

基于劣化度的轨道交通道岔转辙机健康状态评估^{*}石卫师 商 晖^{**} 赖治平 谭文举

(南宁轨道交通集团有限责任公司, 530029, 南宁//第一作者, 高级工程师)

摘 要 为准确反映道岔转辙机设备的运行状态, 为设备维护人员开展设备状态维修提供判断依据, 基于现场监测数据及维护经验, 引入劣化度概念, 结合道岔转辙机设备的特点, 建立基于劣化度的道岔转辙机特征参数。基于层次分析法和熵权法建立特征参数的权重向量, 采用岭形分布隶属度函数建立劣化度模糊判断矩阵, 进行道岔转辙机整体健康状态模糊综合评估, 并根据最大隶属度确定道岔转辙机的健康状态。

关键词 轨道交通; 道岔转辙机; 健康状态; 劣化度

中图分类号 U213.6⁺¹

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.02.004

Health Status Assessment of Rail Transit Turnout Switch Machine Based on Deterioration Degree

SHI Weishi, SHANG Hui, LAI Zhiping, TAN Wenju

Abstract To accurately reflect the operation status of turnout switch machine, judgment basis is provided for equipment maintenance personnel to carry out equipment status maintenance. Based on the field monitoring data and on-site maintenance experience, the concept of deterioration degree is introduced, and with the characteristics of turnout switch machine, the turnout switch machine feature parameters based on deterioration degree are established. Weight vectors of feature parameters are established based on AHP (analytic hierarchy process) and EWM (entropy weight method), and the fuzzy judgment matrix of deterioration degree is established using ridge-shape distribution membership function. Then the fuzzy comprehensive evaluation of the turnout switch machine overall health status is carried out, and the status is determined according to the maximum membership degree.

Key words rail transit; turnout switch machine; health status; deterioration degree

Author's address Nanning Rail Transit Group Co., Ltd.,

530029, Nanning, China

高科技、高性能、高效率的 FAO(全自动运行)系统更需高智能的设备状态健康管理系统与之配套。信号系统是 FAO 系统的核心, 而道岔是信号系统的关键组成部分, 其能使列车由一条轨道线路转至另一条轨道线路运行。道岔转辙机故障严重影响列车运行效率及行车安全, 特别是在 FAO 情况下, 其抢修流程更加复杂, 抢修时间亦更长。因此, 道岔转辙机的健康状态评估至关重要, 是实施道岔转辙机状态维修的重要判断依据。健康状态是指在规定的条件下和规定的时间内能够保持一定可靠性和维修性水平的能力, 是在使用期内可靠度和维修度保持在一定范围的置信水平^[1]。

文献[2]提出一种基于 HMM(隐马尔科夫)模型的道岔转辙机故障诊断方法, 即采用基于 Fisher 准则函数和主成分分析方法进行特征提取, 建立不同故障模式下的 HMM 模型并进行故障诊断。文献[3]根据定性趋势分析算法原理, 设置固定时间窗对动作电流数据进行平均分割, 将每个趋势片段识别为上升、下降或不变, 建立故障诊断规则知识库。文献[4]将道岔转辙机功率曲线分为 3 个动作过程, 对每个过程分别提取道岔功率曲线相应的特征参数; 设计了基于 SVDD(支持向量描述)的道岔转辙机故障检测算法和健康评估算法。文献[5]基于道岔转辙机典型故障下的动作功率曲线变化规律, 通过 Fisher 准则对相应故障模式所对应的特征向量进行选择, 优化分辨系数并计算待测样本与各故障模式特征间的灰关联度, 将满足门限要求的最大灰关联度所对应的故障模式作为待测样本的故障诊断结果。

上述研究推动了人工智能理论和方法在解决

^{*} 广西重点研发计划项目(桂科 AB22035008)

^{**} 通信作者

道岔转辙机异常检测和健康管理方面应用,但也存在以下不足:① 上述研究均基于道岔转辙机功率及电流参数进行分析,但该参数仅能代表部分道岔的宏观状态信息;② 大部分研究重点侧重于故障诊断,未对道岔转辙机设备健康状态进行相应的评估,不利于现场运营维护人员的有效管理。

针对上述问题,本文提出了一种基于劣化度的道岔转辙机健康状态评估方法,结合现场维护管理经验 and 设备特点,研究确定道岔转辙机特征参数和劣化度的计算方式。基于层次分析法和熵权法的综合赋权法确定道岔转辙机评价指标的权重,采用岭形分布隶属度函数进行道岔转辙机整体健康状态模糊综合评估,并基于南宁轨道交通2号线道岔转辙机的实际运行情况进行了模型验证。

