

# 煤矿机械工作状态监测系统研究\*

张文栋, 薛晨阳

(中北大学仪器与动态测试教育部重点实验室 太原, 030051)

**摘要** 煤炭是当今社会的一种重要化石能源,煤机械设备是煤矿企业实现机械化的核心装备,对其工作状态进行监测具有重要的经济价值和安全生产需求。笔者综述了煤矿机械设备的主要故障类型、产生的原因以及故障的表现形式,根据信号采集时煤机设备是否需要停机以及故障诊断的时效性,总结了机械故障诊断的方法及其特点;分析了不同类型无线网络传输技术、不同种类微能源技术的特点及其在煤矿中应用的可行性;同时,针对当前煤矿机械工作状态监测系统的不足,提出了基于微能源技术实现煤矿机械设备工作状态信息采集与发送系统自供电,结合 Zigbee 无线网络传输和通用分组无线服务技术(general packet radio service,简称 GPRS)通信方式实现煤矿机械设备工作状态监测系统自动化在线监测的发展方向。

**关键词** 煤炭; 能源; 自动化; 煤矿机械; 状态监测系统; 微能源技术; 无线传感网络

**中图分类号** TD50; TH89

## 引言

采煤机、掘进机、皮带机等大型设备是现代煤矿企业从事全自动化综采的核心装备,其良好的工作状态对提高煤矿生产效率、降低企业生产成本和减少煤炭开采百万吨死亡率具有重要的支撑作用<sup>[1-4]</sup>。如何确保煤机设备正常运转,关键在于捕捉煤机运行中的细微异常信号,及时对其进行预知判断和反馈,建立对煤机故障实时、准确、高效的监测、诊断和维修的数据管理架构和智能运行体系。根据不同的企业规模和运作方式,现有煤机故障诊断方式种类繁多,但归结为线上和线下两种方式,其共性问题为以人工为核心<sup>[5]</sup>。面向智能化装备升级和物联网应用背景,将传统的“人-机”交互监测模式提升为“机器-传感网络”大数据协同模式,将极大提升煤机监测效率、降低严重故障概率。本研究针对煤机状态监测现状及存在的技术瓶颈,梳理和分析不同状态监测方式的特点,旨在探讨该领域的发展趋势并提出其重点研究方向,对提升传统能源领域装备智能化升级改造具有普遍的现实意义和重要的研究价值。

## 1 煤机故障类型及成因分析

采煤机械设备主要由机械系统、电气系统和液

压系统三部分组成<sup>[6-7]</sup>。面对空气环境潮湿、粉尘多以及煤炭和矿石的冲击等恶劣环境作用和长时间运转造成的磨损、疲劳等综合原因,采煤机械设备不可避免产生各种机械故障。

液压系统是采煤机械设备最容易出现故障的部分,液压油受到污染是其产生故障的主要因素。煤矿井下潮湿环境中的氧气、硫化物等气体会使液压系统的密封件逐渐被氧化、腐蚀,密封不良导致液压油泄露和压力降低。液压系统工作过程中矿井下的灰尘、煤炭微颗粒等杂质会经过液压缸活塞杆进入液压油中;接触且有相对运动的部件磨擦产生的颗粒也会直接进入液压油中;在正常的维护保养过程中,周围环境中的杂质也会进入液压油中;液压油在长时间的工作过程中由于高温、氧化等原因变成杂质。液压油中杂质的累积会造成管路的堵塞,会引起液压油压的升高,增加相对运动部件之间的摩擦力产生大量的热<sup>[8-10]</sup>。因此,液压系统的故障主要表现为液压油品质的降低、压力和温度的变化。

轴承、齿轮等旋转部件是煤机设备机械系统出现故障最多的部分,其出现故障主要由以下几方面原因。工作环境中的粉尘、运动部件上的磨屑等杂质进入润滑油中使轴承、齿轮等部件旋转不良,使系统产生异常的振动并会产生大量的热。温度的升高又会导致部件受到回火烧伤,其硬度与耐磨性受到严重影响。采煤机械设备在运行过程中,煤矿或岩

\* 国家高技术研究发展计划(“八六三”计划)资助项目(2015AA042601)

