

桥梁结构服役状态的动态分级聚类模型^{*}

刘朝峰^{1,2}讲师 曹纯博¹ 刘才玮³讲师 赵少伟^{**1,2}教授 刘之鹏⁴高级工程师

(1 河北工业大学 土木与交通学院, 天津 300401 2 河北工业大学 河北省土木工程技术

研究中心, 天津 300401 3 青岛理工大学 土木工程学院, 山东 青岛 266033

4 天津市公路工程总公司, 天津 300041)

学科分类与代码: 6203099(安全工程技术科学其他学科)

中图分类号: X913.4

文献标志码: A

基金项目: 国家自然科学基金资助(51678017); 山东省自然科学基金资助(ZR2016EEB13); 国家社会科学基金资助(18CGL019); 天津市交通运输科技发展计划项目(2016A-02)。

【摘要】 为准确快速评定现役桥梁的结构状态等级, 结合桥梁工程检测规范和结构特征参数, 从几何特征、材料性能、环境条件、作用类型等4个维度构建钢筋混凝土桥梁服役状态量化指标体系; 基于动态分级聚类法(DGCM)和熵权综合排序法, 建立桥梁结构服役状态的动态聚类评定模型; 采用该模型对11座桥梁进行状态评定, 并将评定结果与其他方法进行对比分析。结果表明: 在最佳聚类数目下的桥梁分类结果与另2种方法的结果完全一致; 相比既有的规范标准方法, 用所建模型能够更加准确科学地评定桥梁的实际服役状况。

【关键词】 桥梁; 服役状态; 动态分级聚类法(DGCM); 评定方法; 自振频率

Dynamic grading clustering method based model for evaluation of service state of bridge structure

LIU Chaofeng^{1,2} CAO Chunbo¹ LIU Caiwei³ ZHAO Shaowei^{1,2} LIU Zhipeng⁴

(1 School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China

2 Research Center of Civil Engineering Technology of Hebei Province, Hebei University of Technology,

Tianjin 300401, China 3 College of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao

Shandong 266033, China 4 Tianjin Highway Engineering Corporation, Tianjin 300041, China)

Abstract: In order to accurately and quickly assess the structural state of existing service bridges, combined with the inspection specifications and structural characteristics of bridge projects, a quantitative index system for the service status of reinforced concrete bridges was constructed from the four dimensions of geometric characteristics, material properties, environmental conditions and action types. Based on the DGCM and sorting method, a dynamic cluster evaluation model for the service statuses of bridge structures was established. The model was used to evaluate the statuses of 11 bridges and a comparison was made between the results and those by other methods. The results show that the results by bridge classification under the optimal number of clusters are completely consistent with the results by the other two methods, and that compared with the existing normative standard methods, it can more accurately and scientifically assess the actual service status of bridges, guide prioritizing of bridge maintenance and resource allocation activities, and provide a basis for developing a reasonable bridge management strategy.

^{*} 文章编号: 1003-3033(2018)09-0098-05; DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2018.09.017

收稿日期: 2018-06-10; 修稿日期: 2018-07-30

^{**} 通信作者: 赵少伟(1972—), 男, 河北保定人, 博士, 教授, 主要从事桥梁评估与加固方面研究。E-mail: 1121962009@ qq.com。

Keywords: bridge; service status; dynamic grading clustering method(DGCM); assessment method; natural frequency

0 引 言

桥梁作为路网的关键节点,对发挥城乡交通功能尤为重要。然而,随着服役时间的延长,材料渐趋老化、结构性能退化等问题严重威胁着桥梁的安全^[1-2]。桥梁服役状态评定分级,对制定合理的管养策略具有重要意义。

目前,国内桥梁服役状态评估主要是采用《公路桥梁技术状况评定标准》^[3]中的分层综合评定与单项指标控制相结合的方法。然而,AHP 法无法解决各类评估信息的模糊、不完全等问题^[4]。因此,研究者们提出桥梁服役状态评估的灰色理论法^[5]、可靠度评估法^[6]、模糊理论评估法^[7-8]、证据理论评估法^[4]、人工智能评估法^[9-10]等。这些评估方法没有统一的评估指标体系,缺乏统一的评估标准,都有局限性,如 AHP 法需要专家参与确定权重,主观性较强;可靠度方法需要依托固定公式,不便于与工程实际结合;人工智能方法需要样本训练,样本规模影响评估精度等。王柏璿^[11]提出基于模糊 C 均值聚类法(Fuzzy C-means Clustering Method,FCM)的桥跨

