

# 基于传感器融合的铁路轨道衡称量稳定性提升方法

张 硕

(中国铁路沈阳局集团有限公司科学技术研究所, 辽宁 沈阳 110000)

**摘 要** 铁路轨道衡是列车动态计量的核心设备, 而结构扰动、车辆冲击、传感器波动等多种因素经常干扰其称量稳定性, 很容易引起数据偏差、误判风险。为增强轨道衡复杂运行场景下的稳定表现, 本研究采用传感器融合机制, 建成多源协同感知系统, 搭配误差识别及补偿算法, 依托信号层面落实动态修正和稳态控制。现场验证表明, 该方法应对结构干扰和传感噪声表现出良好的适应性, 可切实优化动态称量一致性。

**关键词** 铁路轨道衡; 传感器融合; 称量稳定性; 误差补偿; 动态信号处理

中图分类号: U2; TP21

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.09.036

## 0 引言

轨道衡是铁路货运系统里完成列车过轨动态称重的关键装置, 它的计量精度和稳定性直接关系到车站计费、车辆调度和安全管理等关键环节。在复杂环境下运行时, 轨道结构弹性改变、车辆载荷瞬时冲击、传感器信号干扰, 都可能引发称量数值波动甚至误差累积, 影响整套系统运行稳定性。随着传感器技术和多源数据融合方法的进步, 围绕轨道衡系统构建高鲁棒性的稳态识别与误差修正路径, 成为计量保障技术发展的核心方向。

## 1 轨道衡称量稳定性的影响因素分析

### 1.1 结构扰动影响

铁路轨道衡在列车通行过程中需要同时应对轨道结构的弹性变形、底座回弹和列车荷载冲击所带来的动态扰动, 这些扰动在实际称量时会表现为瞬时响应过冲、信号震荡和零点漂移等问题, 容易对短时间内的稳定输出构成干扰。以 50 吨轴重的货运列车为例, 当借助普通型钢轨道衡时, 轨面会出现高达 0.8 mm 的瞬时下挠, 叠加车辆振动频率范围 (5 ~ 20 Hz) 后, 让信号呈现周期性跳变。若该扰动没有被有效识别时, 会直接影响系统判断是否进入稳态窗口, 造成称量数据偏离真实值<sup>[1]</sup>。

### 1.2 传感波动问题

称量系统中常用的应变式、压电式或电阻式传感器在动态工作条件下都存在一定程度的输出波动, 来源包

括传感材料滞后性、电子信号传输延迟和环境干扰。具体来看, 应变片在重复加载过程中可能产生  $\pm 1.5 \mu \varepsilon$  以内的应力迟滞, 而传感器零点漂移率在常温下可达 0.02% FS/h, 在高温高湿环境中甚至翻倍, 如果系统没有引入温度漂移补偿机制与低频噪声滤除模型, 误差会随时间累积, 对稳定性形成长期影响。

## 2 融合系统构建与处理机制

### 2.1 传感器布设策略

为实现列车运行过程关键受力状态的持续监测, 轨道衡系统采用多种传感器布设策略。在钢轨和基础结构之间布设应变式称重传感器, 捕捉轮轨作用引发的主载荷变化, 安装位置必须和轨枕中心线精准对齐, 横向偏差不超过  $\pm 2$  mm, 防止偏载造成信号畸变。另外, 在轨道衡两端轨腰位置安装加速度传感器, 一并采集纵向和垂向振动信号。加速度传感器采用  $\pm 50$  g 量程, 采样频率达 500 Hz, 保障完整捕捉高频扰动信号。此外, 在轨道下方基础结构中, 还整合了位移传感器, 检测轨道下挠变化, 最高分辨率 0.01 mm, 可精准呈现低频结构变形过程。图 1 呈现该传感器布设方案, 结构设计符合纵向分层、横向对称原则, 保障数据采集的准确性和一致性<sup>[2]</sup>。

