

基于变权模糊综合法与人工神经网络的地铁车辆转向架系统健康状态评价

张磊¹ 韩斌² 樊茜琪²

(1. 上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室, 201804, 上海;

2. 同济大学铁道与城市轨道交通研究院, 201804, 上海)

摘要 [目的]相较于现代地铁车辆普遍采用的计划修和故障修的维修模式,状态修可以在优化维修策略和成本的同时,把握车辆系统的健康状态和运行情况。为实现状态修,需对车辆系统健康状态进行准确评价。[方法]以地铁车辆转向架系统为对象,对其健康状态的评价方法进行深入研究。依据转向架系统组成具有层次性的特点,以劣化度为依据,将层次分析法和变权理论相结合,根据模糊综合评判思路,建立基于劣化度的地铁车辆转向架健康状态变权模糊综合评价模型,提出建模流程;通过选取的地铁车辆转向架系统健康状态评价指标对其进行健康状态评估,获得样本数据;利用样本数据对BP神经网络、支持向量机和随机森林三种不同的人工神经网络进行训练,利用实际测试数据判断三种不同类型人工神经网络的评价效果。[结果及结论]随机森林模型对地铁车辆转向架系统健康状态的识别能力最强,可实现对地铁车辆转向架系统的智能化健康评估。

关键词 地铁车辆;转向架;健康状态评价;变权模糊综合法;人工神经网络

中图分类号 U270.33

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.02.033

Health Status Evaluation of Metro Vehicle Bogie System Based on Variable Weight Fuzzy Synthesis Method and Artificial Neural Network

ZHANG Lei¹, Han Bin², FAN Qianqi²

(1. Shanghai Key Laboratory of Rail Infrastructure Durability and System Safety, 201804, Shanghai, China; 2. Institute of Rail Transit, Tongji University, 201804, Shanghai, China)

Abstract [Objective] In contrast to the planned and faulty maintenance modes commonly used in modern metro vehicles, condition-based repair can capture the health status and operation condition of the vehicle system while optimizing maintenance strategies and costs. To realize condition-based repair, the health status of vehicle system needs to be accurately evaluated. [Method] Focusing on metro vehicle bogie system as object, the evaluation method of its health status is studied in-

depth. Based on the hierarchical characteristics of bogie system composition, with reference to the degree of deterioration, combining the analytical hierarchy process method and variable weight theory are combined, to establish the variable weight fuzzy comprehensive evaluation model of metro vehicle bogie based on deterioration degree according to using the idea of fuzzy comprehensive judgment, and the modelling process is proposed. By evaluating the health status of the selected metro vehicle bogie system with the health status evaluation indexes, sample data is obtained and used to train three different artificial neural networks, namely, BP (back propagation) neural network, support vector machine and random forest. Then, the evaluation performance of the three different types of artificial neural networks is judged with actual test data. [Result & Conclusion] The random forest model has the strongest ability to identify the health status of the metro vehicle bogie system and realizes the intelligent health assessment of the metro bogie system.

Key words metro vehicle; bogie; health status evaluation; variable weight fuzzy synthesis method; artificial neural network

目前地铁车辆的维修模式仍以计划修为主,穿插故障修以及少部分的状态修,维修模式偏传统,智能化程度较低,难以实现状态的预测预警和全寿命周期维修策略的优化^[1-2]。本文以地铁车辆的重要子系统——转向架系统为研究对象,研究一种基于变权模糊综合法与人工神经网络的地铁车辆转向架健康状态评价方法,以实现地铁车辆转向架健康状态的准确评价,为状态修提供参考和依据。

1 变权模糊综合评价法理论基础

以劣化度为依据,采用层次分析法及变权理论优化各指标权重,结合模糊综合评价,得到基于劣化度的装备健康状态变权模糊综合评价方法,再对

转向架进行健康状态评价以获得样本数据。

1.1 劣化度、模糊集合及隶属度

对装备进行健康状态评估,实质上是由相关的状态特征参数来表征。随着运行时间的增加,装备部件将会劣化衰老。劣化度是指装备从优良状态偏离到极限技术状态的程度。对于复杂装备来说,影响其状态特征参数劣化的因素较多,本文基于装备自身性能及特征参数计算劣化度。以装备第 i 个状态监测参数为例,劣化度 d_i 的计算公式参见文献[3]。

