

基于相位敏感型光时域反射仪的除尘器破袋检漏及定位技术

高岗^{1,2}, 李俊¹, 刘旭安^{1,2}, 史博^{1,2}, 汤玉泉¹, 庞涛¹, 郑青³, 孙礼明³, 董凤忠^{1,2}

¹中国科学院安徽光学精密机械研究所安徽省光子器件与材料重点实验室, 安徽 合肥 230031;

²中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026;

³合肥水泥研究设计院, 安徽 合肥 230051

摘要 针对水泥生产行业中袋式除尘器破袋检漏定位问题, 提出了基于分布式光纤振动传感的检漏定位方法。分布式光纤振动传感系统灵敏度高, 可以检测到布袋破损后粉尘气流对光纤产生的微振动信号, 以此判断布袋是否破损, 并通过时域差分法来定位破袋。搭建了一套相位敏感型光时域反射仪(φ -OTDR), 通过室内模拟得出该系统最大信噪比为 10 dB, 实际空间分辨率为 23.7 m, 同时验证了该系统能响应低频粉尘气流扰动信号。在现场平台实验基础上, 结合支持向量机(SVM)算法对现场测试数据进行识别分类, 平均破袋识别准确率可达 97.8%。结合 φ -OTDR 分布式系统与 SVM 算法可有效解决袋式除尘器破袋检漏定位问题。

关键词 光纤光学; 光纤传感; 破袋识别; 扰动检测; 支持向量机

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0706001

Bag Filter Leak Detection and Location Based on Phase-Sensitive Optical Time Domain Reflectometry

Gao Gang^{1,2}, Li Jun¹, Liu Xu'an^{1,2}, Shi Bo^{1,2}, Tang Yuquan¹,
Pang Tao¹, Zheng Qing³, Sun Liming³, Dong Fengzhong^{1,2}

¹Anhui Provincial Key Laboratory of Photonic Devices and Materials, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

²University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;

³Hefei Cement Research and Design Institute, Hefei, Anhui 230051, China

Abstract In order to solve the problem of bag filter leak detection and location in the industry of cement production industry, a method for detecting and locating the broken bag based on fiber-optic distributed vibration sensing is proposed. Weak vibration signal can be detected as soon as dust air flows into the broken bag because of the high sensitivity of the vibration sensing system, and thus whether the bag is broken can be judged. A simulation is carried out, and the weak leak signal caused by dust air can be identified in the low-frequency range. In the laboratory environment, the maximum signal-to-noise ratio of the built phase-sensitive optical time domain reflectometry (φ -OTDR) is calculated to be 10 dB and the real spatial resolution is 23.7 m. In field trial, the support vector machine (SVM) algorithm is applied to distinguishing the abnormal bag from the normal one. The average recognition accuracy rate is tested to be 97.8%. The combination of φ -OTDR and SVM is capable of detecting and locating bag filter leak effectively.

Key words fiber optics; fiber-optic sensing; broken bag recognition; intrusion detection; support vector machine

OCIS codes 060.2370; 070.5010; 290.1350

收稿日期: 2018-01-26; 收到修改稿日期: 2018-03-08

基金项目: 国家自然科学基金(41405034)、中国科学院科技服务网络计划(KFJ-STC-SCYD-123)、中国科学院对外合作重点项目(GJHZ1726)

作者简介: 高岗(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事分布式光纤振动传感方面的研究。E-mail: ggang1991@foxmail.com

导师简介: 董凤忠(1966—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事新的环境光学和光纤传感技术用于公共安全、工业过程控制、节能减排减灾等方面的研究。E-mail: fzdong@aiofm.cas.cn (通信联系人)

1 引 言

布袋除尘器是一种发展较为成熟的除尘设备,其主要功能是通过过滤材料分离空气中的颗粒粉尘。水泥生产行业的颗粒物排放量占全国颗粒物总排放量的 20%~30%,且随着近年来我国超低排放标准的逐步实施,研发先进且高效的除尘设备显得尤为重要。若布袋除尘器在运行过程中出现问题,必然导致处理的粉尘在还未达到排放标准前就排入大气中,从而严重污染大气环境。从布袋除尘器运行问题的统计中发现,运行问题一半以上都与布袋破损有关。

作为布袋除尘器的核心部件,布袋一旦发生破损,必然会有大量颗粒物粉尘未经过滤便直接从布袋除尘器中泄漏出来,加重了大气污染。所以,准确地检测出破损布袋并及时更换对保证布袋除尘器的高效稳定运行具有重要意义^[1]。

目前,除尘袋漏袋检测法主要有人工检漏法和间接检测法。人工检漏法是操作者直接进入布袋箱内用肉眼逐条查找有无破损布袋。该方法操作简单,但因一个布袋箱内一般分布有成百上千条布袋,查找工作量极大,且工作环境差。此外该方法还影响除尘器的正常运行,所以人工检漏法逐渐被其他方法取代^[2]。

间接检测法是通过测量布袋除尘器排放的粉尘浓度、烟气中电荷量变化或布袋内外压差的变化来判断是否有布袋破损,主要包括光散射法、浊度法、电荷感应法、压差法、示踪定位法等。目前已研制了多种破袋检漏仪,例如光电式布袋除尘器检漏仪、静电荷法布袋除尘器检漏仪、滤压式布袋除尘器检漏仪等^[3-6]。Mrc 等^[7]基于光浊度的原理研制了一种利用光通量的改变来检测布袋破损的布袋检漏装置, Hayes 等^[8]使用气体示踪剂跟踪布袋检测。

以上技术方法都存在不足和局限性,例如浊度法是在每个排风口安装浊度仪,通过测量空气粉尘浓度的高低来判断此排风口对应的一排布袋中是否有发生破损的布袋,此方法目前仍无法精确定位具体破损布袋。此外,传感器价格高,除尘器中布袋数量大,若在每个布袋口安装浊度仪,会造成系统成本过高。电荷感应法会因为不同粉尘中电荷性的差别较大而无法实现定量分析,造成误报或漏报。压差法与浊度法类似,要进行漏袋定位,需要在每个布袋上布设压力传感器,系统成本过高。荧光粉示踪法是在已经判定除尘器出现漏袋时使用荧光粉和紫外

