

# 甲烷检测器光干涉条纹亚像素级定位与检测精度研究

冯文彬<sup>1,2</sup>, 肖开泰<sup>1,2</sup>, 刘骥志<sup>3</sup>, 邢素霞<sup>3</sup>, 赵士杭<sup>3</sup>, 白天昕<sup>3</sup>, 于重<sup>3</sup>

(1. 煤矿安全技术国家重点实验室, 辽宁 抚顺 113122; 2. 煤科集团沈阳研究院有限公司, 辽宁 抚顺 113122;  
3. 北京工商大学 计算机与人工智能学院, 北京, 100148)

**摘 要:**光干涉式甲烷检测器的干涉条纹定位精度和环境因素是影响甲烷浓度检测精度和稳定性的重要因素。为提高检测精度, 提出了高斯滤波与高斯拟合的亚像素级条纹定位方法。首先针对光干涉图像设计了二维高斯滤波器, 通过实验获取  $\sigma$  最佳取值; 其次, 将滤波后的彩色图像转换为灰度图像, 并按列取灰度平均值, 得到一维离散灰度分布数据, 零级干涉条纹的峰值位置明显且呈高斯分布, 通过最值法初步确定零级条纹峰值位置, 然后在峰值位置左右各取 10 点, 利用最小二乘法对 21 点数据做一维高斯曲线拟合, 实现零级条纹的亚像素级定位, 进而建立甲烷体积分数与条纹偏移量的标定曲线。为提高系统稳定性, 减少环境因素产生的误差, 提出了一种背景差分的零点补偿方法, 利用初始条纹位置计算零级条纹的相对位移量, 修正标定曲线。对采集的 11 组实验数据计算零级条纹位置, 分别采用高斯滤波、均值滤波、小波滤波与高斯拟合、重心法、插值法 2 个组合, 实验结果表明, 采用高斯滤波和高斯拟合定位的方法, 定位平均标准差最小, 为 0.066 6, 标定曲线拟合的决定系数  $R^2$  均在 0.98 之上, 其中高斯滤波与高斯拟合最高, 达 0.999 9。对高斯滤波和高斯拟合标定曲线进行零点补偿后, 0~1% 甲烷体积分数交叉检验最大误差为 0.054%, 相比零点补偿前降低了 0.117%; 在 1%~10% 甲烷体积分数范围内, 最大误差为 0.075%, 满足 MT28—2005 标准要求。因此, 基于高斯滤波与高斯拟合的零级条纹定位方法定位精度高, 可以提高甲烷检测器的检测精度; 背景差分法可以消除零点漂移, 提高系统稳定性, 满足 MT28—2005 标准对甲烷检测器的检测精度要求。

**关键词:**甲烷浓度检测; 光干涉; 零级条纹定位; 高斯拟合; 零点补偿

**中图分类号:** TP391; TH744 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2025)S1-0384-10

## Research on sub-pixel positioning and detection accuracy of optical interference fringes in methane detectors

FENG Wenbin<sup>1,2</sup>, XIAO Kaitai<sup>1,2</sup>, LIU Qizhi<sup>3</sup>, XING Suxia<sup>3</sup>, ZHAO Shihang<sup>3</sup>, BAI Tianxin<sup>3</sup>, YU Chongchong<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Safety Technology Fushun 113122, China; 2. China Coal Technology & Engineering Group Shenyang Research Institute, Fushun 113122, China; 3. Beijing Technology and Business University, School of Computer and artificial, Beijing, 100148)

**Abstract:** The precision of fringe location in optical interferometric methane detectors and environmental factors are important factors affecting the accuracy and stability of methane concentration detection. To improve detection accuracy, a sub-pixel fringe location method combining Gaussian filtering and Gaussian fitting was proposed. Firstly, a two-dimen-

收稿日期: 2024-07-05 责任编辑: 王晓珍 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.0781

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2022YFC2904104)

作者简介: 冯文彬 (1971—), 男, 河北东光人, 研究员。E-mail: 625309069@qq.com

通讯作者: 肖开泰 (1979—), 男, 辽宁北镇人, 研究员。E-mail: lnfsxiaokt@139.com

邢素霞 (1975—), 女, 山东单县人, 副教授。E-mail: xingsuxia@163.com

引用格式: 冯文彬, 肖开泰, 刘骥志, 等. 甲烷检测器光干涉条纹亚像素级定位与检测精度研究[J]. 煤炭学报, 2025, 50(S1): 384-393.

FENG Wenbin, XIAO Kaitai, LIU Qizhi, et al. Research on sub-pixel positioning and detection accuracy of optical interference fringes in methane detectors[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(S1): 384-393.



移动阅读

sional Gaussian filter was designed for the optical interference image, and the optimal value of  $\sigma$  was obtained through experiments; secondly, the filtered color image was converted into a grayscale image, and the average grayscale values were taken column by column to obtain one-dimensional discrete grayscale distribution data. The peak position of the zero-order interference fringe is obvious and follows a Gaussian distribution. The peak position of the zero-order fringe was preliminarily determined by the maximum value method, and then 10 points were taken on both sides of the peak position. A one-dimensional Gaussian curve fitting was performed on the 21-point data using the least squares method to achieve sub-pixel level location of the zero-order fringe, and a calibration curve between methane concentration and fringe displacement was established. To improve system stability and reduce errors caused by environmental factors, a background difference zero-point compensation method was proposed. The relative displacement of the zero-order fringe was calculated using the initial fringe position to correct the calibration curve. The zero-order fringe positions of 11 sets of experimental data were calculated using two combinations of Gaussian filtering, mean filtering, wavelet filtering with Gaussian fitting, centroid method, and interpolation method. The experimental results show that the method using Gaussian filtering and Gaussian fitting for positioning has the smallest average standard deviation of positioning, which is 0.066 6, and the determination coefficient  $R^2$  of the calibration curve fitting is above 0.98, with Gaussian filtering and Gaussian fitting being the highest, reaching 0.9999. After zero-point compensation of the calibration curve of Gaussian filtering and Gaussian fitting, the maximum error of cross-validation for methane volume fraction from 0~1% is 0.054%, which is reduced by 0.117% compared to before zero-point compensation; within the range of 1~10% methane volume fraction, the maximum error is 0.075%, meeting the requirements of the MT28—2005 standard. Therefore, the zero-order fringe location method based on Gaussian filtering and Gaussian fitting has high positioning accuracy, which can improve the detection accuracy of methane detectors; the background difference method can eliminate zero-point drift, improve system stability, and meet the detection accuracy requirements of the MT28—2005 standard for methane detectors.