1 劣化度的概念及计算方法

设备的健康状态可由一系列特征参数表示。特征参数为时间的函数,设为 $X(t) = X(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n)$ 。设备劣化度是指设备状态偏离了良好状态向极限技术状态发展的程度,即:

$$L = L(l_1, l_2, \dots, l_i, \dots, l_n) \quad (1)$$

式中:

l_i ——设备第 i 个特征参数 x_i 的劣化度。

由于设备的部分特征参数可以测量,部分特征参数无法测量,且设备的劣化与多个因素相关,因此,劣化度的计算需根据不同情况选择不同的计算方法。

现介绍三种常用方法^[6]。

1.1 基于特征参数测量的劣化度计算方法

基于特征参数测量的劣化度 l_i 计算公式为:

$$l_i = (|x_i - y_i| / |z_i - y_i|)^k \quad (2)$$

式中:

y_i ——第 i 个特征参数 x_i 的标准参数;

z_i ——第 i 个特征参数 x_i 的极限参数;

k ——指数参数,反映 x_i 的影响程度。

1.2 基于专家评价的劣化度计算方法

由于技术等方面原因,部分特征参数无法测量,需根据现场情况和专家经验进行评价。

$$l_i = \frac{x_{i1}\rho_{i1} + x_{i2}\rho_{i2} + x_{i3}\rho_{i3}}{\rho_{i1} + \rho_{i2} + \rho_{i3}} \quad (3)$$

式中:

x_{i1}, x_{i2}, x_{i3} ——技术人员、维保人员及使用人员对第 i 个特征参数的评价,取值范围为 $[0, 1]$, 0

代表健康,1 代表完全劣化;

$\rho_{i1}, \rho_{i2}, \rho_{i3}$ ——技术人员、维保人员及使用人员对第 i 个特征参数评价的权重。

1.3 基于设备使用时间的劣化度计算方法

结合运营维保大数据,部分部件属于易损消耗类,需定期更换新部件,故可认为该部件劣化度与时间存在线性比例关系。

$$l_i = (t_i/t)^{k_0} \quad (4)$$

式中:

t_i ——部件现场使用时间;

t ——根据运营维保经验得到的部件更换周期;

k_0 ——故障影响指数。

2 基于综合赋权法的特征参数权重

本文采用综合赋权法确定特征参数的权重,其主要思路是采用层次分析法确定评价指标的主观权重,采用熵权法确定评价指标的客观权重,对两种权重进行综合赋权后将其作为该指标的最终权重。

2.1 层次分析法

层次分析法的主要思想是将复杂问题分解为若干层次和若干因素,对两两指标之间的重要程度作出比较判断,建立判断矩阵并计算该矩阵的最大特征值与对应的特征向量,得出不同方案下特征参数重要程度的权重,为最佳方案的选择提供依据^[7]。具体步骤如下:

步骤1:构造判断矩阵。根据系统中各劣化度的重要程度 a_{ij} (其取值见表1)来构造判断矩阵 A 。

表1 基于层次分析法系统劣化度的重要程度
Tab.1 Importance degree of system deterioration degree based on AHP

a_{ij}	含义
1	i 指标与 j 指标同等重要
3	i 指标比 j 指标稍微重要
5	i 指标比 j 指标明显重要
7	i 指标比 j 指标强烈重要
9	i 指标比 j 指标极端重要
2, 4, 6, 8	介入上述2个相邻判断的中值

由表1得到判断矩阵 A :

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nm} \end{bmatrix} \quad (5)$$

步骤2:计算重要性排序。通过 A 可求出其最

大特征根 λ_{\max} 所对应的特征向量 \boldsymbol{w} 。经量纲一化处理,可得到各评价指标的重要性排序,即各指标权重。

步骤 3:一致性检验。一致性检验是为了检查指标权重分配是否合理,其计算公式为:

$$R_C = I_C / R_1 \quad (6)$$

$$I_C = (\lambda_{\max} - m) / (m - 1) \quad (7)$$

式中:

R_C ——判断矩阵的随机一致性比率;

I_C ——判断矩阵的一般一致性标准;

