

熵权-集对分析模型在列车走行性综合评估中的应用

卢永飞^{1,2}, 陈志敏², 余云燕²

(1. 西北民族大学 土木工程学院, 甘肃 兰州, 730030; 2. 兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州, 730070)

摘要:针对过桥列车走行性评价中各评价指标数据测定的不确定性和随机性,在列车走行性综合评价中应用集对分析理论,首先分析测点实测数据与列车走行性评价指标之间的联系度,再根据联系度对各实测数据进行初步分类,然后进一步对初步分类的测点实测数据做综合联系度计算,判定列车走行性等级,并将信息论中的熵值理论引入评价模型确定各指标的权重,使权重的分配有了一定的理论依据.最后通过对一在不同车速下列车过桥的 6 组样本数据进行分析,用 MATLAB 编程计算得到,与传统等权重指标评价方法相比,基于熵权的集对分析模型概念清晰、准确度高、符合实际.

关键词:安全工程;列车;走行性能评价;集对分析;熵;MATLAB

中图分类号:U24

文献标志码:A

文章编号:1006-7930(2020)03-0404-05

Application of entropy weight-set pair analysis model in comprehensive evaluation of train running performance

LU Yongfei^{1,2}, CHEN Zhimin², YU Yunyan²

(1. School of Civil Engineering, Northwest Minzu University, Lanzhou 730030, China;

2. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: The theory of set pair analysis is applied to the comprehensive evaluation of train running performance in view of the uncertainty and randomness of data measurement of evaluation indexes in the evaluation of train running performance of bridge crossing. Firstly, the connection degree between the measured data of the measuring point and the evaluation index of train running was analyzed and then a preliminary classification, and a comprehensive connection calculation on the measured data of the preliminary classification of the measuring point, were also conducted in determining the train running level. The entropy value theory in information theory is introduced into the evaluation model to determine the weight of each index, so that the weight distribution has a certain theoretical basis. Finally, 6 sets of sample data of a vehicle passing through the bridge at different speeds were analyzed. Compared with the traditional equal weight index evaluation method, the evaluation result of the set pair analysis model based on entropy weight is more consistent with the reality, clearer and more accurate through the programming calculation of MATLAB.

Key words: safety engineering; train; running behavior evaluation; set pair analysis; entropy; MATLAB

随着列车行驶速度的不断提高和列车载荷的不断加大,列车通过桥梁的安全性和平稳性问题越来越得到人们的重视.然而由于列车过桥时列车-轨道-桥梁的动力相互作用是一个非常复杂的过程,许多相关因素都具有一定的随机性和模糊性,以致使实测数据不可避免的产生随机误差,对列车运行安全性和平稳性最终评价结果产生一定的影响^[1-4].针对该情况采用模糊诊断方法评估该动力相互作用系统的安全性和平稳性是行之有效的.2000年,翟婉明等^[5]首次从车辆-轨道相互作用整体系统的角度,运用车辆-轨道耦合动力学理论,

对列车走行性受轨道结构刚度的影响规律进行了研究.2002年,曾庆元院士^[6]第一次提出了列车脱轨能量随机分析理论,用此理论预报了一货物列车脱轨实例,预报结果与实际脱轨事故分析结果基本一致,并计算了该试验列车最大振动响应,计算结果与测试结果良好接近.在文献^[6]的基础上,2002年,向俊等^[7]进一步论述了列车脱轨能量随机分析的理论与实践,再次作了实例脱轨分析,提出了预防列车脱轨的措施,得到车轨系统抗脱轨安全系数的计算方法.2011年,周智辉等^[8]人运用列车脱轨能量随机分析理论分析了金温线

收稿日期:2019-09-02 修改稿日期:2020-05-11

基金项目:西北民族大学中央高校基本科研业务费资助项目(31920160065)

