

## 激光与光电子学进展

## 基于分布式光纤声波传感器的带式输送机托辊故障监测方法

梁堃<sup>1,2</sup>, 王驰<sup>1\*</sup><sup>1</sup>上海大学精密机械工程系, 上海 200444;<sup>2</sup>上海拜安传感技术有限公司, 上海 201210

**摘要** 研究了一种基于分布式光纤声波传感器(DAS)的托辊监测方法,用于带式输送机托辊故障识别。在论述利用 DAS 检测托辊故障振动特征信号原理的基础上,搭建胶带长度为 30 m 的带式输送机测试系统平台,模拟托辊卡死、无轴承、断裂等不同故障情况进行实验测试数据采集。通过对采集的声音信号进行时域和频域分析,提取不同故障下的特征量,实现托辊的故障识别。实验结果表明,利用 DAS 技术可以检测带式输送机托辊故障振动特性监测,在工业带式输送机托辊故障监测方面具有应用前景。

**关键词** 仪器,测量与计量;分布式光纤声波传感器;带式输送机;托辊;故障监测

中图分类号 TN247 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP221259

## Roller Fault Monitoring of Belt Conveyor Using Distributed Fiber-Optic Acoustic Sensor

Liang Kun<sup>1,2</sup>, Wang Chi<sup>1\*</sup><sup>1</sup>Department of Precision Mechanical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China;<sup>2</sup>Shanghai Baiantek Sensing Technology Co., Ltd., Shanghai 201210, China

**Abstract** A roller monitoring method based on a distributed fiber-optic acoustic sensor (DAS) is investigated to identify roller faults in a belt conveyor. Based on the principle of using a DAS to detect the fault vibration characteristic signal of an idler, a belt conveyor test system with a belt length of 30 m is constructed to simulate different fault conditions, such as idler jamming, no bearing, and fracture for experimental data collection. By analyzing the collected sound signals in the time and frequency domains, the characteristic quantities under different faults are extracted to identify the faults in the idler. The experimental results show that the DAS can detect the fault vibration characteristics of the belt conveyor idler and has application prospect in the fault monitoring of industrial belt conveyor idler.

**Key words** instrument, measurement, and metrology; distributed fiber-optic acoustic sensor; belt conveyor; roller; fault monitoring

## 1 引言

带式输送机俗称皮带机,是煤矿、钢厂、港口等企业运输物料的主要设备,具有运输量大、输送距离长、输送范围广、运行费用低等优点。带式输送机中,托辊是拖曳传送带、实现物料传送的核心部件<sup>[1]</sup>。托辊在长期运行后,容易发生卡死、变形、断裂等故障<sup>[2]</sup>,继而引起带式输送机损坏甚至起火事故<sup>[3]</sup>。目前托辊故障检测主要采用人工徒步巡检的方式,现场运维工作

量大、检测难度高。因此,针对托辊运行状况进行实时监测技术就显得尤为重要<sup>[4-5]</sup>。

基于振动的故障分析方法已经被广泛应用于工业领域中<sup>[6]</sup>。其中,苗长云等<sup>[7]</sup>设计了一款采用树莓派 3B 开发板的设计带式输送机声音采集系统,通过提取特征向量对输送带纵向撕裂进行检测。郝洪涛等<sup>[8]</sup>选用 LM386 声音传感器模块设计了一款采用声音时频域信号分析技术实现托辊故障诊断的系统,该系统对基于振动信号分析的旋转机械故障诊断有效。但是传

收稿日期: 2022-04-11; 修回日期: 2022-05-17; 录用日期: 2022-05-27; 网络首发日期: 2022-06-06

通信作者: \*wangchi@shu.edu.cn

统的声音传感器不仅需要带电工作,而且容易损坏。光纤传感技术因其无需现场供电、抗电磁干扰能力强、耐腐蚀性能好、灵敏度高、可长距离连续感知等特点,非常适合于带式输送机在湿度大、空气杂质含量高、腐蚀性气体含量高的工作环境中应用<sup>[9]</sup>。陈勇等<sup>[10]</sup>利用光纤光栅传感技术对滚动轴承进行了故障诊断。郭清华<sup>[11]</sup>通过分布式光纤测温技术对带式输送机托辊故障进行了识别算法研究。

本文研究了一种基于分布式光纤声波传感器(DAS)的带式输送机故障识别方法。该技术将光纤视为声波传感器,通过将光纤连续紧密布设在带式输送机附近,沿着光纤长度方向捕捉声能,实现振动信号的快速感知<sup>[11]</sup>。该方法可用于采集带式输送机的声波

实时数据,并可进一步通过时频域分析实现托辊的在线监测和故障诊断。

## 2 基于 DAS 系统的托辊监测方法

基于相干光时域反射(C-OTDR)技术的 DAS 系统是一种实现声波连续、分布式探测的新型传感系统<sup>[12]</sup>。如图 1 所示,DAS 利用信号光和本征光自外差产生的差频信号进行探测,可以探测音频范围内的声音或振动信号<sup>[13]</sup>,还可以通过线性定量测量值来获取声音或振动的事件相位和频率信息。托辊出现故障会产生振动,声波传到待测光缆上,导致光纤发生轴向和径向的应变;光纤的折射率由于弹光效应的影响产生相应的变化,光纤的瑞利散射光的相位也发生变化。

