

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201707114

斜拉桥监测索力的时空评估方法

刘小玲¹, 汪 炳², 任 远³, 黄 侨³

(1. 宁波大学 海运学院, 浙江 宁波 315211; 2. 宁波大学 建筑工程与环境学院, 浙江 宁波 315211;
3. 东南大学 交通学院, 南京 210096)

摘 要: 为更准确地反映监测索力的综合状态, 提出一种考虑索力时间和空间特征的评估方法. 借鉴桥梁风险矩阵决策方法, 将时间指标和空间指标置于一个矩阵中进行评估决策. 时空评估等级分为四级, 分别为蓝色Ⅰ级、黄色Ⅱ级、橙色Ⅲ级和红色Ⅳ级. 时间指标同时考虑索力变化速率和变化幅度, 其中, 索力变化速率通过时间序列分析得到, 变化幅度通过索力变化率绝对值计算得到. 空间指标主要反映由偏载、单索损伤等因素造成的斜拉桥两侧索力的偏差程度, 采用 Canberra 距离表征. 以南京长江三桥 7 a 监测数据为例, 对 20 根长索进行索力时间和空间的综合评估, 得到群索评估表和评估等级分布图. 结果表明: 监测索力符合时间序列特性, 可采用一元线性回归模型提取趋势项; 斜拉索的时空评估等级在Ⅱ级及以上, 主要原因有索力变化趋势过快和上下游索力差异较大. 评估分布图为斜拉索的人工检查提供更有针对性的指导.

关键词: 斜拉桥; 索力; 时间序列; 矩阵决策法; 评估

中图分类号: U446.3

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2018)09-0036-04

Temporal and spatial evaluation method of monitoring cable forces for cable-stayed bridge

LIU Xiaoling¹, WANG Bing², REN Yuan³, HUANG Qiao³

(1. Faculty of Maritime and Transportation, Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China;

2. Faculty of Architectural, Civil Engineering and Environment, Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China;

3. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: To investigate the comprehensive state of cable forces, an evaluation method considering the temporal and spatial characteristics of the cable forces was proposed. Using the bridge risk matrix decision-making method, the time index and spatial index were taken into a matrix for evaluation and policy decision. The spatial and temporal evaluation levels are divided into four levels: blue grade I, yellow grade II, orange grade III and red grade IV. Time index considers both the change rate and the amplitude of the cable forces, in which the change rate of cable force was obtained by time series analysis, and the amplitude of cable force was obtained by absolute value of change rate of cable force. Spatial index mainly reflects the deviation degree of cable forces on both sides of cable-stayed bridge caused by unbalance loading and single cable damage, and was characterized by Canberra distance. Taking 7 years of monitoring data from Nanjing No.3 Yangtze River Bridge as an example, twenty long stay cables were evaluated by the temporal and spatial comprehensive evaluation method. The group cables evaluation grade table and evaluation grade distribution map were formed. Results show that monitoring cable forces conform to time series characteristics, and a linear regression model can be used to extract trend terms. The temporal and spatial evaluation levels of the cables are grade II and above, and the main reasons are excessively fast change rate of cable force and great differences between the upstream and downstream cable forces. The evaluation distribution map provides more targeted guidance for the manual inspection of stay cables.

Keywords: cable-stayed bridge; cable force; time series; matrix decision-making method; evaluation

大跨径斜拉桥一般均安装有健康监测系统, 以监测结构的变化状态, 通过各类传感器数据的获取, 分析结构潜在的损伤^[1]. 其中, 斜拉索索力是关键

测试项之一, 它是反映结构整体内力变化状态的重要参数. 在斜拉桥运营过程中, 由于塔顶偏位、主梁下挠、基础沉降等因素造成结构内力状态改变, 进而引起索力重分布^[2]. 因此在斜拉桥运营阶段尤其要关注索力的评估, 以掌握结构的安全性能.