收稿日期:2018-05-05;修回日期:2018-05-22

石的冲击会使轴承、齿轮等旋转部件产生轴向位置偏离,使旋转部件受到很大的摩擦力,其表面受到严重的磨损、产生剧烈的振动和温度的升高。采煤机械设备在持续的工作过程,轴承、齿轮长时间高速运转、超负荷的工作等原因会受到过大的应力,当超过疲劳极限状态时会在表面出现裂纹甚至断裂<sup>[11-12]</sup>。因此,机械系统出现故障主要表现为振动异常和温度升高。

电气系统出现故障的主要原因是接触不良和电子元器件异常。电路板上的电子元器件长期处在煤矿井下潮湿、含有硫化物的酸性环境中其极易产生老化等问题。煤矿井下的粉尘、颗粒物等累积到电路表面会影响其散热能力导致元器件的寿命降低。电气连接部分长期受到旋转部分不平衡引起的振动、煤炭和矿石对设备的冲击的作用会产生接触不良问题<sup>[13]</sup>。因此,电气系统的故障主要表现为电信号缺失和增加发热。

煤矿机械设备的故障主要体现在温度的变化、振动信号的异常和液压油品质的变化,通过对这些量的监测可以判断其工作状态。

## 2 状态监测类型、特点及发展趋势

目前,典型的设备状态监测方式主要有 3 种:离线定期监测方式、在线监测离线分析方式和自动在线监测分析方式。

离线定期监测方式是最早得到应用的监测方式。它需要专业的测试人员定期到设备现场对各个监测点进行监测,这种方式测试设备简单、成本低,在小型煤矿企业和设备状态监测的初期得到了大量应用。但该方式存在需要专业的技术人员,监测不灵活;设备需要停机监测,影响企业生产效率;监测过程繁琐,时间长等缺点。该种监测方式在机械设备状态监测中已经很少使用。针对这种监测方式的不足,一种在线监测离线分析方式的得到发展。由于已在机械设备各监测点布放了相关传感器在设备现场进行信号采集,再由专业的技术人员对采集到的信号进行分析诊断,避免了设备停机,简化了监测过程,不会影响企业正常的生产活动。该种监测方式是现在状态监测的主要方式。上述这两种监测方式都需要专业的技术人员将采信到的信号进行离线分析,时效性、灵活性比较差,不能及时地发现设备存在故障,可能会导致设备产生“二次损伤”,造成设备的重大故障和安全隐患。随着物联网以及人工智能技术的发展,自动在线监测分析方式成为了可能。

这种方式可以实现对设备工作状态监测并对设备的工作状态进行分析,可以及时发现设备存在的故障、不需要专业的技术人员<sup>[14-18]</sup>。这种检测方式需要建立无线传感器网络 and 智能诊断系统,将成为未来煤矿机械设备状态监测的重要方式。

## 3 监测系统技术特点及实现方式

采煤机械设备有大量的旋转部件,其监测信号用有线方式传输会产生导线缠绕的问题。线缆存在成本高、扩展性差和信号容易被干扰的问题。煤矿井下的复杂环境也容易使线缆老化和损坏。无线传感技术可以有效地解决上述问题,由于使用电池为无线传感器件供电需要定期更换电池,会影响企业的生产效率。因此,将无线传感技术与微能源技术集成应用是未来自动在线监测分析方式的发展方向<sup>[19-20]</sup>。

### 3.1 无线传输技术

无线电波在环境复杂的煤矿井下传输的质量与其频率密切相关。研究表明,频率低于 30 MHz 时其衰减与频率负相关;频率大于 30 MHz 时其衰减与频率正相关,频率高于 300 MHz 的无线电波在煤矿井中传输具有较好的效果<sup>[21-22]</sup>。

蓝牙技术是 Ericsson 在 1994 年发明的无线通讯技术,其工作频段为 2.4 GHz。蓝牙具有传输损耗小、可穿透障碍物、可实现点对点或点对多点的数据传输和成本低等特点<sup>[23-24]</sup>。蓝牙 4.0 标准发射功率低,能够满足煤矿井下安全性的要求,是煤矿井下无线网络的一种重要技术<sup>[25-27]</sup>。WIFI 技术是在 802.11 标准协议基础上定义的工作频段为 2.4 和 2.5 GHz 的局域网。WIFI 具有传输速度快、带宽宽、业务可以集成、投资成本低以及相对健康安全等优点<sup>[28-29]</sup>。文献[30-32]证明了 2.4 GHz 频段在煤矿井下应用的可行性,目前,WIFI 技术已在煤矿井下得到了应用。通用分组无线服务技术(general packet radio service,简称 GPRS)核心层使用网络之间互连的协议(internet protocol,简称 IP)技术,可实现分组数据的高效、低成本传输。随着煤矿信息化升级改造,现有大型煤矿均采用 3G 网络进行井下和地面通信,煤矿井下沿岩壁布放有线缆至工作面,是一种重要的井下信息传输手段<sup>[33-35]</sup>。紫蜂协议(Zigbee)是一种新兴的近距离无线通信技术,具有强大的组网能力、广阔的适应面、良好的节能性以及高可靠性<sup>[36]</sup>。其无线通信技术具有成本低、功

