

文章编号: 1002-1582(2026)03-0266-07

# 基于优化暗通道先验算法的烟雾浓度测量方法研究

蒋涛, 张光学\*, 朱莎弘, 童思睿, 徐江荣  
(中国计量大学, 浙江 杭州 310018)

**摘 要:** 针对传统烟雾浓度监测方法成本高、布点稀疏、难以实现空间连续测量的问题, 研究提出一种基于改进暗通道先验的烟雾浓度视觉测量方法。通过优化透射率估计模型, 引入自适应暗道补偿机制, 建立图像透射率和烟雾浓度的量化关系。实验结果表明, 方法可有效地解决传统方法的问题, 尤其在实现空间连续测量上有显著优势。方法的测量相对误差仅为7.43%, 相关系数达到0.99, 测量范围在0.1~1500mg/m<sup>3</sup>。其均方根误差为43.28mg/m<sup>3</sup>, 优于传统暗通道算法的54.63mg/m<sup>3</sup>, 尤其在高浓度区间表现出更好的稳定性和准确性。研究为烟雾浓度的低成本、可视化监测提供了一种有效技术途径。

**关 键 词:** 烟雾浓度; 视觉测量; 暗通道先验; 透射率  
**中图分类号:** TN206 **文献标识码:** A

## Smoke concentration measurement using an enhanced dark channel prior algorithm

JIANG Tao, ZHANG Guangxue\*, ZHU Shahong, TONG Sirui, XU Jiangrong  
(China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** To address the issues of high cost, sparse distribution of monitoring points, and difficulty in achieving spatially continuous measurement in traditional smoke concentration monitoring methods, a visual measurement method based on an improved dark channel prior is proposed. By optimizing the transmittance estimation model and introducing an adaptive dark channel compensation mechanism, a quantitative relationship between image transmittance and smoke concentration is established. Experimental results demonstrate that the limitations of traditional approaches are effectively resolved by the proposed method, with significant advantages particularly shown in enabling spatially continuous measurement. The method achieves a relative accuracy of 7.43%, a correlation coefficient of 0.99, and a measurement range of 0.1~1500 mg/m<sup>3</sup>. The root mean square error is measured at 43.28 mg/m<sup>3</sup>, outperforming the 54.63 mg/m<sup>3</sup> value obtained by the traditional dark channel algorithm. Improved stability and accuracy, especially in high-concentration ranges, are demonstrated. An effective technical pathway for low-cost and visual monitoring of smoke concentration is provided by this study.

**Keywords:** smoke concentration; visual measurement; dark channel prior; transmittance

## 0 引 言

在产业化、城镇化高速发展的同时, 大气污染问题日益严峻, 其中对空气质量、能见度、人

体健康构成严重威胁的烟雾污染作为典型的复合型污染现象, 更是如此<sup>[1]</sup>。烟雾主要由气溶胶颗粒、水滴和污染物气体组成, 其浓度变化直接影响大气的透光性和环境能见度<sup>[2]</sup>。准确监测烟雾浓

收稿日期: 2026-01-14; 收到修改稿日期: 2026-04-22

基金项目: 国家自然科学基金(52276162)

作者简介: 蒋涛(2001—)男, 硕士研究生, 从事图像处理在环境监测中应用研究。2607229429@qq.com

张光学(1982—), 男, 教授, 博士, 从事能源清洁利用方面的研究。

\* 通讯作者: zhangguangxue@cjlu.edu.cn

度对于环境污染评估、公共健康防护和交通运输安全具有重要意义<sup>[3]</sup>。目前,烟雾浓度的测量主要依靠专业仪器,如 $\beta$ 射线吸收法、激光散射法和振荡天平法等<sup>[4]</sup>。这些方法虽然精度较高,但存在设备昂贵、布点稀疏、难以实现大范围、空间连续监测的局限性。传统方法多局限于单点测量,无法有效反映烟雾在空间上的分布特征和动态变化规律<sup>[5]</sup>。

为了解决上述问题,以图像分析为基础的烟雾浓度监测方法,近年来随着计算机视觉技术的发展而逐渐受到重视。这类方法通过分析烟雾图像的特征与浓度之间的关系,实现非接触式、低成本的浓度估算<sup>[6]</sup>。如陈锋和姜同林<sup>[7]</sup>共同推导的粉尘浓度与图像灰度之间的线性关系,但其方法在灰度值趋近255时会超饱和而失效。之后赵欣然<sup>[8]</sup>等提出基于深度学习的可燃性粉尘云图像检测方法,该方法又和环境绑定,所以往往需要较长的训练模型时间。黄银清<sup>[9]</sup>等提出多标签分配透射率优化,方法能够避免块效应,提升边缘保持性,但是多标签的分配导致算法复杂度较高,实时性有待提升。

