

# 矿用强力带式输送机智能监控技术研究进展\*

马宏伟, 毛清华, 张旭辉

(西安科技大学机械工程学院 西安, 710054)

**摘要** 强力带式输送机是煤矿主要运输设备, 针对矿用强力带式输送机存在启停冲击、运行过程跑偏、撕带等故障综合保护、强力输送带缺陷智能识别和传动系统关键部件故障诊断等问题, 研究了强力带式输送机软启动及节能运行技术、综合保护及传动系统关键部件故障诊断技术和强力输送带内部缺陷检测技术与智能识别方法。提出了一种矿用强力带式输送机智能监控系统, 并构建了智能监控实验平台, 该系统集变频控制、强力输送带缺陷弱磁检测、运行故障综合保护和传动系统关键部件故障诊断于一体, 解决了以上各个模块信息孤岛问题, 实现了带式输送机全面智能保护, 对确保强力带式输送机安全、高效运行和煤矿安全生产具有重要意义。

**关键词** 强力带式输送机; 软启动控制; 综合保护; 故障诊断; 缺陷识别

**中图分类号** TH222

## 引言

强力带式输送机具有输送量大、输送距离远和通用性强等特点, 是大多数煤矿的主运输系统, 在现代化煤矿生产中发挥着极其重要的作用。由于煤矿工作环境恶劣, 强力带式输送机长期在高速、重载状态下运行, 其启动和停止过程存在冲击、运行过程中存在跑偏、撕带、超温、打滑和传动系统中齿轮、轴承和电机故障易发, 以及强力输送带内部缺陷使其容易横向断带<sup>[1-2]</sup>。为了解决上述问题, 许多学者从带式输送机设计、运动学和动力学分析、软启动控制方法、运行过程综合保护方法、传动系统关键部件故障诊断方法和强力输送带内部缺陷检测与智能识别方法、强力输送带接头硫化工艺及接头疲劳强度测试方法等方面进行了广泛的研究。

针对强力带式输送机启动过程冲击问题, 有学者重点研究了液力耦合器软启动、可控启动传输装置(controller start transmission, 简称 CST)软启动和变频软启动等软启动控制方法<sup>[3]</sup>。为了对带式输送机运行过程中跑偏、超温和撕带等故障进行综合保护, 目前主要应用的基于局域网络控制(controller area network, 简称 CAN)总线与以太网通信的主站与分站结合的多条带式输送机综合保护系统, 实现了井下多个带式输送机故障综合保护<sup>[4]</sup>。综合

保护系统中撕带检测是难点, 主要有称重检测法和光学检测法<sup>[5-6]</sup>。

针对带式输送机传动系统齿轮、轴承和电机等关键部件故障诊断问题, 许多学者研究了铁谱分析法、振动检测法与温度检测法等故障诊断方法。铁谱分析法对周围环境要求低, 能够发现零部件的早期疲劳失效, 但是受人的主观因素影响较大; 温度检测法对于微小故障无法发现, 只有当故障达到一定的严重程度时才能检测到; 振动检测法有着其独特的优势, 不仅可以实现故障检测, 而且可以实现故障定位和分类识别, 但是振动信号处理比较复杂, 主要有频谱分析、包络谱分析、解调谱分析、倒频谱分析和小波分析等<sup>[7-10]</sup>。

目前, 许多矿井强力带式输送机缺乏先进的强力输送带缺陷检测系统, 导致断带事故时有发生, 断带事故不仅造成较大的经济损失, 甚至造成人员伤亡<sup>[11]</sup>。对于钢芯输送带内部缺陷检测问题, 目前主要有手工检测方法, 弱磁检测方法和 X 射线检测方法<sup>[12-14]</sup>。手工检测方法无法实现输送带缺陷在线监测, 并且检测不准确、弱磁检测方法具有检测精度高、检测速度快等特点, 并且可以实现输送带钢丝绳芯疲劳缺陷检测, 是目前比较先进的强力输送带缺陷在线监测方法; X 射线检测方法是一种强力输送带缺陷比较成熟检测方法, 但成本较高, 并且存在辐射和无法检测疲劳缺陷等问题。

\* 国家自然科学基金资助项目(U1361121); 教育部博士学科点专项科研基金资助项目(20136121120010); 陕西自然科学基金基础研究计划资助项目(2012JM8039)

