

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.140



开放科学(资源服务)标识码(OSID):



基于3A指标的斜拉桥上部结构状态评估

秦劲东^{1a}, 方圣恩^{1a,1b}, 张玮², 黄学漾², 郭新宇^{1a}

(1. 福州大学 a. 土木工程学院; b. 土木工程防震减灾信息化国家地方联合工程研究中心, 福州 350108;
2. 福建省建筑科学研究院有限公司, 福州 350108)

摘要:针对桥梁状态评估过程中数据量大、分析困难的问题,根据某斜拉桥的监测数据,采用五度指标评估方法对其上部结构各部件进行分析,提出一种基于权重系数的综合评价指标,用于评估斜拉桥上部结构的整体安全状态。针对现存桥梁评估方法中计算复杂的问题,提出3A指标,包括幅值偏移量、异常度和均值波动。相对于五度指标,新指标的计算更便捷,更方便工程人员进行现场评估。最后,用3A指标对斜拉桥进行评估,并将评估结果与五度指标进行比较分析,发现3A指标的评估结果与五度指标基本一致。

关键词:桥梁状态评估;3A指标;幅值偏移量;异常度;均值波动

中图分类号:U446.3 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2022)03-0071-08

Superstructure state evaluation of cable-stayed bridge using 3A indicators

QIN Jindong^{1a}, FANG Shengen^{1a,1b}, ZHANG Wei², HUANG Xueyang², GUO Xinyu^{1a}

(1a. School of Civil Engineering; 1b. National & Local Joint Engineering Center for Seismic and Disaster and Informatization of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, P. R. China; 2. Fujian Academy of Building Research Co., Ltd, Fuzhou 350108, P. R. China)

Abstract: To solve the problem of huge data and analysis paralysis in bridge state assessment, the Five Indices Method is used to analyze the superstructure components of a cable-stayed bridge according to monitored data. Then, a comprehensive evaluation index incorporating weight coefficients is proposed to evaluate the safety condition of the cable-stayed bridge superstructure based on the existing five indices. After that, to overcome the calculation difficulty in bridge evaluation activities, a series of 3A indicators are proposed and individually termed as the amplitude offset, the abnormal degree and the average value fluctuation. Compared with the previous five indices, the three new indicators require less computation, and thus, are more convenient for engineers to conduct on-site evaluation. The 3A indicators are used to evaluate the safety condition of the cable-stayed bridge, and the results are compared with the five indices.

收稿日期:2021-05-02

基金项目:国家自然科学基金(52178276)

作者简介:秦劲东(1995-),男,主要从事桥梁健康监测研究,E-mail:jqqin001@163.com。

方圣恩(通信作者),男,教授,博士生导师,E-mail:shengen.fang@fzu.edu.cn。

Received:2021-05-02

Foundation item:National Natural Science Foundation of China (No. 52178276)

Author brief:QIN Jindong (1995-), main research interest: bridge health monitoring, E-mail: jqqin001@163.com.

FANG Shengen (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: shengen.fang@fzu.edu.cn.

The analysis results show that the superstructure state of the cable-stayed bridge evaluated by the 3A indicators is basically consistent with the five indices.

Keywords: bridge state assessment; 3A indicators; amplitude offset; abnormal degree; average value fluctuation

大跨度桥梁通常承受荷载大、服役年限长、重要性程度高,对安全性和耐久性都有很高的要求。桥梁在运营阶段可能会受到环境、交通和人为等因素的影响而产生损伤,造成其破坏甚至坍塌,引发灾难性事故^[1]。近年来,中国多地发生桥梁事故,造成了巨大的生命财产损失。因此,通过技术手段对桥梁的工作状态和健康状况做出诊断、识别和预测,并对其安全性和耐久性进行评估,具有十分重要的意义。早期的桥梁评估主要是基于人工检测方法,其检测结果受人为因素影响较大,且不适用于复杂大跨桥梁结构。所以,为更好地了解桥梁运营状况,可通过安装健康监测系统以实时获取环境信息和结构响应信息,并对桥梁健康状态做出评估^[2-4]。

