

文章编号: 1671-251X(2025)02-0009-11

DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.2024120069

基于智能护帮装置的煤壁变形监测和集中载荷反演技术

于翔^{1,2,3,4}, 王国法⁵, 王家臣^{1,3,4}, 李良晖^{1,3,4}, 吴昊阳², 王雨兵^{1,3,4}

(1. 中国矿业大学(北京)能源与矿业学院, 北京 100083; 2. 中煤科工开采研究院有限公司, 北京 100013; 3. 放顶煤开采煤炭行业工程研究中心, 北京 100083; 4. 厚煤层绿色智能开采教育部工程研究中心, 北京 100083; 5. 中国煤炭科工集团有限公司, 北京 100013)

摘要: 煤壁片帮是制约煤炭安全高效开发的主要因素, 精准监测煤壁支护状态是提高煤壁稳定性、保证回采安全的基础。针对传统煤壁变形监测技术精度低、范围小、实时性差等问题, 开发了一种基于光纤布拉格光栅(FBG)的智能护帮装置, 创新性地将FBG嵌入液压支架护帮板中, 构建了基于粒子群优化(PSO)-径向基函数(RBF)神经网络的煤壁集中载荷反演模型, 以监测煤壁支护状态。针对复杂工况下变截面结构件受力情况理论计算的局限, 基于分布式光栅应变数据, 通过PSO-RBF神经网络模型建立微观力学参数与宏观力学参数的对应关系, 实现了对煤壁护帮板集中载荷位置及大小的高精度反演。实验结果表明: 该模型在多点标定实验样本上的预测误差较低, 拟合优度较高; 水平、竖直方向位置坐标及载荷大小在训练集上的平均绝对误差分别为0.460 6, 0.248 7, 0.973 2; 相比于载荷大小预测, 模型对集中载荷位置预测的误差更小。研究成果为煤壁支护状态监测与回采安全保障提供了重要的理论与技术基础, 也为液压支架其他结构件所受围岩载荷的精准测量提供了一种可靠方法。

关键词: 煤壁变形监测; 智能护帮装置; 液压支架护帮板; 集中载荷反演; 光纤布拉格光栅; PSO-RBF神经网络

中图分类号: TD355

文献标志码: A

Coal wall deformation monitoring and concentrated load inversion technology based on intelligent support devices

YU Xiang^{1,2,3,4}, WANG Guofa⁵, WANG Jiachen^{1,3,4}, LI Lianghui^{1,3,4}, WU Haoyang², WANG Yubing^{1,3,4}

(1. School of Energy and Mining Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 2. CCTEG Coal Mining Research Institute, Beijing 100013, China; 3. Coal Industry Engineering Research Center of Top-coal Caving Mining, Beijing 100083, China; 4. Engineering Research Center of Green and Intelligent Mining for Thick Coal Seam, Ministry of Education, Beijing 100083, China; 5. China Coal Technology and Engineering Group, Beijing 100013, China)

Abstract: Coal wall spalling is a major factor restricting the safe and efficient development of coal mining. Accurate monitoring of coal wall support conditions is essential to improving wall stability and ensuring safe

收稿日期: 2024-12-25; 修回日期: 2025-02-25; 责任编辑: 胡娴。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC2907505, 2023YFC2907503, 2023YFC2907501); 国家自然科学基金资助项目(52121003, 51934008, 52374106); 中央高校基本科研业务费资助项目(2023YQTD02)。

作者简介: 于翔(1993—), 男, 山东文登人, 助理研究员, 博士, 研究方向为工作面支护装备设计与煤矿智能装备研发, E-mail: yuxiang_cmri@163.com。通信作者: 李良晖(1992—), 男, 安徽淮南人, 讲师, 博士, 研究方向为厚煤层绿色智能开采, E-mail: lilianghui@cumtb.edu.cn。

引用格式: 于翔, 王国法, 王家臣, 等. 基于智能护帮装置的煤壁变形监测和集中载荷反演技术[J]. 工矿自动化, 2025, 51(2): 9-18, 26.

YU Xiang, WANG Guofa, WANG Jiachen, et al. Coal wall deformation monitoring and concentrated load inversion technology based on intelligent support devices[J]. Journal of Mine Automation, 2025, 51(2): 9-18, 26.



扫码移动阅读

mining. To address the issue of low precision, limited range, and poor real-time performance in traditional coal wall deformation monitoring technologies, an intelligent support device based on Fiber Bragg Grating (FBG) was developed. The FBG was innovatively embedded into the hydraulic support shield plate, and a concentrated load inversion model for the coal wall based on Particle Swarm Optimization (PSO)-Radial Basis Function (RBF) neural networks was established to monitor the support conditions of the coal wall. To overcome the limitations of theoretical calculations for stress conditions of structural components with varying cross-sections under complex working conditions, a corresponding relationship between micro-mechanical and macro-mechanical parameters was established using distributed grating strain data based on the PSO-RBF neural network model. This enabled high-precision inversion of the position and magnitude of concentrated load on the support shield plate of the coal wall. Experimental results showed that the model achieved low prediction errors and high goodness of fit in multi-point calibration samples. The average absolute errors of position coordinates and load magnitude in the training set were 0.460 6, 0.248 7, and 0.973 2, respectively. Compared to the load magnitude prediction, the model exhibited smaller errors in predicting the position of concentrated loads. The research findings provide an important theoretical and technical foundation for monitoring coal wall support conditions and ensuring safe mining, as well as a reliable method for accurate measurement of surrounding rock loads on other structural components of hydraulic supports.

Key words: coal wall deformation monitoring; intelligent support device; hydraulic support shield plate; concentrated load inversion; fiber Bragg grating; PSO-RBF neural network

0 引言

煤炭是我国的主要能源,近年来,采煤工作面的长度、开采高度和开采强度不断增大,煤壁片帮引发的人员设备损伤和大块煤堵塞运输系统等问题,是制约煤炭安全高效开采的主要因素^[1]。护帮板与煤壁直接接触,其变形特征可在一定程度上反映煤壁状态。因此,通过监测护帮装置的变形特征,进而掌握煤壁支护状态、揭示煤壁片帮机理、评估片帮风险、指导护帮机构强度校核等,是保障煤炭生产安全、提高生产效率的有效途径^[2]。

国内外学者围绕煤壁支护状态监测开展了大量理论和试验研究。目前煤壁支护状态监测主要有间接监测、直接监测 2 种方式。在间接监测研究方面,现场常用的方式是将压力传感器、行程传感器等元件安装在护帮板上^[3],感知煤壁支撑效果,避免工作面出现片帮隐患。该方式的主要缺点是护帮千斤顶下腔压力不能直接反映护帮板与煤壁之间的接触力,且护帮油缸下腔只有 1 个数据监测点,不能完整反映护帮范围内的接触力分布特征。在直接监测研究方面,主要是采用视觉识别、图像识别等技术,通过相位式高精度三维激光扫描仪、雷达探测仪对工作面煤壁进行成像。黄陵矿区智能化工作面通过视频监控对工作面煤壁、顶板进行图像监测,采用图像识别系统预测煤壁片帮的发展规律并进行预警;利用太赫兹探测煤壁内裂隙发育程度及贯通情况,实