结构状态评价法,在一定程度上消除了人为主观因素的影响,但需要采用 Xie-Beni 有效性分析确定最佳聚类数目,计算过程较为繁琐。

动态分级聚类法(Dynamic Grading Clustering Method, DGCM)^[12]能够考虑数据的相似性和差异性,对样本进行动态聚类分析,获得最佳聚类数,不需要考虑评估等级标准。因此,笔者将在分析桥梁服役状态影响因素的基础上,结合桥梁监测检测数据与人工检查信息,构建桥梁结构服役状态量化指标体系,建立基于动态分级的桥梁结构服役状态聚类评定模型,以期有助于提高动态分级的可靠性。

1 服役状态评估参数选取与量化

首先,根据桥梁结构特征、相关检测规范、工程检测报告等,选取客观合理、能够反映桥梁结构整体状态的评估指标。文中选取几何特征、材料性能、环境条件、作用类型等参数反映钢筋混凝土桥梁服役状态^[5-11, 13-14],构建桥梁结构服役状态评估指标及量化方法,见表 1。

表 1 桥梁结构服役状态评估指标及量化方法

Tab. 1 Evaluation indexes of bridge structure service status and their quantification

准则层	指标层	指标量化
几何特征	保护层厚度	D = 实测保护层厚度特征值 D_{me} / 保护层厚度设计值 D_{nd}
	钢筋分布状况	η = 实测钢筋间距特征值 S_{me} / 钢筋间距设计值 S_{md}
	裂缝宽度/mm	混凝土裂缝宽度最大值 C_w
材料性能	混凝土炭化	K_c = 实测平均碳化深度 $\overline{D_c}$ / 实测保护层厚度平均值 $\overline{D_{me}}$
	混凝土强度	k_{it} = 混凝土实测强度推定值 R_{it} / 混凝土强度设计值 R
	钢筋锈蚀/V	钢筋锈蚀电位最高值 V_m
	氯离子含量/%	氯离子含量的最大值 φ_{cl}
	混凝土电阻率/($\Omega \cdot m$)	混凝土电阻率最小值 Ω_m
环境条件	温度/℃	年最大温差 θ
	湿度/%	年平均相对湿度 R_H
作用类型	交通量	ρ = 当前交通量 Q_m / 设计交通路 Q_d
	超载率/%	实际轴载分布中轴重超过 14 t 所占的比例 β
	应变	校验系数 ζ = 静载下梁底测点应变值 S_e / 测点理论计算应变值 S_s
	自振频率	f = 实测自振基频 f_{mi} / 理论计算自振频率 f_{di}

表 1 中的参数可根据《公路桥梁承载能力检测评定规程》^[13]的相关规定计算或检测得到:①几何特征参数主要包括混凝土保护层厚度、受力钢筋分布状况、混凝土裂缝宽度等,决定着桥梁结构抵抗环境侵蚀和外界荷载作用的能力;②材料性能参数主

要包括混凝土强度、混凝土炭化、钢筋锈蚀情况、氯离子含量和混凝土电阻率等,影响桥梁结构材料的劣化,降低结构的耐久性和安全性;③作用类型参数主要包括交通量参数、超载率、静载应变、桥梁自振频率等因素,反映作用在桥梁结构上的交通流状态

以及结构整体性能变化。

2 服役状态聚类的动态分级模型

DGCM 法是根据桥梁结构服役状态参数的特征矩阵,对桥梁样本进行动态聚类,通过对比不同聚类数下的聚类函数,优选桥梁结构服役状态的最佳聚类数量,结合服役状态综合排序法进行等级评定。

