

# 基于MPU6050惯性传感器的钢厂天车大车运行监测系统研究

赵登鲁, 王冠, 华云松

上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海

收稿日期: 2025年6月29日; 录用日期: 2025年7月22日; 发布日期: 2025年7月30日

## 摘要

天车大车(Bridge Girder Traveling Mechanism)作为钢铁生产流程中的核心运输设备,其运行稳定性直接关系到生产安全与效率。针对传统监测方案成本高、实时性差、环境适应性弱的痛点,本文提出一种基于MPU6050惯性传感器的天车大车运行状态监测系统。该系统以STM32F103ZET6为核心处理器构建多终端数据采集模块,通过LoRa无线网络实现数据实时传输,结合QT框架设计上位机人机交互界面,并创新性采用动态阈值与随机森林融合的双决策算法,实现对啃轨、异常振动等故障的精准检测。实验表明,在模拟天车运行平台上,系统对严重啃轨(姿态角偏移  $> 5^\circ$ )和异常振动(加速度超限)的检测正确率分别达98.1%和92.3%,显著优于传统固定阈值方法。该方案为工业天车的低成本、高鲁棒性状态监测提供了新思路。

## 关键词

天车监测, MPU6050, 随机森林, 动态阈值, STM32, 异常检测

# Research on the Operational Monitoring System for Bridge Girder Traveling Mechanism in Steel Plants Based on the MPU6050 Inertial Sensor

Denglu Zhao, Guan Wang, Yunsong Hua

School of Optical Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Jun. 19<sup>th</sup>, 2025; accepted: Jul. 22<sup>nd</sup>, 2025; published: Jul. 30<sup>th</sup>, 2025

文章引用: 赵登鲁, 王冠, 华云松. 基于 MPU6050 惯性传感器的钢厂天车大车运行监测系统研究[J]. 建模与仿真, 2025, 14(7): 295-304. DOI: 10.12677/mos.2025.147538

## Abstract

The bridge girder traveling mechanism (BGT) serves as a core transportation system in steel production, where its operational stability is directly linked to production safety and efficiency. Addressing the challenges of high cost, poor real-time performance, and weak environmental adaptability in traditional monitoring solutions, this paper proposes a BGT operation state monitoring system based on the MPU6050 inertial sensor. The system employs the STM32F103ZET6 as the central processor to construct a multi-terminal data acquisition module, utilizes a LoRa wireless network for real-time data transmission, and integrates a human-machine interaction interface designed with the Qt framework. Moreover, a novel dual-decision algorithm combining dynamic thresholding and random forest classification is implemented to achieve accurate detection of rail gnawing and abnormal vibrations. Experimental results on a simulated BGT platform demonstrate that the system achieves detection accuracies of 98.1% for severe rail gnawing (attitude angle deviation  $> 5^\circ$ ) and 92.3% for abnormal vibrations (exceeding acceleration limits), significantly outperforming traditional fixed-threshold methods. This study provides a novel approach for cost-effective and robust condition monitoring of industrial BGT systems.

## Keywords

Crane Monitoring, MPU6050, Random Forest, Dynamic Threshold, STM32, Anomaly Detection

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

天车作为现代工业物料调运的核心装备，其运行稳定性直接影响生产流程安全与效率。在钢铁冶金、港口物流、重型机械制造等领域，天车长期处于高负荷、高频次作业环境，天车运行机构作为承载吊装单元的关键运动部件，其轨道偏移、车轮啃轨等机械故障极易引发结构性损伤[1]。现有监测方法包括基于多物理传感器直接测量方法、基于视觉传感的间接测量方法。多物理传感器方案需安装多种测量设备，拆装不够方便，同时，高质量传感器价值不菲，对于中小规模下的作业生产，成本问题是不可忽视的问题[2]。视觉传感间接测量方案同时面临作业生产现场，环境复杂、视觉盲区等因素，也会导致基于视觉传感方案存在不可避免的弊端。综上，本文提出基于 MPU6050 惯性传感器监测方式，可通过基于 MPU6050 单一传感器实现多种物理量的测量，同时结合多变量融合算法实现天车天车运行监测。