荧光灯查找漏袋,不具有实时性,且荧光粉用量较大,检测成本高。

分布式光纤振动传感技术以其独有的优势为布袋除尘器检漏定位提供了新的思路。光纤既是传感器又是信号传输媒介,能抗强电磁干扰。光纤本身体积小、质量小、耐化学腐蚀、耐高温且形状可变,适合在布袋除尘器这种空间受限且粉尘污染物浓度极高的恶劣高温环境中使用。更为重要的是,光纤成本低,制备简单,可大规模敷设。

本文提出一种基于相位敏感型光时域反射仪(φ -OTDR)的布袋除尘器检漏定位技术,简述了 φ -OTDR 分布式传感器检漏及定位原理。基于光纤中瑞利散射效应的分布式光纤传感器对振动的灵敏度要优于一般的传感器^[9]。当布袋除尘器中出现破袋时,携带高浓度粉尘的空气流会对光纤形成入侵扰动。传感系统能感知入侵振动信号,并结合相应的模式识别算法处理信号数据,从而判别布袋是否破损。分布式光纤传感技术可以通过查看干扰源相对于光纤起始点的距离信息来定位具体的破损布袋。

2 原 理

2.1 φ -OTDR 分布式光纤传感基本原理

φ -OTDR 分布式光纤振动传感系统结构如图 1(a)所示。连续窄线宽激光器(NLL)输出的连续光波经声光调制器(AOM)调制成脉冲光,再通过掺铒光纤放大器(EDFA)放大脉冲功率,经环形器注入传感光纤中。脉冲光在沿光纤正向传播过程中,由于光纤中不均匀的介质分布,会产生后向瑞利散射光。后向瑞利散射光沿传感光纤逆向传播,经环形器后由光电探测器(APD)接收。利用数据采集卡(DAQ)采集探测器产生的电信号,再交由上位机进一步处理^[10-11]。

φ -OTDR 使用窄线宽激光器,在脉宽范围内后向瑞利散射光之间会发生干涉。当沿光纤链路上的某处受到外界入侵干扰时,对应位置处的光纤折射率就会发生变化,进而导致该位置处光相位发生变化。基于干涉产生的效果,相位的变化又会引起后向瑞利散射光光强变化,经探测器光电转化,将前后相邻时刻瑞利信号曲线进行差值运算,差分曲线上干涉光强信号发生变化的位置则对应扰动发生的位置。

根据上述原理,选用 NKT 公司窄线宽光纤连续激光器。激光器中心波长为 1550.12 nm,最大输出功率可达 40 mW。激光器线宽决定 φ -OTDR 瑞

利后向散射光的干涉效果,影响系统灵敏度。激光中心频率漂移导致的瑞利曲线畸变问题会严重恶化系统信噪比,降低系统定位精度。经测试,NKT激光器线宽为 100 Hz,1 s 积分时间内稳定度 Allan 方差为 1.25×10^{-10} ,10000 s 积分时间内稳定度为 1.02×10^{-8} ,在同类型商用窄线宽激光器中该激光器线宽较窄,频率漂移较低,能够保证系统测试结果的灵敏度和较高的信噪比。声光调制器与数据采集卡采用同一函数发生器(FG)进行触发调制。为提高检测信号频率响应范围,根据奈奎斯特采样定理,脉冲触发重复频率设置为 30 kHz。数据采集卡采样速率为 100 MHz。搭建完成的系统样机如图 1(b)所示。

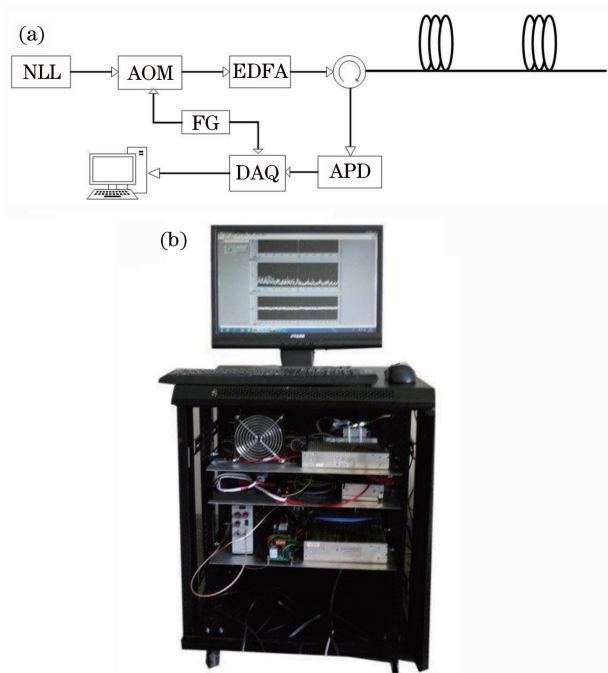


图 1 (a) φ -OTDR 系统结构原理;(b)系统样机

Fig. 1 (a) Schematic of φ -OTDR system;

(b) system prototype

2.2 袋式除尘器结构及检漏原理

如图 2 所示,粉尘气流从进风口进入袋式除尘器后,由导流管进入各单元室。大颗粒粉尘会在导流装置的作用下从气流中分离出来,直接落入灰斗,其余粉尘气流会均匀地进入各仓室中过滤。经过滤后的洁净气体透过布袋后,由上箱体提升阀输送,最后经排风口排出。随着过滤程序的进行,布袋表面会不断积累粉尘,当粉尘达到一定厚度时,清灰控制装置(定时或手动控制)会按预先设定的程序关闭提升阀,控制当前单元离线,并打开电磁脉冲阀喷吹,振落布袋表面的粉尘。落入灰斗中的粉尘经卸灰阀

