

基于嵌入式和模糊孤立森林的公路摊铺机机械故障诊断系统

程旭¹,潘江塞²

(1. 北京市公路事业发展中心,北京 100053; 2. 中科软科技股份有限公司,北京 100086)

摘要:设计基于嵌入式技术和模糊孤立森林的公路摊铺机机械故障诊断系统。采集公路摊铺机状态数据,采用小波阈值进行去噪处理,通过以太网将数据传输至数据存储模块,由故障诊断模块调用存储模块的公路摊铺机状态数据;利用模糊孤立森林算法,挑选有价值的属性构建孤立森林,多维度地判定数据隶属度,通过模糊运算得到公路摊铺机状态数据的异常特性,判断故障类型,并通过报警显示模块实时显示故障诊断结果。实验结果表明:该系统可有效诊断公路摊铺机机械故障,并进行有效预警。

关键词:嵌入式技术;公路摊铺机;故障诊断;小波阈去噪;孤立森林算法;数据采集

中图分类号:TP306.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2023)05-0152-03

Mechanical Fault Diagnosis System of Road Paver Based on Embedded and Fuzzy Isolated Forest

CHENG Xu¹, PAN Jiansai²

(1. Beijing Highway Industry Development Center, Beijing 100053, China;

2. Zhongke Soft Technology Co., Ltd., Beijing 100086, China)

Abstract: A mechanical fault diagnosis system of road pavers based on embedded technology and fuzzy isolated forest is designed. The state data of road pavers are collected, denoised with wavelet threshold, transmitted to the data storage module through Ethernet, and called by the fault diagnosis module. Fuzzy isolated forest algorithm is applied to select valuable data attributes forming isolated forest, determine the data membership degree in multiple dimensions, carry out fuzzy operation obtaining the abnormal characteristics of the state data of road pavers, judge the fault types, and display the fault diagnosis results in real time through the alarm display module. The experimental results show that the system can effectively diagnose the mechanical faults of road pavers with an effective warning.

Keywords: embedded technology; road paver; fault diagnosis; wavelet threshold denoising; isolated forest algorithm; data acquisition

0 引言

公路摊铺机在进行工作时,受到作业环境以及工况等不可抗力因素的影响,当作业环境较差时,会导致其作业难度加大,并时常伴有机械故障发生^[1-2]。因此,有必要设计一种有效的公路摊铺机机械故障诊断系统。

齐继阳等设计了基于故障率与故障症的公路摊铺机机械故障诊断系统^[3],白涛等设计基于多总线接口终端的公路摊铺机机械故障诊断系统^[4]。这两种系统均可实现对公路摊铺机机械故障的诊断,但在获取用于机械故障诊断数据后,均未对数据进行有效的预处理,导致后期运算复杂度大幅度增加,最终使得公路摊铺机机械故障诊断的诊断效率以及准确性有所下降。

为此,本文引入嵌入式技术和模糊孤立森林算法设计公路摊铺机机械故障诊断系统。

1 公路摊铺机机械故障诊断系统

1.1 总体架构

将嵌入式技术应用于公路摊铺机机械故障诊断过程中,系统总体架构如图1所示。系统通过两种方式实现公路摊铺机状态数据采集,两个采集子系统分别为基于RS485与PLC数据采集子系统,二者均通过传感器采集公路摊铺机状态数据,并通过数据去噪模块对数据进行预处理,有效去除采集到的公路摊铺机状态数据中的噪声数据信号,分别通过RS485总线的ModBus通信协议和以太网将去噪处理后的公路摊铺机状态数据传输至嵌入式硬件子系统,嵌入式硬件子系统接收到数据后,将其存储于数据存储模块,故障诊断模块调用数据存储模块中的数据,进行公路摊铺机机械故障诊断。

