面向智慧矿山的光纤光栅安全监测与预警模型优化设计*

生艳凤

(鹤壁能源化工职业学院, 河南 鹤壁市 458000)

摘要:为了提升矿山安全监测系统中FBG传感器对温度和应变交叉敏感问题的解决能力,通过融合双光栅温度补偿法与基于粒子群优化算法改进的高斯过程回归建模方法,构建了高精度交叉敏感解耦监测模型。试验结果表明,所提出的方法在波长漂移数据拟合与预测准确性方面均优于传统方法。监测系统在矿山环境中实现了高精度的温度和应变数据测量,监测误差最低仅为0.04 mm,拟合度R^2达到0.912。系统在矿山环境中实现双参量高精度监测,温度/应变的监测准确率达0.961;数据传输速率较光敏/电子传感器提升36%。表明光纤光栅传感器在采集准确率与实时性维度具有一定优势。研究结果为矿山安全监测创新提供了一种可复用的理论架构,并为智能化监测系统演进奠定了方法论基础。

关键词:光纤光栅;温度;应变;粒子群优化;矿山安全监测

中图分类号:TD76;TP18 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)08-0298-09

Optimization Design of a Fiber Bragg Grating-Based Safety Monitoring and Early Warning Model for Intelligent Mines

Sheng Yanfeng

(Hebi Vocational College of Energy and Chemistry, Hebi, Henan 458000, China)

Abstract: To improve the capability of Fiber Bragg Grating (FBG) sensors in mine safety monitoring systems to address the cross-sensitivity problem of temperature and strain, a high-precision cross-sensitivity decoupling monitoring model was constructed by integrating a dual-grating temperature compensation method and a Gaussian process regression modeling method improved by the particle swarm optimization algorithm. The experimental results indicate that the proposed method outperforms traditional methods in both wavelength shift data fitting and prediction accuracy. The monitoring system achieves high-precision measurement of temperature and strain data in the mine environment, with the minimum monitoring error being only 0.04 mm and the fitting degree R^2 reaches 0.912. The system realizes high-precision dual-parameter monitoring in the mine environment, where the monitoring accuracy of temperature and strain reaches 0.961, and the data transmission rate increases by 36% compared to photosensitive and electronic sensors. This demonstrates that FBG sensors possess certain advantages in the dimensions of acquisition accuracy and real-time performance. The research results provide a reusable theoretical framework for innovation in mine safety monitoring and lay a methodological foundation for the evolution of intelligent monitoring systems.

Key words: Fiber Bragg Grating, Temperature, Strain, Particle swarm optimization, Mine safety monitoring

0 引言

在现代矿山开采中,安全监测是保障矿井环境稳定与人员安全的核心环节。随着采矿深度的增加,环境因素如温度和地层压力对矿山工程结构的影响愈加明显,致使安全监测系统面临更严苛的技术要求[1-2]。光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating,FBG)作为一种新型传感技术,凭借其高灵敏度与实时监测优势,在矿山监测领域逐步替代传统手段[3-4]。研究聚焦FBG传感器在矿山安全监测中的应用,重点解析温度与应变交叉敏感问题,并通过构建有效监测模型提升安全管理水平。近年来,国内外学者对矿山安全监测技术进行了大量探索。费汉强等[5]针对曙光金铜矿北山西矿因不良工程地质条件导致边坡滑动的问题,建立了边坡位移实时动态监测系统,并制定了四级监测预警机制,为矿山安全生产提供了重要保障。藏英涵等[6]对矿井通风系统风险评估模型与监测预警系统进行了研究,并

* **收稿日期**:2025-07-30

作者简介:生艳凤(1982—),女,河北沧州人,高级讲师,主要从事安全技术与管理方面的教学与研究。E-mail:hpym202312@163.com

将两者结合用以辅助管理者对通风系统进行风险决策,所建立的系统在磷矿山井下通风系统安全运行监控中表现良好,使预警次数下降了13.4%,显著提升了矿山的风险管控能力。Nhossai M M等[7]提出了一种基于云建筑信息模型的实时安全监控框架,解决了建筑安全监控依赖人工观察的问题,取得了显著的效果。此外,李俊等[8]针对铁路隧道结构安全监测方式的局限性,将光学视频位移计与光纤布拉格光栅技术有机结合,应用于铁路隧道的安全监测,并取得了初步可行的效果。王涛等[9]则介绍了光纤光栅传感器在高大模板支撑体系中的应用及监测方法,为后续类似监测提供了借鉴。Mishra M等[10]针对FBGs在医疗和保健中的应用问题,提出了监测生理信号的方案,并探讨了具体方法和存在的问题。尽管已有诸多矿山安全监测方面的研究,但矿山安全监测在多物理场耦合和交叉敏感性方面依然存在显著的不足。基于上述背景,本研究将采用双光栅补偿法与粒子群优化-高斯过程回归(Particle Swarm Optimization-Gaussian Process Regression,PSO-GPR)算法,开展理论-实证联合研究。基于试验数据构建高效温变-应变监测模型,实现矿山物理量的精准感知与可视化分析,增强矿山安全监测系统的可靠性与实时性,为保障矿山作业安全提供技术支持。

1 FBG传感监测系统的协同优化设计

1.1 基于双光栅补偿法的温度-应变交叉敏感抑制

FBG在矿山安全监测中主要用于实时监测矿井环境的物理参数,如温度、压力和位移,从而提升矿山的安全性。优化光纤光栅安全监测的设计,能够提高监测数据的准确性和稳定性。FBG传感器的结构原理如图1所示。