1) 测定桥梁服役状态指标 x_{ij} , 构建桥梁样本的特征矩阵 $\mathbf{X}=(x_{ij})_{n \times m}$ 。其中, n 为桥梁样本数量, $i=1,2,\dots,n$; m 为服役状态指标总数, $j=1,2,\dots,m$ 。为均衡各指标对服役状态的影响,按下式对 \mathbf{X} 进行标准化处理,结果记为 $\mathbf{X}'=(x'_{ij})$ 。

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_j(x_{ij})}{\max_j(x_{ij}) - \min_j(x_{ij})} \quad (1)$$

2) 依据桥梁样本的标准化矩阵 \mathbf{X}' , 用熵权法^[15]计算状态指标权重向量 $\mathbf{W}=(w_j)_{1 \times m}$ 。

$$S_j = -k \sum_{i=1}^n P_{ij} \ln P_{ij} \quad (2)$$

$$P_{ij} = x'_{ij} / \sum_{i=1}^n x'_{ij} \quad (3)$$

表 2 桥梁样本的实测数据

Tab. 2 Measured data on bridge samples

样本 编号	桥梁服役状态评估指标													
	D	η	$\theta/^{\circ}\text{C}$	$R_H/\%$	ρ	$\beta/\%$	K_c	k_{it}	V_m/V	$\varphi_{cl}/\%$	$\Omega_m/(\Omega\cdot\text{cm})$	C_w/mm	f	ζ
1	1.09	0.96	57.50	54.30	0.85	1.32	0.30	1.11	-28	0.02	28 532	0.00	1.21	0.85
2	0.97	0.98	58.9	56.7	1.08	3.87	0.8	1.03	-204	0.15	19 863	0.06	1.13	0.89
3	0.91	0.99	60.2	58.1	1.18	5.24	1.2	0.98	-258	0.28	14 682	0.12	1.02	0.94
4	1.03	0.96	58.2	54.7	0.9	2.03	0.2	1.13	-59	0.08	25 326	0.02	1.18	0.88
5	0.82	1.05	62.7	59.2	1.38	7.13	1.7	0.92	-296	0.41	12 365	0.16	0.97	0.98
6	0.72	1.09	63.4	62.5	1.52	9.75	1.9	0.87	-372	0.59	10 086	0.2	0.93	1.04
7	0.87	1.01	60.6	58.6	1.22	5.56	1.3	0.96	-262	0.33	14 264	0.13	0.99	0.96
8	0.96	0.99	59.3	57.8	1.03	4.11	0.7	1.01	-216	0.13	18 524	0.08	1.12	0.91
9	0.68	1.11	62.9	64.2	1.49	10.52	2.1	0.84	-384	0.64	9 568	0.21	0.91	1.07
10	0.78	1.06	61.7	61.4	1.35	7.68	1.6	0.9	-308	0.48	11 254	0.18	0.96	1.01
11	0.85	0.99	61.2	58.7	1.28	5.64	0.95	0.94	-279	0.35	13 768	0.14	0.98	0.97

首先,根据式(1)对实测数据进行标准化处理,并利用式(2)~式(4)计算指标权重向量 $\mathbf{W}=(0.063, 0.087, 0.070, 0.064, 0.070, 0.065, 0.071, 0.068, 0.071, 0.073, 0.080, 0.069, 0.084, 0.065)$ 。其次,考虑国内外对桥梁技术状态划分为 5、7 或 9 级^[11, 14],这里设定样本聚类上限为 7 类、下限为 2 类,进行桥梁样本的动态聚类分析,动态聚类结果见表 3。聚类数 N 与聚类函数 F 的散

$$w_j = \frac{1 - S_j}{\sum_{j=1}^m (1 - S_j)} = \frac{1 - S_j}{m - \sum_{j=1}^m S_j} \quad (4)$$

式中: S_j 为第 j 个指标的信息熵; P_{ij} 为第 i 个桥梁样本的第 j 个指标与其全部指标的值的比值; k 为熵系数, $k=1/\ln n$ 。

3) 利用标准化矩阵 \mathbf{X}' 和指标权重向量 \mathbf{W} , 设定桥梁样本聚类数 N , 根据文献[12]中方法进行动态聚类,绘制聚类函数 F 与聚类数 N 的曲线图,确定最优聚类数。

