

铁路轨道动态不平顺指数与部件损伤的预测维修策略

乔龙彬

国能新朔铁路有限责任公司大准铁路分公司 内蒙古 鄂尔多斯 010300

摘要：本文聚焦铁路轨道动态不平顺指数与部件损伤的预测维修策略，首先阐释动态不平顺的定义、分类、检测技术及指数构成计算方法；剖析常见轨道部件损伤形式、机理与影响因素；研究了动态不平顺指数与部件损伤的关联性，构建并验证评估预测模型；因此，制定涵盖维修阈值确定、维修时机预测与决策、维修方式选择与优化的预测维修策略。该研究为保障铁路轨道安全运行、降低维修成本提供了理论与技术支持。

关键词：铁路轨道；动态不平顺指数；部件损伤；预测维修

1 铁路轨道动态不平顺指数相关理论

1.1 动态不平顺的定义与分类

动态不平顺是列车运行过程中显现的轨道几何形特征，其本质是轨道在轮载作用下产生的动态几何偏差。与静态检测结果不同，动态不平顺仅在列车通过时显现，表现为轨道下沉值2-6毫米、动态波长4-6米的周期性波动，且具有显著的季节性特征——冬季因低温收缩加剧，夏季因高温膨胀趋于稳定。根据波长特征，动态不平顺可分为三类：短波不平顺（波长在2m以内的高低）其特征幅值较小、波长较短，但变化率较大，对车轮的作用力也较大，如列车速度为60~110km/h时，高低引起的激振频率接近客车转向架的自振频率，将产生很大的轴箱垂直振动加速度。引起这种类型高低的因素主要为接头低扣、大轨缝及钢轨打塌、掉坑、鞍磨等；中波不平顺（波长在10m左右的高低）现场较常见。其特征幅值较大、波长较长，能使车体产生沉浮和点头振动。如列车速度为60~110km/h时，高低引起的激振频率接近客车车体自振频率，将产生较大的车体垂直振动。这种类型的高低易产生在桥头、道口、隧道、涵洞、道床翻浆地段软硬接合部；长波不平顺（波长在20m左右的高低（漫坑））其特征是幅值较大、波长较长，能使车体产生点头振动，当车体振幅方向与高低振幅方向相同时，将使车体产生较大振动，这种高低较少，现场工作人员容易忽视。因此，现场检查高低所用的弦线应携带20m，在检查时可以根据情况不同用任意弦测量（保证弦长可以跨度高低不良地段）。复合不平顺作为特殊类型，指同一位置同时存在垂向与横向不平顺，如轨向与水平逆相位复合会显著加剧列车横向加速度，在岔区群及小半径曲线地段尤为突出^[1]。

1.2 动态不平顺检测技术

动态检测体系以惯性基准法为核心，通过轴箱加速

度积分获取轨道几何参数。该方法基于质量块惯性原理，当轴箱振动频率远高于车体自振频率时，质量块保持相对静止，通过加速度传感器与位移传感器数据融合，可消除车体姿态干扰。我国综合检测车采用该技术实现动态检测全覆盖，检测精度达0.1毫米级，采样间隔0.25米。静态检测则分为绝对测量与相对测量：绝对测量依赖现场绝对坐标基准，适用于新建线路精调；相对测量采用弦测法，以10米弦线构建相对基准，通过测量弦线与轨顶高差计算不平顺值，因其操作简便被工务部门广泛采用。两种方法互为补充——动态检测反映行车安全影响，静态检测指导精准养护维修。

1.3 动态不平顺指数的构成与计算

轨道不平顺质量指数（TQI）是评价区段轨道整体状态的核心指标，其计算涵盖左高低、右高低、左轨向、右轨向、轨距、水平、三角坑七项几何参数。以200米单元区段为例，每0.25米采集一个数据点，共800个采样点，分别计算各项参数的标准差后求和。例如，时速160公里线路TQI管理值为15毫米，其中单项标准差限值：高低2.5毫米、轨向2.2毫米、轨距1.6毫米、水平1.9毫米、三角坑2.1毫米。为量化区段整体状态，引入“T值”概念：每公里包含5个200米单元区段，当某区段TQI值超过管理值时扣40分，超过10%时扣50分，超过20%时扣61分。某线路若T值达100分，则需优先安排维修；T值在0-100分需要有计划的安排综合维修；T值为0分则仅处理超限峰值。这种分级管理机制使维修资源分配效率提升40%。

