

# 基于小波分析的刮板输送机断链故障检测系统

温晓荣,任利丰

(神木职业技术学院 机电工程系,陕西 神木 719300)

**摘要:**为切实掌握刮板输送机运行状态,降低刮板输送机断链事故概率,设计一种基于小波分析的断链故障检测系统。系统硬件选择电磁屏蔽性能良好的 XS1 N30PA349 电感式传感器,运用 S7-1200 可编程控制器完成系统信号收发,利用 Tpc7062K 触摸屏显示故障检测输出结果;系统软件包含控制器程序与监控页面,在软件主程序中通过动态时间规整法调节故障检测周期,使用小波分析法划分信号频率分量,在 Elman 神经网络中引入小波函数,根据可信度概念完成刮板输送机设备故障检测。仿真结果表明:所建系统故障检测精度较高,检测时间较短,可为煤矿开采的顺利进行提供参考借鉴。

**关键词:**小波分析;故障检测;系统构建;神经网络;刮板输送机

**中图分类号:**TD528 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2023)02-0216-04

## Broken Chain Fault Detection System of Scraper Conveyor Based on Wavelet Analysis

WEN Xiaorong, REN Lifeng

(Mechanical & Electrical Engineering Department, Shenmu Vocational & Technical College, Shenmu 719300, China)

**Abstract:** In order to grasp the running state of scraper conveyor and reduce the probability of chain breaking accident of scraper conveyor, a chain breaking fault detection system based on wavelet analysis is designed. In terms of system hardware, XS1 N30PA349 inductive sensor with good electromagnetic shielding performance is selected, S7-1200 programmable controller is used to complete system signal transmission and reception, and Tpc7062K touch screen is used to display fault detection output results. The system software includes controller program and monitoring page, and in its main program, the fault detection cycle is adjusted by dynamic time warping method, the signal frequency component is divided by wavelet analysis method, and the wavelet function is introduced into Elman neural network to complete the fault detection of scraper conveyor equipment according to the concept of reliability. The simulation results show that the fault detection accuracy of the system is high and the detection time is short, which can provide a reference for the smooth progress of coal mining.

**Keywords:** wavelet analysis; fault detection; system construction; neural network; scraper conveyor

## 0 引言

刮板输送机是煤矿生产的关键运输设施,是煤炭运输的首要环节<sup>[1]</sup>。在采煤工作面中,刮板输送机负责运输煤炭与物料,担负采煤机的轨道运转,输送机工作的正常与否,对煤矿的安全生产具有重要意义<sup>[2]</sup>。如果刮板机运转工况恶劣或物料单体质量大,运输量高,就极易产生机械设施故障。相关统计资料显示,刮板输送机断链故障占煤矿故障的 1/3,这极大影响了煤矿生产效率<sup>[3]</sup>。

为此,科研工作者大力发展新技术,提升刮板输送机的故障监测水准,减少故障停机次数。文献[4]通过预处理刮板图像,使用零拷贝传输数据,将刮板检测全部流程规划成协同模式,利用 AI 计算机硬件资源,达到刮板输送机断链实时检测目标。但方法中的协同模式会造成大量资源浪费,检测效率较低。文献[5]提取输送装置零部件初始故障数据、降噪和归一化处理故障信号,依据故障特征向量种类和数量构造若干分类器,两两比对识别出故障

类别,预估故障样本变化走向。但提取零部件初始故障数据时,没有考虑数据的时间序列特征,极易导致数据内容失真,无法获得精准故障检测结果且耗费较多检测时间。

为弥补上述方法不足,提出一种基于小波分析的刮板输送机断链故障检测系统,充分考虑煤矿开采工作环境特点,采用信号测量、可编程逻辑控制器(programmable logic controller, PLC)处理、数据传输等板块组成系统框架,在系统软件设计中使用小波分析法进行故障信号处理,在 Elman 神经网络内代入小波函数,利用可信度原则完成断链实时检测。

## 1 小波分析下刮板输送机断链故障检测系统设计

### 1.1 架构

传统刮板输送机断链故障检测多数依靠人工定时巡

**基金项目:**陕西省教育厅 2021 年度科研计划项目(21JK0622)

**第一作者简介:**温晓荣(1988—),男,陕西神木人,讲师,硕士,研究方向为矿山机械、液压传动、工程机械、机械设计。

检,效率较低且故障检测漏洞较多,已不适用于当前煤矿企业生产运作。按照检测目标与传感器类型的差异程度,断链故障在线检测包含两种模式:接触式和非接触式。因井下作业环境较为恶劣,不利于非接触式的精密检测装备运行,本文设计一种接触式刮板输送机断链故障检测系统,该系统通过信号测量、PLC 处理、数据传输、软件监测和报警装置等板块构成,系统架构如图 1 所示。

