

基于 TDLAS 技术的 CH₄ 气体检测与温度补偿方法

马 砺^{1,2}, 范新丽^{1,2}, 张 朔^{1,2}, 王伟峰^{1,2}, 魏高明^{1,2}

1. 西安科技大学安全科学与工程学院, 陕西 西安 710054

2. 西安科技大学陕西省煤火灾害防控重点实验室, 陕西 西安 710054

摘 要 CH₄ 气体的精准检测对防止矿井瓦斯爆炸, 确保安全生产至关重要。目前基于可调谐半导体激光吸收光谱技术(TDLAS)存在因温度变化导致气体浓度测量误差较大。探究了基于 TDLAS 的 CH₄ 气体检测系统与温度补偿方法, 分析温度对 CH₄ 气体吸收谱线的影响, 通过算法补偿模型消除环境温度对 CH₄ 气体检测的影响。依据 TDLAS 技术原理及相关理论, 对系统发射单元、吸收池、信号接收单元、数据处理单元进行设计, 搭建了基于 TDLAS 技术的 CH₄ 气体浓度检测系统, 实验检测了不同环境温度(10~50 °C)时 0.04%CH₄ 气体浓度, 分析温度变化对 CH₄ 气体在波长为 1.653 μm 处吸收谱线强度和半宽度的影响。为消除温度对 CH₄ 气体检测的影响并提高补偿效果, 采用粒子群优化算法(PSO)优化 BP 神经网络(BPNN)的最佳权值和阈值, 建立 CH₄ 气体的 PSO-BP 温度补偿模型, 克服了 BP 神经网络收敛速度慢、易陷入局部最优的缺点。结果表明:(1)基于 TDLAS 的 CH₄ 气体检测浓度随环境温度升高而下降, 整个实验温度内相对误差范围为 4.25%~12.13%, 不同环境温度下 CH₄ 气体检测浓度与温度之间的关系可用一元三次多项式表示;(2)CH₄ 气体的吸收强度和半宽度随着温度的升高而下降, 与温度变化之间的关系为单调递减函数, 温度对 CH₄ 气体吸收谱线强度的相对变化率大于吸收谱线半宽度的相对变化率, CH₄ 气体吸收谱线的强度更容易受温度变化的影响;(3)BP 神经网络和 PSO-BP 模型测试样本的绝对平均误差(MAE)分别为 12.88%和 1.81%, 平均绝对百分比误差(MAPE)分别为 2.3%和 0.3%, 均方根误差(RMSE)分别为 15.96%和 2.69%, 相关系数 R² 分别为 0.980 6 和 0.999 6。通过建立 PSO-BP 温度补偿模型, 补偿效果大部分分布在±1.0%的误差范围内, MAE, MAPE, RMSE 和 R² 等评价指标均大幅度提升, 对提高 TDLAS 技术在矿井 CH₄ 的精准检测具有一定的参考意义。

关键词 可调谐半导体激光吸收光谱; CH₄ 浓度; 精准检测; 神经网络; 粒子群优化; 温度补偿

中图分类号: TN249 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2021)11-3632-07

引 言

我国在煤炭资源开采正由浅部向深部开采迈进, 矿井开采强度也不断加大, 各类灾害问题突出, 其中瓦斯灾害作为煤矿主要灾害之一严重威胁矿井安全生产, 对 CH₄ 气体的精准检测预报至关重要^[1-4]。随着半导体激光器产业的不断发展, 可调谐半导体激光吸收光谱(tunable diode laser absorption spectroscopy, TDLAS), 将激光应用在气体分子吸收光谱测量, 形成一种光学与光谱学技术。该技术属于痕量气体分析检测方法, 通过改变注入的电流和温度来调控可调谐半导体激光器的线宽和波长, 进而测量气体分子之间难以分辨的吸收线, 最终通过朗伯比尔定律计算出所测气体浓

度^[5-8]。与其他气体检测方法相比, 光学法中的 TDLAS 技术具备精度高、响应时间短、灵敏度高、选择性强和校准周期长等优点, 适用于多种气体的高灵敏度动态检测^[9-10]。

基于 TDLAS 的气体检测结果因环境条件(温度、压力、干扰气体)的影响与实际气体浓度有所偏差^[11]。为提高 TDLAS 技术的检测精度, 需对温度引起的气体浓度检测误差进行硬件电路补偿或软件算法补偿。因多元线性回归公式法过于繁琐^[12], 可采用模型修正方法对所测 CH₄ 气体浓度进行实时温度补偿, 结合波长调制谐波检测技术, 建立含温度影响因素的模型, 从而降低系统对温度的依赖性。有报道基于 TDLAS 技术输出波长稳定在被测气体吸收谱线的中心波段, 通过温度补偿实现 TDLAS 气体检测的高灵敏度; 张旭^[13]等基于 TDLAS 技术实现 CH₄ 浓度场的二维分布重建,