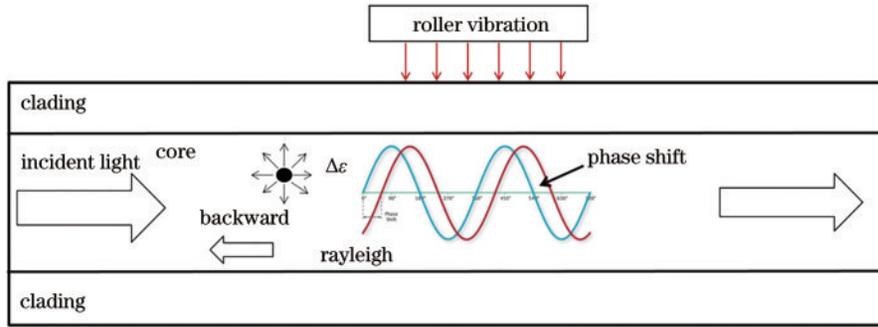


图 1 光纤中瑞利散射过程

Fig. 1 Rayleigh scattering process in fiber

外界扰动的变化与瑞利散射光的相位变化成正比。当光纤发生大小为  $\epsilon$  的应变时,光纤上相距为  $l$  的两点光纤相位差变化  $\Delta\theta$  为

$$\Delta\theta = 2(1 + \gamma)\beta \cdot l \cdot \epsilon, \quad (1)$$

式中: $\gamma$ 为有效弹光系数; $\beta$ 为传播常量。根据式(1)可知,DAS系统可以通过相位解调的方式提取得到 $\Delta\theta$ 的有关信息,从而定量地还原外界声波或振动的情况,为消除后向瑞利散射信号中的相干衰落噪声,利用旋

转矢量相加的办法消除衰落噪声的影响<sup>[14]</sup>。

本文设计如图 2 所示的 DAS 系统,其工作过程为:窄线宽光源<sup>[15]</sup>发出的连续光被耦合器分为探测光和本地光,其中探测光经过声光调制器(AOM)转化成光脉冲信号,再通过掺铒光纤放大器(EDFA)和隔离器注入探测光纤。探测光纤通过扎带固定在皮带机托辊下侧,利用后向瑞利散射感知皮带机托辊的振动。探测光在待测光纤中传输产生的后向瑞利散射信号通

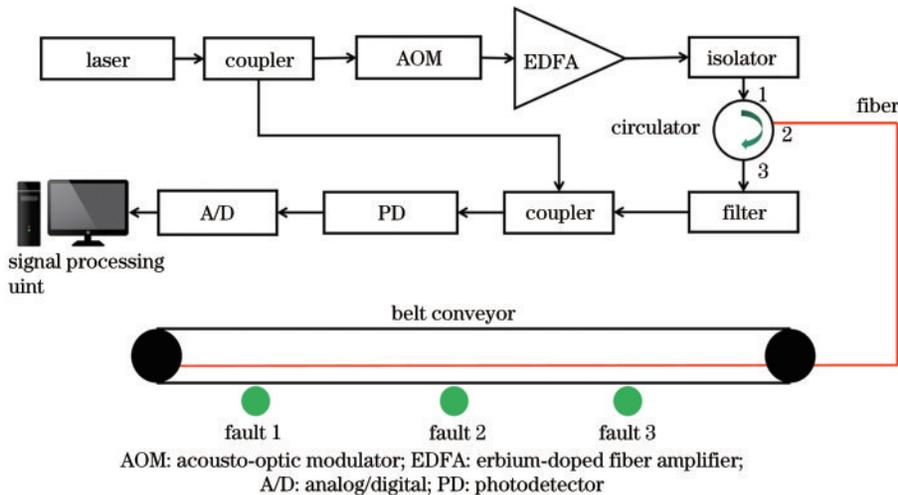


图 2 DAS 系统结构

Fig. 2 Configuration of DAS system

过耦合器与本地光发生拍频,然后由光电探测器(PD)将光信号转成电信号,再通过模拟/数字(A/D)转换器将电信号进行模数转换,并传给信号处理单元,最终得到光纤上各处瑞利散射光相位的变化信息。信号处理单元对采集到的瑞利散射光进行分析,对信号进行预处理后再进行时域、频域分析,根据分析结果判断干扰类型<sup>[16]</sup>。

带式输送机托辊出现故障时,转动过程中相互接触的原件表面损伤点处连续冲击产生振动,这种振动冲击通常是周期性的。托辊的故障频率是指损伤带来的冲击重复频率,诊断托辊故障的关键是找到冲击的重复频率。托辊轴承损伤的类型、程度不同,故障频率会存在差别,需要对不同类型的故障进行模拟测试分析,找出其特征声音信号。



图 3 待测的带式输送机系统。(a) 30 m 的带式输送机测试系统;(b) 托辊结构

Fig. 3 Belt conveyor system to be tested. (a) 30 m belt conveyor test system; (b) idler structure

光缆沿着外侧托辊下方固定如图 4 所示,将光缆绑扎固定在带式输送机托辊的内侧,选取的光缆型号为 GYTS 4B-1 型铠装光缆。布置方式如图 4 所示。

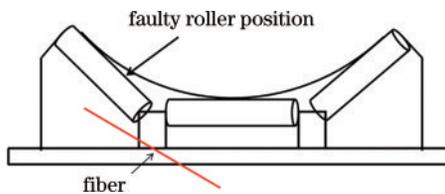


图 4 带式输送机中光缆安装位置示意图

Fig. 4 Location of optical cable installation in belt conveyor

系统主要部件包括窄线宽激光器(型号:上海拜安 OS814A),该窄线宽激光器中心波长为 1550.136 nm,频率漂移小于 1 MHz/min,线宽为 4.9 kHz,输出功率为 25 mW,经调制后脉宽为 100 ns,重复频率为 2 kHz。高速数据采集卡(型号:上海拜安 SADC\_REVE)的采样率为 250 MSa/s。PD(型号:联河光子 BPD)平衡光探测器的响应波长范围为 800~1700 nm,探测带宽为 800 MHz。A/D 采样率为 14 bit/(MSa·s<sup>-1</sup>)<sup>[17]</sup>。