R_1 ——判断矩阵的平均随机一致性标准;

m ——判断矩阵的阶数。

1~9 阶判断矩阵的 R_1 参见表 2。

表 2 判断矩阵的 R_1 取值

Tab.2 R_1 value of judgment matrix

m	R_1	m	R_1
3	0.52	7	1.36
4	0.89	8	1.41
5	1.12	9	1.46
6	1.26		

当 \boldsymbol{A} 中的 $R_C < 0.1$ 或 $\lambda_{\max} = n$ 、 $I_C = 0$ 时, \boldsymbol{A} 具有满意的一致性;否则需调整 \boldsymbol{A} 中的元素使其具有满意的一致性。

2.2 熵权法

熵值是系统无序程度或混乱程度的度量。如果某个指标的信息熵越小,表明该指标的变异程度越大,提供的信息量越大,在综合评价中所起的作用越大,则其权重亦应越大。反之,某指标的信息熵越大,就表明其指标值的变异程度越小,提供的信息量越小,在综合评价中所起的作用越小,则其权重也应越小^[8]。具体步骤如下:

步骤 1:标准化决策矩阵。设系统的健康状态有 m 个评价等级,每个评价等级有 n 个指标 x_{ij} ,则决策矩阵 \boldsymbol{X} 为:

$$\boldsymbol{X} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix} \quad (8)$$

对 \boldsymbol{X} 进行标准化,得到标准化决策矩阵 $\boldsymbol{R} = (r_{ij})_{m \times n}$,其中:

$$r_{ij} = \frac{\max_j (x_{ij}) - x_{ij}}{\max_j (x_{ij}) - \min_j (x_{ij})} \quad (9)$$

步骤 2:定义熵。将第 i 个指标的熵 h_i 定义为:

$$h_i = -\frac{1}{\ln n} \sum_{j=1}^n \left(\frac{r_{ij}}{\sum_{j=1}^n r_{ij}} \right) \ln \left(\frac{r_{ij}}{\sum_{j=1}^n r_{ij}} \right) \quad (10)$$

步骤 3:定义熵权。将第 i 个指标的熵权 e_i 定义为:

$$e_i = (1 - h_i) / \left(m - \sum_{i=1}^m h_i \right) \quad (11)$$

2.3 综合赋权法

主观赋权法是一种定性分析方法,它基于决策者主观偏好或经验给出指标权重,解释性较强,但客观性较差。客观赋权法是根据原始数据之间的关系通过一定的数学方法来确定权重,是一种定量分析方法。该方法确定的权重系数虽然大多数情况下客观性较强,但有时会出现权重系数不合理的现象,解释性较差。综合赋权法克服了单一赋权法的缺点,使得权重的确定更为合理^[9]。具体步骤如下:

步骤 1:基于层次分析法获得权重向量 \boldsymbol{w} 。

$$\boldsymbol{w} = [w_1 \quad w_2 \quad \cdots \quad w_n] \quad (12)$$

步骤 2:基于熵权法获得一组熵权权重 \boldsymbol{E} 。

步骤 3:基于层次分析法得到权重向量 $\boldsymbol{\eta}_j$ 。

$$\boldsymbol{\eta}_j = (e_j w_j) / \sum_{j=1}^n e_j w_j \quad (13)$$

3 道岔转辙机状态特征参数

道岔转辙机由电路控制部分、动力部分、转换部分及表示部分组成。其中,电路控制部分主要由继电器及连接线缆组成。对整个电路控制影响较大、劣化较快的继电器有 1DQJ(道岔一启动继电器)、1DQJF(道岔一启动复示继电器)、2DQJ(道岔二启动继电器)和 DBQ(断相保护器),故可将继电器的接点间隙、接点压力、托片间隙、线圈电阻、充磁值、释放值、工作值、转极值等的测量值作为状态特征参数。

动力部分由电机、油泵组及联轴器组成。其中,电机可由线圈电阻、绝缘值、功率、转速等的测量值作为状态特征参数;油泵组及联轴器需人员现场观察设备的渗油度、表面氧化程度、腐蚀程度及磨损程度等确定设备状态。

转换部分由油缸组、动作杆件组、与尖轨及基本轨连接的动作杆件等组成,故可使用动作电压、溢流压力、动作压力及转换力等测量参数作为状态

特征参数。同时,需设备维护人员基于现场观察并结合道岔动作功率曲线、动作电流曲线等,通过杆件磨损程度、动作顺畅度、功率及电流曲线变化度等确定设备状态。

表示部分由接点组、表示杆件组、与尖轨连接的表示杆件等组成,需人员现场观察动静接点组磨损程度、接点组压力、氧化程度、杆件磨损程度及动作顺畅度等确定设备状态。对于动作次数频繁的转辙机组,如城市轨道交通线路的终端折返道岔,需基于设备使用时间确定劣化度。