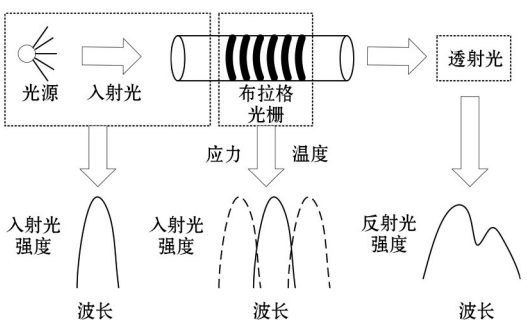


图1 FBG传感器的结构示意

Fig.1 The structural principle of the FBG sensor

FBG传感器的核心结构是在光纤内部刻写周期性折射率调制区。当宽带光在光纤中传输时,拉格衍射效应使得特定波长满足相位匹配条件的光被强烈反射,其余波长的光则透射传输。当环境参量(温度/应变)变化时,光栅周期与光纤有效折射率将发生协同改变,导致布拉格反射波长产生偏移。通过检测反射波长的变化,可以精确测量相应物理量的变化,从而实现对多种环境参数的实时监测。FBG的反射光需要满足布拉格公式,见公式(1)[11]。

$$\lambda = 2\eta\tau \tag{1}$$

式中:λ 表示光栅中心波的波长;η 表示有效折射率;τ 表示光栅周期。

公式(1)反映出中心波波长的影响因素主要为折射率及周期,其变化将决定中心波长的偏移情况。而折射率与光栅周期的数值由温度和应变所决定,因此,本文对FBG的温度传感特性和应变传感特性进行研究分析。假设FBG传感器只受温度影响,对公式(1)两边进行温度求导,得到公式(2)。

$$\begin{cases} \mathrm{d}\lambda = \lambda(\xi+\psi)\mathrm{d}T \\ (1/\eta)(\mathrm{d}\eta/\mathrm{d}T) = \xi \\ (1/\tau)(\mathrm{d}\tau/\mathrm{d}T) = \psi \end{cases} \tag{2}$$

式中:T 表示温度;ψ 表示FBG的热膨胀系数;ξ 表示FBG热光系数。

FBG的温度灵敏系数则可通过公式(3)表示。

$$M_T = \lambda(\xi+\psi) \tag{3}$$

式中,M_T 表示温度灵敏系数。

在矿山勘探过程中,应力产生的形变和弹光效应会对光栅波长产生影响。FBG在受到外界应力影响时,FBG波长变化则可通过公式(4)表示[12]。

$$\begin{cases} \Delta\lambda/\lambda = (\Delta\tau/\tau) + (\Delta\eta/\eta) \\ \Delta\tau/\tau = \varepsilon \end{cases} \tag{4}$$

式中,ε 表示轴向应变大小与光栅周期之间的关系。

弹光效应和光纤折射率之间的关系则可通过公式(5)表示。

$$\Delta\eta/\eta = -\{\eta^2[P_{12} - o(P_{11}+P_{12})]\}\varepsilon/2 \tag{5}$$

式中:P 表示光纤的弹光系数;o 为泊松比。

FBG的应变灵敏系数 M_ε 可由公式(6)表示。

$$M_\varepsilon = (1-P_e)\lambda \tag{6}$$

上述分析均只考虑受温度影响或应变影响得出的结果,但是在实际场景中,两者影响是同时存在的。因此,FBG的温度与应变敏感特性表示为公式(7)。

$$\Delta\lambda = M_T\Delta T + M_\varepsilon\varepsilon \tag{7}$$

在矿山安全监测中,FBG虽具有高灵敏度和实

时监测的优势,却面临温度与应变交叉敏感的核心局限。其主要问题包括温度波动引起光栅热光效应与热膨胀效应,导致反射波长漂移;机械应变通过弹光效应改变光栅周期产生干扰性波长偏移,二者的耦合作用会显著降低测量精度。为消除交叉干扰,需采用双光栅补偿法[13]。双光栅补偿法主要是波分复用(Wavelength Division Multiplexing,WDM)和空分复用(Space Division Multiplexing,SDM)的联合使用,其中 WDM 和 SDM 的复用结构如图 2 所示。

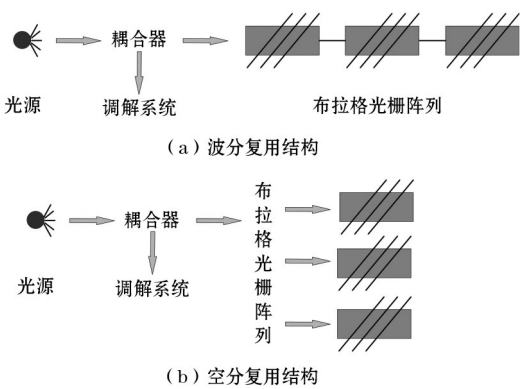


图 2 光栅的 WDM 与 SDM 结构示意

Fig.2 Schematic of the WDM and SDM structures of the grating

图 2(a)展示了由多条不同反射波长的光纤光栅组成的 WDM 结构,使得不同波长的光信号能够在同一光纤中实现并行传输。每个光纤光栅仅反射特定波长的信号,其他波长的光则继续传播,从而高效利用光纤带宽,适用于实时监测多种参数,显著提高了数据采集的效率和准确性。图 2(b)则展示了通过在同一光纤中设置不同位置或结构的光纤光栅,实现信号的空分复合,从而允许独立监测特定物理参数,减少信号之间的干扰和损失。研究表明,结合 WDM 和 SDM 技术可以在同一根光纤上写入应变光栅和温度光栅,其中应变光栅同时受到应变和温度的双重影响,而温度光栅则仅与温度变化相关。将温度光栅波长变化量表示为 $\Delta\lambda_1$,应变光栅波长变化量表示为 $\Delta\lambda_2$,具体表达如公式(8)所示。

$$\begin{cases}\Delta\lambda_1=\Delta T\times M_{T1}\\ \Delta\lambda_2=\Delta T\times M_{T2}+M_\varepsilon\times\varepsilon\end{cases}\tag{8}$$

