基于主动荷电的电荷感应粉尘浓度检测技术[J]. 电子设计工程, 2023, 31(10): 111-116.
YAN Gelai, LIU Guoqing. Charge-induced dust concentration detection technology based on active charging[J]. Electronic Design Engineering, 2023, 31(10): 111-116.
[5] 贺振怀, 王杰. 基于β射线吸收法的粉尘浓度测量技术[J]. 煤矿安全, 2019, 50(7): 80-83, 87.
HE Zhenhuai, WANG Jie. Detection technology of dust concentration based on β-ray absorption method[J]. Safety in Coal Mines, 2019, 50(7): 80-83, 87.
[6] 李海滨, 孙远, 张文明, 等. 基于YOLOv4-tiny的溜筒卸料煤尘检测方法[J]. 光电工程, 2021, 48(6): 73-86.
LI Haibin, SUN Yuan, ZHANG Wenming, et al. The detection method for coal dust caused by chute discharge based on YOLOv4-tiny[J]. Opto-Electronic Engineering, 2021, 48(6): 73-86.
[7] 程学珍, 赵振国, 刘兴军, 等. 基于YOLOv4算法的煤矿井下粉尘检测方法[J]. 实验室研究与探索, 2022, 41(3): 14-18.
CHENG Xuezheng, ZHAO Zhenguo, LIU Xingjun, et al. Dust detection method for underground coal mines based on YOLOv4 algorithm[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2022, 41(3): 14-18.

- [8] 赵欣然,张琪,王卫东,等.可燃性粉尘云的图像检测方法[J].中国安全科学学报,2020,30(4):8-13.
ZHAO Xinran, ZHANG Qi, WANG Weidong, et al. Image detection method of combustible dust cloud[J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(4): 8-13.
- [9] 余晓轲,柯丽华,张光权,等.基于图像技术的爆区粉尘浓度测量方法研究[J].矿业研究与开发,2024,44(4):168-174.
YU Xiaoke, KE Lihua, ZHANG Guangquan, et al. Measurement method of dust concentration in blasting area based on image technology[J]. Mining Research and Development, 2024, 44(4): 168-174.
- [10] 纪大波,方晓,曹廷校,等.基于图像处理测量露天爆破粉尘量[J].工程爆破,2017,23(4):34-38.
JI Dabo, FANG Xiao, CAO Tingxiao, et al. Measuring dust amount of open-pit blasting based on image processing[J]. Engineering Blasting, 2017, 23(4): 34-38.
- [11] 陈锋.基于图像法的粉尘浓度检测设计与研究[D].杭州:中国计量大学,2019.
CHEN Feng. Design and research of dust concentration detection based on image method [D]. Hangzhou: China University of Metrology, 2019.
- [12] 姜同林.基于 CCD 图像的粉尘浓度空间分布测量研究[D].南京:南京理工大学,2016.
JIANG Tonglin. Measurement of dust concentration spatial distribution based on CCD image[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016.
- [13] 贺安民,孔旭辉,郑丽娜,等.基于图像机器学习的粉尘浓度估算方法[J].中国安全生产科学技术,2025,21(1):79-86.
HE Anmin, KONG Xuhui, ZHENG Lina, et al. Estimation method of dust concentration based on image machine learning[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2025, 21(1): 79-86.
- [14] 王野.基于机器视觉的综采工作面粉尘浓度测量方法研究[D].镇江:江苏科技大学,2022.
WANG Ye. Research on measuring method of dust concentration in fully mechanized mining face based on machine vision[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2022.
- [15] 龚晓燕,冯浩,付浩然,等.基于图像分析的掘进工作面粉尘颗粒检测方法[J].工矿自动化,2024,50(4):55-62,77.
GONG Xiaoyan, FENG Hao, FU Haoran, et al. A method for detecting dust particles in excavation working face based on image analysis[J]. Industry and Mine Automation, 2024, 50(4): 55-62, 77.