### 3 带式输送机故障模拟测量实验

本次实验是在某带式输送机生产厂家内的一条 30 m 长的试验机上完成的,带式输送机以 2 m/s 的速度不放货物空载运行。测试的带式输送机系统和托辊如图 3 所示。

本次实验分别模拟托辊轴承卡死、托辊无轴承、托辊断裂等 3 种故障并与正常托辊进行对比。传统人工巡检的方式是有经验的工人通过不同的声音凭经验判断故障类型,由此可知带式输送机正常运行和产生故障的声音频率在人耳能听到的范围内,即 20 Hz~20 kHz。由于技术上百米距离 DAS 系统仍难以实现超声频率范围的采样,所以本实验传感距离设为 100 m,DAS 设定的振动信号采样率为 8 kHz。DAS 设定的空间取样点为 1 m,即每隔 1 m 采集一个样点,每 5 s 保存一组数据,获得 100×40000 的数列<sup>[18]</sup>。如图 6 所示,正常托

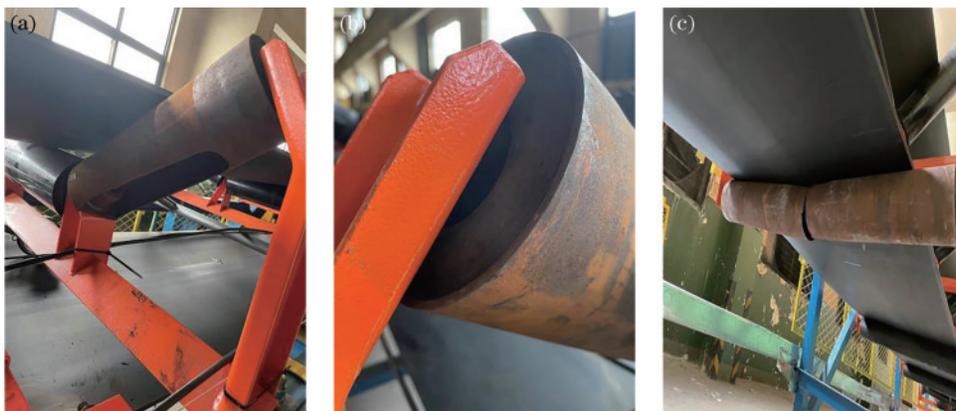


图 5 托辊模拟故障。(a) 托辊卡死;(b) 托辊无轴承;(c) 托辊断裂

Fig. 5 Idler simulation faults. (a) Stuck; (b) no bearing; (c) fracture

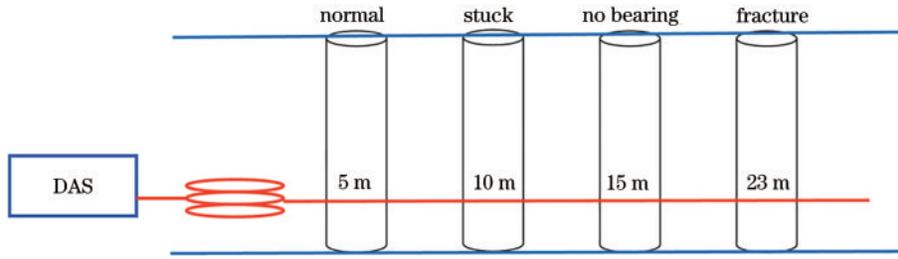


图 6 光缆与带式输送机故障点对应关系俯视图

Fig. 6 Top view of corresponding relationship between optical cable and belt conveyor fault point

辊、托辊卡死、托辊无轴承、托辊断裂这 4 种情况分别对应光缆的距离为 5、10、15、23 m。

#### 4 DAS 信号处理方法

如图 7 所示的分析流程, 本文对 DAS 系统采集到

的原始信号先做数据预处理, 对处理后的数据进行时域、时频域分析。通过时域信号判断故障位置, 时频域信号可以对不同的故障进行区分和识别, 判断托辊故障类型。

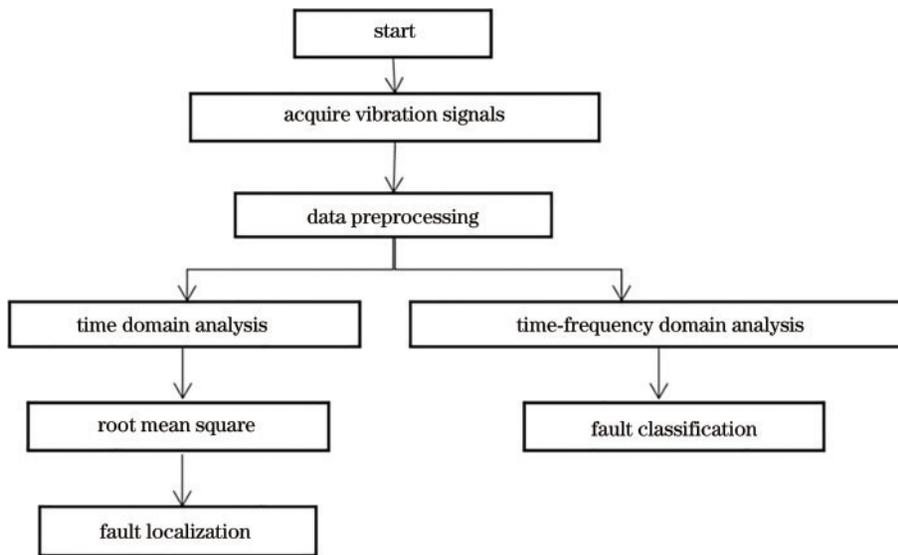


图 7 数据分析方法流程框图

Fig. 7 Flow chart of data analysis method

##### 4.1 DAS 信号的预处理方法

对采集到的原始信号进行数据预处理, 数据预处理包括两个过程: 数据归一化<sup>[19]</sup>和加窗分帧。

1) 数据归一化步骤

求数据均值  $m_x$ :