通过双光栅补偿法的 WDM 与 SDM 技术设计,实现了温度与应变影响的初步解耦,有效缓解了交叉敏感问题。然而,在矿山的复杂环境中,由于受地质结构扰动、设备振动等多物理场耦合作用,FBG 传感器的测量信号往往表现出强非线性和随机噪声叠加的特性。这种非理想特性使得传统的线性拟合方法难以精确还原真实的物理量变化规律。为了进一步提升监测系统的可靠性和环境适应性,构建了基于 PSO 与 GPR 相结合的算法,进一步完善了非线性校正框架。

1.2 面向矿山多场耦合干扰的 PSO-GPR 非线性校正模型

当前 FBG 在矿山安全监测的应用中存在一些局限性,主要体现在测量数据的非线性误差和环境噪声的干扰,这可能导致传感器的响应不准确及稳定性下降。此外,传统的线性拟合方法在处理复杂数据时,往往无法有效捕捉实际的变化趋势。本研究提出的 PSO-GPR 智能算法能够自适应地寻找最优拟合参数,从而提高传感器的线性拟合度和校正准确性,增强监测系统的可靠性和实用性[14-15]。基于 PSO-GPR 优化的 FBG 传感监测系统的基本结构如图 3 所示。

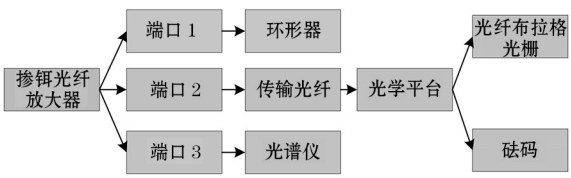


图 3 基于 PSO-GPR 优化的 FBG 传感监测系统基本结构

Fig.3 Basic structure of the FBG sensing monitoring system optimized based on PSO-GPR

在矿山安全监测中,FBG 传感器常面临多物理场耦合的干扰。GPR 通过协方差函数的非线性建模能力,能有效捕捉多变量耦合效应。针对矿山环境中的非平稳噪声,采用复合核函数进行设计,具体形式如公式(9)所示。

$$k(x,x')=k_{\text{Matern}}(x,x')+k_{\text{White}}(x,x')\tag{9}$$

式中:$k(x,x')$表示复合协方差函数;(x,x')表示多变量输入组合,例如温度与应变的组合数据;k_{Matern}表示 Matern 核函数;k_{White}表示白噪声核函数。

公式(9)适用于刻画矿山应变信号的局部平滑性与突变特性,如岩层断裂时的阶跃响应。研究假设:在矿井巷道监测中,温度梯度为 10 ℃/m,会造成传统 FBG 应变测量误差达 15%。GPR 通过联合训练温度-应变数据集,构建条件分布模型,如公式(10)所示。

$$\begin{cases}p(\Delta\lambda\mid T,\varphi)=N(\mu,\sigma^2)\\ \mu=\boldsymbol{k}_*^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{K}+\sigma_{\mathrm{n}}^2\boldsymbol{I})^{-1}Y\end{cases}\tag{10}$$

式中:p 表示条件概率密度函数;$\Delta\lambda$ 为中心波长漂

移量;φ 表示应变变量;μ 表示预测均值;$\boldsymbol{k}_*^{\mathrm{T}}$ 表示协方差向量;$\boldsymbol{K}$ 表示训练集的协方差矩阵,由核函数计算得到;N 表示后验密度函数;σ^2 表示由 GPR 的协方差函数、核参数及输入样本点位置共同决定的预测不确定性度量;σ_{n}^2 表示噪声方差项;$\boldsymbol{I}$ 表示对角矩阵,用于防止矩阵求逆时的数值不稳定;Y 表示观测数据集中的输出变量。

然而,通过双光栅温度补偿后的 FBG 在矿山环境中的拟合效果仍不满足实际应用要求。因此,研究采用优化算法对 FBG 的拟合度进行优化。该优化算法需要具备快速收敛与全局搜索能力,故采用 PSO 算法实现优化。首先对 PSO 粒子进行编码与空间搜索设计,每个粒子对应一组 GPR 的超参数组合:信号方差 σ_{f}、长度尺度 l 和噪声标准差 σ_{n}。

这些参数直接影响 GPR 的预测能力。在搜索空间设定中,设置各超参数的搜索范围。这些约束范围的主要依据:σ_{f} 过小会导致信号幅值被低估,无法捕捉矿山应变信号的剧烈变化;l 过大会忽略局部突变,过小则会导致过拟合;σ_{n} 则需覆盖矿山环境中机械振动与电磁干扰的强度范围。为平衡全局探索与局部开发,引入线性衰减惯性权重,见公式(11)。

$$\omega(t)=\omega_0-(\omega_0-\omega_z)\times\frac{t}{C} \tag{11}$$

式中:$\omega(t)$ 表示在第 t 次迭代时的惯性权重;ω_0 表示初始惯性权重,取值为 0.9,以保持初始阶段的高探索能力,避免陷入传感器噪声引起的虚假最优;ω_z 表示终止惯性权重,取值为 0.4,目的是后期加强局部搜索,精细化调整超参数;t 表示当期迭代次数;C 表示 PSO 总迭代次数。

