

基于索力损伤向量的斜拉桥结构损伤识别

秦伟亮, 孙宗光*, 曲翔雨, 司琦, 伦卓

(大连海事大学 交通运输工程学院, 辽宁 大连 116023)

摘要: 索力具有测试简单、便于应用的特点。基于对实际斜拉桥运营索力的统计分析, 提出了索力损伤向量及相应的损伤识别分析方法。基于监测结果, 消除外界因素影响后的标准索力是一个反映斜拉桥结构基本状态的随机变量。基于经修正后的有限元模型, 采用部分被监测拉索的标准索力均值来构造结构损伤向量, 首先通过对不同损伤工况的损伤向量之间的相关性分析来识别损伤工况, 再通过损伤程度与标准索力均值差之间的关系确定损伤程度。在单损伤工况分析的基础上, 通过任意两种单损伤工况的损伤向量与它们的组合损伤向量之间的线性关系可确定组合损伤工况。所识别的损伤程度: 整体老化 5% 以内, 索损伤 10% 以内, 其他构件损伤 20% 以内; 其中, 单损伤工况与程度均能识别, 损伤程度误差大多在 10% 以内; 对于大多数组合损伤只能识别工况不能识别程度。综上表明: 基于索力构建损伤向量的损伤识别具有显著的可行性。

关键词: 损伤识别; 监测索力; 统计分析; 损伤向量; 组合损伤

大跨桥梁结构的使用期长达几十年、甚至上百年, 环境侵蚀、材料老化、荷载的长期效应、疲劳效应与突变效应等灾害因素的耦合作用将不可避免地导致结构和系统的损伤积累和抗力衰减, 从而抵抗自然灾害、甚至正常环境作用的能力下降, 极端情况下引发灾难性的突发事故。仅凭以往的间歇性的检测和评价, 难以满足确保结构安全运营的要求。因此, 近 20 年来结构长期健康监测系统, 得以迅速发展。如何利用结构健康监测系统采集到的响应信息反演出桥梁结构的工作状态, 这是实现大跨桥梁结构损伤识别与状态评估的关键问题。为此, 众多学者对其进行了大量的研究。斜拉索作为斜拉桥主要的承力构件, 连接着主梁和主塔并且分布广泛, 本身含有桥面和主塔结构的空位置信息, 而对于斜拉索和索力的相关研究大多停留在斜拉索发生损伤的识别上。文献[6]首次提出了索力损伤识别指标, 并探讨了对不同损伤工况的敏感性和稳定性, 显示了较好的基于该指标进行斜拉桥损伤识别的可行性; 文献[10、11]采用了索力损伤指标, 但损伤识别仅是对主梁的损伤识别。该文以青岛海湾大桥沧口斜拉桥为分析对象, 面向实际监测索力, 提出了基

于统计特性而构建的索力损伤向量。基于经修正后的有限元模型, 研究了基于该索力损伤向量进行单损伤和组合损伤识别分析方法。该方法可通过对全部或部分斜拉索的索力监测, 实现对斜拉桥结构的一部分损伤进行识别和健康状态评价。

1 模型修正与监测索力模拟

1.1 模型修正

沧口桥实景图如图 1 所示, 1/2 跨立面布置如图 2 所示。首先, 运用 Ansys 有限元分析软件创建初始有限元模型; 其中, 主梁采用 Beam4 单元, 主塔和墩采用 Beam188 单元, 斜拉索采用 Link10 单元。然后, 以荷载试验和部分监测结果为目标, 采用响应面法进行静、动力模型修正。修正后模型计算的前几阶主要模态频率和静态索力值与实测值的比较如表 1、2 所示。

1.2 监测索力模拟

采用基于监测索力构建的指标进行损伤识别, 宜选用相对稳定可靠的索力监测数据。正常运营环境下索力主要受温度、车辆和其他随机干扰因素的影响。

收稿日期: 2020-07-08(修改稿)

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 51178070); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(编号: 3132014326, 3132016216)