耗小、网络容量大、时延短和可靠性高的特点,在构建煤矿井下的无线网络中扮演重要的角色<sup>[37]</sup>。

紫蜂协议(Zigbee)与其他无线通信相比,最突出的优点在于其超低的功耗,两节 5 号干电池可使用 6 个多月。而 GPRS 技术已在煤矿井下得到了普及应用,可以将煤矿井下的信号传输到地面。因此,将煤机设备上的状态监测信息无线传送到一个中间节点,然后通过 GPRS 技术传送到地面是一种可行性高、成本低的方式。

### 3.2 微能源技术

微能源技术是收集转化环境中的风能、热能、太阳能、化学能和振动能等微能量的技术。单一的微能源技术都具有各自的优点,但也存在其固有的不足,单一形式的能量采集也存在效率低的问题。因此,复合式微能源收集方案成为当前研究的热点。

王中林等<sup>[38-42]</sup>在 2012 年首次提出了摩擦纳米发电机的概念,它利用静电感应和摩擦起电的耦合作用将机械能转化为电能。摩擦纳米发电机(triboelectric nanogenerators,简称 TENG)是一种有效的能量收集方式,具有输出电压高(几百伏),短路电流小(通常小于几毫安),响应频率低的特点,在低频能量采集中具有特殊的应用优势。电磁发电机(electromagnetic generator,简称 EMG)是一种经典而有效的能量收集方法,电磁能量采集方式具有输出功率高、能量密度大、电压稳定可调、电源性能好以及使用可靠等特点<sup>[43]</sup>。随着材料科学的发展,基于压电效应的压电发生器(piezoelectric nanogenerator,简称 PNG)也越来越受到欢迎,压电发电机可以有效采集冲击振动能量<sup>[44]</sup>。热能是环境中随处可在的一种能源,根据贝克效应制作温差电池可以收集环境中的热能。该种发电方式具有可靠性高、维护简单和能够适合恶劣环境等优点。在煤矿井下虽然热能很高,但是温差小,温差发电的热电转换效率低<sup>[45]</sup>。风能是由于环境中的空气流动产生的动能,具有清洁无污染的特点。由于风能不稳定,需要相应的转换电路以及转换效率较低等不足。

煤矿井下存在各种形式的微能量,考虑到能量的来源质量和转换的效率等因素,热能和风能很难广泛应用,以振动为微能量来源的采集方式具有很高的可行性,电磁-摩擦-压电复合式微能源采集方式是煤矿井下未来发展的趋势。笔者课题组设计的基于微能源技术的低功耗无线监测单元示意图如图 1 所示,结构如图 2 所示。

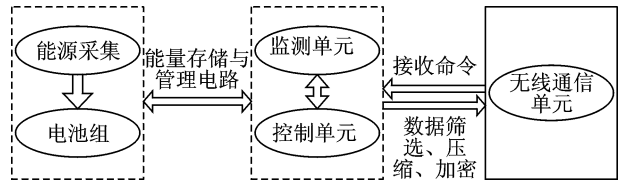


图 1 基于微能源技术的低功耗无线监测单元示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of low power wireless monitoring unit based on micro energy technology

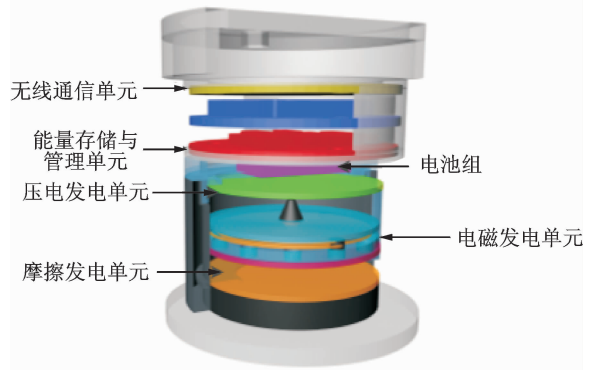


图 2 基于微能源技术的低功耗无线监测单元结构图  
Fig. 2 The structure of low power wireless monitoring unit based on micro energy technology

