

# 基于振动传感器的煤矿井下带式输送机 齿轮箱远程故障诊断系统研究

郑 勇<sup>1</sup>, 冯彦军<sup>2,3\*</sup>

(1. 陕西陕煤曹家滩矿业有限公司, 陕西 榆林 719100; 2. 中煤科工开采研究院有限公司;  
3. 天地科技股份有限公司, 北京 100013)

**摘要:**煤矿井下带式输送机齿轮箱故障诊断对保障安全连续生产具有重要意义,然而现有方法多针对输送机轴承而较少涉及齿轮箱,导致故障识别准确率较低且实时性差。基于此,该文提出了基于振动传感的煤矿井下带式输送机齿轮箱远程故障诊断系统,可实现对齿轮断齿、轴承损伤及轴系失衡故障的分类识别。系统通过振动传感器采集输送机齿轮箱数据,并经 4G/5G 网络传输至地表进行算法处理。算法采用分层阈值降噪技术消除噪声干扰,基于谱峭度定位共振频带并提取包络谱特征,最终通过粒子群优化的决策树支持向量机模型完成故障分类。进一步的现场试验表明系统识别故障的平均准确率为 95.9%,满足煤矿的实际使用需求。相关成果可为煤矿带式输送机的安全运行提供必要的技术支持。

**关键词:**带式输送机; 齿轮箱; 故障诊断; 振动信号; 粒子群优化

中图分类号: TD76

文章编号: 1000-0682(2026)02-0090-05

文献标识码: A

DOI: 10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2026.02.017

## Research on remote fault diagnosis system for gearbox of underground belt conveyor in coal mines based on vibration sensors

ZHENG Yong<sup>1</sup>, FENG Yanjun<sup>2,3\*</sup>

(1. Shaanxi Shaanxi Coal Caojiatan Mining Co., Ltd., Shaanxi Yulin 719100, China; 2. China Coal Science and Industry Mining  
Research Institute Co., Ltd.; 3. Tiandi Technology Co., Ltd., Beijing 100013, China)

**Abstract:** Fault diagnosis of gearboxes in underground belt conveyors is crucial for ensuring safe and continuous coal mine production. However, current methods primarily target conveyor bearings rather than gearboxes, resulting in low fault recognition accuracy and poor real-time performance. To address this, this study proposes a vibration sensor-based remote fault diagnosis system for underground belt conveyor gearboxes, enabling classification of gear tooth fracture, bearing damage, and shaft imbalance faults. The system collects gearbox data via vibration sensors and transmits it to the surface through 4G/5G networks for algorithmic processing. The algorithm employs hierarchical threshold denoising to eliminate noise interference, locates resonance bands via spectral kurtosis to extract envelope spectrum features, and ultimately classifies faults using a decision tree-based support vector machine optimized by particle swarm optimization (PSO). Field tests demonstrate an average fault identification accuracy of 95.9%, meeting practical coal mine requirements. These findings provide essential technical support for the safe operation of belt conveyors in coal mines.

**Keywords:** belt conveyor; gearbox; fault diagnosis; vibration signal; particle swarm optimization

收稿日期: 2025-11-18

第一作者: 郑勇(1986—),男,陕西渭南人,工程师,硕士,研究方向为煤炭开采技术研究工作。E-mail: zhengyong\_2025@163.com。

## 0 引言

煤炭开采作业中,井下带式输送机作为物料输送的关键枢纽,一旦发生故障将导致整条生产线中

断,不仅造成重大经济损失,更可能因机械失效引发火灾、爆炸等次生灾害,严重威胁人员安全与生产环境稳定<sup>[1-2]</sup>。其中,齿轮箱作为驱动系统的关键部件,因其长期承受高负荷、冲击载荷和频繁启停操作,成为故障频发的薄弱部位<sup>[3]</sup>,其磨损、裂纹或轴承失效等问题常导致连锁反应,亟需高效诊断手段。