而非接触式光学视觉测量技术,以其响应快速、覆盖范围广等独特优势,在环境烟雾/粉尘浓度监测领域展现出巨大的应用潜力<sup>[10]</sup>。该技术的核心科学问题在于,如何从单幅二维图像中,有效反演出反映颗粒物质量浓度的三维物理量<sup>[11]</sup>。其中,透射率在穿过烟雾介质时,直接表征景物辐射衰减的程度。于是,精确估计透射率就成了衡量浓度高低的关键。但从单幅图像中求解透射率,必须引入有效的先验约束,这是一个典型的病态问题<sup>[12]</sup>。

何凯明<sup>[13]</sup>等提出的暗道先验理论给出了具有突破性的解决办法。首先,在绝大多数未见雾天的局部图块中,至少有一个接近于零强度的色道存在,这是根据一个坚实的统计规律得出的,这一发现为求解大气散射模型提供了强有力的约束条件,但是没有涉及环境烟雾的测量之中。大部分暗通道的应用在于去除图像烟雾从而达到恢复图像的目的,比如刁志坚<sup>[14]</sup>使用Gamma亮度增强的方法,实现无光晕、亮度适宜、颜色自然的去雾效果。李波<sup>[15]</sup>等为减少明亮物体对大气光估计的干扰,使用超像素分割的方法提升大气光与透射率估计的准确性,结果表明能增强去雾图像的细节保持能力。苏腾华<sup>[16]</sup>等融合学习算法,提出一种对抗网络以增强算法的泛化能力,虽然易过拟合,训练复杂。火元莲<sup>[17]</sup>等为提出一种基于Sigmoid函

数加权融合先验算法,该方法依赖于天空区域分割,使得应用场景受限。

而从图像中获得烟雾浓度或许更能体现工业场景的实际问题,Li<sup>[18]</sup>等是这一领域的先行者,他们构建了透射率与粉尘浓度的定量关系模型,将暗通道法拓宽到工业车间的粉尘浓度测量。然而,工业背景复杂光照不均,传统透射率在RGB色彩空间下计算时,物体固有的暗色区域极易被误判为高浓度粉尘,导致透射率估计失准,从而限制了模型的普适性和精度。为了解决上述背景干扰问题,叶方平<sup>[19]</sup>等进行了深入的优化。他们指出RGB色彩空间中三通道的强耦合性是误差的主要来源,所以他们将暗通道先验的计算从RGB空间转换至HSV颜色空间。这一转换使得暗通道的计算能够更纯粹地反映由粉尘引起的亮度衰减,而非物体固有颜色。最终提升了测量的准确率。

对于暗通道的改进近年来已有许多,宋磊<sup>[20]</sup>等通过自适应大气光值校正、高低频分离、引导滤波等技术,有效解决了井下煤矿图像中去雾中的色偏、光晕、亮度低等问题,却没有涉及浓度的估计。其处理结果表明使用暗通道先验对烟雾图像的处理从暗通道法本身的固有误差出发可能会有更好的结果。其中对于透射率估计改进的方法对于浓度检测方法的改进应该有较为明显的提升,其中王高峰<sup>[21]</sup>等提出自适应补偿参数,结果显示能较好地恢复复原图像颜色失真、亮度异常的问题。孙景荣<sup>[22]</sup>等提出的透射率补偿参数能够满足很多场景下的暗通道使用方法。吕东霞<sup>[23]</sup>等构建负向雾浓度模型,结合灰阶共生矩阵与差分曲率提取雾浓度特征,引入自适应伽马校正,最终实现了更彻底的去雾效果。这些方法在面对高浓度区间时,传统的暗通道计算仍会引入显著误差,即暗通道可能并不为0,导致透射率图存在固有偏差。而这一固有偏差,就成了进一步提高测量精度的瓶颈。其中Yu<sup>[24]</sup>等的研究解决了该问题,通过使用高斯函数建模暗通道先验,对透射率的估计进一步提高,并且使图像恢复得更为自然,去除了伪影。