道岔转辙机特征参数见表3。

表3 道岔转辙机特征参数表

Tab.3 Feature parameters of turnout switch machine			
名称	特征参数	名称	特征参数
电路控制部分	接点间隙 A_1	动力部分	线圈电阻 B_1
	接点压力 A_2		绝缘值 B_2
	托片间隙 A_3		功率 B_3
	线圈电阻 A_4		转速 B_4
	充磁值 A_5		渗油度 B_5
	释放值 A_6		氧化度 B_6
	工作值 A_7		腐蚀度 B_7
	反向值 A_8		磨损度 B_8
	使用时间 A_9		
动作部分	动作电压 C_1	表示部分	接点磨损度 D_1
	溢流压力 C_2		接点氧化度 D_2
	动作压力 C_3		杆件磨损度 D_3
	转换力 C_4		动作顺畅度 D_4
	磨损度 C_5		接点压力 D_5
	动作顺畅度 C_6		使用时间 D_6
	曲线变化度 C_7		

4 道岔转辙机健康状态评估模型

基于劣化度的设备健康状态评估,属于模糊综合评估方法。当劣化度趋于0时,说明设备状态属于健康状态;当劣化度趋于1时,说明设备状态属于劣化极限状态。同时,道岔转辙机的整体健康状态由各个部件的健康状态决定,而各部件的健康状态由各子部件的健康状态决定。道岔转辙机健康状态评估模型步骤为:

步骤1:计算道岔转辙机状态的劣化度。根据特征参数的测量值及现场维保经验等,不同特征参数选择不同的计算方法,如表4所示。

步骤2:建立道岔转辙机健康状态评价集。根据健康状态等级划分原则,从健康管理角度可将转辙机技术状态划分为健康、良好、注意、恶化和疾病

表4 道岔转辙机劣化度计算

Tab.4 Calculation of turnout switch machine deterioration degree			
名称	特征参数	劣化度	计算方法
电路控制部分	A_1-A_8	$l_{1j}(j=1\sim8)$	层次分析法
	A_9	$l_{1j}(j=9)$	综合赋权法
动力部分	B_1-B_4	$l_{2j}(j=1\sim4)$	层次分析法
	B_5-B_8	$l_{2j}(j=5\sim8)$	熵权法
动作部分	C_1-C_4	$l_{3j}(j=1\sim4)$	层次分析法
	C_5-C_7	$l_{3j}(j=5\sim7)$	熵权法
	D_1-D_4	$l_{4j}(j=1\sim4)$	熵权法
表示部分	D_5	$l_{4j}(j=5)$	层次分析法
	D_6	$l_{4j}(j=6)$	综合赋权法

等5级。其中,“健康”状态:所有指标数据均在正常值范围之内,且处于最优值附近且远离阈值,可以采取正常监控及延长维护周期的措施。“良好”状态:所有指标数据均在正常值范围之内,且部分参数在其取值范围内波动,但系统无劣化趋势,仍能正常运行,系统可按计划进行监测和检修。“注意”状态:所有指标数据均在正常值范围之内,且部分参数偏离标准值范围较大,达到规程中的警惕值,但系统仍能正常运行,性能无明显的劣化趋势,此时可以采取加强设备监控及缩短维护周期的措施。“恶化”状态:所有指标数据均在正常值范围之内,但部分参数达到阈值附近,系统运行状态欠佳,容易发生故障,劣化趋势较明显,需尽快维护。“疾病”状态:大部分参数达到或接近阈值,且多个参数甚至超过阈值,要求立即进行维护。

步骤3:建立转辙机部件及其子部件特征参数的重要度。基于综合赋权法确定特征参数权重向量 $\eta_i = [\eta_{i1} \quad \eta_{i2} \quad \cdots \quad \eta_{im}]$ 。

步骤4:建立道岔转辙机子部件的劣化度模糊评价矩阵。常用的模糊隶属度计算有三角形分布、梯形分布、岭形分布等形式。相较梯形分布,岭形分布减小了棱角且其计算误差隶属度较高。相较三角形分布,岭形分布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,岭形分布排除了更多隶属度低的信息。基于上述分析,本文选取岭形分布计算各状态空间的隶属度矩阵^[10-11]。

$\omega_{\text{I}}(l_i) =$

$$\begin{cases} 1, & l_i = 0 \\ 0.5 - 0.5 \sin[\pi(l_i - 0.1)/0.2], & 0 < l_i \leq 0.2 \\ 0, & l_i > 0.2 \end{cases} \quad (14)$$