针对带式输送机的故障诊断,相关学者已取得一些进展,主要集中在智能算法及传感技术2个方向。在智能算法领域,研究热点集中于利用深度学习与信号处理技术提升特征提取与故障分类精度<sup>[4-6]</sup>,比如权国辉等<sup>[7]</sup>提出 Xception - CNN 模型,有效提升了滚动轴承故障识别的准确性,而江帆等<sup>[8]</sup>结合改进优化算法与集成学习实现特征的高效提取。在传感技术领域则探索了光纤<sup>[9]</sup>、声音<sup>[10]</sup>及图像<sup>[11-12]</sup>等监测方法,比如申龙等<sup>[13]</sup>利用卷积自编码器进行异常声音检测等。

然而现有研究仍存在一些局限性。其一,多数成果集中于托辊与轴承监测,对驱动系统核心齿轮箱的针对性诊断研究不足;其二,光纤与声音传感方案在井下恶劣工况易受干扰,且安装维护成本高昂;其三,复杂算法融合模型虽提升精度,但计算负载过高,边缘设备部署可行性低。因此,亟需开发兼具环境适应性、轻量化及齿轮箱专项诊断能力的远程监测系统,以提高带式输送机的故障诊断能力,保障煤矿的安全生产。

## 1 工作原理

系统工作原理如图1所示。系统主要由振动传感器、数据采集卡及上位机组成。多个无线式MEMS振动传感器安装于带式输送机的不同位置处,采集到的数据经无线发送模块实时传输到数据采集端。数据采集端将采集的所有振动数据经4G/5G网络实时传输到指定的云服务器地址进行存储。上位机中安装有编写的软件,联网后实时读取特定云服务器地址中的数据,并对数据进行进一步的算法处理,从而对带式输送机的齿轮箱是否故障及故障类型进行远程在线诊断。

带式输送机齿轮箱的齿轮副在啮合过程中若存在齿面损伤或几何形变,将显著改变接触应力分布,诱发非平稳的冲击性振动响应。齿轮箱的轴承元件一旦出现疲劳剥落屑点或间隙增大,滚动体经过缺陷区域时会产生瞬态冲击与摩擦激励。传动轴系的轻微不对中或弯曲变形则会在旋转过程中引入周期性交变载荷。上述源于齿轮、轴承、轴等核心部件的

局部缺陷或状态异常,均会激发特定的机械振动,并通过箱体结构向外辐射,使得附着于箱体外壁的振动传感器能够捕捉到反映内部运行状态的关键信息。

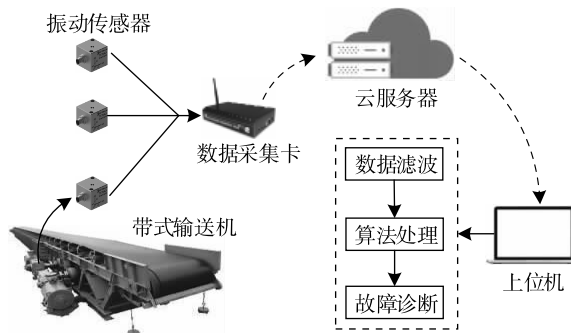


图1 工作原理示意图

图2所示为煤矿井下实际采集的齿轮箱振动信号的时域波形图,信号幅度随时间呈现不规则波动,信号基线上叠加着大量密集的瞬态脉冲与高频振荡成分,表明信号中混杂了显著的背景扰动。这种扰动使得表征核心部件潜在故障的微弱特征信息在时域形态上不易直接辨识。进一步分析图3所示的频域图谱,其频谱结构呈现出宽频带连续噪声基底上叠加多个显著能量集中区域的特征。这些集中区域体现了由齿轮啮合、轴系旋转等基本运动过程及其倍频、边频成分构成的复杂频率结构,而隐藏在其中的、与特定部件损伤相关的细微频率偏移或边带增生,则构成了故障诊断的主要依据,因此需要在强背景中予以精细提取。