引入衰减机制的目的是在深部矿山高压高湿环境下,传感器信号可能随采掘进度呈现阶段性变化,动态权重可自适应调整搜索强度。

PSO 算法的适应度函数用于评估粒子对应的 GPR 超参数性能,定义为负对数似然与正则化项的加权和,具体如公式(12) 所示。

$$\rho(\theta)=-\log p(Y\mid X,\theta)+\alpha\ \|\theta\|_2 \tag{12}$$

式中:$\rho(\theta)$ 表示综合适应度值;$-\log p(Y\mid X,\theta)$ 表示负对数似然项,该项是衡量模型对训练数据(温度-应变数据集)的拟合程度;X 为观测数据集中的输入变量;α 表示正则化系数,防止在矿山监测初期,小样本出现过拟合的情况;$\|\theta\|_2$ 表示超参数向量的 L2 范数。

最后,在 PSO 算法的多样性维护设计方面,引入混沌扰动机制以提高粒子群跳出局部最优的能力。具体策略是当检测到某个粒子的速度(或位置变化) 低于预设阈值(例如接近零),并且其个体最优解长时间未更新时,向该粒子的位置施加一个随机扰动项,该扰动项基于混沌序列生成,具有遍历性和非重复性特点,有助于避免粒子群在矿山复杂数据形成的多峰陷阱中停滞。基于多源参数(温度 T、应变 φ 及其变化率 T' 和 φ') 加权求和预测中心波长漂移量($\Delta\lambda_{\mathrm{pred}}$),见式(13),以构建光纤光栅传感系统的动态安全阈值判据。将实时监测值($\Delta\lambda$) 与预测值($\Delta\lambda_{\mathrm{pred}}$) 的残差绝对值与动态安全阈值($\delta$) 对比,当 $|\Delta\lambda-\Delta\lambda_{\mathrm{pred}}|>\delta$ 时,判定为异常状态(如岩石裂纹扩展、环境温度过高),立即输出警报信号,其中安全阈值并非固定值,而是随负载速率(应力率) 与温度动态耦合变化的自适应参数。

$$\Delta\lambda_{\mathrm{pred}}=\sum_{i=1}^{n}\alpha_{ik}(T_i,\varphi_i,T',\varphi') \tag{13}$$

式中,α_{ik} 为灵敏度函数,反映第 i 个传感器在第 k 种工况下对温度与应变耦合响应的强度。

综上所述,研究所构建的 PSO-GPR 模型流程如图 4 所示。首先,初始化粒子群并编码 GPR 超参数,每个粒子代表一个候选解集。通过动态调整粒子群的搜索能力并结合适应度函数评估超参数对温度-应变数据的拟合精度。当粒子速度低于设定阈值时,启用混沌扰动机制以避免局部最优解。持续更新个体和群体最优解,直至满足迭代终止条件。然后输出优化后的超参数,重构 GPR 协方差核函数,建立高精度波长漂移预测模型,实现从原始数据采集到安全阈值动态计算的完整闭环,支持双光栅补偿法在复杂矿井环境中的应用。

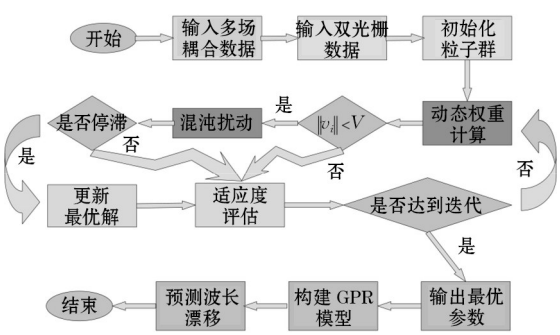


图 4 PSO-GPR 流程示意

Fig.4 Schematic of the PSO-GPR process

2 试验验证与性能评估

2.1 FBG 传感系统灵敏性验证

为验证 FBG 应力传感系统的灵敏性,按照图 3

所示的设置进行试验。砝码的质量(负载)变化范围为 0～1 kg,试验以每 5 g 为一阶段进行反射光谱测量,每个阶段均重复测试 10 次,最终获得 2 000 个样本数据。数据集按照 70%、20%及 10%的比例分为训练集、测试集、验证集。检测参数包括温度、应变、振动等物理量。

对第 130 个采样点进行了分析,并通过光学频谱分析仪扫描得到光谱图,分析结果表明,在第 130 个采样点,不加砝码时,即无应力变化,此时监测波长为 1 551.0 nm,反射强度为 0.001 75 mW;随着砝码质量不断增加,即应力不断增大,砝码质量为 1 kg 时,监测波长为 1 551.3 nm,反射强度为 0.001 70 mW。该数据表明 FBG 传感器在 1 kg 负载下产生了 0.3 nm 的中心波长漂移,说明 FBG 应力传感系统能够有效响应外部负载变化,验证了其高灵敏度和监测能力。

为验证所提方法在矿山安全监测中的有效性与适用性,开展了一系列试验。试验所用的主要硬件包括 FBG 传感器,其监测温度范围为 －20～100 ℃,测量精度为±0.1 ℃;高速光谱分析仪的采样频率为 100 Hz;计算机处理器为 Intel Core i7。试验模型的主要参数设置见表 1。

表 1 模型参数设置

Table 1 Model parameter settings

信号方差	长度尺度	噪声标准差	粒子群大小	迭代次数
1	0.5	0.1	50	100
惯性权重初始值	惯性权重终止值		正则化系数	适应度阈值
0.9	0.4		0.01	0.1

首先通过训练集和测试集对模型性能进行验证分析,模型性能评价指标采用平均绝对误差(*MAE*)、均方误差(*MSE*)、均方根误差(*RMSE*)和平均绝对百分误差(*MAPE*)。另外,采用遗传算法(Genetic Algorithm,GA)[16]、蚁群搜索算法(Ant Colony Optimization,ACO)[17]、麻雀搜索优化算法(Sparrow Search Algorithm,SSA)[18]进行对比分析,如图 5 所示。

