

列车车轮状态监控系统设计与实现

房楠, 朱亚男

(西安铁路职业技术学院, 陕西 西安 710014)

摘要: 针对铁路交通行车安全问题, 聚焦于列车车轮振动状态数据的实时采集与分析, 通过挖掘列车运行规律实现运行工况预测, 以保障行车安全。选取列车车轮作为监控对象, 构建了实时的车轮状态监控系统, 设计了全面的系统架构和数据处理方法。通过 LabVIEW 编程实现了实时数据采集、处理、存储与展示等功能, 同时采用最小二乘拟合法对车轮振动数据进行处理, 以提高数据的准确性和可靠性。实验验证表明, 系统具有良好的实时性与准确性, 为预防行车事故、预判行车状态提供了有力的技术支持, 应用前景广阔。

关键词: 列车车轮; 振动状态; 系统设计

中图分类号: U269; TP18

文章编号: 1000-0682(2025)02-0037-05

文献标识码: A

DOI: 10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2025.02.007

Design and implementation of a train wheel condition monitoring system

FANG Nan, ZHU Ya'nan

(Xi'an Railway Vocational & Technical Institute, Shaanxi Xi'an 710014, China)

Abstract: This paper focuses on the real-time collection and analysis of train wheel vibration data in relation to railway traffic safety. The aim is to predict operational conditions by exploring train operation patterns, thereby ensuring safety. The study selects train wheels as the monitoring object and constructs a real-time wheel condition monitoring system. A comprehensive system architecture and data processing method are designed. Functions such as real-time data acquisition, processing, storage, and display are achieved through LabVIEW programming. Furthermore, the least squares fitting method is employed to process wheel vibration data, enhancing data accuracy and reliability. Experimental verification demonstrates that the system exhibits excellent real-time performance and accuracy, providing strong technical support for preventing train accidents and predicting train conditions. The research showcases significant application prospects in the field.

Keywords: train wheel; vibration status; system design

0 引言

鉴于铁路交通的迅猛发展, 行车安全标准日益提升, 然而受零部件故障或汛期洪涝、地震等自然灾害影响, 列车脱轨、失稳或制动失效等行车安

全事故时有发生。因此, 通过列车监控系统采集数据, 再通过数据分析等手段实现故障预判, 从而有效规避行车事故是轨道交通领域一直以来的研究重点。

张志波等^[1]研究高速列车转向架监测系统, 实现了转向架稳定状态的识别; LI 等^[2]研究监测数据故障分析方法, 实现了故障的数据预测。

然而现有研究成果多聚焦在通过对关键部件的数据监控、分析从而实现故障预判和状态识别上, 忽略了列车自身运行规律的数据挖掘, 而掌握合理的列车运行规律, 可以实现列车运行工况的

收稿日期: 2024-08-01

基金项目: 陕西省教育厅 2023 年度自然科学类专项科研计划项目“基于改进单质点牵引计算模型的列车停车对标仿真训练系统”(23JK0623)

第一作者: 房楠(1989—), 女, 陕西商洛人, 硕士, 主要研究方向为机车制动、智能制造技术。E-mail: 312271170@qq.com

预测、列车制动定点停车数据指导以及列车故障预警等。

由于列车车轮是列车的核心构成部分,列车车轮的振动状态对列车的运行稳定性和安全性具有直接影响^[3],因此该文选取列车车轮作为监控对象,构建列车车轮状态实时监控系统,以实现实时且持续地获取车轮振动状态数据,再通过数据规律实现运行工况预测,这对于预防行车事故、确保行车安全具有深远的意义。

1 轮对振动模态分析

车轮振动主要源自列车行驶过程中车轮与铁轨的接触,此类振动的频率通常与列车的运行速度及轮轨系统的几何参数紧密相关。一般而言,常规火车车轮与铁轨的接触频率在每秒数十次至数百次之间。

除此之外,列车自身的动力系统以及轨道的不平整性等因素也会引发其他类型的振动。这些振动的频率范围可能更为广泛,并可能包含高频成分^[4]。

为深入探究,该研究从列车实际结构中选取车轮进行物理受力分析,如图 1 所示。

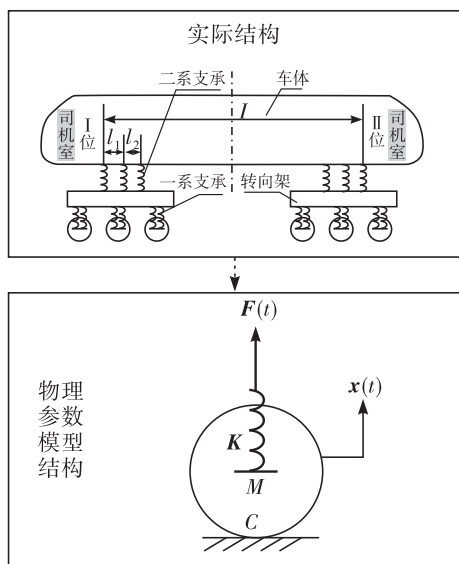


图 1 车轮物理参数模型结构图

车轮振动模型公式见式(1):

