

铁路信号设备健康状态评估研究

李 军

国家能源新朔铁路大准分公司 内蒙古 鄂尔多斯 010300

摘 要：铁路信号设备是保障行车安全的核心基础设施，传统运维评估方式存在滞后性、主观性强等短板，难以适配智能运维需求。本文分析信号设备故障特性，从运行性能、设备状态、环境影响、运维历史四维度构建评估指标体系，采用层次熵权法结合改进模糊神经网络搭建评估模型。经仿真验证，该模型可精准量化设备健康状态、识别隐性隐患，有效提升评估精度，可为铁路信号设备智能化、精细化运维提供可靠技术支持。

关键词：铁路信号；设备健康；状态评估

引言：我国铁路路网不断拓展、列车运行密度持续增高，信号设备运行环境日趋复杂，故障风险显著上升，对铁路运维的安全性、高效性提出更高标准。传统定期巡检、阈值比对的评估方式，难以预判设备隐性故障、量化设备健康状态，运维短板愈发突出。本文结合设备故障机理与运行特征，搭建科学的评估体系与智能模型，探索精准的设备健康评估方法，推动铁路运维模式升级，保障行车安全稳定。

1 铁路信号设备基础理论与故障特性分析

1.1 铁路核心信号设备概述

(1) 信号设备组成：铁路核心信号设备主要包含轨道电路、信号机、转辙机、应答器四大类。轨道电路依托轨道传输电信号，监测轨道占用与空闲状态；信号机以灯光信号为载体，向列车传递行车指令；转辙机是道岔转换核心装置，负责切换列车行驶路径并锁闭道岔；应答器通过车地无线通信，传输线路参数、位置信息等核心数据，各类设备协同保障铁路行车安全与调度有序。(2) 设备运行特性：各类信号设备长期处于户外复杂工况，承受温差、雨雪、振动等多重影响。设备整体使用寿命存在明显差异，其中密封电路、传感芯片等核心精密部件精度要求高、抗干扰能力弱，运行稳定性要求严苛；机械传动、接触点位等易损部件长期摩擦损耗，老化速度更快，是日常运维的重点关注对象。

1.2 信号设备常见故障类型与成因分析

(1) 机械类故障：以转辙机故障为主，常见卡阻、部件磨损、螺栓松动等问题。多由道岔异物卡顿、长期往复运行造成机械磨损、振动引发部件松动导致，会造成道岔转换不到位、锁闭失效，直接影响线路切换，引发行车阻滞。(2) 电气类故障：主要包括轨道电路短路、断路，信号机灯光闪烁、熄灭，线路电路老化等。故障多由线路绝缘破损、接线氧化、元器件老化、电流不稳

等引发，会导致信号传输异常、行车指令误判，严重影响行车调度准确性^[1]。(3) 环境诱发故障：极端高温、低温、潮湿雨雪及电磁干扰均会诱发设备故障。高温易加速电路老化，低温会导致机械部件卡顿，潮湿雨雪易引发线路短路漏电，电磁干扰会扰乱车地信号传输，造成设备状态异常、信号失真。

1.3 设备健康状态界定与评估需求

(1) 健康状态等级划分：结合行业标准与运维经验，将设备状态分为四级。健康状态为设备运行参数正常、无损耗隐患；亚健康为设备轻微损耗，不影响即时运行；故障隐患为部件损耗超标，存在故障风险；故障失效为设备功能异常，无法正常投入运行。(2) 状态评估核心需求：需满足四大核心需求，即设备运行实时状态监测、潜在故障隐患精准识别、设备使用寿命趋势预判、为智能化运维决策提供数据支撑。(3) 传统评估方法局限性：传统定期巡检、阈值比对方式存在明显短板，人工巡检主观性强、疏漏率高，数据更新滞后、实时性差，仅能判断设备是否故障，无法量化健康程度、预判潜在隐患，难以适配现代化铁路运维需求。

2 铁路信号设备健康状态评估指标体系构建

2.1 评估指标构建原则与思路

(1) 指标构建原则：本文构建评估指标体系严格遵循五大核心原则。科学性原则以设备运行机理、故障特性及行业运维标准为依据，保证指标选取有理可依；系统性原则兼顾设备内部状态与外部环境，全方位覆盖影响设备健康的各类因素；可量化原则优先选取可监测、可统计的指标，实现状态精准量化；针对性原则聚焦轨道电路、转辙机等核心信号设备，剔除无关冗余指标；实用性原则贴合现场运维场景，指标数据易于采集、计算与应用，保障评估工作高效落地。(2) 指标构建思路：结合前文信号设备故障机理与运行特征，确立多维度综