**Key words:** methane detection; light interference; zero level stripe positioning; Gaussian fitting; zero point compensation

## 0 引 言

煤炭在我国能源结构中占据着不可替代的位置,它不仅是国家能源安全的基石,更是推动经济发展的重要动力<sup>[1]</sup>。然而,煤矿安全生产面临着瓦斯灾害的严峻挑战。甲烷( $\text{CH}_4$ )作为瓦斯的主要成分,其浓度的准确检测对于预防瓦斯事故至关重要。目前, $\text{CH}_4$ 浓度检测技术主要包括催化燃烧法<sup>[2]</sup>、热导法<sup>[3]</sup>、红外光谱法<sup>[4]</sup>以及光干涉法<sup>[5]</sup>,这些方法依据 $\text{CH}_4$ 的物理和化学性质,各自拥有不同的检测范围和优势<sup>[6-7]</sup>,对比见表1。特别是光干涉法,它利用 $\text{CH}_4$ 在不同浓

度下的折射率差异,适用于井下绝大部分环境,且测量结果稳定可靠。

传统光干涉式甲烷测定器依赖人工目读白光干涉条纹位置,这种方法的准确性和稳定性容易受到主观判断的影响。随着技术的进步,基于 CCD 和图像处理技术的条纹自动定位法已经能够显著提升检测精度和稳定性<sup>[8-11]</sup>,值得注意的是,干涉条纹的定位精度对于确保甲烷测试的高准确度至关重要。

干涉条纹的定位方法有很多。传统的插值法<sup>[12]</sup>和多项式拟合法<sup>[13]</sup>操作简单,但定位精度有限。而空间频域法,移相法,采样平分包络函数法等<sup>[13]</sup>虽然精度较高,但却需要额外的光源参数。小波变换法,傅里叶变换法和空域滤波法虽然去噪能力强,但它们需要在空间域和频域之间转换,计算量大,不太适合用于便携式检测设备。重心法<sup>[14]</sup>依赖于数据的中心对称性。高斯拟合法不仅具备一定的噪声抑制能力,而且计算量相对较小,在 $\text{CH}_4$ 浓度检测中表现突出。如陈成峰<sup>[15]</sup>利用高斯曲线拟合干涉条纹包络的峰值点,利用拟合曲线的峰值点横坐标来确定零级条纹位置。然而,由于实际测试中的干涉条纹峰值包络与理论模型存在差异,仅靠少量的包络峰值点进行拟合,难以

表 1 不同  $\text{CH}_4$  检测方法对比

Table 1 Comparison of different  $\text{CH}_4$  detection methods

检测方法	检测原理	适用条件
催化燃烧法	可燃性	$\text{CH}_4$ 体积分数4%以下,不适用于 $\text{O}_2$ 浓度过低或存在含硫气体井下环境
热导法	热导率	$\text{CH}_4$ 体积分数4%以上,不适用于 $\text{CO}_2$ 浓度过高环境
光干涉法	折射率	绝大部分井下环境,不适用于 $\text{CO}_2$ 浓度过高环境
红外光谱法	选择性吸收	绝大部分井下环境,但需算法优化以减小误差

实现高精度条纹定位。此外,现有方法中,很少有考虑环境因素对条纹定位测试误差的影响<sup>[16]</sup>。

为解决这些问题,提出了一种改进的高斯拟合定位方法。首先,通过高斯滤波对干涉条纹进行预处理,以提高定位精度。然后,采用最值法初步确定干涉条纹灰度的最大值位置。在最大值两侧各选取 10 个点,使用最小二乘法对 21 点数据进行高斯拟合,最终通过拟合曲线确定零级条纹的位置。为了减少环境因素对 CH<sub>4</sub> 检测标定曲线的影响,还提出一种零点补偿方法,这种方法无需额外测量环境条件(如温度、湿度、氧气浓度等),从而提高了设备的稳定性和应用范围。

## 1 光干涉条纹亚像素级定位方法

### 1.1 光干涉条纹与 CH<sub>4</sub> 体积分数

光干涉甲烷测定器通过气体浓度对光折射率的影响来测量 CH<sub>4</sub> 体积分数,当气室中 CH<sub>4</sub> 体积分数发生改变时,折射率随之变化,导致与参考气室的光程差发生改变,进而引起干涉条纹的移动,如图 1 所示光干涉甲烷测定器的工作原理图。由于测量气室与参考气室处于相同的温度、压力等外部环境条件下,可以通过测量条纹的位移量确定 CH<sub>4</sub> 体积分数。图 2a 展示了通过光干涉甲烷测定器中的 CCD 获取的干涉条纹灰度分布图。随着 CH<sub>4</sub> 体积分数的变化,干涉条纹发生位移。在所有干涉条纹中,零级条纹的灰度值最大,位移最为明显,因此选择零级条纹作为测量干涉条纹位移的基准。根据 MT 28—2005 煤炭行业标准<sup>[17]</sup>,甲烷体积分数与条纹位移量之间存在线性关系,因此,通过测量并计算零级条纹位移量,可以计算 CH<sub>4</sub> 体积分数,实现数字化的自动测量。

### 1.2 光干涉图像预处理

干涉图像在获取过程中不可避免的引入一定的噪声,如 CCD 的电子噪声和环境干扰噪声,这些噪声

对干涉条纹精确定位造成了一定的误差。常用的滤波方法包括均值滤波、中值滤波和小波变换<sup>[18]</sup>等。均值滤波虽然能有效滤除噪声,但同时会导致边缘模糊,中值滤波主要针对随机噪声,小波变换虽效果明显,但计算过程复杂,计算量较大。高斯滤波器<sup>[19]</sup>在滤除具有高斯分布特性的噪声方面表现出色,且实现过程相对简单,与均值滤波器相比,高斯滤波器对图像边缘的模糊程度较小,在图像处理中备受青睐。

高斯滤波通过使用高斯算子对图像进行卷积运算实现图像平滑滤波效果。通常采用一个 (3,3) 或 (5,5) 的矩阵模板进行加权运算。二维的离散高斯核函数如式 (1) 所示:

$$H_{i,j} = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(i-k-1)^2+(j-k-1)^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

