

# 基于 IPSO 优化 BP 神经网络的页岩气井有害气体监测系统

宋欣欣 马晓丽 张佩 赵紫萱 贺晓强

陕西煤田地质油气钻采有限公司, 陕西西安, 710054;

**摘要:** 为了实现页岩气井开采过程中对有害气体浓度的精准监测, 解决复杂环境情况下气体传感器之间由于存在交叉互扰问题而导致测量数据不准确, 设计了一款基于改进的粒子群算法 (IPSO) 优化 BP 神经网络的页岩气井有害气体监测系统。该系统利用无线 Wi-Fi 模块、气体传感器模块和 STM32 模块, 将采集到的数据传输至云平台, 通过最新版 OneNET-View3.0 数据可视化模块对监测系统完成数据可视化界面设计, 通过任意 PC 终端登录 OneNET 云平台可以对页岩气井各有害气体进行实时监测。在监测过程中, 通过调整惯性权重、改进 IPSO 算法, 对 BP 神经网络进行优化, 显著提升有害气体浓度的监测精度。利用该系统对四川盆地西南地区页岩气项目有害气体进行测试实验, 将传感器测量值与经过 IPSO 优化 BP 神经网络模型处理后的数据进行对比分析表明, CO、H<sub>2</sub>S、SO<sub>2</sub> 三种有害气体的测量精度分别提高了 16.85%、26.96%、19.74%, 验证了 IPSO 优化 BP 神经网络模型的有效性, 为页岩气井开采过程中有害气体的精确监测提供了新的依据和方法。

**关键词:** 页岩气; 有害气体; 粒子群算法; BP 神经网络; 云平台

DOI: 10.64216/3080-1508.26.02.030

## 引言

页岩气井钻井过程中, 伴随着多种有害气体, 主要有一氧化碳、硫化氢、二氧化硫等<sup>[1]</sup>。在页岩气开采中, 钻探气井时遇地层中还原沉积地层, 易于伴生硫化氢等有毒气体, 由于页岩气层埋藏较深, 钻井施工中伴随井喷风险增大。井喷后, 气井内的硫化氢气体需采取点火燃烧方式处置, 此时会产生二氧化硫。一氧化碳、硫化氢、二氧化硫等有害气体在扩散过程中, 造成局部空气污染和工作人员中毒<sup>[2-3]</sup>。目前, 在开采页岩气钻井现场, 对有害气体检测设备是可燃气体检测仪和手动报警器<sup>[4]</sup>。由于页岩气开采地区地势复杂, 山区条件恶劣, 这种传统监测方式, 增加了人力物力。而且气体检测仪数据采集不精准, 传感器存在交叉敏感性的问题, 导致测量结果误差较大, 不能实时准确地将监测到的有害气体数据传输给安全工作人员和应援组织救援队, 如果发生有害气体泄漏造成钻井人员中毒, 不能及时高效的进行应援救治<sup>[5]</sup>。

近年来, 伴随国内外针对 BP 神经网络算法开展的深入研究, 已取得了较为丰富的成果。BP 神经网络具备并行处理与非线性映射等优势, 能够克服多种气体传感器因交叉敏感性致使测量精度无法达到预期的弊端。然而, 在测量精度需达到更高标准的情形下, BP 神经网络算法在训练过程中易陷入局部极小值, 难以满足此类精度要求<sup>[6-10]</sup>。当前, 国内有关页岩气井有害气体监测系统的研究主要聚焦于数据采集与传输技术领域, 运用智能算法处理页岩气井钻井时伴随的有害气体数据的相关研究相对较少。为进一步提升页岩气井内有害气体浓度的测量精度, 本文设计并开发了一款页岩气井有

害气体监测系统。该系统结合 Wi-Fi 无线传输传感器、STM32 技术以及智能算法, 研究采用改进粒子群算法 IPSO 对 BP 神经网络模型进行优化<sup>[11-12]</sup>, 对目前页岩气井中 CO、H<sub>2</sub>S、SO<sub>2</sub> 等有害气体监测系统常用的 MQ-7、TGS2602、S4-SO<sub>2</sub> 三种型号传感器采集的数据进行优化处理, 以弥补 BP 神经网络易陷入局部极小值的不足, 为页岩气井开采过程中有毒有害气体的精确监测提供新的依据与方法。