很多学者在桥梁评估方面开展了大量研究工作,主要用到可靠度理论^[5-6]、层次分析法^[7-9]、神经网络^[10]、模糊理论^[11-12]和有限元分析^[13]等方法。但上述方法通常操作复杂、主观性强,且不能充分利用桥梁监测数据,因此,需要挖掘监测数据的潜力,实现对桥梁状态的准确评估。有学者提出将五度指标^[14]用于评估桥梁状态,该指标借鉴证券技术分析中的 K 线技术指标,从安全度、承载度、异常度、振荡度和动向度 5 个方面对监测数据进行分析,并对桥梁的状态变化趋势做出预测^[14]。

笔者针对某斜拉桥 14 d 的监测数据,首先利用五度指标^[14]对斜拉桥的主梁、桥塔和斜拉索进行状态评价;然后提出一种综合评估指标,判断上部结构状态;最后针对目前桥梁评估方法中计算复杂等问题,提出一组新的指标:3A 指标,包括 Amplitude offset(幅值偏移量)、Abnormal degree(异常度)和 Average value fluctuation(均值波动),用于桥梁上部结构的分部评价和综合性评估,并将两种指标的评估结果进行对比,验证所提出指标的合理性。

1 工程概况

某斜拉桥全长 453.0 m,跨径布置为 50 m+60 m+110 m+110 m+60 m+50 m。桥面总宽 29.5 m=2.5 m(人行道)+9.75 m(行车道)+5.0 m(分隔带)+9.75 m(行车道)+2.5 m(人行道)。主桥采用钢拱塔斜拉桥结构形式,主梁为预应力钢筋混凝土连续箱梁,主塔采用等腰梯形闭合截面钢箱拱结构。

因该桥结构形式特殊,为保障安全性,运营多年后安装了健康监测系统。根据大桥的结构特点,选择受力较不利截面和变形较大截面作为重点监测对象,包括主梁的跨中、1/4 和 3/4 截面的振动加速度。其中,主梁振动采用加速度传感器测量,布置于每跨跨中截面以及 3#跨和 4#跨的 1/4、3/4 截面,即 B、D、F、G、H、K、L、M、O、Q 截面(图 1),共计 10 个加速度传感器。钢拱塔振动采用加速度传感器测量,布置于拱塔 U、V、W 截面,每个截面外侧各布置 1 个加速度传感器,如图 2 所示。斜拉索索力采用频率法测量,索力传感器附着于斜拉索表面,选取各索面最长、最短和中间长度的斜拉索作为监测对象,4 索面共计 12 根,测点布置如图 3 所示。

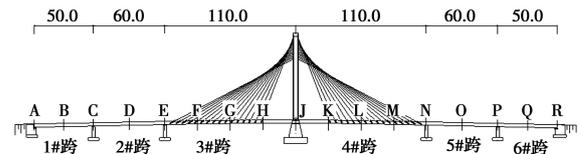


图 1 主梁监测截面(单位:m)

Fig. 1 Monitoring sections of the main girders (unit :m)

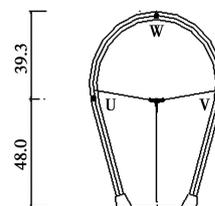


图 2 桥塔监测位置(单位:m)

Fig. 2 Monitoring locations of the bridge tower (unit :m)

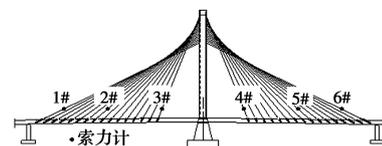


图 3 索力传感器布置

Fig. 3 Layout of cable sensors

2 监测数据统计值

采用 14 d 的监测数据对该斜拉桥上部结构的状况进行分析。采集主梁、桥塔和斜拉索的加速度实测数据,并进行滤波降噪等预处理,其中,主梁和桥塔采用加速度时程数据,而索力数据经模态参数

识别后提取基频和倍频,参考《基于环境振动激励的桥梁拉索索力测试方法》(DB31/T 973—2016)^[15],由式(1)计算索力值。最后,对主梁、桥塔和斜拉索的数据进行统计运算,得到表1~表3。

$$T = 4mL^2 \left(\frac{f_n}{n} \right)^2 - \frac{n^2 EI \pi^2}{L^2} \quad (1)$$

式中: T 为索力,N; m 为单位长度拉索质量; L 为拉索的计算长度,m; f_n 为第 n 阶振动频率; n 为拉索自振频率的阶数; E 为拉索钢丝弹性模量; I 为拉索截面抗弯惯矩, m^4 。