收稿日期: 2020-09-15, 修订日期: 2021-01-27

基金项目: 国家重点研发项目(2018YFC0808104)资助

作者简介: 马 砺, 1978 年生, 西安科技大学消防系教授 e-mail: mal@xust.edu.cn

并通过仿真实验验证可行性。

为提高基于 TDLAS 的 CH₄ 气体检测系统的精度，减少温度对 CH₄ 气体测量产生的影响，采用实验研究和理论分析相结合的方法，选取自主搭建的基于 TDLAS 技术的 CH₄ 气体浓度检测系统，选取 CH₄ 分子在 1.653 μm 附近的吸收峰，对不同环境温度下的 CH₄ 气体检测及其温度补偿模型进行研究，分析温度对 CH₄ 气体的吸收强度和半峰宽度的影响。采用 PSO 算法优化 BP 神经网络的最佳权值和阈值，建立 PSO-BP 温度补偿模型消除温度对 CH₄ 气体检测精度的影响，提升 CH₄ 气体系统检测精度。

1 实验部分

1.1 气体检测原理

TDLAS 技术利用激光器的波长调谐特性，根据所测气体的特征吸收谱线，对其进行定性或定量分析。初始光强和探测器接收光强之间的关系可用 Lambert-Beer 吸收定律表示

$$I_t = I_0 \exp[-S(T)\varphi(\nu)PcL] \quad (1)$$

式(1)中， I_t 为待测气体吸收后的光强，mW； I_0 为初始光强，mW； $S(T)$ 为温度为 T 时气体吸收谱线的强度， $\text{cm}^{-2} \cdot \text{atm}^{-1}$ ； c 为待测气体浓度， $\text{mol} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{atm}^{-1}$ ； P 为工作气体压强，atm； L 为激光在待测气体中经过的光程，cm； $\varphi(\nu)$ 为待测气体吸收谱线的线型函数，cm。

采用波长调制光谱技术检测 CH₄ 气体浓度，通过傅里叶变换的检测方法，提取二次谐波表征气体浓度。通过激光器施加正弦波调制信号，调制后的激光发射频率为

$$\nu(t) = \nu'_0(t) = \delta\nu \cos(2\pi ft) \quad (2)$$

式(2)中， $\nu'_0(t)$ 为未加正弦波调制的激光中心频率，Hz； $\delta\nu$ 为激光频率变化幅值， cm^{-1} ； f 为调制频率，kHz。

激光器发出光束的光强为

$$I_0 = I'_0(t) + \Delta I \cos(2\pi ft + \Psi) \quad (3)$$

式(3)中， $I'_0(t)$ 为光束中心光强，mW； ΔI 为光强调制幅度，mW； Ψ 为光强调制与波长调制的相位差，可忽略。

线性函数在整个频率内积分为 1，在 CH₄ 检测波段为 1.653 μm 处，且浓度较低情况下，CH₄ 气体吸收系数比较小，经运算化简后可得波长调制二次谐波信号和浓度呈正比^[14]

$$A_{2f} \propto I_0 \frac{S(T)PcL}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \varphi[\nu'_0(t) + \delta\nu \cos\theta] \cos 2\theta d\theta \quad (4)$$

式(4)中， $\theta = 2\pi ft$ 。

由式(4)可知，当已知气体吸收谱线、温度、压力、光程及激光频率调制幅度下，可通过二次谐波曲线反演气体浓度。

1.2 系统结构

基于 TDLAS 技术的 CH₄ 气体检测系统总体结构设计如图 1 所示。本实验系统主要由配气系统、光源发射部分、气体吸收池、数据接收和处理单元、程式恒温恒湿箱等组成。

其中光源发射部分主要由分布式反馈(DFB)激光器和半

导体激光控制器两部分组成，DFB 激光器以半导体材料为介质，具有光谱纯度高、协调范围宽、线宽窄、功率低等多种优点，驱动电路为双路温控电路，可精准控制激光器输出波长处于稳定状态。

气体吸收池为光程 20 m 的近红外气体吸收池，包括赫里克特气室、凹面镜、标准光纤连接器、光学检测器、气体入口和出口以及防震基座。通过对 HITRAN 数据库进行查询^[15]，在 1.653 μm 波段处 CH₄ 受外界气体影响较小，因此实验所用波段为 1.653 μm。

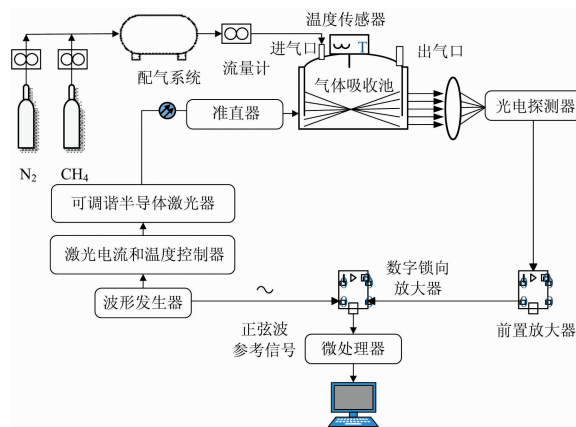


图 1 基于 TDLAS 技术的 CH₄ 检测结构

Fig. 1 The structure of CH₄ detection using TDLAS technology

数据接收和处理单元由光电探测器、锁相放大器、微处理器、数字示波器及 Lab View 虚拟软件组成。光电探测器通过辐射来改变被辐射材料的电导率，具有探测范围广、线性响应良好等优点。入射激光通过透镜聚焦到探测器的光敏面上，锁相放大器对信号进行检测，得到 CH₄ 气体吸收谱线的二次谐波信号。STM32 微处理器将数字锁相放大器传出的二次谐波信号传至模数转换(ADC)模块，光信号转换为电压信号，并传输至 Lab View 虚拟软件中。Lab View 虚拟软件具有数据采集、处理和查询功能，根据标准浓度的气体谱线进行数据处理，可实时显示 CH₄ 气体浓度数据。二次谐波信号的波长调制线型如图 2 所示。