## 4 故障诊断分析方法及应用

机械故障诊断的方法可分为基于模型的方法、基于信号处理的方法和基于知识的方法(人工智能方法)三大类。基于模型的机械故障诊断方法主要有等价空间法、状态估计法和参数估计法三种。这种方法需要了解机械设备系统的工作机理过程,并依此建立精确数学模型。该方法适用于简单的系统,对于多状态变量、产生大量数据的系统则不适用。基于信号处理的机械故障诊断方法主要包括信号模态估计法、自适应滑动窗格形滤波器法、绝对值检验和趋势检验法、信息融合法和小波变换法。该方法是当前比较成熟且得到了大量应用的一种方法,由于该方法在信号处理过程中某些参数只能人为事先设定,不能随信号特征自动适应,已不能满足采煤机械设备等智能化升级改造的需求。基于知识的机械故障诊断方法主要包括知识观测器法、定性观测器法、神经网络法、模式识别法、模糊推理法和专家系统等。这种方法将提取到的信号特征与机器事先学习的离线数据模型对比进行故障诊断,解决了故障诊断对技术人员依赖程度高、故障诊断数量大与专业技术人员相对不足的问题,可以对机械故障进行可靠、实时的预测性故障诊断。目前,某些智能诊断方法已经得到应用,但单一种类的智能诊断

方法都具有各自的局限性,将不同的智能算法相融合形成一种适用性更强的算法是故障诊断方法的发展方向。

2006年,于波等<sup>[46]</sup>在旋转机械故障诊断中利用小波包函数将采集到的信号进行分解,将能量值作为故障特征提取,实现了故障的有效识别。李军等<sup>[47]</sup>在2018年研究一种将总体经验模态分解法(ensemble empirical mode decomposition,简称EEMD)与互信息法相结合的Hibert-Huang变换方法,仿真和实验结果证明了该方法在机械故障诊断中有效性和可行性。

Lu等<sup>[48]</sup>在2016年提出了一种由经验模态分解(empirical mode decomposition,简称EMD)、多重形谱和改进的反向神经网络(back propagation neural network)组成的故障诊断模型,将其应用于水轮机的工作状态监测和故障诊断中。该方法的特点在于通过经验模态分解(empirical mode decomposition,简称EMD)获得数据信号,利用EMD对振动信号进行识别得到故障信号的近似系数,多重形谱提供了几何分布或者概率信息。

韦建波等<sup>[49]</sup>在2018年提出了一种基于改进的径向基函数(radial basis function,简称RB)神经网络通过梯度下降算法和进化数值混合法相结合的配电网故障诊断模型,在实际的应用结果中具有较高的诊断准确率。

Lü等<sup>[50]</sup>在2016年提出一种基于变分模态分解(variational mode decomposition,简称VMD)和经过免疫遗传算法(immune genetic algorithm,简称IGA)优化的多核支持向量机(multiple kernel support vector machine,简称MKSVM)的机械故障诊断方法。该方法首先将信号用变分模式分解成多个固有模态函数(intrinsic mode function,简称IMF),然后在时频域从固有模态函数提出特征构建特征集,最后用半监督局部线性嵌入进行融合和降维。实验结果表明,该方法大大提高了机械故障诊断的精度,提高了机械故障诊断的通用性。

深度学习作为大数据处理的工具,具有极高的处理复杂识别任务的能力,在很多传统的识别任务上都具有较高的识别准确率。其在对特征提取和模式识别具有较高要求的机械故障诊断中具有良好的应用前景。深度学习主要运用在深度置信网络<sup>[51]</sup>、卷积神经网络<sup>[52]</sup>、堆叠自动编码器<sup>[53-54]</sup>和递归神经网络<sup>[55-57]</sup>四种模型中。

刘林凡<sup>[58]</sup>在2017年综述了深度学习在故障诊断中应用的研究现状和技术难点,并展望了深度学

习在故障诊断中的应用前景。Pan等<sup>[59]</sup>提出了一种从复杂机械故障数据中进行分层特征学习的深度学习网络方法进行故障识别,该方法主要包括分离层、预测层、更新层、汇聚层和全连接层。