$$m_x = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \quad (2)$$

所有数据进行去均值处理:

$$x(n) = x(n) - m_x \quad (3)$$

找出去均值数据的最大值  $|x(n)|_{\max}$ , 并对所有数据进行归一化处理, 得到:

$$x(n) = \frac{x(n)}{|x(n)|_{\max}}, \quad (n = 0, 1, \dots, N-1), \quad (4)$$

式中:  $x(n)$  表示原始数列;  $|x(n)|_{\max}$  表示原始数列最大值的绝对值。本文后续分析的信号数据均为归一化处理后的数据。

2) 加窗分帧处理

加窗分帧是将 DAS 系统采集到的信号  $x(i)$  和窗函数  $w(i)$  相乘加权。窗函数的帧长不变, 不断移动, 得到加窗分帧信号  $y_n(i)$ , 表示为

$$y_n(i) = x[(n-1)*N + 1 + i] * w(i), \quad (5)$$

式中:  $y_n(i)$  为第  $n$  帧的第  $i$  个元素的值;  $n$  为当前数据帧索引;  $i$  为数据帧内元素索引, 其范围为 1 到  $N$ ;  $N$  为窗长。

本文选取 Hamming 窗对信号进行分帧。Hamming 窗属于余弦窗, 在处理主瓣和旁瓣大小时较均衡, 在保证信号幅值准确度的同时, 又减少了频谱泄露, 还有一定的频率分辨能力。Hamming 窗的数学表达式为

$$w(i) = \begin{cases} 0.54 - 0.46 \cos\left(\frac{2\pi i}{N-1}\right) & 1 \leq i \leq N \\ 0 & \text{other} \end{cases} \quad (6)$$

## 4.2 信号的时域分析方法

时域分析是观察时间历程信号,计算出信号的基本参数,如振幅、周期、相位等。托辊在运行状况正常的情况下,一般只受到带式输送机自身振动和噪声的影响,信号长时间处于平稳的状态。当托辊出现故障后,信号的振幅会发生较大的变化。

在不同的故障类型下托辊产生的振动信号幅值不同,理论上可以通过设置振幅阈值的方法来判断托辊是否存在故障。然而 DAS 系统直接采集到的信号是一个非稳态时变信号,其信号受外界和自身系统噪声的干扰,不能直接观察分析。需要通过信号的均方根值对信号进行分析。

信号的均方根(RMS)值<sup>[20]</sup>既可以反映振动信号能量的大小,也可以反映数据振动幅度的大小。一般托辊正常运行时振动幅度较小、RMS 值较小,而出现托辊卡死等故障时,RMS 值较大。RMS 值的计算公式为

$$X_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2}{n}}, \quad (7)$$

式中: $X_{\text{RMS}}$ 表示信号的 RMS 值; $n$ 是输入序列  $X$  的元素个数。

## 4.3 信号的时频域分析方法

本文采用短时傅里叶变换(STFT)对光纤振动信

号进行时频分析。STFT 的核心是将非平稳信号近似看作是平稳信号再进行计算,计算步骤是通过加窗函数,对信号进行分帧处理,使信号平稳化。移动窗函数,分别对每段分帧的信号进行傅里叶分析,因此可以得到信号的局部特征,再将所有的局部特征叠加起来,可以得到频率随时间变化的关系。表达式为

$$\text{STFT}(f, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau) g(t - \tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau, \quad (8)$$

式中: $g(t)$ 为窗函数; $x(t)$ 为非平稳信号。当  $t$  变化时, $g(t)$  在  $t$  轴上对 DAS 的时域信号进行平移分帧。STFT 的关键问题是选用窗函数,根据不同的场景选用不同的窗函数,这关系到时域和频域信号的分辨率。窗函数的面积是固定的,所以为了能够同时兼顾时域和频域的分辨率,本文选用 Hamming 窗函数。

## 5 DAS 信号结果分析

将采集到的 DAS 数据进行归一化处理,4 种情况下的数据如图 8 所示,可以看出正常托辊振幅较小,而托辊卡死、无轴承、断裂等情况数据振幅较大,在  $[-1, 1]$  区间剧烈变化,信号存在过饱和的情况,需要对该信号做进一步分析。