4) 根据标准化矩阵 \mathbf{X}' 和指标权重向量 \mathbf{W} , 计算桥梁样本服役状态指数 $Y=(y_i)_{1 \times n}$, 进行桥梁样本服役状态的排序。综合样本聚类结果与服役状态排序,最终确定桥梁结构状态等级。

$$Y = \mathbf{W} \cdot \mathbf{X}' = \sum_{j=1}^m w_j \cdot x'_{ij} \quad (5)$$

3 工程实例分析

为验证文中方法的有效性与可靠性,选取某省境内 11 座具有代表性的钢筋混凝土桥梁为样本^[11]进行服役状态评估,表征桥梁服役状态的实测数据见表 2。

点图,如图 1 所示。

由图 1 可知:随着聚类数 N 的增加,聚类函数 F 值呈现阶段下降趋势。多项式拟合趋势线在 $N=6$ 时,聚类函数 F 最小。因此,最佳聚类数目取为 6。根据表 3,可以得到聚类数 $N=6$ 时,桥梁样本的最佳聚类结果为 5 类,即 $\{1, 4\}$ 、 $\{2, 8\}$ 、 $\{3, 7, 11\}$ 、 $\{5, 10\}$ 、 $\{6, 9\}$ 。为对比分析聚类结果的合理性,设定 $K=5$,分别采用 FCM 法、 K 均值聚类法(K -means

表 3 桥梁样本的动态聚类结果

Tab. 3 Dynamic clustering results of bridge samples

聚类数 N	桥梁样本编号										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	2
3	3	3	2	3	2	1	2	3	1	2	2
4	4	4	3	4	2	1	3	4	1	2	3
5	5	5	4	5	3	1	4	5	1	2	4
6	6	5	4	6	3	1	4	5	1	3	4
7	7	6	5	7	3	1	5	6	1	3	5

注：同一行中标为相同数字的样本，归为同一类别。

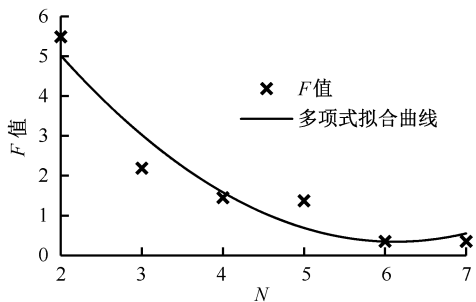


图 1 F - N 散点及拟合曲线

Fig. 1 Scatter plots and fitting curve of F - N

Clustering Method, KM) 分析桥梁样本, 结果见表 4。

表 4 聚类结果对比分析

Tab. 4 Clustering results comparison between three methods

方法	桥梁样本编号										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
DGCM	6	5	4	6	3	1	4	5	1	3	4
FCM	1	3	2	1	4	5	2	3	5	4	2
KM	2	5	1	2	4	3	1	5	3	4	1

由表 4 可知:FCM 聚类结果为 $\{1, 4\}$ 、 $\{2, 8\}$ 、 $\{3, 7, 11\}$ 、 $\{5, 10\}$ 、 $\{6, 9\}$;KM 聚类结果为 $\{1, 4\}$ 、 $\{2, 8\}$ 、 $\{3, 7, 11\}$ 、 $\{5, 10\}$ 、 $\{6, 9\}$ 。可见, 3 种方法的聚类结果完全一致, 验证了文中方法的可行性与有效性。为明确桥梁样本的技术状况等级, 采用式(5)得到服役状态指数(指数越大, 桥梁状态越差), 如图 2 所示。

结合聚类结果与状态指数排序, 将 $\{6, 9\}$ 定为 V 级, $\{10, 5\}$ 为 IV 级, $\{7, 11, 3\}$ 为 III 级, $\{8, 2\}$ 为 II 级, $\{4, 1\}$ 为 I 级。为验证该划分等级的合理性, 根据《公路桥梁技术状况评定标准》^[3] 得到各桥梁样本的技术状况评分, 按从大到小排序, 如图 3 所示。