第一作者:卢永飞(1982-),男,博士生,讲师,主要从事桥梁结构动力学方面的教学与研究工作.E-mail: ban43954069@163.com

武义江桥列车走行性, 并基于该理论, 对铁路桥梁行车安全指标分析方法进行了研究. 2015 年, 梁世庆等^[9]把物元可拓数学方法、熵权理论和关联度函数运用到轨道交通建设中, 建立了轨道交通建设时序决策的熵权物元可拓模型. 2018 年, 刘清漪等^[10]将交通、经济、社会和环境作为轨道交通的影响子系统, 设计量化模型计算了外部效应对轨道交通线路的影响程度, 并对深圳地铁 3 号线建立灰色聚类模型进行了实例分析. KUMAR K 和 GORTMAKER S L 等人已经将集对分析理论已经广泛应用于多个领域^[11-15]. 借助于指标数据测定的确定性和不确定性分析, 本文运用集对分析理论, 先对所测列车运行指标进行定性分析, 通过计算联系度对列车过桥运行安全性和平稳性做出定量分析, 在确定所测列车运行指标权重时, 运用数学中的信息熵反映实测数据的效用值, 对列车过桥运行安全性和平稳性做出全面、客观的评价, 最后通过一实例应用对铁路桥上列车的走行安全性和平稳性做出评估.

1 熵权-集对分析模型

1.1 集对分析原理

集对概念由我国学者赵克勤提出, 用来处理不确定性问题的一种数学分析方法. 集对分析理论的核心思想: 在具体问题背景下, 对集合 A 、 B 组成的集对进行分析, 两组集对得到 N 个特性, 其中有 S 个为集对 A 、 B 所共同具有的元素数, 有 P 个为 A 、 B 中相互对立的元素数, 在其余 F 个特性关系为既不共有也不对立^[16], 则两个集合的联系度

$$\mu = \frac{S}{N} + \frac{F}{N}i + \frac{P}{N}j = a + bi + cj, \quad (1)$$

其中, $(a+b+c=1)$. 式中: μ 为集合 A 、 B 的联系度; S/N 、 F/N 、 P/N 分别为集合 A 与集合 B 的同一度、差异度、对立度, 分别简记为 a 、 b 、 c ; i 为差异标记, 在 $[-1, 1]$ 区间视不同情况取值; j 为对立系数, 一般取为 -1 , 也可仅起标记作用. 联系度 μ 与不确定系数 i 是本理论的核心, 该理论对常见的一系列不确定现象均能够进行描述.

1.2 列车过桥走行性评价的集对分析方法

基于集对分析的列车过桥运行安全性和平稳性评价是将列车过桥走行性实测数据与规范或标准中的列车过桥走行性评价指标构成一个集对, 分析构成的两个集对, 就可以得到安全性和平稳

性评价的量化指标. 列车过桥运行安全性和平稳性评价常规评价指标有 7 个, 分别为脱轨系数、轮重减载率、轮轨横向力、车体垂向加速度、车体横向加速度、Sperling 舒适性垂向指标、Sperling 舒适性横向指标, 设一组实测样本中优于标准的有 S 个评价指标, 劣于标准的有 P 个评价指标, 未测或缺乏比较的有其余的 F 个评价指标构成, 则各数据样本的联系度可通过式(1)计算出, 公式中 a 、 b 、 c 三个数据的大小关系可初步反映该组样本数据所得评价指标的优劣.

列车过桥安全性和平稳性评价指标特性属于越小越优型, 其联系度为

$$\mu_s = \begin{cases} 1 + 0i + 0j, & x \in [0, S_1] \\ \frac{S_2 - x}{S_2 - S_1} + \frac{x - S_1}{S_2 - S_1}i + 0j, & x \in [S_1, S_2] \\ 0 + \frac{S_3 - x}{S_3 - S_2}i + \frac{x - S_2}{S_3 - S_2}j, & x \in [S_2, S_3] \\ 0 + 0i + 1j, & x \in [S_3, +\infty] \end{cases} \quad (2)$$

式中 S_1 、 S_2 、 S_3 分别为标准的界限值; t 为第 t 项指标; s 为第 s 个待测样本; x 为测点 s 的第 t 项评价指标的实测值.

1.3 指标权重系数

在目前已有的列车过桥运行安全性和平稳性评价中, 各项评价指标均取等权重, 没有考虑到不同指标的相对重要性, 不能符合实际列车运行情况, 使得走行性评价结果不够准确. 指标权重的合理性与安全评价的准确度息息相关, 在基于熵权-集对分析的列车过桥运行安全性和平稳性评价模型中, 这里采用熵权法来确定各指标的权重, 计算步骤如下^[17].