## 1 系统总体设计

有害气体监测系统主要由气体传感器、无线 Wi-Fi 通信模块以及 OneNET 云平台构成。气体采集节点被固定设置于被监测区域, 借助 IPSO 算法对 BP 神经网络模型进行优化, 并对传感器所采集的气体信息开展数据训练, 从而获得优化后的模型<sup>[13]</sup>。传感器数据经由 Wi-Fi 通信模块上传至 OneNET 云平台, 依托该云平台实现对页岩气井工作现场的远程安全监测。

## 2 系统算法设计

### 2.1 BP 神经网络

BP 神经网络由输入层、输出层和隐含层构成, 各神经元与下一层神经元呈全连接状态, 同一层神经元之间不存在连接关系。BP 神经网络的输入向量数量为 n 个, 输入向量可表示为  $(X=(X_1, X_2, \dots, X_n))$ , 该网络包含隐藏层, 输出向量数量为 m 个, 输出向量表示为  $(Y=(Y_1, Y_2, \dots, Y_m))$ 。

页岩气开采有害气体监测系统运用由 3 种传感器组成的阵列, 对开采过程中的 3 种有害气体进行检测。设  $(x_1)$ 、 $(x_2)$  和  $(x_3)$  分别代表 3 种有害气体的浓度, 传感器阵列针对这 3 种有害气体的测量输出值  $(y_i)$  ( $i$

=1, 2, 3)) 构成一个非线性方程组。表示为

$$\begin{cases} y_1 = f_1(x_1, x_2, x_3) \\ y_2 = f_2(x_1, x_2, x_3) \\ y_3 = f_3(x_1, x_2, x_3) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $f_i(x_1, x_2, x_3)$ —浓度与传感器响应值之间的映射关系

## 2.2 粒子群原理及改进

### 2.2.1 粒子群原理

粒子群优化算法于上世纪 90 年代首次提出<sup>[9]</sup>, 该算法因其简单易懂、容易求得网络全局的最优解, 已经被广泛应用于很多领域<sup>[15-17]</sup>。在该算法中, 一般采用线性递减惯性权值, 表达式为

$$\omega(k) = \omega_{\max} - \frac{(\omega_{\max} - \omega_{\min})}{k_{\max}} \times k \quad (2)$$

式中:  $\omega_{\max}$ —权重最大值

$\omega_{\min}$ —权重最小值

$k$ —迭代次数

$k_{\max}$ —最大迭代次数

鉴于 BP 神经网络存在收敛速度慢、容易出现局部极小值等缺陷, 本实验利用线性递减惯性权值法来进行完善。该算法中, 粒子可以通过自身和其他粒子移动经验来实时调节自身移动, 粒子调整适应度函数表示为

$$V_i^{k+1} = \omega V_i^k + c_1 \text{rand}_1(P_{best}^k - X_i^k) + c_2 \text{rand}_2(G_{best}^k - X_i^k) \quad (3)$$

$$X_i^{k+1} = X_i^k + V_i^{k+1} \quad (4)$$

式中:  $c_1, c_2$ —学习因子

$\omega$ —惯性权重

$\text{rand}_1, \text{rand}_2$ —[0,1]间的随机数

$P_{best}$ —粒子  $i$  在  $k$  次迭代中的最好位置

$G_{best}$ —所有粒子在  $k$  次迭代中的最好位置

$V_i$ —粒子  $i$  当前速度

$X_i$ —粒子  $i$  当前位置

## 3 系统软件设计

### 3.1 采集系统设计

微控制器 STM32 的程序借助 Keil uVision5 软件编写, 具备良好的拓展性与一定的可移植性。其主要功能为实现硬件系统的数据采集与发送。数据采集节点和主控模块之间的连接情况如图 7 所示。首先, 对发送节点

