

基于车体振动与噪声响应的城市轨道交通线路 曲线健康状态评定模型^{*}

时光明¹ 白磊^{2**} 高培正² 袁健² 丁明²

(1. 北京市地铁运营有限公司线路分公司, 100082, 北京;

2. 北京九州一轨环境科技股份有限公司智慧运维中心, 100070, 北京//第一作者, 高级工程师)

摘 要 在城市轨道交通线路中, 曲线占比较高, 且曲线半径相对较小。准确评估曲线健康状态, 对合理利用维修资源、优化安排维修计划具有重要意义。提出了一种新的曲线健康评定模型, 利用车体的振动与噪声响应检测数据, 构建状态评定指标体系, 确定曲线健康指数。该评定模型可实现曲线健康状态的实时性准确评定。通过北京地铁 1 号线的实际检测数据验证了该模型的有效性。计算结果表明: 曲线健康指数可用以全面评定曲线健康状态, 能够满足现场管理需求。

关键词 城市轨道交通; 线路; 曲线; 健康状态; 综合评定模型; 车体振动; 噪声响应

中图分类号 U211.5; U213.2⁺³

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2022.01.014

Urban Rail Transit Curve Health Condition Evaluation Model Based on Vehicle Body Vibration and Noise Response

SHI Guangming, BAI Lei, GAO Peizheng, YUAN Jian, DING Ming

Abstract In urban rail transit lines, curves have relatively high proportion, and the radius is relatively small. Accurate assessment of curve health condition is of great significance to allocating maintenance resources reasonably and optimizing maintenance scheduling. A new curve health evaluation model is proposed. The measurement data of vehicle body vibration and noise response is used to establish a condition evaluation index system, and curve health index (CHI) is determined. Accurate real-time assessment of curve health condition can be obtained from evaluation model. The effectiveness of the model is verified by the actual measurement data accumulated in Beijing Metro Line 1. Calculation results show that CHI can be used for comprehensive evaluation of curve health condition and can meet on-site metro management requirements.

Key words urban rail transit; line; curve; health condition; comprehensive evaluation model; vehicle body vibration; noise response

First-author's address Beijing Mass Transit Railway Operation Co., Ltd., 100082, Beijing, China

城市轨道交通线路的曲线健康状态评定结果, 是制定曲线维修策略的重要依据。不科学的健康评定方法将导致不合理的维修活动。如何科学地综合评定城市轨道交通线路曲线健康状态, 对维修计划的优化编制具有重要的意义。

根据 GB/T 39559.4—2020《城市轨道交通设施运营监测与评价方法 第 4 部分: 轨道和路基》, 在实际运维过程中, 线路曲线质量状态评定是从静态不平顺(或静态几何尺寸超限)、动态不平顺(或动态几何尺寸超限)、曲线圆顺性(或曲线正矢)和曲线磨耗等 4 个维度评价曲线质量的好坏。上述评定指标的相应检测手段的检测周期较长, 且不同检测手段的检测周期不同, 这导致上述 4 个维度的曲线状态评定指标数据较难在同一时间节点获得。

目前, 国内外专家学者对城市轨道交通线路曲线健康状态的综合评定研究较少, 多侧重研究曲线钢轨的使用寿命评估^[1-5]、曲线钢轨廓形优化设计与曲线钢轨病害治理^[6-12]等相关问题。本文提出一种新的基于振动与噪声响应的城市轨道交通线路曲线健康状态评定模型(VNB-CHEM)。该评定模型综合利用轮轨接触作用下的车辆响应指标, 实现曲线健康状态的实时性准确评定。相应的检测装置(线路质量检测仪)可通过人员携带放置或安装在城市轨道交通电客车上, 对全线路曲线健康状态

^{*} 国家自然科学基金项目(51578057); 北京市博士后工作经费资助项目(ZZ2019-116)

^{**} 通信作者

进行实时评定,有助于把握曲线质量的劣化过程,掌握其状态劣化规律。根据曲线健康状态好坏,及时安排维修活动,实现维修任务的制定更具针对性,实现维修资源的合理分配。

本文的 2 个创新点是:从曲线设备的基本作用出发,利用轮轨接触作用下的车辆响应指标,评估曲线设备健康状况;不同于传统评定方法,VNB-CHEM 可实现对线路曲线健康状态的实时评定。