(1) 先构建 m 个评价对象, 每个评价对象设有 n 个评价指标, 构成判断矩阵 R

$$R = (r_{st})_{m \times n}, (s = 1, 2, \dots, m; t = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

(2) R 归一化处理, 得到矩阵 B .

越大越优型指标为

$$b_{st} = \frac{r_{st} - r_{\min}}{r_{\max} - r_{\min}}$$

越小越优型指标为

$$b_{st} = \frac{r_{\max} - r_{st}}{r_{\max} - r_{\min}} \quad (4)$$

(3) 各评价指标的熵为

$$H_t = - \left(\sum_{s=1}^m f_{st} \ln f_{st} \right) / \ln m \quad (5)$$

$$(s = 1, 2, \dots, m; t = 1, 2, \dots, n)$$

式中: $f_{st} = b_{st} / \sum_{s=1}^m b_{st}$

当 $f_{st} = 0$ 时, $\ln f_{st}$ 无意义, 可将其修正为

$$f_{st} = (1 + b_{st}) / \sum_{s=1}^m (1 + b_{st}) \quad (6)$$

(4) 计算各项指标的熵权

$$W = (\omega_t)_{1 \times n}, \omega_t = (1 - H_t) / (n - \sum_{t=1}^n H_t),$$

$$\text{且满足 } \sum_{t=1}^n \omega_t = 1 \quad (7)$$

1.4 基于熵权的集对分析

设第 s 个待测样本的综合联系度为 μ_s , 首先根据式 (1) 初步计算出列车过桥走行性评价样本 s 的联系度 μ_s ; 再用式 (2) 对评价样本做进一步的集对分析, 得到第 k 项指标联系度 μ_{sk} ; 再次, 运用 (3)-(7) 式计算各项指标的权重 $W = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)^T$, 其应该满足归一化条件 $\sum_{t=1}^n \omega_t = 1$, 即熵权-集对分析模型如下:

$$\mu'_s = \mu_s \times \sum_{t=1}^n (\omega_t \times \mu_{st}) \quad (8)$$

式中, n 为评价指标的个数.

最后, 对 μ'_s 中各分量进行归一化处理, 可得到平均联系度 $\bar{\mu}_s$. 分析比较综合联系度 $\bar{\mu}_s$ 中 a 、 b 、 c 的相对大小, 并结合实际工程, 即可判断出测点样本所属等级, 其评判标准则为: (1) 若 $\max[a, b, c] = b$, 则判断为良好; (2) 若 $\max[a, b, c] = a$, 且 $a + b \geq 0.7$, 则判为优秀, 否则判为良好; (3) 若 $\max[a, b, c] = c$, 且 $b + c \geq 0.7$, 则判为合格, 否则判为良好.

2 实例应用

以文献^[1]中武广高速铁路典型桥梁动力特性和列车走行性评估报告中梁家湾特大桥的列车动力响应数据为例, 在不同车速下共有 6 组实测数据, 每一组数据样本有 7 项评价指标分别为脱轨系数、轮重减载率、轮轴横向力、车体垂向加速度、车体横向加速度、Sperling 舒适性垂向指标、Sperling 舒适性横向指标见表 1. 依据相关规范将列车走行性状况分为 3 级^[18-19], I 级为优秀, II 级为良好, III 级为合格, 其中轮轴横向力指标门限值根据测试车轮静荷载计算得到, 集体分级标准见表 2.

