

文章编号:1671-251X(2021)07-0079-06

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.17753

煤矿机电设备智能化维护研究现状与发展趋势

刘媛媛

(煤炭科学技术研究院有限公司, 北京 100013)



扫码移动阅读

摘要:煤矿机电设备智能化维护是智慧矿山建设的重要组成部分。从煤矿机电设备故障机理、设备状态监测、信号分析与处理、故障诊断与预测算法 4 个方面总结了煤矿机电设备的智能故障诊断与预测性维护研究现状:① 设备故障机理研究主要是针对不同设备,采用不同方法建立设备故障的分析模型,并对模型施加激励以获得设备故障动态响应,从而为后续的故障诊断提供评判依据;② 设备状态监测研究针对煤矿机电设备建立了较为完备的状态监测系统,能够准确及时地获取设备参数,为设备的故障诊断提供数据支持;③ 信号分析与处理研究除了采用传统的时域、频域和时频域分析方法外,还将多种方法结合的手段用于信号处理与特征提取,提高了信号处理效率和处理结果的可靠性;④ 故障诊断与预测算法主要采用人工神经网络及机器学习、深度学习等智能算法建立设备故障诊断与预测模型,从而实现故障的智能诊断和预测。指出煤矿机电设备智能化维护研究存在的问题:① 设备故障机理的研究缺少多故障复合状态下的故障机理研究,需要更多地对设备某部分的故障带来的连锁反应进行研究;② 模拟环境下所获得的故障数据不能完全真实反映设备实际的运行状况,需长时间不断采集现场监测数据,最好是设备全生命周期数据;③ 目前采用组合式的算法研究较少,并且研究对象更多局限在设备某个部分或零部件。最后给出煤矿机电设备智能化维护的发展趋势:① 研究应用灵敏度更高的智能传感器来监测设备,结合随机共振、盲源分离等方法从强噪声中提取微弱的特征信号,及时地识别出设备早期故障,从而实现预测性维护;② 采用独立的诊断方法已经不能适应实际设备的诊断需求,基于多传感器信息融合技术的诊断和预测可准确有效地识别出设备存在的所有故障;③ 将迁移学习算法作为“桥梁”,建立仿真、试验数据与现场数据的相关性,为解决仿真与试验条件和现场条件差异的问题提供数据支持和保障。

关键词:煤矿智能化;煤矿机电设备故障诊断;智能化维护;预测性维护;故障机理;设备状态监测;信号分析与处理

中图分类号:TD63 文献标志码:A

Current status and development trend of research on intelligent maintenance of coal mine electromechanical equipment

LIU Yuanyuan

(CCTEG China Coal Research Institute, Beijing 100013, China)

Abstract: The intelligent maintenance of coal mine electromechanical equipment is an important part of the construction of intelligent mines. The research status of intelligent fault diagnosis and predictive maintenance of coal mine electromechanical equipment is summarized from four aspects, coal mine electromechanical equipment fault mechanism, equipment condition monitoring, signal analysis and processing, and fault diagnosis and prediction algorithm. ① Equipment fault mechanism research is mainly for different equipment, which uses different methods to establish equipment fault analysis models and

收稿日期:2021-03-26;修回日期:2021-07-11;责任编辑:张强,郑海霞。
基金项目:天地科技股份有限公司科技创业资金专项项目(2020-TD-MS001)。
作者简介:刘媛媛(1980—),女,河北唐山人,工程师,主要从事智能矿山方面的研究工作,E-mail:78352239@qq.com。
引用格式:刘媛媛.煤矿机电设备智能化维护研究现状与发展趋势[J].工矿自动化,2021,47(7):79-84.