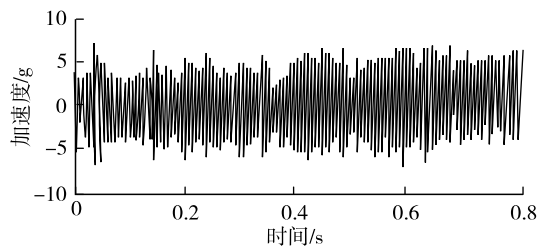


图2 井下带式输送机齿轮箱振动信号时域图

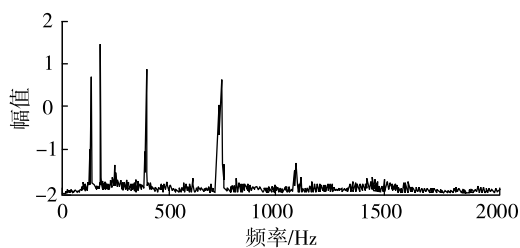


图3 井下带式输送机齿轮箱振动信号频域图

## 2 故障诊断算法

故障诊断算法流程如图4所示。系统的故障诊

断算法首先对多个振动传感器的数据进行预处理,采用小波阈值降噪消除环境干扰。预处理后的信号通过谱峭度分析自动定位共振频带,利用该频带中心频率对原始信号进行带通滤波以增强故障成分。滤波信号经过希尔伯特变换生成包络谱,从包络谱中提取故障特征频率幅值比、倍频带能量比及包络熵作为特征值,随后将特征值输入改进的支持向量机模型进行故障分类。故障分类时首先通过粒子群算法优化模型核函数参数,然后构建多分类决策树结构,最后输出齿轮断齿、轴承内外圈损伤、轴系失衡等典型故障的诊断结果。

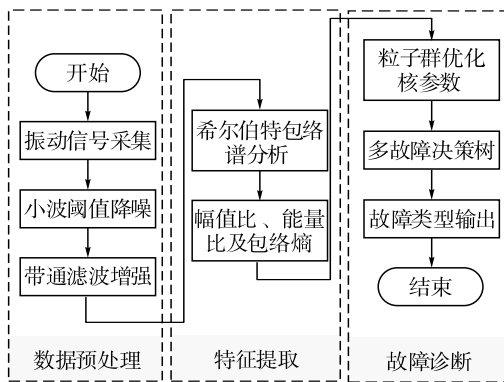


图 4 故障诊断算法流程图

### 2.1 数据预处理

煤矿带式输送机齿轮箱在运行过程中产生的振动信号包含多种故障特征,但井下环境中的煤块冲击、设备共振和电磁干扰会引入大量噪声,将会对齿轮断齿的故障特征频率造成干扰。为准确提取故障特征,本研究采用小波阈值降噪技术进行数据预处理。首先进行小波分解,分解时对采集的振动信号  $x(t)$  进行离散小波分解,将其表示为不同尺度的分量之和,如式(1)所示:

$$x(t) = A_J(t) + \sum_{j=1}^J D_j(t) \quad (1)$$

式中:  $A_J(t)$  为第  $J$  层近似系数;  $D_j(t)$  为第  $j$  层细节系数;  $J$  为分解层数。

随后针对煤矿噪声特性,采用分层阈值处理策略。针对冲击噪声层,即  $j$  为 1 或 2 时,此类噪声主要由煤块冲击引起,采用硬阈值函数进行处理,如式(2)所示:

$$\hat{D}_j(t) = \begin{cases} D_j(t) & |D_j(t)| \geq \lambda_j \\ 0 & |D_j(t)| \leq \lambda_j \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\hat{D}_j(t)$  为处理后的细节分量;  $\lambda_j$  为设定的阈值。

针对电磁噪声层,即  $j$  为 3 或 4 时,此类噪声为

连续背景干扰,采用软阈值函数进行处理,如式(3)所示:

$$\begin{cases} \hat{D}_j(t) = \text{sgn}(D_j(t)) \cdot (|D_j(t)| - \lambda_j) \\ \lambda_j = \sigma_j \sqrt{2 \ln N} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\sigma_j$  为第  $j$  层系数的标准差估计值;  $N$  为采样点数。

针对故障特征层,即  $j$  为 5 或 6 时,此层包含主要故障特征,不做阈值处理,予以保留。随后将处理后的系数重构为降噪信号,如式(4)所示:

$$\hat{x}(t) = A_J(t) + \sum_{j=1}^J \hat{D}_j(t) \quad (4)$$

通过现场实测分析,确定分解层数  $J=6$  可有效分离煤矿振动信号中的噪声与故障特征。图 5 对比显示了降噪处理效果,其中频域滤波法虽抑制了高频噪声,但过度平滑导致故障冲击幅值衰减较大,且残留显著电磁干扰波动。奇异值分解法保留了主要冲击形态,但在冲击间隔期仍存在煤块冲击引起的脉冲噪声。该文方法可有效消除背景波动和随机脉冲,故障冲击幅值完整度较高,并清晰保留了冲击间隔周期特征,从而证明分层阈值策略能针对性抑制煤矿特有噪声干扰。