相较于普通集合,模糊集合描述的对象是具有某种模糊概念属性的全体,能体现研究对象模糊性的特点。而隶属度对模糊性进行了量化分析,是模糊理论中核心的内容。地铁车辆转向架系统具有结构复杂以及健康状态模糊的特点,因此模糊理论十分适用于地铁车辆转向架这类复杂装备的健康状态评价。

目前常用的隶属度函数有三角形、梯形和岭形隶属度函数。相较梯形函数,岭形函数减小了棱角且其计算误差隶属度较高。相较三角形函数,岭形函数的指标处在某等级隶属度较高的隶属度位置时,能够包围更多隶属度高的信息;当指标处在某等级隶属度较低的隶属度位置时,岭形函数排除了更多隶属度低的信息^[4]。故本文采用岭形隶属度函数。

1.2 模糊综合评判理论

模糊综合评判法是依据单因素的评价结果来构建评估矩阵,然后根据各评估指标的权重进行模糊变换,进而可得总目标的评估结果。该方法应用较为广泛,对多因素影响的情况也比较适用,同时也可用于各影响因素之间关系不能被定量描述的情况^[5]。应用模糊综合评判法的具体步骤如下:

1) 确定评价集。评价集需包含评估对象的所有评价等级,一般用 V 表示,包含 m 种评价等级的评价向量为:

$$V = [v_1 \quad v_2 \quad v_3 \quad \cdots \quad v_m] \quad (1)$$

式中:

v_m ——第 m 种评价等级。

2) 确定健康状态评价向量。健康状态评价向量包含了影响评估对象的健康因子,一般用 U 表示,包含 n 个健康因子的状态评价向量为:

$$U = [u_1 \quad u_2 \quad u_3 \quad \cdots \quad u_n] \quad (2)$$

式中:

u_n ——第 n 个健康因子。

各健康因子具有一定的模糊性,评价集中的某指标所对应的健康状态评价向量为:

$$v_j = [u_{1j} \quad u_{2j} \quad \cdots \quad u_{nj}]^T, j = 1, 2, \cdots, m \quad (3)$$

式中:

v_j ——第 j 种评价等级向量;

u_{nj} ——评价等级为 v_j 的第 n 个健康因子。

由此可得出 m 种评价等级中的 n 个健康因子所对应的特征值矩阵 F 为:

$$F = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & \cdots & f_{1m} \\ f_{21} & f_{22} & \cdots & f_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ f_{n1} & f_{n2} & \cdots & f_{nm} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中:

F_i ——所有评价等级对应的第 i 个健康因子的值, $i = 1, 2, \cdots, n$;

f_{ij} ——第 j 种评价等级所对应的第 i 个健康因子的值。

3) 健康因子评价。健康因子评判时,其对评判对象的隶属度为:

$$R_i = [r_{i1} \quad r_{i2} \quad \cdots \quad r_{im}] \quad (5)$$

式中:

R_i ——第 i 个健康因子的隶属度向量;

r_{im} ——第 i 个健康因子的第 m 种评价等级的隶属度。

根据健康因子评价集中各因子集的隶属度函数可得到各单因子相对应的隶属度,将特征值矩阵 F 变换为隶属度矩阵 R :

$$R = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (6)$$

4) 确定权重集。各健康因子对评判对象的重要程度各不相同。为反映出这种区别,给各健康因子 u_i 赋予对应的权重系数 k_i ,各健康因子权重所对应的模糊集可表示为:

$$K = [k_1 \quad k_2 \quad \cdots \quad k_n] \quad (7)$$

式中:

K ——各健康因子权重所对应的模糊集。

1.3 权重确定方法

采用层次分析法计算系统权值系数时,首先要从研究对象自身的特点和结构组成出发,构建对应的层次结构,明确其目标层和评价层。其次,依据

一定的专家经验和装备系统组成结构,建立判断矩阵并进行相关运算,求解出最大特征根和特征向量。当一致性检验通过时,其特征向量值就是该层指标的权重,同理逐层确定权值,直到最高层系统^[6]。