LIU Yuanyuan. Current status and development trend of research on intelligent maintenance of coal mine electromechanical equipment [J]. Industry and Mine Automation, 2021, 47(7): 79-84.

applies incentives to the models to obtain dynamic response to equipment fault so as to provide a basis for subsequent fault diagnosis. ② Equipment condition monitoring research has established a relatively complete condition monitoring system for coal mine electromechanical equipment, which can obtain equipment parameters accurately and timely and provide data support for equipment fault diagnosis. ③ Signal analysis and processing research not only uses traditional time domain, frequency domain and time-frequency domain analysis methods, but also combines multiple methods for signal processing and characteristic extraction, which improves the efficiency of signal processing and the reliability of processing results. ④ Fault diagnosis and prediction algorithms mainly use artificial neural networks, including machine learning, deep learning and other intelligent algorithms to establish equipment fault diagnosis and prediction models so as to achieve intelligent diagnosis and prediction of faults. It is pointed out the problems of intelligent maintenance research of coal mine electromechanical equipment are as follows. ① The study of equipment fault mechanism lacks the study of fault mechanism under multiple fault compound state. And more research is needed on the chain reaction caused by the fault of a certain part of the equipment. ② The fault data obtained in the simulated environment cannot fully reflect the actual operating conditions of the equipment, and it is necessary to continuously collect on-site monitoring data for a long time, preferably the whole life cycle data of the equipment. ③ At present, there is few research using the combined algorithm, and the research object is more limited to a certain part or component of the equipment. Finally, the development trend of intelligent maintenance of coal mine electromechanical equipment is proposed as follows. ① It is suggested to study the application of intelligent sensors with higher sensitivity to monitor equipment, combine the methods such as random resonance and blind source separation to extract weak characteristic signals from strong noise to identify early equipment faults in a timely manner, thus realizing predictive maintenance. ② The use of independent diagnosis method can no longer meet the diagnosis needs of actual equipment. The diagnosis and prediction based on multiple sensor information fusion technology can identify all faults in the equipment accurately and effectively. ③ It is proposed to use the migration learning algorithm as a ‘bridge’ to establish the correlation between simulation, test data and field data, and provide data support and guarantee for solving the problem of the difference between simulation and test conditions and field conditions.

Key words: coal mine intelligence; coal mine electromechanical equipment fault diagnosis; intelligent maintenance; predictive maintenance; fault mechanism; equipment condition monitoring; signal analysis and processing

0 引言

矿山建设经历了人力矿山、机械矿山、数字矿山等阶段,正逐步向智慧矿山迈进。智慧矿山将工业物联网、大数据、人工智能、5G 等技术与煤炭开发利用深度融合,从而实现煤矿采掘、运输、洗选、通风、设备安全管理等全过程智能化运行^[1]。

煤矿机电设备包括综采设备、洗选设备、提升设备、通风设备、供排水设备等,这些设备长时间在恶劣的煤矿生产环境下运转,易出现不同程度的磨损或故障,不仅影响煤矿开采工作的正常开展,降低企业经济效益,且故障如不能及时处理,还会降低设备的使用寿命,提高企业运行成本。因此,及时准确掌握煤矿机电设备当前的运行状态,判断当前故障并对故障发展趋势进行预测,对于保障煤矿安全生产

具有重要意义。

煤矿机电设备大数据具有大容量、多样性和实时性的特点,从煤矿机电设备大数据中挖掘信息,高效、准确地识别设备故障,成为煤矿机电设备维护管理面临的新问题。传统的诊断识别方法无法满足大量监测数据的分析处理要求,智能故障诊断与预测方法通过深层挖掘监测数据中所包含的多传感器故障信息,利用专家系统及各类智能算法识别出设备当前存在的故障隐患,并对其发展趋势进行评判,从而智能化地提出维护管理意见,大大提高了设备维护管理的可靠性和效率。笔者对煤矿机电设备的智能故障诊断与预测性维护研究现状进行了总结,对煤矿机电设备智能化维护研究存在的问题进行了分析,展望了煤矿机电设备智能化维护研究的发展趋势。