针对在使用暗通道法测量烟雾浓度领域上,对于图像更接近烟雾颜色时测量失准的问题,本研究通过引入Yu<sup>[24]</sup>暗通道估计的透射率补偿机制,优化透射率,补充Li<sup>[18]</sup>以及叶方平<sup>[19]</sup>等在烟雾浓度测量方面的不足,以期待提高算法的适用环境与稳定性。本研究旨在开发一种准确、稳定、低成本的大范围烟雾浓度视觉监测方案,为环境监测和污染防控提供新的技术支撑。

## 1 测试方法及实验系统

### 1.1 大气散射模型

1999年, Narasimhan<sup>[25]</sup>针对雾天环境能见度下降的问题, 系统阐述了雾天图像的成像机制及其关键构成要素, 并构建了相应的物理模型。该模型指出, 在强散射介质影响下, 探测系统成像失准主要源于两方面原因: 其一, 目标反射光在传播过程中受到大气悬浮粒子的吸收与散射作用, 其能量发生衰减, 导致最终成像亮度降低、对比度下降; 其二, 大气中的散射介质对太阳光产生散射作用, 使得背景光强度超过目标反射光, 从而引起成像模糊。其散射模型如图1所示。

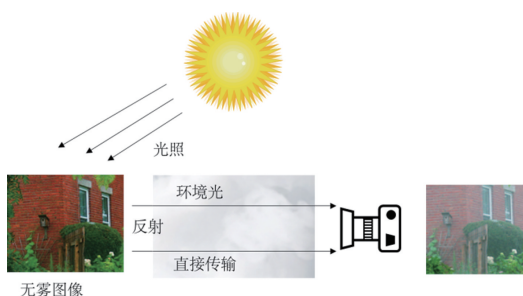


图1 大气散射模型

最终整理得到的大气散射模型的数学表述为

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

式中, 有雾气的图像为  $I(x)$ ; 无雾的图像为  $J(x)$ ; 环境大气光为  $A$ ; 透射率为  $t(x)$ , 透射率越大则自然光透过大气环境达到成像设备的衰减越小, 直接衰减项为  $J(x)t(x)$ , 其表示空气中介质粒子散射后直接成像的部分; 附着项为  $A(1 - t(x))$ , 其表示由直射光、大气散射光或地面反射光等来源的成像过程中加入的环境散射光。并且当空气中介质粒子分布均匀时,  $t(x)$  可表示为

$$t(x) = \exp(-\beta d(x)) \quad (2)$$

式中,  $d(x)$  为场景深度信息, 即从相机到场景中点  $x$  的物理距离。距离越远, 就越需要有介质穿过光线, 越容易被散射出去。 $\beta$  表示单位体积大气散射光能力的大气, 是大气散射系数。

### 1.2 暗通道先验优化

He<sup>[13]</sup>提出的暗通道先验以大量的室外无雾图像为统计基础, 在除天空或部分高亮区外, 像素值至少在一个  $\{r, g, b\}$  颜色通道中趋于0。其暗通道的计算式为

$$J^{\text{dark}}(x) = \min_{y \in \Omega(x)} \left( \min_{c \in \{r, g, b\}} (J^c(y)) \right) \rightarrow 0 \quad (3)$$

式中,  $C$  表示颜色通道,  $\Omega(x)$  指以像素  $x$  为中心的邻域;  $J^{\text{dark}}(x)$  被称为暗通道图。结合式 (1) 对

式 (3) 方程式两边取最小值滤波, 可以得到初始透射率  $t_0(x)$  为

$$\frac{I^{\text{dark}}(x)}{A} = t(x) \frac{J^{\text{dark}}(x)}{A} + 1 - t(x) \quad (4)$$

$$t_0(x) = 1 - \omega \frac{I^{\text{dark}}(x)}{A} \quad (5)$$

式中  $\omega$  通常取 0.95。直接由式 (5) 得到的透射率往往比较粗糙, 并不太适合直接用于透射率估计<sup>[26]</sup>。

在式 (4) 中, 若不将暗通道直接取 0 则可以得到

$$t(x) = 1 - \omega \frac{I^{\text{dark}}(x)}{A} + \frac{J^{\text{dark}}(x)}{A} t(x) \quad (6)$$

结合式 (5) 可以得到

$$t(x) = t_0(x) + \frac{J^{\text{dark}}(x)}{A} t(x) \quad (7)$$

而在 RGB 色彩空间中,  $A$ 、 $I(x)$ 、 $J(x)$  这三个量共平面且模长依次递减, 且根据 Yu 等研究发现,  $J^{\text{dark}}(x)$  与  $I^{\text{dark}}(x)$  关系<sup>[24]</sup>表示为

$$J^{\text{dark}}(x) = e^{-\frac{\left(1 - \frac{I^{\text{dark}}(x)}{A}\right)^2}{\sigma^2}} \quad (8)$$