## 2. 系统构成

本文设计了一种基于 MPU6050 惯性传感器的钢厂天车天车运行监测系统，旨在使用一种低成本方案实现对天车天车运行的监测，同时提高异常场景监测的精度。如图 1 所示，系统按功能分主要包含数据采集终端、人机交互 UI 设计、数据分析三大单元。数据采集终端实现对天车天车运行过程姿态参数、加速度实时采集，通过 Lora 模块无线传输至由 QT 设计的上位机，实现数据可视化以及人机交互，最终数据经过阈值判断和随机森林模型处理实现对天车运行过程中异常状态的实时监测。

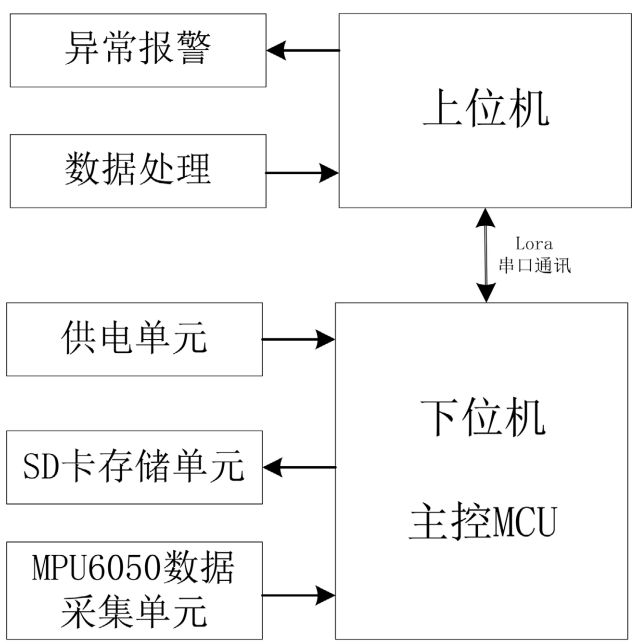


Figure 1. System chart  
图 1. 系统框图

### 3. 硬件设计

#### 3.1. 硬件选型

硬件设计主要为数据采集终端部分，主要包括 STM32F103ZET6 核心处理器、MPU6050 惯性传感器、SD 卡存储单元、lora 无线传输模块几部分组成。

**STM32F103ZET6:** STM32F103ZET6 是 STMicroelectronics 公司基于 ARM Cortex-M3 内核推出的一款高性能 32 位微控制器，主频最高可 72 MHz，内置 512 KB Flash 和 64KB SRAM，满足本系统实时性要求。集成丰富的外设接口，包括多通道 ADC、USART、SPI、I2C、CAN 及 USB 等，同时其高性能与低功耗特性，满足工业现场运行要求[3]。

**MPU6050** 六轴惯性传感器采用 MEMS 工艺集成三轴陀螺仪(量程  $\pm 250/500/1000/2000^{\circ}/s$ )和三轴加速度计(量程  $\pm 2/4/8/16\text{ g}$ )，其运动感知特性满足 DIN EN 13849-1 工业标准[4]。结合 DMP 内置的卡尔曼滤波器，可实现  $\pm 0.5^{\circ}$  的姿态角测量精度。传感器 I<sup>2</sup>C 接口最高支持 400 kHz 通信速率，满足 100 Hz 动态采样需求，考虑实时性要求，其高速通信性能以及采样性能，满足本系统功能需求[5]。

Lora 无线传输模块是 ALIENTEK 推出的一款采用 SMD 封装，体积小、微功率、低功耗、高性能远距离 LORA 无线串口模块。模块设计是采用高效的 ISM 频段射频 SX1278 扩频芯片，模块的工作频率 410 Mhz~441 Mhz，以 1 Mhz 频率为步进信道，共 32 个信道，采用双环形 512FIFO。本设计中，考虑到系统实时性，对采样频率有一定要求，短时间数据吞吐量较大，FIFO 结构可实现数据的快速采集以及实时发送需求。

#### 3.2. PCB 和外壳设计

如图 2 所示，考虑到系统实际运行环境复杂、电磁信号等干扰，为增强系统运行的稳定性和可靠性，采用通过嘉立创 EDA 进行 PCB 设计，增强电路的稳定性。如图 3 所示通过嘉立创 EDA 实现数据采集终端外壳的设计。

