

文章编号:1005-0523(2019)01-0125-08

基于变权物元可拓模型的接触网健康状态综合评价

刘仕兵,仇智圣,马志方

(华东交通大学电气与自动化工程学院,江西 南昌 330013)

摘要:以接触网作为研究对象,搭建了基于变权物元可拓的接触网健康状态综合评价模型。结合物元可拓理论和接触网相关指标标准,确立接触网的状态信息经典域,建立状态参量物元矩阵。同时,通过熵权法和层次分析法的线性组合,得出主客观兼具的初始权重,再运用变权理论进行修正,使权重体现出评价对象在综合评价过程中的主动参与。最后引入贴近度函数对接触网健康等级进行评判,得出评价结果,并通过实例分析对所搭建的模型进行验证。算例结果表明了该模型用于接触网健康状态综合评价的正确性和实用性。

关键词:接触网;物元可拓模型;变权理论;贴近度;健康状态综合评估;敏感性分析

中图分类号:U221

文献标志码:A

随着高速铁路的飞速发展,其对社会和经济的影响不断增强,人们对高速铁路安全性的要求也随之大幅提高。接触网作为铁路牵引供电的关键性部分,是高铁动车组直接获取电能的唯一设备。它从投入运行开始,就一直负责动力的直接传输,它的运行状况将直接关系到列车的安全性能。接触网结构复杂,工作环境恶劣,故障种类繁多且无备用,据各项调查统计,铁路牵引供电系统故障中有大约 80%与接触网故障有关;因此,对接触网的维护成为铁路维护中的重中之重。

目前铁路部门已广泛应用 6C 系统对接触网进行监测,但监测数据的处理方法大部分仍然停留在基础数据查询,通过阈值比较,判断故障,确定缺陷等级,最后人为对接触网进行简单打分。这样的处理没有充分利用接触网的监测数据,挖掘出其背后隐藏的信息,无法指出接触网的变化趋势,做到状态变化预测。因而对接触网的健康情况进行综合评估,从而能够对接触网进行故障预警并给出维护建议是铁路部门所急需的。

国外对可靠性的研究开始的较早,日本运用可靠性理论和相关概率理论对新干线的可靠性进行研究,利用威布尔分布分析机车故障数据,找出失效数据集,计算机车部件的使用寿命,并运用故障树分析法和故障模式影响法找出系统的薄弱位置,以此提高机车运行可靠性,优化维修计划。美国和德国通过建立机车故障数据库,利用可靠性理论对运行和修理期间故障积累数据进行分析,从而使可靠性评估研究从定性向着定量发展^[1]。近年来,中国铁路发展迅猛,国内对接触网可靠性和健康状态的评价工作也已经取得了一定的进展,状态评估的方法有故障树分析法^[2],贝叶斯网络法^[3-4]、GO 法^[5],模糊综合评判法^[6],D-S 证据理论^[7],可信度理论等。这些方法大部分只从接触网的具体结构上进行了定性分析,且数据大多来源于长期统计值,并没有通过对接触网进行动态实测来给出整体的量化评价。文献[8]利用 FTA 建立接触网失效模型,指出了导致接触网出现故障的因素组合和对应概率,但并没有给出接触网健康状态的整体量化值。文献[9]通过熵权法对数据进行处理,分析其背后信息,得到各个指标的权重,利用模糊数学建立评估模型实现对接触网健康状态的评价,但熵权法并不能体现各指标的重要差异性,并且在隶属度函数的选择上有着较强的主观性。文献[10]结合了组合赋权法和灰色聚类法,构造出接触网的综合评估模型。组合赋权法兼具主客观的有点,但

收稿日期:2018-07-02

基金项目:江西省教育厅科技项目(GJJ150530;GJJ160488)

作者简介:刘仕兵(1970—),男,教授,主要研究方向为电气化铁路接触网技术。

是忽略了指标的均衡性,无法反映重要指标数据变化带来的影响。本文结合物元理论和可拓集合理论建立了接触网评价模型,引入贴适度概念来判断接触网健康状态所处等级,避免了由于最大隶属原则失效而导致评判结果与实际状态不符的情况。权重确定方面运用博弈论中线性组合的思想,综合熵权法和AHP得出初始权重,并利用变权理论进行修正,使最终结果不仅兼具主客观的优点,而且体现了各个指标间的均衡性。