作者简介: 秦伟亮, 男, 硕士, E-mail: 1083130845@qq.com

* 通信作者: 孙宗光, 男, 博士, 教授, E-mail: sun@dlnu.edu.cn



图 1 沧口桥实景图

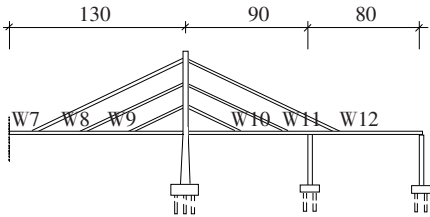


图 2 沧口桥 1/2 跨立面图及索的编号(单位:m)

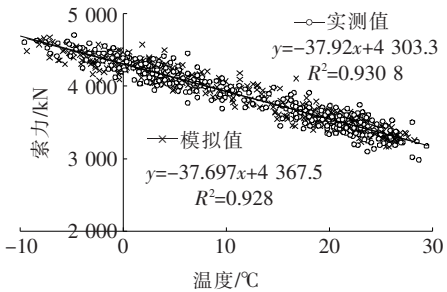
表 1 修正后模型与实测振型频率对比

模态	监测值/Hz	修正后/Hz	差异率/%
竖向 1 阶	0.537	0.539 8	0.52
竖向 2 阶	0.894	0.894 8	0.09
竖向 3 阶	1.406	1.393 5	-0.89
横向 1 阶	0.780	0.768 6	-0.89
横向 2 阶	1.049	1.043 7	-0.51

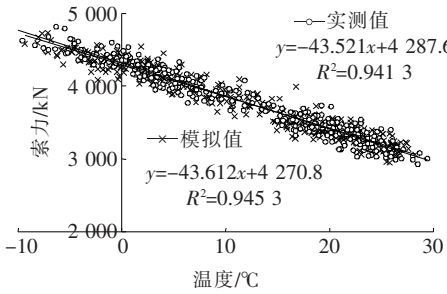
表 2 静态索力实测值与模拟值对比

拉索编号	监测值	模拟值	差值
W7	3 524	3 521	3
W8	3 693	3 690	3
W9	3 134	3 131	3
W10	2 569	2 575	-6
W11	3 559	3 563	-4
W12	3 800	3 803	-3

为此,首先选用夜间时段数据以尽量消除日照温度的影响。再通过数据分解分离高频随机干扰部分和车辆荷载导致的索力突变。然后在年周期内选取每天同一时段的数据为样本,分析建立年温度与索力的统计关系。分析表明:年温度与索力之间呈现显著的线性相关性。基于监测年温度数据样本及其分布特性进行温度加载,由修正的有限元模型计算得到模拟索力。年温度与实测索力和模拟索力的关系对比如图 3 所示。实测索力和模拟索力二者在分布规律及与温度的相关关系方面吻合较好。表明修正的有限元模型能够较好地反映索力与环境温度的关系。



(a) W7 索



(b) W8 索

图 3 实测与模拟索力-环境温度关系比较

由于全年索力 F 与温度 T 之间具有较高的线性相关关系,可通过式(1)消除温度对索力的影响,把得到的新索力 F_s 称为标准索力。

$$F_s = F - k(T - T_b) \tag{1}$$

式中: F_s 为标准索力; F 为索力; k 为索力与环境温度关系的斜率; T 为环境温度; T_b 为基准温度(此处取 15 °C)。

标准正态分布检验结果表明:标准索力 F_s 符合正态分布。2012 年 W7 索全年实测索力和模拟索力的标准值分别如图 4、5 所示。以下的损伤识别分析将基于标准索力。

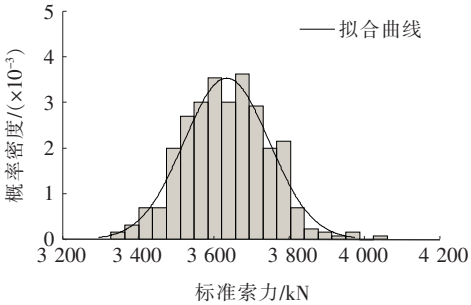


图 4 W7 索的标准索力实测值

2 损伤敏感性分析

通常情况下拉索索力对该区域的损伤更敏感,因此根据结构对称性将斜拉桥划分为 4 个区域,针对各

区域的损伤工况采用该区域索力进行损伤分析和识别。这里以一个区域为例来阐述损伤分析和识别方法。首先基于斜拉桥易损性分析的相关文献以及根据该桥静载情况下的易损性分析,在该区域选取 8 种损伤工况。其中工况 1、2 为索损伤,3、4 为主塔损伤,5、6、7 为主梁损伤,8 为整体老化。前 7 种工况的损伤位置如图 6 所示。