1 研究现状

1.1 故障机理研究

故障机理研究本质上是通过理论或大量的试验方法,得到能够反映设备故障状态下信号特征与设备自身系统参数之间规律的过程^[2]。李占芳^[3]建立了矿井提升机刚性罐道故障激励下提升容器的水平、垂直振动模型,并进行了仿真分析,得到了不同罐道故障大小、提升速度和提升载荷对提升容器振动影响的关系曲线,为罐道故障的振动法检测提供了理论依据。崔国梁等^[4]建立了煤矿主要通风机转子不平衡故障下的动力学模型,并在频谱图显示基频处较大的频谱峰值,以此作为主要通风机故障诊断的依据。Liu Yue 等^[5]建立了弹簧故障下选煤厂振动筛的动力学模型,通过数值模拟得到不同弹簧故障下系统振幅与频率的相关关系,可用于振动筛的弹簧故障诊断。张延超等^[6]对煤矿井下采煤机摇臂传动系统中齿轮断齿和点蚀、轴承磨损等问题进行了失效分析,对润滑油的物理特性进行了试验和测试分析,揭示其故障机理,为传动系统设计、使用和维护提供了十分有价值的参考。李伟^[7]采用集中参数法建立了较全面的矿用重载带式输送机减速器斜齿轮动力学模型,并采用虚拟样机方法模拟得到不同类型、不同程度故障下的齿轮动力学特征,可用于齿轮故障的快速识别。赵军^[8]根据煤矿通风机的运行特点,建立了喘振边界线的数学模型,以此为基础揭示了通风机喘振发生时入口风压和流量的变化,从而作为诊断故障发生的依据。

从以上研究可看出,对于故障机理的研究主要是针对不同设备,采用不同方法(如动力学方法、有限元方法等)建立设备故障的分析模型,并对模型施加激励以获得设备故障动态响应,从而为后续的故障诊断提供评判依据。

1.2 设备状态监测研究

及时准确地获取设备当前运行状态的数据是对设备进行故障诊断和预测性维护的基础。完整的设备状态监测系统一般包括传感器、数据采集装置、数据传输网络、数据存储显示等部分。张旭等^[9]设计了双滚筒采煤机实时监测系统,对采煤机采高状态、牵引速度、工作面倾角及运行位置进行实时监测,并将相关信息通过 CAN 总线传输至井下分站,再通过工业以太网将数据传输到井上监控室,在可视化平台模拟井下采煤机工作的动态画面并显示监测数据。赵端等^[10]针对井下工作面的环境及液压支架分布特点,设计了基于 ZigBee 技术的井下液压支架压力监测系统,实现了液压支架前柱、后柱和前伸梁压力值的实时监测与周期性监测,为井上人员分析

煤层初次来压和周期来压提供了数据。黄丹群^[11]采用 WaveMesh 无线自组网技术设计了井下液压支架压力在线监测系统,可实时精确地监测井下液压支架的压力变化。毛清华等^[12]针对煤矿悬臂式掘进机空间位姿的监测需求,提出了一种多传感器信息的煤矿悬臂式掘进机空间位姿监测系统方案,该方案利用油缸行程传感器检测截割臂姿态角,利用超声、激光和惯导与地磁融合的组合惯导检测掘进机机身空间位姿,实现了煤矿悬臂式掘进机位姿实时精确监测。李宏伟等^[13]基于 RS485 和 CAN 总线,设计了一套煤矿带式输送机监控系统,该系统具有监控功能完备、故障定位准确、通信实时可靠等优点。周李兵^[14]设计了一种基于 STM32F4 主控芯片的煤矿机电设备预测性维护用采集计算平台,该平台可并行高速采集煤矿机电设备振动、温度、压力等数据并实时进行快速傅里叶变换、包络谱分析等处理,准确判断机电设备不同部件的运行状况和故障,满足现场实时计算、就地分析、灵活布置的需求。

从以上文献可看出,设备状态监测的相关研究取得了丰硕成果,针对煤矿机电设备建立了较为完备的状态监测系统,能够准确及时地获取设备参数(如振动、温度、压力、电参数、位置、速度等),并实现了数据显示、存储、传输等功能,为设备的故障诊断提供了数据支持。

1.3 信号分析与处理研究

对采集得到的信号进行分析和处理是获取设备故障特征的重要一环,将直接决定诊断的准确性和可靠性。段蛟龙等^[15]建立了采煤机摇臂直齿轮局部故障振动信号模型,在此基础上,分析了行星齿轮结构特征及振动信号产生和变化规律,并进行了试验,对采集的试验振动信号进行了频谱分析,应用频谱分析法实现了摇臂齿轮局部故障诊断。杨祥等^[16]针对振动信号降噪方法中经验模态分解存在模态混叠等问题,提出了一种基于集合经验模态分解(EEMD)和快速独立分量分析(FastICA)的矿用带式输送机驱动滚筒轴承振动信号降噪方法,该方法有效滤除了原始振动信号中包含的噪声,使得驱动滚筒轴承运行状态特征信息更加明显,提高了故障诊断的准确性。朱敏等^[17]为解决在复杂信号中提取有用故障信号的问题,提出了一种基于 EEMD 和小波包的优良降噪算法,用该算法处理振动筛轴承仿真信号,可保留故障信号,滤除其他信号;用该算法分析实测振动筛轴承信号,降噪效果好。郭文琪等^[18]对矿井离心泵振动信号进行小波包分解,提取特征频段,比较各频段能量值,缩小频率分析范围,并在此基础上对原动机接线端的电信