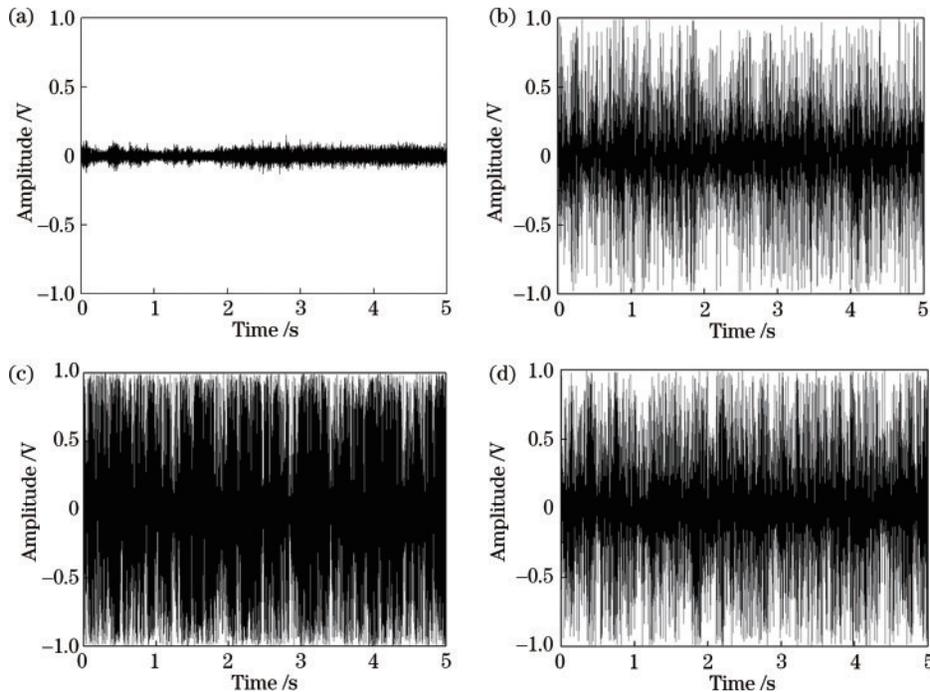


图 8 不同工况托辊幅值-时间对应曲线。(a)正常托辊;(b)托辊卡死;(c)托辊无轴承;(d)托辊断裂

Fig. 8 Amplitude value-time corresponding curves of idler under different working conditions. (a) Nomal idler; (b) stuck; (c) no bearing; (d) fracture

## 5.1 DAS 信号的时域分析结果

将正常托辊、托辊卡死、托辊无轴承和托辊断裂的归一化数据进行 RMS 值计算,设置序列  $X$  的元素个数  $n$  为 50,得到不同工况托辊的 RMS 值-时间对应曲线,如图 9 所示,可以看出 RMS 值随托辊工况的变化趋

势。正常托辊的波形平稳,在 0.05 上下平稳波动。而故障托辊的波形变化趋势明显,托辊卡死时波形在 0.1~0.8 间剧烈变化,托辊无轴承和断裂两种情况 RMS 值均集中在 0.4~1 的区间内,在时域信号内无法快速识别故障类型。

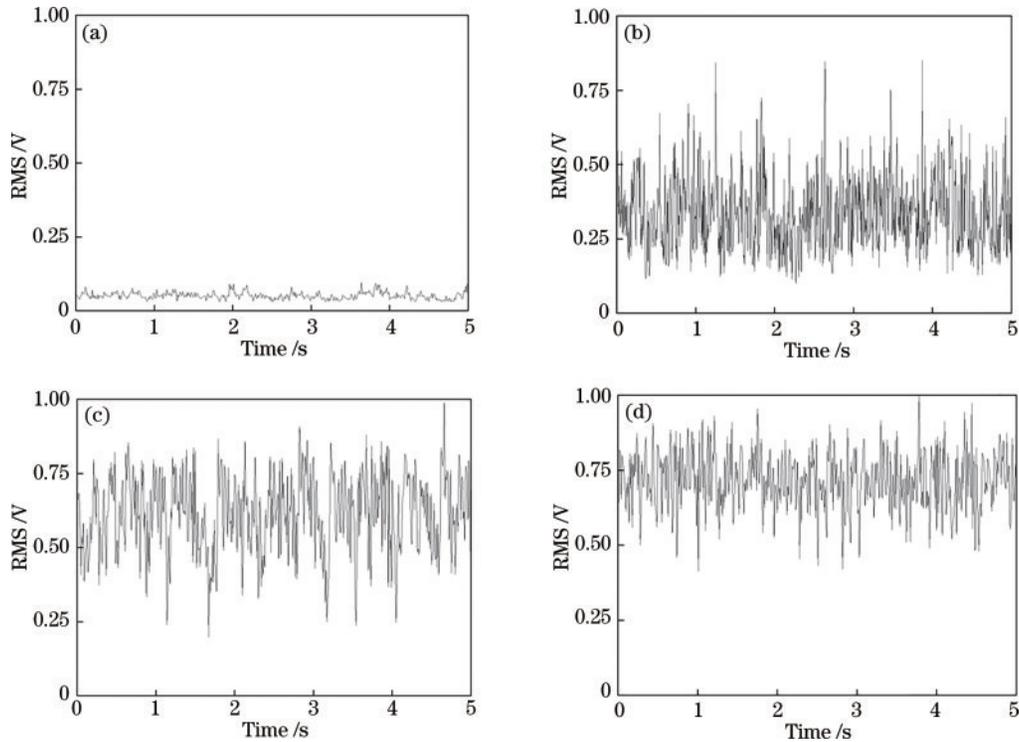


图9 不同工况托辊 RMS 值-时间对应曲线。(a)正常托辊;(b)托辊卡死;(c)托辊无轴承;(d)托辊断裂  
Fig. 9 RMS value-time corresponding curves of idler under different working conditions. (a) Nomal idler; (b) stuck;  
(c) no bearing; (d) fracture