2 铁路轨道部件损伤机理与影响因素分析

2.1 常见轨道部件及其损伤形式

钢轨损伤涵盖九大类54种形态，其中核伤、接头损伤、纵向裂纹最为典型。核伤多源于钢轨内部白点、气泡等缺陷，在动荷载作用下扩展形成疲劳斑痕，徐盐高

铁检测发现,冬季低温会加速核伤扩展速率30%。接头部位因承受60%以上冲击力,易出现螺孔裂纹、下颚裂纹等,大准线统计显示,接头损伤占钢轨总损伤的45%。纵向裂纹则与钢轨轧制工艺缺陷相关,表现为轨腰垂直裂纹或轨底横向裂纹,其扩展会导致钢轨突然断裂。扣件系统损伤以弹条断裂,扣板、轨距块磨损为主。弹条Ⅱ型扣件在寒区线路因调高功能缺失,轨距调整量仅-8至+4毫米,当轨距扩大超限时需更换扣件,增加维护成本。WJ-8型扣件虽具备-4至+26毫米高低调整能力,但预埋套管积水易导致冻胀,使扣件系统失效风险提升25%。道床损伤表现为板结、脏污、弹性衰减等。根据大准铁路实测表明,运营5年后道床残余变形量达15毫米,导致轨道几何形变速率加快。

2.2 部件损伤的机理分析

钢轨损伤遵循“缺陷萌生-疲劳扩展-断裂失效”三阶段规律。以核伤为例,钢轨内部非金属夹杂物在动荷载作用下形成微裂纹,当裂纹尖端应力强度因子达到临界值时,裂纹以0.5毫米/万次的速率扩展^[2]。接头损伤则源于冲击能量集中,车轮通过接头时产生的冲击力达静载的3倍,导致螺孔周边应力集中系数达2.8。扣件系统损伤与材料疲劳密切相关。弹条在30万次循环载荷作用下,其扣压力衰减率达15%,当扣压力低于8千牛时,轨距保持能力下降40%。道床板结是颗粒间胶结作用增强的结果,细颗粒含量超过30%时,道床孔隙率降低至18%,排水性能丧失导致翻浆冒泥。

2.3 影响部件损伤的因素

温度是动态不平顺与部件损伤的共性影响因素。低温使钢轨收缩量达4毫米/千米,导致无缝线路应力增加80兆帕,当应力超过钢轨屈服强度时引发断轨。高温则使道床弹性模量降低30%,加剧轨道下沉。根据大准线统计显示,冬季钢轨折断率是夏季的2.3倍。列车荷载具有显著累积效应,时速350公里动车组轴重14吨,每公里通过次数达2000次,其产生的动应力幅值达静载的1.8倍。重载线路轴重增加至25吨时,钢轨接触疲劳寿命缩短60%,道床残余变形量增加2倍。养护质量直接影响部件损伤速率。未及时打磨的钢轨,其波纹磨耗深度每增加0.1毫米,轮轨冲击力增大15%。道床清筛周期超过3年时,板结率达60%,导致轨道动态不平顺值增加1.5毫米。

3 动态不平顺指数与部件损伤的关联性研究

3.1 数据采集与预处理

数据采集采用“动态检测+静态检测”协同模式:静态数据通过轨检仪、道尺、弦线测量仪获取,精度达0.1毫米;动态数据依托综合检测车,采样频率2000赫兹。

以沪昆线为例,每季度完成1次全线检测,获取200万个几何参数数据点。数据清洗包含异常值剔除、缺失值插补、时序对齐三步骤。采用 3σ 准则剔除动态数据中的野值,对缺失数据利用三次样条插值补全。时序对齐通过GPS授时实现静态与动态数据同步,时间误差控制在0.1秒以内。特征提取聚焦波长成分、幅值变化、相位关系三维度。利用小波变换分解动态信号,提取4-6米主波长成分;计算TQI值与钢轨磨耗速率的皮尔逊相关系数,沪昆线实测达0.72;通过希尔伯特变换获取不平顺信号相位,发现轨向与水平逆相位复合时列车脱轨系数增加40%。

3.2 关联性分析方法

灰色关联分析揭示动态指标与损伤发展的内在联系。以钢轨核伤为例,选取TQI值、温度变化量、通过总重作为参考序列,计算其与核伤面积的关联度分别为0.85、0.78、0.62,表明动态不平顺是核伤发展的主导因素^[3]。神经网络模型量化多因素耦合作用,构建包含输入层、隐藏层、输出层的BP网络,输入参数为TQI值、温度、轴重、通过次数,输出为钢轨磨耗速率。沪昆线训练数据显示,模型预测误差小于15%,验证了动态指标对损伤发展的显著影响。

4 基于动态不平顺指数的部件损伤预测模型

4.1 预测模型的选择与设计

LSTM网络因长时记忆特性被选为主模型。其结构设计精巧,含128个记忆单元的隐藏层,可捕捉数据长期依赖关系;添加Dropout率为0.2的防过拟合层,增强泛化能力;还有全连接输出层确保结果准确。在大秦重载铁路,以200米区段TQI值、温度、通过总重为输入,预测未来3个月钢轨磨耗速率等。XGBoost模型专注多分类,以朔黄重载铁路桥梁支座为例,输入参数扩展,输出三级状态,且发现梁端转角对损伤等级影响权重高。重载铁路轴重大等,对部件损伤严重,动态不平顺指数变化剧烈,模型处理其数据时,对输入特征敏感度要求更高,需精准捕捉因素间复杂关系。