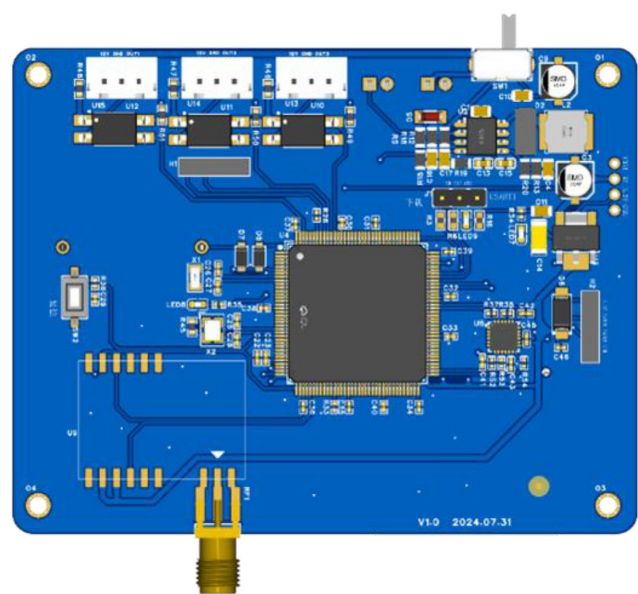


Figure 2. Lower computer PCB design  
图 2. 下位机 PCB 设计

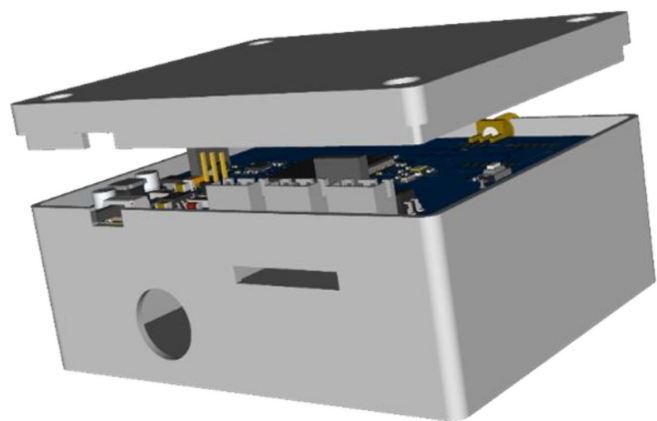


Figure 3. Data acquisition terminal shell design  
图 3. 数据采集终端外壳设计

4. 软件设计

本系统软件设计主要分为上位机和下位机两部分。上位机软件设计主要实现对数据的处理分析和人机交互，下位机软件设计主要实现对数据采集终端所采集的数据进行预处理、本地保存以及实时发送至上位机。

4.1. 上位机

天车大车运行状态是工业设备监测中的关键指标，其异常状态的可视化呈现与后期数据分析具有重要价值。上位机采用 Qt Widgets 框架进行开发，主要包含界面展示与数据处理两大模块。UI 设计涵盖运行日期、三轴加速度与姿态角的实时显示，并在检测到轨道偏斜或异常振动等情况时触发即时报警。系统运行过程中产生的异常信息将通过日志模块本地存储，为后续阶段性的运行状态分析提供有力支撑。