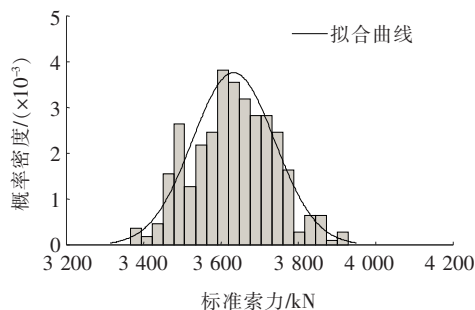


图 5 W7 索的标准索力模拟值

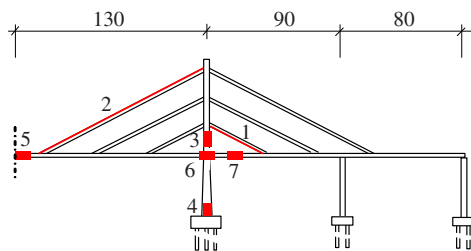


图 6 第 1~7 种损伤工况的损伤位置(单位:m)

模拟损伤方法很多,该文采用降低构件弹性模量的方法模拟损伤。为得到标准索力分布特性与损伤程度之间的关系以及索力均值随损伤程度的变化趋势和趋势方程,分别模拟了各损伤工况 0~70% 的损伤程度。计算结果表明:索力均值对这几种损伤工况都较敏感,而索力标准差敏感性较差。限于篇幅,这里仅列出工况 2 的 W10 索标准索力分布特性变化情况(如图 7 所示),以及相应的索力均值改变量与损伤程度的趋势(如图 8 所示)。

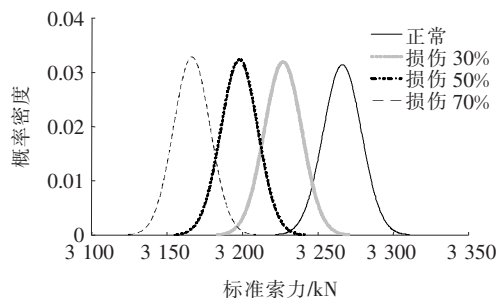


图 7 W10 索标准索力分布特性(工况 2)

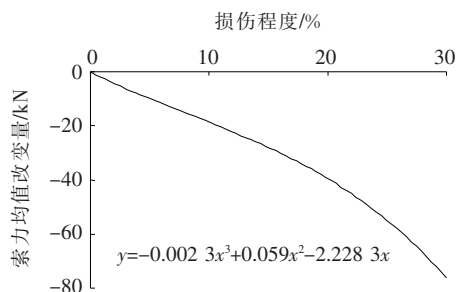


图 8 W10 索力均值改变量与损伤程度趋势线(工况 2)

由图 8 可见索力均值随损伤程度呈显著变化,而标准差最大改变量仅为为 $-0.559 4 \text{ kN}$;故选用索力均值作为损伤识别指标。

由损伤敏感性分析可得:斜拉索不仅平衡主梁自重更使主梁产生拱度,而主梁具有一定的抗弯刚度;当主梁发生损伤,索力必然发生变化。主塔两侧索力也不完全平衡,从而在桥塔内产生可观的弯矩,故主塔损伤也必然引起索力变化。对于斜拉索,当拉索发生损伤必然引起索力重分布。随着时间推移,斜拉桥结构构件会发生老化致使刚度降低(包括梁、塔、索),索力必然发生明显降低。

3 损伤识别

采用标准索力个别值抽样例行监测评价,该方法较为简单,但有很大的局限性。如果结构发生显著改变,必然会导致索力分布特性发生显著改变,但是索力个别值仍然可能处于正常值域,这时,上述评价方法就会失效。因此,基于分布特性的索力状态评价才是更为可靠和科学的方法。但根据一根索索力分布特性的改变来识别损伤是很难做到的,因此,采用一组索索力分布特性的改变模式来识别损伤才有实现的可能。