时调整护帮结构,实现煤壁片帮控制^[4-5]。A. A. M. Alzahrani^[6]利用雷达技术对工作面煤壁、顶板状态进行监测并取得了一定成果,但是由于井下环境的复杂性,图像识别在精度和适应性上仍需进一步完善^[7]。视觉识别、图像识别技术主要依靠后处理软件获得煤壁片帮特征,但由于技术原理本身的局限,无法对护帮板覆盖区域的煤壁进行有效监测,两液压支架之间无护帮板覆盖区域煤壁占工作面整体煤壁的比例较小,该问题在大采高工作面采用多级护帮板结构时更加突出。

光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)是一种基于光纤技术的高精度光学传感器,具有灵敏度高、抗电磁干扰性强、体积小、集成性高等特点,已在多个领域得到广泛应用,如围岩变形监测^[8-10]、刮板输送机形态监测^[11-12]、底板应力监测^[13]、顶板离层监测^[14]、飞机起落架载荷监测^[15-16]、机翼形变与载荷监测^[17]、风力发电机塔筒焊缝应变监测^[18]、风机叶片监测^[19]、输电导线拉力监测^[20]、火箭柔性箭体形变监测^[21]等。对于 FBG 监测数据的准确分析与解读是实现高效、可靠监测的关键,目前主流的深度学习方法中,卷积神经网络(Convolutional Neural Networks, CNN)能够捕捉数据的复杂和抽象特征,建立数据的空间层级特征关系;循环神经网络(Recurrent Neural Network, RNN)适用于处理序列数据,能够有效捕捉序列中的时序信息;径向基函数(Radial Basis Function, RBF)神经网络的非线性逼近

能力强,可以处理复杂的非线性问题。

针对煤壁支护状态监测的迫切需求,本文在现有研究的基础上,开发了一种基于 FBG 的智能护帮装置,创新性地 将 FBG 嵌入液压支架护帮板中监测煤壁支护状态,构建了基于粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)-RBF 神经网络的煤壁集中载荷反演模型,研究成果为监测复杂结构大载荷情况下液压支架护板结构所受围岩载荷、提高煤壁稳定性、保障回采安全提供了重要的理论与技术基础。

1 基于 FBG 的智能护帮装置

1.1 FBG 传感原理

根据光纤光栅的耦合模理论,当一束宽带光入射到光纤光栅中时,在每个空间周期性折射率变化处会有少量光发生反射^[22]。光纤光栅反射光的中心波长(光纤光栅波长) λ_B 主要取决于光栅周期 A 和有效折射率 n_{eff} 。当 FBG 受到拉伸、压缩、受热膨胀等因素影响时,光栅周期 A 和有效折射率 n_{eff} 会发生改变,从而造成中心波长漂移^[23]。因此,可根据反射光中心波长的变化确定待测部位相应物理量的变化。分布式 FBG 传感器是在一条光纤上布置不同光栅周期的光栅,每个光栅周期对应 1 个中心波长,当某一位置的光栅周期受外界因素影响而发生改变时,对应中心波长将发生漂移(图 1),由此可以求得特定位置的物理量变化。

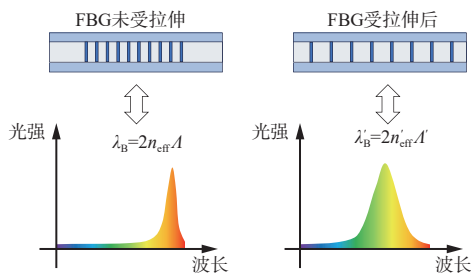


图 1 FBG 受拉伸前后波长特征

Fig. 1 Wavelength characteristics of Fiber Bragg Grating (FBG) before and after tension

根据 FBG 应变感知特性可知轴向应力应变引起的光纤光栅反射光中心波长变化为

$$\Delta\lambda_B = (1 - P_e)\lambda_B\varepsilon \quad (1)$$

式中: P_e 为弹光系数; ε 为应变。

对于某一材料确定的光纤光栅, $(1 - P_e)\lambda_B$ 为应变灵敏度系数, 记为 K_e , 其大小由光纤材料、弹光系数、有效折射率和泊松比决定。

FBG 传输的是光信号, 其原理是根据光栅反射光中心波长的变化来确定待测部位相应物理量的变化, 在数据采集和传输过程中没有电流产生, 在防爆

要求较高的煤矿工作面使用有较高的安全性^[24]。FBG 强度较低, 不能受剪切力, 将 FBG 嵌入护帮板中能够保证 FBG 不受外界载荷破坏, 提高 FBG 传感器的可靠性。FBG 可以采用串行布置, 可在 1 条光纤上布设多个测点, 能够一次性采集多点数据, 相比传统监测手段, 数据的全面性和集成性更高^[25]。另外, FBG 传感器精度可达到微米级, 灵敏度高, 并可实现实时采集^[26-27]。综合考虑 FBG 的原理及性能优势, 将其嵌入护帮装置进行变形监测。

1.2 智能护帮装置结构与变形监测方法

智能护帮装置主要由智能护帮板、快速接口、耳板等组成, 如图 2 所示。其中, 智能护帮板由外侧钢板(与煤壁贴合一侧)、内侧钢板、FBG 传感器等组成。FBG 传感器位于外侧钢板与内侧钢板之间, 外侧钢板与内侧钢板通过焊接方式固定。内侧钢板设计有凹槽结构, 凹槽边缘与钢板边缘之间有一定距离, 凹槽厚度为 t_1 。FBG 传感器通过折曲的形式夹在 2 块钢板之间, 固定后整体厚度为 t_2 , $t_2 \leq t_1$ 。光纤上的光栅层尽可能均匀分布在护帮板面域内^[28-29]。FBG 传感器通过快速接口与铠装光纤跳线连接, 通过跳线将光信号传输给解调仪。

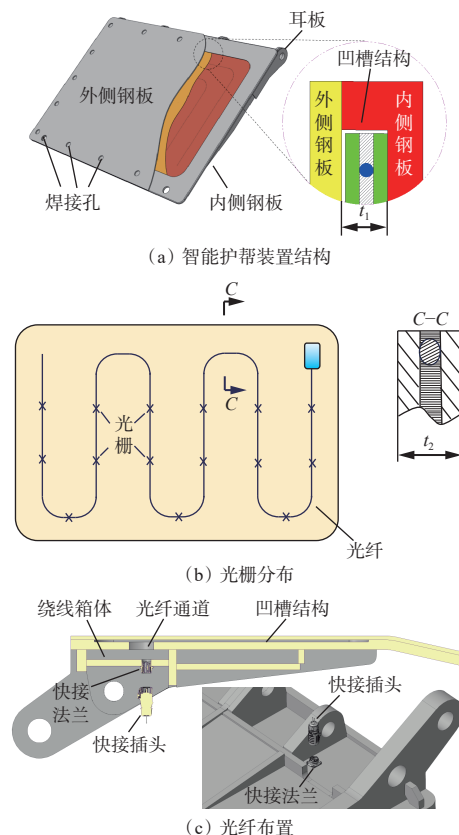


图 2 智能护帮装置

Fig. 2 Intelligent coal wall face guard

液压支架移架后展开护帮板, 使护帮板与煤壁接触, 煤壁在矿山压力的作用下发生变形并对护帮

板造成挤压,使护帮板发生变形^[2]。护帮板变形引起内部 FBG 传感器弯曲变形,使光栅周期发生变化,光栅对应中心波长也随之变化,该变化可以通过解调仪获取,对数据进行处理后可得光栅位置产生的应变。在弹性范围内,根据胡克定律可得光栅位置的应力^[30-32]。