上位机软件流程图如图 4 所示：

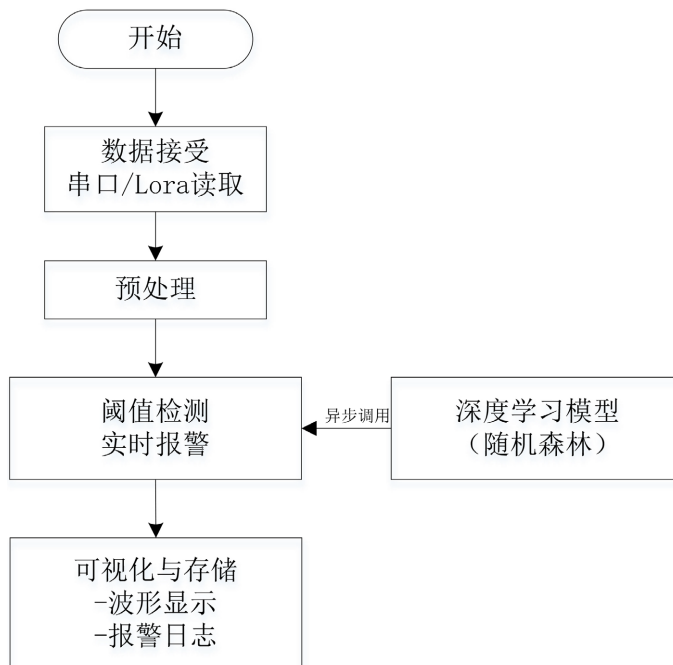


Figure 4. PC software flow chart

图 4. 上位机软件流程图

上位机启动后,首先通过 LoRa 接收模块实时获取下位机发送的数据包,解析后校验完整性并提取加速度、姿态角等关键参数,并对数据进行预处理。随后,启动并行异常检测流程——实时线程基于动态阈值(加速度  $\pm 2\text{ g}$ 、倾斜角  $\pm 5^\circ$ )触发报警,最后,检测结果与原始数据同步更新至人机交互界面:所有报警事件及传感器数据均存入 SQLite 数据库,支持历史查询与导出,为后期数据分析提供支撑。开发采用多线程架构:主线程负责 UI 渲染,独立子线程分别处理数据接收、阈值检测和模型推理,通过共享内存队列实现模块间高效协作,保障系统响应速度。

下位机 UI 设计如图 5 所示:

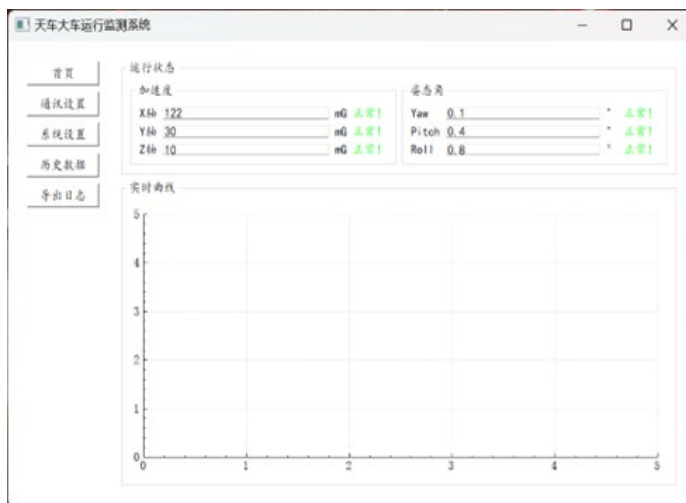


Figure 5. PC interface

图 5. 上位机界面

4.2. 下位机

下位机程序开发基于 Keil MDK 平台，考虑到天车大车在实际运行过程中受负载影响，整体运动速度相对较低，但为了确保系统具备良好的实时性与数据采集精度，本文在下位机软件设计中将采样频率设定为 100 Hz，以满足异常状态快速响应的需求。

下位机软件流程图如图 6 所示：

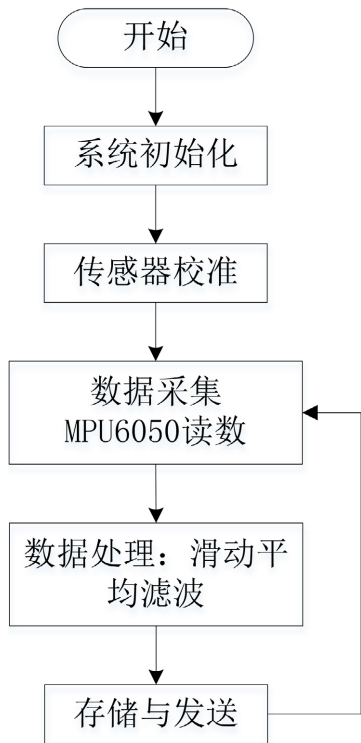


Figure 6. Lower computer program flow chart  
图 6. 下位机程序流程图

首先，在设备上电的瞬间，对下位机进行初始化，包含 STM32 外设驱动配置(I2C、SPI、UART、GPIO)、MPU6050 传感器零偏校准(静态采样 10 秒计算均值补偿)。初始化完成后，进入实时数据采集阶段：通过 MPU6050 以 100 Hz 频率读取天车的三轴加速度和姿态角数据。然后，完成数据采集后，对原始数据进行滑动平均滤波(窗口大小 10)和坐标系变换(局部转全局)。最终，将处理后的数据通过 LoRa 模块实时发送至上，并周期性(每秒一次)写入 SD 卡存储。