根据《公路桥梁技术状况评定标准》^[3] 中桥梁技术状况分类界限, 即: I 级 $[95, 100]$ 、II 级 $[80,$

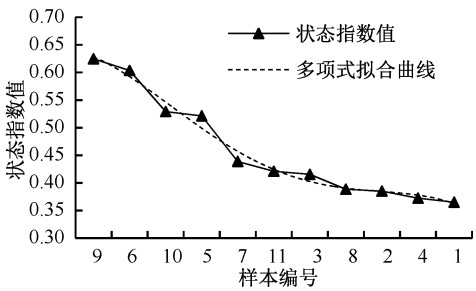


图 2 桥梁样本的状态指数

Fig. 2 State index values of bridge samples

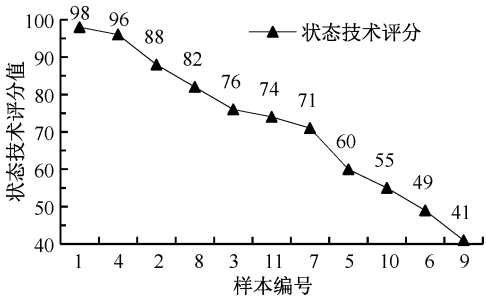


图 3 桥梁技术状态评分

Fig. 3 Bridge technology status ratings

95)、III 级 $[60, 80)$ 、IV 级 $[40, 60)$ 、V 级 $[0, 40)$, 可知 $\{1, 4\}$ 为 I 级, $\{2, 8\}$ 为 II 级, $\{3, 11, 7, 5\}$ 为 III 级, $\{10, 6, 9\}$ 为 IV 级。从桥梁技术状态评分值散点图变化趋势可以看出, $\{3, 11, 7\}$ 、 $\{5, 10\}$ 、 $\{6, 9\}$ 分别划分为不同类别较为合理。根据桥梁技术状况分类界限, 样本 1、4 归为 I 级, 样本 2、8 归为 II 级, 样本 3、11、7 评分值较为接近, 都为 70 分以上, 归为 III 级; 而样本 5 与 10 评分值较为接近, 样本 5、10、6、9 可归为 IV 级, 但是动态聚类最佳聚类级别为共 5 级, 据样本评分值的差距, 样本 5、10、6、9 可进一步细分为 $\{5, 10\}$ 为 IV 级, $\{6, 9\}$ 为 V 级。文中方法既考虑了评估指标的综合结论, 又考虑了单个评估指标之间的差异性, 动态聚类分析桥梁技术状态分类分级, 计算过程简便, 工作量较小, 可为桥梁分级管理与养护次序提供技术支持。

4 结 论

1) 针对桥跨结构服役状态评定分级问题, 挖掘实测数据潜在的结构信息, 建立桥梁结构整体状态量化参数指标体系, 运用 DGCM 思想分析最佳聚类数目, 结合服役状态指数确定桥梁服役状态等级。该方法计算简便, 需求数据类型单一, 可实现后续检测桥梁录入整体样本中的自动分类分级。