目前在规范^[3]里索力的评估方法采用的是单索索力的变化率控制指标, 当索力变化率大于 10% 时, 判定索力可能异常. 该方法中阈值确定较为主

收稿日期: 2017-07-15

基金项目: 国家自然科学基金 (51208096, 51808301)

作者简介: 刘小玲 (1988—), 女, 博士, 讲师;

黄 侨 (1958—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 刘小玲, liuxiaolingseu@163.com

观,且无法考虑索力重分布的特性. 后来学者们提出了针对群索的评估方法,例如灰色关联度^[4-5]、变权综合法^[6]、蒙特卡罗法^[7]、神经网络法^[8]等,这些方法考虑了群索的关联性,然而在实际应用中也存在一定的劣势,比如忽略了索力的空间特性,评估仅根据某一时间点的一组数据进行,或应用较为复杂或物理意义不明等.

为了能充分利用积累的长期监测数据,对索力的时空特征进行全面描述,以得到一种便于应用推广的群索评估方法,本文以长期监测数据为基础,分析群索的时空特征,并建立群索的综合时空评估方法. 以一座运营 12 a 的大跨径斜拉桥为工程背景,验证本文方法的可行性与适用性.

1 群索的时空评估方法

1.1 索力的时空评估

群索的评估针对的是时间和空间的综合体现,分别由时间指标 R_1 和空间指标 R_2 决定. 本文借鉴风险评估中的基于 ALARP 的桥梁风险矩阵决策方法^[9],该方法是最常用且被普遍接受的定性风险分析方法. 它是通过将风险事故发生的概率和风险损失置于一个矩阵中进行风险水平决策. 在群索的综合评估中,将时间指标 R_1 和空间指标 R_2 置于一个矩阵中进行评估决策. 评估等级分为四级,分别为蓝色Ⅰ级、黄色Ⅱ级、橙色Ⅲ级和红色Ⅳ级. 具体见表 1,时间指标划分为 1 级至 4 级 4 个级别,分别代表一般、较大、重大和特大,空间指标划分为 1 级至 4 级,分别代表较好、轻微严重、较严重和特别严重.

针对每根索进行评定,然后可以绘制相应的索力分布评估图. 对于处于橙色及以上的斜拉索,需要进一步的现场检测、检查.

表 1 时空评估等级评定标准

Tab.1 Rating criteria for temporal and spatial evaluation				
时间、空间指标等级	较好	轻微严重	较严重	特别严重
特大	高度Ⅲ	高度Ⅲ	极高Ⅳ	极高Ⅳ
重大	中度Ⅱ	高度Ⅲ	高度Ⅲ	极高Ⅳ
较大	中度Ⅱ	中度Ⅱ	高度Ⅲ	高度Ⅲ
一般	低度Ⅰ	中度Ⅱ	中度Ⅱ	高度Ⅲ

1.2 时间指标的确定

从时间尺度来看,反映索力变化特征的是索力的变化速率和变化幅度,而两者的计算都依赖于恒载索力. 监测索力中最主要的环境影响成分是温度和车辆荷载,温度引起的索力变化具有季节性特点^[10],车辆荷载引起的索力变化具有不规则变动特性,这与时间序列^[11]的特点较为接近. 因此可通过时间序列分析将恒载索力趋势项提取出来.

假设在某段时间内的索力监测样本为一组含 n 个变量的有序观测值, $y_1, y_2, \dots, y_n$, 那么监测值 Y_t 可表达为

$$Y_t = T_t + S_t + R_t, t = 1, 2, \dots, n. \tag{1}$$

式中 T_t 为趋势项, S_t 为季节项, R_t 为随机项.

趋势项估计可采用一元线性回归模型^[12], 设 $y_i = a + bt + \varepsilon_i, t = 1, 2, \dots, n, \mathbf{Y} = (y_1, y_2, \dots, y_n)^T, \mathbf{Z} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & 2 & \dots & n \end{pmatrix}$, 则最小二乘估计结果为

$$(\hat{a}, \hat{b})^T = (\mathbf{Z}\mathbf{Z}^T)^{-1}\mathbf{Z}\mathbf{Y}. \tag{2}$$

其中 $\hat{b}$ 反映的是恒载索力的变化速率. 如果将当前评估时间 t 与前 $t/2$ 时间的变化速率进行对比,则可反映出索力变化趋势是趋于平缓还是加剧,定义索力变化速率比 $\gamma = \hat{b}_t / \hat{b}_{t/2}, \gamma$ 越小,则表明趋势越平缓,结构状态越安全.