式中:  $(i, j)$  为高斯卷积核的中心坐标;  $(2k+1) \times (2k+1)$  为二维卷积核矩阵的维数;  $\sigma$  为高斯核的标准差,表示数据的离散程度,  $\sigma$  较小,模板中心系数较大,周围系数较小,对图像的平滑效果不明显;相反,当  $\sigma$  较大时,则生成的模板各个系数相差很大,对图像的平滑效果比较明显。为确定  $\sigma$  的最佳取值,在  $k=1$  时,即高斯核为 (3,3) 大小,  $\sigma$  取值从 0 变化至 0.9,为每个值生成对应的高斯核模板,然后利用不同的模板对干涉图像进行卷积滤波。滤波后,通过多项式拟合法确定零级条纹位置,计算每个  $\sigma$  值下的零级条纹位置的均方差。均方差是衡量数据偏离平均值的程度,均方差越小,表示数据的一致性越好,滤波效果越理想。因此,我们选择使均方差最小的  $\sigma$  值作为最佳参数,以确保高斯滤波器在平滑图像的同时,最大程度地保留了图像的细节特征。

实验时,采用 3 组不同日期采集的干涉条纹图像,每组包含 10 幅图像。每组数据均在相同环境下连续采集。由于实验条件一致,预期零级条纹位置应相对

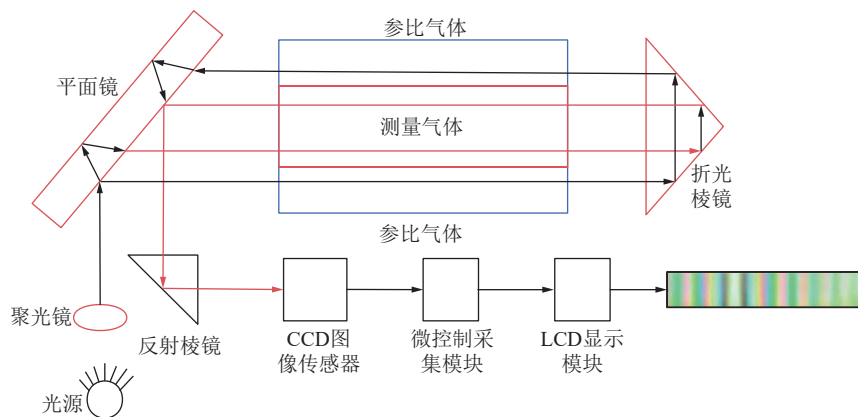


图 1 光干涉甲烷测定器工作原理示意

Fig. 1 Schematic of the working principle of the optical interferometric methane detector

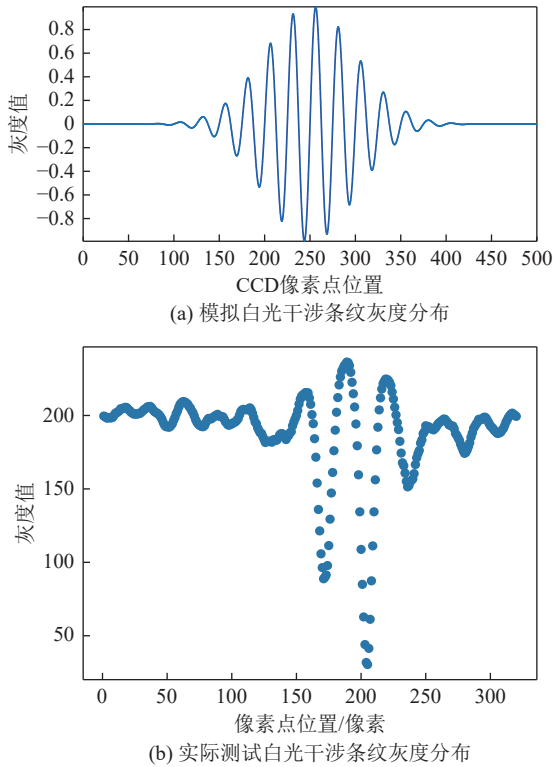


图 2 干涉条纹灰度分布

Fig.2 Interference fringe intensity distribution

稳定,理论上均方差应该较小。实验结果汇总在表 1 中,通过表中数据分析,可以观察到当  $\sigma$  取值 0.8 和 0.9 时,3 组数据的均方差相对较小。说明在该范围内,高斯滤波器对图像的平滑效果最佳,对零级条纹位置的干扰最小。基于以上实验结果,选择  $\sigma=0.8$  作为高斯滤波核的最佳标准差值。高斯滤波核矩阵如式 (2) 所示。

$$H = \begin{bmatrix} 0.0571 & 0.1247 & 0.0571 \\ 0.1247 & 0.2724 & 0.1247 \\ 0.0571 & 0.1247 & 0.0571 \end{bmatrix} \quad (2)$$

### 1.3 亚像素级干涉条纹定位

CCD 获取的干涉条纹图像经滤波后转换为灰度图像,通过对灰度图像按列求平均,得到一维离散数据。理想条件下,干涉条纹的峰值包络有很明显的高斯分布特征,如图 2a 所示。然而,实际测试中,由于噪声和其他因素影响,能够根据峰值包络法获取的有效峰值点有限,如图 2b 所示,这导致了拟合误差较大。

为提高极值点定位精度,首先选取灰度最大值对应的位置为初始零级条纹位置。然后,以该位置为中心,左右各取 10 个点,组成一个包含 21 点数据点的集合,如图 3 所示。这 21 点数据近似符合高斯正态分布。因此,选择高斯曲线对 21 点离散数据进行近似拟合。通过最小二乘法拟合除一条高斯曲线,从而精确确定零级条纹的中心位置。最小二乘法作为一

种数学优化技术,通过最小化误差的平方和来寻找数据的最佳函数匹配。在本例中,它被用来拟合高斯曲线,以确定零级条纹的精确位置,从而提高测量的准确性和可靠性。这种方法能够有效地减少由于噪声和其他干扰因素带来的误差,提高干涉条纹图像处理的精度。