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F(t) \quad (1)$$

式中: $F(t)$ 为车轮 n 维激振力向量(包含列车轮轴重), \ddot{x}, \dot{x}, x 分别为车轮 x 维位移、速度和加速度对应的响应向量; M 为车轮的结构质量; C 为车轮的刚度; K 为车轮所受阻尼矩阵。

2 系统设计与软件实现

2.1 车轮状态监控系统架构

系统总体设计如图 2 所示。

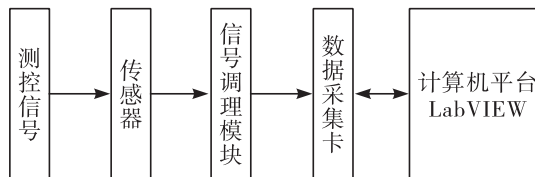


图 2 系统总体设计图

系统主要由以下几个层次构成:

(1) 传感器层: 此层负责采集火车车轮的多项关键数据,包括但不限于旋转速度、旋转方向以及车轮位置等核心参数;

(2) 数据采集层: 借助数据采集卡或专门的数据采集模块,此层负责收集来自传感器层的数据,并进行初步的数据预处理工作;

(3) 数据处理层: 在此层次,对采集到的数据进行更为深入的处理、分析与存储。同时,该层还承担着实现实时监控与报警功能的重要职责;

(4) 用户界面层: 采用 LabVIEW 软件编程实现,致力于提供一个用户友好的交互界面,用于展示车轮的实时状态与历史数据。同时,它还支持用户进行个性化的配置与系统设置;

(5) 数据存储层: 作为系统架构的最后一层,数据存储层负责安全、高效地存储车轮的历史数据,以便后续进行深入的分析与查询工作。

2.2 硬件选型

系统的硬件平台主要由传感器、信号调理模块、数据采集模块以及 PC 机构成。

(1) 传感器组件

传感器模块是数据采集的直接环节,需要采集的数据信息包括车轮转速数值、转向和位置信息。

转速方面,考虑到车轮表面磨损或污染的影响,选择非接触式旋转速度传感器实时监测车轮的旋转速度;

转向方面,考虑到列车运行过程环境条件复杂,为保证高精度的数据获取,选择稳定性较高的磁阻传感器检测车轮的旋转方向;

位置方面,考虑到车轮位置信息可用于制动停车模型建立,因此数据准确性尤为重要,选择 GPS 和 RFID 复合技术,能够提供精确的位置数据。

(2) 信号调理模块

信号调理模块需要具有广泛的增益控制和滤波选项,考虑到系统运行稳定性和后续更换维护的便利性,选择具有多通道输入、增益控制可调、支持多种输入和配置选项的多功能信号调理模块。

通过精确的增益控制和滤波选项,信号调理模块调频范围广(1.526 ~ 10.000 kHz),能够优化信号质量,减少噪声和干扰,确保了数据采集的准确性和稳定性。

(3) 数据采集模块

数据采集模块需要在适配多传感器通道输入的基础上,保证数据采集的实时性和完整性。因此选择多输入、高采样率和高精度的数据采集卡。

2.3 数据处理与采集

在监控系统中,由于采样受到温度、传感器周围环境干扰等不确定性影响,会导致采样数据与实际值差异较大,因此采用消除干扰趋势项的数据处理方法,趋势项的消除方法很多,具体选择取决于信号特征、被测试对象的物理模型等多种因素。由于列车行驶速度属于确定性信号,而车轮状态会受到振动影响有随机信号产生,因此主要采取拟合趋势项的方式来进行消除^[5]。

选用最小二乘拟合法对趋势项进行消除,具体见式(2):

$$x_i = u_i - b_0 + b_1 i \Delta t \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

式中: b_0 和 b_1 为拟合系数,赋值见式(3):

$$b_0 = \frac{2(2N+1) \sum_{n=1}^N u_n - 6 \sum_{n=1}^N n u_n}{N(N-1)}, \quad (3)$$

$$b_1 = \frac{12 \sum_{n=1}^N n u_n - 6(N+1) \sum_{n=1}^N u_n}{\Delta t N(N-1)(N+1)}$$