而索力变化幅度也可通过索力变化率绝对值计算出来,定义索力变化幅度为

$$k = \frac{|y_n - y_1|}{y_1} \times 100\%. \tag{3}$$

索力变化幅度的阈值设定按拉索自身强度及相关文献^[13]建议,设为 40%. 表 2 给出了时间评估指标的评估等级标准.

表 2 时间评估指标的等级评定标准

Tab.2 Rating criteria for time assessment indexes	
R_1	评定标准
4	$20\% < k \leq 40\%, \gamma > 1.0$ 或 $k > 40\%$
3	$10\% < k \leq 20\%, \gamma > 1.0$ 或 $20\% < k \leq 40\%, \gamma \leq 1.0$
2	$k \leq 10\%, \gamma > 1.0$ 或 $10\% < k \leq 20\%, \gamma \leq 1.0$
1	$k \leq 10\%, \gamma \leq 1.0$

1.3 空间指标的确定

从空间尺度上来看,一般大跨径斜拉桥采用双索面形式,且多为两塔及以上,因此斜拉索具有空间效应. 为了考虑偏载、单索的损伤造成两侧索力的偏差过大的情况,需利用合适的指标来反映两组向量之间的相关性,在实际工程中,常用指标有皮尔逊相关系数、欧氏距离、街区距离、Canberra 距离,切比雪夫距离等,本文选取分类能力最好的 Canberra 距离^[14]来反映两侧索力的相关性,设上游、下游索力向量分别为 $\{U_i\}、\{V_i\}$, 则 Canberra 距离表示为

$$d = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{|u_i - v_i|}{u_i + v_i}. \tag{4}$$

式中 m 为上游索力监测样本数量. $0 \leq d \leq 1, d$ 越接近于 0,则上下游索力变化越一致.

对索力的空间评估指标等级评定标准制定如下:当 $d \leq 0.025$ 时, R_2 为 1 级,当 $0.025 < d \leq 0.05$

时, R_2 为 2 级, 当 $0.05 < d \leq 0.08$ 时, R_2 为 3 级, 当 $d > 0.08$ 时, R_2 为 4 级。

2 实例验证

2.1 工程概况

南京长江第三大桥(简称“南京三桥”)是上海至成都国道(GZ55)主干线的重要组成部分。主桥双塔双索面钢塔钢箱梁斜拉桥,主跨 648 m, 全长 1 288 m。全桥共设 8×21 对高强度平行钢丝外挤包高密度聚乙烯斜拉索,最小型号为 7×109 ,最大型号为 7×241 。南京三桥于 2005 年 10 月建成,该桥斜拉索布置外观效果图见图 1。



图 1 主桥斜拉索布置效果图

Fig.1 Layout of the stay cable on the main bridge

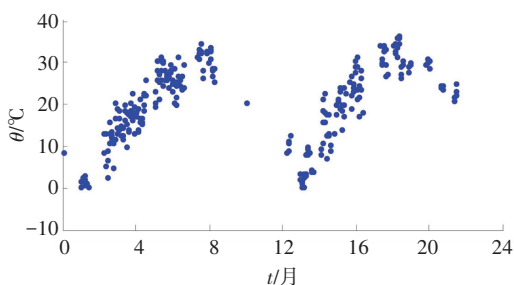
为保障南京三桥运营阶段健全性监测、评估及维护决策的要求,保证桥梁的安全运营,在主桥上安装了桥梁结构健康监测系统,每个拉索均布置有压力传感器^[15]。

由于拉索数量众多,需要对其进行编号。根据桥梁南北走向和上下游河道的特点,编号包含了 3 个字母和一个数字。第一个为 S 或 N,分别代表南塔或北塔,第二个为 J 或 A,代表为江侧或岸侧,第三个为 S 或 X,代表上游或下游,最后一个为 1 至 21,代表最短索至最长索。例如, SJS15 表示为南塔江侧上游 15 号拉索。