1 传统的城市轨道交通线路曲线健康状态评定方法

在我国城市轨道交通实际运维过程中,线路曲

线状态评定是以线路上单个曲线为分析对象,利用各类检查方式获得的数据,从静态不平顺、动态不平顺、曲线圆顺性和曲线磨耗等 4 个维度对曲线设备状态进行的分析和评价,如图 1 所示。曲线状态评定的数据源包括轨检车检测数据、轨检仪检测数据、钢轨波磨检测仪检测数据、人工线路检查数据和曲线正矢检查数据等。

曲线设备不同维度下的病害等级划分不同。动态不平顺的病害等级划分为 4 级,包括 I 级、II 级、III 级和 IV 级;静态不平顺等级划分为 3 级,包括作业验收、计划维修和临时补修;曲线圆顺性(或曲线正矢)的病害等级划分为 2 级,包括作业验收和

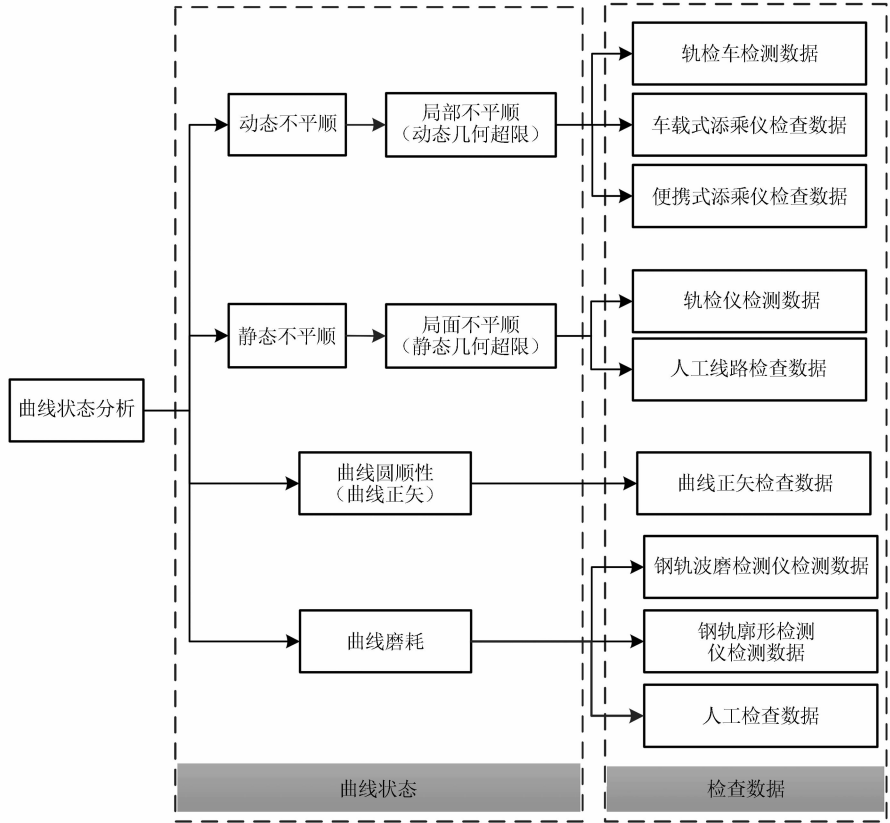


图 1 城市轨道交通线路曲线状态分析流程图
Fig. 1 Flow chart of urban rail transit line curve condition analysis

日常保持。曲线磨耗主要有侧面磨耗、垂直磨耗和波浪形磨耗等不同形式。曲线磨耗属于一种钢轨伤损病害类型,钢轨伤损等级划分为 3 级,包括轻伤、重伤和折断。

GB/T 39559.4—2020 规定的曲线检测周期较长,且不同检测方式的检测周期不同,详见表 1。这导致上述 4 个维度的曲线状态评定指标数据较难在同一时间节点获得。