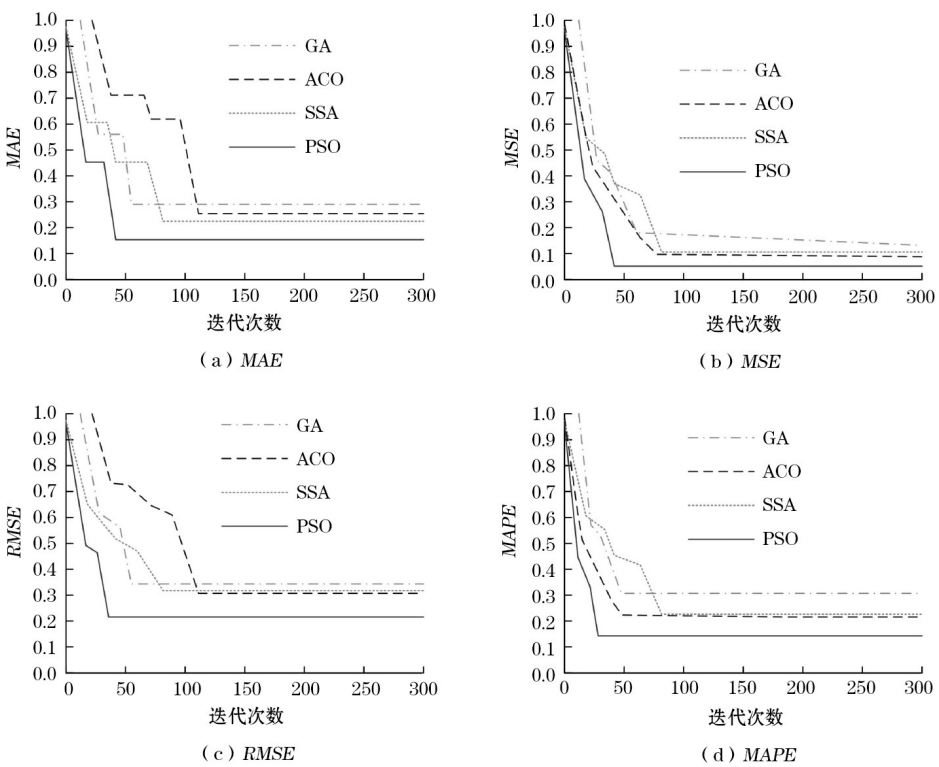


图 5 不同模型在训练集上的性能对比

Fig.5 Performance comparison of different models in the training set

由图 5 可知,PSO 算法模型的 *MAE*、*MSE*、*RMSE* 和 *MAPE* 分别为 0.172,0.033,0.202,0.153;GA 算法模型的 4 种指标分别为 0.301,0.184,0.352,0.305;ACO 算法模型的 4 种指标分别为 0.267,0.098,0.297,0.208;SSA 算法模型的 4 种指标分别为 0.231,0.095,0.294,0.209。结果表明,PSO 算法模型在训练集上具有优秀的拟合能力和较高的精确性,相对于其他优化算法更具优势。为验证各方法的拟合能

力,通过线性拟合度 R^2 和一次项系数 Q_1 进行分析。测试集中 172 采样点的中心波长分析结果见表 2。

表 2 不同模型的拟合性能对比

Table 2 Comparison of fitting performance of different models

算法	中心波长 2		中心波长 4		中心波长 6		中心波长 8		中心波长 10	
	R^2	Q_1	R^2	Q_1	R^2	Q_1	R^2	Q_1	R^2	Q_1
GA	0.834	0.018	0.812	0.025	0.823	0.020	0.805	0.027	0.810	0.022
ACO	0.885	0.014	0.872	0.018	0.877	0.017	0.868	0.021	0.870	0.019
SSA	0.876	0.015	0.865	0.021	0.871	0.019	0.858	0.023	0.860	0.020
PSO	0.912	0.012	0.901	0.015	0.905	0.013	0.895	0.018	0.898	0.016

从表 2 中的数据可以看出,PSO 算法在所有中心波长的拟合度 R^2 为 0.895～0.912,均高于其他算法,说明 PSO 算法在波长预测方面具有优越的性能。同时,PSO 算法的一次项系数 Q_1 也处于最低水平,进一步说明了 PSO 算法在拟合误差控制上也具有良好的性能。这些结果验证了 PSO 算法在 FBG 应力传感系统中对中心波长的高效拟合能力,显示出其在实际应用中的潜在价值。

2.2 PSO-GPR 算法的应用效果分析

为进一步验证 PSO-GPR 算法的应用效果,通过验证集及实际应用进行更具体的对比分析。首先采用验证集中的 6 个采样点进行误差对比,采样点分别为 182,185,188,193,196,199。6 个采样点的误差对比如图 6 所示。