1 变权物元可拓模型

物元可拓模型是综合了物元理论和可拓集合理论,并将其作为理论依据,建立经典域,节域和评价等级。通过计算待评物元和各个等级之间的关联度,从而指出评价对象所属的等级^[11-12]。

物元是构成物元可拓模型的逻辑单元。作为描述事物的基本元,物元是由3个元素有序排列组成的数组。这三者分别为事物、特征以及事物对应特征的具体量值,记为 $R=(\text{事物}, \text{特征}, \text{量值})=(N, C, V)^{[13-14]}$ 。该方法的具体步骤如下:

1) 确定评价对象的经典域,节域和具体的待评物元。经典域 R_j 表示为

$$R_j=(N_j, C_i, V_{ij})=\begin{bmatrix} N_j & c_1 & v_{1j} \\ & c_2 & v_{2j} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_{nj} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} N_j & c_1 & (a_{1j}, b_{1j}) \\ & c_2 & (a_{2j}, b_{2j}) \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & (a_{nj}, b_{nj}) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: N_j 为第 j 个评价等级; c_1, c_2, \dots, c_n 为 N_j 的 n 个不同的特征; $v_{1j}, v_{2j}, \dots, v_{nj}$ 分别是 N_j 对应于 c_1, c_2, \dots, c_n 的具体取值变化范围,即经典域; a_{ij} 和 b_{ij} 为 v_{ij} 的取值边界。

节域 R_p 表示为

$$R_p=(N, C_i, V_{pi})=\begin{bmatrix} N & c_1 & v_{p1} \\ & c_2 & v_{p2} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_{pn} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} N & c_1 & (a_{p1}, b_{p1}) \\ & c_2 & (a_{p2}, b_{p2}) \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & (a_{pn}, b_{pn}) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: N 为评价对象等级的全体; $v_{p1}, v_{p2}, \dots, v_{pn}$ 分别是 N 对应于 c_1, c_2, \dots, c_n 的数值变化范围,即节域。

待评物元 R_0 表示为

$$R_0=(N_0, C_i, V_i)=\begin{bmatrix} N_0 & c_1 & v_1 \\ & c_2 & v_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: N_0 为具体的待评物元; v_1, v_2, \dots, v_n 分别是 N_0 关于 c_1, c_2, \dots, c_n 的实际测量数据。

2) 归一化处理。通过对评价模型的经典域和待评物元进行归一化处理,来克服当评价对象实测的某个指标数值超出节域时,关联函数出现分母为零从而无法计算评价的局限性,并通过这样的无量纲化处理解决各个指标单位不一的问题。

对经典域归一化处理

$$R_j'=(N_j, C_i, V_{ij}')=\begin{bmatrix} N_j & c_1 & \left(\frac{a_{1j}}{b_{p1}}, \frac{b_{1j}}{b_{p1}}\right) \\ & c_2 & \left(\frac{a_{2j}}{b_{p2}}, \frac{b_{2j}}{b_{p2}}\right) \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & \left(\frac{a_{nj}}{b_{pn}}, \frac{b_{nj}}{b_{pn}}\right) \end{bmatrix} \quad (4)$$

对待评物元进行归一化处理

$$R_0' = \begin{bmatrix} N_0 & c_1 & \frac{v_1}{b_{p1}} \\ & c_2 & \frac{v_2}{b_{p2}} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & \frac{v_n}{b_{pn}} \end{bmatrix} \quad (5)$$

3) 权重的确定。本文结合熵权法和层次分析法进行组合赋权确定各指标的初始权重,再通过变权理论^[15]进行权重的修正。从而使得权重综合了客观数据体现出的信息和专家长期实践得出的经验,并体现出评价对象在综合评价中的主动参与。