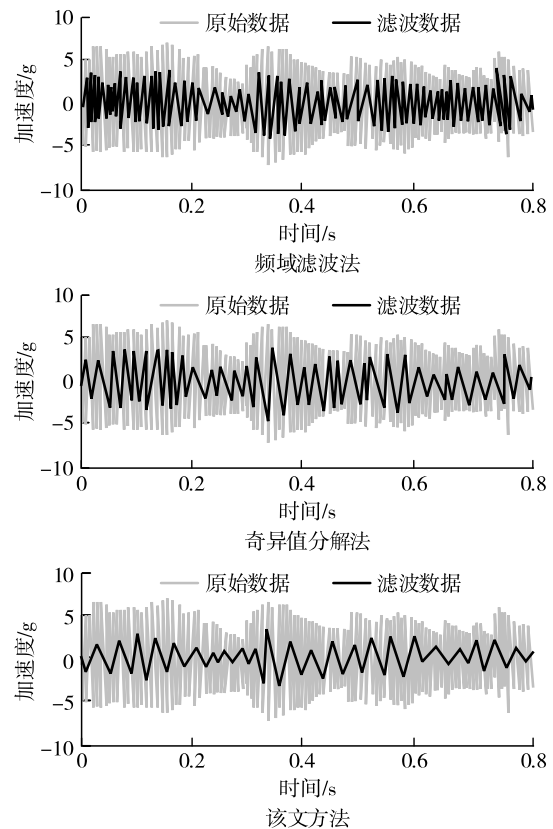


图 5 不同算法降噪效果对比

### 2.2 故障特征提取

带式输送机齿轮箱的降噪信号仍包含复杂频域

成分,传统包络分析法依赖人工经验选择共振频带,存在主观性强、效率低等问题。针对煤矿设备多故障并发特性,提出了基于谱峭度引导的包络分析方法,通过自动定位最优共振频带,可有效提升故障特征提取精度。故障特征提取时,首先对滤波信号  $x_f(t)$  进行希尔伯特变换,构建解析信号,如式(5)所示:

$$z(t) = x_f(t) + jH[x_f(t)] \quad (5)$$

式中:  $j$  为虚数单位;  $H$  为希尔伯特变换算子。

随后提取包络信号  $A(t)$  及其包络谱  $E(f)$ , 其中包络谱消除了高频载波的影响,凸显出故障冲击特征的频率成分。如图6、7所示分别为实测的齿轮箱轴承损伤及断齿的包络图,可见加速度波形的包络图存在明显的周期性冲击,冲击频率对应了轴承外圈缺陷频率及齿轮缺陷频率,该频率与轴承及齿轮转速相对应,由此证明了包络图方法在缺陷检测中的优势。

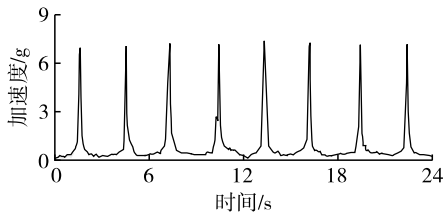


图6 齿轮箱轴承损伤振动信号包络图

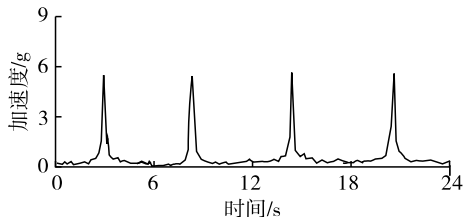


图7 齿轮箱齿轮断齿振动信号包络图

进一步从包络谱中提取特征频率幅值比、倍频带能量比及包络熵等故障敏感特征量作为故障诊断的特征,如式(6)~式(8)所示。其中特征频率幅值比用于量化故障特征频率相对能量强度,当齿轮断齿时该特征的典型值较大。倍频带能量比用于表征故障谐波能量集中度,当轴承损伤时的典型值较大。包络熵用于反映信号复杂度,故障状态下熵值下降30%~50%。