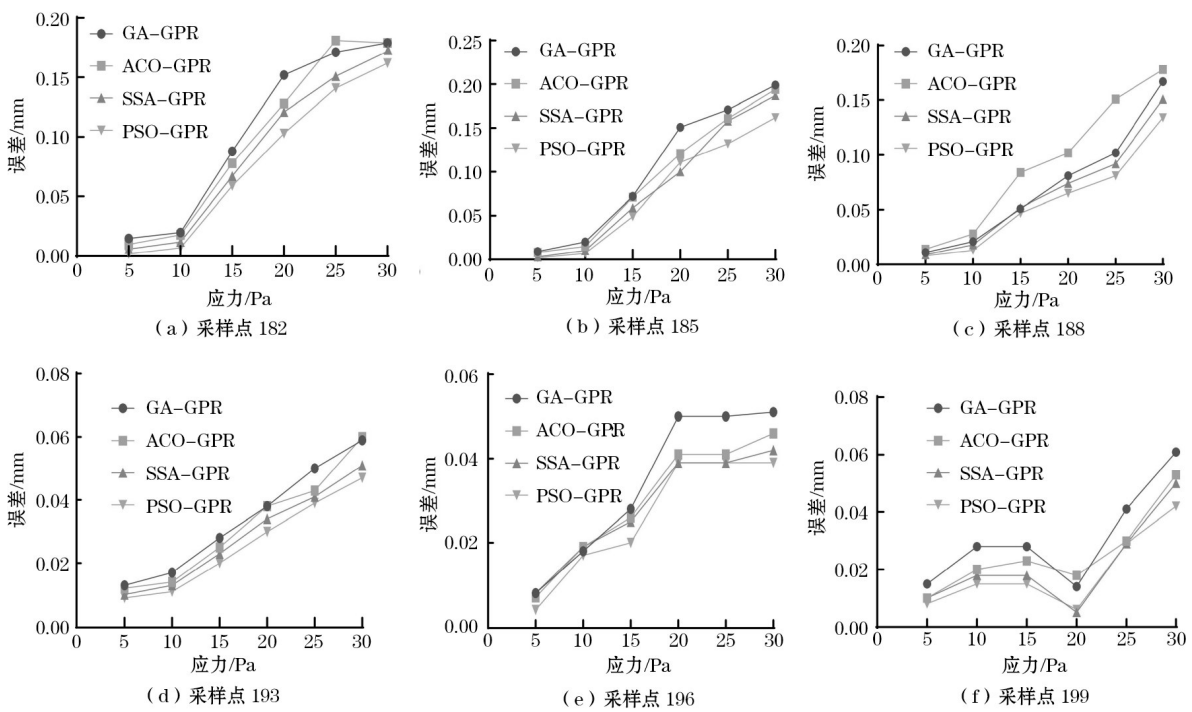
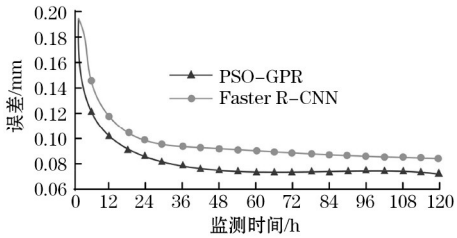


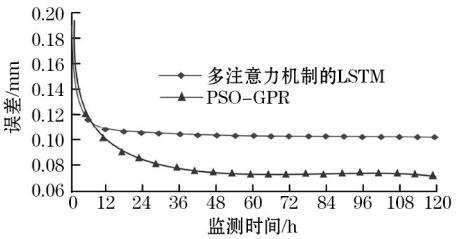
图 6 不同模型的监测误差对比

Fig.6 Comparison of monitoring errors of different models

由图 6 可知,PSO-GPR 方法的监测误差最低。在采样点 196 中,PSO-GPR 的监测误差最大值仅为 0.04 mm,而 GA-GPR 方法的误差最大值达到 0.05 mm;在采样点 188 中,PSO-GPR 的监测误差最大值为 0.14 mm,而 ACO-GPR 的监测误差最大值为 0.18 mm。结果表明,PSO-GPR 在 6 个采样点中的监测误差均低于其他比较模型,说明 PSO-GPR 模型在实际应用中具有良好的有效性和可靠性。为进一步验证 PSO-GPR 模型的实际应用可行性,收集了不同时间段内的监测数据,包括温度、应变和振动,且确保时间跨度内包括多次试验的数据,并采用 PSO-GPR、Faster R-CNN 和多注意机制的 LSTM 模型分别进行实时监测数据的预测。不同模型预测结果的误差随时间的变化曲线如图 7 所示。



(a) PSO-GPR与Faster R-CNN的预测误差对比



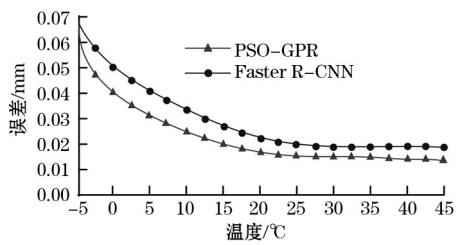
(b) PSO-GPR与多注意力机制的LSTM的预测误差对比

图 7 不同模型随时间变化的预测结果误差

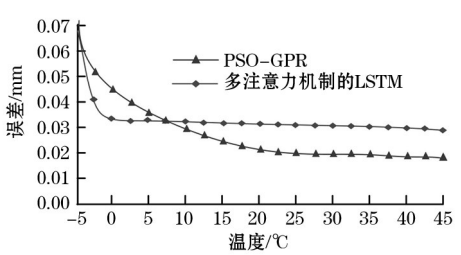
Fig.7 The error of prediction results of different models with time change

由图 7 可知,随着时间的推移,各预测模型的误差值逐渐趋于稳定,PSO-GPR 模型在 24 h 时达到收敛状态,此时误差值趋近于 0.083 mm;Faster R-CNN的收敛时间与 PSO-GPR 相同,但其准确率低于 PSO-GPR,最终收敛于 0.094 mm 左右。相较于其他两种预测模型,多注意机制的 LSTM 模型的收敛速度更快,仅需 18 h 完成收敛,但收敛后的误差值仍维持在 0.109 mm 左右,误差结果较大。