表 1 城市轨道交通线路不同曲线状态的检测周期
Tab. 1 Inspection cycle of urban rail transit line curve of different conditions

检测对象	检测内容	检测频率
曲线	轨道静态不平顺	不低于 1 次/季度
	轨道动态不平顺	不低于 1 次/2 月
	曲线圆顺性	整体道床不低于 1 次/半年, 碎石道床不低于 1 次/季度
	曲线钢轨磨耗	不低于 1 次/季度

2 VNB-CHEM 构建

不同于传统的城市轨道交通线路曲线健康状态评定方法,本文提出以客车车体通过曲线过程中的振动响应和客室内噪声为评定指标,来综合评价曲线设备健康状态,基于此构建 VNB-CHEM,计算确定曲线健康指数 H_{CHI} 。该模型有两部分构成:振动响应和客室内噪声评定指标的建立;综合评定指标的计算。

2.1 指标体系的构建

1) 加速度有效值:不良的轨道平顺性、圆顺性和曲线钢轨磨耗是加剧接触振动的主要原因,导致过大的冲击加速度,加剧车辆轮轨动力作用,使车辆异常振动,可能造成轨道弹条的折断、扣件脱落,对车辆底部关键零部件等造成冲击伤害等。采用振动加速度有效值衡量车体的振动响应,其计算公式为:

$$E_v = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l y_v^2(x) dx} \quad (1)$$

$$E_h = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l y_h^2(x) dx} \quad (2)$$

式中:

E_v ——垂直加速度有效值;

E_h ——水平加速度有效值;

y_v ——垂直加速度信号值;

y_h ——水平加速度信号值;

x ——信号采样间距,设为 0.25 m;

l ——曲线全长。

2) 噪声有效值:客室内噪声与曲线磨耗严重程度存在正相关性,严重的钢轨磨耗会显著增大客室内噪声,客室内恶劣的声学环境会降低服务质量。本文采用声压级 L_p 描述客室内噪声的强弱,其单位是 dB,其计算公式为:

$$L_p = 20 \lg \frac{p}{p_0} \quad (3)$$

式中:

p ——有声音与无声音时的大气压强差值,Pa;

p_0 ——基准声压,取值为 2×10^{-5} Pa。

噪声有效值 E_p 采用声压级的均值描述车辆在经过曲线时客室内的整体噪声情况,其计算公式为:

$$E_p = \frac{1}{l} \int_0^l L_p(x) dx \quad (4)$$

2.2 综合评定指标的计算

为整体评价曲线的健康状态,本文从列车通过曲线过程中的振动和噪声响应角度出发,提出以

H_{CHI} 综合评价曲线健康的好坏,其计算公式为:

$$H_{CHI} = \alpha E_v + \beta E_h + \gamma E_p \quad (5)$$

式中:

α, β, γ ——系数,取值需根据实际情况确定。

2.3 H_{CHI} 应用场景

1) 为有效评价曲线整体健康状态,需综合考虑实际养护维修能力和水平以及历史检测维修数据,选取符合线路实际情况的曲线健康评价基准值 H_{base} 。当 $H_{CHI} > H_{base}$ 时,表明曲线整体健康状态较差,应尽快安排维修活动。

2) 可根据 H_{CHI} 的大小,由高到低对管辖范围内的曲线健康状况的“好”和“坏”进行排序。根据排序结果,同时考虑管理部门的养护维修能力,确定出需要维修的曲线设备集,为合理制定维修计划奠定基础。

3 实例验证

3.1 实例背景

北京地铁 1 号线始建于 1965 年,从 1971 年开始逐步开通试运营。北京地铁 1 号线西起苹果园站,东至四惠东站,全长 31.04 km。本文实例验证采用北京地铁 1 号线上行线 2020 年 12 月 14 日的检测数据,以验证 VNB-CHEM 的有效性。检测数据通过线路质量智能检测仪测得。该质量智能检测仪可实现在地下隧道环境下里程的自主定位与检测数据的自动校准。