$$R_a = \frac{\max(E(f_k), E(2f_k), E(3f_k))}{\text{mean}(E(f))} \quad (6)$$

$$R_e = \frac{\sum_{n=1}^3 \int_{nf_k-5}^{nf_k+5} E(f) df}{\int_0^{f/2} E(f) df} \quad (7)$$

$$H_e = - \sum_{i=1}^{N_b} p_i \ln p_i, p_i = \frac{E(f_i)}{\sum E(f)} \quad (8)$$

式中:  $R_a$  为特征频率幅值比;  $R_e$  为倍频带能量比;  $H_e$  为包络熵;  $f_k$  为故障特征频率;  $f_s$  为采样频率;  $N_b$  为频带划分数。

### 2.3 故障诊断

带式输送机齿轮箱的多维故障特征存在非线性耦合特性,传统支持向量机在参数选择不当时分类精度显著下降,因此该文提出基于粒子群优化决策树支持向量机(PSO-DTSVM)的故障诊断模型,通过参数自适应优化与层级决策机制,提升故障诊断的准确率。粒子位置更新公式如(9)所示:

$$\begin{cases} \mathbf{v}_i^{k+1} = w\mathbf{v}_i^k + c_1 r_1 (\mathbf{p}_{b,i}^k - \mathbf{x}_i^k) + c_2 r_2 (\mathbf{g}_b^k - \mathbf{x}_i^k) \\ \mathbf{x}_i^{k+1} = \mathbf{x}_i^k + \mathbf{v}_i^{k+1} \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $\mathbf{x}_i^k$  为第  $i$  个粒子在  $k$  次迭代的位置向量;  $\mathbf{v}_i^k$  为粒子速度向量;  $\mathbf{p}_{b,i}^k$  为粒子历史最优位置;  $\mathbf{g}_b^k$  为群体历史最优位置;  $w$  为惯性权重;  $c_1$ 、 $c_2$  为学习因子;  $r_1$ 、 $r_2$  为随机数。

针对齿轮箱的正常、断齿、轴承损伤、轴系失衡等4类故障模式,构建二叉决策树分类结构,则节点分割准则如式(10)所示:

$$\max \Delta G = G(D_p) - \sum_{j \in \{L, R\}} \frac{|D_j|}{|D_p|} G(D_j) \quad (10)$$

式中:  $D_p$  为父节点样本集;  $D_L$ 、 $D_R$  分别为左右子节点样本集;  $G(D)$  为基尼不纯度。

随后构建层级诊断策略,即:节点1中若  $H_e < 2.5$ ,则判定为轴承损伤;节点2中若  $R_a > 5$ ,则判定为齿轮断齿;节点3中若  $R_e > 0.25$ ,则判定为轴系失衡;否则判定为正常状态。

### 3 试验验证

为验证系统可靠性,先后在实验室及曹家滩煤矿开展试验。实验室采用齿轮箱故障模拟平台构建4类典型故障进行试验,包括正常状态、齿轮断齿、轴承内外圈损伤及轴系失衡等。由表1可知,该方法平均诊断准确率达96.8%,显著高于频域滤波法84.9%、小波包分析法88.7%与深度信念网络(DBN)算法的92.1%。其中断齿故障识别准确率为97.2%,分层降噪策略使故障冲击特征保留率大幅度提升,强噪声环境下冲击幅值衰减率较小。

表1 实验室故障诊断准确率对比

故障类型	频域滤波法	小波包分析法	DBN 算法	该文方法
正常状态	90.3	93.1	95.7	98.1
齿轮断齿	83.5	86.9	90.6	97.2
轴承损伤	82.1	85.4	89.8	95.6
轴系失衡	79.7	84.1	88.3	92.3
平均准确率	84.9	88.7	92.1	96.8