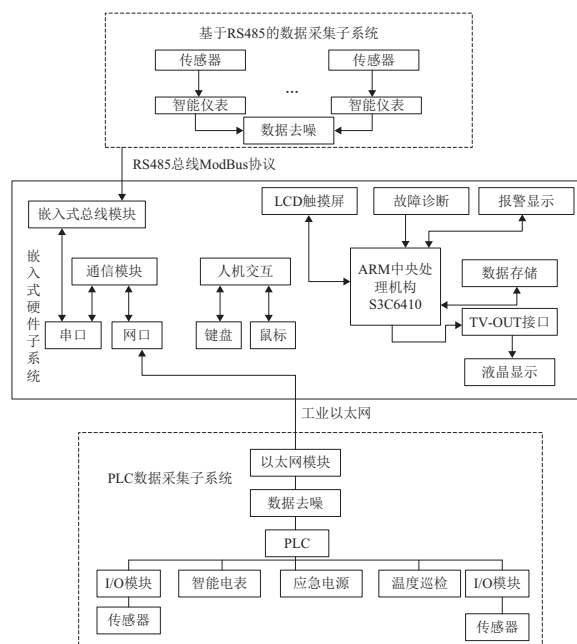


图1 系统总体架构

1.2 硬件设计

1) 以太网通信方式的 PLC 数据采集子系统

系统中将以以太网作为通信方式的 PLC 数据采集子系统由一些现场设备以及若干个供数据采集的传感器共同构成,PLC 数据采集子系统硬件结构如图 2 所示。在 PLC 控制器中接入 I/O 模块,当传感器采集完公路摊铺机状态数据后,由作为连接传感器与 PLC 控制器连接纽带的 I/O 模块负责将公路摊铺机状态数据输送到 PLC 控制器中进行存储^[5-6],之后在以太网中接入 PLC 控制器,可使公路摊铺机状态数据在环网实现远程传输。

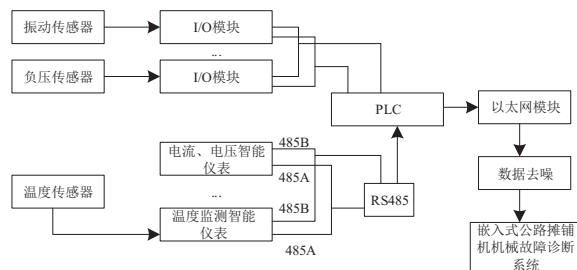


图2 PLC 数据采集子系统硬件结构

2) 报警显示模块设计

系统的报警显示模块通过借助单片引脚完成摊铺机故障的蜂鸣报警,具有较强的经济性与实用性。单片机使用 STC89C52RC,其指令代码不仅能够对传统 8051 实现全兼容,还集成了字节量为 512 的 RAM,除此之外,其对定时器软件的使用可完成若干个 UART。报警显示模块设计如图 3 所示。图 3 中,辅单片机以串口为媒介实现与主单片机通信,获取公路摊铺机故障状态数据。电源以及串口的通信状态由信号指示模块实现,通过 LED 显示模块以及声音报警模块可实时高效显示公路摊铺机机械故障诊断报警结果^[7-8]。

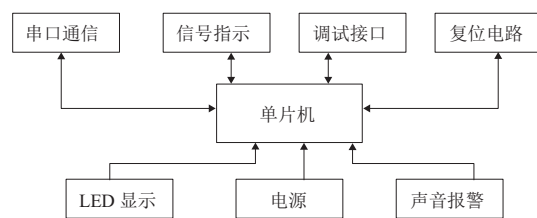


图3 报警显示模块设计

1.3 软件设计

1) 数据去噪

应用小波阈值去噪方法对其执行数据去噪^[9]。如果将不含噪声的原始公路摊铺机状态数据信号、采集到的含有噪声的公路摊铺机信号以及公路摊铺机噪声信号分别表示为 $s(r)$ 、 $s_n(r)$ 与 $x(r)$,那么有

$$s_n(r) = s(r) + x(r) \quad (1)$$

不含噪声的原始公路摊铺机状态数据信号 $s(r)$ 在执行小波变化操作后,能量主要集中于具有较大幅值的小波系数处,而噪声数据常常是呈现随机分布的状态,因而能量自然也不会集中于小波系数处,只是会在小波域呈现相对比较匀称的状态分布。根据上述分析,通过小波阈值法便可实现对含有噪声的公路摊铺机状态数据信号的噪声去除。具体去噪流程如下。

①对公路摊铺机状态数据进行小波变换。首先选择合适的小波基以及分解层数量用于执行公路摊铺机状态数据小波变换操作。小波基以及分解层数确定后对含噪声的公路摊铺机状态数据信号 $s_n(r)$ 执行小波变换操作,获得的小波系数用 $d_{j,r}$ 代表,其中,小波分解层数用 j 代表。

②对步骤 1) 中确定的各层小波系数 $d_{j,r}$ 进行小波阈值处理,获得新的小波系数,并将其表示为 $d'_{j,r}$ 。需要指出的是阈值 λ 并不是一个精确值,而是一个估计值,它是按照阈值规则通过合理的估计获得的。