号进行频谱分析,将故障特征频率与 3 次谐波频率分离,从而精确提取到故障特征频率。王伟等^[19]针对矿用机电设备齿轮箱故障特征难以提取的问题,提出采用平移不变多小波相邻系数的降噪方法,提取出齿轮箱的故障特征频率,为故障诊断提供了准确依据。

从以上文献可看出,在信号分析与处理研究方面,除了采用传统的时域、频域和时频域分析方法外,还将多种方法结合的手段用于信号处理与特征提取,提高了信号处理效率和处理结果的可靠性。

1.4 诊断与预测算法研究

掌握设备运行状态后,判定设备当前是否存在故障,并对设备未来的发展趋势进行预测。王浩宇等^[20]基于极限学习机训练的神经网络搭建了主要通风机故障诊断模型,设计了一种矿井主要通风机的故障诊断系统,该系统中极限学习机算法运行时间短、故障诊断准确率高,能够实现主要通风机故障的实时、准确诊断。张梅等^[21]基于模糊故障树和贝叶斯网络,提出了一种矿井提升机快速故障诊断方法,以矿井提升机液压制动部分故障为例进行分析,该方法可快速、准确诊断提升机故障类型和故障点。孟宪刚等^[22]提出了一种基于模糊 Petri 网的矿井提升机减速系统故障诊断方法,通过建立提升机故障的模糊 Petri 网模型,利用与其对应的递推状态方程,结合矩阵运算,找出系统中的故障可能性模糊值排序,并依次进行故障排查,还可同时兼顾故障的传递性和模糊性,且模型清晰,结构直观,可以有效提高矿井提升机减速系统故障诊断的效率。曹现刚等^[23]提出了基于振动图像和动态卷积神经网络(DCNN)的采煤机滚动轴承故障诊断模型,该方法不但识别准确率高且诊断时间短,对复杂高噪声工况下的滚动轴承故障诊断具有较好的诊断性能。杨健健等^[24]提出了变异自适应粒子群优化(VSAPSO)算法,构建 VSAPSO-BP 神经网络对掘进机回转台不同故障进行监测,可准确有效地监测掘进机回转台的异常情况。林广旭^[25]提出了一种基于 BP 神经网络的带式输送机张紧力预测方法,该方法根据负载与张紧力的函数关系,通过 BP 神经网络对带式输送机的负载进行预测,根据负载实时预测张紧力,再根据预测的张紧力对带式输送机进行自适应调控,该方法的预测精度较高,满足带式输送机张紧力预测的需求。高正中等^[26]将 Petri 网理论应用于井下水泵的故障诊断中,建立了基于模糊 Petri 网和状态监测的井下水泵故障诊断模型,该模型以处理后的振动信号作为模糊化的特征向量输入,并引入神经网络中的 BP 算法对网络参数进行优化训练,能较准确地找到水泵故障原因,具有较

好的准确性和自适应性。

从智能算法的研究现状来看,主要采用人工神经网络及机器学习、深度学习等智能算法建立设备故障诊断与预测模型,从而实现故障的智能诊断和预测。

2 存在的问题

(1) 设备的故障机理研究不足。煤矿机电设备往往体积庞大,结构复杂,对于该类型设备进行故障机理研究时,往往需要对研究对象进行一定程度的简化,才可以建立相应的数学和力学模型,通过仿真等手段验证模型是否有效,再结合试验修正模型。过度简化的数学模型不能完整反映设备本身全部的状态信息,甚至可能会丢失反映设备故障状态的重要特征,这会给诊断工作增加难度。因此,在机理研究方面需要进一步深入研究,建立能够尽可能反映设备状态的简化模型(包括数学模型和试验模型),合理地添加典型故障。目前对于设备故障机理的研究多集中于设备某种单一故障的机理研究,缺少多故障复合状态下的故障机理研究,今后需要更多地对设备某部分故障带来的连锁反应进行研究。