式中  $\sigma$  为标准差, 取值 0.15<sup>[27]</sup>。

所以综合可以得到

$$t(x) = \frac{1 - \omega \frac{I^{\text{dark}}(x)}{A}}{1 - \exp\left(\frac{-\left(1 - \frac{I^{\text{dark}}(x)}{A}\right)^2}{\sigma^2}\right)/A} \quad (9)$$

通常暗通道计算中, 往往需要同时解耦环境光  $A$  与透射率  $t(x)$ , 而环境光  $A$  往往代表着烟雾本身的底色, 于是按照 He 的做法, 取图像中最亮的部分作为环境光  $A$  去避免环境光  $A$  影响<sup>[13]</sup>。

### 1.3 实验装置

为达到高精度测量烟雾浓度的目的, 开发的烟雾浓度视觉测量系统示意图如图2所示。

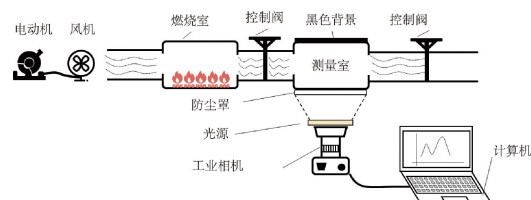


图2 烟雾浓度测量示意图

该测量系统主要由烟雾生成室, 烟雾测量室, 软件处理部分组成。烟雾生成室中由稳定烟雾室以及风机组成, 在烟雾室中点燃烟饼待到烟雾稳定在室内之后, 烟雾通过风机以及开关阀的作用进入烟雾测量室之中。烟雾测量室由黑色背景板、

LED环境光源组成,烟雾聚集在这里,由测量范围为 $0.1\sim 1500\text{mg}/\text{m}^3$ 的直读式烟雾浓度测量仪获得烟雾浓度,并且通过工业摄像机获得分辨率为 $1920\times 1080$ 的烟雾图像。软件测量主要由图像预处理、训练处理和测量处理三部分组成。图像预处理是为了减少烟尘图像受到噪音的影响而设计的,在测量过程中能有效地提高测量精度。其过程主要为选取位于相机中心的 $640\times 360$ 像素的子块作为烟雾测量图像。对烟雾图像用 $3\times 3$ 均值滤波器进行过滤。训练过程主要采用Li等研究得到的二次模型进行拟合,该模型符合丁达尔公式。最后通过对实际测量后计算浓度,并将该值与传统方法计算得到的浓度对比。训练过程主要采用Li<sup>[18]</sup>等研究得到的二次模型进行拟合。最后通过对实际测量后计算浓度,并将该值与传统方法计算得到的浓度对比,以获得测量准确度。

为了从每个 $640\times 360$ 像素的透射率矩阵中获得一个与烟雾浓度校准仪测量值相对应的单一代表性透射率值,依据Beer-Lambert定律,透射率本质是光路径上烟雾衰减的积分效应。在均匀烟雾场中, $\bar{T}$ 等价于路径平均透射率,与点式校准仪的测量物理原理一致。所以本研究对于子图采用全局平均的方法获得单一代表性透射率。

由于在低浓度区间( $t>0.8$ ),烟雾对背景的遮盖能力有限。根据暗通道理论,背景物体的反射率直接参与暗通道计算。实验观测到在浅色背景下,透射率估计值容易出现波动,这是由于算法将物体固有色误判为烟雾消光所致。于是本文将背景改为黑色背景板用于消除该影响。其次由于大气光值 $A$ 的估计精度对最终浓度映射至关重要。尽管采用了稳定光源,但在图像边缘区域,光线散射路径的不一致性,局部亮度偏移会导致系统偏差。故本研究采用稳定图像的中间部分的子图去消除大部分此类影响。

测量过程是在燃烧室中点燃烟雾,在风机的作用下沿管道进入测量室。在测量室中指定的测量区域内,以黑模板为背景,通过工业相机结合防尘玻璃在LED光源下采集烟雾图像,然后将图像发送到计算机中并于测量室中通过以光散射为原理的直读式烟雾浓度测量仪测量获得该烟雾图像的对应浓度。