2 煤壁对护帮装置集中载荷的反演原理

2.1 纯弯条件下集中载荷反演

将护帮装置简化为悬臂梁,如图 3 所示,其中 $m-n$ 截面中与中性轴距离为 y 处的轴向应力为

$$\sigma = \frac{My}{I} \quad (2)$$

式中: M 为弯矩; I 为梁关于 x 轴的惯性矩。

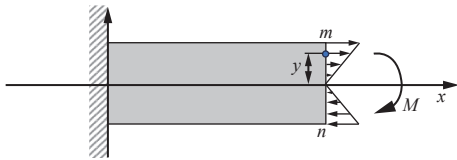


图 3 悬臂梁轴向应力

Fig. 3 Axial stress of cantilever beam

根据胡克定律有

$$\frac{My}{I} = E\varepsilon \quad (3)$$

式中 E 为梁的弹性模量。

假设护帮装置受来自煤壁的竖向应力 F 的作用,如图 4 所示,沿水平方向,在护帮装置中等间距设置 6 个截面 a—f,应变分别为 ε_a — ε_f 。由式(3)可知, $\varepsilon_a > \varepsilon_b > \varepsilon_c > \varepsilon_d > \varepsilon_e = \varepsilon_f$,可以判断集中载荷位于 d 截面和 e 截面。

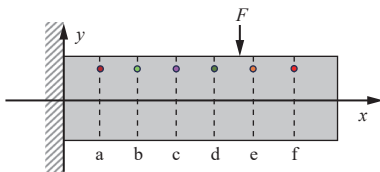


图 4 竖向应力作用下的悬臂梁

Fig. 4 Cantilever beam under vertical stress

进一步建立纯弯条件下的护帮装置轴向应变计算模型,如图 5 所示。其中, L 为护帮装置上点 m 和点 p 之间的距离, x 为应力 F 与点 p 之间的距离, y 为点 m 和点 p 与中心轴的距离,则点 m 处的应力 σ_m 和点 p 处的应力 σ_p 分别为

$$\begin{cases} \sigma_m = \frac{M_m y}{I} = \frac{F(L+x)y}{I} = E\varepsilon_m \\ \sigma_p = \frac{M_p y}{I} = \frac{Fxy}{I} = E\varepsilon_p \end{cases} \quad (4)$$

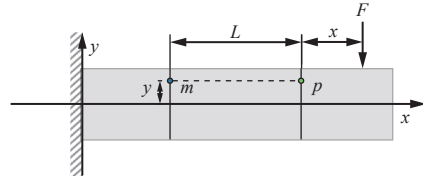


图 5 护帮装置轴向应变

Fig. 5 Axial strain of face guard

由式(4)可得

$$\begin{cases} F = \frac{EI}{Ly} (\varepsilon_m - \varepsilon_p) \\ x = L \left(\frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_p} - 1 \right) \end{cases} \quad (5)$$

联立式(5)和式(1)可得

$$\begin{cases} F = \frac{EI}{Ly} \left(\frac{\Delta\lambda_{Bm} - \Delta\lambda_{Bp}}{K_\varepsilon} \right) \\ x = L \left(\frac{\Delta\lambda_{Bm}}{\Delta\lambda_{Bp}} - 1 \right) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\varepsilon_m, \varepsilon_p$ 分别为点 m 和点 p 处的轴向应变; $\Delta\lambda_{Bm}, \Delta\lambda_{Bp}$ 分别为点 m 和点 p 处的光纤光栅反射光中心波长变化。

通过 FBG 传感器测量波长变化量并代入式(6),即可测量梁上 2 点的轴向应变,并反演护帮装置集中载荷位置和大小^[33]。

2.2 基于 RBF 神经网络的集中载荷反演

在实际井下工况中,液压支架护帮板受到的载荷非常复杂,防护装置不仅会因承受集中载荷而产生弯矩效应,还会因受力点偏离对称轴而产生扭转变形。

假设护帮装置受来自于煤壁的外载荷 F 作用,按照静力等效原则分解为 n 个子载荷,如图 6 所示。

$$F = \sum_{i=1}^n \lambda_i F_i \quad n \geq 1 \quad (7)$$

式中: F_i 为第 i 个子载荷; λ_i 为载荷传递系数; n 为子载荷数量。

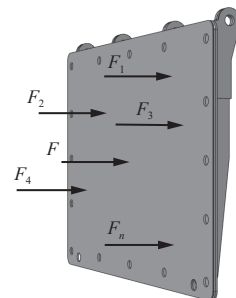


图 6 护帮装置受力

Fig. 6 Force acting on face guard

从式(7)可以看出,护帮装置所受载荷可等效为多个或无限个子载荷共同垂直作用的结果,同理,护帮装置所受多个或无限个子载荷共同作用可以等效为 1 个外载荷。根据线弹性力学的响应叠加原理,外载荷 F 的总响应是 n 个子载荷的响应线性叠加的结果^[34]。

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i \psi_i = \psi \quad (8)$$

式中: ψ 为外载荷总响应; ψ_i 为子载荷响应。

因此,想要求得外载荷总响应 ψ , 就要求出载荷传递系数 λ_i 。由于护帮板内部箱体结构的非对称性及外载荷的复杂性,载荷传递系数的确定受到非线性问题显著影响。机器学习为解决此类问题提供了方法,本文采用 RBF 神经网络建立载荷模型。

RBF 神经网络是一种 3 层前向网络: 第 1 层为输入层,由信号源节点组成;第 2 层为隐藏层,隐藏层中神经元变换函数即 RBF;第 3 层为输出层^[35]。输入变量为 $\psi_i = [\varepsilon_{1i} \ \varepsilon_{2i} \ \dots \ \varepsilon_{ji}]^T$ (ε_{ji} 为第 i 个子载荷的第 j 个应变)和权值向量 $\mathbf{W} = [\omega_1 \ \omega_2 \ \dots \ \omega_m]$, 其中 m 为隐藏层节点数量。计算应变和权值向量的距离 $\sqrt{\sum_{k=1}^j (\varepsilon_{ji} - \omega_k)^2}$ (k 为输入向量的维度, j 为应变测点数),若距离大于阈值 b ,则激活神经网络,激活函数取高斯函数。高斯函数将输入的线性关系转换成非线性函数,从而对网络各参数进行求解,最后输出外载荷合力大小和位置。