不同模型随温度变化的预测结果误差如图 8 所示。



(a) PSO-GPR与Faster R-CNN的预测误差对比



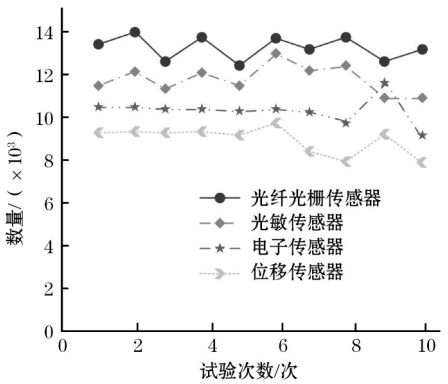
(b) PSO-GPR与多注意力机制的LSTM的预测误差对比

图 8 不同模型随温度变化的预测结果误差

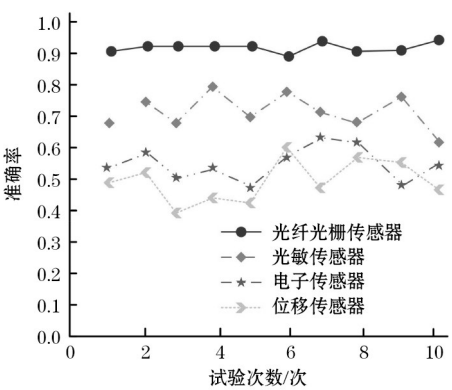
Fig.8 The error of prediction results of different models with temperature change

由图 8 可以看出,随着温度变化,3 个预测模型均趋于稳定。PSO-GPR 和 Faster R-CNN 均在 10 ℃左右收敛,而 LSTM 算法虽在 0 ℃完成收敛,但准确率较低,误差趋于稳定后,误差值逐渐趋近于 0.032 mm。PSO-GPR 的预测准确率最高,误差值接近 0.018 mm。Faster R-CNN 的预测准确率低于 PSO-GPR,误差值约为 0.020 mm。

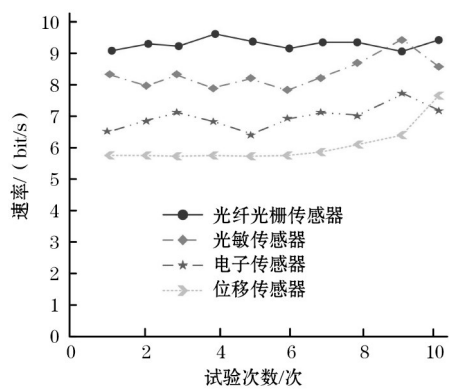
不同传感器的性能对比如图 9 所示。



(a) 数据采集数量



(b) 数据收集准确率



(c) 数据传集速率

图 9 不同传感器的性能比较

Fig.9 Performance comparison of different sensors

从图 9(a)可以看出,光纤光栅传感器在数据采集上表现最佳,共收集了 12 859 个数据点,而光敏

传感器则记录了 10 587 个数据。由图 9(b)可知,光纤光栅传感器的监测准确率平均值为 0.962,相较于其他 3 种传感器具有更高的准确率和更稳定的监测效果。由图 9(c)可知,光纤光栅传感器在矿山环境中仍具有较快的数据传输速率。结果表明,经优化后的光纤光栅传感器在实际应用中具有巨大潜力。

3 结论

基于双光栅补偿法和 PSO-GPR 优化算法,针对温度和应变交叉敏感问题,提出了一种高效的 FBG 传感监测系统,实现了矿山环境中多物理场的准确监测与数据校正,并得出以下结论。

(1) 试验结果表明,基于 PSO 算法的模型在训练数据集上获得了 *MAE* 为 0.172、*MSE* 为 0.033、*RMSE* 为 0.202、*MAPE* 为 0.153 的优良指标。这些指标反映了 PSO 算法具有优异的拟合能力和较高的精确度,意味着利用 PSO 算法可以高效地监测矿山环境下的多物理场,以提高对潜在危险的预警能力。

(2) PSO 算法在所有中心波长的拟合度 R^2 均高于 0.895,相较于 GA、ACO 及 SSA,PSO 算法展现出更好的性能。在波长漂移预测方面,PSO 模型的监测误差最低,仅为 0.04～0.14 mm。

(3) 本文提出的 PSO-GPR 算法成功解决了由于环境变量耦合所导致的数据不稳定问题。这为矿山安全监测提供了一种可靠的数据校正方法,能更准确地反映实际监测情况,降低了因误差带来的安全隐患。

(4) FBG 传感器监测系统为矿山安全智能化监测提供了一种新的手段。该监测系统可对温度和应变进行精确解耦,因此可直接应用于矿山关键部位的微应变和微温度变化的实时监测。FBG 传感器数据采集准确率高,响应速度快,结合校正模型的快速运算能力,使得整个监测系统具备高速的数据处理能力和传输特性。该方案为建立矿山“感-智-控”一体化的安全监测系统奠定了基础。该监测系统以高质量的实时传感数据作为输入,驱动智能预警模型准确地工作,进一步通过数字化平台实现数据的可视化管理与分析。

然而,研究中仍存在一定的局限性,如在复杂地质条件下的信号稳定性及实时性有待加强,未来应针对多种环境干扰因素进行更深入的分析与优化,进一步提升系统在实际应用中的适应能力和可靠性。

参考文献(References):

[1] 魏启明,赵俊杰,王虎,等.矿山巷道矿压数值模拟推演及监测技术研究[J].有色金属工程,2023,13(7):88-95.
Wei Qiming, Zhao Junjie, Wang Hu, et al. Study on ground pressure deduction and monitoring technology of roadway [J]. Nonferrous Metals Engineering,2023,13(7):88-95.

[2] 胡美婷,叶会师,杨天鸿,等.超大型露天矿多源信息集成的 WebGIS 云平台构建[J].金属矿山,2023(6):145-154.
Hu Meiting, Ye Huishi, Yang Tianhong, et al. Construction of WebGIS cloud platform for multi-source information integration of super large open-pit mine[J]. Metal Mine,2023(6):145-154.

