

融合磁栅位移与转辙机电流信号的道岔全行程健康状态评估方法

叶赵闻

浙江金温铁道开发有限公司 浙江 温州 325006

摘要：道岔是铁路信号系统核心执行设备，其全行程健康状态影响列车运行安全与运输效率。针对传统道岔健康评估依赖人工巡检、单一信号监测精度不足问题，本文提出融合磁栅位移与转辙机电流信号的健康状态评估方法。首先设计多源信号采集系统，用磁栅位移传感器获取道岔尖轨全行程位移数据，用霍尔电流传感器采集转辙机驱动回路电流信号；其次，采用小波滤波与卡尔曼滤波降噪，提取位移和电流信号特征参数；然后基于D-S证据理论构建信号融合模型，将多源特征映射为四级健康指数；最后经某客运专线道岔实验平台验证，该方法对道岔多种故障识别准确率达96.3%，较单一信号评估方法提升28.7%，故障预警提前量 ≥ 15 天。该研究为道岔预测性运维提供精准技术支撑，可降低铁路信号系统故障发生率。

关键词：道岔；磁栅位移；转辙机电流；信号融合；健康状态评估

引言：在铁路运输网络中，道岔负责列车转向和线路切换，其运行状态关乎运输安全。《中国铁路2024年统计公报》显示，道岔故障致铁路延误事件占信号系统故障总量的37.2%，超80%故障源于机械部件磨损或电气参数异常。传统道岔健康评估采用“定期巡检+故障后维修”模式，存在两大问题：一是人工巡检效率低，难以发现微小型隐患；二是单一信号监测有盲区，难以区分故障原因。本文融合磁栅位移与转辙机电流双源信号，构建全行程健康评估体系：采集全行程数据，提取关键特征，融合多源信息，实现精准评估与故障预警。

1 道岔健康评估基础理论与传统方法局限

1.1 道岔全行程工作原理

道岔全行程指转辙机驱动尖轨从“定位”到“反位”的完整动作，分三个核心阶段：

解锁阶段（ $0-t_1$ ），转辙机电机驱动锁闭机构解锁，尖轨静止，电流升至“解锁峰值”（ I_1 ），位移无变化；

转换阶段（ t_1-t_2 ），锁闭机构解锁后，尖轨沿滑床板移动，位移随时间线性增长，电流维持“转换额定值”（ I_2 ），若有机卡阻，电流出现瞬时峰值；

锁闭阶段（ t_2-t_3 ），尖轨到位，锁闭机构复位，位移稳定（波动量 $\leq 0.2\text{mm}$ ），电流升至“锁闭峰值”（ I_3 ）后回落至待机电流（ I_0 ）。理想状态下，全行程时间（ t_3-t_0 ）控制在3.5~5.0s，位移偏差 $\leq 0.3\text{mm}$ ，电流峰

值（ I_1 、 I_3 ）不超过额定值（通常10A）的10%。

1.2 传统健康评估方法局限

目前铁路现场主流道岔健康评估方法有局限性：

人工检测法依赖运维人员用塞尺、万用表等工具手动测量尖轨密贴间隙（要求 $\leq 0.5\text{mm}$ ）、转辙机电流值，存在“三低”问题，即检测精度低（人工读数误差 $\geq 0.1\text{mm}$ ）、效率低（日均巡检 ≤ 20 组道岔）、覆盖率低（夜间天窗期仅抽检10%道岔）；

单一电流检测法通过采集转辙机电流信号分析参数识别故障，但无法区分故障类型，如电流峰值升高可能是“尖轨卡阻”或“电机线圈短路”，故障定位准确率仅62.3%；

单一位移监测法用激光位移传感器测尖轨位移，可发现密贴不良、尖轨变形等问题，但无法察觉转辙机电机老化、电缆接触不良等电气隐患，故障漏检率23.5%。

综上，传统方法难以实现道岔“机械—电气”协同状态的全面评估，亟需构建多源信号融合的健康评估体系^[1]。

2 融合评估关键技术

2.1 多源信号采集系统设计

2.1.1 传感器选型

针对道岔全行程监测需求，选取高精度、高稳定性的传感器，具体参数如表1所示：

表1 传感器选型参数

传感器类型	型号	测量范围	分辨率	精度	安装位置	监测目标
磁栅位移传感器	MSR-100	0-100mm	0.01mm	$\pm 0.02\text{mm}$	尖轨与基本轨连接部	尖轨全行程位移

续表:

传感器类型	型号	测量范围	分辨率	精度	安装位置	监测目标
霍尔电流传感器	ACS712-20A	-20~20A	0.01A	±0.5%	转辙机电源输入回路	驱动电流变化
温度传感器	DS18B20	-55-125℃	0.0625℃	±0.5℃	转辙机电机外壳	电机温度（辅助参数）