4.3. 检测算法

为适应天车大车在不同负载工况下运行状态差异较大的实际情况，本文在数据处理过程中引入了滑动阈值与随机森林融合的双重判别机制，以增强异常识别的自适应性与准确性。其中，动态滑动阈值算法基于采样窗口内的统计特性自动调整判定边界。设定滑动窗口大小为 100 个连续采样点，计算该窗口内姿态角(或加速度)的均值  $\mu$  与标准差  $\sigma$ ，动态阈值表达式如式(1)所示：

$$(t) = w + k\sigma \tag{1}$$

其中自适应系数  $k$  取值为 2。



该方法可根据实时数据波动情况自动调整报警阈值, 提高系统对不同负载条件下姿态异常的响应能力, 避免固定阈值带来的漏报与误报问题。

同时, 为进一步提升异常识别的准确性与泛化能力, 本文基于自建数据集训练了随机森林分类器。数据集包含三类典型运行工况: 正常、异常振动与啃轨, 各类数据均通过实验平台采集获得。特征选择方面, 输入向量包含加速度与姿态信息, 如式(2)所示:

$$X = [a_x, a_y, a_z, pitch, roll, yaw]^T \quad (2)$$

模型采用 Bootstrap 采样构建 100 棵决策树, 设定当超过 80% 的子分类器判断结果为异常时触发二级报警, 有效降低了轻度异常时的误判率, 提升了系统对中重度故障的识别能力。

## 5. 实验平台搭建与结果分析

### 5.1. 实验平台搭建

如图 7 所示, 实验平台采用深圳市中达力通运动系统有限公司生产的三坐标机器人控制系统, 行进距离编程精度可控制 mm 级, 通过其进行模拟钢厂天车大车运行状况, 通过编程实现特定速度的三轴坐标移动, 同时通过外界干预模拟天车在运行过程中的异常振动、啃轨异常状态。