设 $\mathbf{X}=(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 为因素状态变量, $\mathbf{W}=(w_1, w_2, \dots, w_n)$ 为因素常权变量, $\mathbf{S}(\mathbf{X})=(S_1(\mathbf{X}), S_2(\mathbf{X}), \dots, S_n(\mathbf{X}))$ 为状态变权向量, 则变权向量 $\mathbf{W}(\mathbf{X})=(w_1(\mathbf{X}), w_2(\mathbf{X}), \dots, w_n(\mathbf{X}))$ 可表示为 \mathbf{W} 和 $\mathbf{S}(\mathbf{X})$ 的归一化 Hadamard 乘积

$$w_i(\mathbf{X}) = \frac{w_i S_i(\mathbf{X})}{\sum_{k=1}^n w_k S_k(\mathbf{X})}, \quad i=1, 2, \dots, n \quad (6)$$

式中: $S_i(\mathbf{X})=e^{\alpha(x_i-\bar{x})}$, α 为变权因子, 各指标的权重会随着 α 取值的变化而发生改变 w_i 为第 i 个评价指标的变权重。

为了能够让各个指标主动参与到评价过程中, 本文通过熵权法确定初始权重, 再通过实测数据和各个指标的节域范围来得到状态变权向量, 即式(6)可变化为

$$w_i(\mathbf{X}) = \frac{w_i \exp[\alpha(d_{i \max} - d_{i \min})]}{\sum_{k=1}^n w_k \exp[\alpha(d_{k \max} - d_{k \min})]} \quad (7)$$

式中: $d_{i \max} = \max\{|v_i - a_{pi}|, |b_{pi} - v_i|\}$, $d_{i \min} = \min\{|v_i - a_{pi}|, |b_{pi} - v_i|\}$, 本文取 $\alpha = -1$, 生成 n 维惩罚性状态变量, 从而表现各指标的平衡性要求。

4) 贴近度函数的建立与计算。运用最大隶属原则来确定评价对象所属等级时, 有时会忽略待评对象自身界限的模糊性, 在评定过程中可能发生部分信息的丢失^[16], 导致一些评判结果无法反映出评价对象的实际状态。考虑到上述存在的问题, 本文引入贴近度概念来分析评价对象指标对于各个状态等级的集化程度。文献^[17]提出了非对称贴进度的公式, 整理如下

$$T = 1 - \frac{1}{n(n+1)} \sum_{i=1}^n D w_i \quad (8)$$

式中: T 为贴近度; D 为距离; w_i 为权重。

对待评物元 R_0 与归一化后的经典域之间的距离为

$$D_j(v_i') = \left| v_i' - \frac{a_{ij}' + b_{ij}'}{2} \right| - \frac{1}{2} (b_{ij}' - a_{ij}') \quad (9)$$

进一步, 可推导出待评物元与各个状态等级的贴近度为

$$T_j(N_0) = 1 - \frac{1}{n(n+1)} \sum_{i=1}^n D(v_i') w_i(\mathbf{X}) \quad (10)$$

式中: $w_i(\mathbf{X})$ 为评价指标的权重; n 为评价指标的个数。

5) 等级的评定。通过 $T_j(N_0) = \max\{T_j(N_0)\}$ 可以比较得出待评物元所属等级为 j' 。

j^* 为待评物元 R_0 的等级变量特征值,具体表示为

$$j^* = \frac{\sum_{j=1}^m j \bar{T}_j(N_0)}{\sum_{j=1}^m \bar{T}_j(N_0)} \tag{11}$$

式中: $\bar{T}_j(N) = \frac{T_j(N) - \min T_j(N)}{\max T_j(N) - \min T_j(N)}$, 而 j^* 的数值可以反映出待评物元 R_0 向相邻等级靠近的趋势。

2 实例分析

2.1 接触网健康状态评价指标体系的建立

根据《接触网运行检修规程》^[18],《高速铁路接触网运行检修暂行规程》^[19]以及《高速铁路设计规范(试行)》^[20]等相关规定标准,搭建接触网健康状态综合评价的整体指标体系,确定一级指标和二级指标,如图1所示。