进行初始化操作, 该节点通过传感器采集环境信息; 随后, 单片机控制电路经 SPI 接口与 Wi-Fi 通信模块相连, 并对 Wi-Fi 通信模块的发送模式进行配置; 最终完成数据发送, 进入休眠状态以等待下一阶段的数据传输。

### 3.2 OneNET 云平台界面设计

利用最新 OneNET-View3.0 数据可视化模块对监测系统完成数据可视化界面设计, 对页岩气井气体监测系统的设计界面采用最新版 OneNET-View3.0 数据可视化编辑界面, 该界面支持 3D 场景搭建嵌入, 并且 2D/3D 组件互调, 而开发的数据集功能, 是基于 MySQL5.X 和 MySQL8.X 数据库, 可以建立表关联功能来实现数据建模, 快速打通大屏与数据库, 通过代码编辑器对数据进行快速过滤筛选或逻辑加工。界面可编辑多种地图、表盘、图表等不同分类的 2D/3D 组件, 可以进行数据无缝对接。登录云平台进入应用管理区域, 可以对采集到的气体浓度数据进行实际界面应用与编辑, 页岩气井气体监测系统显示界面如图 8。本次实验, 页岩气井气体监测系统平台展示了三种气体的实时数据, 工作人员登录 OneNET 云平台账号可以实时查看气体监测系统的动态信息, 以及气井安全状态, 并实时同步天气预报和环境监测信息。

## 4 工程实验

经中国地质调查局油气资源调查中心权威勘探, 四川盆地西南地区页岩气地质资源存储量预计在 1.2 万亿立方米左右, 探明储量占全国目前探明储量的近七成, 具有良好的页岩气开发资源。在地质钻探和页岩气开采过程中, 经常伴随有 CO、H2S、SO2 等多种有害气体产生, 这些气体会对工作人员和山区环境造成巨大威胁, 需要事先做好有害气体外溢的预防工作, 对有害气体进行实时监测。根据实际开采经验, 在一般工作条件下, 井口气体监测系统测量到的 CO 浓度基本控制在 7.10mg/m<sup>3</sup> 左右、H2S 浓度为 3.80mg/m<sup>3</sup> 左右、SO2 浓度为 5.80mg/m<sup>3</sup> 左右。在数据采集阶段, 传感器以每 5 分钟一次的频率进行数据采集。为实现传感器测量值与有害气体实际值的对比分析, 运用手持气体测量仪对井口各节点的数据予以采集, 并将手持仪所采集的数据视为实际值。通过对采集的 1080 个数据样本进行统计分析可知, 各传感器的测量值与实际值之间存在较大误差, 如表 3 所示。

表 3 传感器测量值与真实值误差对比表

Table3 Comparison table of error between measured value and real value of sensor

气体	气体传感器	传感器测量值与真实值误差/(mg/m <sup>3</sup> )	传感器测量值与真实值相对误差/%
CO	MQ-7	1.19-2.17	17-31
H2S	TGS2602	0.98-1.59	26-42
SO2	S4-SO2	1.39-2.14	24-37

经 BP 神经网络模型处理后的数据波动相对较小, 较为接近真实值; 经 IPSO 优化 BP 神经网络模型处理后的数据波动最小, 更趋近于真实值。为对实验数据进行直观的量化评估, 采用平均相对误差百分比和拟合优度这两种评价指标, 对 BP 神经网络和 IPSO 优化 BP 神经网络模型的处理结果展开对比。通过表 4 对比 180 个测试样本在 BP 神经网络模型和 IPSO 优化 BP 神经网络

模型下平均相对误差和拟合优度决定系数的处理结果可知, 利用 IPSO 优化 BP 模型对井下有害气体浓度数据进行优化, 其平均相对误差小于 BP 神经网络模型, 拟合优度优于 BP 神经网络模型。经 IPSO 优化 BP 神经网络后, CO、H<sub>2</sub>S、SO<sub>2</sub> 三种气体浓度数据样本相较于 BP 神经网络的平均相对误差分别降低了 37.8%、32% 和 34%, 优化效果提升显著。

表 4 BP 神经网络和经 IPSO 优化 BP 神经网络模型处理结果对比表

Table4 Comparison of processing results of BP neural network and IPSO optimized BP neural network model