### 2.2 数据同步机制设计

为确保多类传感器在动态称重过程中协同响应, 要构建统一的数据同步机制。各类传感器采集端统一接入同步触发模块, 外部脉冲信号做时间基准, 构建全通

作者简介: 张硕 (1986-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 计量技术与设备。

道一致的采样时序体系。针对列车通行周期短、冲击突变快，同步信号频率设置1 000 Hz，保障在轨距范围内任一位置采样延迟不超过1 ms，各通道数据采集单元嵌入高精度时钟芯片（年漂移不大于±3 ppm），并配置低延时缓存结构，支持预采样与补偿计算操作。同步机制中引入时间戳插值补全策略，在传输链路出现片段丢帧或数据错位时，借助上下帧速率拟合进行恢复，维持完整、连续的数据时间轴，构成后续融合计算的基础保障。

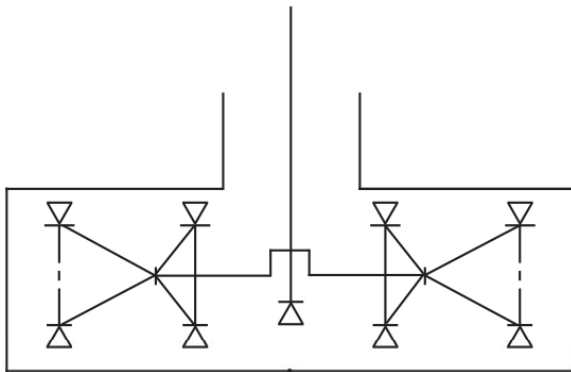


图1 传感器布设示意图

### 2.3 融合计算模型构建

多源数据在同步采集后要依靠融合计算模型实现统一输出，系统用分层融合架构，结合物理参数特性和统计特征构建协同解算机制。基础层以归一化预处理为起点，对应变、电压、位移等信号进行幅值重构和噪声剔除，选用带通滤波器控制有效频带在3~25 Hz之间，压制低频漂移与高频扰动，融合核心层引入加权卡尔曼滤波模型，根据各个传感器历史偏差方差自动调整融合权重，权重初始设定区间为0.15~0.6，动态调整周期不超过0.2 s<sup>[3]</sup>。对非线性扰动响应，引入残差动态门限机制，实时计算各通道残差向量与预设稳定区间的拟合偏差，如果超过±5% FS，自动切换到自适应融合模式，最终输出层集成三轴位移、动载梯度和主称重通道信号，继而滑动均值和中值滤波联合输出稳定称量数据，构建全过程动态解耦的数据融合路径。

## 3 稳定性识别与误差自适应补偿策略

### 3.1 稳态识别与阈值判断

轨道衡的动态信号在列车通过过程中表现出明显的非稳态—稳态—离轨三阶段特征，系统要借助信号波动特征完成稳态窗口的自动识别。在信号处理链路中引入滑动窗口机制，设定窗口宽度2.5秒，内部采样点数量和系统采样率绑定，以500 Hz为例，每窗口包含1 250点，选用方差与偏移率联合判据建立稳态识别模型，定义任意时刻t的原始称量信号是 $X_t$ ，滑

动均值为 $\mu_t$ ，则信号波动度量函数为：

$$\sigma_t = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} (X_{t-i} - \mu_t)^2} \quad (1)$$

式(1)中， $\sigma_t$ 是波动方差， $n$ 对应窗口内的点数，给系统设稳态阈值 $\Delta$ 为0.15% FS，连续3个窗口全部满足 $\sigma_t < \Delta$ ，最大偏移率不超0.3%，判定这段数据为稳态输出段，还要防范误触发造成伪稳态识别，给窗口末尾加退判机制，容错干预轨尾扰动。该识别流程借助动态判别模型确保输出数据具备足够的波动稳定性和时段完整性，给后面误差建模提供基础数据支撑。