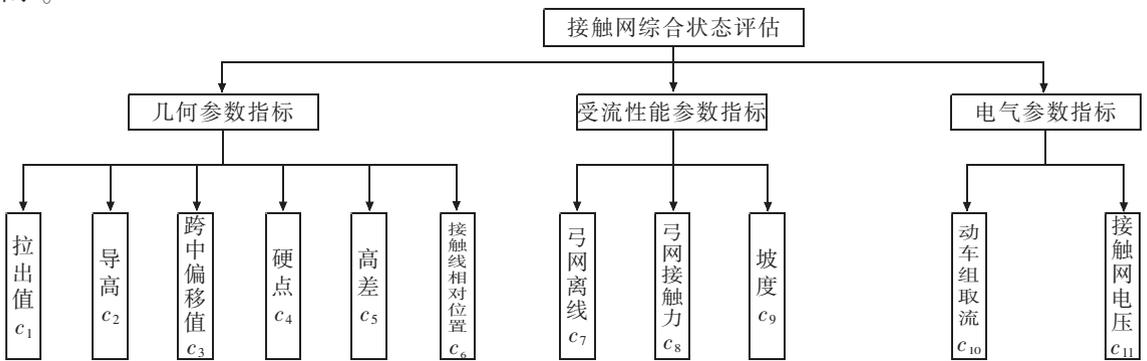


图1 接触网评价指标体系

Fig.1 Evaluation index system of catenary

2.2 接触网经典域,节域和待评物元的确立

对于接触网健康等级的划分,并没有明确的界限规范。本文结合专家经验和接触网设计相关数据标准,将接触网的健康状态划分成五个等级:1为不合格,2为较差,3为一般,4为较好,5为良好。不合格状态指接触网已经存在故障,需要立即排查故障;较差状态指接触网个别指标存在缺陷,存在着安全隐患,有存在故障的可能,需要及时检查;一般状态指接触网运行状态一般,可以满足列车运行要求;较好状态指接触网运行状态良好,几乎不存在安全隐患;良好状态指接触网各指标值较理想,此时接触网安全等级最高,不会出现故障。

本文通过对某段接触网实际检测数据的分析,以及结合铁路接触网的设计标准,确定这5个等级对应的经典域为 $R_1 \sim R_5$,并将经典域和待评物元 R_0 进行归一化处理,处理结果如下

$$R_1' = \begin{bmatrix} N_1 & c_1 & (0, 0.166) \\ & c_2 & (0, 0.2) \\ & c_3 & (0, 0.2) \\ & c_4 & (0, 0.25) \\ & c_5 & (0, 0.2) \\ & c_6 & (0, 0.4) \\ & c_7 & (0, 0.286) \\ & c_8 & (0, 0.15) \\ & c_9 & (0, 0.1) \\ & c_{10} & (0, 0.15) \\ & c_{11} & (0, 0.2) \end{bmatrix} \quad R_2' = \begin{bmatrix} N_2 & c_1 & (0.166, 0.333) \\ & c_2 & (0.2, 0.4) \\ & c_3 & (0.2, 0.45) \\ & c_4 & (0.25, 0.45) \\ & c_5 & (0.2, 0.4) \\ & c_6 & (0.4, 0.65) \\ & c_7 & (0.286, 0.357) \\ & c_8 & (0.15, 0.35) \\ & c_9 & (0.1, 0.2) \\ & c_{10} & (0.15, 0.35) \\ & c_{11} & (0.2, 0.4) \end{bmatrix} \quad R_3' = \begin{bmatrix} N_3 & c_1 & (0.333, 0.6) \\ & c_2 & (0.4, 0.7) \\ & c_3 & (0.45, 0.7) \\ & c_4 & (0.45, 0.75) \\ & c_5 & (0.4, 0.6) \\ & c_6 & (0.65, 0.7) \\ & c_7 & (0.357, 0.75) \\ & c_8 & (0.35, 0.52) \\ & c_9 & (0.2, 0.6) \\ & c_{10} & (0.35, 0.625) \\ & c_{11} & (0.4, 0.65) \end{bmatrix}$$