表 1 列车过桥走行性评价指标实测数值

Tab. 1 The measured value of the train crossing bridge behavior evaluation index

车速 序号	脱轨 系数	轮重 减载率	轮轴横向力 /kN	车体垂向加速 度/ $m \cdot s^{-2}$	车体横向加速 度/ $m \cdot s^{-2}$	Sperling 舒适 性垂向指标	Sperling 舒适 性横向指标
1	0.39	0.53	32.10	2.292	1.148	2.35	2.14
2	0.57	0.71	34.30	1.962	1.343	2.26	2.37
3	0.72	0.66	36.26	2.556	1.348	2.73	2.33
4	0.60	0.70	34.56	2.298	1.510	2.61	2.91
5	0.72	0.41	48.18	2.130	2.050	2.26	2.52
6	0.66	0.48	46.00	2.421	2.090	2.33	2.57

表 2 列车过桥走行性评价指标分级标准

Tab. 2 The grading standards of the train crossing bridge behavior evaluation index

级别	脱轨 系数	轮重 减载率	轮轴横向力 /kN	车体垂向加速度 / $m \cdot s^{-2}$	车体横向加速度 / $m \cdot s^{-2}$	Sperling 舒适性 垂向指标	Sperling 舒适性 横向指标
I	0.60	0.60	47.37	2.45	1.47	2.50	2.50
II	0.80	0.65	51.62	2.95	1.98	2.75	2.75
III	0.90	0.80	57.17	3.63	2.45	3.00	3.00

首先根据式(1)以列车走行性分级 I、II、III 的级别作为分析对象联系度表达式中的同一度、差异度、对立度的取值界限, 计算 6 组测量样本数据的集对分析联系度分别为: $\mu_1 = \frac{7}{7} + 0i + 0j$ 、 μ_2

$$= \frac{6}{7} + 0i + \frac{1}{7}j, \mu_3 = \frac{3}{7} + \frac{3}{7}i + \frac{1}{7}j, \mu_4 = \frac{3}{7} + \frac{2}{7}i + \frac{2}{7}j, \mu_5 = \frac{3}{7} + \frac{3}{7}i + \frac{1}{7}j, \mu_6 = \frac{4}{7} + \frac{2}{7}i + \frac{1}{7}j.$$

比较 6 个列车走行性评价样本的联系度可知:

样本 3、5 属于同一级别, 列车走行性状况从优到劣依次为 1、2、6、3 和 5、4. 为进一步分析实测指标的具体数值与列车走行性分级标准之间的数量关系, 需对各测点样本数值做同一、差异、对立的进一步分析.

以车速序号 3 为例, 由式(2)可计算出 7 项实测指标相对于列车走行性分级标准的联系度分别为:

$$\mu_{31} = \frac{0.8 - 0.72}{0.8 - 0.6} + \frac{0.72 - 0.6}{0.8 - 0.6}i + 0j = 0.4 + 0.6i + 0j$$

$$\mu_{32} = 0 + \frac{0.8 - 0.66}{0.8 - 0.65}i + \frac{0.66 - 0.65}{0.8 - 0.65}j$$

$$j = 0 + 0.933i + 0.067j$$

$$\mu_{33} = 1 + 0i + 0j$$

$$\mu_{34} = \frac{2.95 - 2.556}{2.95 - 2.45} + \frac{2.556 - 2.45}{2.95 - 2.45}i + 0j$$

$$i + 0j = 0.788 + 0.212i + 0j$$

$$\mu_{35} = 1 + 0i + 0j,$$

$$\mu_{36} = \frac{2.75 - 2.73}{2.75 - 2.5} + \frac{2.73 - 2.5}{2.75 - 2.5}i + 0j$$

$$i + 0j = 0.08 + 0.92i + 0j$$

$$\mu_{37} = 1 + 0i + 0j$$

用 MATLAB 对熵值法确定权重系数过程(3)-(7)式进行编程如图 1, 分别输入 6 种不同的车速对应的 6 组实测数值, 计算得到列车过桥走行性评价指标的各自权重见表 3.