归一化数据经 RMS 值计算后,得到一个  $100 \times 800$  的数列,对  $0 \sim 30$  m 的各个光纤点的 RMS 值进行叠加,得到带式输送机故障点对应位置的 RMS 曲线,如图 10 所示,其中 a、b、c、d 等 4 个位置分别对应正常托辊、托辊卡死、托辊无轴承和托辊断裂 4 种情况,通过 RMS 值数据的累加,可以看到故障位置的振幅长期处于 0.5 以上,累加后有明显波峰,通过 RMS 值的累加可以判断出带式输送机故障发生的位置。

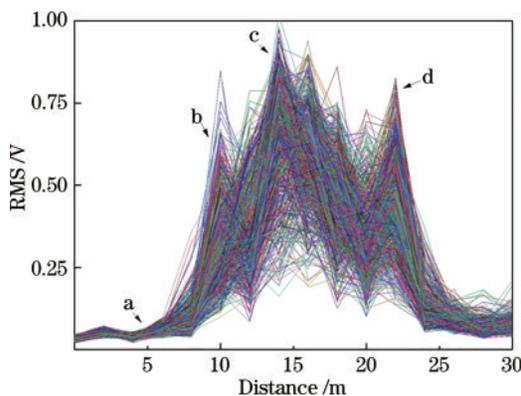


图 10 带式输送机故障点对应位置的 RMS 曲线  
Fig. 10 RMS curves of corresponding positions of fault points of belt conveyor

## 5.2 DAS 信号的频域分析结果

对相应单元的归一化数据加窗分帧做快速傅里叶变化(FFT)。不同工况托辊 FFT 频域曲线如图 11 所示,不同工况的托辊信号在频域上的分布有所不同。

正常运行的托辊信号频率非常小,而故障托辊会有很大的噪声,其中无轴承时噪声最大,故障托辊最大频率一般集中在  $0 \sim 500$  Hz 范围内,在此频率区间内有若干个波峰。FFT 属于静态分析,无法判断某频率的出现时间,为了得到信号的动态信息,需要进行时频域分析。

## 5.3 DAS 信号的时频域分析结果

选用 Hamming 窗对 DAS 信号的原始数据做 STFT,其中 STFT 的序列长度为 256,窗函数长度为 256,窗函数的重叠长度为 128。正常托辊、托辊卡死、托辊无轴承、托辊断裂 4 种工况 5 s 内的 STFT 结果如图 12 所示。可以看到运行中的带式输送机信号基本属于一个稳态信号,通过对比正常托辊和故障托辊的频谱图,可知托辊处于正常运行时,DAS 系统采集到的振动信号频率较小,500 Hz 以内没有明显频率信号。故障托辊在运行时,振动信号频率明显增大。托辊卡死和断裂情况中,DAS 系统采集到的振动信号频率主要集中在  $0 \sim 500$  Hz,其中 100 Hz 左右频率能量最大。但托辊断裂明显比卡死时的噪声大。托辊无轴承时振动信号频率分布最广,信号噪声也最大,其中信号能量的极值在 100 Hz 左右。

## 5.4 基于 DAS 信号的带式输送机故障分类方案

以上可得到一种基于 DAS 的带式输送机故障诊断方法,即先对 DAS 采集数据做归一化处理。再进行时域分析,通过计算并累加归一数据的 RMS 值,可获取 RMS 值-位置对应曲线图,由此可判断故障位置,可

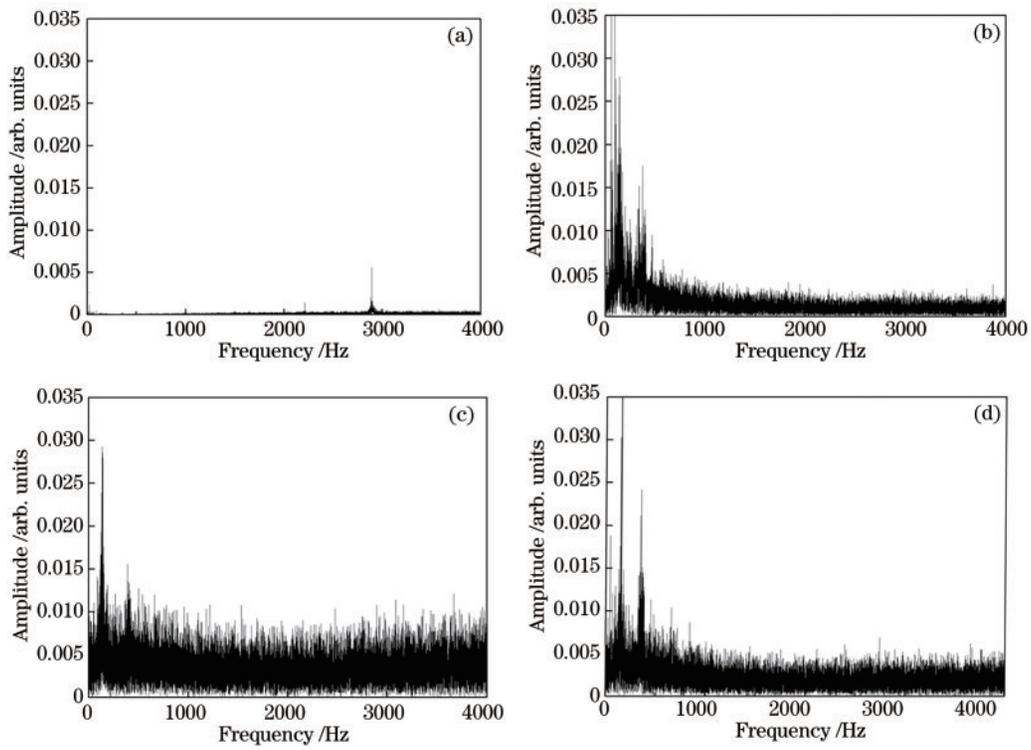


图 11 不同工况托辊 FFT 频域曲线。(a)正常托辊;(b)托辊卡死;(c)托辊无轴承;(d)托辊断裂  
 Fig. 11 FFT frequency domain curves of idler under different working conditions. (a) Nomal idler; (b) stuck;  
 (c) no bearing; (d) fracture