合构建思路。摒弃单一性能评估模式,从运行性能、设备损耗、环境干扰、运维记录四大核心维度开展指标筛选,统筹设备实时运行状态、硬件老化程度、外部环境影响及历史运维情况。同时融合定性与定量指标,既保留可精准监测的量化数据,也纳入设备损耗、环境侵蚀等定性状态指标,构建全面、立体的健康评估指标框架。

2.2 多维度评估指标筛选与确定

(1) 运行性能指标:该类指标为设备健康状态的核心直观体现,主要包含设备动作准确率、系统响应时延、信号传输稳定性、故障报警频次。动作准确率反映转辙机等设备作业可靠程度,响应时延体现设备信号处理效率,信号传输稳定性直接决定行车指令传递质量,故障报警频次可直观表征设备运行异常概率,是评估设备实时运行工况的关键量化依据。(2) 设备状态指标:聚焦设备本体硬件损耗与老化状态,涵盖部件磨损程度、电气参数偏差、设备老化系数、部件更换频次。长期运行产生的机械磨损、电气参数漂移是设备隐性故障的主要诱因,老化系数体现设备整体服役损耗程度,部件更换频次可直观反映核心部件故障率,精准体现设备本体健康衰减规律^[2]。(3) 环境影响指标:针对户外复杂服役环境,选取环境温湿度、电磁干扰强度、雨雪侵蚀程度、粉尘污染等级作为核心指标。极端温湿度、雨雪侵蚀易引发电路故障与机械卡顿,电磁干扰会扰乱车地信号传输,粉尘堆积会加速部件老化,各类环境因素直接影响设备运行稳定性,是不可或缺的外部评估维度。(4) 运维历史指标:依托设备全生命周期运维数据,包含检修周期、故障修复时长、历史故障频次、日常巡检评分。规范的检修周期、高效的故障修复可降低设备故障隐患,历史故障频次反映设备固有可靠性,巡检评分直观体现日常运维质量,为设备健康状态评估提供长效数据支撑。

2.3 指标量化与权重确定

(1) 指标标准化处理:由于各指标量纲、数据量级存在差异,需统一标准化处理。针对运行性能等定量指标,采用极差标准化法完成数据归一化处理;针对环境侵蚀程度、部件磨损等定性指标,采用模糊量化法完成等级量化赋值,有效消除量纲差异,实现所有指标数据的统一适配,为后续模型评估奠定数据基础。(2) 指标权重计算:为规避单一权重算法的局限性,采用层次分析法结合熵权法的组合赋权方式。通过层次分析法结合行业运维经验完成主观权重赋值,贴合现场运维实际;利用熵权法依托海量运行数据计算客观权重,保证数据真实性。二者融合修正权重系数,兼顾主观性与客观性,提升指标权重的精准度与可信度^[3]。(3) 指标体系有效性检

验:为保障指标体系科学合理,开展有效性检验。通过一致性检验判断权重赋值的合理性,规避权重逻辑矛盾;通过相关性分析筛选各类指标,剔除高度重叠、冗余的无效指标。经过优化迭代,最终形成层次清晰、覆盖全面、精准高效的铁路信号设备健康状态评估指标体系。

3 铁路信号设备健康状态评估模型构建与验证

3.1 评估模型选型与原理分析

(1) 主流评估模型对比:目前设备健康状态评估领域常用模型包含模糊综合评价法、BP神经网络、支持向量机与深度学习模型,各类模型适配场景与优缺点差异显著。模糊综合评价法可有效处理模糊、定性评估指标,适配多维度、不确定性问题,但权重主观性较强,复杂场景评估精度有限。BP神经网络自适应学习能力强,可挖掘数据非线性关联,适配大规模数据评估,但存在收敛速度慢、易局部最优的问题。支持向量机小样本拟合效果好、泛化能力优异,对离散设备数据适配性高,但大规模数据运算效率较低。深度学习模型精度高、特征挖掘能力突出,适合海量数据场景,但对数据体量、算力资源要求较高,小样本铁路设备数据易出现过拟合问题。(2) 本文模型确定:结合铁路信号设备运维数据样本有限、指标维度多、数据存在模糊性与非线性的特征,以及设备健康状态精准分级评估的核心需求,本文选取融合层次熵权法与改进模糊神经网络的组合评估模型。该模型兼顾主观运维经验与客观数据规律,核心架构包含数据预处理层、指标权重层、状态评估层与结果输出层,既解决单一模型精度不足、主观性过强的问题,又适配铁路设备小样本、多干扰的运行数据特征,可实现设备健康状态的精准量化与等级判定。