$\omega_{\text{II}}(l_i) =$

$$\begin{cases} 0, & l_i = 0 \\ 0.5 + 0.5 \sin[\pi(l_i - 0.1)/0.2], & 0 < l_i \leq 0.2 \\ 0.5 - 0.5 \sin[\pi(l_i - 0.1)/0.3], & 0.2 < l_i \leq 0.5 \\ 0, & l_i > 0.5 \end{cases} \quad (15)$$

$\omega_{\text{III}}(l_i) =$

$$\begin{cases} 0, & l_i \leq 0.2 \\ 0.5 + 0.5 \sin[\pi(l_i - 0.35)/0.2], & 0.2 < l_i \leq 0.5 \\ 0.5 - 0.5 \sin[\pi(l_i - 0.65)/0.3], & 0.5 < l_i \leq 0.8 \\ 0, & l_i > 0.8 \end{cases} \quad (16)$$

$\omega_{\text{IV}}(l_i) =$

$$\begin{cases} 0, & l_i \leq 0.5 \\ 0.5 + 0.5 \sin[\pi(l_i - 0.65)/0.3], & 0.5 < l_i \leq 0.8 \\ 0.5 - 0.5 \sin[\pi(l_i - 0.90)/0.2], & 0.8 < l_i < 1.0 \\ 0, & l_i = 1.0 \end{cases} \quad (17)$$

$\omega_{\text{V}}(l_i) =$

$$\begin{cases} 0, & l_i \leq 0.8 \\ 0.5 + 0.5 \sin[\pi(l_i - 0.9)/0.2], & 0.8 < l_i < 1.0 \\ 1, & l_i = 1.0 \end{cases} \quad (18)$$

基于式(14)一式(18)的劣化度模糊隶属度函数,如图 1 所示。

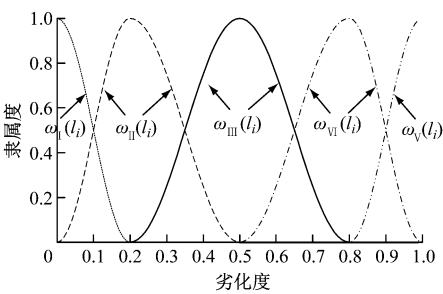


图 1 岭形分布隶属度函数

Fig. 1 Ridge-shape distribution membership function

根据图 1 可知,岭形分布隶属度函数具有主值区间宽、过渡带平缓的特点,能够较好地反映道岔劣化度状态空间的模糊关系。

根据式(14)一式(18)可得以劣化度为评价标准的模糊评判矩阵为:

$\omega_i =$

$$\begin{bmatrix} \omega_{\text{I}}(l_{i1}) & \omega_{\text{II}}(l_{i1}) & \omega_{\text{III}}(l_{i1}) & \omega_{\text{IV}}(l_{i1}) & \omega_{\text{V}}(l_{i1}) \\ \omega_{\text{I}}(l_{i2}) & \omega_{\text{II}}(l_{i2}) & \omega_{\text{III}}(l_{i2}) & \omega_{\text{IV}}(l_{i2}) & \omega_{\text{V}}(l_{i2}) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \omega_{\text{I}}(l_{im}) & \omega_{\text{II}}(l_{im}) & \omega_{\text{III}}(l_{im}) & \omega_{\text{IV}}(l_{im}) & \omega_{\text{V}}(l_{im}) \end{bmatrix} \quad (19)$$

步骤 5:计算道岔转辙机子部件的健康状态隶属度向量 h_i 。

$h_i = \eta_i \omega_i = [h_{i\text{I}} \quad h_{i\text{II}} \quad h_{i\text{III}} \quad h_{i\text{IV}} \quad h_{i\text{V}}] \quad (20)$

步骤 6:计算道岔转辙机整体健康状态隶属度向量 h 。

$h = \eta h_i = [h_{\text{I}} \quad h_{\text{II}} \quad h_{\text{III}} \quad h_{\text{IV}} \quad h_{\text{V}}] \quad (21)$

步骤 7:根据最大隶属度原则确定道岔转辙机的健康状态。

5 南宁轨道交通 2 号线道岔转辙机实例分析

本文以南宁轨道交通 2 号线(以下简称“2 号线”)某道岔转辙机为例,通过现场测量、厂家资料及现场经验确定各特征参数的额定值及极限阈值,运用劣化度计算公式,得出特征参数观测值的劣化度,如表 5 所示。