收稿日期: 2016-01-05; 修回日期: 2016-02-22

总之,对于带式输送机软启动控制、综合保护、传动系统关键部件故障诊断和强力输送带内部缺陷检测均已有很多研究成果得以应用,但是以上各个功能模块相互独立。因此,急需构建一套强力带式输送机智能监控系统,将软启动控制系统、综合保护系统、关键部件故障诊断系统和强力输送带内部缺陷检测系统有机融合,实现强力带式输送机全方位的智能监控,有效预防强力输送带带式输送机运行故障和断带等事故发生,对于确保煤矿安全生产具有重要的意义。

## 1 软启动控制方法及节能运行技术

### 1.1 带式输送机软启动控制方法

强力带式输送机起动过程中加速度变化大,容易使输送带产生粘弹性变形,进而产生动张力,导致输送机机械部件和输送带内部产生较大冲击力,甚至损坏输送机。对此,软启动控制是一种降低带式输送机启停冲击良好方法,主要包括液力耦合器、CST 和变频等软启动控制方法,工作特点对比分析如表 1 所示。通过几种软启动方式特点对比可以看出,变频软启动控制方式综合性能最好,能将输送机电机的软启动与皮带的软启动合二为一。

表 1 软启动控制方法主要特点对比分析

Tab. 1 Main characteristic comparative analysis of soft start control methods

对比项目	液力耦合器软启动	CST 软启动	变频软启动
传动效率	较低	大约 85%	大约 95%
节能效果	无	基本无节能	节能效果明显
价格	较低	高	较高
日常维护	定期更换液压油	维护复杂,配件价格高	维护简单,故障处理复杂
启动电流	启动电流大	启动电流较小	启动电流小
多电机功率平衡	可以实现	可以实现	可以实现
工作可靠性	可靠	比较可靠	可靠
驱动单元体积	占地面积大,带液压系统	占地面积大,带液压系统	占地面积小,布置灵活

### 1.2 带式输送机变频节能运行技术

一般三相交流异步电机空载运行时功率因数较低,通常为 0.5~0.6。电机在重载运行时功率因数较高,可达到 0.85 以上。电机采用变频控制方式

可以确保在空载和重载时都有很高的功率因数,可达到 0.9 以上。某煤矿两带式输送机采用两台 250 kW 的电机驱动,用变频控制方式对带式输送机进行软启停和调速控制,变频器控制方式为矢量控制。改造之前电动机功率因数为 0.85,每天工作 14 h,电动机效率约为 80%,故改造前消耗电能为

$$250 \text{ kW} \times 80\% \times 14 \text{ h} \times 0.85 = 3294 \text{ kW} \cdot \text{h}$$

采用变频技术后,功率因数为 0.92,改造后消耗的电能约为

$$250 \text{ kW} \times 80\% \times 14 \text{ h} \times 0.92 = 3043 \text{ kW} \cdot \text{h}$$

可见,采用变频改造后,系统每天至少可以节约电能为 251 kW·h,采用变频控制方式节能效果明显。

## 2 强力带式输送机综合保护及关键部件故障诊断技术

### 2.1 带式输送机综合保护

带式输送机综合保护系统主要对运行过程中跑偏、撕带、超温、打滑、堆煤和冒烟等故障进行保护,综合保护系统组成如图 1 所示。

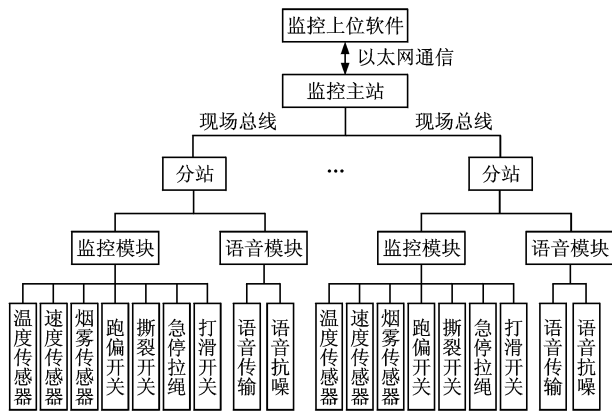


图 1 带式输送机综合保护系统

Fig. 1 Integrated protection system component of belt conveyor

系统主要由综合保护传感器、监控模块和语音模块组成的监控分站、监控主站和监控上位软件构成。一般每台带式输送机配置 1 个监控分站,各监控分站通过 CAN 总线等现场总线与监控主站通信,监控主站通过以太网传输到地面调度中心上位软件,从而实现调度中心集控井下带式输送机。