在装备实际运行过程中,评估指标所对应的权重值会发生变化。即当装备某个评估指标的状态处于非常差的时候,应立即引起高度重视,增加此指标的权重值。所以,在装备健康状态评估中应采用变权原理来反映评估指标的这种不均匀性问题^[3],以提高装备健康状态评估的准确性。

为此引入变权公式:

$$\varpi_i = \frac{\varpi_i^{(0)}(1 - d_i)^{\alpha-1}}{\sum_{k=1}^n \varpi_k^{(0)}(1 - d_k)^{\alpha-1}} \quad (8)$$

式中:

- ϖ_i ——第 i 个健康因子对应的变权权重;
- $\varpi_i^{(0)}$ ——第 i 个健康因子对应的常权权重;
- d_i ——第 i 个健康因子对应的劣化度;
- α ——装备均衡性参数,通常情况下取值为 0.2。

2 变权模糊综合评价法建模计算

依据地铁车辆转向架系统组成具有层次性的特点,以劣化度为依据,将层次分析法和变权理论相结合以确定权重值。根据模糊综合评判思路,建立基于劣化度的地铁车辆转向架健康状态变权模糊综合评价模型。具体建模流程为:①建立装备的评价集和状态向量;②计算装备和部件的权重值及劣化度;③基于劣化度的健康因子模糊综合评估;④基于劣化度的系统模糊综合评估;⑤确定装备的健康状态。

2.1 建立装备的评价集和状态向量

通过对地铁车辆技术规格书、各级维修规程、作业指导书以及检修记录的阅读分析,并依据转向架运行过程中具体故障模式和实际检修内容,同时结合领域专家经验,分层选取出地铁车辆转向架系统健康因子,并给出其参数范围,如表 1 所示。

由表 1 可知,地铁车辆转向架健康状态评价向量为 $U = [U_1 \quad U_2 \quad \cdots \quad U_6 \quad U_7]$ 。其中 $U_1 = [u_{1,1} \quad u_{1,2} \quad \cdots \quad u_{1,10} \quad u_{1,11}]$ 代表车辆轮对子系统的健康状态向量,内含 11 个健康因子。其余 6 个子系统的健康状态向量同理可得。

表 1 地铁车辆转向架健康因子			
Tab. 1 Factors for evaluating metro vehicle bogie health			
子系统	健康因子名称	出厂允许值 (最佳值)	极限 状态值
轮对	车轮直径磨耗量/mm	0	70
	车轮踏面平痕长度/mm	0	40
	车轮踏面凹坑长度/mm	0	20
	轮辋翻边量/mm	0	6
	同一转向架轮径差/mm	0	4
	同一轮对内侧距差/mm	0	2.5
	同一轮对两轮轮重差/%	0	2
	同一转向架两轴轴重差/%	0	1
	车轴平行度(轴距差)/mm	0	1
轴箱	车轴冲击痕长度/mm	0	1
	同一辆车车轴温差/℃	0	20
	轴箱轴承温度/℃	25	90
	轴箱轴承温升/℃	0	30
弹簧悬挂装置	接地回路单元接地刷磨损量/mm	0	5
	空气弹簧裂纹长度/mm	0	50
	空气弹簧安装面高度/mm	595	593 ~ 597
	空气弹簧上平面距轨面高度/mm	865	863 ~ 867
	同一转向架空气弹簧高度差/mm	0	3
	同一转向架空气弹簧压力差/kPa	0	40
	高度阀水平杆及高度调节阀杆 两固定点高度差/mm	0	10
	提吊销与转臂止挡距离/mm	35	32 ~ 38
	放过充止挡间隙/mm	25	21 ~ 29
中央牵引 连接装置	牵引橡胶堆橡胶开裂程度/%	0	30
驱动装置	齿轮箱安全吊间隙/mm	20	17 ~ 23
	联轴节温度/℃	25	90
	联轴节温升/℃	0	45
基础制 动装置	闸瓦裂纹长度/mm	0	25
	闸瓦末端材料缺失长度/mm	0	25
	闸瓦表面发亮金属斑痕面积/cm ²	0	10
	制动管路气密性试验压降/kPa	0	10
其他辅 助装置	接近传感器距轨面高度/mm	105	102 ~ 108
	TI 传感器距轨面高度/mm	321	318 ~ 324
	ATC 天线距轨面高度/mm	175	173 ~ 177
	TI 天线距轨面高度/mm	300	290 ~ 310
	清障器底端距轨面高度/mm	117.5	115 ~ 120
	轮缘润滑试验油斑直径/mm	30	25 ~ 35