其中: μ_n 为测试数据; N 为样本长度; Δt 为采样间隔时间。

数据采集模块通过与计算机系统底层硬件驱动及数据采集卡的实时通讯来实现数据采集任务。该文所采用的数据采集卡 MP422, 内置了一个 512 kB 的数据缓冲区 (DFIFO)。在实时数据采样过程中,采集到的数据会先被存储到这个缓冲区中。当计算机发出读取数据命令 (Read AD) 后,数据会被传输

到计算机中,同时缓冲区会被清空,以确保能够不间断地进行全速数据采集,数据采集软件流程设计如图 3 所示。

数据读取包括用户手动搜索文件和数据连续回放功能,其过程与图 3 类似,设计流程如图 4 所示。

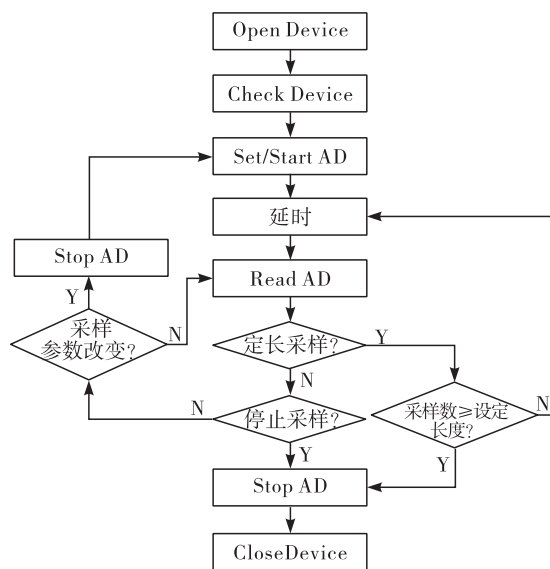


图3 数据采集和存储流程图

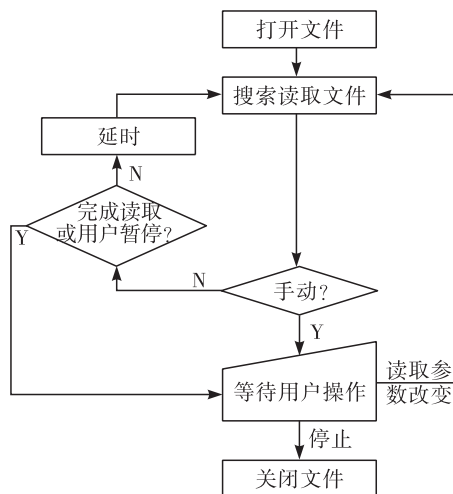


图4 数据读取流程图

2.4 软件实现

列车车轮状态监控系统数据识别程序设计框图如图 5 所示^[6]。图 5 中,①为创建式(2)转换矩阵;②为计算式(3)多项式系数;③为计算整体模式参数。监控系统主界面设计效果如图 6 所示。