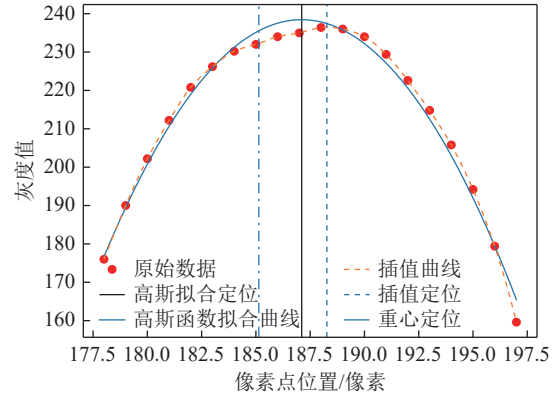


图 3 零级条纹定位结果

Fig.3 Zero-order fringe localization results

一维高斯拟合函数如式 (3) 所示:

$$f(x) = a \cdot e^{-\frac{(x-b)^2}{2c^2}} + d \quad (3)$$

其中,  $a$  是高斯曲线振幅 (峰值高度);  $b$  是曲线中心位置,也就是峰值所在的  $x$  坐标;  $c$  是曲线标准差,控制曲线的宽度;  $d$  是曲线垂直偏移量。对于一组数据点  $(x_i, y_i)$ , 误差函数  $E$  定义为实际数据点与高斯曲线之间差的平方和,如式 (4) 所示:

$$E = \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i))^2 \quad (4)$$

其中,  $f(x_i)$  是第  $i$  个拟合值,  $n$  是拟合点的个数,  $y_i$  为第  $i$  个实际数据值。为找到最佳拟合参数  $a, b, c, d$ , 对误差函数  $E$  分别求  $a, b, c, d$  的偏导,并令偏导数为 0, 得到一组非线性方程。通过设置初值,例如令  $a=1, b$  为所有  $y_i$  的均值,  $c$  为所有  $y_i$  的方差,  $d$  为所有  $y_i$  的均值,使用迭代法不断更新这些参数值,直到误差函数值收敛到一定值不再明显减小,或达到预期迭代次数。此时得到参数的  $a, b, c, d$  使得拟合曲线与实际数据点之间的残差最小,从而实现良好的拟合效果。将这些参数值带入函数  $f(x)$  中,得到最终的拟合函数。

根据高斯拟合曲线,找到曲线的极值点,极值点对应的横坐标即为零级条纹位置。

如图 3 所示,图中红色点为 21 点数据  $(x_i, y_i)$ , 零级条纹的初始位置设定在第 11 点处,对应图像的第 188 列。蓝色实线表示通过最小二乘法得到的高斯拟合曲线,很好的描述了数据点的分布。通过对高斯曲

线求极值,找到极值点所在横坐标即为零级条纹的精确位置。在图中用黑色竖线标示,对应像素位置为 187.110。结果表明,通过高斯拟合法,能够比初始估计(即第 11 点处)更精确的确定零级条纹位置。

此外,图中还展示了重心法和插值法得到的零级条纹位置,分别用黑色实线左右 2 条虚线表示。重心法得到零级条纹位置为 185.134,插值法得到零级条纹位置为 188.270。这些结果表明,不同的方法可能会得到略有差异的结果,但高斯拟合方法提供了一种更为精确和可靠的定位方式。

## 2 基于光干涉位移的甲烷测定器标定

对 0%、1%、4%、7%、10% 甲烷体积分数下的干涉条纹进行零级条纹定位,可以得到不同体积分数下的定位结果,如图 4 所示。

由图 4 可以看出,不同甲烷体积分数下的零级条纹位置随体积分数的增加而向右移动,因为气体浓度的变化影响了气体的折射率。

如图 5 所示,图中红色点表示在 0%、1%、4%、7%、10% 5 个不同体积分数下的零级条纹位置。这些数据点表明,CH<sub>4</sub> 体积分数与零级条纹位置呈明显的线性关系。使用线性拟合法对这些数据点拟合,得到一条标定曲线。该标定曲线描述了 CH<sub>4</sub> 体积分数与零级条纹位置之间的关系。该标定曲线可以表示为

$$y = mx + b \quad (5)$$

其中, $y$  表示 CH<sub>4</sub> 的体积分数, $x$  表示零级条纹位置, $m$  是斜率,表示条纹位置随体积分数变化的敏感度, $b$  是截距,反映了在 0% 体积分数时的条纹位置。

根据该标定曲线。可以预测任意未知体积分数的干涉条纹图像对应的 CH<sub>4</sub> 体积分数。

## 3 CH<sub>4</sub> 检测性能测试与零点补偿

### 3.1 光干涉条纹采集

光干涉条纹测试实验时,采用气压式瓦斯计校准器模拟不同体积分数的甲烷环境。使用气压式瓦斯计校准器向甲烷体积分数检测器的气室加压,调整气室压力,使水柱上升至特定刻度,等待水柱在某高度维持 1 min 稳定时,通过 CCD 相机获取干涉条纹图像,记录当前刻度对应的 CH<sub>4</sub> 体积分数。为降低测试误差,每个体积分数下采集 5 次干涉图像,计算条纹位置后取平均值。

将采集的数据分为训练集和测试集。随机选择 0%、1%、4%、7%、10% 体积分数作为训练集,用于建立甲烷气体检测的标定曲线。测试集选择 0.378%、

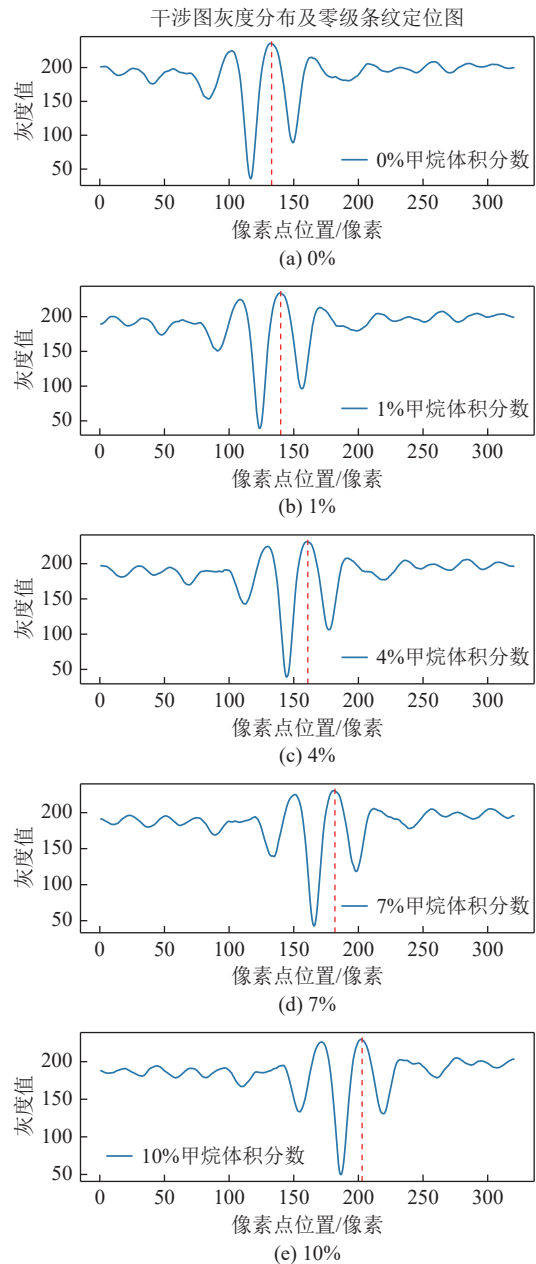


图 4 不同甲烷体积分数下的零级条纹定位

Fig.4 Zero-order fringe localization at different methane volume fraction

0.567%, 0.756%, 2.835%, 5.671%, 7.561%。体积分数的数据,用于验证模型的精度和稳定性。

训练集和测试集数据在同一实验室连续采集 10 d,室内温度、湿度、气压、氧气浓度等随天气变化略有差异。但尽量保持一致性以减少外部因素对实验结果的影响。

### 3.2 零级条纹定位与标定误差分析

对所有采集的干涉条纹图像进行预处理和定位处理。每刻度(或体积分数)下的图像有 5 幅,这些图像在相同环境下连续采集,零级条纹位置相对稳定,平均标准差应较小。预处理方法分别采用高斯滤波、