表1 桥塔顶端振动加速度

Table 1 Vibrational accelerations at tower top

时间/d	振动加速度/($m \cdot s^{-2}$)		
	最大值	最小值	平均值
1	0.418 6	-0.407 0	-2.11×10^{-8}
2	0.413 9	-0.417 0	4.64×10^{-9}
3	0.446 4	-0.461 5	2.85×10^{-9}
4	0.308 5	-0.322 2	2.76×10^{-9}
5	0.384 4	-0.330 9	6.31×10^{-9}
6	0.409 7	-0.411 1	2.13×10^{-10}
7	0.414 2	-0.408 7	9.07×10^{-9}
8	0.403 5	-0.400 6	-2.66×10^{-8}
9	0.370 4	-0.390 1	8.39×10^{-9}
10	0.352 5	-0.344 1	1.19×10^{-8}
11	0.353 4	-0.399 1	-1.24×10^{-8}
12	0.391 5	-0.399 3	2.93×10^{-8}
13	0.373 3	-0.374 0	-3.80×10^{-9}
14	0.357 0	0.363 9	9.11×10^{-10}

表2 4#跨跨中振动加速度

Table 2 Mid-span vibrational accelerations of 4# span

时间/d	振动加速度/($m \cdot s^{-2}$)		
	最大值	最小值	平均值
1	0.204 1	-0.356 3	3.80×10^{-9}
2	0.207 6	-0.222 2	-1.84×10^{-9}
3	0.169 1	-0.173 9	-8.72×10^{-10}
4	0.252 1	-0.181 3	-3.34×10^{-9}
5	0.260 9	-0.171 8	1.31×10^{-8}
6	0.229 2	-0.355 8	-5.71×10^{-10}
7	0.280 0	-0.355 7	2.66×10^{-9}
8	0.197 5	-0.169 2	-1.49×10^{-8}
9	0.235 1	-0.189 4	-2.44×10^{-9}
10	0.232 1	-0.169 2	-3.09×10^{-9}
11	0.210 0	-0.214 0	-4.04×10^{-9}
12	0.224 4	-0.171 1	-4.94×10^{-10}
13	0.138 1	-0.357 5	-7.57×10^{-10}
14	0.186 0	-0.357 0	-5.53×10^{-9}

表3 上游侧5#斜拉索索力数据

Table 3 Internal forces of upstream side 5# cable

时间/d	5#斜拉索索力/kN		
	最大值	最小值	平均值
1	1 824.44	1 773.05	1 805.13
2	1 826.65	1 769.63	1 803.28
3	1 826.65	1 761.09	1 800.46
4	1 915.02	1 756.75	1 818.01
5	1 822.55	1 780.21	1 796.55
6	1 818.77	1 777.87	1 798.57
7	1 822.71	1 756.29	1 791.71
8	1 819.24	1 761.86	1 798.70
9	1 811.37	1 778.81	1 795.71
10	1 815.77	1 740.84	1 787.57
11	1 820.97	1 749.02	1 791.94
12	1 815.77	1 736.52	1 788.70
13	1 812.63	1 750.25	1 791.24
14	1 820.97	1 746.85	1 797.50

3 基于五度指标的斜拉桥上部结构状况评估

参考《公路桥梁技术状况评定标准》(JTG/T H21—2011)^[16],结合五度指标^[14]分析斜拉桥的监测响应数据,对上部结构中的主梁、桥塔和斜拉索进行状态评估。

3.1 安全度

利用实测监测参数的最大值和最小值与设计计算值进行比较,用于判别当前监测结构的设计使用程度。规定安全度指标不应大于100%。

$$sfd = \frac{V}{h} \times 100 \quad (2)$$

式中: V 为监测参数实测值; h 为监测参数设计允许的最大值; sfd 为设计能力使用程度。

3.2 承载力

将本周期内监测参数HLA线图(包含监测参数最大值(High)、最小值(Low)和平均值(Avg))的极值幅度与过去若干周期的HLA线图的极值幅度进行比较,判别当前周期内监测参数的极值变化程度,以此反映当前结构承载水平的增加或减少。默认的承载力预警阈值为连续几个周期内 ≥ 100 。

$$czd = \left[\frac{h - lv(h, n)}{hv(h, n) - lv(h, n)} \right] \times 100 \quad (3)$$