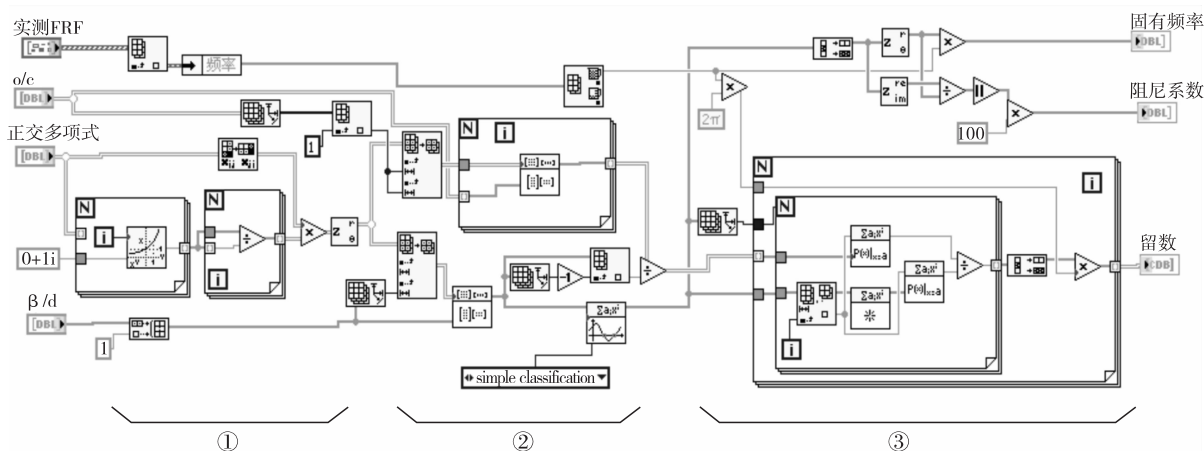


图5 数据识别程序框图

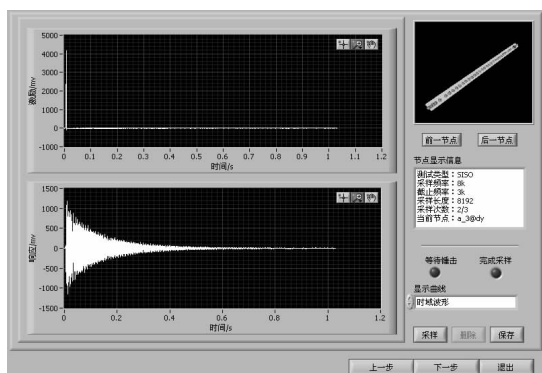


图6 监控系统主界面

3 系统验证与结果分析

为验证轮对状态监控系统数据监控的实时性与准确性,考虑到车轮振动直接关系到列车运行状态,是对行车工况预测的重要数据因素,因此以试验装置车轮振动数据为评判维度进行系统采集数据验证。

在实验中为模拟运行中车轮的振动,采用锤击法进行振动模式模拟^[7],激振方式方面采取多点移步敲击、单点响应的方法。验证试验装置如图7所示。

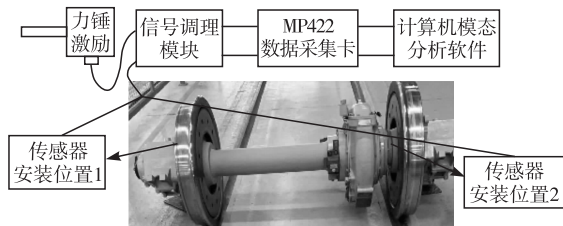


图7 验证试验装置

实验采样参数设定:采样频率设定为 8 kHz,软件低通滤波的截止频率设为 3 kHz,采样长度设为

8192 点,采样次数为 3 次。依次改变敲击点的位置,获取不同激励点下同一响应点的所有测点的激励与响应信号,计算相关曲线,并将结果保存。

针对试验装置的所有测点,绘制了频响函数的幅值谱叠加曲线图,如图8所示。从图中可以清晰地观察到该车轮对应的 5 阶模态,并且在大约 300 Hz 的频率附近,可能存在着某一阶模态。

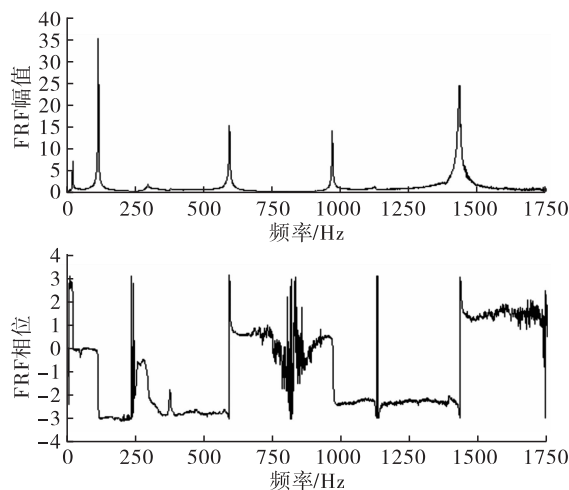


图8 验证试验频响函数幅值谱叠加曲线图

采用式(2)的拟合法进行拟合识别振动模态,首先,对 0 ~ 约 1700 Hz 的频响函数执行逆傅里叶变换,以获得各测点的脉冲响应函数。随后,通过对这些函数进行总体拟合,进一步求取了模态参数。随后,将拟合阶次设定为 18 次,并直接进行拟合,输出了 18 组模态参数。图9展示了测点的拟合曲线与实际频响函数曲线之间的对比情况。