### 3.2 误差建模与动态补偿

轨道衡称量输出长期带有微小系统误差，主要来自传感器间响应滞后、温度漂移和信号通道非同步引发的缓慢偏移。为提高输出数据稳定性，要在稳态段植入基于时间序列的误差建模机制，达成误差趋势识别与动态补偿，系统设定融合信号 $Y_t$ ，标准参考值 $R_t$ ，给出瞬时残差表达式：

$$\varepsilon_t = Y_t - R_t \quad (2)$$

式(2)中， $\varepsilon_t$ 表示第t时刻的系统误差； $Y_t$ 为融合后输出； $R_t$ 为经标准载荷校验获得的理想值，考虑误差存在时间依赖性，系统采用自回归模型进行误差拟合预测：

$$\hat{\varepsilon}_t = \phi_1 \varepsilon_{t-1} + \phi_2 \varepsilon_{t-2} + \dots + \phi_p \varepsilon_{t-p} \quad (3)$$

式(3)中， $\hat{\varepsilon}_t$ 为预测残差， $\phi_i$ 为第i阶回归系数， $p$ 为模型阶数。预测误差经过动态调节系数 $\lambda$ 控制后叠加到融合输出，选择形式是 $Y_t^* = Y_t - \lambda \hat{\varepsilon}_t$ ，其中 $0.6 \leq \lambda \leq 0.9$ 。补偿逻辑结合滑动窗口平滑与极差监控策略，实现高频扰动压制与慢变误差跟踪，增强称量结果的稳定性与可控性<sup>[4]</sup>。

### 3.3 闭环控制与自适应调节

轨道衡在完成稳态识别与误差建模之后，要构建闭环调节机制，以保障输出持续稳定。系统依托动态监测窗口，对输出值和历史预测结果开展一致性判定：当连续采样段内残差偏离超限，会触发调节指令，按照扰动等级设定不同阻尼系数与修正周期，压制信号异常。参数更新模块用误差变化率为触发条件，结合历史响应调整平滑因子与修正步长，使调节逻辑匹配结构状态变化趋势，融合修正通道在信号注入环节设立优先级分配策略，稳定性优先原则下动态赋权，避免通道冲突引发输出抖动。

## 4 实验验证与性能分析

### 4.1 测试平台与采集方案

1. 应用背景与平台构建。检验所提出的传感器融合和误差自适应补偿策略在实际铁路运行环境的可行

性和稳定性,借助东北某货运编组站现有轨道衡线路搭建实验平台,这条线路用典型单线双轨结构,配备 S 型轨道衡框架和嵌入式应变片称重单元,能满足稳定载荷通行和多次重复实验需求,适配动态信号采集和模型运行测试。

2. 实验布设与数据采集流程。平台搭建阶段,依据结构扰动和称重响应路径,轨道衡左右两侧各布设高精度应变计 16 组,布设点位覆盖轨枕中线、钢轨底部和钢轨腰部,并依照分层布设原则,给基础层加装 6 组位移传感器,承担结构形变量和偏移趋势的记录工作。选用 ZL-2A 型应变片充当传感器,配套测量区间 0~2 000  $\mu\epsilon$ ,位移传感器量程是 0~10 mm,分辨率 0.01 mm,契合微变形识别要求。

实验列车采用单节货运编组配置,将标准轴重设为 23.5 t,通行速度锁定 3~8 km/h 区间,实现典型低速称量工况全覆盖。同步采集系统采用嵌入式数据采集模块,自带 32 通道 A/D 转换器与高精度时钟源,固定采样频率为 1 000 Hz,采用统一时钟信号触发所有采集通道,搭建无时序漂移的同步采集链路。

平台配置信号处理主机和现场边缘服务器,前者

执行数据缓存和滤波操作,后者植入融合计算模型和误差补偿控制逻辑,实现在线实时处理和离线分析双模式自由切换。采集数据经过千兆以太网实时上传上位机控制中心,同步配套设置自校准流程,每轮实验前开展零点校验与标准载荷压载验证,维持测试数据精度和可比性<sup>[5]</sup>。