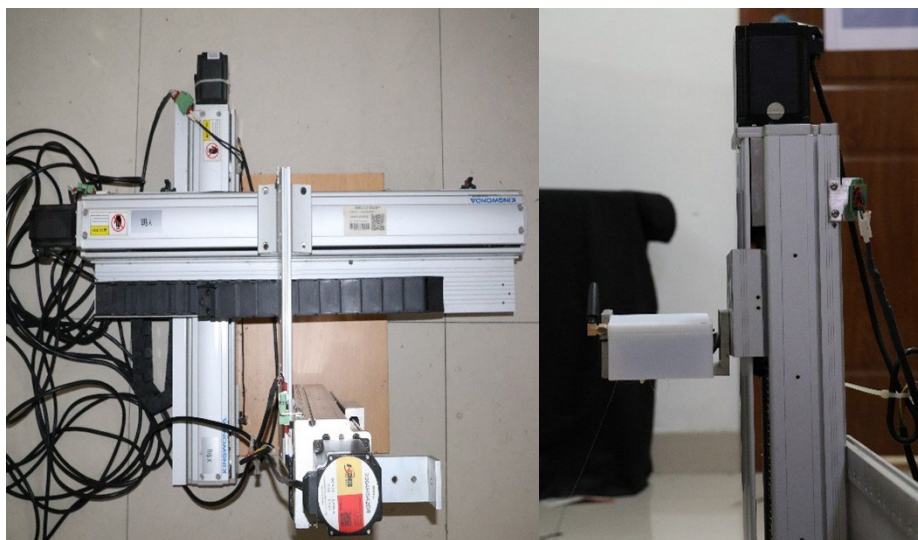


Figure 7. Experimental simulation platform

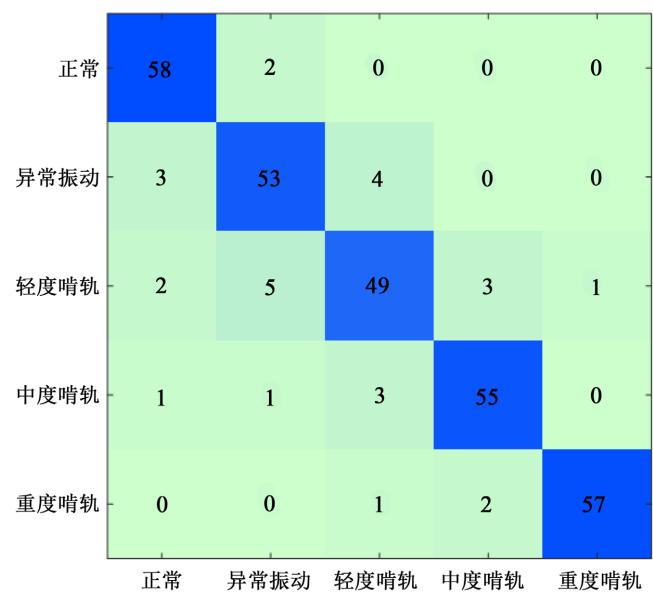
图 7. 实验模拟平台

### 5.2. 随机森林模型性能评估

为验证随机森林模型在天车运行异常识别中的性能表现, 本文构建包含正常工况、异常振动与啃轨三类故障场景的实验数据集。每类采集约 300 组样本, 每组包含 2 秒(约 200 帧)连续姿态与加速度数据。模型训练比例为 80%训练集/20%测试集[6]。

随机森林模型配置参数如下: 决策树数目( $n_{tree}$ ) = 100, 最大树深度未限制, 采用 Gini 指数作为特征划分标准。输入特征包括三轴加速度( $a_x, a_y, a_z$ )与姿态角( $pitch, roll, yaw$ )共 6 维向量, 数据经标准化处理后输入模型。

用混淆矩阵来表示测试集的分类预测结果, 如图 8 所示:



**Figure 8.** Confusion matrix of the crane state test set  
**图 8.** 天车状态测试集混淆矩阵

分析混淆矩阵可知，正常工况的分类准确率最高，60 个样本中有 58 个被准确识别，仅有 2 个被误判为“异常振动”，误报率为 3.3%，说明模型在面对无扰动或轻微偏移状态下具有良好的识别稳定性与可靠性。异常振动工况表现稍逊，其中 53 个样本被正确分类，但有 3 个误判为正常、4 个误判为轻度啃轨，主要由于振动状态在短时间窗内的幅值与频率特征与部分啃轨轻症状态高度相似，导致边界模糊，模型精确率略低。轻度啃轨的分类存在一定误差，共 49 条被正确识别，5 条误判为异常振动，3 条误判为中度啃轨，1 条误判为严重啃轨，说明轻度啃轨作为啃轨与振动状态的“过渡类型”，其特征区分性不强。中度啃轨识别效果较好，55 条被正确分类，仅有 5 条被误分到相邻类别，表现出模型对中等幅度姿态变化具备较强的识别能力。严重啃轨识别最为准确，60 个样本中有 57 个被正确识别，仅 1 条被误判为轻度啃轨、2 条为中度啃轨，准确率达 95% 以上，体现出模型在姿态角大幅偏移场景下的高鲁棒性。

总体来看，模型在五类故障工况中的整体识别准确率达 92.8% (277/298)，在不依赖视觉或编码器类定位装置的前提下，仅通过惯性传感器数据即可实现高效故障分类，具备良好的工程实用性，特别适用于啃轨类安全关键故障的在线监测与提前预警。

随机森林具备特征重要性评估能力，通过统计各特征对决策树分裂的贡献度衡量其在模型中的影响权重，根据表 1 可知，姿态角信息(pitch、roll)相较于加速度量更具分类辨识力，尤其在区分机械位姿异常时表现突出。

表 1 为模型中 6 个输入特征的归一化重要性得分(Gini 重要性):

**Table 1.** Importance score results  
**表 1.** 重要性得分结果

| 特征    | pitch | roll | ax   | az   | ay   | yaw |
|-------|-------|------|------|------|------|-----|
| 重要性得分 | 24.3  | 21.8 | 18.5 | 14.2 | 11.9 | 9.3 |

特征重要性评估结果显示，在随机森林模型中，姿态角相关特征(尤其是 pitch 和 roll)对故障分类贡献最大，分别占据 24.3% 与 21.8% 的权重，表明天车在发生啃轨或姿态异常时，这两项角度变化最为