注:TI—德州仪器;ATC—列车自动控制。

考虑地铁车辆转向架结构组成特点、健康状态影响因素、故障演化规律和专家意见,从健康管理 的角度将其健康状态分为健康、良好、注意、异常和 故障等 5 级。

2.2 计算权重和劣化度值

通过对某线路地铁车辆转向架系统资料的研 究和对已掌握的数据信息的分析,以及参考相关专 家及供应商关于 7 个子系统、37 个健康因子的重要 度评判结果,运用层次分析法获得权重。根据专家 经验对各指标重要度进行两两对比,构造判断矩 阵。以基础制动系统的 4 个指标为例,构造判断矩 阵 A 为:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 8/6 & 8/5 & 8/7 \\ 6/8 & 1 & 6/5 & 6/7 \\ 5/8 & 5/6 & 1 & 5/7 \\ 7/8 & 7/6 & 7/5 & 1 \end{bmatrix}$$

计算出 A 的最大特征值 $\lambda_{\max} = 4$,其对应的特 征向量 $W = [1.23 \quad 0.92 \quad 0.77 \quad 1.08]^T$,求得相 对一致性校验指标 $0.090 \quad 1 < 0.1$ (通过了一致性检 验),故 W 即为权重。同理可得其余 6 个子系统各 个健康因子的权重。由表 1 可得到各部件特征参数 的出厂允许值和极限值,且利用检测设备得到各状 态参数的测量值,根据劣化度计算公式可得地铁车 辆转向架系统各部件特征参数的劣化度。最后通 过式(8)可以得到特征参数的变权权重。

采用层次分析计算地铁车辆转向架系统各子 系统、各健康因子的权重,以及一组观测值劣化度, 根据劣化度进行调整的变权权重,如表 2 所示。

2.3 建立隶属度函数

根据本文 1.2 节内容、文献资料以及地铁车辆 转向架本身数据特点,本文采用岭形隶属度函数计 算健康因子劣化度对应的隶属度值,具体函数表达 式参见文献[4]。

2.4 基于劣化度的健康因子级模糊综合评估

以地铁车辆基础制动系统为例,将表 2 中各评 价指标的相对劣化度代入隶属度函数中,得到各个 评价指标属于各评价集的隶属度,构建健康因子级 模糊判断矩阵(即隶属度矩阵) R_6 和模糊评价集 B_6 。 分别为:

$$R_6 = \begin{bmatrix} 0.060 & 0.940 & 0 & 0 & 0 \\ 0.910 & 0.090 & 0 & 0 & 0 \\ 0.386 & 0.614 & 0 & 0 & 0 \\ 0.638 & 0.362 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

表 2 转向架系统特征向量权重及劣化度
Tab.2 Weights and deterioration degrees of feature vectors in bogie system