以 6 根索的标准索力均值的改变量作为一组列向量 $\alpha = \{w_7 \ w_8 \ w_9 \ w_{10} \ w_{11} \ w_{12}\}^T$ 。根据向量与向量之间的相关性来研究不同损伤工况及相同损伤工况不同损伤程度的损伤向量之间的关系。

3.1 单损伤识别

通过损伤敏感性分析,可以得到前文所述 8 种损伤工况的损伤向量。“模态置信准则”(MAC—Modal Assurance Criterion) 通常可用于检验两个向量之间的相关性:

$$MAC(\alpha_1, \alpha_2) = \frac{(\alpha_1^T \cdot \alpha_2)^2}{(\alpha_1^T \cdot \alpha_1)(\alpha_2^T \cdot \alpha_2)} \quad (2)$$

MAC 值总是在 $[0, 1]$ 区间内变化,越靠近 1 表

示 α_1 、 α_2 的相关性越好。但要谨慎区分“虚假”的 MAC 值。对同一损伤工况不同损伤程度之间的损伤向量进行 MAC 检验,其结果如表 3 所示。而对同一损伤程度下的不同损伤工况之间损伤向量的 MAC 检验结果如表 4 所示。

表 3 同一损伤工况不同损伤程度损伤向量之间的 MAC 值

工况	不同损伤程度的 MAC 值		
	10%~20%	20%~30%	10%~30%
1	1.00	1.00	1.00
2	1.00	1.00	1.00
3	1.00	0.97	0.99
4	1.00	1.00	1.00
5	1.00	1.00	1.00
6	1.00	1.00	1.00
7	1.00	1.00	1.00
8	1.00	1.00	1.00

表 4 不同损伤工况相同损伤程度损伤向量之间的 MAC 值

项目	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5	工况 6	工况 7	工况 8
工况 1	1.00							
工况 2	0.01	1.00						
工况 3	0.14	0.02	1.00					
工况 4	0.91	0.06	0.04	1.00				
工况 5	0.10	0.78	0.01	0.22	1.00			
工况 6	0.02	0.00	0.19	0.05	0.02	1.00		
工况 7	0.10	0.00	0.25	0.08	0.40	0.60	1.00	
工况 8	0.10	0.21	0.29	0.17	0.57	0.43	0.44	1.00

表 5 未知损伤向量与已知损伤向量的 MAC 值

已知损伤	未知损伤与已知损伤向量的 MAC 值
工况 1 损伤 30%	1.00
工况 2 损伤 30%	0.14
工况 3 损伤 30%	0.91
工况 4 损伤 30%	0.10
工况 5 损伤 30%	0.02
工况 6 损伤 30%	0.02
工况 7 损伤 30%	0.10
工况 8 损伤 30%	0.10

表 5 表明:未知损伤应该是工况 1 或工况 3 当中的某一种工况。下面通过识别损伤程度来排除“虚假”损伤。由损伤敏感性分析可以得出各单损伤工况的均值改变量与损伤程度趋势线,并求出如图 8 所示的趋

表 3、4 表明:① 只要是同一损伤工况,不同损伤程度的损伤向量之间都具有高度相关性;② 不同损伤工况之间,即使损伤程度相同,其损伤向量之间相关性也较差。以上两点显示了通过由索力构造的损伤向量识别损伤的可行性。对于表 4 中两工况的 MAC 值较大“虚假”的情况,可暂把此损伤工况作为一种损伤可能。在计算损伤程度的时候,可将此“虚假”损伤排除。

基于以上损伤向量的相关性分析可知,有的损伤工况易发生混淆。为此,下面模拟工况 1 损伤程度 5%的情况作为“未知的损伤”来阐述该文的损伤识别方法。

首先,模拟“工况 1 损伤程度 5%”,得到损伤向量 $\alpha=\{-1.3 \quad -4.4 \quad -13.5 \quad 19.9 \quad 7.5 \quad 2.4\}$ 。然后,将上述损伤向量与全部 8 种损伤工况的某同一损伤程度(不妨选取 30%)的损伤向量求 MAC 值,计算结果如表 5 所示。