式中: h 为某周期内监测参数HLA线图的最大值; $hv(h, n)$ 为最近 n 周期内监测参数HLA线图的最大值; $lv(h, n)$ 为最近 n 周期内监测参数HLA线图

的最大值的最小值。

3.3 异常度

将本日内监测参数的平均值与最近 n 天的移动平均值比较, 判别当前监测结构参数的波动偏离程度。规定异常度指标不超过 0.15。

$$gl = \frac{|\text{avg} - \text{ma}(\text{avg}, n)|}{\text{ma}(h, n) - \text{ma}(l, n)} \quad (4)$$

式中: avg 为某天监测参数的平均值; $\text{ma}(\text{avg}, n)$ 为最近 n 天各天监测参数平均值的移动平均值; $\text{ma}(h, n)$ 为最近 n 天各天监测参数线最大值的移动平均值; $\text{ma}(l, n)$ 为最近 n 天各天监测参数线最小值的移动平均值;

3.4 振荡度

计算出每个周期极值振荡上下值, 然后计算出不同周期的累积振荡, 再经过统计加权平滑处理得到振荡度指标。通常情况下, 振荡度指标在 20~80 之间, 代表监测对象平稳; 大于 80 或小于 20, 需设置预警信号。

$$\begin{cases} th_i = \max(h_i, h_{i-1}) \\ tl_i = \min(lo_i, lo_{i-1}) \end{cases} \quad (5)$$

式中: i 为计算某周期测值数据振荡上下值时该周期的编号; th_i 为某周期测值相对于前一周期测值的向上值; tl_i 为某周期测值相对于前一周期测值的向下值。

$$\begin{cases} ACC1_i = \frac{\sum_{k=n-2+1}^n (\text{avg}_k - tl_k)}{\sum_{k=n-2+1}^n (th_k - tl_k)} = \frac{\sum_{k=n-1}^n (\text{avg}_k - tl_k)}{\sum_{k=n-1}^n (th_k - tl_k)} \\ ACC2_i = \frac{\sum_{k=n-7+1}^n (\text{avg}_k - tl_k)}{\sum_{k=n-7+1}^n (th_k - tl_k)} = \frac{\sum_{k=n-6}^n (\text{avg}_k - tl_k)}{\sum_{k=n-6}^n (th_k - tl_k)} \\ ACC3_i = \frac{\sum_{k=n-14+1}^n (\text{avg}_k - tl_k)}{\sum_{k=n-14+1}^n (th_k - tl_k)} = \frac{\sum_{k=n-13}^n (\text{avg}_k - tl_k)}{\sum_{k=n-13}^n (th_k - tl_k)} \end{cases} \quad (6)$$

式中: i 为计算第 i 个周期的累积振荡时当天的编号; k 为循环变量; $ACC1$ 为最近 n_1 周期内测值的累积振荡; $ACC2$ 为最近 n_2 周期内测值的累积振荡; $ACC3$ 为最近 n_3 周期内测值的累积振荡。

$$u_{os} = \frac{ACC1 \times 7 \times 14 + ACC2 \times 2 \times 14 + \leftarrow \frac{ACC3 \times 2 \times 7}{14 + 2 \times 7} \times 100 \quad (7)$$

3.5 动向度

根据多个周期中的均值进行比较, 寻求在此期间内监测参数的上升动向与下降动向, 以透视出该测量值的变化方向、强弱和趋势。长期来看, 动向度指标应在 25~75 之间, 大于 75 或小于 25 时可以设置预警。

$$\begin{cases} \text{ain}_j = \text{avg}_j - \text{avg}_{j-1}, & \text{avg}_j > \text{avg}_{j-1} \\ \text{ade}_j = \text{avg}_{j-1} - \text{avg}_j, & \text{avg}_j < \text{avg}_{j-1} \end{cases} \quad (8)$$

式中: j 为分析特定周期(第 n 周期)之前 n_1 个周期到该周期内从前往后各周期的编号。

当 $\text{avg}_j > \text{avg}_{j-1}$ 时, $\text{ade}_j = 0$; 当 $\text{avg}_j < \text{avg}_{j-1}$ 时, $\text{ain}_j = 0$ 。

$$\begin{cases} \text{sain}_n = \sum_{l=n-14+1}^n \text{ain}_l = \sum_{l=n-13}^n \text{ain}_l, & \text{ain}_l > 0 \\ \text{sade}_n = \sum_{l=n-13}^n \text{ade}_l, & \text{ade}_l > 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中: l 为循环变量; sain_n 为第 n 周期之前 n_1 个周期到该周期内的累积升幅; sade_n 为第 n 周期之前 n_1 个周期到该周期内的累积降幅。

$$RSI = \frac{\text{sain}_n}{\text{sain}_n + \text{sade}_n} \times 100 \quad (10)$$