子系统		健康因子		观测 值劣 化度	变权 权重
名称	权重/ %	名称	权重/ %		
轮对 系统	18.4	车轮直径磨耗量	12.0	0.04	11.6
		车轮路面平痕长度	9.3	0.12	9.6
		车轮路面凹坑长度	12.0	0.11	12.2
		轮辋翻边量	12.0	0.09	12.1
		同一转向架轮径差	9.3	0.20	10.4
		同一轮对内侧距差	8.0	0.12	8.3
		同一轮对两轮轮重差	5.3	0.03	5.1
		同一转向架两轴轴重差	6.7	0.01	6.2
		车轴平行度(轴距差)	8.0	0.03	7.6
		车轴冲击痕长度	9.3	0.07	9.2
轴箱 系统	16.3	同一辆车车轴温差	8.0	0.03	7.6
		轴箱轴承温度	36.8	0.09	34.9
		轴箱轴承温升	42.1	0.17	43.2
悬挂 系统	14.2	接地回路单元接地刷磨损量	21.1	0.19	21.9
		空气弹簧裂纹长度	16.0	0.08	15.6
		空气弹簧安装面高度	10.0	0.23	11.3
		空气弹簧上平面距轨面高度	10.0	0.08	9.7
		同一转向架空气弹簧高度差	14.0	0.15	14.5
		同一转向架空气弹簧压力差	16.0	0.01	14.6
		高度阀水平杆及高度阀调节 杆两固定点高度差	14.0	0.18	14.9
		提吊销与转臂止挡距离	8.0	0.07	7.7
		放过充止挡间隙	12.0	0.08	11.7
中央牵引 连接系统	10.2	牵引橡胶堆橡胶开裂程度	100	0.12	100
驱动 系统	14.3	齿轮箱安全吊间隙	20.0	0.22	22.1
		联轴节温度	35.0	0.13	35.5
		联轴节温升	45.0	0.05	42.4
基础制 动系统	18.4	闸瓦裂纹长度	30.8	0.17	32.6
		闸瓦末端材料缺失长度	23.1	0.04	21.8
		闸瓦表面发亮金属斑痕面积	19.2	0.11	19.4
		制动管路气密性试验压降	26.9	0.08	26.3
其他辅 助系统	8.2	接近传感器距轨面高度	16.7	0.04	15.6
		TI 传感器距轨面高度	16.7	0.07	16.1
		ATC 天线距轨面高度	22.2	0.01	20.3
		TI 天线距轨面高度	19.4	0.11	19.4
		清障器底端距轨面高度	13.9	0.14	14.2
		轮缘润滑试验油斑直径	11.1	0.36	14.4

$$B_6 = W_6^T R_6 = \begin{bmatrix} 0.325 & 7 \\ 0.217 & 5 \\ 0.193 & 6 \\ 0.263 & 3 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 0.060 & 0.940 & 0 & 0 & 0 \\ 0.910 & 0.090 & 0 & 0 & 0 \\ 0.386 & 0.614 & 0 & 0 & 0 \\ 0.638 & 0.362 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} =$$

$[0.460\ 3\ 0.539\ 7\ 0\ 0\ 0]$

式中:

B_6 ——表 2 中所列第 6 个子系统的模糊评价集;

W_6 ——表 2 中所列第 6 个子系统各健康因子的变权权重。

2.5 劣化度的系统级模糊综合评价

健康因子模糊评判对应的评判集是系统级模糊评价的单因素评判矩阵。根据上述方法可得到系统级模糊综合判断矩阵(即隶属度矩阵) R_s 为:

$$R_s = [B_1\ B_2\ B_3\ B_4\ B_5\ B_6\ B_7]^T\ (9)$$

式中:

B_1 — B_7 ——表 2 中第 7 个子系统的模糊评价集。

系统级模糊综合评价集 B_s 为:

$$B_s = W_s^T R_s = [0.449\ 0.544\ 0.007\ 0\ 0]\ (10)$$

式中:

W_s ——各子系统权重向量。

依据最大隶属度原则,可判断车辆转向架系统健康状态为“良好”。从后续的监测结果及维保情况来看,该转向架安全运行周期长,运行过程稳定可靠,任务完成率高,绝大部分试验测试均达标。因此本方法可准确评估地铁车辆转向架系统健康状态实际情况。

3 基于人工神经网络的健康状态评价

利用上述方法对某线路地铁车辆的多个转向架系统进行健康状态评价,得到用于训练神经网络的 128 组样本数据,部分结果如表 3 所示。通过对某线路运营期间地铁车辆转向架系统评价指标统计与地铁车辆转向架系统实际健康状态的分析,基