③根据步骤 2) 中获得的新小波系数 $d'_{j,r}$ 对公路摊铺机状态数据执行小波重构操作,便可获得去除噪声后的公路摊铺机状态数据信号。

2) 模糊孤立森林算法的数据异常检测

为提升数据异常检测的效率,本文应用孤立森林算法对公路摊铺机状态数据进行异常检测。首先对隔离树以及路径长度进行如下定义。

①隔离树。 T 与 N 分别代表二叉树与二叉树的节点。如果 N 代表的是二叉树的叶子节点,则将其定义为外部节点,如果 N 拥有两个节点,则视其为内部节点。

②路径长度。 $h(g)$ 代表路径长度,所谓路径长度就是隔离树自隔离树的根节点起遍历各个外部节点后所有遍历过的总量。

在应用孤立森林算法进行异常数据检测时,需要经历两个阶段,即隔离树构建阶段与异常分数获取阶段。具体的实施过程如下:

- 在公路摊铺机状态训练数据集中任意挑选 b 个公路摊铺机状态数据点当作子样本,送至孤立树根节点;
- 任意选取一个维度,在当前公路摊铺机状态数据允许的范围内,生成一个切割点,将其表示为 p ;

c) p 为分属生成超平面一个,利用该超平面对公路摊铺机状态数据空间执行切分操作,切分后形成左右两个子空间,将维度低于 p 的公路摊铺机状态数据点与维度高于 p 的公路摊铺机状态数据点分别置于左右两个子空间;

d) 不断重复步骤②与步骤③,获得新的叶子节点,当公路摊铺机状态数据无法被分割或者分割次数已达 \log_2^b ,分割操作完毕。

根据隔离树与二叉查找树间的结构等价关系可将二叉查找树中查询路径的长度用公式表示为

$$D(n) = 2H(n-1) - \frac{2(n-1)}{n} \quad (2)$$

式中: n 为叶子节点的数量; $D(n)$ 代表叶子节点数量 n 为给定情况下的 $h(g)$ 平均值; H 代表平均深度。

异常分数的求解过程可用公式表示为

$$S(g, n) = 2^{\frac{-E[h(g)]}{D(n)}} \quad (3)$$

式中 $E[h(g)]$ 代表隔离树集合中 $h(g)$ 的平均值。

此时,通过孤立森林算法得到的异常检测分数值进行异常判断,即:公路摊铺机状态数据测试样本中的数据如果几乎全部都为正常值,则有 $E[h(g)] \rightarrow D(n)$ 并且 $S \rightarrow 0.5$;公路摊铺机状态数据测试样本如果存在异常,则有 $E[h(g)] \rightarrow 0$,并且 $S \rightarrow 1$;公路摊铺机状态数据测试样本如果存在异常数据的可能性极小,则有 $E[h(g)] \rightarrow (n-1)$,并且 $S \rightarrow 0$ 。

但孤立森林算法对数据的属性均是随机选取的,导致对于异常点的选取范围过大,不能够准确地判定故障。因此,引入了模糊综合评价方法对孤立森林进行改进。具体过程如下:

以公路摊铺机运行数据的属性为评价对象,构建评价因素集合 $W^* = \{w_1, w_2, \dots, w_m\}$,评价结果集合为 $v^* = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$;在此基础上进行单因素评价,从单因素的角度对各评价等级的模糊子集判定隶属度;通过专家打分结果,构建模糊关系矩阵为

$$T = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & \dots & t_{1m} \\ t_{21} & t_{22} & \dots & t_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ t_{n1} & t_{n2} & \dots & t_{nm} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中 t_{ij} 为模糊向量,表示某个待评价因素对评价结果集合中各个评价结果的隶属程度。

各个评价因素在结果判断的评价结果中的重要程度不同,因此,需要对评价因素的隶属度进行求解,将孤立森林算法得到的异常分数值进行归一化处理。将归一化处理后的值作为单因素隶属度的模糊分量,构成模糊集合。在此基础上进行多因素模糊评价,得到待评价对象的模糊综合评价结果向量。将公路摊铺机运行数据的异常分数值按相对位置排序。由此,实现对异常分数值的判定,从而更为准确地确定公路摊铺机机械故障。