综合保护系统保护传感器安装位置及作用如表 2 所示,主要由速度传感器、温度传感器、堆煤传感器、跑偏传感器和撕带传感器等构成,其中撕带故障比较复杂,比较先进的方法主要有称重检测方法和光学检测方法(见图 2)。

表 2 保护传感器安装位置及作用

Tab. 2 Protection sensors installation position and role

传感器类型	安装位置	作用
速度传感器	安装主滚筒与皮带接触面的 5~10 cm 处	对皮带打滑和超速保护等
温度传感器	安装在滚筒或托辊处	对皮带与滚筒或托辊的摩擦超温保护
堆煤传感器	安装在皮带机卸载滚筒前方	对皮带堆煤故障进行保护
跑偏传感器	安装距离机头约 25 m 处,约间隔 100 m 沿皮带线对称安装	对皮带跑偏故障进行保护
烟雾传感器	安装主滚筒上方的下风口处	对皮带煤冒烟故障进行保护
撕带传感器	安装在皮带机头合适的位置	对皮带撕裂故障进行保护
急停开关	安装在皮带机架人行侧,从机头到机尾间隔 100 m 安装	对带式输送机紧急故障进行保护



(a) 撕带称重检测法  
(a) Weighing testing method of belt tear



(b) 撕带光学检测法  
(b) Optics testing method of belt tear

图 2 2 种先进的撕带检测方法

Fig. 2 Two advanced testing methods of belt tear

### 2.2 带式输送机传动系统关键部件故障诊断

带式输送机传动系统的驱动电机、减速机齿轮与轴承、滚筒重载轴承是带式输送机传动系统重点诊断的关键部件。传动系统关键部件采用温度与振动结合的方法进行故障诊断,传感器安装位置和主要诊断过程分别如图 3 和图 4 所示,主要包括振动与温度信号获取、信号调理与采集、信号降噪、特征



(a) 安装在减速机壳体上  
(a) Installation position for reducer shell



(b) 安装在滚筒轴承座上  
(b) Installation position for roller bearing seat

图 3 温度和振动传感器安装位置

Fig. 3 Installation position of temperature and vibration sensors

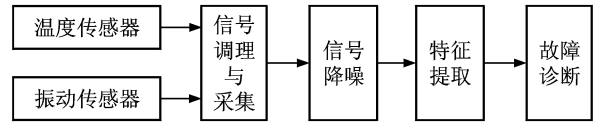


图 4 关键部件故障诊断过程

Fig. 4 Fault diagnosis process of the key components

提取和故障诊断等过程。

对于温度信号主要提取最大值和超过设定温度阈值的报警次数等特征,并通过最大值和报警次数综合判断进行故障诊断。振动信号处理比温度信号复杂的多,信号降噪主要采用小波降噪和自适应滤波等,特征提取主要提取时域特征、频域特征和时频域特征,并通过故障诊断方法对提取的特征信息进行故障定位、故障分类与故障预测等。振动与温度结合的诊断系统首先采用温度检测方法对故障进行预判,然后采用振动检测方法对故障位置和故障严重程度等进行详细诊断,从而实现关键部件故障准确诊断。

## 3 强力输送带缺陷智能检测技术

强力输送带缺陷主要有接头钢芯抽动、断绳、磨损和疲劳等,缺陷检测方法主要有电磁检测和 X 射线检测,其中电磁检测方法中弱磁检测效果较好。

### 3.1 弱磁检测技术

#### 3.1.1 弱磁传感器检测原理

弱磁传感器由磁衡元件和释磁元件组成,其工作原理如图 5 所示,释磁元件提供恒定的弱磁场  $B_x$ ,与弱磁规划后的输送带内部钢丝绳芯中剩余弱磁场  $B$  关联出弱磁场  $B_y$ ,磁衡元件具有 0.5 V/Gs 的灵敏度准确地将  $B_y$  转换为电压信号, $B_y$  与输送带中钢丝绳缺陷产生漏磁场有关,通过检测  $B_y$  的变化量可以反映钢丝绳芯缺陷状况,从而实现输送带钢丝绳缺陷的检测。