表 5 2 号线某折返道岔转辙机特征参数劣化度
Tab. 5 Deterioration degree of feature parameters of a Line 2 turnout switch machine

名称	特征参数	取值	名称	特征参数	取值
电路控制部分	A_1	0.05	动力部分	B_1	0.06
	A_2	0.08		B_2	0.01
	A_3	0.06		B_3	0.08
	A_4	0.08		B_4	0.09
	A_5	0.15		B_5	0.06
	A_6	0.18		B_6	0.20
	A_7	0.19		B_7	0.15
	A_8	0.12		B_8	0.18
	A_9	0.28			
动作部分	C_1	0.08	表示部分	D_1	0.21
	C_2	0.09		D_2	0.18
	C_3	0.06		D_3	0.24
	C_4	0.13		D_4	0.18
	C_5	0.21		D_5	0.14
	C_6	0.18		D_6	0.28
	C_7	0.16			

根据基于专家经验的层次分析法确定权重判

断矩阵,分别为:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_{\text{ahp}} &= \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 1/4 & 1/4 & 1/4 & 1/4 & 1/4 & 1/3 \\ 1/2 & 1 & 3 & 1/4 & 1/4 & 1/4 & 1/4 & 1/4 & 1/3 \\ 1/3 & 1/3 & 1 & 1/4 & 1/4 & 1/4 & 1/4 & 1/4 & 1/3 \\ 4 & 4 & 4 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1/2 \\ 4 & 4 & 4 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1/2 \\ 4 & 4 & 4 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1/2 \\ 4 & 4 & 4 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1/2 \\ 4 & 4 & 4 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1/2 \\ 3 & 3 & 3 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 1 \end{bmatrix} \\ \mathbf{B}_{\text{ahp}} &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1/3 & 3 & 3 & 3 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1/3 & 3 & 3 & 3 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1/3 & 3 & 3 & 3 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1/3 & 3 & 3 & 3 \\ 3 & 3 & 3 & 3 & 1 & 4 & 4 & 4 \\ 1/3 & 1/3 & 1/3 & 1/3 & 1/4 & 1 & 1 & 1 \\ 1/3 & 1/3 & 1/3 & 1/3 & 1/4 & 1 & 1 & 1 \\ 1/3 & 1/3 & 1/3 & 1/3 & 1/4 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \\ \mathbf{C}_{\text{ahp}} &= \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 1/2 & 1/2 & 2 & 1/2 & 1/2 \\ 2 & 1 & 1 & 1 & 2 & 1/2 & 1/2 \\ 2 & 1 & 1 & 1 & 2 & 1/2 & 1/2 \\ 2 & 1 & 1 & 1 & 3 & 1 & 1 \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 & 1/3 & 1 & 1/3 & 1/3 \\ 2 & 2 & 2 & 1 & 3 & 1 & 1 \\ 2 & 2 & 2 & 1 & 3 & 1 & 1 \end{bmatrix} \\ \mathbf{D}_{\text{ahp}} &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 2 & 1/2 & 1 & 2 \\ 1 & 1 & 2 & 1/2 & 1 & 2 \\ 1/2 & 1/2 & 1 & 1 & 1/2 & 2 \\ 2 & 2 & 1 & 1 & 1/2 & 2 \\ 1 & 1 & 2 & 2 & 1 & 2 \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 & 1/2 & 1/2 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

分别计算出矩阵的最大特征根,并根据式(6)一式(7)和表2进行矩阵一致性验证。然后求得特征参数的权重分别为: $\mathbf{w}_a = [0.049\ 4\ 0.042\ 3\ 0.031\ 7\ 0.134\ 6\ 0.134\ 6\ 0.134\ 6\ 0.134\ 6\ 0.134\ 6\ 0.203\ 8]$, $\mathbf{w}_b = [0.134\ 6\ 0.134\ 6\ 0.134\ 6\ 0.134\ 6\ 0.311\ 1\ 0.050\ 2\ 0.050\ 2\ 0.050\ 2]$, $\mathbf{w}_c = [0.089\ 3\ 0.132\ 5\ 0.132\ 5\ 0.170\ 1\ 0.060\ 8\ 0.207\ 4\ 0.207\ 4]$, $\mathbf{w}_d = [0.175\ 7\ 0.175\ 7\ 0.126\ 5\ 0.210\ 2\ 0.225\ 7\ 0.086\ 2]$ 。