## 2 实验结果及分析

### 2.1 测量模型的训练

在所收集的图像中,随机选取60组成训练集,由烟雾浓度校准仪在每张图片对应场景下的浓度进行测定,然后选取多项拟合形式对各组样本进

行模型训练,该模型拟合相关性为0.9989,用本研究算法求得其透射率,其拟合曲线如图3所示。

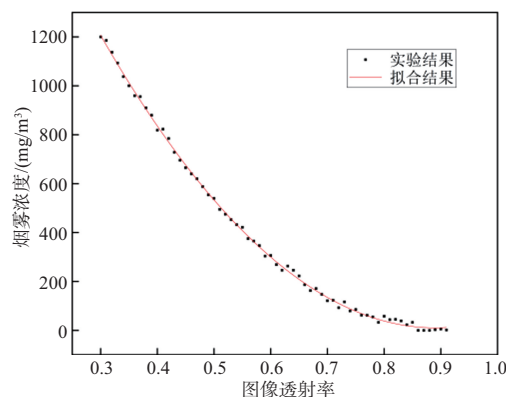


图3 实验与拟合结果

由图3可知的烟雾浓度与图像的透射率之间存在着很好的负相关性。在低浓度区域(图右侧,透射率高),浓度随透射率下降而缓慢增加。在高浓度区域(图左侧,透射率低),浓度随透射率略微下降而急剧增加。这意味着在烟雾浓时,透射率对浓度的变化更为敏感,但是过浓时透射率会趋于定值。

从图3拟合中得到

$$c = 2731 - 6111t + 3431t^2 \quad (10)$$

图中的显现主要是因为烟雾颗粒会产生消光效应,在烟雾成像过程中,烟雾消光程度与烟雾浓度呈正相关关系。那么据此推论该透射率应和激光透射率呈现成相关关系,于是选取红光测量了激光透射率,实验结果如图4所示。

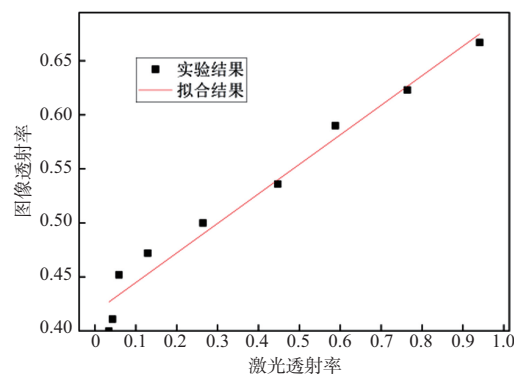


图4 图像透射率与激光透射率的关系

可见激光透射率与图像透射率呈现正相关关系,分析中相关性为0.97。尽管光源不同,但它们所探测到的核心物理过程烟雾对光的衰减是高度一致的,这可以从侧面表述图像透射率是稳定可行的。

这也表示其烟雾透射率本质是光在颗粒群中衰减的表征。传统的暗通道法应用在粉尘颗粒之中,所以表现出了很好的实用性,但对于烟雾颗粒来说,其未曾考虑到颗粒尺寸的影响,所以对

透射率的估计出现了偏差，本文的补偿机制依据大气散射模型得到更为精确的透射率估计，优化后的透射率修正了在 Mie 过渡区中的透射率估计偏小的问题，其颗粒尺寸参数  $x$  在 0.1~2000 之内，大气环境中的烟雾、尘埃等粒子在该范围之内。

2.2 测量模型的测试

为了验证训练模型的泛化能力，采用 10 折交叉验证的方式进行评估分析。

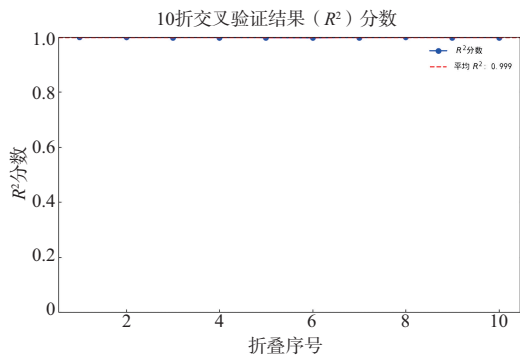


图 5 10 折  $R^2$  验证结果

可以看到平均  $R^2$  分数为  $0.996 \pm 0.0007$ ，交叉验证显示模型具有良好稳健性， $R^2$  分数波动较小。标准差仅为 0.0003，表明模型在不同数据集上表现高度一致。而最低值出现在折叠序列三中 ( $R^2=0.996$ )，与理论模型的最大偏差仅 0.15%。