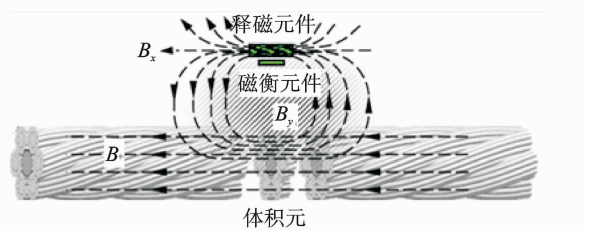


图 5 弱磁传感器的钢丝绳芯缺陷检测原理

Fig. 5 Steel cord defect testing principle of weak magnetic sensor

#### 3.1.2 缺陷弱磁检测系统

钢芯输送带缺陷弱磁检测系统内部结构和安装示意图分别如图 6,7 所示,其主要由弱磁加载模块、

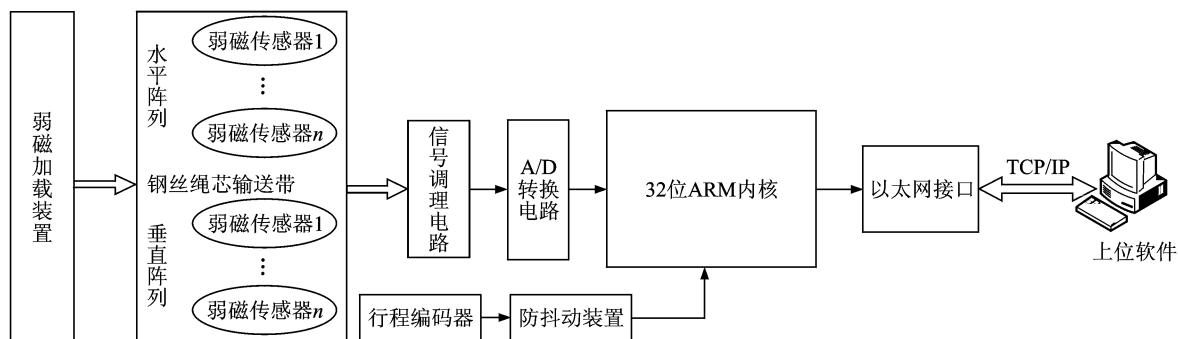


图 6 弱磁检测系统内部结构

Fig. 6 Weak magnetic testing system internal structure

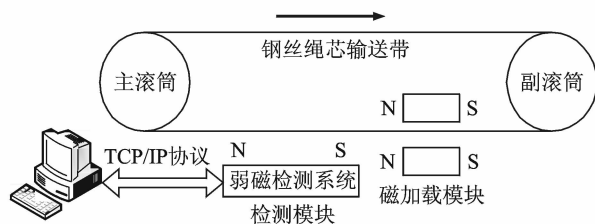


图 7 缺陷弱磁检测系统安装示意图

Fig. 7 Weak magnetic testing system installation schematic diagram

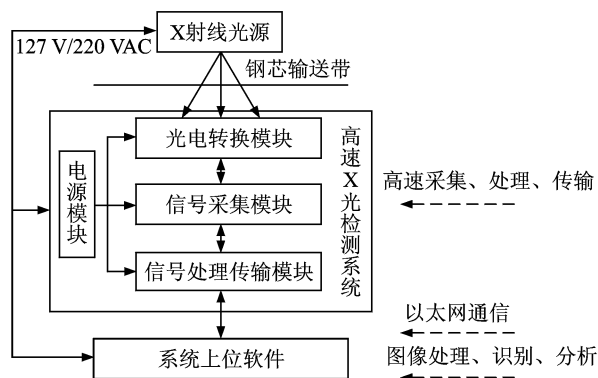


图 8 X射线检测系统构成

Fig. 8 Component of X-ray testing system

弱磁检测模块、行程编码器及防抖装置和上位软件组成。弱磁检测模块以 ARM 处理器为核心,内部由多个弱磁传感器、信号调理电路和信号采集电路组成,其中信号采集电路不仅采集弱磁传感器的信号,而且采集行程编码器的信号。行程编码装置以 0.5 mm 的检测精度对输送带的运行行程进行检测,防抖装置可以消除输送带抖动影响,从而实现缺陷在输送带长度方向精确定位。