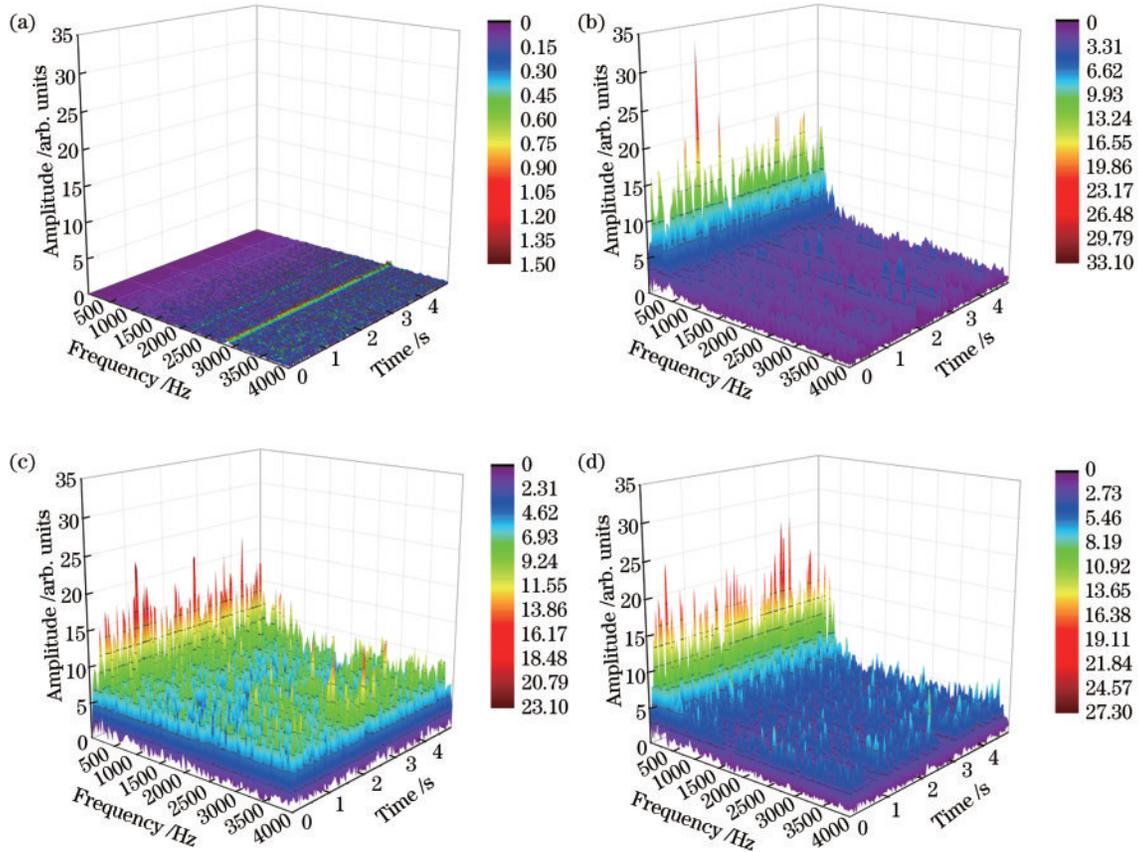


图 12 不同工况托辊时频图。(a)正常托辊;(b)托辊卡死;(c)托辊无轴承;(d)托辊断裂  
 Fig. 12 Time-frequency diagram of idler under different working conditions. (a) Nomal idler; (b) stuck; (c) no bearing; (d) fracture

选取 RMS 值超过阈值 0.5 的振动点为疑似故障点。最后对归一数据做时频域分析,在频谱图上对疑似故障点进行分类,结合已知故障类型托辊振动信号的频率分布情况进行匹配,判断故障类型。

## 6 结 论

在论述基于相干光时域反射技术测振原理的基础上,搭建了基于 DAS 技术的带式输送机托辊监测系统,通过模拟不同托辊故障,利用 DAS 的高灵敏度、高分辨率对振动信号进行时域和时频域分析,实现托辊的故障诊断。通过实验测试表明,利用 DAS 系统对带式输送机进行安全监测的方法是可行的。在带式输送机空载的前提下,将声音信号的时域和时频域结合起来,可以准确检验并判断出故障点,并对故障进行分类。这种 DAS 技术在带式输送机监测方面具有良好的应用前景。