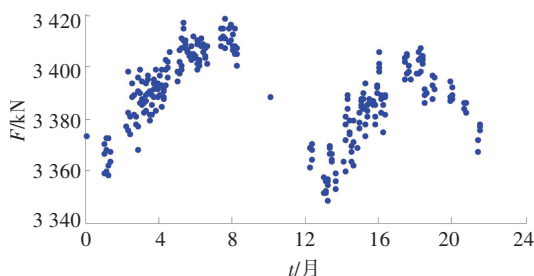
由于长索的振动频率比短索低,更易发生不利的振动损伤,出现的病害概率较高,因此对于长索的观测具有重要意义,进而本文主要以长索的索力分析为主。选取上游侧最长的 17 号至 21 号共 20 根斜拉索索力为研究对象。

2.2 索力的时空特征与评估

1) 索力的时间指标。以 SJS17 索为例,图 2 给出了该索 2008 年~2009 年两年的温度和索力数据,可以看出,索力与温度有极强的相关性,相关系数高达 0.96。采用一元线性回归方法,计算该索的时间评估指标。



(a) 温度



(b) 索力

图 2 SJS17 索 2008 年—2009 年两年的索力和温度数据

Fig.2 Cable force and temperature data of SJS17 cable from 2008 to 2009

选取数据段为 2006 年 5 月到 2012 年 8 月,首先通过时间序列分析得到恒载索力趋势项,然后分别计算 76 个月和前 38 个月的数据线性拟合结果,得到各自拟合的斜率分别为 -1.514 和 -0.831,如图 3 所示,得到 $\gamma = \hat{b}_t / \hat{b}_{t/2} = (-1.514) / (-0.831) = 1.82$ 。接着索力变化幅度 $k = \frac{|3\,290 - 3\,405|}{3\,405} \times 100\% = 3.4\%$ 。

根据表 2 确定其时间指标为 2 级。然后依照该方法得到其他索的时间指标。

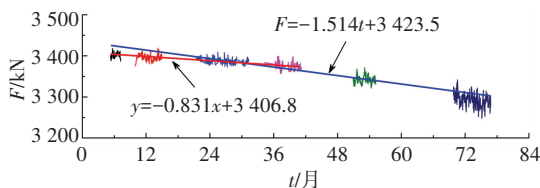


图 3 SJS17 号 2006—2012 年的索力数据及线性拟合结果

Fig.3 Cable force data and linear fitting results of SJS17 cable in 2006—2012

2) 索力的空间分布。对于 SJS17 和 SJX17 拉索的数据,如图 4 所示,上下游索力变化趋势保持较好的一致性,计算其 Canberra 距离 $d = 0.002$ 。查空间指标评定标准确定其空间指标为 1 级。以此方法可以得到其他索的空间指标。

最后,查表 1,得到 SJS17 索的时空综合等级为中度 II 级。

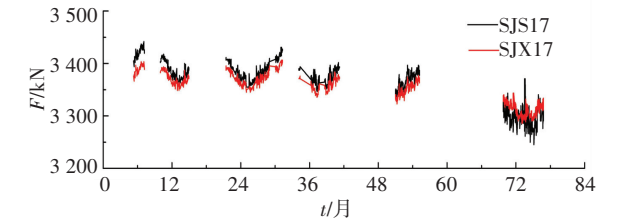


图 4 SJS17 和 SJX17 索 2006 年~2012 年的索力数据

Fig.4 Cable force data for SJS17 and SJX17 in 2006~2012

2.3 群索综合评估结果及分析

其他 19 根拉索的评估结果见表 3, 其中 SAS20 索、SAS18 索、SJX18 索和 NAX20 索出现故障, 因此相应的数据缺失, 有效结果为 18 根索. 表中, k 为索力变化幅度, γ 为索力变化速率比, d 为 Canberra 距离. 从表 3 中可以看出, 18 根索的时空综合等级分布 I 至 III 级之间, 其中 III 级的拉索有 1 根 (NAS19 号拉索), 该拉索与下游索力变化具有较大差异性, 需进一步的检查; II 级的拉索有 12 根, 这些拉索普遍时间评估等级较高, 这是由索力指数级的增长或下降造成的, 养护人员需密切观察索力的变化, 并检查相应拉索索体锈蚀断丝状况. 将评估等级形成索力的评估等级图, 如图 5 所示, 可以更加清晰地看出索力的状况, 便于养护人员进行更有针对性的拉索检查.