弱磁检测系统主要工作过程如下:首先,弱磁加载模块对输送带内部钢丝绳芯进行磁加载,使内部钢丝绳芯具有微弱剩磁场,当输送带内部接头钢芯抽动、断绳、磨损和疲劳等缺陷时,产生漏磁场;然后,弱磁检测模块中高灵敏度传感器获取缺陷漏磁场,并将缺陷检测信号通过以太网 TCP/IP 协议传输到上位软件;最后,上位软件对缺陷信号进行存储、信号降噪、特征提取和缺陷识别等处理,最终实现钢丝绳芯输送带缺陷信号智能识别。

### 3.2 X 射线检测技术

钢丝绳芯输送带 X 射线检测系统可以实时扫描、实时成像、实时智能识别出所有隐患和故障预警。X 射线检测系统构成和安装示意图如图 8,9 所示,其主要由 X 射线光源、高速 X 射线检测系统和



图 9 X射线检测系统安装示意图

Fig. 9 X-ray testing system installation schematic diagram

上位软件构成。系统工作原理如下:首先,通过 X 光发射器发出 X 光源到钢丝绳芯输送带;然后,高速 X 射线检测系统对穿透输送带的 X 光进行光电转换、高速采集、高速处理和高速传输;最后,系统上位软件对输送带 X 光图像信号进行分析和处理,从而实现输送带内部钢丝绳芯损伤和接头抽动进行定量分析及精确定位。

## 4 强力带式输送机智能监控实验平台

### 4.1 实验平台功能及构成

为了研究强力带式输送机智能监控系统关键技术,建立了强力带式运输机智能监控实验平台,其构

成如图 10,11 所示。

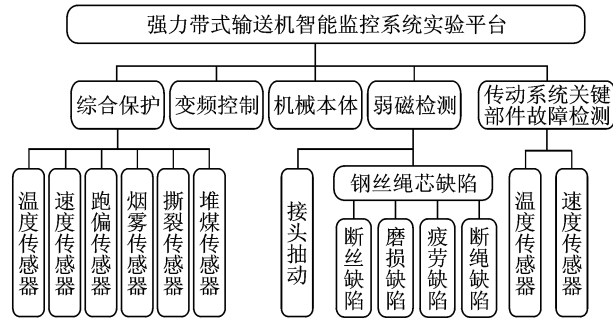


图 10 智能监控实验平台构成

Fig. 10 Component of intelligent monitoring experiment platform



图 11 智能监控实验平台实物图

Fig. 11 The prototype of intelligent monitoring experiment platform

陷检测是难题。因此,运用智能监控实验平台中的弱磁检测对强力输送带内部缺陷信号进行采集和分析处理研究(见图 12)。

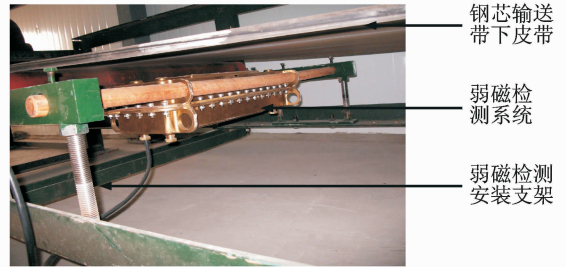


图 12 强力输送带缺陷弱磁检测系统安装图

Fig. 12 Installation picture of steel cord conveyor belt defects weak magnetic testing system

对于强力输送带内部缺陷弱磁信号处理问题,重点研究了缺陷弱磁信号非平稳噪声降噪方法、特征提取及约简方法和分类识别方法,实现了强力输送带缺陷弱磁在线准确识别。

#### 4. 2. 1 缺陷弱磁信号非平稳噪声降噪处理

提出了一种小波包与 RLS 自适应滤波相结合的缺陷弱磁信号降噪方法,对缺陷非平稳噪声信号进行降噪,该方法原理如图 13 所示。

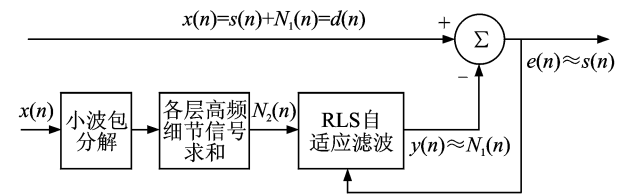


图 13 小波包与 RLS 自适应滤波相结合的降噪方法

Fig. 13 Noise reduction method for a combination of wavelet packet and RLS adaptive filter