2.3 PSO-RBF 神经网络模型构建

为了提高 RBF 神经网络的学习能力和预测性能,采用 PSO 算法对 RBF 神经网络进行优化^[36],主要优化的参数为 Spread 参数。在 RBF 神经网络中,该参数通过调节高斯函数的宽度,直接影响模型的灵敏性与覆盖范围:较小的 Spread 值使基函数“尖锐化”,可增强对局部细节的捕捉能力,但也可能导致过拟合;而较大的 Spread 值使基函数“平缓化”,可扩大隐藏层神经元的响应区域,减少神经元数量,但可能因忽略局部特征导致欠拟合。这种对覆盖范围的控制不仅平衡了模型的灵敏性与稳定性,还隐式调控了模型复杂度。通过 PSO 算法自动搜索最佳 Spread 值,能够有效避免人工调参的盲目性。

模型输入特征为 5 维度,分别为 $\varepsilon_1 - \varepsilon_5$, 输出标签为 3 维度,分别为集中载荷位置坐标 (x, y) 与载荷大小 q , 样本总量为 144 个。设置训练集占总样本的 70%,并将样本集打乱,对特征和标签进行归一化处理,将数据缩放到 $[0, 1]$ 区间。

PSO 优化算法的参数见表 1。以均方根误差作

为适应度函数,通过最小化预测误差确定最优 Spread 值。在优化过程中,粒子的初始位置随机生成,并根据个体历史最优值与全局最优值动态更新速度和位置,同时约束 Spread 在指定范围内。利用最优 Spread 值构建 RBF 神经网络,并在训练集和测试集上验证模型的性能。PSO 最佳适应度收敛曲线如图 7 所示^[37]。

表 1 PSO 优化算法参数

Table 1 Parameters of PSO optimization algorithm		
算法参数	值	备注
dim	1	优化参数个数
lb	0.01	优化参数目标下限
ub	1 000	优化参数目标上限
pop	10	种群数量
Max_iteration	45	最大迭代次数

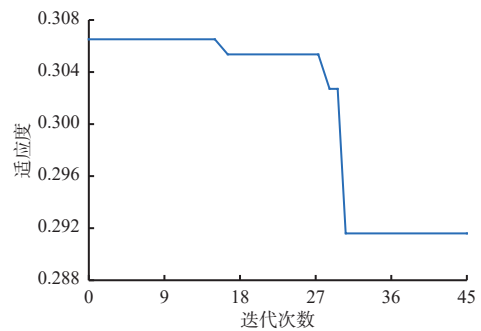


图 7 PSO 最佳适应度收敛曲线

Fig. 7 Convergence curve of PSO with best fitness

利用 Matlab 构建 1 个完全连接的 PSO-RBF 神经网络模型,流程如图 8 所示。

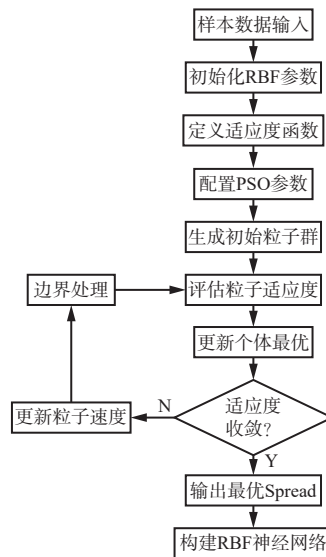


图 8 PSO-RBF 神经网络模型构建流程

Fig. 8 Construction process of Particle Swarm Optimization(PSO)-Radial Basis Function(RBF)

PSO-RBF 神经网络模型包括输入层、隐藏层与输出层,如图 9 所示。其中输入层的节点数等于输入数据的特征数。每个输入样本点对应 1 个隐藏层节点,每个隐藏层节点使用 RBF 作为激活函数。输出层节点数等于输出数据的维度(标签数)。

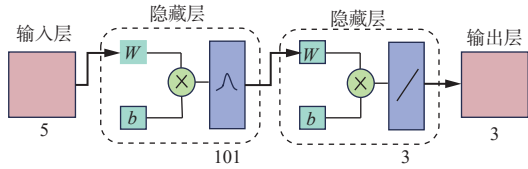


图 9 PSO-RBF 神经网络模型结构

Fig. 9 Structure of PSO-RBF neural network model

3 实验分析

3.1 载荷数据集标定实验

智能护帮装置变形监测与载荷反演实验平台主要由护帮装置模型、TV1600 光纤光栅解调仪、夹具、载荷加载装置和数据处理模块等组成,如图 10 所示。

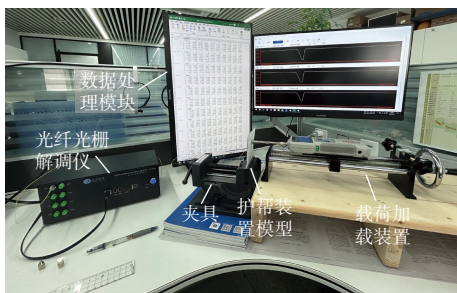
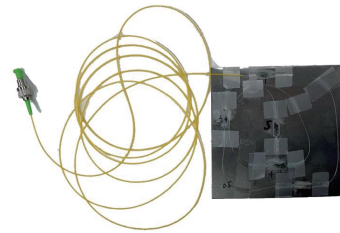


图 10 智能护帮装置变形监测与载荷反演实验平台

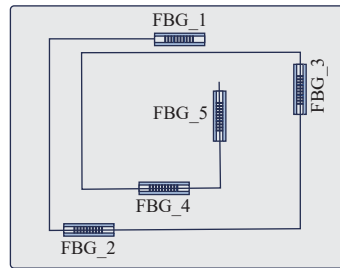
Fig. 10 Experimental platform for deformation monitoring and load inversion of intelligent face guard

将 FBG 传感器与 TV1600 光纤光栅解调仪连接。FBG 传感器共包含 1 条光纤(图 11(a)),在光纤上采用飞秒激光器刻写 5 个光栅点,5 个光栅点采用非对称布置(图 11(b))。非对称布置目的是使光栅测点对轴向变形具有更高灵敏度,以区分同一位置不同方向的应变,同时避免因护帮板的轴对称性而难以识别对称轴两侧的变形特征。其中,光栅 FBG_1, FBG_2, FBG_4 为横向布置,FBG_3, FBG_5 为纵向布置。将刻好光栅的光纤盘绕在 0.5 mm 铝板上形成带有 FBG 传感器的护帮装置模型。在光栅点处用高折射率丙烯酸酯固定,FBG_1—FBG_5 的中心波长分别为 1 534.96, 1 539.99, 1 544.89, 1 549.94, 1 544.95 nm, 应变灵敏度系数为 1.2 pm/ $\mu\epsilon$ 。

进行标定实验时,在护帮装置模型表面选取 16 个加载点,加载点位置采用平面直角坐标表示,坐标原点为模型左上角,模型左沿为 x 轴,自上向下等



(a) FBG 传感器光纤

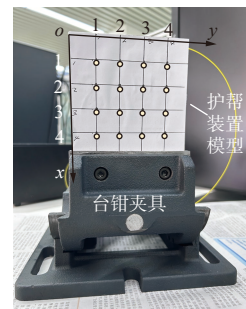


(b) 光栅点位置与光栅轴线方向

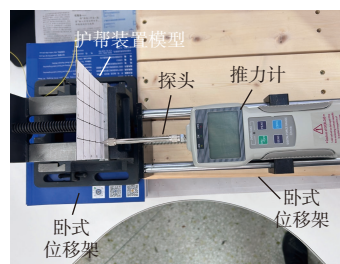
图 11 FBG 传感器位置及光栅轴线方向

Fig. 11 FBG sensor positions and direction of the grating axis

距离划分为 4 行,模型上沿为 y 轴,自左向右等距离划分 4 列,如图 12(a)所示^[38]。将模型用台钳夹具固定,将 ZP-50 数显推力计与卧式位移架固定后放置在护帮装置模型加载面前方,调整模型与卧式位移架之间的位置,使推力计探头与模型其中一个加载点对齐,如图 12(b)所示。