3.2 结果分析

为降低不同指标量纲的影响,本文对计算出的各项指标数据进行了标准化处理。

3.2.1 不同指标的相关性分析

图 2 是北京地铁 1 号线上行线全部曲线不同里程位置的 E_h 、 E_v 、 E_p 和 H_{CHI} 的分布情况。分析图 2 可知:

1) E_h 与 E_v 随里程位置的变化趋势一致, E_h 与 E_v 的皮尔逊(Pearson)相关系数 $\rho_{h,v}$ 为 0.70,其计算公式为:

$$\rho_{h,v} = \rho(E_h, E_v) = \frac{\text{cov}(E_h, E_v)}{\sigma_{E_h} \sigma_{E_v}} \quad (6)$$

式中:

$\text{cov}(E_h, E_v)$ —— E_h 与 E_v 的协方差;

$\sigma_{E_h}, \sigma_{E_v}$ ——分别为 E_h 和 E_v 的标准差。

2) E_h 、 E_v 与 E_p 随里程位置的变化趋势相关性较低。其中, E_h 与 E_p 的皮尔逊相关系数为 0.21, E_v 与 E_p 的皮尔逊相关系数为 0.08。

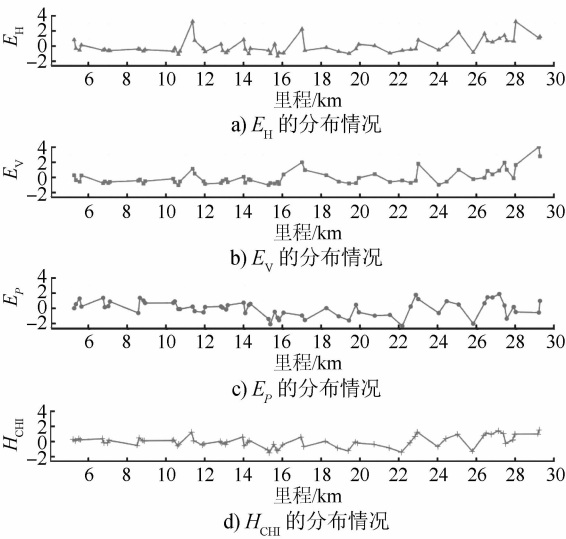


图 2 北京地铁 1 号线上行全部曲线不同里程位置的 E_H 、 E_V 、 E_P 和 H_{CHI} 的分布情况

Fig. 2 Distribution of E_H , E_V , E_P and H_{CHI} at different mileage location of all curves in upgoing direction of Beijing Metro Line 1

表 2 北京地铁 1 号线中整体健康状态较差的前 10 条曲线的指标数据

Tab. 2 Index data of top ten worst-health curves of Beijing Metro Line 1

序号	曲线 ID	起点里程/km	终点里程/km	曲线半径/m	E_H	E_V	E_P	H_{CHI}
1	qx0170	29.228	29.264	2 000	1.257	2.792	0.985	1.505
2	qx0164	27.131	27.298	350	1.005	0.908	1.889	1.423
3	qx0156	22.953	23.060	1 200	0.792	1.797	1.223	1.259
4	qx0126	11.326	11.415	1 000	3.271	1.144	0.238	1.223
5	qx0162	26.523	26.658	1 000	0.666	0.869	1.461	1.114
6	qx0165	27.399	27.485	700	1.425	1.961	0.382	1.037
7	qx0169	29.172	29.208	2 000	1.066	4.039	-0.556	0.998
8	qx0168	27.979	28.059	1 000	3.232	1.645	-0.478	0.980
9	qx0163	26.779	27.013	600	0.527	0.407	1.445	0.956
10	qx0159	25.038	25.129	2 000	1.804	1.000	0.505	0.954

qx0155 曲线的 E_P 值较大、 E_H 值较小、 E_V 值较小, E_P-E_H 差值在全部曲线中最大, E_P-E_V 差值在全部曲线中最大。这说明 qx0155 曲线的磨损病害相对严重。