## 5 无线监测系统发展方向

随着机械设备故障诊断技术、微机电系统(micro-electro-mechanical system,简称MEMS)技术、物联网技术、人工智能以及大数据技术的融合发展,无线监测系统将会朝着以下几个方向发展:

1) 集成化和小型化微机电系统技术可以实现单一芯片对采煤机械设备温度、压力和振动等信号的检测,在未来的发展中采煤机械设备所使用的传感器芯片将具备功能多、体积小和成本低的特点。

2) 建立数据库。随着采煤机械设备故障信号大数据库的建立,设备故障将不再必需专业的技术人员进行诊断,而且可以提前诊断人不易发现的机械故障。

3) 智能化。无线监测系统将实现自供电,系统将能自主判断进行能量收集与存储、电池与传感器的管理以及信号的发送等。

4) 可视化。随着虚拟现实技术的发展,采煤机械设备将把监测到的故障原因、位置等信息直观地展现在操作人员面前,实现采煤机械设备的及时、准确维修。

5) 网络化。将同一设备的不同监测点、不同监测设备之间的监测点同时进行监测和信号传输。

6) 远程化。将采集到的设备工作状态信息传输到监控中心进行处理,实现一个信号处理中心可以同时监测多个设备的目标。

## 参 考 文 献

- [1] 李鹏. 煤炭开采的科学技术与管理[J]. 能源与节能, 2014(9):17-18.  
Li Peng. Scientific technologies and management of coal mining[J]. Energy and Energy Conservation, 2014(9):17-18. (in Chinese)
- [2] 魏明明. 面向采煤机械自供电监测系统的无线终端设计[D]. 太原:中北大学,2016.
- [3] 李国辉. 煤矿机电设备的状态监测与故障诊断[J]. 价值工程, 2012, 31(15):39.  
Li Guohui. Monitoring and fault diagnosis of the conditions of electrical and mechanical equipments of coal mine[J]. Value Engineering, 2012, 31(15):39. (in