随后于曹家滩煤矿井下某带式输送机进行了现场试验,累计触发诊断217次。如图8所示,系统整体准确率达95.9%,其中断齿故障诊断准确率为96.4%,轴承损伤诊断率为93.8%,轴系失衡因联轴器干扰诊断率降至85.7%。由此证明系统煤矿强噪声环境下具备较高的故障识别率,且单样本边缘计算耗时及平均预警时间均大幅度缩减,满足煤矿实时监测需求。

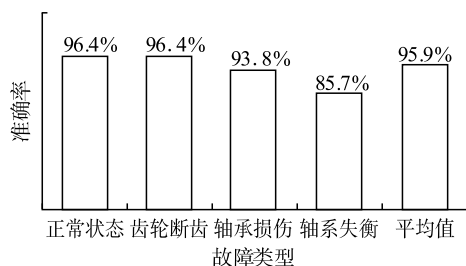


图8 曹家滩现场试验故障识别准确率

## 4 结论

针对煤矿带式输送机齿轮箱故障诊断需求,该文提出基于振动传感的远程监测系统,通过分层阈值降噪、谱峭度引导包络分析及 PSO-DTSVM 分类模型的协同优化,有效解决了井下强噪声干扰、故障特征微弱及边缘设备算力受限等难题。现场试验结果表明,系统对故障识别的平均准确率达95.9%,其中断齿故障识别准确率最高,可达96.4%,大幅度提高了故障识别的精度,满足煤矿的实时监测需求。

与常规方法相比,该文的创新点体现在两个方面。一是提出融合分层阈值降噪与谱峭度包络分析的特征增强方法,通过噪声差异化处理与共振频带自适应定位,在煤矿强干扰环境下实现高精度的故

障冲击特征保留率;二是构建粒子群优化决策树支持向量机模型,借助参数自整定与层级决策机制,将多故障并发识别准确率大幅度提高。后续将重点突破联轴器松动等复合工况的诊断瓶颈,推进多矿井集群化监测的应用。

### 参考文献:

- [1] 刘东. 基于机器视觉的矿井带式输送机节能调速控制系统设计[J]. 西部探矿工程, 2025, 37(10): 182-185.
- [2] 王锐,冯彦军,任建超,等. 基于机器视觉的煤矿井下带式输送机堆煤故障监测系统研发[J]. 煤矿机械, 2024, 45(09): 157-159.
- [3] 徐志军. 煤矿带式输送机变速箱齿轮故障诊断技术研究[J]. 矿业装备, 2024(09): 167-169.
- [4] 祁瑞敏,张国栋,代皓轩. 基于改进模糊信息融合的煤矿带式输送机健康诊断[J]. 电子测试, 2024(01): 16-20.
- [5] 麻荣福,宋泓炎,庄巍,等. 基于 ICEEMDAN-GOA-LSSVM 的带式输送机托辊轴承故障诊断方法[J]. 矿山机械, 2025, 53(04): 18-24.
- [6] 张硕. 基于 AI 技术的矿用带式输送机驱动装置故障诊断预警研究[J]. 煤矿机电, 2023, 44(05): 59-63.
- [7] 权国辉,邵金华,张庆莉,等. 用于矿山皮带输送机滚动轴承故障识别的 Xception-CNN 模型[J]. 金属矿山, 2025(10): 149-158.
- [8] 江帆,程舒曼,朱真才,等. 基于 CLSRIME-XGBOOST 的带式输送机托辊故障诊断方法[J]. 振动、测试与诊断, 2025, 45(04): 666-673.
- [9] 秦翥. 分布式光纤传感带式输送机故障诊断系统研究[J]. 煤矿机械, 2025, 46(08): 190-192.
- [10] 陈湘源,秦伟,刘晏驰,等. 融合卷积神经网络与线性回归的带式输送机托辊故障音频识别方法[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(S1): 389-398.
- [11] 王艳. 基于声音阵列和图像处理的皮带机跑偏检测系统[J]. 测控技术, 2022, 41(06): 19-25.
- [12] 王浩宇,王希鹏. 基于机器视觉的带式输送机胶带跑偏检测方法研究[J]. 中国煤炭, 2024, 50(S2): 158-163.
- [13] 申龙,单浩然,裴文良,等. 基于卷积自编码器的煤矿带式输送机异常声音检测方法[J]. 工矿自动化, 2025, 51(02): 100-105.