基于表5和式(13)一式(17)分别求得以劣化

度为评价标准的模糊评判矩阵 $\omega_a, \omega_b, \omega_c, \omega_d$,以此作为熵权法的决策矩阵,分别求得熵权权重为: $\mathbf{e}_a = [0.112\ 5\ 0.090\ 9\ 0.103\ 8\ 0.090\ 9\ 0.112\ 5\ 0.140\ 9\ 0.148\ 2\ 0.090\ 9\ 0.109\ 4]$, $\mathbf{e}_b = [0.110\ 5\ 0.157\ 8\ 0.096\ 8\ 0.093\ 2\ 0.110\ 5\ 0.161\ 5\ 0.119\ 7\ 0.1500]$, $\mathbf{e}_c = [0.114\ 9\ 0.110\ 6\ 0.131\ 1\ 0.121\ 9\ 0.189\ 4\ 0.178\ 0\ 0.154\ 2]$, $\mathbf{e}_d = [0.192\ 3\ 0.180\ 7\ 0.173\ 0\ 0.180\ 7\ 0.133\ 1\ 0.140\ 3]$ 。

基于综合赋权法计算得到特征参数的权重向量为: $\eta_a = [0.048\ 9\ 0.033\ 9\ 0.029\ 0\ 0.107\ 9\ 0.133\ 4\ 0.167\ 1\ 0.175\ 7\ 0.107\ 9\ 0.196\ 4]$, $\eta_b = [0.126\ 3\ 0.180\ 4\ 0.110\ 7\ 0.106\ 6\ 0.292\ 1\ 0.068\ 9\ 0.051\ 1\ 0.064\ 0]$, $\eta_c = [0.071\ 6\ 0.102\ 1\ 0.121\ 1\ 0.144\ 6\ 0.080\ 3\ 0.257\ 4\ 0.222\ 9]$, $\eta_d = [0.201\ 7\ 0.189\ 5\ 0.130\ 7\ 0.226\ 6\ 0.179\ 3\ 0.072\ 2]$ 。

计算道岔转辙机子部件的健康状态隶属度向量为: $\mathbf{h}_a = \eta_a \omega_a = [0.219\ 4\ 0.748\ 1\ 0.032\ 5\ 0\ 0]$, $\mathbf{h}_b = \eta_b \omega_b = [0.654\ 6\ 0.345\ 4\ 0\ 0\ 0]$, $\mathbf{h}_c = \eta_c \omega_c = [0.269\ 1\ 0.730\ 7\ 0.000\ 2\ 0\ 0]$, $\mathbf{h}_d = \eta_d \omega_d = [0.047\ 1\ 0.934\ 7\ 0.018\ 1\ 0\ 0]$ 。

由于道岔转辙机的4个组成部分都是完成道岔转换必不可少的,每个部分的功能均不可被其他部分替代,故可设这4个组成部分的权重均为0.25。通过计算得到道岔转辙机整体健康状态隶属度向量 $\mathbf{h} = [h_a\ h_b\ h_c\ h_d] = [0.25\ 0.25\ 0.25\ 0.25]^T = [0.297\ 6\ 0.689\ 7\ 0.012\ 7\ 0\ 0]^T$ 。由此可以得到该道岔转辙机隶属于健康、良好、注意、恶化和疾病的程度分别为0.297 6、0.689 7、0.012 7、0和0,依据隶属度最大原则可判断该道岔转辙机处于良好状态。

6 道岔转辙机健康状态评估模型的验证

本文以2号线中动作次数较为频繁的终点站道岔转辙机为例,基于综上建立的道岔转辙机健康状态评估模型,对其开展模型的现场应用验证。

2号线两侧终点站设置的道岔转辙机共计8组,如表6所示。其中,动作较为频繁的道岔转辙机有5组,月均动作约万次,截至目前累计动作约30万次;有3组道岔为站前备用折返道岔或固定开通位置道岔,日常动作次数较少,平均每月动作仅约百次。

基于本文建立的道岔转辙机健康状态评估模型,

确定了各道岔转辙机的评价指标及参数,获得了相应的道岔转辙机整体健康状态隶属度,如表 7 所示。

表 6 2 号线折返站道岔动作统计表
Tab.6 Statistics of Line 2 turn-back station turnout action

车站名称	道岔型号	属性	月均动作次数/次	累计动作次数/次
玉洞站	P2110	固定开通位置	112	4 128
	P2106	每次折返均动作	9 863	305 068
	P2108	每次折返均动作	9 863	305 068
西津站	P3801	每次折返均动作	9 863	305 068
	P3803	每次折返均动作	9 863	305 068
	P3805	每次折返均动作	9 863	305 068
	P3802	站前备用折返	112	4 128
	P3804	站前备用折返	112	4 128