通过图9可看出,系统运行流畅,数据实时性高;拟合方法可靠,拟合结果准确度高达 97.3%,模态识别正确率完全满足实际运行要求。

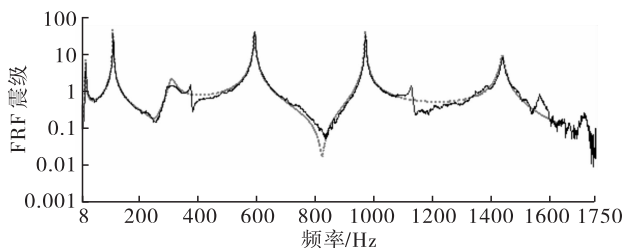


图 9 最小二乘拟合曲线对比

4 结论与展望

该文选取列车车轮作为监控对象,旨在通过实时、持续地获取车轮振动状态数据,进一步挖掘运行规律,实现运行工况预测,以保障行车安全。

该文分析了车轮振动的多种模态,并基于此设计了一套全面的列车车轮状态监控系统,通过 LabVIEW 编程实现了系统各项功能。最后,通过实验验证了轮对状态监控系统的实时性与准确性,并展示了系统的应用效果。

该文的创新点:

(1) 选取列车车轮作为监控对象,构建了实时的车轮状态监控系统,填补了列车自身运行规律数据挖掘的空白;

(2) 设计了全面的系统架构和数据处理方法,提高了数据的准确性和可靠性;

(3) 通过实验验证了系统的有效性和准确性,为列车行车安全提供了新的技术手段。

未来可进一步拓展和优化列车车轮状态监控系统,包括提高系统的采样率和精度、优化数据处理算法、增强系统的实时性和稳定性等。同时,也可探索将该系统与其他列车监控系统进行集成,以实现更全面的列车状态监测和故障预判。

参考文献:

- [1] 张志波,张振先,冯永华. 高速动车组转向架综合智能检测技术研究[J]. 铁道车辆,2021,59(06):40-44.
 - [2] LI H F, Parikh D, He Q. Improving rail network velocity: A machine learning approach to predictive maintenance [J]. Transportation Research Part C – Emerging Technologies, 2014(45):17-26.
 - [3] 朱亚男,李冰毅,房楠,等. 动车组驱动装置故障模式分析及风险评估[J]. 工业仪表与自动化装置,2022(2):72-75.
 - [4] 张龙,张号,周建民,等. 采用显式动力学的轴承性能退化评估指标构建[J]. 西安交通大学学报,2022,56(8):11-21.
 - [5] 李震. 面向模态分析的多通道同步采集与数据处理系统设计[D]. 重庆:重庆大学,2008.
 - [6] 杨乐平. LabVIEW 高级程序设计[M]. 北京:清华大学出版社,2003.
 - [7] PAN Difu, WANG Mengge, ZHU Yanan, et al. An optimization algorithm for locomotive secondary spring load adjustment based on artificial immune [J]. Journal of central south university, 2013(20):3497-3503.
-
- (上接第 36 页)
- 参考文献:
- [1] 杨旭. 核电厂蒸汽排放系统安全性分析及改进[J]. 科技资讯,2022,20(23):25-28.
 - [2] 张楠,葛月霆,张雷. 蒸汽大气排放系统(TSA)大气排放阀 30 分钟不干预自动控制方案设计[J]. 工业仪表与自动化装置,2020(6):35-38.
 - [3] 广东核电培训中心. 900 MW 压水堆核电站系统与设备[M]. 北京:原子能出版社,2005.
 - [4] 赵建,刘东亮,马志昕. 某核电厂安全级 DCS 网络结构分析与改进研究[J]. 核动力工程,2021,42(6):148-154.
 - [5] 王纪坤,张智慧,石桂连,等. ACPR1000 核电厂多样性驱动系统人机接口设置[J]. 核电子学与探测技术,2021,41(2):327-332.
 - [6] 窦维维,马忠刚,李萌,等. 核电厂安全控制显示模拟系统的设计与实现[J]. 自动化仪表,2021,42(7):59-62.
 - [7] 罗炜,王银丽,陈学坤,等. 基于 FirmSys 平台的核电厂反应堆保护系统设计[J]. 自动化仪表,2021,42(S1):65-69.
 - [8] 何庆镭,李颖,张海波,等. 基于数字化技术的核电厂后备盘设计[J]. 自动化仪表,2023,44(S1):88-91.
 - [9] 马晓宇,黄晓津,王冬. 基于 FPGA 的核安全级仪控系统设计与验证[J]. 核动力工程,2021,42(2):115-120.
 - [10] 核电厂应对全厂断电设计准则:NB/T 20066-2012[S]. 2012.
 - [11] 张博平,初永越,张适,等. M310 机组应对全厂断电事故的优化研究[J]. 核科学与工程,2019,39(5):796-803.
 - [12] 吴鹏,王冠一,张阳. CPR1000 核电厂全厂断电事故情况下严重事故缓解措施有效性研究[J]. 核安全,2020,19(2):78-85.