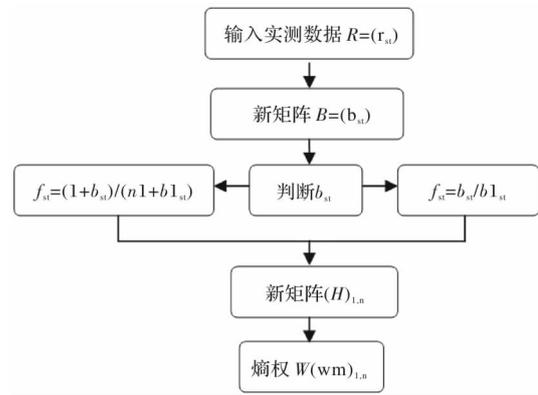


图 1 MATLAB 流程图

Fig. 1 MATLAB program chart

表 3 列车过桥走行性评价指标权重

Tab. 3 The weight of the train crossing bridge behavior evaluation index

评价 指标 权重	脱轨 系数	轮重 减载率	轮轴横向力 /kN	车体垂向加速 度/m·s ⁻²	车体横向加速 度/m·s ⁻²	Sperling 舒适 性垂向指标	Sperling 舒适性 横向指标
	0.139	0.139	0.165	0.139	0.139	0.139	0.139

表 4 列车过桥走行性评价结果

Tab. 4 Evaluation results of the train crossing bridge behavior

方法	车速 1	车速 2	车速 3	车速 4	车速 5	车速 6
熵权-集对法	I	I	II	III	II	I

按式(8)计算出各样本的平均联系度为 $\bar{\mu}'_1$ 、 $\bar{\mu}'_2$ 、 $\bar{\mu}'_3$ 、 $\bar{\mu}'_4$ 、 $\bar{\mu}'_5$ 、 $\bar{\mu}'_6$, 再对计算出的平均联系度进行归一化可得各样本的综合联系度 $\bar{\mu}_1$ 、 $\bar{\mu}_2$ 、 $\bar{\mu}_3$ 、 $\bar{\mu}_4$ 、 $\bar{\mu}_5$ 、 $\bar{\mu}_6$. 最后根据评价准则判断出各车速下实测数据的列车走行性等级见表 4.

各种车速下列车安全性和平稳性状况从优到劣依次为 1、2、6、5、3、4. 车速序号 1、2、6 列车过桥车速最小, 所得列车安全性和平稳性状况最优, 样本 4 列车过桥车速最大, 其安全性和平稳性最差, 整个评价结果与实际相符.

3 结论

(1) 本文应用数学上的集对分析理论构造列车走行性评价模型, 在确定列车过桥运行安全性和平稳性评价的 7 个常规评价指标权重时引入了信息论中熵值理论, 通过信息熵理论计算列车过桥运行实测数据本身的效用值来确定各个指标的权重,

使得指标权重的分配有理可依.

(2) 与常规列车过桥运行安全性和平稳性的等权重的指标权重评价方法相比, 本文的评价方法使轮轴横向力这项指标的权重增大为 0.165, 该结果更加符合实际情况.

(3) 列车过桥运行安全性和平稳性评价是一项比较复杂的工程, 需要综合多项测量指标的属性进行判定, 本文仅仅考虑了列车过桥运行安全性和平稳性评价的 7 个常规评价指标, 而且列车过桥时要受到风荷载气动影响和温度变化的动态影响, 故对其进行综合评价仅仅从权重角度考虑还有待欠缺.

参考文献 References

[1] 翟婉明, 夏禾. 列车-轨道-桥梁动力相互作用理论与工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
ZHAI Wanming, XIA He. Train-track-bridge dynamic interaction theory and engineering application[M]. Bei-