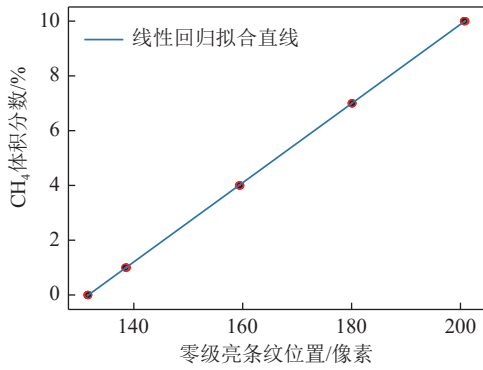


图 5 CH<sub>4</sub> 体积分数与条纹位移量标定曲线

Fig.5 Calibration curve of CH<sub>4</sub> volume fraction versus fringe displacement

均值滤波、小波变换; 定位方法分别采用高斯拟合、重心法和插值法。两两组合后的平均标准差见表 2。

表 2 3 组 30 幅图像的在不同  $\sigma$  取值时的条纹定位均方差

Table 2 Mean square error of fringe localization for 30 images in 3 groups at different  $\sigma$  values

$\sigma$	组1	组2	组3
0.1	0.090 7	0.054 2	0.104 1
0.2	0.090 7	0.054 2	0.104 1
0.3	0.090 7	0.054 2	0.104 1
0.4	0.101 0	0.056 2	0.080 6
0.5	0.090 9	0.035 9	0.075 1
0.6	0.070 8	0.021 4	0.062 4
0.7	0.045 0	0.075 4	0.063 9
0.8	0.040 8	0.012 2	0.053 7
0.9	0.043 4	0.012 2	0.049 0

标准差小说明定位结果更加集中, 数据围绕均值的离散程度越低。通过表 2 可知, 高斯滤波与高斯拟合定位组合得到的零级条纹定位标准差最小, 为 0.066 6。相同的拟合定位方法下, 高斯滤波的效果最好, 说明图像中的噪声分布更加符合高斯分布特点。在相同的滤波方法下, 高斯拟合定位的平均标准差最小, 重心法最大。

以 3 种滤波方法与 3 种定位方法两两组合, 得到各体积分数下的零级条纹位置, 通过线性拟合得到 9 组标定曲线, 如图 6 所示。由图 6 可以看出, 不同方法的标定曲线斜率基本一致, 表明 CH<sub>4</sub> 体积分数变化的响应趋势是相似的。尽管斜率一致, 但不同方法的截距差异较大, 反映了不同方法在处理数据时的系统偏长或初始条件的不同处理方式。9 条拟合曲线的决定系数  $R^2$  见表 3 所示, 除小波滤波-重心法组合的拟合决定系数  $R^2$  为 0.981 2 外, 其他方法的  $R^2$  均在

0.99 以上, 说明这些方法都能很好地拟合数据, 特别是高斯滤波与高斯拟合组合的  $R^2$  达到 0.999 9, 非常接近 1, 说明这种组合在数据拟合上标注卓越, 几乎完美地解释了数据中的所有变异。后续均采用高斯滤波和高斯拟合方法进行标定和测试。

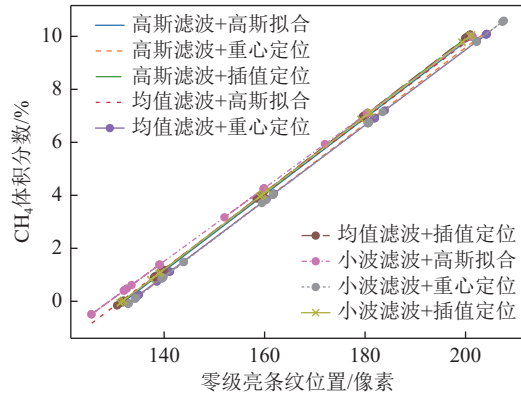


图 6 不同拟合方法的标定曲线拟合曲线

Fig.6 Calibration curves fitted by different fitting methods

表 3 不同方法下的零级条纹定位平均标准差

Table 3 Average standard deviation of zero-order fringe localization using different methods

	高斯拟合	重心法	插值法
高斯滤波	0.066 6	0.831 7	0.386 0
均值滤波	0.068 7	1.003 2	0.415 6
小波滤波	0.774 1	1.350 9	0.892 8

通过应用高斯滤波和高斯定位技术, 对 10 组数据进行处理, 并绘制了标定曲线, 如图 7 所示。进一步分析曲线, 计算出斜率、截距、残差和决定系数  $R^2$ , 结果汇总在表 4 中。表 4 数据显示, 所有标定曲线的残差都非常低, 而决定系数  $R^2$  的值则非常高, 说明数据与模型的拟合程度非常优秀。此外, 每组曲线的斜率绝对误差均小于 0.2%, 进一步验证了条纹位移量与体积分数变化之间的一致性。然而, 截距的最大绝对误差达到了 30%, 这与数据采集时各自不同的环境条件有关。

### 3.3 CH<sub>4</sub> 体积分数预测误差分析

在进行光干涉式甲烷测定器技术的测量误差分析时, 根据文献[17]提供的标准, 见表 5 所示, 可以得知不同的体积分数范围对测试精度的要求有所差异, 例如, 在 0~1%CH<sub>4</sub> 体积分数范围内, 绝对误差的标准设定为  $\pm 0.05\%$ 。随 CH<sub>4</sub> 体积分数增加, 允许的测试精度误差范围有所放宽, 见表 6。