2 实验与分析

实验以某厂生产的某型号公路摊铺机为对象,应用本文系统对其进行机械故障诊断。

针对 12 组含有异常公路摊铺机状态数据信号,本文系统的公路摊铺机机械故障诊断结果如表 1 所示。从表 1 可

以看出,应用本文系统可以有效诊断公路摊铺机机械故障,更好满足实际公路摊铺机机械故障诊断工作需要。

表 1 公路摊铺机机械故障诊断结果

编号	实际异常数据量/个	检测异常数据量/个	摊铺机故障类型
1	224	224	行走马达故障
2	127	127	电磁阀接线故障
3	206	206	螺旋分料器故障
4	269	269	行星减速器故障
5	356	356	动力传送链条故障
6	571	571	液压泵故障
7	423	423	液压泵电机故障
8	102	102	液压过滤器故障
9	138	138	熨平板提升回路故障
10	266	266	熨平板升降控制阀故障
11	207	207	拆检工作泵故障
12	521	521	拆检液压缸故障

为了验证本文系统在公路摊铺机状态数据信号去噪方面的优势,将公路摊铺机状态数据原始信号、采集到的含噪声的公路摊铺机状态数据信号以及应用本文系统去噪后的公路摊铺机状态数据信号进行对比,获得的去噪效果对比图如图 4 所示。从图 4 可以看出,应用本文系统对采集到的公路摊铺机状态数据信号去噪后,获得的数据信号曲线基本去除了噪声干扰。

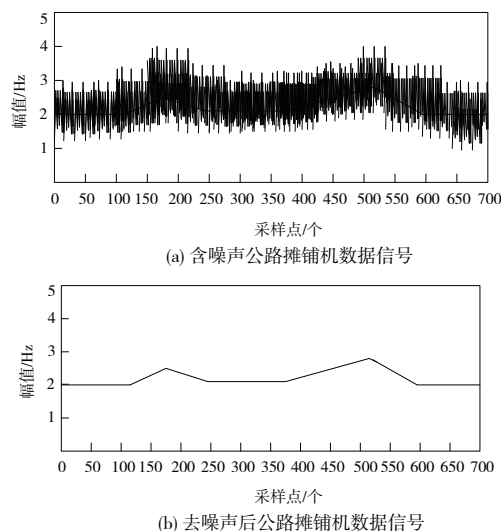


图 4 去噪效果对比图

图 5 是分别应用本文系统与文献[3]、文献[4]系统对公路摊铺机进行机械故障诊断后获得的公路摊铺机摊铺效率对比结果。由图 5 可知,应用本文系统进行公路摊铺机机械故障诊断后,4 台公路摊铺机的摊铺量均在 1 000 m 左右,而应用其他两种系统进行公路摊铺机机械故障诊断后,4 台公路摊铺机的摊铺量分别为 500 m 左右与 750 m 左右,本文系统应用后公路摊铺机摊铺量明显高于其他两种系统。究其原因主要是本文系统能够更高效、

(下转第 158 页)

- [2] 李国丽,李浩霖,王群京,等. 永磁球形电机 Stribeck 摩擦模型参数辨识[J]. 电机与控制学报,2022,26(4):121-130.
- [3] 张铁,李秋奋,邹焱颢. 轻载机器人动力学参数辨识中的关节摩擦力辨识[J]. 润滑与密封,2020,45(7):1-7.
- [4] 张铁,胡亮亮,邹焱颢. 基于混合遗传算法的机器人改进摩擦模型辨识[J]. 浙江大学学报(工学版),2021,55(5):801-809,854.
- [5] 于仕泽,王周义,戴振东,等. 一种面向航天需求的仿生柔性机械臂的设计[J]. 机械制造与自动化,2020,49(1):134-137.
- [6] SPONG M W. Modeling and control of elastic joint robots[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1987, 109(4):310-318.
- [7] IBRAHIM K, SHARKAWY A B. A hybrid PID control scheme for flexible joint manipulators and a comparison with sliding mode control[J]. Ain Shams Engineering Journal, 2018, 9(4):3451-3457.
- [8] 刘泽鹏. 基于经验模态分解和优化概率神经网络的变压器励磁涌流识别研究[D]. 北京:华北电力大学(北京),2021.
- [9] 沈晓燕,王雪梅,王燕. 基于样本熵和模式识别的脑电信号识别算法研究[J]. 计算机工程与科学, 2020, 42(8):1482-1488.
- [10] 赵兵,王增平,纪维佳,等. 基于注意力机制的 CNN-GRU 短期电力负荷预测方法[J]. 电网技术, 2019, 43(12):4370-4376.
- [11] 牛哲文,余泽远,李波,等. 基于深度门控循环单元神经网络的短期风功率预测模型[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(5):36-42.
- [12] 薛阳,王琳,王舒,等. 一种结合 CNN 和 GRU 网络的超短期风电预测模型[J]. 可再生能源, 2019, 37(3):456-462.