(a) 护帮装置模型加载点划分



(b) 推力计探头与模型

图 12 标定实验

Fig. 12 Calibration test

调试好 FBG 传感器后,转动卧式位移架摇轮,使推力计探头逐渐与模型接触,观察推力计液晶显示器读数,使推力从 2 N 开始逐步递增至 10 N,每递增 1 N 记录 1 次 FBG 传感器 5 个光栅测点的应变;将 16 个加载点全部加载后,共计得到 144 组不同位置不同加载载荷对应的 FBG 传感器应变响应,每

个加载点的数据包括压力大小、压力位置坐标和 5 个光栅位置的应变响应。按照加载位置将不同加载压力条件下 FBG 传感器上 5 个光栅测点的应变绘制成曲线, 如图 13 所示。可看出, 随着施加的压力增大, 各测点处的应变逐渐增大; 不同光栅轴线方向对压力位置变化的敏感度不同, 横向光栅 FBG_1,

FBG_2, FBG_4 对横向位置变化的敏感度更高, 纵向光栅 FBG_3, FBG_5 对纵向位置变化的敏感度更高。

3.2 PSO-RBF 神经网络模型性能验证

PSO-RBF 神经网络模型在训练集和测试集上的预测结果与真实值如图 14—图 16 所示。

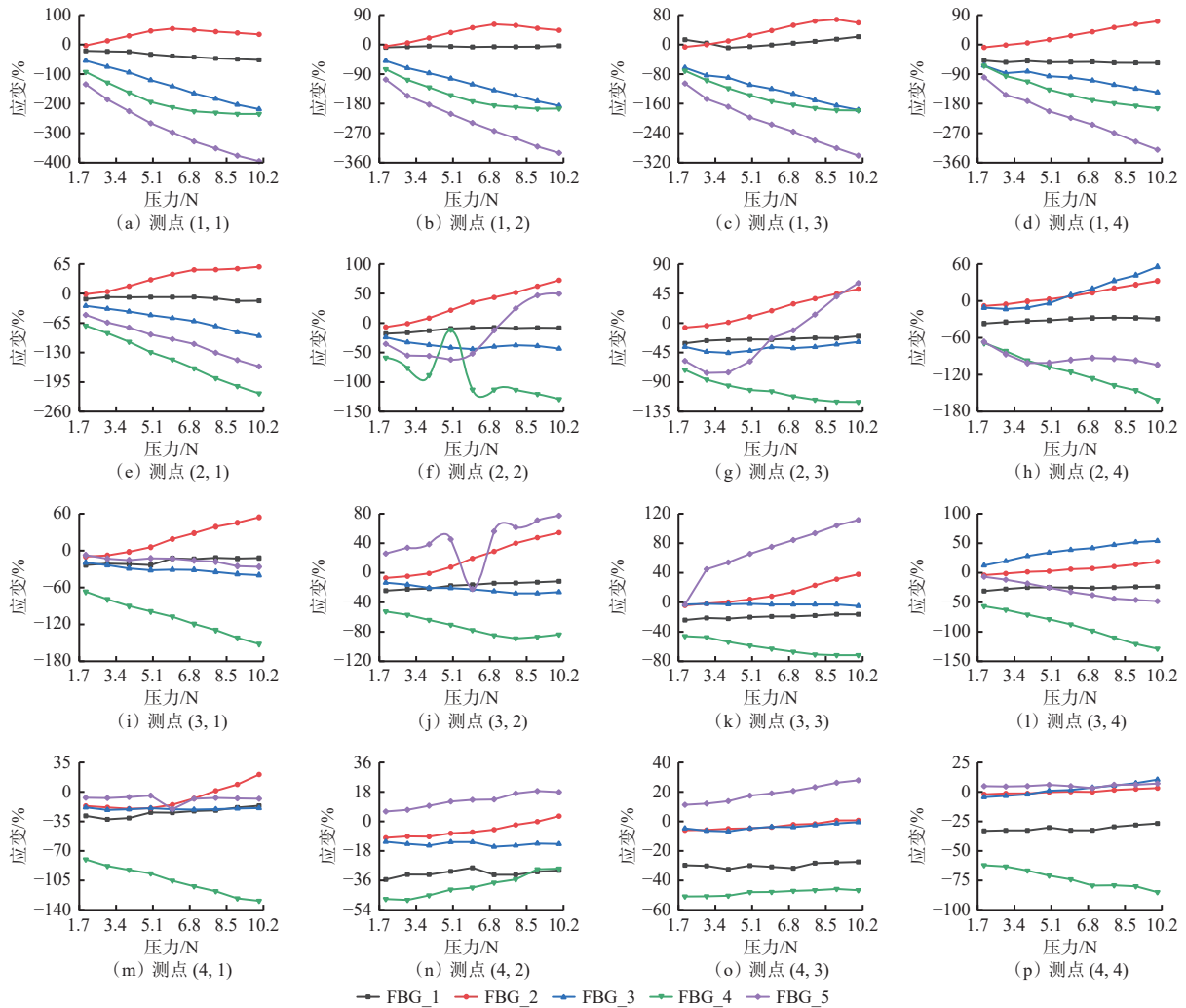


图 13 FBG 传感器应变响应

Fig. 13 Strain response of FBG sensors

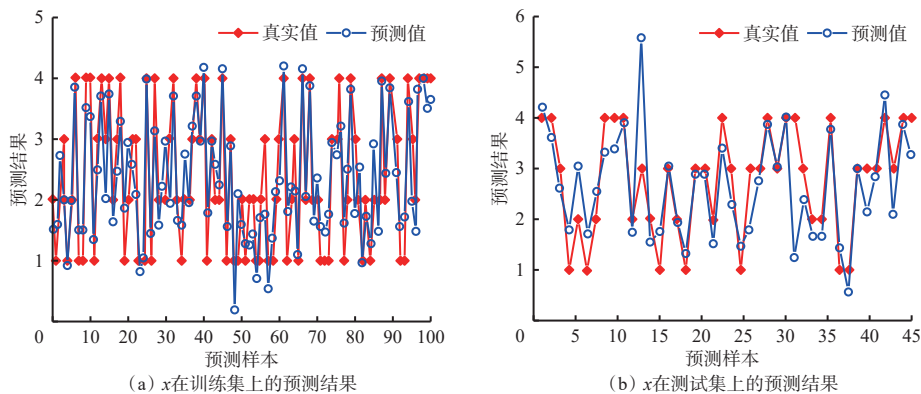
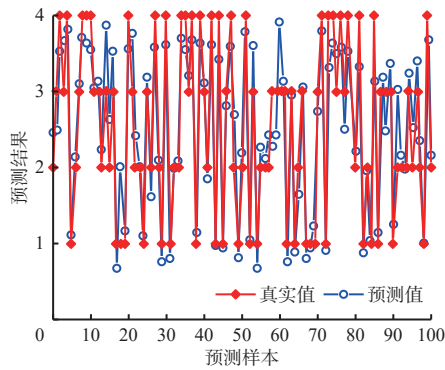
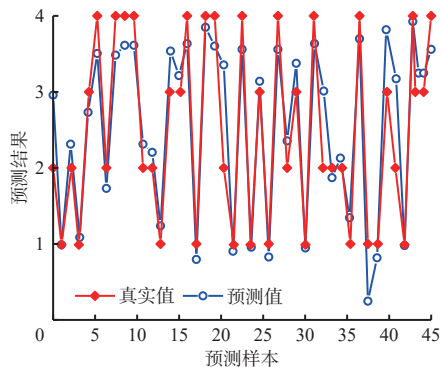