$$R_4' = \begin{bmatrix} N_4 & c_1 & (0.6, 0.78) \\ & c_2 & (0.7, 0.84) \\ & c_3 & (0.7, 0.85) \\ & c_4 & (0.75, 0.9) \\ & c_5 & (0.6, 0.9) \\ & c_6 & (0.7, 0.9) \\ & c_7 & (0.75, 0.8) \\ & c_8 & (0.52, 0.75) \\ & c_9 & (0.6, 0.8) \\ & c_{10} & (0.625, 0.7) \\ & c_{11} & (0.65, 0.9) \end{bmatrix} \quad R_5' = \begin{bmatrix} N_5 & c_1 & (0.78, 1) \\ & c_2 & (0.84, 1) \\ & c_3 & (0.85, 1) \\ & c_4 & (0.9, 1) \\ & c_5 & (0.9, 1) \\ & c_6 & (0.9, 1) \\ & c_7 & (0.8, 1) \\ & c_8 & (0.75, 1) \\ & c_9 & (0.8, 1) \\ & c_{10} & (0.7, 1) \\ & c_{11} & (0.9, 1) \end{bmatrix} \quad R_0' = \begin{bmatrix} N_0 & c_1 & (0.825, 0.5) \\ & c_2 & (0.785, 0.6) \\ & c_3 & (0.793, 0.1) \\ & c_4 & (0.802, 0.1) \\ & c_5 & (0.700, 0.5) \\ & c_6 & (0.811, 0.7) \\ & c_7 & (0.845, 0.1) \\ & c_8 & (0.853, 0.1) \\ & c_9 & (0.530, 0.5) \\ & c_{10} & (0.672, 0.1) \\ & c_{11} & (0.702, 0.5) \end{bmatrix}$$

式中: N_1, N_2, N_3, N_4 和 N_5 分别表示等级不合格, 较差, 一般, 较好和良好。

2.3 指标权重的确定

本文取某段接触网接触网的检测数据, 将其标准化得到表 1。

表 1 接触网标准化数据
Tab.1 Catenary standardized data

指标	组号										
	c_1	c_2	c_3	c_5	c_6	c_7	c_8	c_9	c_{10}	c_{11}	
1	0.765	0.808	0.902	0.552	0.836	0.786	0.525	0.822	0.515	0.788	
2	0.820	0.864	0.765	0.420	0.874	0.811	0.387	0.785	0.492	0.826	
3	0.543	0.636	0.813	0.904	0.798	0.782	0.395	0.645	0.495	0.685	
4	0.660	0.688	0.884	0.580	0.924	0.653	0.482	0.801	0.625	0.715	
5	0.720	0.485	0.895	0.914	0.695	0.776	0.684	0.384	0.816	0.605	
6	0.798	0.692	0.854	0.875	0.941	0.771	0.785	0.365	0.381	0.755	

结合表 1 中数据和待评物元, 运用熵权法, AHP 法, 组合赋权法以及变权理论, 得到各指标权重, 如表 2 所示。

表 2 不同方法确定的权重
Tab.2 Variation of weight values determined by different methods

方法	指标权重										
	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7	c_8	c_9	c_{10}	c_{11}
熵权法	0.046 3	0.081 8	0.008 7	0.002 5	0.207 8	0.025 4	0.011 9	0.183 4	0.255 4	0.151 2	0.025 7
层次分析法	0.136 8	0.082 6	0.023 2	0.160 1	0.053 4	0.044 1	0.072 5	0.204 6	0.038 5	0.147 4	0.036 8
组合赋权	0.100 6	0.082 3	0.017 4	0.097 1	0.115 2	0.036 6	0.048 3	0.196 1	0.125 3	0.148 9	0.032 4
变权	0.084 0	0.074 4	0.015 5	0.085 0	0.123 5	0.031 4	0.038 8	0.155 0	0.188 8	0.169 0	0.034 6