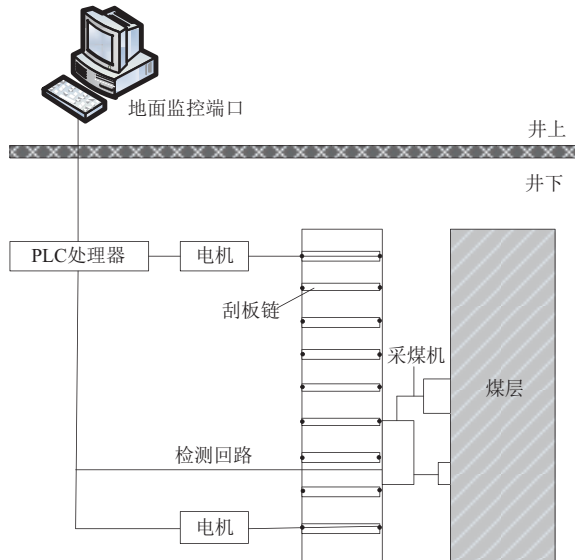


图 1 刮板输送机断链故障检测系统架构

信号测量板块是系统操作的核心,担负数据采集的任务;PLC 处理板块与数据传输板块可在井下设置监控系统的前提下实施进一步优化升级,PLC 信号处理板块在报警状况下能够断开电机电源,保证设备安全;软件监测和报警装置板块需要使用 Visual Basic 编程进行研发。

### 1.2 系统硬件

传感器要最大限度减小自身体积,量程一般很小,且安置在工作面复杂的环境内极易受到周边设施的电磁扰动,影响传感器的检测距离与检测结果精度。故要挑选电磁屏蔽性能良好的传感器。传感器依照工作原理被划分成电容型、电感型、光电型等,因电感型传感器能预防非金属材料干扰,本文选用电感式传感器。

综上,本文使用施耐德 XS1 N30PA349 电感式传感器。该传感器安装简单,检测距离最高是 25 mm。振荡信号的衰退被放大电路转换成开关信号<sup>[6]</sup>,触发驱动控制器部件。PLC 处理板块处于井下操作环境,从平稳性、可靠性等层面考虑,使用 S7-1200 可编程控制器作为核心控制单元,存储器是 50 kB,利用以太网实现信号收发。

刮板输送机断链故障检测系统的上位机包含触摸屏、工控机与组态软件。监视与控制通用系统(monitor and control generated system, MCGS)触摸屏在钢铁、电力、石油化工等操作系统中均得到广泛应用,选用 Tpc7062K 触摸屏为本文系统的上位机,显示刮板链运转情况。触摸屏性能参数见表 1。

表 1 Tpc7062K 触摸屏性能参数

参数	数值
外观大小/mm	226.5×162×35
屏幕大小/mm	152.7×85.76
LAN RJ45	以太网接口
串口	1×RS-232
电源接口/V	DC24

依照系统设计方案需求,监测系统可实现刮板输送机运转数据存储与报表打印等功能,使用工控机为系统的远程上位机,以提升系统的工业自动化水准。系统远程监控界面使用 Force Control V7.0 组态软件,该软件仅需把各类板块实施简单组合,就能完成故障检测所需的各项功能,提升故障检测时效性。