图 14 集中载荷位置坐标 x 预测结果

Fig. 14 Predicted results of coordinate x for concentrated load



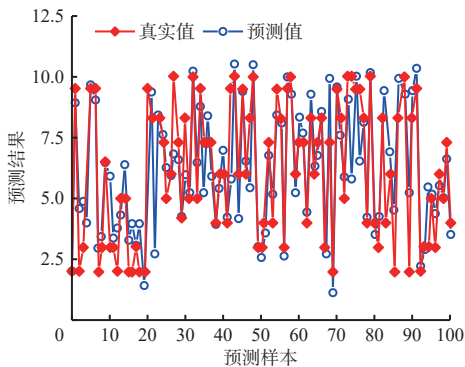
(a) y在训练集上的预测结果



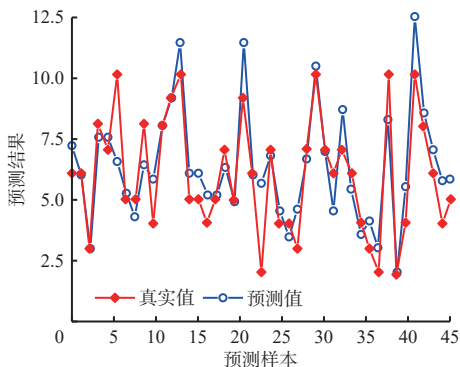
(b) y在测试集上的预测结果

图 15 集中载荷位置坐标 y 预测结果

Fig. 15 Predicted results of coordinate y for concentrated load



(a) q在训练集上的预测结果



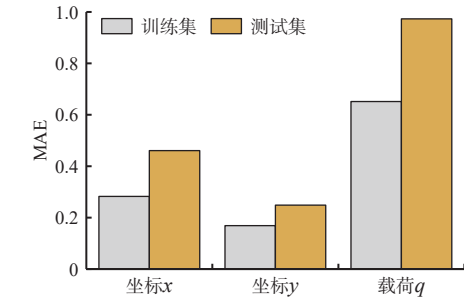
(b) q在测试集上的预测结果

图 16 集中载荷大小 q 预测结果

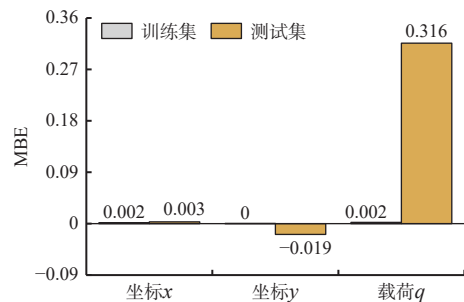
Fig. 16 Predicted results of concentrated load q

采用平均绝对误差 (Mean Absolute Error, MAE)、平均偏差误差 (Mean Bias Error, MBE)、拟合优度

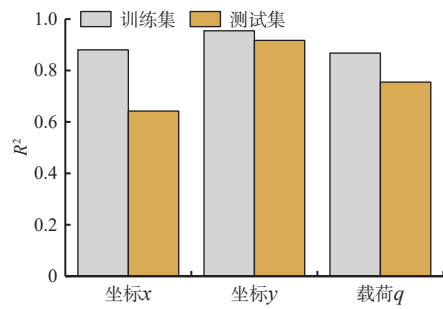
R^2 作为模型的评价指标。针对 3 个标签, 即输出 1(集中载荷位置坐标 x)、输出 2(集中载荷位置坐标 y)、输出 3(集中载荷大小 q), PSO-RBF 神经网络模型评价结果如图 17 所示。



(a) MAE



(b) MBE



(c) R^2

图 17 PSO-RBF 神经网络模型评价结果

Fig. 17 PSO-RBF neural network model evaluation results

由图 17 可看出, 模型整体评价指标良好, 其中位置坐标 x, y 及载荷大小 q 在测试集上的 MAE 分别为 0.460 6, 0.248 7, 0.973 2。相比于载荷大小预测, 模型对集中载荷位置预测的误差更小。位置坐标 x, y 在训练集上的 MAE 存在一定差异, 且前者的拟合优度 R^2 明显小于后者, 可能是由于实验过程中产生了一定随机误差, 造成模型对不同方向的预测产生差异。从 MBE 可知, 位置坐标 x (MBE=0.003 1) 和载荷大小 q (MBE=0.316 0) 的预测值高于实际值, 而位置坐标 y (MBE=-0.018 9) 的预测值低于实际值; 载荷预测效果比位置预测差, 但误差仍在允许范围内。

4 结论

1) 将FBG传感器嵌入液压支架护帮板,通过分析FBG光栅点的应变特性,推导出纯弯条件下监测集中载荷位置和大小理论模型。相比传统监测方法,该模型显著提高了煤壁支护状态监测的空间分辨率与准确性,解决了现有技术无法全面反映护帮区域受力分布的问题。

2) 针对复杂工况下护帮板受力特征,通过构建基于PSO算法的RBF神经网络模型,实现了集中载荷位置及大小的高精度反演。实验结果表明,该模型在多点标定实验样本上的预测误差较低,拟合优度较高,验证了模型在复杂载荷环境下的可靠性和可行性。

3) 基于智能护帮装置与PSO-RBF神经网络模型,实现了对煤壁集中载荷的实时监测,为揭示煤壁片帮机理、优化煤壁支护设计及预测片帮风险提供了重要依据。此外,该方法在液压支架其他结构件的载荷监测中也具有良好的推广应用潜力。

参考文献(References):