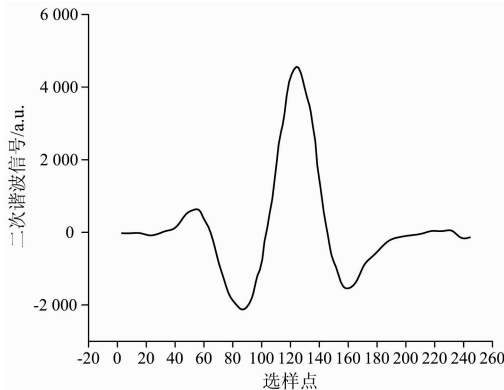


图 2 二次谐波信号

Fig. 2 Second harmonic signal

根据波长调制原理，二次谐波信号幅度与待测气体浓度

之间呈正相关关系。因此,可通过处理后的二次谐波信号反演得出待测 CH_4 气体浓度

$$c = K \frac{A_{2f}}{I_0} \quad (5)$$

式(5)中, A_{2f} 为谐波分量, K 为标定系数。

1.3 方法

通过程式恒温恒湿箱改变实验装置所处温度,具体实验方法及步骤如下:

(1)以 $500 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 的流量通入浓度为 99.8% 氮气 10 min,清除吸收池中干扰气体,通过电脑端 LabView 软件校准背景气体氮气,即所测背景气体浓度示数为 0。

(2)通过标准配气系统配制浓度为 0.04% 的 CH_4 标准气体,将气体缓慢通入气体吸收池内 15 min,程式恒温恒湿箱温度设置为 10°C ,待池内气体从室温达到设定温度且数据稳定后,记录 10°C 下 CH_4 气体测量浓度。

(3)重复上述操作,每升高一定温度对 CH_4 气体进行测量,温度变化范围为 $10\sim 50^\circ\text{C}$,温度间隔 5°C ,记录不同温度下 CH_4 气体测量浓度。

2 结果与讨论

2.1 温度对 CH_4 气体浓度测量精度的影响

利用 TDLAS 技术对不同温度下 0.04% CH_4 气体浓度进行测量,实际测量气体浓度及误差如图 3 所示。

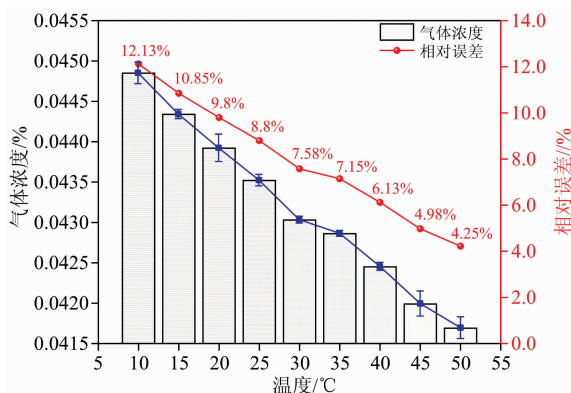


图 3 不同温度下 CH_4 浓度变化趋势

Fig. 3 Variation trend of CH_4 concentration at different temperature

由图 3 可知,温度对实验测量影响误差较大,在 $10\sim 50^\circ\text{C}$ 的温度区间内,实际测量气体浓度随着环境温度的升高而下降,但逐渐接近于真实浓度值。采用一元三次多项式对不同温度下 CH_4 气体浓度进行拟合,得到基于 TDLAS 技术检测 CH_4 气体浓度和温度的关系为式(6)

$$y = (-1.81953e-8)t^3 + (1.94996e-6)t^2 + (-1.40009e)t + 0.04607 \quad (6)$$

式(6)中, t 为环境温度, $^\circ\text{C}$; y 为 CH_4 气体检测浓度, %。

当 CH_4 气体所处环境温度较低时(10°C),相对误差为 +12.13%,当 CH_4 气体所处环境温度较高时(50°C),相对误差为 +4.25%。基于 TDLAS 的 CH_4 检测系统在整个实验

温度范围($10\sim 50^\circ\text{C}$)内,检测结果的误差范围为 4.25%~12.13%,与实际 0.04% CH_4 气体浓度相差较大,无法做到 CH_4 气体浓度的精准检测。分析认为误差的主要原因是由于 CH_4 气体分子不断吸收环境中热量,气体分子体积增大,分子间距离增大,分子活性增强,初始射入激光通过气体吸收池被 CH_4 气体吸收后的光强发生明显变化,从而所测浓度随温度的升高而降低。