- Chinese)
- [4] Huang Jianfeng, Chen Guohua, Shu Lei, et al. WSNs-based mechanical equipment state monitoring and fault diagnosis in China[J]. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2015, 2015(4):15.
- [5] 李刚, 邵锋, 曹望广. 离线状态监测系统在设备故障诊断中的应用[J]. *设备管理与维修*, 2017(6):115-117.
- Li Gang, Shao Feng, Cao Wangguang. Application of off-line condition monitoring system in equipment fault diagnosis[J]. *Plant Maintenance Engineering*, 2017(6):115-117. (in Chinese)
- [6] 黄建锋, 李宁波. 采煤机机械故障分析及处理[J]. *科技视界*, 2017(9):106.
- Huang Jianfeng, Li Ningbo. Analysis and treatment of mechanical fault of shearer[J]. *Science & Technology Vision*, 2017(9):106. (in Chinese)
- [7] 张建伟, 张长合. 浅析采煤机故障及诊断方法[J]. *中国高新技术企业*, 2012(26):120-124.
- Zhang Jianwei, Zhang Changhe. Analysis of fault and diagnosis method of Shearer [J]. *China High-Tech Enterprises*, 2012(26):120-124. (in Chinese)
- [8] Si Lei, Wang Zhongbin, Liu Xinhua, et al. Identification of shearer cutting patterns using vibration signals based on a least squares support vector machine with an improved fruit fly optimization algorithm[J]. *Sensors*, 2016, 16(1):90.
- [9] 魏晋萍. 采煤机的故障分析与诊断及其发展趋势[J]. *山东工业技术*, 2016(11):88.
- Wei Jinping. Fault analysis and diagnosis of shearer and its development trend [J]. *Shandong Industrial Technology*, 2016(11):88. (in Chinese)
- [10] 普亚松, 郭德伟, 张文斌. 故障诊断技术在煤矿机械设备中的应用[J]. *工矿自动化*, 2015, 41(4):36-39.
- Pu Yasong, Guo Dewei, Zhang Wenbin. Application of fault diagnosis technologies in coal mine machinery [J]. *Industry and Mine Automation*, 2015, 41(4):36-39. (in Chinese)
- [11] 王猷和. 煤矿机械设备的故障及维修与养护[J]. *民营科技*, 2011(9):420.
- Wang Xianhe. Fault, service and maintenance of coal mine machinery equipment [J]. *Minying Keji*, 2011(9):420. (in Chinese)
- [12] 李天宇. 煤矿机械设备的故障维修及预防措施研究[J]. *科技致富向导*, 2013(32):39-40.
- Li Tianyu. Fault maintenance and preventive measures of coal mine machinery and equipment [J]. *Guide of Sci-tech Magazine*, 2013(32):39-40. (in Chinese)
- [13] 李向东. 基于状态监测的采煤机械故障检修研究[J]. *内蒙古煤炭经济*, 2017(14):56-57.
- Li Xiangdong. Fault detection and maintenance of mining machinery based on condition monitoring [J]. *Inner Mongolia Coal Economy*, 2017(14):56-57. (in Chinese)
- [14] 徐小力, 梁福平, 许宝杰, 等. 旋转机械状态监测及预测技术的发展与研究[J]. *建设机械技术与管理*, 2003, 16(7):20-24.
- Xu Xiaoli, Liang Fuping, Xu Baojie, et al. Development and research of condition monitoring and prediction technology for rotating machinery [J]. *Technology & Management for Construction Machinery*, 2003, 16(7):20-24. (in Chinese)
- [15] 张弘. 关于旋转机械状态监测及预测技术的发展研究[J]. *黑龙江科技信息*, 2009(15):23.
- Zhang Hong. Development of condition monitoring and prediction technology for rotating machinery [J]. *Heilongjiang Science and Technology Information*, 2009(15):23. (in Chinese)
- [16] 徐澎. 对旋转机械状态监测及预测技术的发展研究[J]. *科技创业家*, 2012(3):136.
- Xu Peng. Development of condition monitoring and prediction technology for rotating machinery [J]. *Technological Pioneers*, 2012(3):136. (in Chinese)
- [17] 彭合. 对旋转机械状态监测及预测技术的探讨[J]. *今日科苑*, 2007(16):226.
- Peng He. Discussion on condition monitoring and prediction technology of rotating machinery [J]. *Modern Science*, 2007(16):226. (in Chinese)
- [18] 李健. 煤矿机械设备的故障和维修探究[J]. *硅谷*, 2010(13):127.
- Li Jian. Fault and maintenance of coal mine machinery and equipment [J]. *Silicon Valley*, 2010(13):127. (in Chinese)
- [19] Chen Yanhua, Ou Jing, Ma Xuan. Research on coal mine safety wireless monitoring system based on bluetooth technology[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 765-767:2061-2064.
- [20] Vullers R J M, Van Schaijk R, Visser H J, et al. Energy harvesting for autonomous wireless sensor networks[J]. *Solid-State Circuits Magazine, IEEE*, 2010, 2(2):29-38.
- [21] 薛永刚. 蓝牙技术在煤矿数据传输中的应用研究[D]. 西安:西安科技大学, 2006.
- [22] 张文祥, 徐世国. 蓝牙技术在矿井无线通信中的应用[J]. *煤矿机械*, 2007, 28(7):158-159.
- Zhang Wenxiang, Xu Shiguo. Application of bluetooth used in mine wireless communication[J]. *Coal Mine Machinery*, 2007, 28(7):158-159. (in Chinese)