排出后,通过输灰系统送出^[12]。

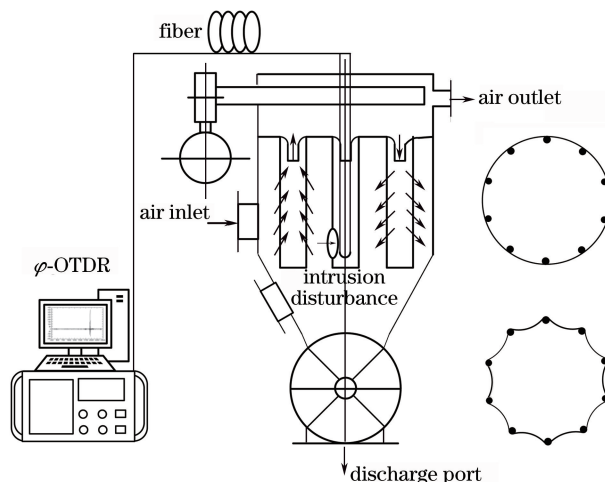


图 2 脉冲反吹式袋式除尘器工作原理示意图

Fig. 2 Schematic of back pulse-cleaned bag filters

由除尘器工作原理可知,除尘布袋未破损时,粉尘在除尘布袋内外气压差的作用下吸附在布袋表面,通过脉冲气阀喷气震落,而当除尘布袋出现破损时,粉尘气流会从破口处流进布袋内。在布袋内悬垂吊挂传感光纤,粉尘气流会对传感光纤形成入侵扰动。一个布袋除尘器中分布有数百条布袋,每一条布袋内布置数米光纤,可以通过事先的敲击扰动确定此条布袋内光纤位置距离起始点的距离范围,在此距离范围内选择一个点作为此条布袋的信号表征点。可通过表征点的单点时域振动信号以及傅里叶变换后的频率谱来提取此点的信号特征,并结合相关模式识别算法判断此点对应的布袋是否有破损。

3 模拟及结果分析

3.1 系统性能测试

为测试 φ -OTDR 系统的性能参数及对粉尘气流扰动的频率响应特性,在实验室内搭建模拟平台。在平台中安置 4 条除尘布袋,每条布袋长 1.5 m。距离光纤起始点的前两条布袋选用破损布袋,剩余两条布袋为正常布袋。每条布袋内悬垂吊挂 3 m 长光缆,前两条布袋间相距 20 m,后三条布袋间各相距 200 m。在前两条破损布袋正对破口处放置风扇施加风压以模拟粉尘气流,而在第三条正常布袋相同位置处同样放置风扇施加风压,平台结构如图 3 所示。传感光缆总长 3 km,通过 φ -OTDR 标定前两条布袋内光缆大约位于 1915 m 和 1935 m 处。

对第二条布袋,即 1935 m 处光缆施加风压,相邻 20 条瑞利信号曲线叠加效果如图 4(a)所示,振

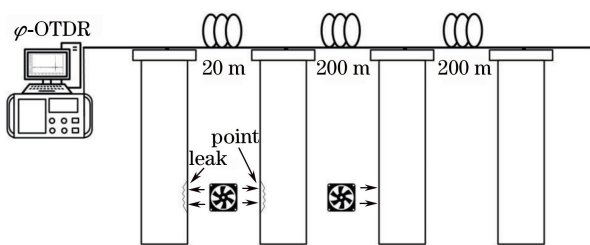


图 3 实验室中模拟平台结构

Fig. 3 Configuration of simulation platform in laboratory
 动区域光功率变化非常明显。对相邻时域瑞利曲线进行差分处理, 20 条时域差分曲线叠加结果如图 4(b) 所示, 可见在 1935 m 附近有明显的入侵发生。信噪比 (R_{SN}) 可以由扰动位置处信号幅值 (V_{signal}) 与最大噪声幅值 (V_{noise}) 来确定^[13]:

$$R_{SN} = 10 \lg \frac{V_{signal}}{V_{noise}}, \quad (1)$$

由(1)式计算得信噪比为 10 dB。定位精度指多次重复实验定位结果的一致度, 与脉冲宽度有关, 通常用标准差表征。图 4(c) 为连续 32 次的定位结果, 计算得标准差为 5.37 m。

空间分辨率是指 φ -OTDR 系统能够区分两个扰动事件之间的最小空间距离。空间分辨率 Δz 由注入传感光纤的激光脉冲宽度 T_p 决定^[14], 其关系式为

$$\Delta z = \frac{c T_p}{2n}, \quad (2)$$

式中: n 为光纤折射率; c 为真空中的光速。从(2)式可以看出, 空间分辨率由脉冲宽度决定, 为使 φ -OTDR 系统达到较高的定位精度, 需要有足够高的空间分辨率, 但过窄的脉宽会导致脉冲功率受限, 造成传感距离减小, 两者存在矛盾。常用除尘袋长为 3~10 m, 一条布袋最少敷设 6~20 m 长光纤, 在一台布袋除尘器中, 除尘袋有成百上千条, 数量众多的除尘布袋需要长距离的光纤敷设。为同时兼顾布袋除尘器中光纤长距离敷设与较高的空间定位需求, 脉冲宽度设置为 200 ns, 由(2)式可得理论空间分辨率为 20 m。在模拟实验中, 对两条相距约 20 m 的破损布袋各施加风压信号, 测得实际空间分辨率为 23.7 m, 如图 4(d) 所示。