2.2 温度对 CH_4 气体吸收谱线的影响

基于 TDLAS 的气体检测吸收谱线与温度之间存在一定的关系,从而产生检测误差。通过查询 HITRAN 数据库,在 $10\sim 50^\circ\text{C}$ 范围内 CH_4 气体吸收谱线强度及吸收谱线宽度的部分仿真数据曲线如图 4、图 5 所示。

由图 4、图 5 可知, $10\sim 50^\circ\text{C}$ 范围中, CH_4 气体的吸收谱线强度和展宽随温度的变化明显。即:随着温度升高, CH_4 吸收谱线的强度和宽度呈下降趋势,与采用 TDLAS 技术检测 CH_4 气体浓度随温度变化趋势一致。温度影响气体吸收谱线的强度,同时由于温度变化造成气体吸收池内压力变化使气体吸收谱线的半宽度变化。随着环境温度的不断升高, CH_4 气体的吸收谱线展宽减小,吸收谱线强度逐渐减弱,从而传感器吸收信号逐渐减弱,最终表现为所测浓度随温度升高而降低。

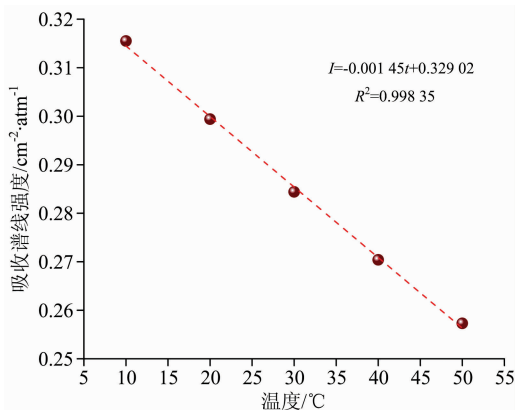


图 4 CH_4 吸收谱线强度随温度变化曲线

Fig. 4 CH_4 absorption line intensity curve with temperature change

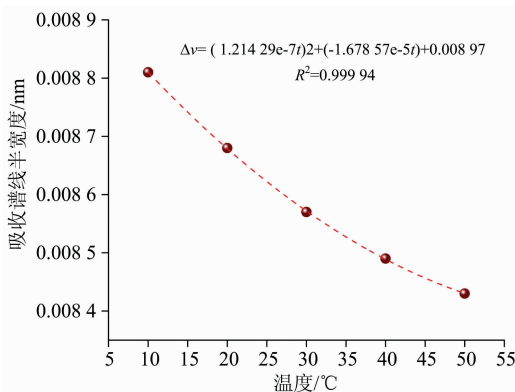


图 5 CH_4 吸收谱线半宽度随温度变化曲线

Fig. 5 Half width at half-maximum of CH_4 absorption line varies with temperature

在 1.653 μm 处温度影响 CH_4 气体的主要参数为吸收线谱线强度和吸收宽度, CH_4 气体吸收谱线的强度和半宽度随温度变化为单调递减函数, 具体函数关系式如式(7)和式(8)

$$I = -0.00145t + 0.32902 \quad (7)$$

$$\Delta\nu = (1.21429e-7)t^2 + (-1.67857e-5)t + 0.00897 \quad (8)$$

其中, I 为 CH_4 气体吸收谱线的强度, $\text{cm}^{-2} \cdot \text{atm}^{-1}$; $\Delta\nu$ 为 CH_4 气体吸收谱线的半宽度, nm ; t 为温度, $^\circ\text{C}$ 。

以 20 $^\circ\text{C}$ 为基准点, 环境温度变化对 CH_4 气体吸收谱线的吸收线强和半宽度影响的相对变化率如图 6 所示。

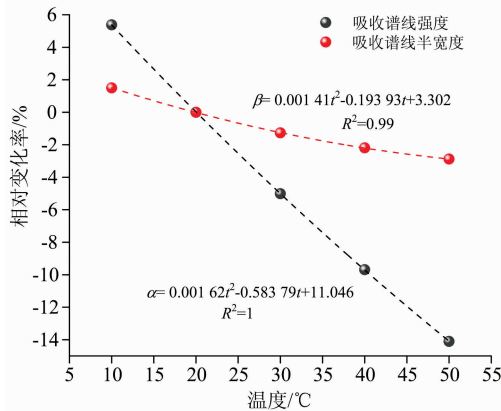


图 6 CH_4 谱线强度和半宽度随温度相对变化率

Fig. 6 CH_4 line intensity and half width at half-maximum vary with temperature relative rate

由图 6 可以看出, 温度变化对 CH_4 气体吸收谱线的强度和宽度变化影响存在差异, 吸收谱线强度相对变化率大于谱线半宽度相对变化率, 说明吸收谱线的强度更容易受温度变化的影响。由于辐射源在检测过程中长期处于无规则的热运动状态, 产生的不规则热运动与检测器之间形成相对位移运动, 从而发生多普勒效应。同时, 由于气体分子之间的碰撞造成线型的变化、线型位置的不确定性以及其他跃迁的存在导致 CH_4 吸收谱线强度变化^[16]。