收稿日期:2022-02-25

(上接第 154 页)

准确地诊断出公路摊铺机机械故障,更及时地对有故障的公路摊铺机进行维修,从而提高了公路摊铺机的工作效率。

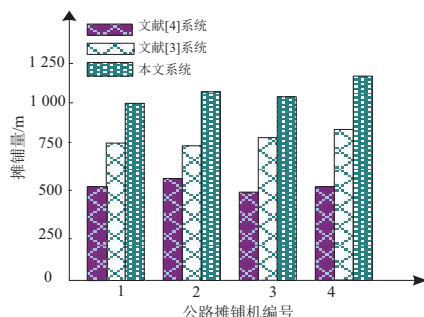


图5 公路摊铺机摊铺效率对比

AUC 作为不同类别数据区分度的代表,是反映公路摊铺机状态数据异常检测效果的一个重要指标。为验证本文系统在公路摊铺机状态数据异常检测方面的优势,绘制在不同信噪比环境下,应用本文系统进行公路摊铺机状态数据异常检测获得的 AUC 曲线,具体如图 6 所示。分析图 6 可知,随着数据样本点数量的增加,应用本文系统进行公路摊铺机状态数据异常检测时获得的 AUC 值也呈现出下降的趋势,但是下降趋势非常不明显,并且在不同信噪比环境下的 AUC 曲线也十分接近。实验证明:应用本文方法可较好实现对公路摊铺机状态数据的异常检测,将该结果用于公路摊铺机故障诊断,可获得较好的故障诊断效果。

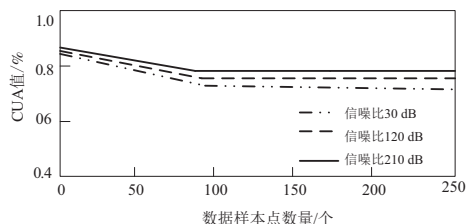


图6 不同信噪比 AUC 曲线

3 结语

本文设计的基于嵌入式和模糊孤立森林的公路摊铺机机械故障诊断系统,可有效诊断公路摊铺机机械故障,满足实际公路摊铺机故障诊断工作需要。本文系统可实现公路摊铺机机械故障诊断,检测出的异常数据量与实际异常数据量完全相符合。数据信号去噪效果较好,可降低后续运算的复杂性,有效提升公路摊铺机机械故障诊断的准确性与效率。

参考文献:

- [1] 王友宝. 摊铺机摊铺厚度测量系统的测量精度研究[J]. 筑路机械与施工机械化, 2018, 35(11):86-89.
- [2] 郑建丰,冯虎,李相锋. 基于 AMESim 的摊铺机负荷传感多路阀液压系统仿真[J]. 筑路机械与施工机械化, 2018, 35(1):97-101, 105.
- [3] 齐继阳,刘英豪,王凌云,等. 基于故障率与故障症的设备故障诊断方法[J]. 机械设计与研究, 2018, 34(3):17-21.
- [4] 白涛,张军,叶敏,等. 多总线接口终端的摊铺机远程监控系统研究[J]. 控制工程, 2020, 27(10):1788-1794.
- [5] 李长安. 基于模糊 PID 控制的摊铺机布料器控制系统[J]. 筑路机械与施工机械化, 2019, 36(7):94-98.
- [6] 胡师杰,权磊,田波,等. 水泥混凝土路面滑模摊铺机行进过程颠簸姿态研究[J]. 公路, 2018, 63(6):6-11.
- [7] 郑宁德,潘海洋,程军圣,等. 基于自适应经验傅里叶分解的机械故障诊断方法[J]. 机械工程学报, 2020, 56(9):125-136.
- [8] 任世锦,潘剑寒,李新玉,等. 基于 ELMD 与改进 SMSVM 的机械故障诊断方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2019, 51(5):693-703.
- [9] 谢军,刘云鹏,刘磊,等. 局放信号自适应加权分帧快速稀疏表示去噪方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(21):6428-6438.

收稿日期:2022-09-19