综上所述, 本文实例验证以每条曲线为基本评定对象, 计算其 H_{CHI} 值, 并依据 H_{CHI} 值进行倒序排列, 可快速确定健康状态较差的曲线。运维部门可据此及时安排相应的检查活动对病害原因进行复核, 并针对性地组织维修活动, 实现维修资源的合理分配。同时, 通过分析 E_V-E_P 值和 E_H-E_P 值的相对大小, 可初步判断曲线的主要病害类型, 可帮助现场人员有针对性地上道复核曲线病害原因。

3.2.2 基于 TOP N 的薄弱设备分析

表 2 为标准化处理后的整体健康状态较差的前 10 条曲线的状态评定指标数据。其中, $\alpha=0.25$, $\beta=0.25$, $\gamma=0.50$ 。由表 2 可见: qx0170 曲线的 H_{CHI} 值为最高值, 其整体健康状态相对较差, 需重点关注, 应将其纳入维修计划; qx0164 曲线的 E_P 值为最高值, 该曲线为小半径曲线; qx0126 曲线的 E_H 值为最高值; qx0169 曲线的 E_V 值为最高值。由对比分析可知, 虽然 qx0164 曲线、qx0126 曲线和 qx0169 曲线的某一状态指标值相对是最高值, 但 qx0170 曲线的整体健康状态相对而言更差些, 需及时维修。

3.2.3 基于状态指标相对大小的病害原因初判

qx0168 曲线的 E_H 值较大、 E_P 值较小, E_H-E_P 差值在全部曲线中最大; qx0169 曲线的 E_V 值较大、 E_P 值较小, E_V-E_P 差值在全部曲线中最大。这说明 qx0168 曲线和 qx0169 曲线的平顺性、圆顺性病害相对严重。

4 结语

本文提出了一种基于车体振动与噪声响应的城市轨道交通线路曲线健康状态评定模型 VNB-CHEM。研究建立了振动响应和客室内噪声的评定指标 E_H 、 E_V 和 E_P , 由此构建了曲线健康指数 H_{CHI} 。采用北京地铁 1 号线的实际检测数据验证了模型 VNB-CHEM 的有效性。模型 VNB-CHEM 已开始在北京地铁测试使用, 将根据用户反馈不断完善模型 VNB-CHEM。如何基于车辆的振动与噪声响应快速判断线路上钢轨异常波磨, 将是下一步的研究方向。