(2) 煤矿现场的故障数据不足。随着煤矿信息化程度的不断提高,获取设备实时运行状态的数据已不再困难。但由于监测时间有限,目前获取的设备运行过程中含有故障的数据较少,而故障数据是对设备故障诊断与预测性维护具有重要意义的数据。目前诸多研究中普遍采用搭建试验台或计算机仿真的方法来模拟故障,但是模拟环境下所获得的故障数据往往比较理想,不能完全真实反映设备实际的运行状况。因此,仍需长时间不断采集现场监测数据,最好是设备全生命周期数据,这对于设备的诊断和预测具有重要意义。

(3) 诊断和预测的智能化程度不高。在目前的诊断与预测算法研究中,往往是人为设定或修改相应参数以实现设备正常工作或故障状态的切换,算法的推广程度和普适性有待进一步验证。因此,需进一步研究基于人工智能算法的智能诊断与预测方法。目前研究中的诊断与预测算法大多采用某种单一算法,采用组合式的算法研究较少,同时研究对象更多局限在设备某个部分或零部件,借助海量数据对整个大型设备进行诊断和预测算法的研究较少。因此若能采用多种有效算法组合对设备整体进行诊断与预测,将对设备的智能化维护具有更重要的意义。

3 发展趋势

(1) 设备早期故障的识别。对煤矿机电设备未

来运行状态进行预判,是设备故障诊断与预知性维护研究的终极目标。要实现该目标,就需要在设备出现故障的早期及时发现故障并采取相应的维护手段。研究应用灵敏度更高的智能传感器来监测设备,结合随机共振、盲源分离等方法从强噪声中提取微弱的特征信号,使得设备早期故障被及时地识别出,从而实现预测性维护。

(2) 复杂机电设备的多故障耦合的诊断与预测。在实际工况环境下,设备故障复杂多变,一个故障源可能引起链式反应,导致更大故障发生。采用独立的诊断方法,已经不能适应实际设备的诊断需求。基于多传感器信息融合技术的诊断和预测可准确地识别出设备存在的所有故障,这对故障诊断与预测性维护的研究具有重要意义。

(3) 仿真与试验数据对现场设备诊断与预测的指导。仿真与试验手段仍是获取典型故障特征的重要手段。深度学习中迁移学习的应用,可有效解决不同数据集之间数据分布差异性的问题,将迁移学习算法作为“桥梁”,建立仿真、试验数据与现场数据的相关性,为解决仿真与试验条件和现场条件差异的问题提供数据支持和保障。

4 结语

在智慧矿山建设的背景下,煤矿机电设备的故障诊断与预测性维护必将迈入新阶段。随着人工智能、大数据、物联网等技术的飞速发展,智能传感技术结合随机共振、盲源分离等方法,可及时识别设备早期故障;借助多传感器信息融合技术可准确有效地识别出设备存在的耦合故障;利用迁移学习算法可以建立仿真、试验数据与现场数据的相关性,对现场设备进行诊断与预测。今后应从这3个方面展开深入研究,将智能化故障诊断与预测更好地应用于煤矿机电设备的维护管理中,保障设备安全可靠运行。

参考文献(References):

[1] 孙春升,宋晓波,弓海军. 煤矿智慧矿山建设策略研究[J]. 煤炭工程,2021,53(2):191-196.
SUN Chunsheng, SONG Xiaobo, GONG Haijun. Construction strategy of intelligent coal mine[J]. Coal Engineering,2021,53(2):191-196.

[2] 陈予恕. 机械故障诊断的非线性动力学原理[J]. 机械工程学报,2007,43(1):25-34.
CHEN Yushu. Nonlinear dynamical principle of mechanical fault diagnosis [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2007,43(1):25-34.

[3] 李占芳. 矿井提升系统振动特性及典型故障诊断研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2008.

LI Zhanfang. Study on the vibration characteristic and typical fault diagnosis of mine hoist system [D]. Xuzhou:China University of Mining & Technology, 2008.