- [1] 王家臣. 厚煤层开采理论与技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009.
WANG Jiachen. Theory and technology of thick coal seam mining[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009.
- [2] 许永祥, 王国法, 李明忠, 等. 超大采高综放工作面板裂化片帮特征及合理护帮控制[J]. 煤炭学报, 2021, 46(2): 357-369.
XU Yongxiang, WANG Guofa, LI Mingzhong, et al. Investigation on coal face slabbed spalling features and reasonable control at the longwall face with super large cutting height and longwall top coal caving method[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(2): 357-369.
- [3] 王鹤理, 李金刚. 大采高智能化综采工作面关键技术研究[J]. 内蒙古煤炭经济, 2019(23): 39, 41.
WANG Heli, LI Jingang. Research on key technologies of intelligent fully mechanized mining face with large mining height[J]. Inner Mongolia Coal Economy, 2019(23): 39, 41.
- [4] 雷照源, 姚一龙, 李磊, 等. 大采高智能化工作面液压支架自动跟机控制技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(7): 194-199.
LEI Zhaoyuan, YAO Yilong, LI Lei, et al. Research on automatic follow-up control technology of hydraulic support in intelligent working face with large mining height[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(7): 194-199.
- [5] 刘俊峰, 唐恩贤, 许永祥, 等. 大采高智能化开采煤壁全过程精准控制技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(10): 131-135.
LIU Junfeng, TANG Enxian, XU Yongxiang, et al. Study on full process precision control technology of coal wall under large mining height intelligent mining condition[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(10): 131-135.
- [6] ALZHRANI A A M. Detection of mine roof failure using inexpensive LiDAR technology[D]. Rolla: Missouri University of Science and Technology, 2017.
- [7] 尤秀松, 葛世荣, 郭一楠, 等. 智采工作面三机数字孪生驱动控制架构[J]. 煤炭学报, 2024, 49(7): 3265-3275.
YOU Xiusong, GE Shirong, GUO Yinan, et al. Digital twin-driven control construction for three machines of smart coal mining face[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(7): 3265-3275.
- [8] 于远祥, 廖安全. 中深埋缓倾斜梯形切眼围岩变形规律及支护技术[J]. 西安科技大学学报, 2023, 43(6): 1137-1148.
YU Yuanxiang, LIAO Anquan. Surrounding rock deformation law and support technology of moderately deep buried gently inclined trapezoidal cut[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2023, 43(6): 1137-1148.
- [9] 杜文刚. 基于光纤感测的采动覆岩变形演化特征试验研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2020.
DU Wengang. Basic experimental study on deformation evolution characteristics of mining overburden based on optical fiber sensing[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2020.
- [10] 柴敬, 王佳琪, 杨健锋, 等. 区段煤柱变形光纤光栅监测应用研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(1): 126-137.
CHAI Jing, WANG Jiaqi, YANG Jianfeng, et al. Research on the application of fiber Bragg grating monitoring for deformation of coal pillar in sections[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(1): 126-137.
- [11] 宋扬. 智能工作面刮板输送机形态高精度光纤感测机制研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.
SONG Yang. Research on high-precision optical fiber sensing mechanism of scraper conveyor shape in intelligent working face[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023.
- [12] 张璠. 智能工作面刮板输送机运行轨迹的三维重构研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.
ZHANG Fan. Research on three-dimensional reconstruction of scraper conveyor running trajectory in intelligent working face[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023.
- [13] 丁自伟, 巩欣伟, 张杰, 等. 煤层群下行开采底板应力演化规律与合理巷道错距研究[J]. 西安科技大学学报, 2024, 44(2): 213-225.
DING Ziwei, GONG Xinwei, ZHANG Jie, et al. Study on the evolution law of bottom plate stress and reasonable roadway misalignment in downstream mining of coal seam group[J]. Journal of Xi'an University of

- Science and Technology, 2024, 44(2): 213-225.
- [14] 宋佳佳. 基于光纤光栅的顶板离层监测系统的研究应用[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2021.
SONG Jiajia. Research and application of roof separation monitoring system based on fiber Bragg grating[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2021.
- [15] 夏嘉斌. 飞机起落架光纤监测信号智能解调方法与载荷重构关键技术研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2023.
XIA Jiabin. Research on intelligent demodulation methods for aircraft landing gear optical fiber monitoring signals and key technologies in load reconstruction[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2023.
- [16] 黄鹏宇, 陈诗, 刘元凤, 等. 基于 FBG 的某舰载机前起落架载荷监测技术研究[J]. 激光杂志, 2023, 44(7): 68-75.
HUANG Pengyu, CHEN Shi, LIU Yuanfeng, et al. Research on FBG-based front landing gear load monitoring technology of a carrier aircraft[J]. Laser Journal, 2023, 44(7): 68-75.
- [17] 朱敏. 基于柔性机翼形变分析的分布式传递对准方法[D]. 南京: 东南大学, 2023.
ZHU Min. Distributed transfer alignment method based on flexible wing deformation analysis[D]. Nanjing: Southeast University, 2023.
- [18] 李明辉. 基于 FBG 的风力发电机塔筒焊缝应变监测[J]. 焊接技术, 2023, 52(8): 98-104.
LI Minghui. Weld strain monitoring of wind turbine tower based on FBG[J]. Welding Technology, 2023, 52(8): 98-104.
- [19] 孙智鹏. 基于光纤光栅的风机叶片监测系统研究与设计[D]. 恩施: 湖北民族大学, 2023.
SUN Zhipeng. Research and design of fan blade monitoring system based on fiber Bragg grating[D]. Enshi: Hubei Minzu University, 2023.
- [20] 刘祥和. 基于光纤光栅的输电导线拉力传感器设计及应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2022.
LIU Xianghe. Design and application of transmission line tension sensor based on fiber Bragg grating[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2022.
- [21] 梁庄. 基于光纤光栅传感的火箭形变重构研究及在姿态控制中的应用[D]. 长沙: 国防科技大学, 2021.
LIANG Zhuang. Research on deformation reconstruction of rocket based on fiber Bragg grating sensing and its application in attitude control[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2021.
- [22] 张俊, 陈光辉, 倪国新, 等. FBG 传感技术在飞机机翼动态形变监测中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(11): 252-260.
ZHANG Jun, CHEN Guanghui, NI Guoxin, et al. Application of FBG sensing technology in dynamic deformation monitoring of aircraft wings[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(11): 252-260.
- [23] HOCKER G B. Fiber-optic sensing of pressure and temperature[J]. *Applied Optics*, 1979, 18(9): 1445-1448.
- [24] 梁敏富. 煤矿开采多参量光纤光栅智能感知理论及关键技术[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
LIANG Minfu. Intelligent sensing theory and key technology of multi-parameter fiber Bragg grating in coal mining[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [25] DI S R. Fibre optic sensors for structural health monitoring of aircraft composite structures: recent advances and applications[J]. *Sensors*, 2015, 15(8): 18666-18713.
- [26] 吴晶, 吴晗平, 黄俊斌, 等. 光纤光栅传感器在舰船结构健康监测中的应用[J]. 舰船科学技术, 2014, 36(10): 50-54.
WU Jing, WU Hanping, HUANG Junbin, et al. Studying the application of fiber Bragg grating sensor on ship structures health monitoring[J]. *Ship Science and Technology*, 2014, 36(10): 50-54.
- [27] 郭师苒, 龙建辉, 李旭鹏, 等. 直角台阶式不规则加筋土挡墙静力荷载试验及 FBG 监测研究[J/OL]. 太原理工大学学报: 1-11. <https://link.cnki.net/urlid/14.1220.N.20240510.1043.004>.
GUO Shiyi, LONG Jianhui, LI Xupeng, et al. Study on static load test and FBG monitoring of right-angle stepped irregular reinforced earth retaining wall[J/OL]. *Journal of Taiyuan University of Technology*: 1-11. <https://link.cnki.net/urlid/14.1220.N.20240510.1043.004>.
- [28] 吉晓朋, 张志创, 李克, 等. 分布式光纤监测技术在基坑监测中的应用[J]. 中原工学院学报, 2022, 33(6): 49-53.
JI Xiaopeng, ZHANG Zhichuang, LI Ke, et al. Application of distributed optical fiber monitoring technology in monitoring of excavation[J]. *Journal of Zhongyuan University of Technology*, 2022, 33(6): 49-53.
- [29] 蔡明, 王子菡, 陶雷, 等. 基于分布式光纤传感技术的风电叶片变形监测研究[J]. 科技创新与应用, 2024, 14(16): 16-19.
CAI Ming, WANG Zihan, TAO Lei, et al. Research on blade deformation monitoring for wind turbines based on distributed fiber optic sensing technology[J]. *Technology Innovation and Application*, 2024, 14(16): 16-19.
- [30] LI Dongsheng. Strain transferring analysis of fiber Bragg grating sensors[J]. *Optical Engineering*, 2006, 45(2). DOI: 10.1117/1.2173659.
- [31] DERKEVORKIAN A, MASRI S F, ALVARENGA J, et al. Strain-based deformation shape-estimation algorithm for control and monitoring applications[J]. *AIAA Journal*, 2013, 51(9): 2231-2240.