2.4 贴近度的计算和等级的评定

首先根据待评物元和各个经典域的具体数据, 运用式(9)得出其各指标与经典域的距离 $D_j(v_i')$, 结果如表 3 所示。

表3 接触网评价指标等级距离
Tab.3 Evaluation index level distance of catenary

指标	$D_1(v_i')$	$D_2(v_i')$	$D_3(v_i')$	$D_4(v_i')$	$D_5(v_i')$
c_1	0.659 5	0.492 5	0.225 5	0.045 5	-0.045 5
c_2	0.585 6	0.385 6	0.085 6	-0.054 4	0.054 4
c_3	0.593 1	0.343 1	0.093 1	-0.056 9	0.056 9
c_4	0.552 1	0.352 1	0.052 1	-0.052 1	0.097 9
c_5	0.500 5	0.300 5	0.100 5	-0.100 5	0.199 5
c_6	0.411 7	0.161 7	0.111 7	-0.088 3	0.088 3
c_7	0.559 1	0.488 1	0.095 1	0.045 1	-0.045 1
c_8	0.703 1	0.503 1	0.333 1	0.103 1	-0.103 1
c_9	0.430 5	0.330 5	-0.069 5	0.069 5	0.269 5
c_{10}	0.522 1	0.322 1	0.047 1	-0.027 9	0.027 9
c_{11}	0.502 5	0.302 5	0.052 5	-0.052 5	0.197 5

然后根据式(10),通过表3得出的数据可计算出物元 R_0 与各个等级的贴程度,如表4所示。

表4 待评物元对于等级1-5的贴程度
Tab.4 Closeness degree of matter-element for Level 1 to Level 5

等级	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5
贴程度	0.995 85	0.997 18	0.999 25	0.999 97	0.999 38

由表4中贴程度可看出,该段待评接触网数据与第4等级(较好)的贴程度最大。进而可依据式(11)计算得到等级变量特征值 $j^*=3.7957 > 3.5$ 。因此该段待评接触网的健康等级为较好,并且偏向于良好等级的程度较大。

2.5 敏感性分析

当评价指标实际检测数据中任一指标值发生变化,而其余评价指标值均不改变时,其对应的权重和等级变量特征值 j^* 也会产生一定的变化。由此,根据接触网评价体系中各指标的实测值对接触网健康状态等级做敏感性分析。当评价指标的实测值分别变化-60%,-50%,-40%,-30%,-20%,-10%,0和10%时,其权重和等级变量特征值随单一指标值增长而变化的折线图如图2和图3所示。

从图2中可以看出,指标 c_8, c_9, c_{10} 和 c_5 的权重变化最为明显,而指标 c_3, c_6 和 c_{11} 的权重变化不明显。所有指标的实测值在该经典域中逐渐增大时,其对应的权重都呈现出了先增大后减小的趋势。 c_8 指标所占权重最大,并且权重变化幅度也最大,而 c_4 和 c_8 的权重变化几乎一样。指标 $c_1, c_2, c_3, c_4, c_6, c_7$ 和 c_8 的权重都在其实测值减小40%左右达到峰值,并开始由增大转变为减小。指标 c_5, c_{10}, c_{11} 的权重都在其实测值减小30%左右处发生权重变化趋势的转变,而指标 c_9 则在实测值变化-10%时权重达到最大值。通过上述指标权重随指标实测值变化的分析可以看出,指标的权重会随着任一指标值的改变而发生变化,由此可得知在本文搭建的模型中评价指标主动参与了整个评价过程。

由图3能够看出,随着待评接触网各个指标的实际测量值在其-60%到+10%之间增大,其对应的等级变量特征值也随之发生改变,但是值变化的幅度较小,全部在3.6~3.85之间。说明当只有单个指标发生劣化,而其他指标保持原有状态时,接触网的健康状态变化较小,其所处健康等级不变。其中指标 c_8 ,随着指标数值的不断增大, j^* 的变化幅度较大,由此可以看出,它是接触网健康状态评价的敏感性指标。