表 3 人工神经网络样本数据

Tab.3 Artificial neural network sample data								健康模式
序号	u_{11}	u_{12}	...	u_{38}	...	u_{75}	u_{76}	
1	0.04	0.12	...	0.08	...	0.14	0.36	良好
2	0.59	0.31	...	0.94	...	0.51	0.56	注意
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
64	0.36	0.29	...	0.18	...	0.33	0.27	良好
65	0.77	0.81	...	0.88	...	0.92	0.53	异常
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
127	0.89	0.95	...	0.20	...	0.92	0.47	故障
128	0.05	0.15	...	0.03	...	0.23	0.12	健康

于专家经验、文献检索方法及现场调查获得某线路地铁车辆转向架系统健康评估的 32 组样本数据(形式与表 3 相同),将其处理后作为人工神经网络的测试数据。

采用 BP(反向传播)神经网络、支持向量机和随机森林三种模型,对 128 组样本数据进行训练,利用 32 组测试数据评判网络评估结果,结果如图 1 ~ 3 所示。

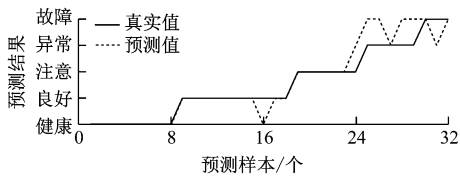


图 1 BP 神经网络预测结果

Fig. 1 BP neural network prediction results

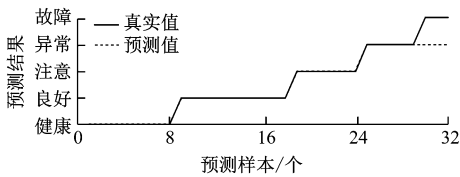


图 2 支持向量机预测结果

Fig. 2 Support vector machine prediction results

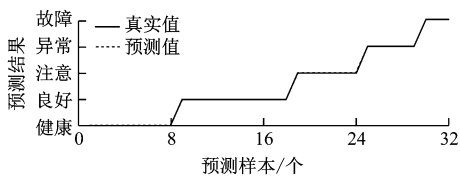


图 3 随机森林预测结果

Fig. 3 Random forest prediction results

由图 1 ~ 3 可知:

- 1) 传统 BP 神经网络的预测结果一般,预测准确率为 78.125%,且错误主要发生在对最差的两种状态——异常和故障的辨别。主要原因可能为该线路地铁运营年限尚不是很久,加上日常维修保养比较好,导致训练集中关于异常和故障两种状态的数据量相对较少,故网络对这两种状态的训练尚有欠缺,最终导致错误率较高。
- 2) 支持向量机对训练集和测试集训练的结果均表现为对前 4 种状态能够完全准确识别,但总将故障状态识别为异常状态,且多次训练均为此结果。具体原因可能为故障类别数据量不足、后两种状态的输入数据分布域接近或模型的分类能力不足。
- 3) 随机森林模型能够完美地识别出 5 种健康状态,对测试集 32 组样本的识别准确率达到了

100%。故此方法相比于前两种模型,更适合地铁车辆转向架系统的健康状态评价。

4 结语

本文构建了地铁车辆转向架系统的健康状态评价体系,依据地铁车辆转向架系统生产技术规格书、检修标准、故障模式以及专家经验建立了反映地铁车辆转向架系统健康状态的评价指标体系,对监测所得的评价指标利用变权模糊综合评价法进行多次地铁车辆转向架系统的健康状态评价获得样本数据,分别输入到 BP 神经网络、支持向量机和随机森林 3 种不同的人工神经网络模型中进行训练,运用测试样本数据测试训练后的神经网络模型评估效果。结果显示,随机森林模型对地铁车辆转向架系统健康状态的识别能力最强,可实现对地铁车辆转向架系统的健康评估。

参考文献

- [1] 周健. 城市轨道交通车辆故障预测与健康管理技术研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2022.
ZHOU Jian. Research on fault prediction and health management technology of urban rail transit vehicles[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2022.
- [2] 杨建军, 刘丰. 城市轨道交通车辆引入 PHM 技术的决策分析[J]. 智慧轨道交通, 2022(2): 24.
YANG Jianjun, LIU Feng. Decision analysis for the introduction of

PHM technology in urban rail transit vehicles[J]. Smart Rail Transit, 2022(2): 24.