建立一元二次拟合模型 $y = at^2 + bt + c$ 得到 CH_4 气体的吸收谱线强度相对变化率、半宽度相对变化率与温度之间的关系如式(9)和式(10)

$$\alpha = 0.00162t^2 - 0.58379t + 11.046 \quad (9)$$

$$\beta = 0.00141t^2 - 0.19393t + 3.302 \quad (10)$$

其中, α 为 CH_4 气体的吸收谱线强度相对变化率, %; β 为 CH_4 气体的吸收谱线半宽度相对变化率, %; t 为温度, $^\circ\text{C}$ 。

3 基于 PSO-BP 模型的实验结果修正

3.1 粒子群优化算法

粒子群优化算法 (particle swarm optimization, PSO), 为一种基于群体智能的优化算法, PSO 算法避免了遗传算法的变异 (Mutation) 和交叉 (Crossover) 操作。在一个多维空间中, 由 n 个粒子组成种群, 通过迭代寻找最优解, 将每个优化问题的潜在解视为搜索空间中的一只“鸟”, 也被称为粒子。

每个被优化函数决定每个粒子的适值, 并有一个速度决定粒子飞行的方向与距离, 在解空间中粒子群便追随当前的最优粒子进行搜索^[17]。其优化过程如下^[18]:

步骤 1: 对每个粒子的位置 $X_i = (X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{in})$ 和速度 $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{in})$, 种群规模 n 进行初始化。

步骤 2: 根据适应度函数, 计算每个粒子的对应的适应度值 $\text{Fit}[i]$ 。

步骤 3: 对每个粒子的适应度值 $\text{Fit}[i]$ 和个体极值 $P_{\text{best}}(i) = (P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{in})$ 进行比较。若粒子的适应度值 $\text{Fit}[i]$ 大于个体极值 $P_{\text{best}}(i)$ 时, 将粒子的适应度值 $\text{Fit}[i]$ 替换个体极值 $P_{\text{best}}(i)$ 。

步骤 4: 对每个粒子的适应度值 $\text{Fit}[i]$ 和全局极值 $G_{\text{best}}(i) = (G_{i1}, G_{i2}, \dots, G_{in})$ 进行比较。若粒子的适应度值 $\text{Fit}[i]$ 大于全局极值 g_{best} 时, 将粒子的适应度值 $\text{Fit}[i]$ 替换全局极值 g_{best} 。

步骤 5: 通过每一次迭代, 更新粒子的位置 X_i 和速度 V_i 。

步骤 6: 对是否满足结束条件进行判定, 当误差达到期望值或达到最大循环次数, 结束循环, 否则返回第二步。

3.2 PSO-BP 模型建模

BP 神经网络为采用误差反向传播算法的多层前馈网络, 根据 BP 神经网络原理和 PSO 算法理论, 采用 PSO 算法优化 BP 神经网络, 寻找最佳权值和阈值, 建立参数优化的 PSO-BP 温度补偿模型, 从而加速 BP 神经网络收敛效率并提高学习速率^[19-20]。建立 CH_4 气体温度补偿模型算法流程如下^[21]:

步骤 1: 读取训练样本和测试样本。

步骤 2: BP 神经网络初始化。设定隐含层节点数为 18、输入层节点数设为 3, 输出层节点数设为 1。

步骤 3: 编码长度初始化。

步骤 4: 构建前馈 BP 神经网络。输入用于定义 R 个输入向量的最大值和最小值的一个 $R \times 2$ 的矩阵, 输入每层神经元个数的数组和包含每层用到的转移函数名称的细胞数组, 最后输入所用训练函数名称。

步骤 5: PSO 算法参数初始化。其中 $C_1 = 1.5$, $C_2 = 1.5$, 种群规模为 10, 进化次数为 300, 初始粒子速度, 速度限制 $v_{\text{max}} = 1$, $v_{\text{min}} = -1$, 种群限制 $\text{pop}_{\text{max}} = 5$, $\text{pop}_{\text{min}} = -5$, 把粒子初始位置设定为 BP 神经网络最初的连接阈值和权值。

步骤 6: 定义适应度评价函数。得出个体与全局最佳适应度值。

步骤 7: 迭代寻优。更新粒子的速度和位置、种群更新以及自适应变异, 以避免 PSO 算法陷入局部最优。

步骤 8: 将最优的初始阈值和权值重新赋予 BP 神经网络进行预测, 设置训练次数、训练目标和学习速率, 继续训练 BP 神经网络, 最后输入测试气体浓度数据并输出预测结果。

3.3 性能指标

对所建立的 PSO-BP 温度补偿模型进行预测评价指标分析, 即绝对平均误差 (MAE)、平均绝对百分比误差 (MAPE)、均方根误差 (RMSE)、相关系数 (R^2)、绝对误差

(AE)、相对误差(RE), 分别定义为式(11)一式(16)