势方程。将未知损伤工况的均值改变量分别代入与之相应的工况 1 与工况 3 的趋势方程中,求解损伤程度。如果求解的损伤程度为 0~100%且数值接近,就可以确定损伤工况及损伤程度。计算结果见表 6。

表 6 求解的损伤程度

工况	各拉索的损伤程度/%					
	W7	W8	W9	W10	W11	W12
工况 1	5	5	5	5	5	5
工况 3	无正解	533	44	无正解	无正解	无正解

由表 6,可以将工况 3 排除,确定未知损伤为工况 1,损伤程度为 5%。用该方法进行损伤识别,部分损伤识别结果如表 7 所示。

3.2 组合损伤识别

组合损伤是指两种损伤工况的组合损伤。通过数

表7 损伤识别结果

已知损伤	有无虚假值	工况识别	程度识别/%
工况1损伤5%	√	√	5
工况2损伤8%	√	√	8
工况3损伤16%	×	√	13~17
工况4损伤15%	√	√	17~26
工况5损伤15%	×	√	16~25
工况6损伤18%	×	√	22~23
工况7损伤20%	×	√	16~25
工况8损伤3%	×	√	3

0,但不能排除未知损伤为工况1或工况2的单损伤的可能性。为识别损伤,采用3.1节中单损伤识别的方法进行识别,结果为与工况1的MAC值为0,与工况2的MAC值为0.95。

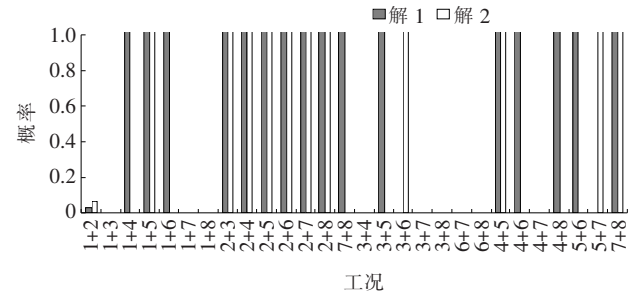


图9 未知损伤向量与解向量的乘积

由此可得:未知损伤与工况2的单损伤相关性较高,与工况1的相关性很差,故把工况1的单损伤情况排除。用3.1节中求单损伤程度的方法求解损伤程度,求解结果见表8。

表8 工况2求解的损伤程度

拉索编号	损伤程度/%	拉索编号	损伤程度/%
W7	5	W10	无正解
W8	4	W11	2
W9	无正解	W12	4

通过表8,可以将工况2的单损伤可能性排除,并确定损伤工况为工况1+工况2的组合损伤工况。用该方法进行损伤识别,部分组合损伤识别结果见表9。

表9 组合损伤识别结果

已知损伤	a_{i1}	a_{i2}	确定损伤的概率/%	是否识别
工况1损伤4%+ 工况5损伤15%	0.00	0.04	96~100	√
工况3损伤10%+ 工况4损伤10%	0.13	0.13	87	√
工况3损伤12%+ 工况7损伤20%	0.20	0.28	72~80	√
工况1损伤5%+ 工况2损伤7%	0.07	0.05	93~95	√
工况2损伤8%+ 工况4损伤20%	0.01	0.06	94~99	√
工况8损伤4%+ 工况7损伤16%	0.70	0.14	30~86	×
工况5损伤15%+ 工况6损伤15%	0.00	0.06	94~100	√

值模拟得出,组合损伤向量可近似看成这两种单损伤向量的线性叠加。假设待识别的未知损伤工况是上述8种损伤工况中某两种单损伤工况的组合。

首先,选取每种单损伤工况任意两种已模拟的损伤程度的损伤向量(该文选取10%、30%),并将8种单损伤工况两两组合(共28组),每组一共4个损伤向量。

其次,选取第*i*组的4个单损伤的损伤向量 $[\alpha_{i1} \ \alpha_{i2} \ \alpha_{i3} \ \alpha_{i4}]^T, i=1,2,3,\cdots,28$ 。假设存在正交向量 $\beta_i=\{x_{i1} \ x_{i2} \ x_{i3} \ x_{i4} \ x_{i5} \ x_{i6}\}^T$,使得:

$$[\alpha_{i1} \ \alpha_{i2} \ \alpha_{i3} \ \alpha_{i4}]^T \cdot \beta_i = 0$$

(3)