3.6 分部评估结果

根据结构对称性, 选取 4#、5# 和 6# 跨跨中、桥塔以及 4# 跨上游侧的斜拉索, 采用五度指标进行评估, 得到表 4~表 6。由评估结果可知: 6# 拉索的振荡度指标为 82.65, 不满足指标要求, 而其他部件均满足五度指标要求。

表 4 主梁评估结果

Table 4 Evaluation results of main beam

指标名称	4# 跨跨中	5# 跨跨中	6# 跨跨中
安全度	每日指标均小于 100%	每日指标均小于 100%	每日指标均小于 100%
承载度	99.84	26.98	89.98
异常度	9.13×10^{-9}	3.24×10^{-9}	5.03×10^{-9}
振荡度	60.63	49.68	58.92
动向度	44.35	50.16	50.22

表 5 桥塔评估结果

Table 5 Evaluation results of tower

指标名称	桥塔顶端	塔身一半南侧	塔身一半北侧
安全度	每日指标均小于 100%	每日指标均小于 100%	每日指标均小于 100%
承载度	29.94	23.19	27.59

续表 5

指标名称	桥塔顶端	塔身一半南侧	塔身一半北侧
异常度	1.14×10^{-7}	5.77×10^{-5}	5.55×10^{-5}
振荡度	50.32	49.68	50.41
动向度	53.94	46.75	46.78

表 6 斜拉索评估结果

Table 6 Evaluation results of cables

指标名称	4#索	5#索	6#索
安全度	每日指标均 小于 100%	每日指标均 小于 100%	每日指标均 小于 100%
承载度	80.63	9.27	10.9
异常度	2.75×10^{-2}	1.53×10^{-4}	1.26×10^{-1}
振荡度	65.29	66.24	82.65
动向度	39.62	44.58	45.25

3.7 上部结构整体评估

3.7.1 评估规则 为评估斜拉桥上部结构的整体状态,结合五度指标^[14]提出了一个综合评估指标,将主梁、桥塔和斜拉索视为一个体系。

上部结构评估过程中的一些因素,例如部件的种类、指标的使用方法等,都会影响最终评估结果。通过引入权重系数,将各类部件结合在一起,可以实现对上部结构的综合性评价。各部件的权重系数取值取决于其功能和重要程度,例如,斜拉索用于连接主梁和桥塔,其健康状况直接影响桥梁上部结构的安全,所以,其重要性高于主梁和桥塔。

在斜拉桥的所有拉索中,端锚索的长度最大,其承受索力较大。当端锚索发生破坏导致张力下降时,旁边拉索数量较少,不能很好地分担索力,这对上部结构的整体受力不利,所以,索力数据取端锚索(6#索)的索力数据。由于所取斜拉索锚固于桥塔的南侧,故桥塔振动加速度数据取塔顶和塔身一半南侧位置的数据。主梁振动加速度数据取最不利点,即 4#跨跨中位置。

使用五度指标^[14]对主梁、桥塔和斜拉索进行评估时,五个指标的重要程度不同。根据各指标的重要程度,赋予各指标不同的分值,各类指标及相应分值见表 7。五度指标^[14]中,由于安全度是反映使用程度的指标,如果监测响应不满足安全度指标,意味着其超过了设计允许值,部件可能会损坏,所以规定部件若不满足安全度指标,直接判断部件的状态发生了恶化,需要进行进一步检查和维修加固。

表 7 综合评估下五度指标分值

Table 7 Individual scores for the five indices under comprehensive evaluation

指标名称	字母代表	分值
安全度	A	40
承载度	B	15
异常度	C	15
振荡度	D	15
动向度	E	15
部件得分	P_i	100

3.7.2 综合评估步骤 评估步骤:

1)采集加速度数据并进行预处理,获取桥塔和主梁的加速度值,并换算斜拉索的索力值。

2)使用五度指标^[14]分别对斜拉桥上部结构的各类部件进行评价,得到表 8。将主梁、桥塔和拉索的得分设为 $P_i (i=1,2,3)$, 满分为 100 分。若不满足某类指标,则减去相应的分数。当某类部件得分低于 60 分或不满足安全度指标时,直接判定上部结构体系安全性不足,不再进入下一步。

3)设置主梁、桥塔和拉索的权重系数为 $\omega_i (i=1,2,3)$,将三者得分乘以权重系数后再相加,以此计算上部结构的综合得分 TS 。

$$TS = P_1 \times \omega_1 + P_2 \times \omega_2 + P_3 \times \omega_3 \quad (11)$$

4)根据综合得分判断上部结构的状态,得分与相应的评估状态见表 9。

表 8 上部结构分部评估结果

Table 8 Superstructure conditions after evaluation

指标	6#索	4#跨跨中	桥塔顶端	塔身一半南侧
安全度	✓	✓	✓	✓
承载度	✓	✓	✓	✓
异常度	✓	✓	✓	✓
振荡度	×	✓	✓	✓
动向度	✓	✓	✓	✓

表 9 斜拉桥上部结构状态划分

Table 9 Superstructure condition divisions of the cable-stayed bridge

得分	状态
$90 \leq TS \leq 100$	健康
$80 \leq TS < 90$	良好
$TS < 80$	警戒

3.7.3 综合评估结果 为研究权重系数取值对评

估结果的影响,将主梁、桥塔和斜拉索的权重系数设置为3组不同的比值,分别为0.3:0.3:0.4、0.25:0.25:0.5和0.2:0.2:0.6,经计算,综合评估指标分别为94、92.5、91分。

可见,采用上述权重系数进行评估,均得出该桥上部结构在监测的时间内没有发生恶化的结论。取第2组权重系数进行评估。

4 基于3A指标的斜拉桥上部结构状况评估

针对目前大跨度桥梁评估方法计算复杂、不便于工程现场人员理解和应用、海量数据下处理实时性不佳等问题,提出公式更简单、更便于现场快速计算的3A指标,包括Amplitude offset(幅值偏移量)、Abnormal degree(异常度)和Average value fluctuation(均值波动),以3种指标的英文首字母命名。3A指标公式简单、计算方便,方便工程人员理解和应用,可用于对大跨度桥梁上部结构各部件的当前状态进行快速判断。

3A指标与五度指标^[14]不同之处在于:主梁和桥塔的加速度数据均取绝对值,使评估中的计算过程得到简化。使用3A指标评估斜拉桥上部结构的状态,并将其与五度指标^[14]的评估结果进行对比,从而提供一种评估大跨度桥梁上部结构状态的新方法。

4.1 Amplitude offset(幅值偏移量)

对主梁和桥塔的振动加速度数据,可以规定其超限阈值,用于判断部件的状态。基于数据中的最大值反映部件最不利状态的特性,提出幅值偏移量指标,用来分析相应部件最大加速度的变化情况。若部件的最大加速度变化过大,就有超过规定阈值的可能,预示部件可能发生损伤。

斜拉索在上部结构中是最重要的部件,而现实中索力是始终变化的。若拉索承受的索力过大,可能导致拉索的损坏。

幅值偏移量计算式为

$$A_o = \frac{\max(h, n) - \text{mean}(h, n)}{\text{mean}(h, n)} \times 100\% \quad (12)$$

式中: h 为某个周期监测响应数据的最大值; $\max(h, n)$ 为 n 个周期监测响应数据的最大值; $\text{mean}(h, n)$ 为 n 个周期监测响应数据最大值的平均值。

根据各部件重要性程度,规定主梁和桥塔的振动加速度的幅值偏移量不应超过25%,索力不应超

过10%。

4.2 Abnormal degree(异常度)

变异系数是概率分布离散程度的一个归一化量度,定义为标准差与平均值之比。一般在比较两组数据的离散程度时,由于测量尺度或量纲不同,直接使用标准差不合适,故采用变异系数来消除影响。