- long-distance fixed-point sealed coring technology in broken-soft coal seam[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(8): 93-98.
- [13] 孙四清, 张群, 龙威成, 等. 煤矿井下长钻孔煤层瓦斯含量精准测试技术及装置[J]. *煤田地质与勘探*, 2019, 47(4): 1-5.
SUN Siqing, ZHANG Qun, LONG Weicheng, et al. Accurate test technology and device for coal seam gas content in long boreholes in underground coal mines[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2019, 47(4): 1-5.
- [14] 郑凯歌, 孙四清, 龙威成, 等. 地面钻井煤层气含量样品原位密闭取心装置及工艺研究[J]. *煤炭工程*, 2022, 54(10): 141-145.
ZHENG Kaige, SUN Siqing, LONG Weicheng, et al. In-situ sealed coring device and technology of CBM content sample in ground drilling[J]. *Coal Engineering*, 2022, 54(10): 141-145.
- [15] 俱养社, 马峰良, 华立. 钻孔瓦斯密闭保压取心器研制及应用[J]. *中国煤炭地质*, 2022, 34(4): 79-83.
JU Yangshe, MA Fengliang, HUA Li. Development and application of borehole gas airtight pressurized corer[J]. *Coal Geology of China*, 2022, 34(4): 79-83.
- [16] 杨冬冬, 赵江鹏, 王四一. 煤矿井下取心钻进技术与装备研究现状及发展趋势[J]. *煤炭工程*, 2021, 53(6): 176-181.
YANG Dongdong, ZHAO Jiangpeng, WANG Siyi. Research status and development direction of coring drilling technology and equipment in coal mine[J]. *Coal Engineering*, 2021, 53(6): 176-181.
- [17] 卢宗玮, 王清峰, 李彦明. 密闭取心装置研究现状与解决方案[J]. *煤炭技术*, 2022, 41(5): 142-144.
LU Zongwei, WANG Qingfeng, LI Yanming. Research and solution of closed sampling device[J]. *Coal Technology*, 2022, 41(5): 142-144.
- [18] 郭明功, 张鹏伟, 于红. 煤矿井下深孔密闭保压取样装置研制[J]. *工矿自动化*, 2023, 49(10): 160-164.
GUO Minggong, ZHANG Pengwei, YU Hong. Development of sealed pressure maintaining sampling device for deep holes in coal mines[J]. *Journal of Mine Automation*, 2023, 49(10): 160-164.
- [19] 秦大同, 谢里阳. 现代机械设计手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.
QIN Datong, XIE Liyang. *Modern mechanical Design Manual*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011.
- [20] 偶国富, 肖定浩, 易玉微, 等. 硬密封球阀主密封副接触的特性分析[J]. *浙江理工大学学报*, 2015, 40(9): 669-674.
OU Guofu, XIAO Dinghao, YI Yuwei, et al. Characteristic analysis of primary seal and auxiliary contact the main seal in metal to metal sealed ball valve[J]. *Journal of Zhejiang Sci-Tech University*, 2015, 40(9): 669-674.
- [21] 成大先. 机械设计手册[M]. 6版. 北京: 化学工业出版社, 2017.
CHENG Daxian. *Handbook of mechanical design*[M]. 6th ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2017.
- [22] 王孝天. 不锈钢阀门的设计与制造[M]. 北京: 原子能出版社, 1987.
WANG Xiaotian. *Design and manufacture of stainless steel valve*[M]. Beijing: Atomic Press, 1987.
- [23] 陆培文. 实用阀门设计手册[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2007.
LU Peiwen. *Practical valve design manual*[M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2007.

(上接第 18 页)

- [32] 司亚文. 基于分布式光纤传感器的变形监测与应变场重构方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
SI Yawen. Research on deformation monitoring and strain field reconstruction based on distributed optical fiber sensor[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019.
- [33] 田欢, 周平章. 弹性梁动载荷辨识方法研究[J]. *空天技术*, 2023(2): 84-96.
TIAN Huan, ZHOU Pingzhang. Research on dynamic load identification method of elastic beams[J]. *Aerospace Technology*, 2023(2): 84-96.
- [34] 张赐宝, 李涛, 滕申科, 等. 基于应变响应叠加原理的飞行载荷测量建模研究[J]. *应用力学学报*, 2018, 35(1): 22-27, 224.
ZHANG Cibao, LI Tao, TENG Shenke, et al. Research on modeling of flight load measurement based on strain response superposition principle[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2018, 35(1): 22-27, 224.
- [35] 尚琳, 何发东, 杨华保, 等. 基于神经网络的垂尾飞行载荷模型研究[J]. *强度与环境*, 2011, 38(5): 49-53.
SHANG Lin, HE Fadong, YANG Huabao, et al. Research on flight loads model of vertical tail based on neural networks[J]. *Structure & Environment Engineering*, 2011, 38(5): 49-53.
- [36] WANG Dongshu, TAN Dapei, LIU Lei. Particle swarm optimization algorithm: an overview[J]. *Soft Computing*, 2018, 22(2): 387-408.
- [37] 刘佳玮, 于明鑫, 祝连庆, 等. 基于深度学习的机翼蒙皮载荷计算方法[J]. *电子测量与仪器学报*, 2022, 36(4): 1-8.
LIU Jiawei, YU Mingxin, ZHU Lianqing, et al. Calculation method of wing skin load based on deep learning[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2022, 36(4): 1-8.
- [38] 侯乔乔, 张清勇. 一种改进的载荷标定试验数据回归算法[J]. *工程与试验*, 2018, 58(4): 22-24.
HOU Qiaoqiao, ZHANG Qingyong. An improved regression algorithm for load calibration test data[J]. *Engineering & Test*, 2018, 58(4): 22-24.