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |f_i - y_i| \tag{11}$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{f_i - y_i}{y_i} \right| \times 100\% \tag{12}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f_i - y_i)^2} \tag{13}$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - f_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \tag{14}$$

$$AE = f_i - y_i \tag{15}$$

$$RE = \frac{f_i - y_i}{y_i} \tag{16}$$

式(11)一式(16)中, f_i 为消除温度影响后 CH_4 气体浓度预测值, %; y_i 为实验所测 CH_4 气体浓度真实值, %; \bar{y} 为实验所测 CH_4 气体浓度真实值的平均值, %。

其中, MAE, MAPE 和 RMSE 取值范围为 0 到 $+\infty$, MAE, MAPE 和 RMSE 值越倾向于 0, 表明真实值与预测值越贴近, 即完美模型。 R^2 为相关系数, 为评价拟合好坏的指标, 数值为实测值和拟合值的相关系数的平方, R^2 越大, 表明拟合效果越好。

3.4 对比分析

根据 PSO-BP 温度补偿模型设计, PSO 算法对 BP 神经网络的权值和阈值不断寻优, 选用 BP 神经网络及 PSO-BP 模型预测结果及误差分析对比如图 7 和图 8(a,b) 所示。

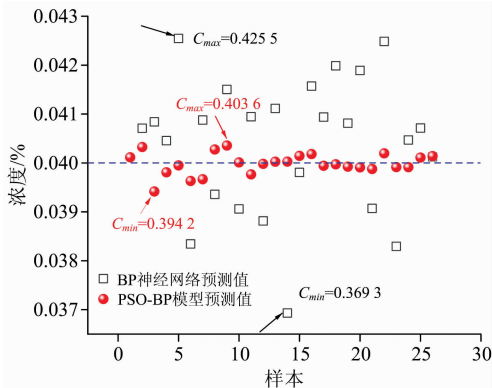


图 7 BP 神经网络与 PSO-BP 模型预测输出

Fig. 7 BP neural network and PSO-BP model forecast output

由图 7 可知, BP 神经网络预测值分散分布于实际浓度两侧, 一定程度上与真实值有所偏离。PSO-BP 模型预测值相对集中于实际浓度两侧, 且随着训练样本的不断增多, PSO-BP 模型预测值与真实值基本趋于一致。

PSO-BP 模型预测值的相对误差和绝对误差均小于 BP 神经网络预测值。PSO-BP 模型的误差百分比均低于 0.015, 其绝对误差最小为 0.05%, 相对误差最小为 1.4%。随着训练样本的不断增多, PSO-BP 模型预测值的绝对误差和相对误差波动范围逐渐减小, 误差趋于稳定状态。

采用 BP 神经网络和 PSO-BP 模型的相对误差正态分布

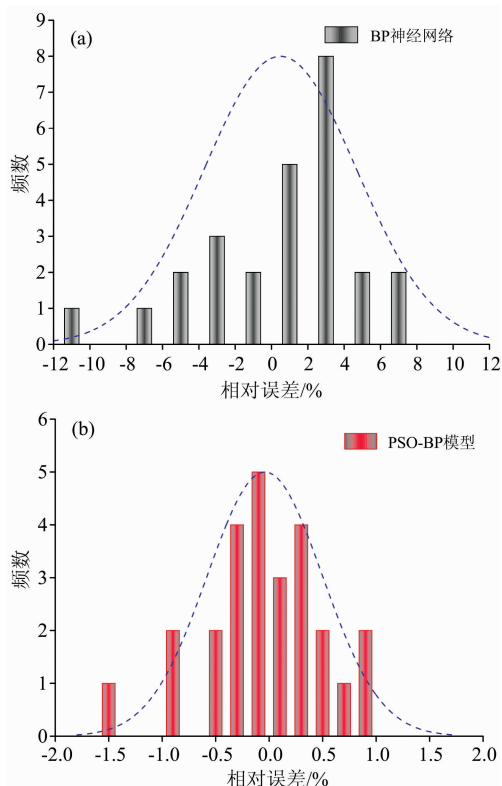


图 8 相对误差分布直方图

(a): BP 神经网络; (b): PSO-BP 模型

Fig. 8 Histogram of relative error distribution

(a): BP neural network; (b): PSO-BP model

图显示温度补偿预测效果, 从图 8 可以看出对于 TDLAS 检测 CH_4 气体浓度温度补偿方面, PSO-BP 模型明显优于 BP 神经网络。BP 神经网络补偿后误差较为分散, 相对误差范围在 $\pm 12\%$, 而 PSO-BP 模型补偿效果大部分分布在 $\pm 1.0\%$ 的误差范围内。PSO-BP 模型相对误差分布范围明显小于 BP 神经网络, 大幅度降低温度对 CH_4 气体检测的影响, 同时其误差范围符合实际矿井生产要求。

为进一步量化 PSO-BP 模型的温度补偿效果, 对比分析 BP 神经网络与 PSO-BP 模型的评价指标数据, 如表 1 所示。

表 1 两种算法预测评价指标

Table 1 Prediction evaluation indexes of the two algorithms

算法	MAE	MAPE	RMSE	R^2	AE	ME
BP	12.88	0.023	15.96	0.980 6	46.3	11.57
PSO-BP	1.81	0.003	2.69	0.999 6	8.5	1.42

由表 1 可得, 基于 PSO-BP 模型的气体浓度预测指标相比 BP 神经网络优化效果明显, 预测指标 MAE, MAPE, RMSE 和 R^2 等预测评价指标均有大幅度提升, MAE 减少了 11.07%, MAPE 减少了 0.02%, RMSE 减少了 13.27%。