- [23] 何小哲. 矿井通风系统的评价方法[J]. 青年科学, 2014(10):225.  
He Xiaozhe. Evaluation method of mine ventilation system[J]. Youth Science, 2014(10):225. (in Chinese)
- [25] Sairam K V S S S S, Gunasekaran N, Ready S R. Bluetooth in wireless communication[J]. Urbanism & Architecture, 2015, 40(6):1-9.
- [25] 李柏均. 基于蓝牙和WiFi的矿用无线智能防突仪设计[J]. 自动化与仪器仪表, 2017(6):89-91.  
Li Baijun. Design of mine wireless intelligent outburst prevention instrument based on bluetooth and WiFi[J]. Automation & Instrumentation, 2017(6):89-91. (in Chinese)
- [26] 谭晖. 低功耗蓝牙开发与实战[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2016:4-12.
- [27] Wu Yongping, Guo Feng, Zhang Meng. The study on coal mine using the Bluetooth wireless transmission [C]//2014 IEEE Workshop on Electronics, Computer and Applications. Piscataway, NJ:IEEE, 2014:1016-1018.
- [28] 何雨生. 基于WiFi的煤矿井下语音通信系统设计与实现[J]. 数字技术与应用, 2017(7):157-159.  
He Yusheng. Design and implementation of voice - based communication system based WiFi in coal mine [J]. Digital Technology and Application, 2017(7):157-159. (in Chinese)
- [29] 李培焯, 强蕊. 基于WiFi的煤矿井下应急救援无线通信系统的研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2011, 7(4):139-143.  
Li Peixuan, Qiang Rui. Emergency rescue wireless communications system in mine based on the WiFi[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2011, 7(4):139-143. (in Chinese)
- [30] Ding Enjie, Wang Manyi, Wen Jinchao, et al. Performance evaluation of 2.4 GHz wireless sensor nodes transmission in coal mine[C]//2009 WRI World Congress on Computer Science and Information Engineering. Piscataway, NJ:IEEE, 2009:452-455.
- [31] 吴静然, 李秀凤, 吴倩. 基于WiFi的煤矿井下智能终端设计[J]. 工矿自动化, 2013, 39(4):5-8.  
Wu Jingran, Li Xiufeng, Wu Qian. Design of underground mine intelligent terminal based on WiFi[J]. Industry and Mine Automation, 2013, 39(4):5-8. (in Chinese)
- [32] 王桃, 卢才武, 冯治东. 基于WiFi的煤矿井下生产环境监测系统[J]. 金属矿山, 2012, 41(9):139-142.  
Wang Tao, Lu Caiwu, Feng Zhidong. Underground coal mine production environment monitoring system based on WiFi[J]. Metal Mine, 2012, 41(9):139-142. (in Chinese)
- [33] Luo Xin, Luo Ke. Safety monitoring system under coal mine based on GPRS and CAN bus[J]. Instrument Technique & Sensor, 2008, 37(5):72-73.
- [34] Guo Xiaoyan, Yin Jiting. Gas monitoring system with GPRS for coal mine[J]. Measurement & Control Technology, 2006, 25(12):78-80.
- [35] Cheng Jie, Gao Dianwu, Wang Junfei, et al. Coal mine safety monitoring system based on ZigBee and GPRS[J]. Applied Mechanics & Materials, 2013, 422:215-220.
- [36] Wheeler A. Commercial applications of wireless sensor networks using ZigBee [J]. IEEE Communications Magazine, 2007, 45(4):70-77.
- [37] Yang Wei, Zhang Yu, Liu Yang. Constructing of wireless emergency communication system for underground coal mine based on WMN technology[J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2010, 16(4):441-448.
- [38] Zhang Lei, Zhang Binbin, Chen Jun, et al. Lawn Structured Triboelectric Nanogenerators for Scavenging Sweeping Wind Energy on Rooftops[J]. Advanced Materials, 2016, 28(8):1650-1656.
- [39] Wang Zhonglin, Chen Jun, Lin Long. Progress in triboelectric nanogenerators as a new energy technology and self-powered sensors[J]. Energy & Environmental Science, 2015, 8(8):2250-2282.
- [40] Zhu Guang, Peng Bai, Chen Jun, et al. Triboelectric nanogenerators as a new energy technology: From fundamentals, devices, to applications[J]. Nano Energy, 2015, 14:126-138.
- [41] Zhu Guang, Su Yuanjie, Peng Bai, et al. Harvesting water wave energy by asymmetric screening of electrostatic charges on a nanostructured hydrophobic thin-film surface[J]. ACS Nano, 2014, 8(6):A-G.
- [42] Wang Zhonglin, Song Jinhui. Piezoelectric nanogenerators based on zinc oxide nanowire arrays[J]. Science, 2006, 312(5771):242-246.
- [43] 徐剑萍, 胡军龙. 永磁发电机与电磁发电机对比分析[J]. 移动电源与车辆, 2012(1):43-45.  
Xu Jianping, Hu Junlong. Comparative analysis of permanent magnet generator and electromagnetic generator [J]. Movable Power Station & Vehicle, 2012(1):43-45. (in Chinese)
- [44] Kan Junwu, Wang Shuyun, Peng Shaofeng, et al. Output performance of piezoelectric generators with multi-vibrators[J]. Optics & Precision Engineering, 2011, 19(9):2108-2116.