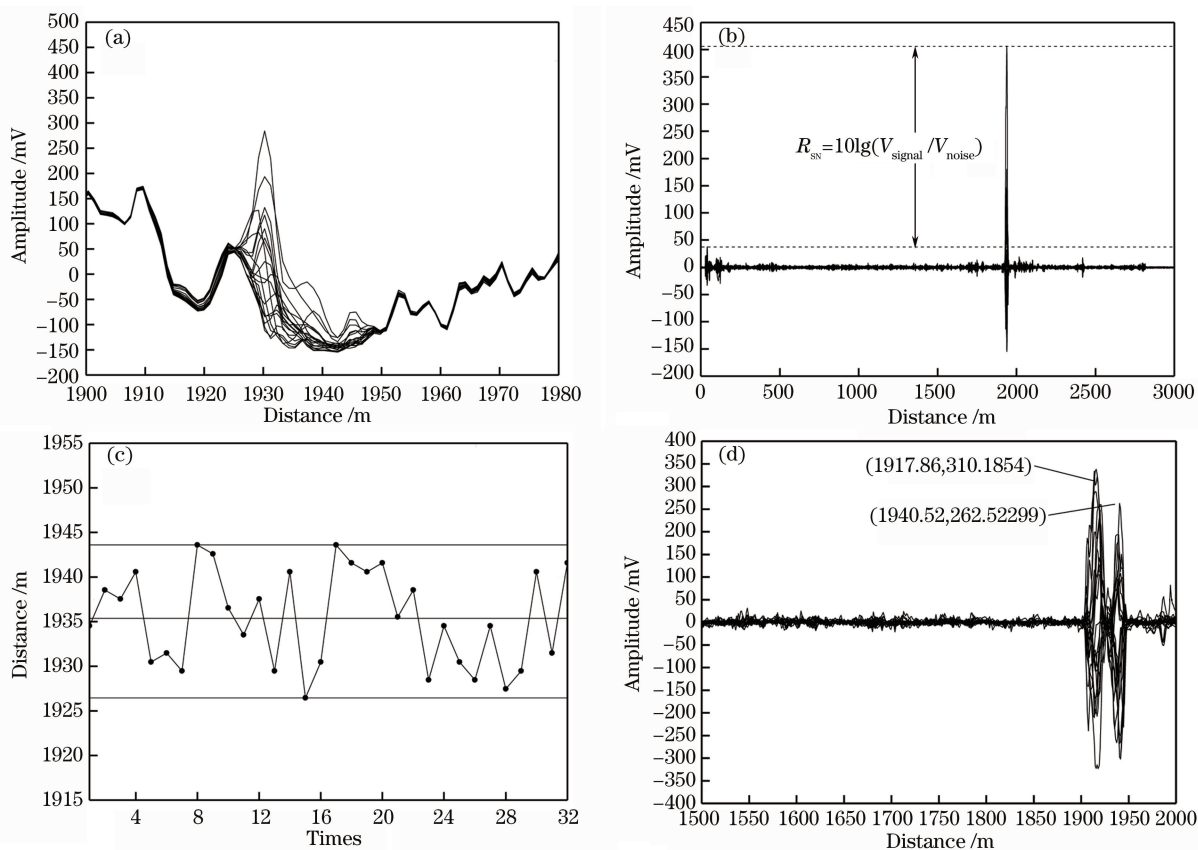


图 4 (a) 连续 20 条瑞利曲线叠加图; (b) 相邻时域差分叠加图; (c) 定位精度; (d) 空间分辨率

Fig. 4 (a) Superposition of 20 consecutive Rayleigh traces; (b) adjacent time-domain difference of the superposition; (c) positioning accuracy; (d) spatial resolution

3.2 振动频率响应

前文所述相邻时域差分法只能从空间域角度对瑞利散射曲线进行整体处理,监测扰动事件的发生并进行定位,但无法获知扰动事件的具体时域以及频域特征。同时光纤在布袋中扭转、弯曲造成双折射特性变化而导致系统存在偏振相关噪声,从差分信号上影响对多个扰动事件的判断,当有效信号和噪声信号同时施加于传感光纤时,此算法无法有效区分扰动事件,易产生误报。为了滤除外界干扰信号的影响并提取有效信号特征,需要对传感光纤扰动位置处的单点时域信号进行分析并通过相应的信号处理方法表征扰动事件的时频特征。本研究对一定时间内原始瑞利曲线作切片,提取差值曲线中尖峰位置处时域信号^[15]:

$$h(j, k) = \sum_{i=1}^M x_{ij} \delta(k - i), \quad (3)$$

式中: i 为采样的数据帧序号,对应不同时刻; j 为差值曲线中尖峰对应的采样位置点; x_{ij} 为在时刻 i 系统采集的空间位置点 j 处的数据; M 为每一数据段所包含的数据帧数; $\delta(k)$ 为单位序列, $k=1, 2, \dots, M$,

$$\delta(k - i) = \begin{cases} 1, & k = i \\ 0, & k \neq i \end{cases} \quad (4)$$

模拟中为了分析传感系统的频率响应特性,在第二条破损布袋即传感光纤 1935 m 处接触式放置一个振动音叉。此振动音叉用电压驱动,并以恒定的 100 Hz 频率振动。采集光缆 1935 m 处单点时域振动信号,每段数据帧数 M 为 1024。该处时域信号经傅里叶变换后的频谱图能直观地还原 100 Hz 振动信号,如图 5(a)所示。以等高线图表现连续 120 组频谱曲线,如图 5(b)所示, x 轴代表曲线标签, y 轴代表频率分量,颜色梯度代表对应的频率幅值。

对第二条布袋以及第三条布袋即 1935 m 和 2135 m 处光缆施加风压,第四条布袋即 2335 m 处光缆不施加风压,同时采集光缆 1935, 2135, 2335 m 三处振动时域信号。对三个光缆位置处各自连续 150 组数据作傅里叶变换,得到 450 组频谱曲线,以等高线图形式表现,如图 6 所示,其中 x 轴代表位置标签(1~150:1935 m; 151~300:2135 m; 301~450:2335 m)。

与 300~450 范围内没有风压扰动作用的 150 组频谱曲线相比,前 300 组频谱曲线存在 20 Hz 范围内的低频成分,可以确定 φ -OTDR 系统在低频段对风压扰动有响应;而对比 1~150 与 151~300 两处的频谱,破损布袋内传感光纤与正常布袋相对风