模型	平均相对误差%			决定系数		
	CO	H <sub>2</sub> S	SO <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub> S	SO <sub>2</sub>
BP	9.36	12.54	10.87	0.63	0.89	0.84
IPSO+BP	5.82	8.53	7.17	0.86	0.96	0.93

从表 5 能够看出, 各传感器的数据精度均有所提升, 其中 MQ-7、TGS2602、S4-SO<sub>2</sub> 型传感器的精度分别提升了 16.85%、26.96%、19.74%。实验结果显示, 基

于 IPSO 优化的 BP 神经网络模型对传感器所测数据进行优化处理后, 显著提高了有害气体数据的精度, 改善了传感器之间的交叉敏感问题。

表 5 传感器采集数据优化前后对比表

Table5 Comparison table before and after optimization of sensor collected data

气体传感器型号	传感器平均测量精度(%)	BP 神经网络优化后平均测量精度(%)	IPSO 优化 BP 神经网络处理后平均测量精度(%)
CO	78.27	89.41	95.12
H <sub>2</sub> S	63.21	85.32	90.17
SO <sub>2</sub>	70.82	88.45	91.56

## 5 结论

本文以页岩气井有害气体浓度精确监测为目的, 针对传统的 BP 神经网络极易陷入局部极小值的缺点, 结合四川盆地西南地区页岩气工程项目, 设计并实现了运用无线 Wi-Fi 技术、STM32 技术、One-NET 云平台及 IPSO 优化 BP 神经网络智能算法的有害气体精确监测系统, 得出以下结论:

(1) 针对气体传感器因存在交叉互扰现象, 导致页岩气井有害气体数据精度较低的问题, 经 IPSO 优化 BP 神经网络后的 CO、H<sub>2</sub>S、SO<sub>2</sub> 三种气体浓度数据样本比 BP 神经网络的平均相对误差分别减少了 37.8%、32% 和 34%, 优化效果提高显著。

(2) 利用 IPSO 优化 BP 神经网络模型处理后, MQ-7 型一氧化碳传感器测量精度由 78.27% 提升到 95.12%, TGS2602 型硫化氢传感器由 63.21% 提升到 90.17%, S4-SO<sub>2</sub> 型二氧化硫传感器由 70.82% 提升到 91.56%, 3 种有害气体的测量精度分别提高了 16.85%、26.96%、19.74%, 达到了预期效果。

(3) 该监测系统实现了有害气体数据采集和实时传输。系统运行良好, 易于人工操作、造价成本较低, 可移植性强, 为页岩气井开采过程中有害气体的精确监测, 保证页岩气井下安全作业环境提供了新的依据和方法。

## 参考文献

- [1] 成潇潇, 刘建国, 徐亮等. 基于页岩气返排液中污染气体浓度及扩散模型研究 [J]. 物理学报, 2021, 70(13): 163-171.
- [2] 韩伟. 浅谈页岩气压裂开采及环境保护 [J]. 化工管理, 2019(03): 153.
- [3] 袁梦, 田原宇, 张君涛. 浅谈我国页岩气开发过程中的环境风险与对策 [J]. 广州化工, 2016, 44(21): 144-146.
- [4] 李小敏, 史聆聆, 马建等. 我国页岩气开发的环境影响特征 [J]. 环境工程, 2015, 33(09): 139-143.
- [5] 杨德敏, 喻元秀, 梁睿等. 我国页岩气重点建产区开发进展、环保现状及对策建议 [J]. 现代化工, 2019(39(01)): 1-6.
- [6] 刘春. 遗传算法优化 BP 神经网络的网络流量预测 [J]. 信息安全与技术, 2014, 5(6): 82-86.
- [7] 颜七笙, 游泳, 杨志辉. BP 网络结构设计与算法探讨 [J]. 科技广场, 2005(3): 36-38.
- [8] 涂娟娟. PSO 优化神经网络算法的研究及其应用 [D]. 南京: 江苏大学, 2013.
- [9] 庄肖波, 李耀明, 王曜等. 基于粒子群算法的混联机构神经网络自适应反演控制 [J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊): 576-583.