3.2 健康状态评估模型搭建

(1) 模型输入与输出设定:基于前文构建的标准化评估指标体系,将预处理后的运行性能、设备状态、环境影响、运维历史四大维度指标数据作为模型输入变量,所有输入数据均完成归一化处理,消除量纲差异。模型输出端以预设的健康、亚健康、故障隐患、故障失效四个设备健康状态等级为核心输出结果,同时输出设备健康量化评分,实现定性等级与定量数值的双重输出。(2) 模型参数初始化与训练:结合模型架构完成核心参数初始化设置,确定网络学习速率、迭代次数、收敛精度与模糊隶属度参数。选取筛选后的铁路信号设备历史运行数据、环境监测数据、运维台账数据作为训练样本,划分训练集与测试集。通过样本数据持续迭代训练模型,不断修正指标权重与模型参数,优化数据拟合效果,降低评估误差,提升模型整体稳定性与适配性^[4]。(3) 模型

评估流程设计：构建全流程闭环评估体系，首先对采集的原始设备数据进行清洗、补缺、标准化预处理；其次通过组合赋权法完成各指标权重精准赋值；随后依托模型算法计算设备健康综合评分；最后结合评分阈值完成健康状态等级判定，同时记录评估数据，形成从数据采集、处理分析、模型计算到结果输出的完整标准化评估流程。

3.3 实例仿真与结果分析

(1) 实验数据选取：为保证仿真实验的真实性与有效性，选取铁路现场典型核心信号设备为研究对象，涵盖轨道电路、转辙机、信号机、应答器四类设备。收集设备近一年的实时监测数据、环境温湿度、电磁干扰记录、日常巡检数据、故障台账及检修运维记录，剔除异常、缺失数据，筛选出有效实验样本，覆盖不同工况、不同服役周期的设备数据，保障样本的全面性与代表性。

(2) 仿真实验开展：依托MATLAB仿真平台搭建完成的组合评估模型，导入预处理后的实验样本数据，启动仿真运算。模型自动完成指标权重匹配、数据特征分析、健康分值计算与等级判定，批量得到各类信号设备的健康量化评分、对应健康等级及潜在故障风险系数，完成所有样本设备的健康状态全覆盖评估。

(3) 结果对比分析：将本次模型仿真评估结果与设备实际运行状态、传统阈值比对评估结果进行双向对比。结果表明，本文组合模型评估结果与现场实际工况高度契合，可精准识别设备亚健康与隐性故障隐患，相较于传统评估方法，有效规避了主观性强、滞后性明显、无法量化评估的缺陷，评估精度与稳定性显著提升，验证了模型的科学性与优越性。

3.4 基于评估结果的运维优化策略

(1) 分级运维策略：依据设备四级健康状态，制定差异化分级运维方案。健康设备实行常规周期巡检、实时状态监测，维持稳定运行；亚健康设备缩短巡检周期，开展针对性微调养护，遏制状态劣化；故障隐患设备开展专项重点整改，排查潜在故障点，提前干预消除；故

障失效设备立即执行停机检修、部件更换，杜绝行车安全隐患。

(2) 设备寿命管理优化：依托模型多次评估结果，拟合设备健康状态时序变化曲线，精准预判设备老化趋势与剩余使用寿命。结合寿命预判结果，优化设备全生命周期管理，科学制定老旧设备更换、部件迭代计划，避免设备超期服役或过早更换造成的资源浪费，提升设备运维经济性与安全性^[5]。

(3) 运维体系改进建议：根据仿真评估梳理的设备高频故障诱因，针对环境干扰、部件老化、运维疏漏等核心问题，优化铁路信号设备运维体系。建立设备常态化实时监测机制，实现状态数据全天候采集分析；推进运维模式从传统定期检修向智能化状态修转型，依托数据评估结果精准施策，全面提升铁路信号设备运维智能化、精细化水平。

结束语

本文完成铁路信号设备故障特性分析、评估指标体系构建与智能评估模型验证，有效解决了传统评估精度低、隐患识别滞后的问题，实现设备健康状态量化分级评估。基于评估结果制定的分级运维、寿命优化策略，可有效提升运维精细化水平。研究成果可为铁路信号设备智能运维提供理论与实践参考。后续可优化算法模型，适配更多复杂工况，进一步提升设备故障预判与运维决策的精准性。

参考文献

- [1]王秋实.基于多源数据融合的铁路信号设备健康状态评估方法[J].铁道标准设计,2023,67(8):156-161.
- [2]陈世奎,刘青峰.铁路信号设备劣化趋势预测与健康管理体系构建[J].铁道运营技术,2023,29(3):122-125.
- [3]孙磊.基于模糊综合评价的铁路信号设备健康状态评估模型[J].铁路通信信号工程技术,2022,19(11):36-40.
- [4]李刚,王英琪.铁路信号智能运维大模型构建及应用探索[J].铁路计算机应用,2025,34(6):61-65.
- [5]邢旺,张鑫.大数据智能分析系统在铁路信号设备PHM中的应用[J].交通科技与管理,2025,6(9):225-228.