### 1.3 系统软件

系统软件设计涵盖控制器程序与监控页面设计,如图 2 所示。

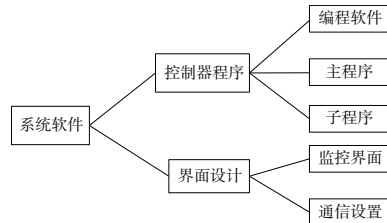


图 2 系统软件设计示意图

系统软件中的主程序是系统稳定运行的基础,包含断链故障检测的全部流程,如图 3 所示。可以看出,系统软件包含信息初始化、电流控制、故障点定位等功能。

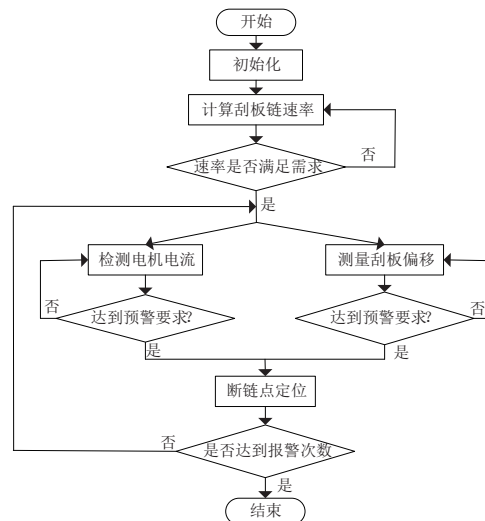


图 3 断链故障检测系统软件程序流程

科学技术的持续发展,使变频器在煤炭企业内的应用愈加广泛,推进了刮板输送机的升级。在运行速率读取程序中,变频器的运用减少了刮板输送机在启动与终止时的冲击力度,延长了机器使用寿命。读取变频器的刮板链速率时使用 RS485 总线把数据输送到 PLC 内。

刮板偏移距离检测,通过分散在输送机中部槽对称的

若干组传感器完成<sup>[7]</sup>,PLC可不间断记录刮板两侧运行速率与时间差,获得刮板偏移值。若偏移距离低于预先设置的临界值,则刮板链为正常运行状态,反之故障检测系统会发出警报,警报次数超出4次,则刮板输送机终止运行。

系统软件最关键的部分是故障点定位。本文利用小波分析法完成故障定位检测,将结果呈现在人机交互页面。使用小波分析法能够准确评估故障类型,减少人工劳动成本,为刮板输送机的及时检修提供可靠数据支持,下面为计算详细过程。

Mallat方法是众多小波分析中应用次数最多的,假设 $\{V_j\}$ 为一个固定的多分辨率分析谱, $\Omega(x)$ 、 $W(x)$ 依次为尺度函数与小波函数,则得到式(1)的目标函数

$$f(x) = \sum_{i=1}^{\infty} A\Omega_{j,i}(x) + \sum_{j=1}^J \sum_{i=-\infty}^{\infty} B_{j,i}W_{j,i}(x) \quad (1)$$

式中: $A$ 、 $B$ 均为小波系数; $i$ 为整数; $j$ 为分析谱数量。

式(1)内的尺度系数与小波系统之间的耦合关联为

$$\begin{cases} A_{j-1} = CA_j \\ B_{j-1} = DA_j \end{cases} \quad j=0,1,2,\dots,J-1 \quad (2)$$

式中: $C$ 为尺度函数相对的低通滤波器; $D$ 为小波函数相对的低通滤波器。

从上面两个公式看出,Mallat方法利用一组带通滤波器进行信号分析,再把信号分成大小不均的频率分量<sup>[8]</sup>,频率值越大,相位划分越精细,故障检测精度越高。使用状态值的改变走势调节故障检测周期,降低因检测周期过短形成的资源浪费与周期过长形成的故障漏检。将故障检测周期动态调节过程记作

$$\Delta T_{i,i+1} = \Delta T_{i-1,i} + \Delta T_{i-1,i} \times \Delta U_e(s, t_i) / O \quad (3)$$

式中: $\Delta T_{i-1,i}$ 是现有检测周期; $\Delta U_e(s, t_i)$ 是上一时段的小波系数; $O$ 是故障检测周期预警临界值。

刮板输送机设备故障信号的时间长度是随机变化的,利用动态时间规整法识别故障信号。融合时间规整与距离测度,假设故障参数涵盖 $m$ 帧向量,参照样本内包含 $n$ 帧向量, $m \neq n$ ,通过动态时间规整函数完成两种矢量之间的映射,计算公式为

$$M = \min \sum v [Q(m), H(m(n))] \quad (4)$$

式中: $M$ 是两个向量的最小间距; $v$ 是两个向量的距离测度; $Q(m)$ 是待检测向量; $H(m(n))$ 是参照样本向量。

引入Elman神经网络,设计一种小波-Elman神经网络,预测刮板输送机故障的短期负荷。挑选小波函数构建神经网络时,要着重考虑下面几个要素:一是小波函数要拥有优秀的支撑性,小波函数支撑区域范围越广,表明其频率分辨率越优,反之表明其时间分辨率越优;二是小波函数的消失矩越大越好;三是小波函数要具备一定的正则性,确保其计算稳定性。