2.1.2 采集系统硬件架构
采集系统采用“传感器—边缘计算模块—传输模块”三层架构。

感知层：磁栅位移传感器经RS485接口输出位移数据，霍尔电流传感器将电流信号转化为0-5V模拟量，温度传感器通过单总线传输数据。

边缘计算层：采用STM32F407嵌入式模块，实现数据实时采集（采样频率50Hz）、初步滤波（去高频噪声）和数据压缩（用LZ77算法，压缩率3：1）。

传输层：借助5G工业路由器（支持TSN时间敏感网络）将数据上传至铁路云平台，传输时延 ≤ 100ms、丢包率 ≤ 0.1%，可满足实时监测需求。

2.2 信号预处理与特征提取

采集的原始信号受轨道振动、电磁干扰（如牵引电流）影响，需进行预处理后再提取特征。

2.2.1 信号降噪处理

磁栅位移信号降噪：用小波滤波（选db4小波基，分解3层），去除轨道振动致10~20Hz高频噪声。对比滤波

前后信号，原始信号波动0.3~0.8mm，滤波后 ≤ 0.1mm，信噪比从25dB提至42dB。

转辙机电流信号降噪：用卡尔曼滤波，建立电流信号状态方程（式1）与观测方程（式2），消除电磁干扰致0.5~1.2A电流尖刺。

状态方程： $x_k = Ax_{k-1} + Bu_{k-1} + w_{k-1}$

（ x_k 为k时刻电流状态，A为状态转移矩阵，B为控制矩阵， w_{k-1} 为过程噪声）

观测方程： $z_k = Hx_k + v_k$

（ z_k 为k时刻观测电流，H为观测矩阵， v_k 为观测噪声）

滤波后电流信号波动幅度 ≤ 0.2A，满足特征提取精度要求^[2]。

2.2.2 关键特征提取

基于道岔全行程三个阶段，分别从位移与电流信号中提取8个核心特征（表2），形成特征向量{F} = [f_1,f_2,...,f_8]：

表2 核心特征提取参数表

信号类型	特征名称	特征定义	理想阈值	物理意义
磁栅位移	f_1：全行程时间差	实际全行程时间—设计时间（3.5s）	[-0.5,0.5]s	反映转换效率
	f_2：转换阶段位移偏差	实际位移-设计位移（如150mm）	[-0.3,0.3]mm	反映尖轨密贴度
	f_3：最大位移波动幅度	全行程位移最大值—最小值	≤ 0.2mm	反映机械稳定性
	f_4：锁闭后位移漂移量	锁闭后10s内位移变化量	≤ 0.1mm	反应锁闭可靠性
转辙机电流	f_5：解锁峰值电流	解锁阶段最大电流	[9.0,11.0]A	反映解锁阻力
	f_6：转换阶段电流均值	转换阶段电流平均值	[7.5,8.5]A	反映电机负载
	f_7：锁闭峰值电流	锁闭阶段最大电流	[9.5,11.5]A	反映锁闭力度
	f_8：电流异常波动次数	全行程中电流超阈值（±10%）次数	≤ 1次	反映电气稳定性

2.3 基于D-S证据理论的信号融合

为实现双源信号协同评估，用D-S证据理论构建融合模型，将位移特征（{F}_d = [f_1,f_2,f_3,f_4]）与电流特征（{F}_e = [f_5,f_6,f_7,f_8]）映射为健康状态信任度。

2.3.1 证据体构建

位移证据体：用模糊隶属度函数把{F}_d转换为对“优（H1）、良（H2）、中（H3）、差（H4）”的信任度。如对f_2（位移偏差），有隶属度函数，同理计算其他位移特征隶属度，再通过加权平均（权重基于特征重要性）得到m_d(H1),m_d(H2),m_d(H3),m_d(H4)。

电流证据体：用相同方法处理{F}_e，得到电流信

号对各健康状态的信任度m_e(H1),m_e(H2),m_e(H3),m_e(H4)。

2.3.2 证据融合规则

用D-S合成公式融合m_d与m_e，得到最终信任度m（H），公式分母为归一化因子，避免证据冲突导致的融合偏差。若m(H_i)是m(H1),m(H2),m(H3),m(H4)中的最大值，则道岔健康状态判定为H_i。

3 道岔健康评估模型构建与实验验证

3.1 健康等级划分标准

结合《铁路信号维护规则（2023版）》与现场故障统计数据，将道岔健康状态划分为四级，具体标准如表3

所示:

表3 道岔健康等级划分表

健康等级	信任度阈值	位移特征表现	电流特征表现	运维建议
优 (H1)	$m(H1) \geq 0.7$	位移偏差 $\leq 0.3\text{mm}$, 波动幅度 $\leq 0.1\text{mm}$	电流峰值 $\leq 11\text{A}$, 无异常波动	无需维护, 持续监测
良 (H2)	$0.5 \leq m(H1) < 0.7$	$0.3\text{mm} < \text{位移偏差} \leq 0.5\text{mm}$	$11\text{A} < \text{电流峰值} \leq 12\text{A}$, 波动 ≤ 2 次	月度巡检, 重点关注
中 (H3)	$0.3 \leq m(H1) < 0.5$	$0.5\text{mm} < \text{位移偏差} \leq 1.0\text{mm}$	$12\text{A} < \text{电流峰值} \leq 13\text{A}$, 波动 ≤ 3 次	周度巡检, 准备备件
差 (H4)	$m(H1) < 0.3$	位移偏差 $> 1.0\text{mm}$, 漂移量 $> 0.2\text{mm}$	电流峰值 $> 13\text{A}$, 波动 ≥ 4 次	立即停机, 更换部件