为提高对复杂环境的响应分析水准,平台设置双环境试验场景,配合开展湿度扰动及基础可控干扰实验,系统对比不同外部条件下传感器融合模型的输出稳定性,确认实验数据覆盖维度广、结构响应全、测试逻辑闭环完整。

#### 4.2 系统输出对比分析

在完成各项实验工况下的数据采集后,对比分析了传统轨道衡信号输出与本研究所构建融合系统的输出稳定性、重复性和误差控制能力,选取同一组列车重复通过 5 次的称量结果为样本,分别提取最大偏差、重复标准差与均值漂移三类指标进行横向比对,并结合稳态识别判定比率衡量融合机制对有效输出窗口的提取能力(见表 1)。分析表明,融合系统在轨道扰动与传感波动并存的环境中输出波动范围更窄,重复性

表 1 系统输出稳定性指标对比分析

项目	传统轨道衡系统	传感器融合补偿系统	指标说明
最大偏差 (%FS)	0.73	0.28	表征误差极值,融合后大幅收敛
重复标准差 (t)	0.46	0.17	表示多次称重一致性,融合系统更为稳定
均值漂移量 (t)	0.21	0.06	衡量漂移趋势,补偿机制抑制长期偏移
有效稳态识别比例 (%)	71.3	92.6	表明融合算法更精准提取高质量输出段

更优,特别在基础扰动增强场景下,融合机制表现出更强的抗干扰能力,明显降低了残差传播效应。

从实验对比结果看,融合系统在数据分布紧密性和误差可控性方面显著比传统方案更优,它的稳定性优势在多轮通行、复杂干扰及温变条件下表现更加明显,具备工程推广应用的结构基础和算法适配性。

#### 5 结束语

针对轨道衡动态称量过程中的结构扰动和信号不稳定问题,本研究构建了一套以传感器融合为核心的数据获取、处理和输出控制机制,并嵌入稳态识别与误差自适应补偿策略,在多轮实验验证中展现出良好的精度保持和抗干扰能力。整体方案实现了从感知布局、数据同步到输出优化的链路闭环,具有在典型货运场景中部署运行的可适应性。未来需结合边缘计算架构进一步拓展其实时处理性能和工程集成水平。

#### 参考文献:

[1] 张宇.全要素轨道精测技术在铁路大修中的应用[J].测绘通报,2025(S2):110-114.  
 [2] 王佳丽,谢征宇,杨庆玺,等.基于层次化语义融合的铁路天窗作业安全检测算法[J/OL].北京交通大学学报,1-13 [2025-12-24][2026-01-27]. [https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=hmNf6PfbABsAfTmbeboExzSTI0DdzgH4XeR5UXJrn3\\_sDWT1ELC8decMxicI51B2T\\_u5\\_tg7Mj0ublx\\_UKXq1E58kMUxdLoQ1bCj0wmjgrSWojrOxfqKU-9URsIIQfjofQwNO5IxZjtLnoMkS0ZL5\\_u-uwEaW9KtLcBs1diHDUpH7PgEkH6Hw==&uniplatform=NZKPT&language=CHS](https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=hmNf6PfbABsAfTmbeboExzSTI0DdzgH4XeR5UXJrn3_sDWT1ELC8decMxicI51B2T_u5_tg7Mj0ublx_UKXq1E58kMUxdLoQ1bCj0wmjgrSWojrOxfqKU-9URsIIQfjofQwNO5IxZjtLnoMkS0ZL5_u-uwEaW9KtLcBs1diHDUpH7PgEkH6Hw==&uniplatform=NZKPT&language=CHS).  
 [3] 余祖俊,王洪伟,王悉,等.轨道交通自主运行控制技术综述[J].北京交通大学学报,2025,49(05):6-33.  
 [4] 陈俊臣,魏琛.基于多传感器数据融合的铁路智能调度指挥系统设计[J].自动化与仪器仪表,2025(11):78-82.  
 [5] 陈春雷,韩志,贺雨,等.基于多维校准平台的铁路轨道测量模拟研究[J].计量科学与技术,2025,69(03):42-52.