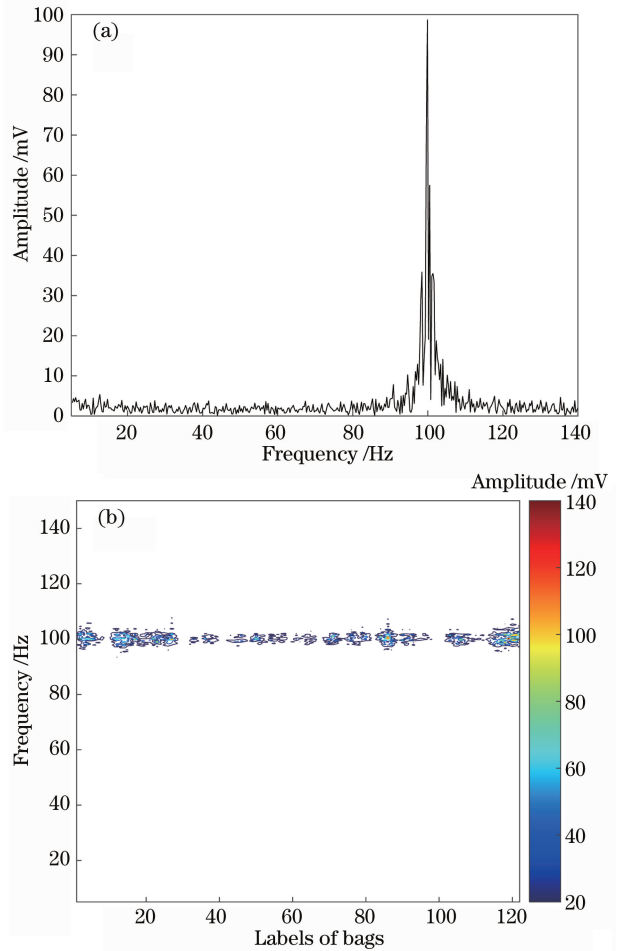


图 5 (a) 100 Hz 频率响应图; (b) 100 Hz 频率响应等高线图
Fig. 5 (a) Frequency spectrum at 100 Hz; (b) contour map of 100 Hz frequency response

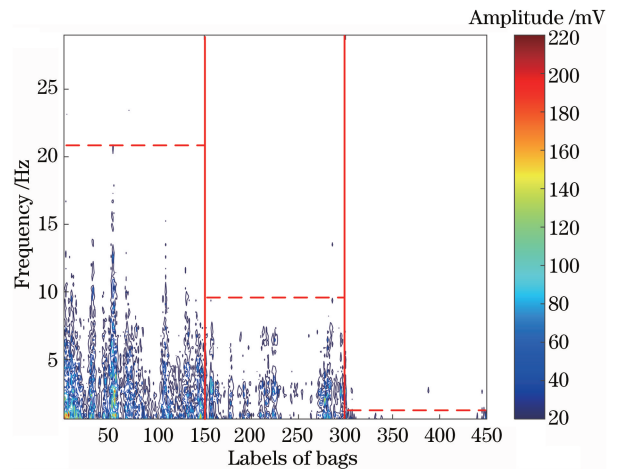


图 6 三条布袋频率响应等高线对比图
Fig. 6 Contrast diagram of the frequency response contour of three bags

压扰动有更宽的频带响应且响应段内幅值更高,可以认为正常布袋内传感光纤检测到的是布袋抖动噪声。模拟验证了 φ -OTDR 系统对微弱气流扰动的低

频响应特征,表明现场平台实际测试具备可行性。

4 基于支持向量机的现场信号识别分类

4.1 支持向量机原理

为了在破损布袋的特征信号基础上尽可能消除各种噪声等误判因素干扰,优化破损布袋与正常布袋的识别结果,选择支持向量机(SVM)算法区分识别两类布袋。SVM算法是针对有限样本,根据结构风险最小化原则设计的一种统计学习理论。对于给定的训练数据集 $\{x_i, y_i\}_{i=1}^N$,其中 x_i 为输入模式的第 i 个样本, $y_i \in \{-1, +1\}$,若训练样本线性可分,分类的目的就是寻求最优超平面作为决策曲面,使得正例和反例之间的隔离边缘最大化。在线性不可分的情况下,SVM将低维空间中无法线性分类的样本 x_i ,通过选择合适的核函数 $K(x_i, x)$ 映射到高维空间中转化为线性问题分类,此时分类决策函数为

$$f(x) = \text{sgn} \left[\sum_{i=1}^N a_i^* y_i K(x_i, x) + b^* \right], \quad (5)$$

式中: a_i^* 和 b^* 分别为最优的拉格朗日系数和阈值。根据分类决策函数 $f(x)$ 的正负即可判别测试样本 x 所属的类别^[16-17]。

本研究基于 Matlab 的 Libsvm-mat 工具箱对 SVM 模型进行训练,并基于训练得到的模型测试样本分类结果。Libsvm 工具箱对使用的数据有严格要求,在对数据进行训练之前先按规定格式对数据进行转化。针对破袋检测技术,只需区别布袋有无破损两类,所以本研究中 SVM 算法只需应用于二分类情况。 φ -OTDR 所测得的时域振动信号不能直接用于 SVM 算法建模,要对信号进行处理并提取数字特征,将这些特征作为分类器的输入量,从而达到分类目的。选取 800 组数据,其中 300 组数据作为训练集,另外 500 组作为测试集。将每一组数据指定的特征值以及对应的分类数据按照指定的格式保存。SVM 分类的具体步骤如下^[18]:

1)对数据进行归一化处理;

2)选取径向基函数(RBF)作为核函数,使之将低维空间非线性不可分样本映射到高维空间实现线性分类,求取最优超平面;

3)对于惩罚因子 c 以及核函数参数 g ,使用交叉验证法求取最佳 c/g 参数,即将 300 份测试集数据均分成 5 份,4 份作为训练集,剩下 1 份作为测试集,通过循环测试,得到最佳的 c/g 参数;

4)用得到的最佳 c/g 参数,以 svmtrain 函数指

令对训练集数据进行模型训练,得到分类器模型;