其次为了验证讨论样本量对拟合结果的影响，线性分割数据量并对公式进行了拟合，拟合结果如图 6 所示。

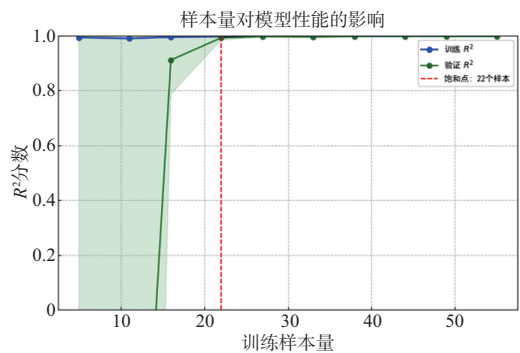


图 6 样本量对于模型的影响

学习曲线展示训练集和验证集  $R^2$  分数随样本量增加的变化趋势。横坐标为训练样本数量 (6~60)，纵坐标为  $R^2$  分数。绿色曲线为验证集性能，蓝色曲线为训练集性能，红色虚线标记性能饱和点。样本量小于 20 时泛化差距大于 0.05，存在过拟合风险。样本量大于 35 后训练/验证性能收敛。

随机再选择了 6 组图样的组成测试集的图像。样本跨越了从低浓度 ( $230\text{mg}/\text{m}^3$ ) 到极高浓度 (近  $1000\text{mg}/\text{m}^3$ ) 的工业典型工况。每一组图像都是在烟雾流稳定后，取得的典型图像。其测量结果如图 7 所示，以验证测量模型的精确性和可靠性。

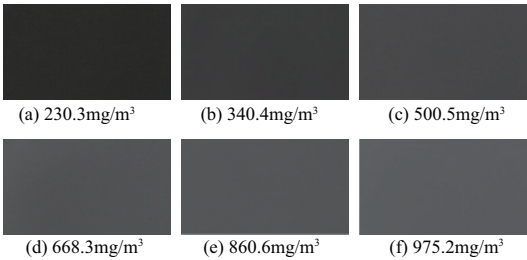


图 7 不同烟雾浓度下的图像

图 7 均是在测量室稳定时获得的烟雾核心图像，随着烟雾浓度的提高，越接近烟雾本身的色彩。在 Li<sup>[18]</sup>等的研究中可以看到环境光值  $A$  虽然在浓度变化时有细小的变化，但是对于测量的结果影响并不大。所以本研究在使用了环境光作为整体环境光后，忽略了环境光  $A$  的影响。最后环境光值  $A$  选择为在浓度最高时的最亮部分，其作为全局算法的环境光  $A$ 。

对比采用的暗通道算法使用相同的图像计算得到透射率并与烟雾浓度校准仪进行拟合后，使用拟合函数对烟雾浓度进行预测。在暗通道算法和本研究算法分别使用测试集的图样分别进行验证，其测试结果见表 1 所示，分别用于对暗通道算法的验证和本研究算法的检测。

从表中 1 可以得知，随着烟雾浓度的升高，图像透射率逐渐降低，即烟雾浓度与图像透射率呈

表 1 测量模型测试结果

| 图像<br>编号 | 实际浓度/<br>( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) | 原暗通道算法                          |                                 |        | 优化暗通道先验算法                       |                                 |        |
|----------|-------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------|---------------------------------|---------------------------------|--------|
|          |                                     | 预测浓度/( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) | 绝对误差/( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) | 相对误差/% | 预测浓度/( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) | 绝对误差/( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) | 相对误差/% |
| a        | 230.3                               | 200.1                           | -30.2                           | -13.12 | 278.6                           | 48.3                            | 20.97  |
| b        | 340.4                               | 300.2                           | -40.2                           | -11.81 | 378.1                           | 37.7                            | 11.08  |
| c        | 500.5                               | 579.2                           | 78.7                            | 15.72  | 572.6                           | 72.1                            | +14.41 |
| d        | 668.3                               | 622.5                           | -45.8                           | -6.85  | 657.6                           | -10.7                           | -1.60  |
| e        | 860.6                               | 833.1                           | -27.5                           | -3.20  | 844.9                           | -15.7                           | -1.82  |
| f        | 975.2                               | 903.6                           | -71.6                           | -7.34  | 990.2                           | 15.0                            | 1.54   |