该智能监控系统各模块之间关联和主要功能如下。

1) 变频控制: 主要实现强力带式输送机软起停和变频节能调速运行。

2) 综合保护: 主要实现对带式输送机运行过程中跑偏、撕带、超温及打滑等故障进行保护。该模块与变频控制形成闭环, 保护系统一旦发现以上故障, 及时发出报警信号, 同时通过变频控制模块控制带式输送机平稳停机。

3) 缺陷弱磁检测: 主要实现对强力输送带内部钢芯损伤和接头抽动等缺陷进行在线监测, 一旦检测到缺陷比较严重, 及时发出断带报警信号, 同时通过变频控制模块控制带式输送机平稳停机, 从而预防输送带断裂事故发生。

4) 传动系统关键部件故障诊断: 主要对强力带式输送机传动系统电机、齿轮和轴承等关键部件进行故障诊断, 一旦发现关键部件严重故障, 通过变频控制模块控制带式输送机平稳停机, 以防传动系统关键部件大面积损坏。

### 4. 2 缺陷弱磁检测及智能识别

强力带式输送机智能监控系统中强力输送带缺

实验中以叠加高斯白噪声和调频、调幅产生同频带非平稳强噪声的接头弱磁信号为研究对象, 运用小波包和小波包与 RLS 自适应滤波结合两种降噪方法进行降噪对比研究, 降噪前后波形如图 14 所示。从图 14(c), (d) 中可得出, 小波包与 RLS 自适应滤波相结合的缺陷弱磁信号降噪方法比小波包降噪方法具有更好的降噪效果。

#### 4. 2. 2 缺陷弱磁信号特征提取

提出了一种基于属性数据标准差的改进邻域粗糙集特征约简算法, 对强力输送带的接头、断绳和疲劳弱磁信号进行特征提取及约简, 特征约简结果如表 3 所示。改进的邻域粗糙集特征约简方法, 不仅