从图 9 的测试结果可以看出, 采用 PSO-BP 模型补偿后传感器的测量值与真实值误差明显减小, 气体浓度在较小的范围内波动。基于上述比较和分析, PSO-BP 模型适合基于

TDLAS 技术 CH_4 气体检测的温度补偿, 系统测量的可靠性显著提高。

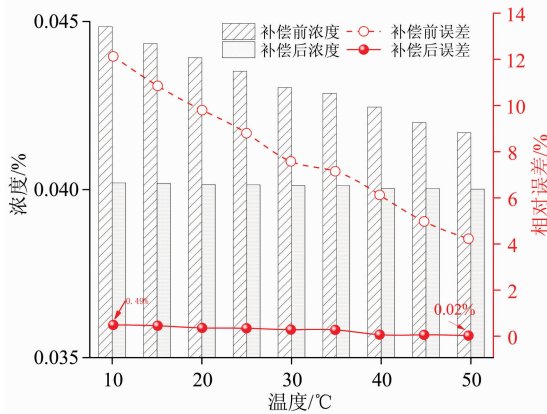


图 9 0.04% CH_4 补偿前后实验数据图
Fig. 9 Experimental data graph before and after 0.04% CH_4 compensation

4 结 论

探究了基于 TDLAS 检测技术 CH_4 气体检测与温度补偿方法, 分析温度对 CH_4 气体吸收谱线的影响, 通过 PSO-BP 温度补偿模型对 CH_4 气体检测进行环境温度补偿, 得到以下结论:

(1) 基于 TDLAS 的 CH_4 气体检测系统受环境温度变化影响较大, 相对误差范围为 4.25%~12.13%。在 10~50 °C 环境温度下, 温度越低, 偏离标准气体浓度 0.04% 越大。基于 TDLAS 的 CH_4 气体检测浓度和温度的关系可表示为 $y = -0.000182x^3 + 0.0195x^2 - 1.4x + 460.7$ 。

(2) 温度升高, CH_4 气体分子热胀冷缩, 分子间距离变大, 激光器射入的激光被 CH_4 气体吸收后光强变弱, CH_4 气体的吸收强度降低, 光谱展宽变窄, 传感器信号变弱使所测浓度离标准浓度偏差增大, 实测浓度呈下降趋势。

(3) 建立 PSO-BP 温度补偿模型后系统的测量误差为 1.42%, 进一步提高了基于 TDLAS 技术的 CH_4 气体检测的准确性和可靠性。

References

- [1] CHEN Xian-feng, ZHANG Yin, XU Xiao-jiang, et al(陈先锋, 张 银, 许小江, 等). Journal of Mining & Safety Engineering(采矿与安全工程学报), 2012, 29(3): 429.
- [2] JIANG Fu-xing, YIN Yong-ming, ZHU Quan-jie, et al(姜福兴, 尹永明, 朱权洁, 等). Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering(岩石力学与工程学报), 2014, 33(S2): 3581.
- [3] ZHAO Yong-yi, CHANG Jian-hua, SHEN Wan, et al(赵勇毅, 常建华, 沈 婉, 等). Infrared Technology(红外技术), 2019, 41(8): 778.
- [4] DENG Jun, XIAO Yang, CHEN Xiao-kun, et al(邓 军, 肖 畅, 陈晓坤, 等). Journal of Mining & Safety Engineering(采矿与安全工程学报), 2011, 28(4): 638.
- [5] ZHOU Pei-li, TAN Wen, PENG Zhi-min(周佩丽, 谭 文, 彭志敏). Chinese Journal of Scientific Instrument(仪器仪表学报), 2019, 40(11): 233.
- [6] LI Ao-qi, WANG Biao, XU Yue, et al(李奥奇, 王 彪, 许 玥, 等). Laser Journal(激光杂志), 2019, 40(12): 6.
- [7] ZHANG Zhi-rong, PANG Tao, SUN Peng-shuai, et al(张志荣, 庞 涛, 孙鹏帅, 等) Chinese Journal of Lasers(中国激光), 2019, 46(12): 265.
- [8] LI Ming-xing, LIU Jian-guo, KAN Rui-feng, et al(李明星, 刘建国, 阚瑞峰, 等). Acta Optica Sinica(光学学报), 2015, 35(4): 399.
- [9] LI Zhe, ZHANG Zhi-rong, SUN Peng-shuai, et al(李 哲, 张志荣, 孙鹏帅, 等). Infrared and Laser Engineering(红外与激光工程), 2017, 46(9): 243.
- [10] LI Bin, ZHENG Chuan-tao, LIU Hui-fang, et al. Sensors and Actuators B: Chemical. 2016, 225: 188.
- [11] YUAN Song, KAN Rui-feng, HE Ya-bo, et al(袁 松, 阚瑞峰, 何亚柏, 等). Chinese Journal of Lasers(中国激光), 2013, 40(5): 247.
- [12] NIE Wei, KAN Rui-feng, XU Zhen-yu, et al(聂 伟, 阚瑞峰, 许振宇, 等). Acta Physica Sinica(物理学报), 2017, 66(20): 97.
- [13] ZHANG Xu, GUO Teng-xiao, YANG Liu, et al(张 旭, 郭腾霄, 杨 柳, 等). Infrared Technology(红外技术), 2018, 40(6): 603.
- [14] ZHANG Zeng-fu, ZOU De-bao, CHEN Wen-liang, et al(张增福, 邹得宝, 陈文亮, 等). Opto-Electronic Engineering(光电工程), 2014, 41(6): 32.
- [15] TONG Xiu-xiu, KANG Zhi-hong(佟秀秀, 康志宏). Science Technology and Engineering(科学技术与工程), 2007, 33(4): 500.
- [16] XIA Hui, LIU Wen-qing, ZHANG Yu-jun, et al(夏 慧, 刘文清, 张玉钧, 等). Optical Technique(光学技术), 2008, (2): 298.
- [17] LI Meng-shan, LIAN Su-yun, WANG Fan, et al. Chemical Engineering Research and Design, 2020, 155: 98.
- [18] DENG Jun, LEI Chang-kui, CAO Kai, et al(邓 军, 雷昌奎, 曹 凯, 等). Journal of China Coal Society(煤炭学报), 2018, 43(10): 2800.
- [19] TIAN Zhen, JING Shuang-xi, ZHAO Li-juan, et al(田 震, 荆双喜, 赵丽娟, 等). Journal of Henan Polytechnic University • Natural Science(河南理工大学学报 • 自然科学版), 2020, 39(1): 68.