- [16] 叶方平,方朝阳,徐显金,等.基于图像透光率的粉尘浓度测量算法研究[J].应用光学,2022,43(3):496-502.
YE Fangping, FANG Chaoyang, XU Xianjin, et al. Dust concentration measurement algorithm based on image transmittance[J]. Journal of Applied Optics, 2022, 43(3): 496-502.
- [17] 吴婕萍.基于图像透光率的粉尘浓度视觉测量方法及分布规律研究[D].成都:四川师范大学,2018.
WU Jieping. Study on visual measurement method and distribution rule of dust concentration based on image transmittance[D]. Chengdu: Sichuan Normal University, 2018.
- [18] 刘伟华,袁伟.基于图像分析的煤尘在线监测系统[J].电子测量技术,2010,33(1):125-128,146.
LIU Weihua, YUAN Wei. Investigation of on-line monitoring instrument used in coal dusts based on image analysis[J]. Electronic Measurement Technology, 2010, 33(1): 125-128, 146.
- [19] 孔旭辉.基于后向散射图像的粉尘浓度分布测量方法研究[D].徐州:中国矿业大学,2024.
KONG Xuhui. Study on measurement method of dust concentration distribution based on backscattering image [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2024.
- [20] 刘丹丹,王威廉,李德文,等.CCD 散射图样法测量粉尘质量浓度影响因素研究[J].中国安全生产科学技术,2024,20(9):89-95.
LIU Dandan, WANG Weilian, LI Dewen, et al. Study on influencing factors of dust mass concentration measurement based on CCD scattering pattern method[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2024, 20(9): 89-95.
- [21] 刘丹丹,侯展博,胡丙阳,等.基于 CCD 图像的粉尘浓度面维度分布测量方法[J].黑龙江科技大学学报,2023,33(1):99-102.
LIU Dandan, HOU Zhanbo, HU Bingyang, et al. Surface dimension distribution measurement method of dust concentration based on CCD image[J]. Journal of Heilongjiang University of Science and Technology, 2023, 33(1): 99-102.
- [22] 张宸瑜,李舒,许传龙,等.基于 CCD 的粉尘质量浓度光散射测量系统[J].中南大学学报(自然科学版),2016,47(1):290-297.
ZHANG Chenyu, LI Shu, XU Chuanlong, et al. Dust mass concentration measurement system based on CCD light scattering[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47(1): 290-297.
- [23] WU J P, LI G H, LUO Z W, et al. Distribution law of dust concentration by image transmission in a cement workshop[J]. Applied Optics, 2018, 57(7): B59.
- [24] ZHAO Y M, KINGSLY AMBROSE R P. A real-time method for sensing suspended dust concentration from the light extinction coefficient[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2020, 67: 104242.
- [25] KONOSHONKIN A, KUSTOVA N, BOROVOI A, et al. Using the physical optics approximation for estimating the light scattering properties of large dust particles for lidar applications[J]. EPJ Web of Conferences, 2020, 237: 08025.
- [26] ARJOMANDI H R, KHEIRALIPOUR K, AMARLOEI A. Estimation of dust concentration by a novel machine vision system[J]. Scientific Reports, 2022, 12: 13697.
- [27] XIONG R X, TANG P B. Machine learning using synthetic images for detecting dust emissions on construction sites[J]. Smart and Sustainable Built Environment, 2021, 10(3): 487-503.
- [28] WANG M P, YAO G, YANG Y, et al. Deep learning based object detection for visible dust and prevention measures on construction sites[J]. Developments in the Built Environment, 2023, 16: 100245.
- [29] BADDOCK M C, STRONG C L, LEYS J F, et al. A visibility and total suspended dust relationship[J]. Atmospheric Environment, 2014, 89: 329-336.
- [30] LI G H, WU J P, LUO Z W, et al. Vision-based measurement of dust concentration by image transmission[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 68(10): 3942-39.