为确保条纹定位精度和性能测试的稳定性, 本实验设计了 2 种预测误差检验方法。

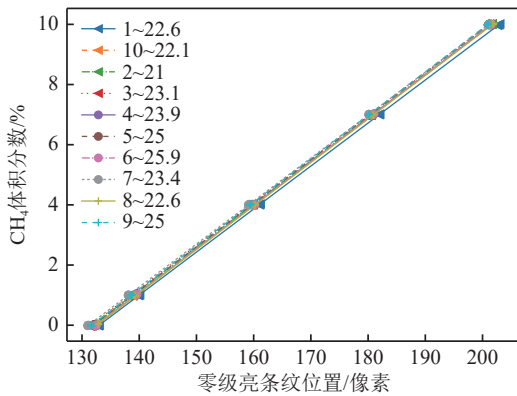


图 7 高斯滤波+高斯定位的 10 组拟合曲线

Fig.7 Ten fitting curves of Gaussian filtering + Gaussian positioning

表 4 不同方法下的线性回归拟合的拟合决定系数

Table 4 Determination coefficients of linear regression fits for different methods

方法	高斯拟合	重心定位	插值定位
高斯滤波	0.999 9	0.998 1	0.999 6
均值滤波	0.999 8	0.997 7	0.999 4
小波滤波	0.995 1	0.981 2	0.998 5

表 5 10 组高斯滤波-高斯拟合的线性回归直线参数

Table 5 Linear regression line parameters of ten sets of Gaussian filtering-Gaussian fitting

组数	斜率	截距	残差	R <sup>2</sup>
1	0.142 981	-19.016 5	0.087	0.999 981
2	0.143 372	-18.910 5	0.455	0.999 717
3	0.143 584	-18.888 7	0.095	0.999 971
4	0.144 614	-19.159 4	0.057	0.999 991
5	0.144 659	-19.091 8	0.093	0.999 981
6	0.144 928	-19.199 1	0.082	0.999 983
7	0.142 847	-18.728 5	0.074	0.999 988
8	0.144 604	-19.172 3	0.129	0.999 964
9	0.144 376	-19.010 5	0.086	0.999 983
10	0.144 663	-19.117 1	0.071	0.999 987

1) 同组数据验证: 使用当天的标定曲线预测同一时段内采集的干涉条纹所对应的 CH<sub>4</sub> 体积分数, 如用第 1 天的标定曲线预测第 1 天的测试数据。这种方法不允许跨日预测, 即不能用第 1 天的标定曲线预测第 2 天或其他时间的数据。同组数据验证的目的是分析定位精度及预测精度。

2) 交叉验证: 这种方法使用第 1 天的标定曲线预测随后 9 天内采集的干涉条纹对应的 CH<sub>4</sub> 体积分数。交叉验证的目的在于验证算法的稳定性, 确保即使在不同的时间点, 算法也能保持一致的预测性能。

表 6 MT 28—2005 CH<sub>4</sub> 体积分数测试误差标准

Table 6 Standard for CH<sub>4</sub> volume fraction test error according to MT 28—2005

体积分数/%	0~1	1~4	4~7	7~10
绝对误差/%	±0.05	±0.1	±0.2	±0.3

实验中, 选择了表 4 中的 10 条标定曲线进行测试。测试数据涵盖了从 0.378% 到 7.561% 不同体积分数的 CH<sub>4</sub>, 这些数据代表了干涉条纹图像在不同体积分水平下的响应。通过这些测试, 可以评估光干涉式甲烷测定器在不同体积分数范围内的测量准确性和稳定性。

### 3.3.1 同组数据验证与误差分析

在同组数据验证过程中, 采用某一标定曲线预测同时段内采集的干涉条纹图像, 以评估干涉条纹的定位精度。定位精度的高低直接影响预测精度, 因此, 这一验证方法对确保测量结果的准确性至关重要。

实验中, 对连续采集 10 组不同体积分数 (0.378%, 0.567%, 0.756%, 2.835%, 5.671%, 7.561%)CH<sub>4</sub> 对应的干涉条纹数据进行分析。按同组验证的原则进行条纹位置计算, 并预测了相应的 CH<sub>4</sub> 体积分数。随后, 计算预测结果与真实结果的绝对误差, 并根据体积分数值统计了 10 组预测结果中的最大绝对误差、最小绝对误差及平均绝对误差。

图 8 为一个直观的误差分布视图。通过分析图 8 中的测试误差结果, 可以得出如下结论: ① 0~1% CH<sub>4</sub> 体积分数范围内, 0.378% 的 CH<sub>4</sub> 体积分数对应的绝对误差范围最大, 最大绝对误差为 0.04%, 平均误差为 0.015%。这一结果满足 MT 28—2005 技术标准要求。② 2.835% 的 CH<sub>4</sub> 体积分数对应的绝对误差最小, 最大值为 0.071%, 平均 0.017%。③ 在较高体积分范围内, 5.671% 的 CH<sub>4</sub> 体积分数对应的绝对误差最大值为 0.035%, 而 7.561% 的最大绝对误差为 0.024%。尽管这些误差值较高, 但满足 MT 28—2005 技术标准的要求。

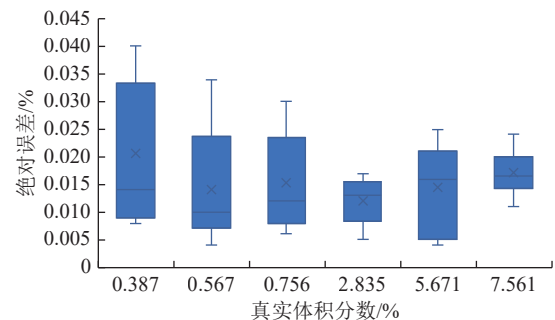


图 8 同时段预测误差

Fig.8 Prediction errors for the same time period

综上, 高斯滤波与高斯定位技术在干涉条纹定位精度方面表现出较高的精度, 满足行业标准的精度要求。在实际应用中具有较高的可靠性和有效性。

### 3.3.2 交叉验证与误差分析

交叉验证可以评估模型的泛化能力, 特别是在不同时间或条件下的稳定性。实验中通过使用第 1 天的标定曲线来预测后续 9 天采集的干涉条纹数据, 能检验标定曲线在不同测试环境下的适应性和稳定性。

按 CH<sub>4</sub> 体积分数对 9 组测试结果进行误差统计, 结果显示误差较图 8 中的结果又明显增加。在 1~10%CH<sub>4</sub> 体积分数范围内, 最大绝对误差为 0.171%, 平均绝对误差 0.077%。2.835%CH<sub>4</sub> 体积分数对应的最高绝对误差 0.128。这些误差值均高于 MT 28—2005 标准对 0~1%、1%~4% 范围的误差要求, 表明测试误差已不符合技术标准。