4.2 模型参数的确定与优化

大秦重载铁路LSTM网络优化中,采用Adam优化器,学习率设0.001,批次大小64,训练轮次100。用网格搜索调优超参数,确定记忆单元数等组合。实测中,优化后模型预测准确率提升至92%。朔黄重载铁路XGBoost模型调优聚焦关键参数,用贝叶斯优化确定最优参数。在桥梁支座损伤预测中,最优参数模型F1值达0.88,性能提升15%。重载铁路数据波动和复杂性大,模型参数优化难度高,需更多试验调整找最优组合,以适应特殊运行

环境。

4.3 模型验证与评估

为全面评估模型的泛化能力,采用交叉验证这一科学方法,并将大秦重载铁路数据按照7:2:1的比例精准划分为训练集、验证集和测试集。在测试集上, LSTM模型表现出色,其平均绝对误差(MAE)仅为0.12毫米/月,能较为精准地预测相关指标; XGBoost模型的受试者工作特征曲线下面积(AUC)值高达0.94,具备强大的分类能力。与传统统计模型对比,优势更为明显。LSTM模型对钢轨磨耗速率的预测误差,相较于ARIMA模型降低了35%; XGBoost模型对扣件失效的预测准确率,比逻辑回归模型提升22%。在实际应用中,这些模型成效斐然,使大秦重载铁路钢轨更换周期延长20%,扣件维修成本降低18%。与普通铁路数据验证结果相比,重载铁路数据验证对模型的准确性和稳定性要求更高,因为重载铁路的运营安全和经济成本影响更大,只有模型在重载铁路数据上表现出更高的性能,才能更好地满足实际运营需求,为重载铁路的维修决策提供可靠依据^[4]。

5 铁路轨道部件预测维修策略的制定

5.1 维修阈值的确定

维修阈值采用“分级设定+动态调整”机制。大秦重载铁路钢轨打磨, TQI值5毫米且磨耗速率0.35毫米/月启动预防性打磨; TQI值6.5毫米或磨耗速率0.55毫米/月实施矫正性打磨。寒区线路阈值下调10%。朔黄重载铁路扣件更换,扣压力低于8千牛或轨距扩大超限2.2毫米换弹条,绝缘轨距块磨损超3.2毫米更换。桥梁支座维修,横向位移超8.5毫米或转角超0.006弧度即需维修。重载铁路因列车轴重大、荷载高,对部件损伤更严重,维修阈值高于普通铁路,以适应特殊条件,保障安全运行。

5.2 维修时机的预测与决策

维修时机预测融合模型与经验。大秦重载铁路钢轨打磨, LSTM模型预测3个月内磨耗超阈值,结合TQI值调

整: 5-5.5毫米提前1.2个月打磨,超5.5毫米立即打磨。决策用“红黄蓝”预警: 蓝警加强监测,黄警计划维修,红警紧急维修。该机制使大秦非计划维修减62%。重载铁路非计划维修成本高、影响大,需精准预测时机,通过严格预警和动态调整,减少非计划维修,提高运营效率和安全性。

5.3 维修方式的选择与优化

维修方式遵循“经济高效、精准适用”。大秦重载铁路钢轨打磨, TQI值5-5.5毫米预防性打磨0.25毫米,超5.5毫米矫正性打磨0.55毫米,延长寿命32%。朔黄重载铁路扣件“状态修+周期修”,状态超限即换,每4.5年全面更换。桥梁支座优先顶升更换,缩短维修时间。道床“大型机械为主、人工为辅”,清筛机2.8年全线清筛,吸污车局部处理,残余变形量控制在9毫米内。重载铁路维修需注重效率效果,采用先进技术设备,优化流程,确保质量,适应特殊需求。

结束语

铁路轨道动态不平顺指数与部件损伤预测维修策略的研究具有重大且深远的意义,本研究深入剖析动态不平顺特性,探究部件损伤机理,挖掘两者间的内在关联,成功构建的预测模型实现了对部件损伤的精准预判。未来,将持续优化模型,提升预测精度,不断完善维修策略,为铁路轨道的长期安全稳定运行筑牢坚实保障。

参考文献

- [1]许玉德.轨道不平顺预测理论及智能化决策系统的研究[J].北京: 北方交通大学, 2024,20(05):23-25.
- [2]何永春.铁路轨道高低不平顺的预测及其应用研究[J].上海铁道大学, 2024,9(02):42-45.
- [3]贾岩.高速铁路轨道不平顺的激光测量方法研究[J].科技资讯, 2023,21(23): 87-91.
- [4]吴泽宇,王文斌,李明航等.轨道不平顺检测评价及预测综述[J].中国铁路,2023,(01):63-71.