[4] 崔国梁,孟国营,丁铖. 基于频谱分析的主扇风机转子不平衡的故障诊断[J]. 煤矿机械,2012,33(10):273-274.
CUI Guoliang, MENG Guoying, DING Cheng. Fault diagnosis of main fan rotor imbalance based on spectrum analysis [J]. Coal Mine Machinery, 2012, 33(10):273-274.

[5] LIU Yue, SUO Shuangfu, MENG Guoying, et al. A theoretical rigid body model of vibrating screen for spring failure diagnosis[J]. Mathematics,2019,7(3):1-18.

[6] 张延超,吴鲁纪,尹明虎,等. 某型采煤机摇臂传动系统故障机理分析[J]. 机械传动,2018,42(11):137-141.
ZHANG Yanchao, WU Luji, YIN Minghu, et al. Fault mechanism analysis of transmission system for a shearer rocker arm [J]. Journal of Mechanical Transmission,2018,42(11):137-141.

[7] 李伟. 基于虚拟样机技术的矿用重载减速器故障模拟研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京),2012.
LI Wei. Research on fault simulation of mine-used heavy load reducer based on virtual prototyping technology[D]. Beijing:China University of Mining & Technology(Beijing),2012.

[8] 赵军. 煤矿轴流式风机喘振机理与故障消除研究[J]. 水力采煤与管道运输,2019(2):30-31.
ZHAO Jun. Mechanism of surging of axial-flow ventilator in operation and study of countermeasures [J]. Hydraulic Coal Mining & Pipeline Transportation,2019(2):30-31.

[9] 张旭,张鹏程,孟国营,等. 采煤机截割工况实时监测系统及可视化平台的开发[J]. 煤炭工程,2008,40(3):101-103.
ZHANG Xu, ZHANG Pengcheng, MENG Guoying, et al. Development of on time monitoring and measuring system and visualized platform for coal cutting performances of coal shearer [J]. Coal Engineering,2008,40(3):101-103.

[10] 赵端,纵鑫. 基于 ZigBee 技术的井下液压支架压力监测系统的设计[J]. 工矿自动化,2014,40(1):31-34.
ZHAO Duan, ZONG Xin. Design of pressure monitoring system of underground hydraulic support based on ZigBee technology[J]. Industry and Mine Automation,2014,40(1):31-34.

[11] 黄丹群. 井下液压支架压力在线监测系统的设计[J]. 工矿自动化,2015,41(12):9-11.
HUANG Danqun. Design of online pressure monitoring system of underground hydraulic support