- jing: Science Press, 2011.
- [2] YANG Y B, WU Y S. A versatile element for analyzing vehicle-bridge interaction response [J]. *Engineering Structure*, 2001, 23(1):452-469.
- [3] 夏禾, 张楠, 郭薇薇, 等. 车桥耦合振动工程[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
XIA He, ZHANG Nan, GUO Weiwei, et al. *Coupling vibrations of train-bridge system*[M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [4] 曾庆元, 向俊, 周智辉, 等. 列车脱轨分析理论与应用[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2006.
ZENG Qingyuan, XIANG Jun, ZHOU Zhihui, et al. *Theory and application of train derailment analysis* [M]. Changsha: Central South University Press, 2006.
- [5] 翟婉明, 蔡成标, 王开云. 轨道刚度对列车走行性能的影响[J]. *铁道学报*, 2000(6):80-83.
ZHAI Wanming, CAI Chengbiao, WANG Kaiyun. Effect of track stiffness on train running behavior[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2000(6):80-83.
- [6] 曾庆元, 向俊, 姜平. 车桥及车轨时变系统横向振动计算中的根本问题与列车脱轨能量随机分析理论[J]. *中国铁道科学*, 2002(1):3-12.
ZENG Qingyuan, XIANG Jun, LOU Ping. Fundamental problems in calculation of transverse vibration of train-bridge and train-track time-varying system and theory of energy random analysis for train derailment [J]. *China Railway Science*, 2002(1):3-12.
- [7] 向俊, 曾庆元, 姜平. 再论列车脱轨能量随机分析[J]. *中国铁道科学*, 2002(2):26-32.
XIANG Jun, ZENG Qingyuan, LOU Ping. Further discussion on the energy random analysis of train derailment[J]. *China Railway Science*, 2002(2):26-32.
- [8] 周智辉, 张军, 秦文孝, 等. 金温线武义江桥列车走行性与行车安全指标研究[J]. *振动与冲击*, 2011, 30(10):9-13.
ZHOU Zhihui, ZHANG Jun, QIN Wenxiao, et al. Train running performance and traffic safety index for Wuyi river bridge of Jinwen line[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2011, 30(10):9-13.
- [9] 梁世庆, 孙波成, 戢小辉. 基于熵权-物元模型的轨道交通建设时序研究[J]. *铁道标准设计*, 2015, 59(10):18-22.
LIANG Shiqing, SUN Bocheng, JI Xiaohui. Construction sequence of urban rail transit engineering based on information entropy and matter-element model [J]. *Railway Standard Design*, 2015, 59(10):18-22.
- [10] 刘清漪, 蒋琦玮, 王梦缘. 基于熵权和灰色聚类模型的城市轨道交通外部效应研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2018, 15(12):3266-3273.
LIU Qingyi, JIANG Qiwei, WANG Mengyuan. Study on externality evaluation of urban rail transit through entropy-weight and grey clustering model[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2018, 15(12):3266-3273.
- [11] SU M R, YANG Z F, CHEN B, et al. Urban ecosystem health assessment based on emergy and set pair analysis-A comparative study of typical Chinese cities [J]. *Ecological Modelling*, 2009, 220(18):2341-2348.
- [12] TAO J, FU M C, SUN J J, et al. Multifunctional assessment and zoning of crop production system based on set pair analysis: A comparative study of 31 provincial regions in mainland China [J]. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2014, 19(5):1400-1416.
- [13] ZOU Q, ZHOU J Z, ZHOU C, et al. Comprehensive flood risk assessment based on set pair analysis-variable fuzzy sets model and fuzzy AHP [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2013, 27(2):525-546.
- [14] KUMAR K, GARG H. Connection number of set pair analysis based TOPSIS method on intuitionistic fuzzy sets and their application to decision making [J]. *Applied Intelligence*, 2018, 48(8):2112-2119.
- [15] GORTMAKER S L, MUST A, SOBOL A M, et al. Assessment of rockfall hazard along the road cut slopes of state highway-72, Maharashtra, India [J]. *Geomaterials*, 2013, 3(1):15-23.
- [16] 赵克勤. 集对分析及其初步应用[M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 2000.
ZHAO Keqin. *Set pair analysis and its preliminary application* [M]. Hangzhou: Zhejiang Science & Technology Press, 2000.
- [17] 孟宪萌, 胡和平. 基于熵权的集对分析模型在水质综合评价中的应用[J]. *水利学报*, 2009, 40(3):257-262.
MENG Xianmeng, HU Heping. Application of set pair analysis model based on entropy weight to comprehensive evaluation of water quality [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, 40(3):257-262.
- [18] 中华人民共和国铁路部. 铁道机车动力学性能试验鉴定方法及评价标准: TB/T 2360-93. [S]. 北京: 中国铁道出版社, 1993.
Ministry of Railway of the People's Republic of China. *Railway locomotive dynamic performance test identification method and evaluation standard: TB/T 2360-93* [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 1993.
- [19] 国家铁路局. 高速铁路设计规范: TB10621-2014. [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2015.
National Railway Administration of People's Republic of China. *High-speed railway design specification: TB10621-2014* [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2015.