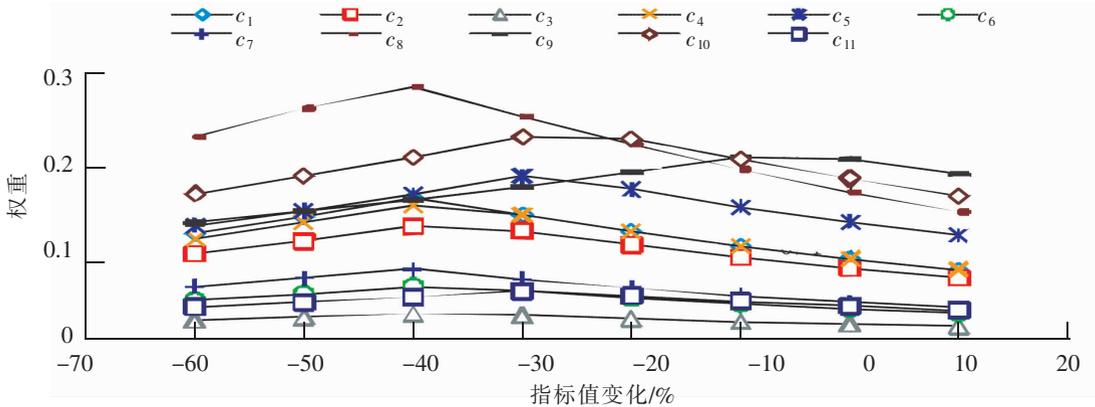


图 2 权重随指标值变化的对应情况

Fig.2 Variation of weight values with the index values

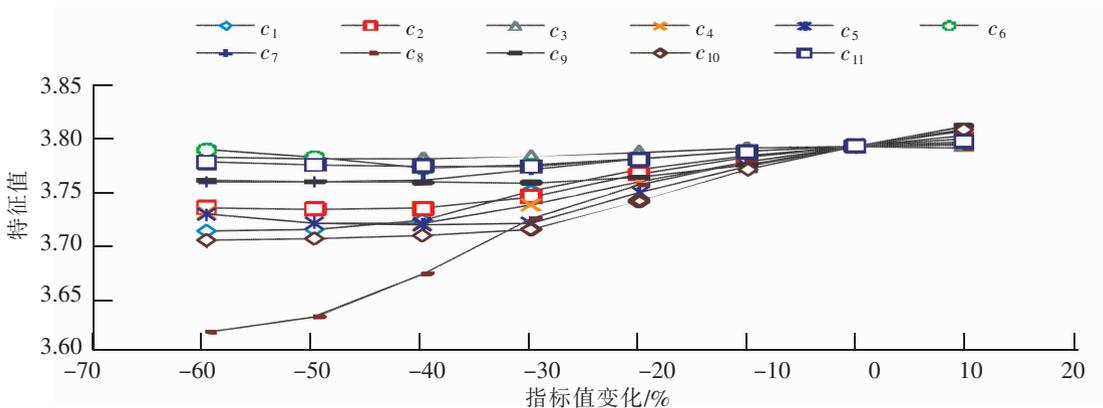


图 3 等级变量特征值随指标值变化的情况

Fig.3 Variation of grade variable eigenvalues with the index values

3 结论

1) 以接触网作为研究对象,针对其特点,将变权理论和物元可拓模型相结合,搭建了接触网健康状态的综合评价模型。通过引入贴适度概念来替代最大隶属度准则,从而解决了评判过程中可能出现的信息丢失,导致隶属函数失效引起评判结果偏差的问题。

2) 在权值方面,首先利用熵权法和 AHP 分别得出的较为客观和主观的指标权重,然后根据博弈论线性组合的思想,综合两者优缺点得出初始权重,最后再结合变权理论进行修正,从而体现出评价对象在整个评价过程中的主动参与以及各指标间的均衡性,使结果更加科学合理。

3) 运用模型对某段接触网实测数据的健康状态进行综合评价,结果显示其为较好,并且偏向于良好的程度较大。

4) 通过敏感性分析得出,“拉出值”,“弓网接触力”和“动车组取流”是影响接触网健康状态结果的敏感性指标。

参考文献:

[1] HAUGEN E M. Statistical algebra for engineering applications[J]. Bulletin of the International Statistical Institute, 1965, 41(1): 515-517.
 [2] 杨凯,瞿福林,邱秀姣,等. 基于故障树分析法的高速铁路钢轨断裂机理分析[J]. 铁道标准设计, 2017, 61(4): 33-37.