表 7 2 号线折返站道岔转辙机健康评估
Tab.7 Health assessment of Line 2 turn-back station turnout switch machine

道岔编号	健康状态	状态描述
P2110	良好	开通方向固定,列车折返时不需转换;长期开通单方向,另一方向的转换力轻微增大
P2106	健康	该处道岔动作次数较多,但评估前两个月更换全新设备且无问题
P2108	注意	油箱底部有渗油,动作转换力不足,更换全新油泵组后恢复
P3801	良好	转换过程有轻微的“跳板”现象,原因为道岔尖轨有变形现象
P3803	良好	转换过程有轻微的“跳板”现象,原因为道岔尖轨有变形现象
P3805	良好	转换过程较为顺畅,锁闭阶段动作稍微迟缓,动作转换力轻微增大
P3802	健康	动作次数较少,无问题
P3804	健康	动作次数较少,无问题

由表 7 可见,基于本文建立的道岔转辙机健康状态评估模型,将 P2106、P3802、P3804 道岔转辙机的健康状态评估为“健康”状态,经专家现场检查确认,3 组道岔符合相关技术要求,未发现影响使用及安全问题;将 P2110、P3801、P3803、P3805 道岔转辙机的健康状态评估为“良好”状态,经专家现场检查确认,4 组道岔存在影响程度较小的质量问题,且相关问题不影响设备功能及行车安全,对其进行小范围调整后恢复“健康”状态;将 P2108 道岔转辙机的健康状态评估为“注意”状态,经专家现场检查确认,该组道岔转辙机需更换全新部件方可恢复至“健康”状态,存在较大的安全隐患。

将基于道岔转辙机健康状态评估模型评估出的道岔健康状态,与经专家现场检查得到的道岔问题进行对比,发现本文建立的道岔转辙机健康状态评估模型能够较好地反映现场道岔转辙机的运行质量状态。

7 结语

道岔转辙机是信号系统核心关键组成设备,确保其处于“健康”状态对保障行车安全和乘客出行安全至关重要。本文结合 2 号线道岔转辙机维管理经验,建立了道岔转辙机健康状态评估模型,并开展了实例分析和模型应用验证。试验表明,本文建立的道岔转辙机健康状态评估模型能够较好地反映道岔转辙机的质量状态,可为其他城市轨道交通线路道岔转辙机健康状态的评估提供技术参考。

参考文献

[1] 马海英,周林,王亮. 基于劣化度的装备健康状态评估模型[J]. 火力与指挥控制, 2014, 39(10): 66.
MA Haiying, ZHOU Lin, WANG Liang. Research on the model of equipment health state evaluation based on deterioration degree[J]. Fire Control & Command Control, 2014, 39(10): 66.

[2] 许庆阳,刘中田,赵会兵. 基于隐马尔科夫模型的道岔故障诊断方法[J]. 铁道学报, 2018, 40(8): 98.
XU Qingyang, LIU Zhongtian, ZHAO Huibing. Method of turnout fault diagnosis based on hidden Markov model[J]. Journal of the China Railway Society, 2018, 40(8): 98.

[3] 胡锦添,蔡俊涛,张滔. 基于 QTA 的道岔转辙机故障诊断研究与应用[J]. 机电工程技术, 2018, 47(5): 13.
HU Jintian, CAI Juntao, ZHANG Tao. Research and application of fault diagnosis of switch machine based on QTA[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2018, 47(5): 13.

[4] 钟志旺,陈建译,唐涛,等. 基于 SVDD 的道岔故障检测和健康评估方法[J]. 西南交通大学学报, 2018, 53(4): 842.
ZHONG Zhiwang, CHEN Jianyi, TANG Tao, et al. SVDD-based research on railway-turnout fault detection and health assessment[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2018, 53(4): 842.

[5] 赵林海,陆桥. 基于灰关联的道岔故障诊断方法[J]. 铁道学报, 2014, 36(2): 69.
ZHAO Linhai, LU Qiao. Method of turnout fault diagnosis based on grey correlation analysis[J]. Journal of the China Railway Society, 2014, 36(2): 69.

[6] 周林,赵杰,冯广飞. 装备故障预测与健康管理工作[M]. 北京:国防工业出版社, 2015.

(下转第 27 页)