- [J]. Industry and Mine Automation, 2015, 41(12): 9-11.
- [12] 毛清华, 张旭辉, 马宏伟, 等. 多传感器信息的悬臂式掘进机空间位姿监测系统研究[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(12): 41-47.
- MAO Qinghua, ZHANG Xuhui, MA Hongwei, et al. Study on spatial position and posture monitoring system of boom-type roadheader based on multi sensor information[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(12): 41-47.
- [13] 李宏伟, 李璐, 曲兵妮, 等. 基于 RS485 和 CAN 总线的带式输送机监控系统设计[J]. 煤炭工程, 2017, 49(7): 18-21.
- LI Hongwei, LI Lu, QU Bingni, et al. Design of belt conveyor monitoring system based on RS485 and CAN bus[J]. Coal Engineering, 2017, 49(7): 18-21.
- [14] 周李兵. 煤矿机电设备预测性维护用采集计算平台设计[J]. 工矿自动化, 2020, 46(8): 106-111.
- ZHOU Libing. Design of collecting and computing platform used for predictive maintenance of coal mine electromechanical equipment[J]. Industry and Mine Automation, 2020, 46(8): 106-111.
- [15] 段蛟龙, 许春雨, 宋建成, 等. 基于振动模型的采煤机摇臂齿轮局部故障频谱分析[J]. 工矿自动化, 2016, 42(7): 34-39.
- DUAN Jiaolong, XU Chunyu, SONG Jiancheng, et al. Spectrum analysis of partial failure of shearer rocker gear based on vibration model[J]. Industry and Mine Automation, 2016, 42(7): 34-39.
- [16] 杨祥, 田慕琴, 李璐, 等. 矿用带式输送机驱动滚筒轴承振动信号降噪方法[J]. 工矿自动化, 2019, 45(3): 66-70.
- YANG Xiang, TIAN Muqin, LI Lu, et al. Vibration signal denoising method for drive roller bearing of mine-used belt conveyor [J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(3): 66-70.
- [17] 朱敏, 段志善, 郭宝良. EEMD 结合小波包的振动筛轴承信号降噪效果分析[J]. 机械设计与制造, 2020(5): 63-67.
- ZHU Min, DUAN Zhishan, GUO Baoliang. Denoising analysis of vibration screen bearing signal based on EEMD and wavelet packet[J]. Machinery Design & Manufacture, 2020(5): 63-67.
- [18] 郭文琪, 田慕琴, 宋建成, 等. 基于多源信号融合的离心泵叶轮磨损故障分析[J]. 工矿自动化, 2018, 44(6): 74-79.
- GUO Wenqi, TIAN Muqin, SONG Jiancheng, et al. Wear fault analysis of centrifugal pump impeller based on multi-source signal fusion[J]. Industry and Mine Automation, 2018, 44(6): 74-79.
- [19] 华伟, 牛振华, 王志阳, 等. 基于平移不变多小波相邻系数的矿用齿轮箱故障诊断[J]. 煤炭学报, 2016, 41(增刊 1): 253-258.
- HUA Wei, NIU Zhenhua, WANG Zhiyang, et al. Mine gearbox fault diagnosis based on neighboring coefficients of translation-invariant multiwavelets[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(S1): 253-258.
- [20] 王浩宇, 陈颖, 缪燕子, 等. 一种矿井主要通风机故障诊断系统[J]. 工矿自动化, 2017, 43(6): 69-71.
- WANG Haoyu, CHEN Ying, MIAO Yanzi, et al. A fault diagnosis system of mine main ventilator[J]. Industry and Mine Automation, 2017, 43(6): 69-71.
- [21] 张梅, 许桃, 孙辉煌, 等. 基于模糊故障树和贝叶斯网络的矿井提升机故障诊断[J]. 工矿自动化, 2020, 46(11): 1-5.
- ZHANG Mei, XU Tao, SUN Huihuang, et al. Fault diagnosis of mine hoist based on fuzzy fault tree and bayesian network[J]. Industry and Mine Automation 2020, 46(11): 1-5.
- [22] 孟宪刚, 于晓, 李晓静. 基于模糊 Petri 网的矿井提升机减速系统故障诊断[J]. 工矿自动化, 2019, 45(6): 91-95.
- MENG Xiangang, YU Xiao, LI Xiaojing. Fault diagnosis of mine hoist deceleration system based on fuzzy Petri net[J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(6): 91-95.
- [23] 曹现刚, 张国祯, 张鑫媛, 等. 基于振动图像和 DCNN 的采煤机滚动轴承故障诊断[J]. 煤矿机械, 2020, 41(7): 149-152.
- CAO Xiangang, ZHANG Guozhen, ZHANG Xinyuan, et al. Fault diagnosis of shearer rolling bearing based on vibration image and DCNN[J]. Coal Mine Machinery, 2020, 41(7): 149-152.
- [24] 杨健健, 唐至威, 王晓林, 等. 单类学习下基于 VSAPSO-BP 的掘进机异常检测方法[J]. 振动. 测试与诊断, 2019, 39(1): 130-135.
- YANG Jianjian, TANG Zhiwei, WANG Xiaolin, et al. Roadheader anomaly detection method based on VSAPSO-BP under the single category learning[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2019, 39(1): 130-135.
- [25] 林广旭. 矿用带式输送机张紧力预测方法[J]. 工矿自动化, 2018, 44(10): 38-42.
- LIN Guangxu. Tension force prediction method for mine-used belt conveyor [J]. Industry and Mine Automation, 2018, 44(10): 38-42.
- [26] 高正中, 龚群英, 赵丽娜, 等. 基于模糊 Petri 网和状态监测的井下水泵故障诊断[J]. 工矿自动化, 2016, 42(5): 28-31.
- GAO Zhengzhong, GONG Qunying, ZHAO Lina, et al. Fault diagnosis of underground water pump based on fuzzy Petri net and condition monitoring [J]. Industry and Mine Automation, 2016, 42(5): 28-31.