敏感。加速度特征中， $a_x$ 作为反映横向冲击的核心指标，权重达 18.5%，在识别啃轨和异常振动中起到关键作用； $a_z$ 和  $a_y$  的贡献相对较低，主要用于捕捉垂直与前后方向的震动变化；而  $yaw$  的变化相对平稳，对分类影响最小。总体来看，姿态角特征在模型中占据主导地位，是实现高精度异常识别的核心因素。

实验结果表明，随机森林模型在识别中度及严重啃轨工况中具有极高的精度与稳定性，尤其在姿态角偏移明显的场景下识别率超过 97%。因其特征变化幅度较小，易与正常工况重叠，对轻度啃轨与异常振动的识别能力略弱。

### 5.3. 系统可靠性实验

本次实验设计共进行 400 次，手动模拟正常、异常振动、啃轨工况，正常工况 200 次，异常振动 100 次，啃轨 100 次。实验验证结果如表 2 所示：

Table 2. Experimental result

表 2. 实验结果

| 实验场景 | 检测指标                            | 正确率(%) | 召回率(%) | F1-Score | 误报率(%) |
|------|---------------------------------|--------|--------|----------|--------|
| 正常工况 | 无异常                             | 98.5   | -      | -        | 1.5    |
| 异常振动 | 加速度幅值超限                         | 92.3   | 89.7   | 0.91     | 7.2    |
| 轻度啃轨 | 姿态角偏移( $\leq 2^\circ$ )         | 85.6   | 83.4   | 0.84     | 9.1    |
| 中度啃轨 | 姿态角偏移( $2^\circ \sim 5^\circ$ ) | 94.2   | 92.8   | 0.93     | 4.7    |
| 严重啃轨 | 姿态角偏移( $> 5^\circ$ )            | 98.1   | 97.5   | 0.98     | 1.9    |

注：正确率：模型正确分类的样本占比(包括正常和异常)。召回率：真实异常样本中被正确检测的比例(避免漏报)。F1-Score：精确率与召回率的调和平均数(综合评估模型平衡性)

实验结果表明，在模拟天车运行平台上，系统对严重啃轨(姿态角偏移 $> 5^\circ$ )和异常振动(加速度超限)的检测正确率分别达 98.1%和 92.3%，为钢厂天车大车状态的智能监测提供了可靠技术支撑。

## 6. 总结

本文设计了一种基于 MPU6050 惯性传感器的天车大车运行监测系统，通过融合传感器数据与机器学习算法，实现了对啃轨、异常振动等典型故障的高效检测。同时一定程度上降低了天车大车监测系统因为传感器数量众多导致的成本问题。提出的过双阈值决策机制(动态阈值 + 随机森林)平衡了实时性与检测精度，确保了天车大车监测的要求。随机森林模型配合多维姿态特征，可在不依赖传统定位装置的前提下实现对天车关键异常状态的快速判别，具备良好的实用性与工程部署价值。未来可结合 5G 边缘计算架构，部署轻量化卷积神经网络(如 MobileNetV3)，进一步提升复杂耦合故障的辨识能力，推动起重机械智能化监测技术的发展。

## 参考文献

- [1] Malik, A.S., Boyko, O., Aktar, N. and Young, W.F. (2001) A Comparative Study of MR Imaging Profile of Titanium Pedicle Screws. *Acta Radiologica*, **42**, 291-293. <https://doi.org/10.1080/028418501127346846>
- [2] Awad, A.H., Alsabaan, M., Ibrahim, M.I., Saraya, M.S., Elksasy, M.S.M., Ali-Eldin, A.M.T., et al. (2024) Low-Cost Iot-Based Sensors Dashboard for Monitoring the State of Health of Mobile Harbor Cranes: Hardware and Software Description. *Heliyon*, **10**, e40239. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40239>
- [3] 陈国定, 周鹏豪, 胡朕豪, 等. 基于 MPU6050 的四轴硬件姿态解算研究[J]. 机电工程, 2018, 35(1): 95-100.
- [4] 赵志鹏, 李青, 王燕杰, 等. 基于 STM32 的矿山钻机智能监测保护系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2016(11):

41-44.

- [5] 卓从彬, 杨龙频, 周林, 等. 基于 MPU6050 加速度传感器的跌倒检测与报警系统设计[J]. 电子器件, 2015(4): 821-825.
- [6] 姚登举, 杨静, 詹晓娟. 基于随机森林的特征选择算法[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2014, 44(1): 137-141.