表 3 20 根典型长索的时空评估等级

Tab.3 Temporal and spatial evaluation rate of 20 typical long stay cables

索力编号	$k/\%$	γ	R_1	d	R_2	时空等级
SAS21	7.8	0.91	1	0.031	2	II
SAS20	—	—	—	—	—	—
SAS19	0.7	1.67	2	0.009	1	II
SAS18	—	—	—	—	—	—
SAS17	3.5	3.8	2	0.022	1	II
SJS17	3.4	1.82	2	0.002	1	II
SJS18	0.8	0.55	1	—	—	I
SJS19	1.1	0.88	1	0.018	1	I
SJS20	2	1	1	0.008	1	I
SJS21	8	2.73	2	0.03	2	II
NJS21	4.2	6.32	2	0.014	1	II
NJS20	8.9	1.27	2	0.043	2	II
NJS19	8.4	1	1	0.028	2	II
NJS18	1	1.45	2	0.004	1	II
NJS17	2	1.04	2	0.002	1	II
NAS17	8.5	48.33	2	0.013	1	II
NAS18	2.2	0.56	1	0.003	1	I
NAS19	0.1	1.53	2	0.055	3	III
NAS20	10.7	0.8	2	—	—	II
NAS21	1.2	0.56	1	0.012	1	I

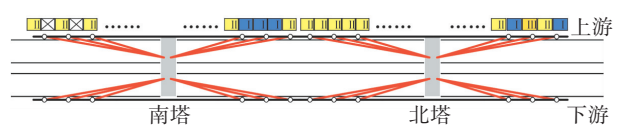


图 5 20 根典型长索的时空评估结果分布

Fig.5 Temporal and spatial evaluation result distribution of 20 typical long stay cables

3 结论

- 1) 以南京三桥的上游 20 根长索的 7 a 监测数据为样本, 进行时空综合评估. 监测索力符合时间序列特性, 可采用一元线性回归模型提取趋势项, 并考虑索力变化幅度, 作为索力的时间评估指标; 索力通常具有空间特性, 取两侧索力的 Canberra 距离作为空间评估指标.
- 2) 群索的评估是时间和空间的综合体现, 借鉴风险评估中的基于 ALARP 的桥梁风险矩阵决策方法, 将时间指标和空间指标置于一个矩阵中进行综合评估, 评估等级分为 4 级.
- 3) 评估样本中斜拉索的时空综合等级在 II 级及以上的主要原因有索力变化趋势过快、上下游索力差异较大, 评估分布图给养护人员提供更有针对性的拉索外观检查.

参考文献

[1] XU Zhaodong, ZENG Xin, LI Shu. Damage detection strategy using strain-mode residual trends for long-span bridges [J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2015, 29(5): 4014064-1. DOI: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000371

[2] MARTINS A M B, SIMÕES L M C, NEGRÃO J H J O. Optimum design of concrete cable-stayed bridges [J]. Engineering Optimization, 2016, 48(5): 772. DOI: 10.1080/0305215X.2015.1057057

[3] 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: 人民交通出版社股份有限公司, 2011

China Academy of Transportation Sciences. Standards for technical condition evaluation of highway bridges: JTG/T H21—2011 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2011

[4] 刘小玲, 黄侨, 任远, 等. 大跨度钢斜拉桥主梁监测挠度的评估与预警 [J]. 湖南大学学报 (自然科学版), 2016, 43(9): 98. doi: 10.3969/j.issn.1674-2974.2016.09.013

LIU Xiaoling, HUANG Qiao, REN Yuan, et al. Assessment and early warning on the monitoring girder deflection of the long-span steel cable-stayed bridge [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2016, 43(9): 98. doi: 10.3969/j.issn.1674-2974.2016.09.013

[5] 钟桔. 斜拉桥拉索损伤状态的有限元模拟与模型试验研究 [D]. 长沙: 湖南科技大学, 2014

ZHONG Ji. Finite element simulation and model test study on cable damage state of cable stayed bridge [D]. Changsha: Hunan University of Science and Technology, 2014