2) 文中方法能够动态模拟聚类过程, 直接获取

最佳聚类数目,且最佳聚类数目下的分类结果与另2种方法的结果完全一致。

3) 随着后续检测桥梁数量的增多,最佳聚类数

目可能发生变化,但是整体桥梁样本的分类分级层次清晰,可指导确定桥梁维护和资源配置次序,为制定合理的桥梁管养策略提供依据。

参考文献

- [1] 胡健勇, 苏木标. 基于监测数据的铁路桥梁结构健康状态评估[J]. 石家庄铁道大学学报: 自然科学版, 2016, 29(3): 39-44.
HU Jianyong, SU Mubiao. Assessment of the health status of railway bridge structure based on monitoring data[J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University: Natural Science, 2016, 29(3): 39-44.
- [2] SASMAL S, RAMANJANEYULU K. Condition evaluation of existing reinforced concrete bridges using fuzzy based analytic hierarchy approach[J]. Expert Systems with Applications, 2008, 35(2): 1 430-1 443.
- [3] JTG/T H21—2011, 公路桥梁技术状况评定标准[S].
JTG/T H21—2011, Standards for technical condition evaluation of highway bridges[S].
- [4] 刘小玲, 黄侨, 任远, 等. 斜拉桥多指标证据融合的综合评估方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(3): 74-79.
LIU Xiaoling, HUANG Qiao, REN Yuan, et al. Comprehensive evaluation method of cable-stayed bridges with multi-index evidence fusion[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(3): 74-79.
- [5] 刘均利, 方志. 基于灰色关联度的在役双曲拱桥耐久性综合评估[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2010, 37(9): 1-6.
LIU Junli, FANG Zhi. Durability evaluation of existing two-way curved arch bridges using grey relation analysis[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2010, 37(9): 1-6.
- [6] STRAUSS A, KARIMI S, KOPF F, et al. Monitoring-based performance assessment of rail-bridge interaction based on structural reliability[J]. Structural Concrete, 2015, 16(3): 342-355.
- [7] KIM Y M, KIM C K, HONG S G. Fuzzy based state assessment for reinforced concrete building structures[J]. Engineering Structures, 2006, 28(11): 1 286-1 297.
- [8] LIANG Mingte, WU Jaihe, LIANG C. Multiple layer fuzzy evaluation for existing reinforced concrete bridges[J]. Journal of Infrastructure Systems, 2001, 7(4): 144-159.
- [9] 王彬, 徐秀丽, 李雪红, 等. 基于自适应模糊推理和 RBF 网络的桥梁安全评估[J]. 中国安全科学学报, 2017, 27(5): 164-168.
WANG Bin, XU Xiuli, LI Xuehong, et al. Safety assessment of bridge based on RBF neural network and adaptive fuzzy inference[J]. China Safety Science Journal, 2017, 27(5): 164-168.
- [10] 胡志坚, 常英, 乐云祥, 等. 基于模糊神经网络的混凝土桥梁状态评估系统研究[J]. 桥梁建设, 2009 (1): 19-21.
HU Zhijian, CHANG Ying, YUE Yunxiang, et al. Research of a condition assessment system for concrete bridge based on fuzzy-neural network[J]. Bridge Construction, 2009 (1): 19-21.
- [11] 王柏璿. 钢筋混凝土梁桥横向分布及服役状态评价方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
WANG Baiyong. Research on evaluation approach of lateral distribution and in-service condition for reinforced concrete bridge[D]. Chuangchun: Jilin University, 2015.
- [12] 刘朝峰, 兰玥, 张鹏博, 等. 供水管网震后流量监测点的动态分级优化布局研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2018, 14(1): 12-17.
LIU Chaofeng, LAN Yue, ZHANG Xiaobo, et al. Study on dynamic classification for layout optimization of post-earthquake flow monitoring points in water supply network[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2018, 14(1): 12-17.
- [13] JTG/T J21—2011, 公路桥梁承载能力检测评定规程[S].
JTG/T J21—2011, Specification for inspection and evaluation of load-bearing capacity of highway bridges[S].
- [14] 贾布裕, 余晓琳, 颜全胜. 基于离散动态贝叶斯网络的桥梁状态评估方法[J]. 桥梁建设, 2016, 46(3): 74-79.
JIA Buyu, YU Xiaolin, YAN Quansheng. Method of bridge condition assessment based on discrete dynamic networks[J]. Bridge Construction, 2016, 46(3): 74-79.
- [15] 章清, 王生新, 汪鹏飞, 等. 基于熵权可拓理论的管道坡面水毁危险性评价[J]. 中国安全科学学报, 2017, 27(12): 110-115.
ZHANG Qing, WANG Shengxin, WANG Pengfei, et al. Assessment of risk of flood damage at slope of pipeline based on combination of entropy method and extension theory[J]. China Safety Science Journal, 2017, 27(12): 110-115.



作者简介: 刘朝峰 (1984—), 男, 河北晋州人, 博士, 讲师, 主要从事基础设施防灾减灾方面的研究。E-mail: liucf8403@hebut.edu.cn。