- [3] 李藕. 复杂装备健康管理及故障预测模型[D]. 西安: 西安工业大学, 2021.
LI Ou. Complex equipment health management and fault prediction model[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2021.
- [4] 石卫师, 商晖, 赖治平, 等. 基于劣化度的轨道交通道岔转辙机健康状态评估[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(2): 16.
SHI Weishi, SHANG Hui, LAI Zhiping, et al. Health status assessment of rail transit turnout switch machine based on deterioration degree[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(2): 16.
- [5] 林泽力, 郑国, 莫固良, 等. 基于模糊综合评判的飞机液压泵故障预测[J]. 振动、测试与诊断, 2016, 36(4): 746.
LIN Zeli, ZHENG Guo, MO Guliang, et al. Fault prediction of aircraft hydraulic pump based on fuzzy comprehensive evaluation[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2016, 36(4): 746.
- [6] 秦宏波. 基于层次分析法的电机系统能效评估方法研究与应用[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(2): 72.
QIN Hongbo. Analysis of energy efficiency assessment of motor systems and application based on analytic hierarchy process method[J]. Electric Machines & Control Application, 2022, 49(2): 72.

· 收稿日期: 2023-06-18 修回日期: 2023-09-20 出版日期: 2024-02-10
Received: 2023-06-18 Revised: 2023-09-20 Published: 2024-02-10
· 第一作者: 张磊, 硕士研究生, 2133350@tongji.edu.cn
通信作者: 韩斌, 教授, hanbin@tongji.edu.cn
· ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 178 页)

宜切换至 1 000 Hz。加装滤波器后, 加速段声压级降低了 11.38%, 制动段声压级降低了 6.72%, 加装滤波器对加速段和制动段的降噪效果非常显著。

参考文献

- [1] 赵跃英, 盛胜我, 刘海生, 等. 磁悬浮列车行驶噪声的测试与分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2005, 33(6): 768.
ZHAO Yueying, SHENG Shengwo, LIU Haisheng, et al. Measurement and analysis of noise from running maglev systems[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2005, 33(6): 768.
- [2] 段传波, 张辉, 朱妍妍, 等. 中低速磁悬浮交通噪声研究[J]. 应用声学, 2010, 29(3): 184.
DUAN Chuanbo, ZHANG Hui, ZHU Yanyan, et al. Noises of middle-low-speed maglev vehicles[J]. Applied Acoustics, 2010, 29(3): 184.
- [3] 梁燕, 俞英杰, 葛剑敏, 等. 磁悬浮车辆噪声源及噪声特性分析[C]//中国声学学会. 2007 年全国环境声学学术讨论会论文汇编. 宁波: 中国声学学会, 2007: 1.

LIANG Yan, YU Yingjie, GE Jianmin, et al. Analysis on noise sources and its noise properties of maglev vehicles[C]// Acoustical Society of China. Proceedings of the 2007 National Symposium on Environmental Acoustics. Ningbo: Acoustical Society of China, 2007: 1.

- [4] 李帅, 刘岩, 杨冰, 等. 牵引电机传动系统噪声及振动分析[J]. 噪声与振动控制, 2011, 31(3): 149.
LI Shuai, LIU Yan, YANG Bing, et al. Noise and vibration analysis for drive system of a traction motor[J]. Noise and Vibration Control, 2011, 31(3): 149.
- [5] 丁杰, 王永胜, 臧晓斌, 等. 地铁车辆牵引电机装车噪声性能测试及分析[J]. 电力机车与城轨车辆, 2020, 43(1): 57.
DING Jie, WANG Yongsheng, ZANG Xiaobin, et al. Test and analysis of noise performance of traction motor in metro vehicle[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2020, 43(1): 57.

· 收稿日期: 2021-07-20 修回日期: 2021-09-20 出版日期: 2024-02-10
Received: 2021-07-20 Revised: 2021-09-20 Published: 2024-02-10
· 通信作者: 李颖华, 高级工程师, liyinghua22@126.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license