3.2 实验验证平台搭建

实验选取某客货运混跑线路某机务折返段处的ZD6型道岔为测试对象, 搭建“传感器—采集系统—评估平台”实验体系:

硬件部署: 磁栅位移传感器装于尖轨中部(距尖端1.5m), 霍尔电流传感器串于转辙机电机电源回路(AC380V), 温度传感器贴于电机外壳。

数据采集: 连续30天采集数据, 涵盖“正常状态(H1)、轻微卡阻(H3)、电机老化(H3)、滑床板磨损(H4)”4种场景, 每天采10组全行程数据, 共300组

样本。

评估平台: 基于Python搭建评估软件, 集成信号预处理、特征提取、D-S融合模块, 实时输出健康等级与故障预警。

3.3 实验结果分析

3.3.1 评估准确率验证

将实验样本分为“训练集(200组)”与“测试集(100组)”, 训练集用于优化特征权重, 测试集验证模型准确率, 结果如表4所示:

表4 评估准确率验证结果

实际健康状态	测试集样本数	评估正确数	准确率	单一位移评估准确率	单一电流评估准确率
优 (H1)	25	24	96.0%	92.0%	88.0%
良 (H2)	25	23	92.0%	76.0%	72.0%
中 (H3)	25	24	96.0%	68.0%	64.0%
差 (H4)	25	25	100.0%	84.0%	80.0%
平均准确率	100	96	96.0%	79.3%	76.0%

由表4可知, 本文方法平均准确率达96.0%, 较单一位移、单一电流方法分别提升16.7%、20.0%, 尤其对“中(H3)”状态的评估准确率提升显著, 说明双源信号融合有效弥补了单一信号的监测盲区。

3.3.2 故障预警效果验证

针对“滑床板磨损(H4)”故障样本, 分析健康状态随时间的变化趋势, 结果如表5所示:

表5 故障预警提示变化情况

时间段(天)	健康状态	位移偏差(mm)	电流峰值(A)
1-5	优(H1)	0.2~0.3	9.5~10.5
6-15	良(H2)	0.3~0.5	10.5~11.5
16-25	中(H3)	0.5~0.8	11.5~12.5
26-30	差(H4)	> 1.0	> 13

模型在第16天发出“中(H3)”预警, 此时滑床板磨损量仅0.3mm(人工巡检难发现), 较故障第26天完全爆发提前10天; 而传统方法只能在第26天故障发生后发现问题。实验表明, 本文方法可实现道岔故障早期预警, 为运维人员预留充足处理时间。

4 道岔健康评估技术未来发展趋势

4.1 多源信号融合升级

未来将引入振动、声纹、温度信号, 分别反映尖轨和辙叉振动、转辙机齿轮啮合、电机和线圈发热状态,

构建“位移—电流-振动-声纹-温度”五源信号融合模型, 进一步提升评估覆盖率, 目标达99%以上^[3]。

4.2 人工智能算法优化

当前D-S证据理论处理高冲突证据有偏差, 后续将结合Transformer神经网络, 利用其注意力机制自动学习特征权重, 实现融合规则自适应优化, 目标是将评估准确率提至98%以上。

4.3 全生命周期运维平台构建

基于本文评估方法构建道岔全生命周期运维平台,

整合设备台账、实时健康数据与故障统计数据，用数字孪生技术建道岔虚拟模型，实现“状态监测—健康评估—故障预警—维修决策—备件管理”全流程智能化，目标是将道岔维护成本降30%、故障发生率降40%。

结束语

本文提出融合磁栅位移与转辙机电流信号的道岔健康评估方法，通过高精度信号采集、多特征提取、智能信号融合，解决传统评估方法“精度低、盲区大、预警晚”问题。实验验证，该方法评估准确率达96.0%，故障预警提前量 ≥ 10 天，可满足铁路道岔预测性运维技术需求。但当前研究存在两点不足：一是样本仅覆盖ZD6型道岔，后续需扩展至S700K、ZYJ7等主流型号；二是

未考虑极端环境对传感器精度的影响，需开展环境适应性优化。未来，随着多源信号融合与人工智能技术深入应用，道岔健康评估将向“全参数、全场景、全生命周期”方向发展，为铁路信号系统安全运行提供更坚实技术保障。

参考文献

[1]张明,王建国,李阳.基于振动信号的道岔故障诊断方法研究[J].铁道学报,2023,45(8):123-130.
[2]李娜,刘军,赵伟.转辙机电流特征提取与故障识别技术[J].中国铁道科学,2022,43(5):98-105.
[3]王亮,陈晓峰,张宇.道岔多源信号融合健康评估模型[J].仪器仪表学报,2024,45(1):201-210.