尽管表 4 中每组曲线的决定系数  $R^2$  接近为 1, 显示了高度拟合, 但图 9 中的交叉验证误差较大, 这表明误差可能与条纹定位精度无关。测试误差可能与标定曲线的测试环境与预测数据的测试环境不同有关, 如温度、气压、湿度、氧气浓度等环境因素。这些环境因素对干涉条纹位移的干扰是一个复杂的过程, 很难确定单一要素对条纹位移量的影响<sup>[20-21]</sup>。图 10 展示了在 0%CH<sub>4</sub> 体积分数下, 连续记录 20 天条纹位

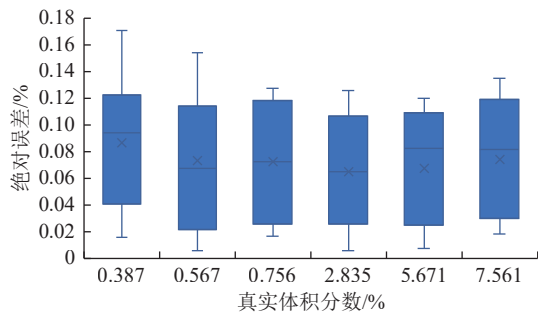


图 9 交叉验证绝对误差

Fig.9 Cross-validation absolute error

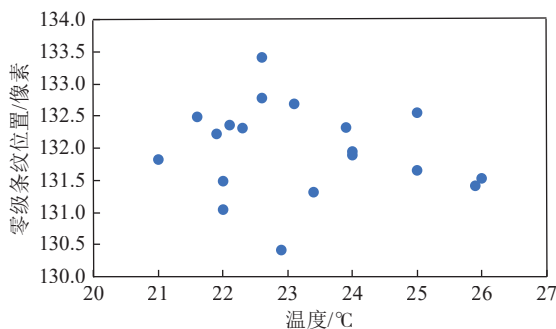


图 10 零级条纹位置与温度的关系

Fig.10 Relationship between zero-order fringe position and temperature

置与温度值的关系, 显示条纹位置与测试时的环境温度无明显对应关系, 很难建立明确的关系式。因此, 在未来的实验设计中, 可以考虑环境条件的监测, 减少环境因素对测试结果的影响。本文从改进算法出发, 提出背景差分的零点补偿方法, 以适应不同环境条件下的测试, 提高预测准确性和稳定性。

### 3.4 基于背景差分的零点补偿

1) 无压条件下的条纹位置 ( $P_-$ )。当甲烷检测器的气室与参考室中的气体完全相同时, 即在不加任何压力时, 采集和计算干涉条纹位置, 记为  $P_-$ , 则该位置反映了当前环境因素对条纹位移量的影响。

2) 加压后的条纹位置 ( $P$ )。当通过气压式瓦斯计校准器向气室加压, 等价于 CH<sub>4</sub> 体积分数发生变化时, 干涉条纹位置发生变化。计算此时的零级条纹位置, 记为  $P$ 。该  $P$  值反映了当前 CH<sub>4</sub> 体积分数和环境因素共同产生的位移量。

3) 背景差分计算 ( $P'$ )。用式 (5) 计算背景差分后的条纹位置, 其中  $P'$  反映的仅仅是 CH<sub>4</sub> 体积分数变化产生的位移量。

$$P' = P - P_- \quad (6)$$

将不同 CH<sub>4</sub> 体积分数下的  $P'$  进行线性回归拟合, 得到标定曲线, 该标定曲线称为背景差分后的零点补偿曲线。

为验证零点补偿后的标定曲线预测 CH<sub>4</sub> 体积分数的稳定性, 对第 1 组标定曲线进行零点补偿后, 用于预测第 2 组—第 10 组数据。预测误差如图 11 所示。经零点补偿后, 交叉验证的绝对误差明显降低, 在 0~1% 体积分数范围, 最大误差为 0.054%, 相对零点校正前降低了 0.117%, 平均误差 0.035%, 近似满足测量标准要求。在 1%~10%CH<sub>4</sub> 体积分数范围内, 最大误差均小于 MT 28—2005 标准的误差要求。因此, 基于背景差分的零点补偿方法是一种快速且稳定的 CH<sub>4</sub> 检测方法, 能够有效地减少环境因素对测量结果的影响, 提高测量的准确性和稳定性。

这种方法通过减少仪器标定次数, 降低了操作的

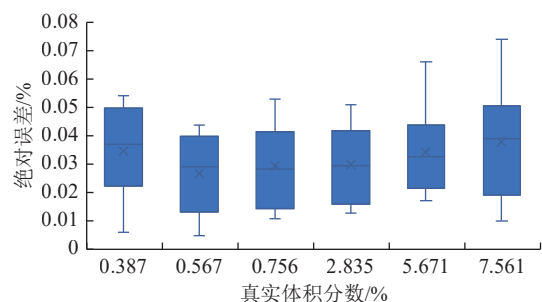


图 11 零点校正后的交叉验证误差

Fig.11 Cross-validation error after zero-point correction.

复杂性和成本,同时提高了测量结果的可靠性。

## 4 结 论

在光干涉甲烷检测器的性能评估中,干涉条纹的定位精度是决定检测精度的核心因素之一。此外,环境因素的补偿一直是行业内的一大挑战,它对仪器的稳定性和可靠性有着显著影响。通过以下 2 个方面的研究,为提高光干涉甲烷检测器的性能提供了有效的解决方案:

1) 高斯滤波和高斯拟合定位方法:本研究首先提出了一种结合高斯滤波和高斯拟合的定位方法。这种方法通过有效降低图像噪声,显著提高了零级条纹的定位精度。实验结果表明,定位的标准差达到了 0.066 6,从而解决了条纹定位精度的问题。

2) 背景差分的零点补偿方法:本文提出的北京差分零点补偿法能够有效地减少环境因素的影响。通过这种方法,不仅提升了测试的稳定性和鲁棒性,还避免了仪器使用前频繁的标定过程。这为光干涉甲烷检测器的自动检测提供了一种稳定可靠的解决方案。

综上所述,笔者不仅在理论上提供了新的视角,而且在实际应用中也展现了显著的改进。通过这些方法的应用,光干涉甲烷检测器的检测精度和稳定性得到了显著提升,为相关领域的研究和实践提供了重要的参考和指导。