Elman神经网络是一种反馈性神经网络,其网络结构共有4层:输入层具有信号传输作用;输出层含有线性加权作用;隐含层用来完善网络整体时效性;承接层用于记录隐含层上个时段的输出值并传递给输入层。将小波-Elman神经网络的非线性状态空间定义成:

$$y(k) = g(d^3 x(k)) \quad (5)$$

$$x(k) = f\{d^1 x_b(k) + d^2 [r(k-1)]\} \quad (6)$$

$$x_b(k) = x(k-1) \quad (7)$$

式中: $k$ 是时间; $x$ 是输出的节点矢量; $r$ 是隐含层节点的单元矢量; $x_b$ 是反馈状态矢量; $d^1$ 、 $d^2$ 、 $d^3$ 均为各个层次的连接权值; $g(\cdot)$ 是输出神经单元的传递函数; $f(\cdot)$ 是隐含层神经元的传递函数。

在小波-Elman神经网络中添加可信度概念,识别刮板输送机设备故障可信度,依照评估规则判断设备是否发生故障。输送机设备故障信息为训练样本,将样本输入小波-Elman神经网络。倘若第 $i$ 个输出矢量为 $Z_i$ , $Z_i = \{l_{ij}\}$ ,可信度是 $\lambda$ ,得到故障检测公式

$$\lambda = \frac{\max_{j=1} \{ |l_{ij}| \}}{\sum_{j=1,2} |l_{ij}|} \quad (8)$$

式中: $\max_{j=1} \{ |l_{ij}| \}$ 代表第 $i$ 个输出矢量内绝对值最高的故障因素; $\sum_{j=1,2} |l_{ij}|$ 是第 $i$ 个输出矢量内故障因素绝对值总和。因故障检测算法具备一定微小偏差,在 $\sum_{j=1,2} |l_{ij}|$ 值小于1时,将该值近似地看作为1。

归一化处理式(8),让计算更加简便,得到

$$\lambda' = \frac{l_{ij}}{\max_{j=1} \{ |l_{ij}| \}} \quad (9)$$

## 2 仿真实验

系统功能测验是系统投入实际应用前的重要环节,以此明确系统是否能完成期望指标。为进一步验证所建系统可靠性,对系统进行功能测试,实验样本为某中型双链刮板输送机,如图4所示,实验平台为ADAMS动力学仿真软件。



图4 实验样本

随机挑选10个不同的电流信号,与本文系统获得的输出值进行对比,验证系统的电路与信号采集程序,是否能完成不同工况下精准的刮板输送机断链故障检测,对比结果如表2所示。

表2 电流信号采集测试结果

电流信号值/mA	输出值/V	真实值/V
5	0.66	0.66
6	0.74	0.73
8	0.91	0.91
9	0.92	0.92
10	1.51	1.52
12	1.83	1.83
14	2.01	2.02
15	2.27	2.27
16	2.34	2.34
21	3.25	3.27

从表 2 可知,电流信号值较小时,本文系统得到的检测结果与真实值基本相同,仅在电流信号值最大时,出现略微偏差,但处于技术指标的容错范围。由此表明:本文系统设计的电路与信号采集程序可满足电流信号采集精度需求,为断链故障诊断提供强有力数据支持。

利用本文系统依次在额定功率工况与断链工况下进行检测,得到对应工况下刮板链的动力学结果,如图 5 所示。

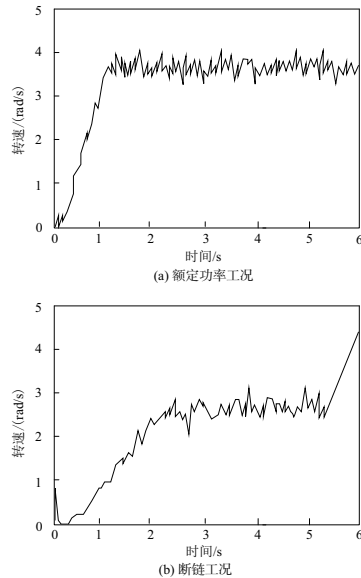


图 5 本文系统下动链速度特征曲线输出结果

从图 5(a)中看到,额定功率下,刮板输送机的动链转速在 1 s 内加速运行至额定速率,因多边形响应的存在,平稳运行时期,动链转速产生微小浮动,可忽略不计,表明链轮和链条啮合情况良好;处于断链情况下,刮板输送机系统会产生运动干涉状况,动链不能实现正常循环。从图 5(b)中可知,刮板链在 2 s 内速率逐步加速至额定功率,在 5.4 s 时刮板链产生断裂现象,这时刮板链速率明显变大,刮板链与链轮之间的动载荷快速增多,发生剧烈振动冲击。由此看出,本文系统能有效呈现出不同工况下刮板输送机的实时特征,可行性极强。