- [20] LI Hui-min, LI Zhen-lei, HE Rong-jun, et al(李慧民, 李振雷, 何荣军, 等). Journal of Mining & Safety Engineering(采矿与安全工程学报), 2014, 31(2): 203.
- [21] WANG Ping, HUANG Zhen-yi, ZHANG Ming-ya, et al. Journal of Iron and Steel Research(International), 2008, 15(3): 87.

Research on CH₄ Gas Detection and Temperature Correction Based on TDLAS Technology

MA Li^{1,2}, FAN Xin-li^{1,2}, ZHANG Shuo^{1,2}, WANG Wei-feng^{1,2}, WEI Gao-ming^{1,2}

1. School of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China

2. Shaanxi Provincial Key of Coal Fire Hazard Prevention and Control, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China

Abstract Accurate detection of CH₄ is essential to prevent gas explosion and ensure safe production. However, the gas detection technology based on tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS) has a large error due to temperature change. This paper explored the CH₄ detection based on TDLAS technology and the temperature compensation method, analyzed the impact of temperature on CH₄ absorption line, and finally eliminated the impact of environmental temperature on the CH₄ detection through algorithm compensation model. This study used TDLAS technology's principle and theory to design the transmitter unit, absorption cell, signal receiver unit and data processing unit. A CH₄ detection system based on TDLAS technology was established, the concentration of CH₄ at different ambient temperatures (10~50 °C) was measured, and the effect of temperature change on the intensity and half width at half-maximum of CH₄ absorption line at 1.653 μm was analyzed. In order to eliminate the influence of temperature on CH₄ detection and improve the compensation effect, the particle swarm optimization (PSO) was employed to optimize the optimal weight and the threshold of back propagation neural network (BPNN). The PSO-BP temperature compensation model of CH₄ was established, which overcame the characteristics of slow convergence rate and easy to fall into local optimum of the BPNN. The result indicated that: (1) Based on TDLAS technology, the CH₄ detection concentration dropped with the increasement of ambient temperature, the relative error range within the whole experimental temperature was 4.25%~12.13%. The relationship between CH₄ detection concentration and temperature under different ambient temperatures can be expressed as a cubic polynomial; (2) The absorption intensity and half width at half-maximum of CH₄ gas decrease with the increase of temperature relationship between it and temperature was a monotonous decreasing function. The relative change rate of temperature on the absorption line intensity of CH₄ gas was greater than the half width. The absorption line intensity of CH₄ gas was more susceptible to the temperature change; (3) The absolute mean error (MAE) of the BPNN and PSO-BP model test samples were 12.88% and 1.81%, the mean absolute percentage error (MAPE) were 2.3% and 0.3%, the root mean square (RMSE) were 15.96% and 2.69%, and the correlation coefficient R^2 were 0.980 6 and 0.999 6, respectively. By establishing the PSO-BP temperature compensation model, the compensation effect was mostly distributed within the error range of ±1.0%, and MAE, MAPE, RMSE, R^2 and another evaluation indexes were greatly improved. It has a certain reference significance to improve the accurate detection of CH₄ in the mine with TDLAS technology.

Keywords Tunable diode laser absorption spectroscopy; CH₄ gas concentration; Accurate detection; Neural networks; Particle swarm optimization; Temperature compensation

(Received Sep. 15, 2020; accepted Jan. 27, 2021)