- [3] 王佳培,高仕斌,晏紫薇,等. 基于贝叶斯网络的接触网运行可靠性分析[J]. 电气化铁道,2017,28(5):63-68.
- [4] 李兴运,齐金平. 基于模糊贝叶斯网络的受电弓系统可靠性分析[J]. 铁道科学与工程学报,2018(6):1383-1390.
- [5] LIU Z,LIU Y,WU X L,et al. Risk analysis of subsea blowout preventer by mapping GO models into Bayesian networks [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries,2018,52:54-65.
- [6] 高焱,夏晶晶,耿纪莹,等. 基于模糊综合评判法的寒区高速铁路隧道冻害评价体系研究[J]. 铁道标准设计,2018(7):124-129.
- [7] 李贤钰,郭忠印,王璐,等. 基于 D-S 证据理论的灾后公路交通生命线多源信息融合技术[J]. 华东交通大学学报,2017,34(3):88-94.
- [8] 杨媛,吴俊勇,吴燕,等. 基于可信性理论的电气化铁路接触网可靠性的模糊评估[J]. 铁道学报,2008,30(6):115-119.
- [9] 程宏波,何正友,胡海涛,等. 高铁接触网健康状态的熵权多信息综合评估[J]. 铁道学报,2014(3):19-24.
- [10] 刘仕兵,朱雪龙,张艳伟,等. 基于灰色聚类 and 组合赋权法的高速铁路接触网健康状态评估研究[J]. 铁道学报,2016,38(7):57-63.
- [11] 杨春燕,蔡文. 可拓工程学[M]. 北京:科学出版社,2007.
- [12] 黄剑,周林,栗秋华,等. 基于物元分析理论的电能质量综合评估[J]. 重庆大学学报,2007,30(6):25-29.
- [13] 李如琦,苏浩益. 基于可拓云理论的电能质量综合评估模型[J]. 电力系统自动化,2012,36(1):66-70.
- [14] 汪新凡,杨小娟. 基于联系数贴近度的区间数多属性决策方法[J]. 数学的实践与认识,2008,38(3):16-22.
- [15] 李洪兴. 因素空间理论与知识表示的数学框架(VIII)——变权综合原理[J]. 模糊系统与数学,1995(3):1-9.
- [16] 陈耀辉,孙春燕. 对最大隶属原则有效度的进一步研究[J]. 重庆师范大学学报:自然科学版,2002,19(1):47-49.
- [17] 张晓平. 基于贴近度的模糊综合评判结果的集化[J]. 山东大学学报:理学版,2004,39(2):25-29.
- [18] 中华人民共和国铁道部.接触网运行检修规程[S]. 北京:中华人民共和国铁道部,2007.
- [19] 中华人民共和国铁道部. 高速铁路接触网运行检修暂行规程[M]. 北京:中国铁道出版社,2011.
- [20] 铁道第三勘察设计院集团有限公司. 高速铁路设计规范(试行)[M]. 北京:中国铁道出版社,2010.

Comprehensive Evaluation on Health Status of Catenary Based on Matter-Element Extension Model with Variable Weight

Liu Shibing, Qiu Zhisheng, Ma Zhifang

(School of Electrical and Automation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: Taking catenary as the research object, a comprehensive evaluation model of catenary health status based on variable weight matter-element extension was established. Combined with the matter-element extension theory and the relevant index standard of catenary, the classical domain of the state information of catenary was set up, and the state parameter matter-element matrix was formed. Meanwhile, using the linear combination of entropy weight method and analytic hierarchy process, the initial weight with both subjectivity and objectivity was obtained. Re-correction using the variable weight theory made the weight reveal the active participation of the evaluation object in the general evaluation process. Finally, the closeness degree function was introduced to evaluate the health level of catenary, and was checked by tests. The example proves the correctness and practicability of this model in comprehensive evaluation of catenary health status.

Key words: catenary; matter-element extension model; variable weight theory; closeness degree; health status comprehensive assessment; sensitivity analysis