5)依据得到的模型,通过 svmpredict 指令对剩下的 500 份测试集样本进行测试。

4.2 现场实验

现场实验在合肥水泥研究设计院下属中亚环保科技有限公司大气环保除尘实验平台上进行。现场实验平台属于脉冲反吹式布袋除尘器,如图 7(a)所示。将搭建的传感系统应用于实验平台,光缆以图 7(b)所示方式敷设于除尘器内。光缆总长 3 km,实验平台中每条布袋长约 3 m,在每条除尘布袋内将 5~6 m 长的光缆对折绕卷并悬垂吊挂。为满足系统 20 m 的空间分辨率,每两条布袋间留长约 20 m 的光缆以区分相邻两布袋。因实验属于验证性实验,光纤只铺满一个除尘仓室中一个除尘单元,共 16 条布袋,首端光纤引出仓室接入 φ -OTDR 系统。

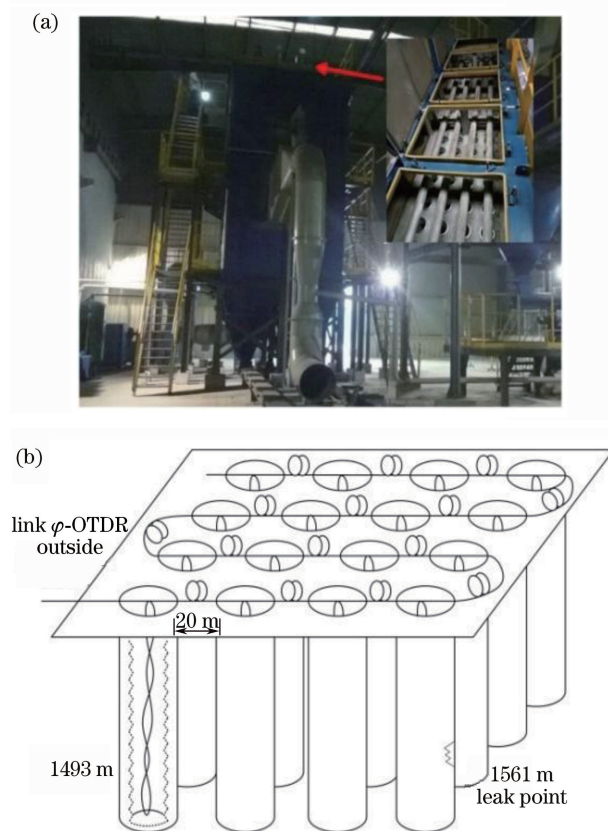


图 7 (a)实验现场图;(b)现场实验光纤敷设示意图

Fig. 7 (a) Experimental scene; (b) schematic of on-site optical fiber laying

φ -OTDR 系统属于分布式传感系统,可以监测传感光缆范围内任意一点的振动信号。但针对实验需求,选定一条布袋内 6 m 长光缆范围内一个点作为本布袋的信号表征点。光缆敷设完成后可以通过敲击来确定本布袋内光缆距离首端的距离,选取

1493 m 及 1561 m 处作为振动时域信号采样点,以便完成后续处理。

实验中,假设除尘器中没有布袋破损,光纤的不规则弯曲和扭转引入的偏振相关噪声、工况环境下的强机械噪声等内外因素都可能导致系统在传感光纤不同位置点处所采集到的信号存在本身固有的特征差异,进而导致实验结果的误判。为了尽可能消除误判因素的干扰,选取两种方式对比破损布袋与正常布袋内的时频域振动信号:1)对比布袋破损前后振动信号时频域差异(方式一),在此方式下将特定位置处(1561 m)光缆先后放置于正常布袋与破损布袋内,并分别采集此位置处时域振动信号;2)对比同时刻下正常布袋与破损布袋内振动时域信号差异(方式二),在此方式下同时采集正常布袋内光缆位置(1493 m)以及破损布袋内光缆位置(1561 m)的单点时域振动信号。

4.3 实验结果与分析

单点时域信号以 350 Hz 的采样率连续存储,在数据处理时,每数据段内帧数 M 设为 1024。分别取两种方式下正常布袋与破损布袋各 500 组数据进行傅里叶变换,从幅值-频率谱上分析正常布袋和破损布袋的幅频特性。图 8 为由连续 1000 组频谱曲线所得等高线图,因零频量即直流量幅值与其他频率成分相比幅值过高,故不在等高图中体现。图 8(a)和(b)为光缆 1561 m 处两布袋频谱对比,在 10~40 Hz 频率范围内正常布袋的幅值高于破损布袋,而在 80~160 Hz 频率范围内破损布袋幅值高于正常布袋。图 8(c)和(d)为位于正常布袋内的光缆 1493 m 处与位于破损布袋内光缆 1561 m 处的频谱对比,在 15 Hz 频率范围内破损布袋幅值明显高于正常布袋,而在 90~140 Hz 频率范围内正常布袋幅值高于破损布袋。