刮板链与链轮之间的接触力变化,能显示出链条是否存在断链风险。使用本文系统分析不同工况下,刮板链和链轮从啮合至分离过程中接触力的变化情况,仿真结果如图 6 所示。

图 6(a) 额定功率下,刮板链在约 4.5 s 时和链轮啮合,接触力快速增加且幅值呈现周期性变化。图 6(b) 断链状况下,刮板链在约 4.2 s 时与链轮啮合,接触力不断上升,后期呈无规则变化形态。表明本文系统能清晰观察出井下作业是否发生断链故障,起到一定预警作用。

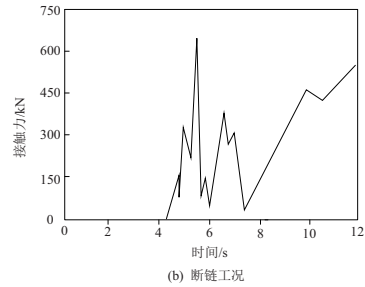
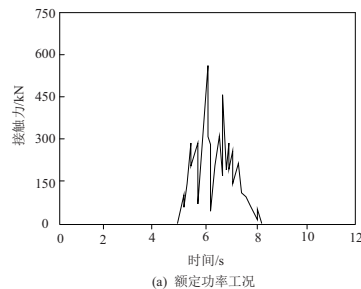


图 6 本文系统下刮板链和链轮接触力曲线输出结果

故障检测效率优劣是衡量方法可靠性的关键指标,将本文系统与文献[4]边缘算法、文献[5]DAG-SVM 法进行实验对比,分析 3 种方法故障检测效率高低,实验结果如图 7 所示。观察可知,本文系统在计算耗时方面远远低于其他两个文献方法,不会因实验次数增多影响其运算稳定性,在恶劣的矿井环境下依旧能快速地完成故障检测任务。

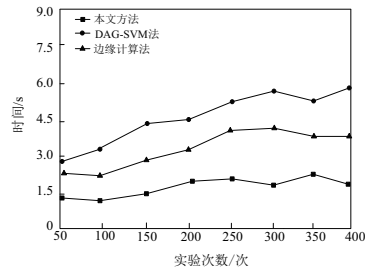


图 7 断链故障检测效率对比

### 3 结语

煤矿井下恶劣的操作环境,导致刮板输送机的刮板链条极易受到磨损甚至断裂,影响煤矿工作进度,给井下工作人员带来不小的安全隐患。本文设计一种基于小波分析的刮板输送机断链故障检测系统,完成对链条运行状态的实时监测,利用小波分析法达到高精度故障定位任务。通过仿真实验进一步表明系统的合理性与实用性,为刮板输送机的安全运行发挥应有作用。

#### 参考文献:

- [1] 汪爱明,吴景红,程晓涵,等. 刮板输送机链条故障在线监测仪设计[J]. 煤炭工程,2019,51(10):161-165.
- [2] 马鹏飞. 变频器系统在煤矿刮板输送机中的应用[J]. 中国煤炭,2019,45(1):99-102,132.
- [3] 朱秀光,邱涵,穆润青,等. 煤矿刮板输送机中板失效分析[J]. 铸造技术,2021,42(7):617-620.
- [4] 张志强,冯伟,赵小虎,等. 面向边缘计算的选煤厂刮板检测方法[J]. 工矿自动化,2021,47(4):92-97.
- [5] 赵取阳. 基于 DAG-SVM 的煤矿井下输送装置故障在线检测[J]. 机床与液压,2021,49(10):189-194.
- [6] 方新秋,宁耀圣,李爽,等. 基于光纤光栅的刮板输送机直线度感知关键技术研究[J]. 煤炭科学技术,2019,47(1):152-158.
- [7] 郑勇,杨小兰. 基于信号提纯的机械故障检测系统设计[J]. 现代电子技术,2019,42(4):49-52.
- [8] 刘冰洁,陈炳发,丁力平. 基于卷积神经网络的微电机装配故障诊断研究[J]. 机械制造与自动化,2021,50(3):171-174,189.

收稿日期:2021-12-28