[3] 徐磊,高广军,彭畅,等.融合光纤传感与压电感知的列车结构健康监测方法[J].铁道科学与工程学报,2023,20(7):2763-2772.
Xu Lei, Gao Guangjun, Peng Chang, et al. Train structure health monitoring method based on optical fiber sensors and piezoelectric sensors[J]. Journal of Railway Science and Engineering,2023,20(7):2763-2772.

[4] 蔡煜杰,张碧华.光纤光栅技术在边坡安全监测中的应用[J].建筑机械化,2024,45(2):118-120.
Cai Yujie, Zhang Bihua. Application of fiber bragg grating technology in slope safety monitoring[J]. Construction Mechanization,2024,45(2):118-120.

[5] 费汉强,马增,潘懿,等.基于实时动态全球定位测量的边坡监测预警研究[J].矿业研究与开发,2023,43(7):54-59.
Fei Hanqiang, Ma Zeng, Pan Yi, et al. Study on slope monitoring and early warning based on real-time dynamic global positioning measurement[J]. Mining Research and Development,2023,43(7):54-59.

[6] 藏英涵,李先福,吝曼卿,等.磷矿井下通风系统风险评估与监测预警研究[J].矿业研究与开发,2023,43(11):115-121.
Zang Yinghan, Li Xianfu, Lin Manqing, et al. Research on risk assessment and monitoring and early warning of underground ventilation system in phosphate mine[J]. Mining Research and Development,2023,43(11):115-121.

[7] Nhossai M M, Ahmed S, Anam S M A, et al. BIM-based smart safety monitoring system using a mobile app: a case study in an ongoing construction site[J]. Construction Innovation,2023,25(2):552-576.

[8] 李俊,张鼎博,张訢炜,等.基于光纤光栅传感与视频位移计技术的运营期铁路隧道结构安全监测[J].激光与光电子学进展,2023,60(23):169-177.
Li Jun, Zhang Dingbo, Zhang Xinwei, et al. Safety monitoring of railway tunnel structure during operation period based on fiber grating sensing and video displacement meter technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023,60(23):169-177.

[9] 王涛,乔杨,郭永兴,等.基于光纤光栅传感器的高支模安全监测[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2024,56(2):311-316.

Wang Tao, Qiao Yang, Guo Yongxing, et al. High formwork support system safety monitoring based on fiber bragg grating sensors[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2024,56(2):311-316.

[10] Mishra M, Sahu P K. Fiber bragg gratings in healthcare applications:a review[J]. IETE Technical Review,2023,40(2):202-219.

[11] 张东振,耿聪杰,司玉军.基于光纤光栅传感器的采煤机制动盘温度智能监测[J].微型电脑应用,2024,40(11):186-188.
Zhang Dongzhen, Geng Congjie, Si Yujun. Temperature intelligent monitoring of brake disk of coal mining mechanism based on fiber grating sensor[J]. Microcomputer Applications,2024,40(11):186-188.

[12] 李俊杰,葛德,孙文.基于结构健康监测系统的某办公建筑运营期结构响应分析[J].建筑结构,2023,53(21):107-111.
Li Junjie, Ge De, Sun Wen. Structural response analysis of an office building during operation based on structural health monitoring system[J]. Building Structure, 2023, 53(21): 107-111.

[13] 王霞,樊卓杨,吴超,等.双光纤温度补偿法测量高温下电缆与附件界面压力的方法[J].高电压技术,2023,49(7):3072-3081.
Wang Xia, Fan Zhuoyang, Wu Chao, et al. Double-optical-fibre temperature compensation method used for interface pressure measurement between cable and accessory at high temperatures [J]. High Voltage Engineering,2023,49(7):3072-3081.

[14] 李如仁,葛永权,李梦晨,等.基于 InSAR-COMSOL 的露天矿边坡稳定性分析及形变预测[J].金属矿山,2024(3):172-182.
Li Ruren, Ge Yongquan, Li Mengchen, et al. Stability analysis and deformation prediction of open-pit mine slopes based on InSAR and COMSOL[J]. Metal Mine,2024(3):172-182.

[15] 林正鸿,黄麟淇,李涵,等.基于超宽带非对称双边双程测距的矿山井下定位跟踪算法研究[J].黄金,2023,44(4):28-33.
Lin Zhenghong, Huang Linqi, Li Han, et al. Study of underground locating and tracking algorithm in mines based on ultra-band asymmetric bilateral two-way ranging[J]. Gold,2023,44(4):28-33.

[16] 陈延康,郭广礼,孟浩,等.陕蒙矿区深部开采导水裂隙带发育特征与高度预测方法[J].金属矿山,2024(4):186-192.
Chen Yankang, Guo Guangli, Meng Hao, et al. Study on the development characteristics and height prediction of water conducting fracture zones in the deep mining area of Shanxi-Mongolia[J]. Metal Mine,2024(4):186-192.

[17] 聂秀珍,焦迎雪,张霞.融合优化遗传算法和变步长蚁群算法的矿山巡检机器人路径规划[J].金属矿山,2023(7):248-253.
Nie Xiuzhen, Jiao Yingxue, Zhang Xia, et al. Path planning of mine inspection robot based on optimal genetic algorithm and variable step size ant colony algorithm[J]. Metal Mine, 2023(7):248-253.

[18] 黄鑫康,刘萍,芦庆和,等.基于改进麻雀搜索算法优化 SVR 和 FLAC3D 的开采地表沉降预测[J].矿业研究与开发,2023,43(10):110-118.
Huang Xinkang, Liu Ping, Lu Qinghe, et al. Prediction of mining surface subsidence by optimized SVR based on improved sparrow search algorithm and FLAC3D [J]. Mining Research and Development,2023,43(10):110-118.