- [45] 朱俊杰,李美成. 无线传感器微能源自供电技术研究[J]. 可再生能源,2012,30(11):55-60.  
Zhu Junjie, Li Meicheng. Research on micro-energy self-powered technology in wireless sensor networks[J]. Renewable Energy Resources, 2012, 30(11): 55-60. (in Chinese)
- [46] 于波,徐雪娇,郑昕. 基于小波包分解的能量特征提取在旋转机械故障诊断中的应用研究[J]. 化工自动化及仪表,2016,43(10):1056-1059.  
Yu Bo, Xu Xuejiao, Zheng Ting. Applicatoin Research on wavelet packet-based energy feature extraction for fault diagnosis of rotating machinery[J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2016, 43(10): 1056-1059. (in Chinese)
- [47] 李军,李佳,张世义,等. 采用 EEMD 算法与互信息法的机械故障诊断方法[J]. 华侨大学学报:自然科学版,2018(1):7-13.  
Li Jun, Li Jia, Zhang Shiyi, et al. Mechanicla fault diagnosis method using EEMD algorithm and mutual information method[J]. Journal of Huaqiao University: Natural Science, 2018(1): 7-13. (in Chinese)
- [48] Lu Shibao, Wang Jianhua, Xue Yangang. Study on multi-fractal fault diagnosis based on EMD fusion in hydraulic engineering[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 103: 798-806.
- [49] 韦建波,张栋柱,罗浩杰,等. 基于改进的 RBF 神经网络的配电网故障诊断模型[J]. 吉首大学学报, 2018, 39(1): 54-58.  
Wei Jianbo, Zhang Dongzhu, Luo Haojie, et al. Distribution network fault diagnosis based on improved RBF neural network[J]. Journal of Jishou University, 2018, 39(1): 54-58. (in Chinese)
- [50] Lü Zhongliang, Tang Baoping, Zhou Yi, et al. A novel method for mechanical fault diagnosis based on variational mode decomposition and multikernel support vector machine[J]. Shock and Vibration, 2016, 2016(5): 1-11.
- [51] Bai Yun, Chen Zhiqiang, Xie Jingjing, et al. Daily reservoir inflow forecasting using multiscale deep feature learning with hybrid models[J]. Journal of Hydrology, 2016, 532: 193-206.
- [52] Wang Kai, Zhao Youjin, Xiong Qingyu, et al. Research on healthy anomaly detection model based on deep learning from multiple time-series physiological signals[J]. Scientific Programming, 2016, 2016: 1-9.
- [53] Utkin L V, Zaborovskii V S, Popov S G. Detection of anomalous behavior in a robot system based on deep learning elements[J]. Automatic Control & Computer Sciences, 2016, 50(8): 726-733.
- [54] Lee Hoyeop, Kim Youngju, Kim Chang Ouk. A deep learning model for robust wafer fault monitoring with sensor measurement noise[J]. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 2017, 30(1): 23-31.
- [55] 李鸿儒,顾树生. 一种递归神经网络的快速并行算法[J]. 自动化学报,2004,30(4):516-522.  
Li Hongru, Gu Shusheng. A fast parallel algorithm for a recurrent neural network[J]. Acta Automatica Sinica, 2004, 30(4): 516-522. (in Chinese)
- [56] Tim de Bruin, Kim Verbert, Robert Babuska. Railway track circuit fault diagnosis using recurrent neural networks[J]. IEEE Transactions on Neural Networks & Learning Systems, 2017, 28(3): 523-533
- [57] Deljac Ž, Randić M, Krčelić G. A Multivariate approach to predicting quantity of failures in broadband networks based on a recurrent neural network[J]. Journal of Network & Systems Management, 2016, 24(1): 189-221.
- [58] 刘林凡. 深度学习在故障诊断中的研究综述[J]. 新型工业化, 2017, 17(4): 45-48, 61.  
Liu Linfan. Review of deep learning in fault diagnosis [J]. The Journal of New Industrialization, 2017, 17(4): 45-48, 61. (in Chinese)
- [59] Pan Jun, Zi Yanyang, Chen Jinglong, et al. Lifting-net: a novel deep learning network with layerwise feature learning from noisy mechanical data for fault classification[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(6): 4973-4982.



**第一作者简介:**张文栋,男,1962年9月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为动态测试技术与智能仪器、微型机电系统(MEMS)等。先后获得国家技术发明二等奖3项、三等奖1项,国家科学技术进步二等奖1项,国家教学成果二等奖1项及省部级奖9项。发明专利39项,出版著作4部,发表学术论文300多篇。2011年获何梁何利基金“科学与技术创新奖”。

E-mail: wdzhang@nuc.edu.cn

**通信作者简介:**薛晨阳,男,1971年11月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为新型微米纳米器件(MEMS/NEMS)微纳测试技术,固体光谱学与微光学气体传感器。

E-mail: xuechenyang@nuc.edu.cn