负相关,因此可以将图像透射率作为烟雾浓度的测量特征值,对烟雾的透射率进行测量。以标准浓度为基准,对两种算法预测浓度的绝对偏差分别进行了测算,以期对算法的性能进行量化评估。可以看到本研究算法的绝对误差为 $24.45\text{mg}/\text{m}^3$ 相较于原来的算法更低更接近真实值,其次原来暗通道算法的均方根误差为 $54.63\text{mg}/\text{m}^3$ ,而本研究的算法均方根误差为 $43.28\text{mg}/\text{m}^3$ ,所以本研究算法预测稳定性更好,大幅偏差更少。最后本研究算法与原来算法在烟雾图像偏暗时误差较为接近,但是在烟雾图像偏亮时,本研究算法展现出优势,原来算法出现了 $71.6\text{mg}/\text{m}^3$ 这样的高偏差,但是本研究算法的偏差仅为 $15.0\text{mg}/\text{m}^3$ ,稳定性显著升高。

### 3 结 论

本研究提出将优化暗通道算法用于烟雾浓度估算之中,实现了烟雾浓度的迅速测量。在此基础上,建立了烟雾浓度测量系统,以直读式烟雾浓度仪作为标定器件,其最大相对误差为16%,在图片偏向烟雾本色时最大相对浓度会降低。最后将该算法与传统算法进行了对比,比较验证了本研究算法在烟雾浓度偏高时会有更高的准确度。

本研究虽然验证了所提算法的有效性,但受限于实验场地与同步标定条件的复杂性,目前测试验证集的样本规模较小(仅包含6组典型浓度样本),这在一定程度上限制了结果的统计显著性。在后续工作中,研究团队计划通过以下路径进一步提升结论的可靠性:一是构建更大规模的工业烟雾图像数据库,覆盖更多动态光照工况;二是引入消融实验定量分解背景纹理、光源色温等因素对测量精度的贡献率,从而进一步精炼补偿模型的稳健性。

随着光电成像系统的广泛应用,该装置可以将原来独立的烟雾报警器等产品融合进,具有广泛的使用价值。

#### 参考文献:

- [1] 王丽霞,夏雪,高凡,等.深度学习在森林火灾检测中的研究进展[J].林产工业,2023,60(11):88—92.  
Wang Lixia, Xia Xue, Gao Fan, et al. Research progress of deep learning in forest fire detection[J]. Forest Products Industry, 2023, 60(11): 88—92.
- [2] Santos J M, Couceiro M S, Portugal D, et al. A sensor fusion layer to cope with reduced visibility in SLAM[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2015, 80(3): 401—422.
- [3] Kim D E, Seo D G, Hong H R, et al. A study on the visibility in fire smoke[C]//Proceedings of the Korea Institute of Fire Science and Engineering Conference. Seoul, South Korea: KIFSE, 2010: 283—286.
- [4] 吴婕萍.基于图像透射率的烟雾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 law of smoke concentration based on image transmittance [D]. Chengdu: Sichuan Normal University, 2018.
- [5] 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 mine dust mass concentration based on dark channel prior[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(10): 187—200.
- [6] 张宏伟,张凌婕,袁小锋,等.基于离散余弦变换特征和隐马尔科夫模型的铜熔炼过程烟雾分级[J].激光与光电子学进展,2018,55(12):399—407.  
Zhang Hongwei, Zhang Lingjie, Yuan Xiaofeng, et al. Smoke classification in copper smelting process based on discrete cosine transform features and hidden Markov model[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(12): 399—407.
- [7] 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,2021.  
Chen Feng. Design and research of dust concentration detection based on image method[D]. Hangzhou: China Jiliang University, 2021.
- [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] 黄银清,曾力.像素标签化参数自适应航拍去雾算法[J].浙江大学学报(工学版),2026,60(3):556—564.  
Huang Yinqing, Zeng Li. Parameter adaptive aerial image dehazing algorithm based on pixel labeling[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2026, 60(3): 556—564.
- [10] Wu J, Li G, Luo Z, et al. Distribution law of dust concentration by image transmission in a cement workshop[J]. Applied Optics, 2018, 57(7): B59—B66.
- [11] 彭朋,董宇成,李家春,等.基于编解码深度估计的雾天公路能见度检测方法[J].光学学报,2025,45(8):140—153.  
Peng Peng, Dong Yucheng, Li Jiachun, et al. Highway visibility detection method in foggy weather based on codec depth estimation[J]. Acta Optica Sinica, 2025, 45(8): 140—153.
- [12] Carminati M, Ferrari G, Sampietro M. Emerging miniaturized technologies for airborne particulate matter pervasive monitoring[J]. Measurement, 2017, 101: 250—256.
- [13] He K, Sun J, Tang X. Single image haze removal using dark channel prior[C]//2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Miami, USA: IEEE, 2009: 1956—1963.
- [14] 刁志坚.基于自适应透射率与Gamma增强的图像去雾[J/OL].激光技术,2026:1—12.  
Diao Zhijian. Image dehazing based on adaptive transmittance and Gamma enhancement[J/OL]. Laser Technology, 2026: 1—12.
- [15] 李波,胡红萍,杨正民.基于超像素分割的暗通道先验图像