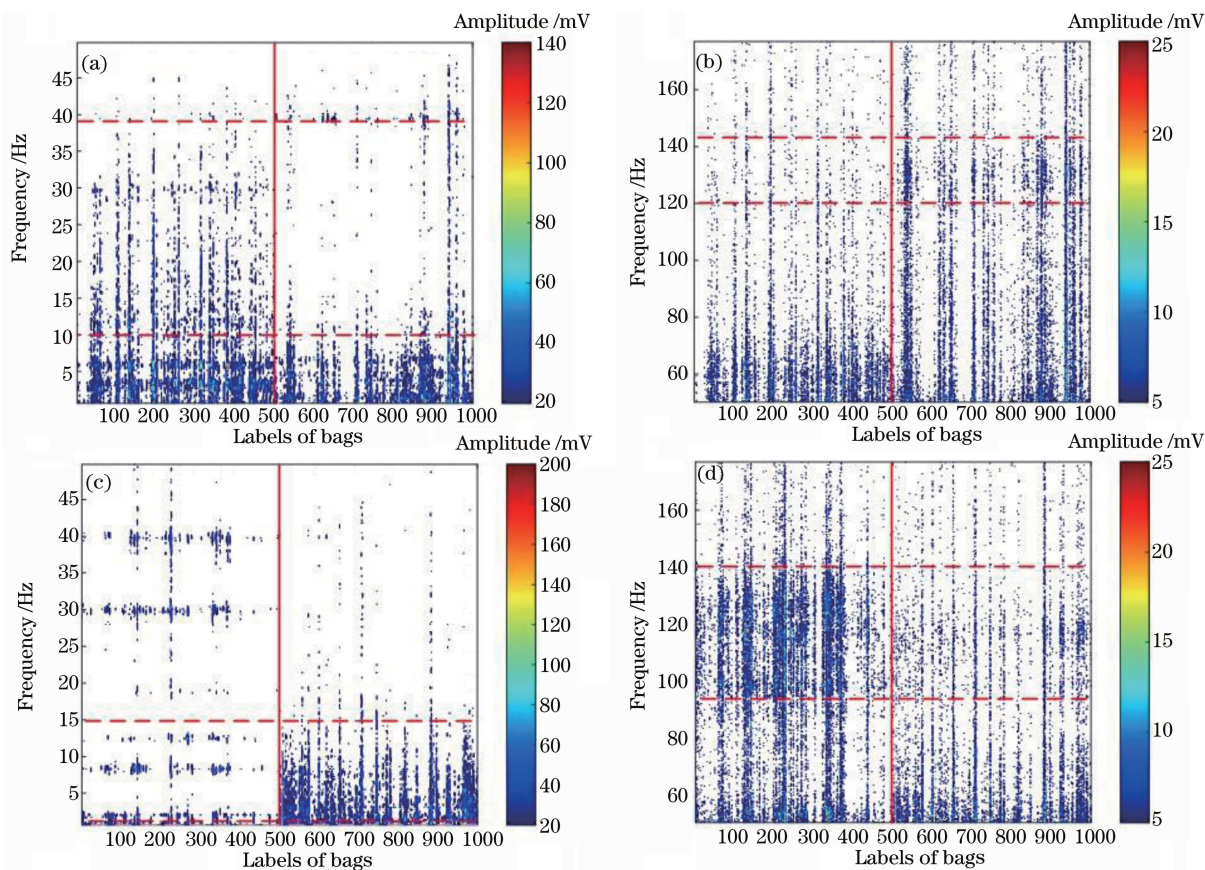


图 8 正常布袋(1~500)与破损布袋(500~1000)的幅频特性。(a)(b) 1561 m 处频谱对比; (c)(d) 1493 m 与 1561 m 两处频谱对比
Fig. 8 Amplitude-frequency characteristics of normal bags (1-500) and broken bags (500-1000).

(a)(b) Frequency spectra contract at 1561 m location; (c)(d) frequency spectra contract at 1493 m and 1561 m locations

基于以上不同频段的差异性,进行 SVM 算法建模时提出了一种频谱分段特征提取法,将频谱分为 1~10,15~40,95~135 Hz 三段,然后求三段频谱幅值的均值和方差。均值可以反映同组数据的一

般情况和平均程度,还可用于不同组数据间的对比;方差可以反映一组样本的波动情况和离散程度。确定数据样本特征后,依据前文步骤 1)~4)建立分类器模型。通过交叉验证提取最优二维特征,可视化

模型以等高线图形式表现,如图 9 所示,“+”代表正常袋的特征标示,“*”代表破损布袋的特征标示,“o”是支持向量。

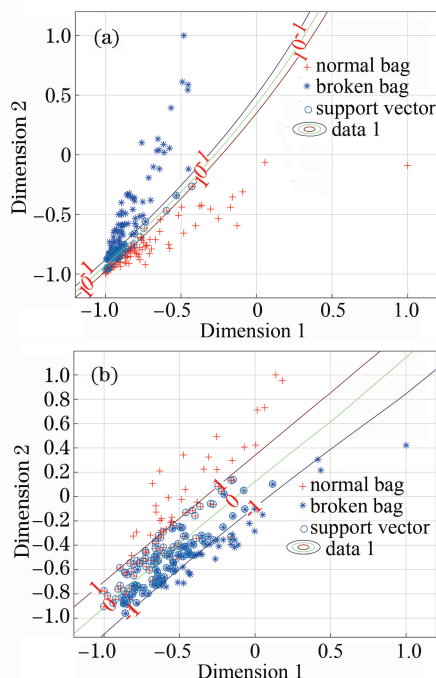


图 9 (a) 1561 m 位置处分类结果可视化模型; (b) 1493 m 与 1561 m 两处分类结果可视化模型
Fig. 9 (a) Visual model of classification at 1561 m location; (b) visual model of classification at 1493 m and 1561 m locations

如前文所述,将两种方式下各自采集的 500 组测试集数据均分成 5 组,依次导入已建立的模型中进行测试,测试结果如表 1 和表 2 所示。采用方式一可得两种状态布袋的平均识别准确率达 93.8%;采用方式二数据时正常布袋内即光缆 1493 m 处与破损布袋内即光缆 1561 m 处信号识别准确率达 97.8%。由测试结果可见,基于 SVM 算法对布袋破损前后的状态变化以及同时刻破损布袋与正常布袋的状态差异都有较高的识别准确率,且依方式二所得数据的平均识别准确率略高于方式一。

表 1 同一位置(1561 m)处两种布袋分类结果

Table 1 Classification results of two different kinds of bags at the same place of 1561 m

Serial no.	Amount	Accurate amount	Accuracy rate /%	Average accuracy rate /%
1	100	94	94	93.8
2	100	91	91	
3	100	96	96	
4	100	97	97	
5	100	91	91	

表 2 同时刻两种布袋分类结果

Table 2 Classification results of two different kinds of bags at the same time

Serial no.	Amount	Accurate amount	Accuracy rate /%	Average accuracy rate /%
1	100	97	97	97.8
2	100	100	100	
3	100	98	98	
4	100	97	97	
5	100	97	97	