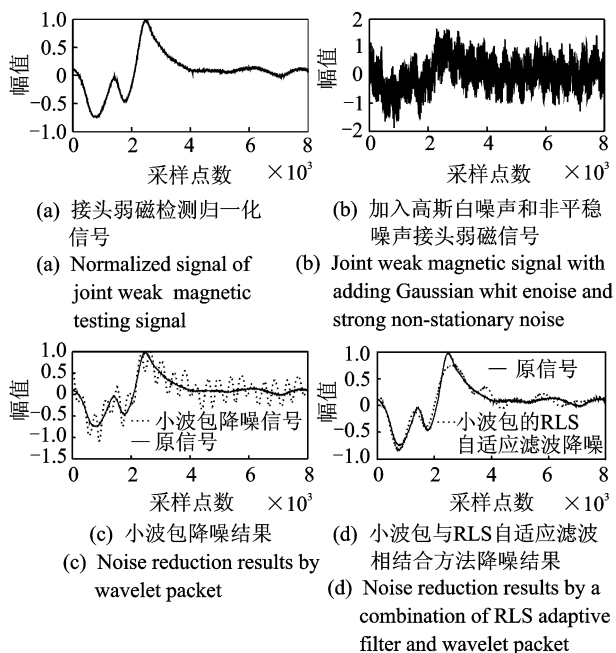


图 14 两种降噪方法降噪结果对比

Fig. 14 Noise reduction result contrast for two noise reduction methods

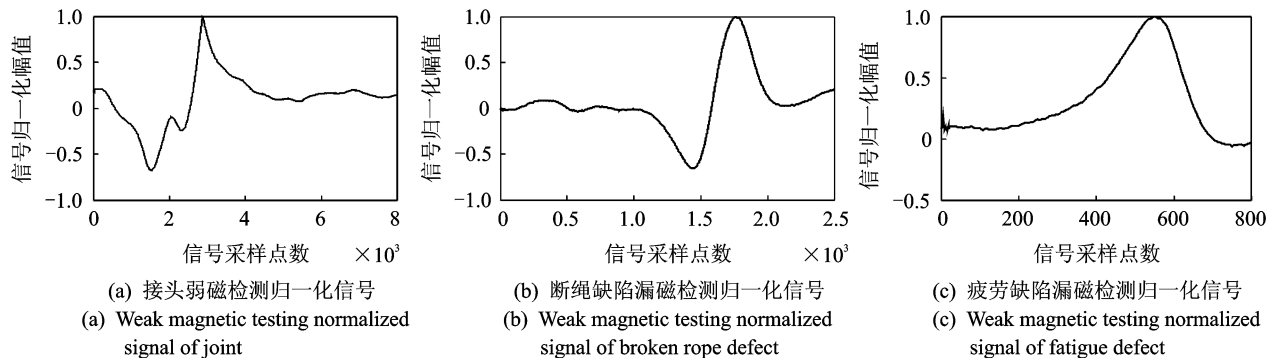


图 15 强力输送带弱磁检测归一化信号

Fig. 15 Weak magnetic testing normalized signal of steel cord conveyor belt

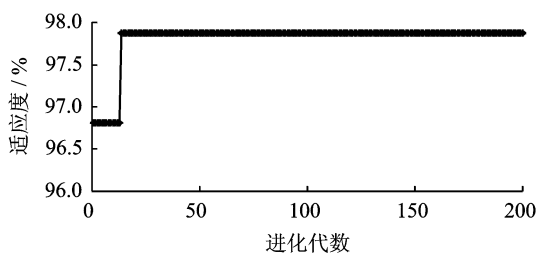


图 16 强力输送带多类缺陷分类识别结果

Fig. 16 Multi-class defect classification results of steel cord conveyor belt

保证了缺陷识别的准确率,而且较大地降低了特征维数和提高了识别速度,约简后 5 个特征属性为峰峰值、均方根值、方差、峭度和波宽。

表 3 特征约简前后分类识别测试实验结果

Tab. 3 Classification recognition testing experiment results before reduction and after reduction

特征约简	特征数	识别准确率/%	测试时间/s
约简前	12	90.5	0.030
约简后	5	90.5	0.016

#### 4.2.3 强力输送带多类缺陷分类识别

提出了一种粒子群优化的二叉树支持向量机多类分类算法,运用该算法对如图 15 所示的强力输送带的接头、断绳和疲劳 3 类弱磁信号 168 个样本进行分类识别。

实验结果表明:粒子群优化的二叉树支持向量机有效地对强力输送带缺陷进行分类,分类准确率高达约 97.9%,识别结果如图 16 所示。

## 5 结束语

强力带式输送机在煤矿、冶金、交通、电力及港口等行业中具有广泛应用,其存在启停冲击、运行过

程跑偏、撕带、横向断带和传动系统关键部件故障等问题,直接影响了安全高效生产。目前,在应用中的变频软启动控制系统、综合保护系统、强力输送带缺陷检测系统和传动系统关键部件故障诊断系统,互不关联,存在信息孤岛。因此,提出了一种矿用强力带式输送机智能监控系统,并重点研究了各个系统关键技术。本研究对矿用强力带式输送机全面智能监控提供了一种新思路,通过各子系统之间信息相互融合,可实现强力带式输送机全面智能监控。

## 参 考 文 献

- [1] 黄民,潘虎生,胡成,等. 钢绳芯带式输送机实时综合监测与保护系统[J]. 中国矿业大学学报, 2006, 35(5): 673-680.