斜拉桥每日的监测数据不断变化,为更好地研究数据的离散程度,提出异常度指标来判断监测数据的异常程度,进而掌握斜拉桥的运营状况。

$$A_d = \frac{S}{\text{mean}} \quad (13)$$

式中: S 为每日监测响应数据的标准差; mean 为每日监测响应数据的平均值。

由于监测数据受传感器自身因素和外部激励的影响较复杂,并考虑各部件的重要性,规定主梁和桥塔的异常度应小于2.5,索力异常度应小于0.1。

4.3 Average value fluctuation(均值波动)

数据均值能反映大跨度桥梁在一段时间内的基本状态,为此提出均值波动指标,通过均值的波动情况来判断桥梁部件的状态变化。

$$\begin{cases} A_{vf1} = \frac{\max(a, n) - \text{mean}(a, n)}{\text{mean}(a, n)} \\ A_{vf2} = \frac{\text{mean}(a, n) - \min(a, n)}{\text{mean}(a, n)} \end{cases} \quad (14)$$

式中: a 为某个周期内监测响应数据的均值; $\max(a, n)$ 为 n 个周期内监测响应数据均值的最大值; $\min(a, n)$ 为 n 个周期内监测响应数据均值的最小值; $\text{mean}(a, n)$ 为 n 个周期内监测响应数据均值的平均值。

规定主梁和桥塔的加速度数据 A_{vf1} 不应大于35%,为保持部件的状况稳定,最大值和最小值不应相差过大,即 A_{vf1} 和 A_{vf2} 之和不应大于55%。

索力 A_{vf1} 应小于10%, A_{vf1} 和 A_{vf2} 之和不应大于15%。

4.4 基于3A指标的斜拉桥上部结构整体评估

4.4.1 综合性评估 在3A指标中,均值波动指标更能反映桥梁在一段时间内的普遍状态,因此,规定幅值偏移量、异常度和均值波动指标的分值分别为25、25、50分。

类似五度指标^[14]的综合评估方法,基于3A指标的综合性评估方法步骤:

1)采集加速度数据并进行预处理,获取桥塔和主梁的加速度绝对值以及拉索索力值。

2)使用3A指标分别对大跨度桥梁上部结构的各类部件进行评价,列于表10。将主梁、桥塔和拉索的得分设为 $P_i(i=1,2,3)$,满分为100分。若不满足某类指标,则减去相应的分数。当部件得分低于50分时,直接判定上部结构体系安全性不足,不再进入下一步。

表10 评估结果

Table 10 Evaluation results

指标	6#索	4#跨中	桥塔顶端	塔身一半南侧
幅值偏移量	√	×	√	√
异常度	√	√	√	√
平均值波动	√	√	√	√

3)设置主梁、桥塔和拉索的权重系数为 $\omega_i(i=1,2,3)$,将三者得分乘以权重系数后再相加,以此计算上部结构的综合得分 TS 。

4)根据综合得分判断上部结构的状态,得分与相应的评估状态见表9。

4.4.2 评估结果 对上部结构进行评估时,将主梁、桥塔和斜拉索的权重系数设置为0.25:0.25:0.5,综合安全评估指标得分

$$TS = 75 \times 0.25 + 100 \times 0.25 + 100 \times 0.5 = 93.75 \text{分}$$

可见,斜拉桥的上部结构处于健康状态,在所监测的时间内其状态没有发生恶化。

4.5 评估分析比较

基于五度指标^[14]和3A指标的综合性状态评估方法,均判断斜拉桥的上部结构处于稳定状态,在研究的14d时间内,上部结构的状态没有发生恶化。不同之处在于:五度指标^[14]评估中,斜拉索的振荡度指标不满足要求;但是在3A指标的评估中,主梁的幅值偏移量指标不满足要求,这意味着两种指标的侧重点有所不同。

通过分析可得,3A指标对主梁的要求高于斜拉索,而五度指标^[14]对斜拉索的要求更高。斜拉桥在运营阶段会由于各种因素引起结构损伤,进一步导致索力下降,通常可对其进行更换来保证桥梁安全。而主梁作为永久部件,发生损伤时不可轻易更换,其重要性会随时间而增加。因此,当所评估桥梁运营时间较长时,更适合使用3A指标进行评估。

5 结论

针对目前大跨度桥梁状态评估时数据处理量

大、评价困难的难题,提出了3A指标和综合安全评估指标,对某斜拉桥的上部结构进行评估。通过与已有的五度指标评估结果进行对比,验证了所提指标的可行性和合理性。

1)提出的3A指标(幅值偏移量、异常度、均值波动)公式简单易懂,计算方便,便于工程人员现场快速判断桥梁状况。

2)不仅对斜拉桥上部结构各部件进行评价,还将各类部件视为一个整体,根据各部件的重要性赋予不同的权重系数,评估方法更全面。

3)对斜拉桥上部结构的评估结果与已有五度指标的评估结果基本一致,可为类似大跨度桥梁的状态评估提供方法依据。

参考文献:

- [1] SARMADI H, ENTEZAMI A, SAEEDI RAZAVI B, et al. Ensemble learning-based structural health monitoring by Mahalanobis distance metrics [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2021, 28(2): e2663.
- [2] 孙宗光,陈一飞. 桥梁结构健康监测分析与评价[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2017.
SUN Z G, CHEN Y F. Health monitoring analysis and evaluation for bridge structures [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017. (in Chinese)
- [3] 孙利民,尚志强,夏焯. 大数据背景下的桥梁结构健康监测研究现状与展望[J]. 中国公路学报, 2019, 32(11): 1-20.
SUN L M, SHANG Z Q, XIA Y. Development and prospect of bridge structural health monitoring in the context of big data [J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(11): 1-20. (in Chinese)
- [4] 单德山,罗凌峰,李乔. 桥梁健康监测2019年度研究进展[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(5): 115-125.
SHAN D S, LUO L F, LI Q. State-of-the-art review of the bridge health monitoring in 2019 [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, 42(5): 115-125. (in Chinese)
- [5] LI H, LI S, OU J P, et al. Reliability assessment of cable-stayed bridges based on structural health monitoring techniques [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2012, 8(9): 829-845.
- [6] CHEN X H, OMENZETTER P. A framework for reliability assessment of an in-service bridge using

- structural health monitoring data [J]. *Key Engineering Materials*, 2013, 558: 39-51.
- [7] JAMALI S, CHAN T H, NGUYEN A, et al. Reliability-based load-carrying capacity assessment of bridges using structural health monitoring and nonlinear analysis [J]. *Structural Health Monitoring*, 2019, 18 (1): 20-34.
- [8] 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 J Y, SU M B. Assessment of the health status of railway bridge structure based on monitoring data [J]. *Journal of Shijiazhuang Tiedao University (Natural Science Edition)*, 2016, 29(3): 39-44. (in Chinese)
- [9] 路双, 张永水. 桥梁健康监测挠度评估方法应用[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2013, 32(6): 1133-1136.
LU S, ZHANG Y S. Application of assessment methods of bridge health monitoring deflection [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 2013, 32(6): 1133-1136. (in Chinese)
- [10] CHENG Y C, GUO H B, WANG X Q, et al. Durability assessment of reinforced concrete bridge based on fuzzy neural networks [J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 838-841: 1069-1072.
- [11] SRINIVAS V, SASMAL S, KARUSALA R. Fuzzy based decision support system for condition assessment and rating of bridges [J]. *Journal of the Institution of Engineers (India): Series A*, 2016, 97(3): 261-272.
- [12] HAN L Z, ZHANG J Q, YANG Y. Comprehensive fuzzy assessment on the life-cycle environment impact of bridges [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 522/523/524: 122-131.
- [13] 王瑀, 荆国强, 王波. 桥梁健康监测系统在线结构分析及状态评估方法[J]. *桥梁建设*, 2014, 44(1): 25-30.
WANG Y, JING G Q, WANG B. Online structural analysis and state evaluation method for bridge health monitoring system [J]. *Bridge Construction*, 2014, 44 (1): 25-30. (in Chinese)
- [14] 张宇峰, 李贤琪. 桥梁结构健康监测与状态评估[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2018.
ZHANG Y F, LI X Q. *Bridge structure health monitoring & condition assessment* [M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2018. (in Chinese)
- [15] 上海市质量技术监督局. 基于环境振动激励的桥梁拉索索力测试方法: DB31/T 973—2016 [S]. 2016.
Shanghai Municipal Bureau of Quality and Technical Supervision. Cable tension measurement of bridge with ambient vibration method: DB31/T 973-2016 [S]. 2016. (in Chinese)
- [16] 交通运输部公路科学研究院. 公路桥梁技术状况评定标准: JTG/T H21—2011 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
Research Institute of Highway Ministry of Transport. Standards for technical condition evaluation of highway bridges: JTG/T H21-2011 [S]. Beijing: China Communication Press, 2011. (in Chinese)

(编辑 胡玲)