## 参考文献(References):

- [1] 张培森,牛辉,朱慧聪,等. 2019—2020 年我国煤矿安全生产形势分析[J]. 煤矿安全, 2021, 52(11): 245—249.  
ZHANG Peisen, NIU Hui, ZHU Huicong, et al. Analysis of coal mine safety production situation in China from 2019 to 2020[J]. Safety in Coal Mines, 2021, 52(11): 245—249.
- [2] 原恒. 适用于矿井的甲烷检测技术研究[J]. 内蒙古石油化工, 2022, 48(4): 70—73.  
YUAN Heng. Study on the methane-testing technologies suitable to pit[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2022, 48(4): 70—73.
- [3] 黄为勇,童敏明,任子晖. 采用热导传感器检测气体浓度的新方法研究[J]. 传感技术学报, 2006, 19(4): 973—975.  
HUANG Weiyong, TONG Minming, REN Zihui. New method of gas concentration detection using thermal conductivity sensor[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2006, 19(4): 973—975.
- [4] 吕团. 红外甲烷传感器系统设计[J]. 化学工程与装备, 2022(8): 192—194.  
LYU Tuan. Design of infrared methane sensor system[J]. Chemical Engineering & Equipment, 2022(8): 192—194.
- [5] 刘畅. 基于 STM32 的光干涉甲烷浓度测量系统研究[D]. 天津: 天津大学, 2021.  
LIU Chang. Research on optical interference methane concentration measurement system based on STM32[D]. Tianjin: Tianjin University, 2021.
- [6] 梁运涛,田富超,冯文彬,等. 我国煤矿气体检测技术研究进展[J]. 煤炭学报, 2021, 46(6): 1701—1714.  
LIANG Yuntao, TIAN Fuchao, FENG Wenbin, et al. Research progress of coal mine gas detection technology in China[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(6): 1701—1714.
- [7] 梁运涛,陈成锋,田富超,等. 甲烷气体检测技术及其在煤矿中的应用[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(4): 40—48.  
LIANG Yuntao, CHEN Chengfeng, TIAN Fuchao, et al. Methane gas detection technology and its application in coal mines[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(4): 40—48.
- [8] 张海涛,冯永贵,王江鹏. 上隅角瓦斯测量的 CCD 光纤光谱仪设计[J]. 山西煤炭, 2019, 39(3): 89—96.  
ZHANG Haitao, FENG Yonggui, WANG Jiangpeng. Design of CCD fiber optic spectrometer for gas measurement in upper corner[J]. Shanxi Coal, 2019, 39(3): 89—96.
- [9] 赵景科. 基于 ARM 和线阵 CCD 的甲烷浓度测量仪的研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.  
ZHAO Jingke. Research on methane concentration measuring instrument based on ARM and linear CCD[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010.
- [10] 李庆圣. 光干涉甲烷自动测量装置研制[D]. 太原: 中北大学, 2018.  
LI Qingsheng. Development of optical interference methane automatic measuring device[D]. Taiyuan: North University of China, 2018.
- [11] LONG T, LI E, YANG L, et al. Analysis and design of an effective light interference methane sensor based on three-dimensional optical path model[J]. Journal of Sensors, 2018, 2018(1): 1342593.
- [12] 吴云帆,张仕明,吴玉国,等. 基于三次样条插值法的凸轮型线误差算法研究[J]. 制造业自动化, 2023, 45(10): 66—70.  
WU Yunfan, ZHANG Shiming, WU Yuguo, et al. Research on cam profile error algorithm based on cubic spline interpolation[J]. Manufacturing Automation, 2023, 45(10): 66—70.
- [13] 汝洪武,张文喜,吴玲玲. 白光干涉垂直扫描测量算法综述[J]. 激光与红外, 2020, 50(8): 899—906.  
RU Hongwu, ZHANG Wenxi, WU Lingling. A survey of white light interference vertical scan measurement algorithms[J]. Laser & Infrared, 2020, 50(8): 899—906.
- [14] 夏鑫,付生鹏,夏仁波,等. 基于改进灰度重心法的线结构光中心提取算法[J]. 激光杂志, 2024, 45(1): 75—79.  
XIA Xin, FU Shengpeng, XIA Renbo, et al. Extraction algorithm of line structured light center based on improved gray gravity method[J]. Laser Journal, 2024, 45(1): 75—79.
- [15] 陈成锋,梁运涛,田富超,等. 光干涉式甲烷测定器的零级条纹自动定位及性能测试[J]. 煤炭学报, 2021, 46(S2): 830—839.  
CHEN Chengfeng, LIANG Yuntao, TIAN Fuchao, et al. Automatic location and performance test of zero-order fringe of optical interference methane detector[J]. Journal of China Coal Society, 2021,

- 46(S2): 830–839.
- [16] 周莹, 郑舒月, 耿芸仙, 等. 光干涉甲烷测定器检定仪的测量不确定度评定[J]. 现代信息科技, 2020, 4(15): 52–54.  
ZHOU Ying, ZHENG Shuyue, GENG Yunxian, et al. Measurement uncertainty evaluation of photo-interferometric methane tester[J]. Modern Information Technology, 2020, 4(15): 52–54.
- [17] 光干涉式甲烷测定器: MT 28—2005[S].
- [18] 李小成, 杨鹏程, 梁蒲佳, 等. 基于 dbN 小波变换和自适应高斯滤波的齿面干涉图像相位滤波方法[J]. 机械与电子, 2023, 41(4): 17–21.  
LI Xiaocheng, YANG Pengcheng, LIANG Pujia, et al. Phase filtering method of tooth surface interference image based on dbN wavelet transform and adaptive Gaussian filtering[J]. Machinery & Electronics, 2023, 41(4): 17–21.
- [19] 张再源, 徐永祥. 迈克耳孙干涉仪中动镜微小位移量的测量方法研究[J]. 物理与工程, 2023, 33(2): 136–142.  
ZHANG Zaiyuan, XU Yongxiang. Measurement of micro-displacement of movable mirror in Michelson interferometer[J]. Physics and Engineering, 2023, 33(2): 136–142.
- [20] 林浩, 李恩, 梁自泽, 等. 光干涉甲烷检测器的光路改进与零点补偿[J]. 煤炭学报, 2015, 40(1): 218–225.  
LIN Hao, LI En, LIANG Zize, et al. Configuration improvement and zero-drift error compensation of light interference methane detector[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(1): 218–225.
- [21] 赵坤, 王正帅. 煤矿井下光干涉甲烷测定器误差分析与修正研究[J]. 中国矿业, 2023, 32(3): 74–79.  
ZHAO Kun, WANG Zhengshuai. Study on error analysis and correction of optical interference methane detector in coal mine[J]. China Mining Magazine, 2023, 32(3): 74–79.