- Huang Min, Pan Husheng, Hu Cheng, et al. A system for real time monitoring and protecting of steelcord belt conveyors[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2006,35(5):673-680. (in Chinese)
- [2] 苗继军,姜明学,刘朋元,等. 变频技术在带式输送机远距离运输中的应用[J]. 工矿自动化,2013,39(4):105-108.
- Miao Jijun, Jiang Mingxue, Liu Pengyuan, et al. Application of frequency-conversion technology in long-distance transportation of belt conveyor[J]. Industry and Mine Automation, 2013,39(4):105-108. (in Chinese)
- [3] 姜筱瀛. 煤矿带式输送机启动控制方式的探讨[J]. 安徽理工大学学报,2012,32(3):45-48.
- Jiang Xiaoying. Discussion on starting control mode of belt conveyor for coal mines[J]. Journal of Anhui University of Science and Technology, 2012,32(3):45-48. (in Chinese)
- [4] 王桂梅,赵彦斌,李长刚,等. 井下带式输送机智能监控系统研究[J]. 煤矿机械,2012,33(8):230-231.
- Wang Guimei, Zhao Yanbin, Li Changgang, et al. Study on intelligent monitoring system of belt conveyor under coal mine[J]. Coal Mine Machinery, 2012,33(8):230-231. (in Chinese)
- [5] Yang Yanli, Miao Changyun, Li Xianguo, et al. On-line conveyor belts inspection based on machine vision[J]. International Journal for Light and Electron Optics, 2014,125(19):5803-5807.
- [6] 徐永峰,杨彦利,苗继军,等. 煤矿输送带视觉在线监测系统研究[J]. 煤矿机电,2013(4):88-91.
- Xu Yongfeng, Yang Yanli, Miao Jijun, et al. Research on online visual monitoring system of belt conveyor[J]. Colliery Mechanical & Electrical Technology, 2013(4):88-91. (in Chinese)
- [7] 赵志宏,杨绍普,刘永强. 多小波系数特征提取方法在故障诊断中的应用[J]. 振动、测试与诊断,2015,35(2):276-280.
- Zhao Zhihong, Yang Shaopu, Liu Yongqiang. Application of feature extraction method in fault diagnosis based on multi-wavelet coefficients[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2015,35(2):276-280. (in Chinese)
- [8] Ales B, Joze F. Determining cracks in gears using adaptive wavelet transform approach[J]. Engineering Failure Analysis, 2010,17:664-671.
- [9] 李辉,郑海起,唐力伟. 基于倒双谱分析的轴承故障诊断研究[J]. 振动、测试与诊断,2010,30(4):353-356.
- Li Hui, Zheng Haiqi, Tang Liwei. Application of bicepstrum technique to bearing fault detection[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2010,30(4):353-356. (in Chinese)
- [10] 李舜酩,郭海东,李殿荣. 振动信号处理方法综述[J]. 仪器仪表学报,2013,34(8):1907-1915.
- Li Shunming, Guo Haidong, Li Dianrong. Review of vibration signal processing methods[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013,34(8):1907-1915. (in Chinese)
- [11] 叶春青,苗长云,李现国,等. 基于 X 光检测的强力输送带故障定位方法[J]. 计算机测量与控制,2009,17(2):302-305.
- Ye Chunqing, Miao Changyun, Li Xianguo, et al. A fault location method of steel cord conveyor belt based on X-ray detection [J]. Computer Measurement & Control, 2009,17(2):302-305. (in Chinese)
- [12] 毛清华,张大伟,张旭辉,等. 煤矿用钢丝绳芯输送带断带和撕带机理及检测方法研究进展[J]. 矿山机械,2011,39(7):70-73.
- Mao Qinghua, Zhang Dawei, Zhang Xuhui, et al. Progress of research on reasons and detection methods for coal mine steel cord conveyor belt breaking and tearing [J]. Mining & Processing Equipment, 2011,39(7):70-73. (in Chinese)
- [13] 郭东兵,李会军,窦柏林. 钢丝绳芯输送带在线实时自动监测系统的开发及应用[J]. 煤矿机电,2011(3):44-46.
- Guo Dongbing, Li Huijun, Dou Bolin. Development and application of on-line real-time automatic monitoring system of steel wire rope core conveyor belt[J]. Colliery Mechanical & Electrical Technology, 2011(3):44-46. (in Chinese)
- [14] 焦晋杰,牛昱光. X 光成像的钢绳芯输送带接头距离检测方法[J]. 机械工程与自动化,2012(5):133-135.
- Jiao Jinjie, Liu Yuguang. X-ray based distance detection method for joint distance of steel cord conveyor belt[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2012(5):133-135. (in Chinese)



**第一作者简介:**马宏伟,男,1957年10月生,博士、教授、博士生导师。现任西安科技大学副校长,兼任陕西省研究生教育学会副会长、陕西省机械工程学科评议组成员、中国煤炭工业机电专家委员会委员、西安市专家咨询团特聘专家等。主要研究方向为智能检测与控制、工业机器人及机电一体化技术、煤矿机电设备及其自动化、智能化等。先后主持和参加以国家自然科学基金为代表的国家级、省部级科研项目 10 余项,主持和参加的企业委托项目多项。获省部级科技进步奖 4 项,陕西省优秀教学成果奖、精品课程以及优秀教材奖 5 项,国家发明专利 10 余项;在国内外学术期刊上发表论文 110 余篇,其中被 SCI, EI 等收录 50 余篇。

E-mail: mahw@xust.edu.cn