- 去雾算法[J]. 测试技术学报, 2025, 39(4): 415—423.
- Li Bo, Hu Hongping, Yang Zhengmin. Image dehazing algorithm of dark channel prior based on superpixel segmentation[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2025, 39(4): 415—423.
- [16] 苏腾华, 吕莉, 樊棠怀, 等. 暗通道先验优化的生成对抗网络图像去雾算法[J]. 南昌工程学院学报, 2025, 44(1): 81—90.
- Su Tenghua, Lv Li, Fan Tanghuai, et al. Image dehazing algorithm of generative adversarial network optimized by dark channel prior[J]. Journal of Nanchang Institute of Technology, 2025, 44(1): 81—90.
- [17] 火元莲, 张乔森, 张金石, 等. 一种用 Sigmoid 函数进行加权融合的图像去雾算法[J]. 计算机工程与科学, 2023, 45(9): 1621—1628.
- Huo Yuanlian, Zhang Qiaosen, Zhang Jinshi, et al. An image dehazing algorithm with weighted fusion using Sigmoid function[J]. Computer Engineering and Science, 2023, 45(9): 1621—1628.
- [18] Li G, Wu J, Luo Z, et al. Vision-based measurement of dust concentration by image transmission[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 68(10): 3942—3949.
- [19] 叶方平, 方朝阳, 徐显金, 等. 基于图像透射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 Zhaoyang, Xu Xianjin, et al. Research on dust concentration measurement algorithm based on image transmittance[J]. Journal of Applied Optics, 2022, 43(3): 496—502.
- [20] 宋磊, 冯凡, 李鑫, 等. 基于自适应大气光值补偿的改进暗通道煤矿井下图像去雾算法(特邀)[J]. 光子学报, 2024, 53(10): 102—113.
- Song Lei, Feng Fan, Li Xin, et al. Improved dark channel prior image dehazing algorithm for underground coal mines based on adaptive atmospheric light compensation (invited)[J]. Acta Photonica Sinica, 2024, 53(10): 102—113.
- [21] 王高峰, 李琨, 刘梦尼, 等. 自适应透射率补偿函数的图像去雾算法[J]. 电子设计工程, 2021, 29(23): 158—161.
- Wang Gaofeng, Li Kun, Liu Mengni, et al. Image dehazing algorithm with adaptive transmittance compensation function[J]. Electronic Design Engineering, 2021, 29(23): 158—161.
- [22] 孙景荣, 陈哲哲, 王健凯, 等. 结合图像纹理的自适应透射率修正去雾算法[J]. 数据采集与处理, 2024, 39(2): 395—405.
- Sun Jingrong, Chen Zhezhe, Wang Jiankai, et al. Dehazing algorithm of adaptive transmittance correction combined with image texture[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2024, 39(2): 395—405.
- [23] Lu D, Yang Y. A dehazing algorithm of compensated transmission based on negative haze concentration correction[J/OL]. Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2026: 1—9.
- [24] Yu T, Riaz I, Piao J, et al. Real-time single image dehazing using block-to-pixel interpolation and adaptive dark channel prior[J]. IET Image Processing, 2015, 9(9): 725—734.
- [25] Nayar S K, Narasimhan S G. Vision in bad weather[C]//Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision. Kerkyra, Greece: IEEE, 1999, 2: 820—827.
- [26] Zhan X, Yang Y, Liang J, et al. Gas bubble effects and elimination in ultrasonic measurement of particle concentrations in solid-liquid mixing processes[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2017, 66(7): 1711—1718.
- [27] 杨燕, 王志伟. 基于补偿透射率和自适应雾浓度系数的图像复原算法[J]. 通信学报, 2020, 41(1): 66—75.
- Yang Yan, Wang Zhiwei. Image restoration algorithm based on compensated transmittance and adaptive haze concentration coefficient[J]. Journal on Communications, 2020, 41(1): 66—75.