5 结 论

针对袋式除尘器破袋检漏定位技术,提出了基于分布式光纤振动传感的方法,解决了破损布袋的检测及定位问题。基于光纤的瑞利散射效应搭建了 φ -OTDR 分布式光纤振动传感系统,结合傅里叶变换方法和 SVM 算法对正常布袋和破损布袋进行分类识别。现场实验中,光缆同一位置处与不同位置处分别置于正常布袋以及破损布袋内的平均识别率分别为 93.8% 和 97.8%,识别准确率较高。在识别布袋破损状态的同时,通过计算扰动信号点与光纤起始点的距离可以定位破损布袋。实验结果表明基于 φ -OTDR 系统与 SVM 算法相结合的方法可以解决袋式除尘器检漏及定位问题,为后续实时在线检测奠定了基础。

参 考 文 献

- [1] He Y T. Technology of bag-house with leak detection by capacitive sensor[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2012: 1-6.
贺艳婷. 电容传感式布袋除尘器检漏技术研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2012: 1-6.
- [2] Yu X M, Wu X J, Lü X C. The present situation and prospects of monitoring and locating leakage in bag filters[J]. Industrial Safety & Dust Control, 2005, 31(5): 13-14.
余新明, 吴学军, 吕先昌. 布袋收尘穿漏监测及定位技术现状与展望[J]. 工业安全与环保, 2005, 31(5): 13-14.
- [3] Wang S M, Xu Y Q, Lu Y, et al. On-line monitoring particulate mass concentration emitted by coal fired boiler[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 1997, 3(1): 58-62.
王式民, 徐益谦, 陆勇, 等. 燃煤锅炉排烟粉尘浓度在线检测研究[J]. 燃烧科学与技术, 1997, 3(1): 58-62.
- [4] Xie Z Y. Electrostatic charge law fibaric bag dust

- exclusion leak hunting instrument development [J]. Control & Automation, 2005, 21(24): 153-154.
- 谢志英. 静电荷法布袋除尘检漏仪的研制 [J]. 微计算机信息, 2005, 21(24): 153-154.
- [5] Pan W G, Wang Q J, Cao J M, *et al.* Study on measurement of the coal powder concentration in pneumatic pipes of boiler with velocity-pressure difference method [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 1999, 20(5): 461-463.
- 潘卫国, 王启杰, 曹绛敏, 等. 用速度-差压法对送粉管道煤粉浓度测量模型的研究 [J]. 仪器仪表学报, 1999, 20(5): 461-463.
- [6] Zhang J. Application of fluorescent powder leak detection technology in bag filter [J]. Journal of Electric Power, 2013, 28(3): 259-262.
- 张瑾. 荧光粉检漏技术在布袋除尘器上的应用 [J]. 电力学报, 2013, 28(3): 259-262.
- [7] Mrc P, Gernot P, Ulrich V. Remote leak detection sensing method and device: US5572327 [P]. 1996-11-05.
- [8] Hayes J R, Cabot C. Bag filter leak detection: US3960001(A) [P]. 1976-06-01.
- [9] Zhang X P, Zhang Y X, Wang F, *et al.* Ultra-long fully distributed optical fiber sensor based on Rayleigh scattering effect [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(7): 0700002.
- 张旭莘, 张益昕, 王峰, 等. 基于瑞利散射的超长距离分布式光纤传感技术 [J]. 中国激光, 2016, 43(7): 0700002.
- [10] Xie K L, Rao Y J, Ran Z L. Distributed optical fiber sensing system based on Rayleigh scattering light φ -OTDR using single-mode fiber laser with high power and narrow linewidth [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(3): 569-572.
- 谢孔利, 饶云江, 冉曾令. 基于大功率超窄线宽单模光纤激光器的 φ -光时域反射计光纤分布式传感系统 [J]. 光学学报, 2008, 28(3): 569-572.
- [11] Feng K B, Song M P, Xia Q L, *et al.* High-resolution distributed optical-fiber sensing technology based on direct-detecting coherent optical time-domain reflectometer [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(1): 0106002.
- 冯凯滨, 宋牟平, 夏俏兰, 等. 基于直接检测相干光时域反射计的高分辨率分布式光纤传感技术 [J]. 光学学报, 2016, 36(1): 0106002.
- [12] Wang H H, Zhang B. Technology of fabric filter and its application [J]. Jilin Electric Power, 2004, 25(5): 14-17.
- 王鸿合, 张斌. 布袋除尘器技术及其应用 [J]. 吉林电力, 2004, 25(5): 14-17.
- [13] Chen L, Zhu T, Bao X Y, *et al.* Distributed vibration sensor based on coherent detection of phase-OTDR [J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(22): 3243-3249.
- [14] Gao J, Jiang Z, Zhao Y, *et al.* Full distributed fiber optical sensor for intrusion detection in application to buried pipelines [J]. Chinese Optics Letters, 2005, 3(11): 633-635.
- [15] An Y. Two-beam φ -OTDR distributed fiber sensing technology and application [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014: 38-40.
- 安阳. 双光束 φ -OTDR 分布式光纤传感技术与应用 [D]. 天津: 天津大学, 2014: 38-40.
- [16] Chang C C, Lin C J. LIBSVM: a library for support vector machines [J]. ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology, 2011, 2(3): 27.
- [17] Hsu C W, Chang C C, Lin C J. A practical guide to support vector classification [Z/OL]. [2018-01-03]. <https://pdfs.semanticscholar.org/7823/81def9a727e050802d640308026ba073aafc.pdf>.
- [18] Zhang J N, Lou S Q, Liang S. Study of pattern recognition based on SVM algorithm for φ -OTDR distributed optical fiber disturbance sensing system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(4): 0422003.
- 张俊楠, 娄淑琴, 梁生. 基于 SVM 算法的 φ -OTDR 分布式光纤扰动传感系统模式识别研究 [J]. 红外与激光工程, 2017, 46(4): 0422003.