### 参 考 文 献

- [1] 姜阔胜, 毛中元, 谢有浩, 等. 矿用带式输送机托辊运行状态监测系统[J]. 工矿自动化, 2021, 47(7): 45-49.  
Jiang K S, Mao Z Y, Xie Y H, et al. Mine belt conveyor roller operation condition monitoring system[J]. Industry and Mine Automation, 2021, 47(7): 45-49.
- [2] 冯志星. 矿用带式输送机常见故障及故障诊断系统的设计研究[J]. 机械管理开发, 2019, 34(11): 114-115.  
Feng Z X. Common faults of the mine belt conveyor and the design of the fault diagnosis system[J]. Mechanical Management and Development, 2019, 34(11): 114-115.
- [3] 魏士谦. 带式输送机安全监测系统的设计及可行性测试[J]. 机械管理开发, 2021, 36(11): 217-219.  
Wei S Q. Design and feasibility test of safety monitoring system for belt conveyor[J]. Mechanical Management and Development, 2021, 36(11): 217-219.
- [4] 马宏伟, 毛清华, 张旭辉. 矿用强力带式输送机智能监控技术研究进展[J]. 振动·测试与诊断, 2016, 36(2): 213-219, 396.  
Ma H W, Mao Q H, Zhang X H. Intelligent monitoring technology study process for steel cord conveyor belt in coal mine[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2016, 36(2): 213-219, 396.
- [5] 李臻, 操虹, 贾洪钢, 等. 煤矿带式输送机轴承监测诊断系统及其应用[J]. 工矿自动化, 2011, 37(12): 15-18.  
Li Z, Cao H, Jia H G, et al. Bearing monitoring and diagnosis system of belt conveyor of coal mine and its application[J]. Industry and Mine Automation, 2011, 37(12): 15-18.
- [6] Yang M J, Zhou W J, Song T X. Audio-based fault diagnosis for belt conveyor rollers[J]. Neurocomputing, 2020, 397: 447-456.
- [7] 苗长云, 邵琦. 基于声音的带式输送机输送带纵向撕裂检测方法[J]. 天津工业大学学报, 2021, 40(6): 70-75, 82.  
Miao C Y, Shao Q. Detection method of longitudinal tear of belt conveyor belt based on sound[J]. Journal of Tiangong University, 2021, 40(6): 70-75, 82.
- [8] 郝洪涛, 倪凡凡, 丁文捷. 基于声音信号的托辊故障诊断方法[J]. 噪声与振动控制, 2019, 39(3): 187-192.  
Hao H T, Ni F F, Ding W J. Fault diagnosis method of rollers based on sound signals[J]. Noise and Vibration Control, 2019, 39(3): 187-192.
- [9] 刘统玉, 王兆伟, 李振, 等. 激光/光纤传感技术研究及其在煤矿安全监测预警中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(13): 1306016.  
Liu T Y, Wang Z W, Li Z, et al. Advance of laser and fiber optic sensors for applications of coal mine safety monitoring and early warning[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(13): 1306016.
- [10] 陈勇, 安汪悦, 刘焕淋, 等. 利用 FBG 传感信号诊断滚动轴承故障的检测方法[J]. 中国激光, 2020, 47(11): 1104004.  
Chen Y, An W Y, Liu H L, et al. Detection method using FBG sensing signal to diagnose rolling bearing fault [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(11): 1104004.
- [11] 郭清华. 基于光纤测温技术的带式输送机托辊故障识别算法研究[J]. 煤矿机械, 2018, 39(8): 157-160.  
Guo Q H. Research on roller fault identification algorithm of belt conveyor system based on fiber temperature measurement technology[J]. Coal Mine Machinery, 2018, 39(8): 157-160.
- [12] 何祖源, 刘庆文. 光纤分布式声波传感器原理与应用[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(13): 1306001.  
He Z Y, Liu Q W. Principles and applications of optical fiber distributed acoustic sensors[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(13): 1306001.
- [13] 张旭苹, 丁哲文, 洪瑞, 等. 相位敏感光时域反射分布式光纤传感技术[J]. 光学学报, 2021, 41(1): 0106004.  
Zhang X P, Ding Z W, Hong R, et al. Phase sensitive optical time-domain reflective distributed optical fiber sensing technology[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 0106004.
- [14] Chen D, Liu Q W, He Z Y. Phase-detection distributed fiber-optic vibration sensor without fading-noise based on time-gated digital OFDR[J]. Optics Express, 2017, 25(7): 8315-8325.
- [15] 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  $\phi$ -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.  
Xie K L, Rao Y J, Ran Z L. Distributed optical fiber sensing system based of Rayleigh scattering light  $\phi$ -OTDR using single-mode fiber laser with high power and narrow linewidth[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(3): 569-572.
- [16] 吴慧娟, 刘欣雨, 饶云江. 基于  $\Phi$ -OTDR 的光纤分布式传感信号处理及应用[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(13): 1306003.  
Wu H J, Liu X Y, Rao Y J. Processing and application of fiber optic distributed sensing signal based on  $\Phi$ -OTDR [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(13): 1306003.
- [17] 盛庆华, 俞钊, 卢斌, 等. 基于异构加速的  $\Phi$ -OTDR 实时信号处理系统[J]. 中国激光, 2020, 47(1): 0104002.

- Sheng Q H, Yu Z, Lu B, et al. Real-time phase-sensitive optical time-domain reflectometry signal processing system based on heterogeneous accelerated computing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(1): 0104002.
- [18] 王辰, 刘庆文, 陈典, 等. 基于分布式光纤声波传感的管道泄漏监测[J]. 光学学报, 2019, 39(10): 1006005.  
Wang C, Liu Q W, Chen D, et al. Monitoring pipeline leakage using fiber-optic distributed acoustic sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(10): 1006005.
- [19] 杨震, 封皓. 基于深度学习的  $\Phi$ -OTDR 输油管道入侵监测研究[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(8): 0806001.
- Yang Z, Feng H. Oil pipeline intrusion monitoring based on deep learning of  $\Phi$ -OTDR[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(8): 0806001.
- [20] 盛媛媛, 刘俊承, 金佳颖, 等. 光纤传感器振动信号特征提取研究[J]. 光电技术应用, 2015, 30(6): 45-50.  
Sheng Y Y, Liu J C, Jin J Y, et al. Research on vibration signal feature extraction on optical fiber sensor [J]. Electro-Optic Technology Application, 2015, 30(6): 45-50.