参考文献

- [1] GHOFrani F, CHAVA N K, HE Q. Forecasting risk of service failures between successive rail inspections: a data-driven approach[J]. Journal of Big Data Analytics in Transportation, 2020, 2(1): 17.
 - [2] BAI W, SUN Q, WANG F, et al. A segmental evaluation model for determining residual rail service life based on a discrete-state conditional probabilistic method[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability, 2019, 233(2): 211.
 - [3] BAI W, LIU R, SUN Q, et al. A stochastic model for the estimation of renewal periods of sharply curved metro rails[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2018, 232(2): 572-588.
 - [4] BAI L, LIU R, WANG F, et al. Estimating railway rail service life: a rail-grid-based approach[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2017, 105: 54.
 - [5] 刘丰收, 李闯, 田常海. 我国高速铁路钢轨早期伤损研究[J]. 铁道建筑, 2018(1): 138.
LIU Fengshou, LI Chuang, TIAN Changhai. Study on early damage of rail in high-speed railway in China[J]. Railway Engineering, 2018(1): 138.
 - [6] 刘永乾, 王军平, 徐宁, 等. 北京地铁个性化钢轨廓形打磨技术应用效果分析[J]. 城市轨道交通研究, 2020(8): 185.
LIU Yongqian, WANG Junping, XU Ning, et al. Application effect analysis of personalized rail profile grinding technology in Beijing Metro[J]. Urban Mass Transit, 2020(8): 185.
 - [7] 李克飞, 黑勇进, 王进, 等. 列车及轨道参数对曲线钢轨波磨影响及防治措施研究[J]. 铁道标准设计, 2019(8): 36.
LI Kefei, HEI Yongjin, WANG Jin, et al. Study on the influence of train and track parameters on curved rail corrugation and preventive measures[J]. Railway Standard Design, 2019(8): 36.
 - [8] 李金良. 周期性钢轨廓形打磨对小半径曲线寿命的影响[J]. 铁道建筑, 2019(8): 154.
LI Jinliang. Influence of periodic rail profile grinding on life of small radius curve[J]. Railway Engineering, 2019(8): 154.
 - [9] JAMSHIDI A, HAJIZADEH S, SU Z, et al. A decision support approach for condition-based maintenance of rails based on big data analysis[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2018, 95: 185.
 - [10] 周清跃, 刘丰收, 张银花, 等. 高速铁路轮轨匹配存在问题及对策[J]. 中国铁道科学, 2017(5): 78.
ZHOU Qingyue, LIU Fengshou, ZHANG Yinhua, et al. Solutions for problems at wheel-rail interface in high-speed railway[J]. China Railway Science, 2017(5): 78.
 - [11] 李军. 神朔铁路钢轨使用寿命研究[J]. 铁道建筑, 2017(11): 98.
LI Jun. Study on rail service life of Shenmu-Shuozhou railway[J]. Railway Engineering, 2017(11): 98.
 - [12] 周骏, 刘林芽, 毛顺茂. 基于轨道质量指数的钢轨打磨型面研究[J]. 铁道建筑, 2014(8): 86.
ZHOU Jun, LIU Linya, MAO Shunmao. Study on rail profile grinding based on track quality index[J]. Railway Engineering, 2014(8): 86.
- (收稿日期: 2021-03-31)
-
- (上接第 69 页)
- [13] 李长安. 地铁车站梁板相对刚度对现浇板弯矩的影响[J]. 铁道建筑技术, 2012(增刊 2): 87.
LI Chang'an. Effect of relative stiffness of beams and slabs on bending moments of cast-in-place slabs in metro stations[J]. Railway Construction Technology, 2012(S2): 87.
 - [14] 郑刚, 邓旭, 刘庆晨. 地表荷载对地铁车站箱体影响实测及有限元分析[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2013(10): 885.
ZHENG Gang, DENG Xu, LIU Qingchen. Field observation and finite element analysis of metro station boxes due to ground loading[J]. Journal of Tianjin University, 2013(10): 885.
 - [15] BRANSBY M F, SPRINGMAN S M. 3-D finite element modelling of pile groups adjacent to surcharge loads[J]. Computer and Geotechnics, 1996, 19(4): 301.
 - [16] 徐光黎, 马郎, 张杰青, 等. 东京地下水位上升对地下工程的危害警示[J]. 岩土工程学报, 2014(2): 269.
XU Guangli, MA Xun, ZHANG Jieqing, et al. Lessons from impact of rising of ground water level on underground engineering in Tokyo[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014(2): 269.
 - [17] 罗富荣, 刘赫炜, 韩焯. 地下水水位上升对地铁隧道结构的影响分析[J]. 中国铁道科学, 2011(1): 81.
LUO Furong, LIU Chengwei, HAN Xuan. Numerical analysis on the influence of the rising groundwater level on the metro tunnel structure[J]. China Railway Science, 2011(1): 81.
 - [18] 张晨明, 董秀竹. 新线施工对既有车站影响分析[J]. 铁道工程学报, 2006(9): 85.
ZHANG Chenming, DONG Xiuzhu. Analysis of effect on existing line station due to new line construction[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2006(9): 85.
 - [19] 沈辉, 罗先启, 李野, 等. 深基坑施工对地铁车站影响的数值仿真分析[J]. 地下空间与工程学报, 2011(5): 1018.
SHEN Hui, LUO Xianqi, LI Ye, et al. Numerical simulation and analysis of influence of deep excavation on adjacent subway station[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011(5): 1018.
 - [20] 胡恒, 朱厚喜, 贾立宏. 基坑开挖对邻近地铁结构基础的影响分析[J]. 岩土工程学报, 2010(1): 116.
HU Heng, ZHU Houxi, JIA Lihong. Effect of pit excavation on subway foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010(1): 116.
- (收稿日期: 2021-05-20)