求正交向量 β_i (由6个未知数4个方程可知该方程有两个线性无关的正交向量 $\beta_{i1}、\beta_{i2}$)。以同样的方式求解出所有组的正交向量。

最后,把未知损伤的损伤向量 α 的转置 α^T 与这28组损伤工况的正交向量 $\beta_{i1}、\beta_{i2}$ 相乘,当得到的数值 $a_{i1}、a_{i2}(i=1,2,3,\cdots,28)$ 越接近于0,则未知损伤工况为该损伤工况的概率越大;当得到的值 $a_{i1}、a_{i2}$ 大于1时,则未知损伤工况为该损伤工况的概率基本为0。计算方程式如下:

$$\begin{cases} \alpha^T \cdot \beta_{i1} = a_{i1} \\ \alpha^T \cdot \beta_{i2} = a_{i2} \end{cases}$$

(4)

其中: α^T 为未知损伤的损伤向量; $\beta_{i1}、\beta_{i2}$ 为第*i*组的正交向量。限于篇幅,该文仅提供一例加以佐证。

模拟“工况1损伤5%+工况2损伤7%”的组合损伤作为待识别的组合损伤工况,得到损伤向量。将 $\alpha=\{-151.4 \ 18.1 \ -8.1 \ 21.6 \ -5.1 \ -20.7\}$ 代入式(4)得到的结果取绝对值,由于数值偏差较大,该文只给出[0,1]区间的结果展示,如图9所示(图中解1表示 a_{i1} ,解2表示 a_{i2})。

由图9得出:未知损伤为工况1+工况2组合损伤的概率高达90%以上,其他组合损伤的概率基本为

3.3 损伤个数识别

众所周知,在实际工程中损伤个数是无法预知的(此处损伤个数为 1 个或 2 个),损伤个数未知就无法判断用单损伤识别还是组合损伤识别。然而,如果用组合损伤识别的方法判断单损伤,那么包含此单损伤的所有组的正交向量 β_{i1} 、 β_{i2} 与未知单损伤的损伤向量转置 α^T 的乘积 a_{i1} 、 a_{i2} 都应该接近于 0。

下面以 3.1 节中的单损伤例子加以证明,“工况 1 发生 5%”的损伤,得到标准索力均值改变量向量 $\alpha = \{-1.3 \quad -4.4 \quad -13.5 \quad 19.9 \quad 7.5 \quad 2.4\}$,用组合损伤识别的方法进行识别得到结果,如图 10 所示。

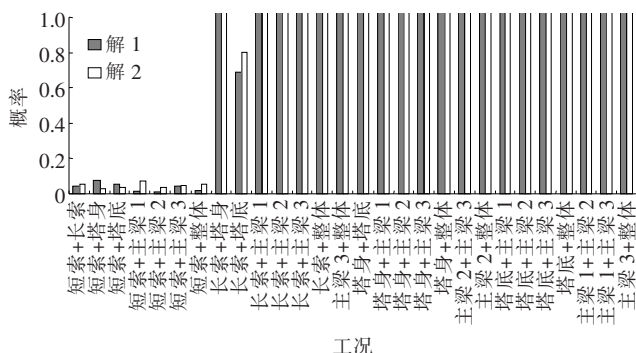


图 10 未知损伤向量与正交向量的乘积

由图 10 可知:包含单损伤工况 1 的 7 种组合损伤的正交向量 β_{i1} 、 β_{i2} 与未知损伤向量转置 α^T 的乘积 a_{i1} 、 a_{i2} 都趋近于 0,这与预期一致。由此得出一套未知损伤识别的方法:在得到未知损伤向量 α 之后,先用组合损伤识别的方法进行验证,如果只有一组正交向量 β_{i1} 、 β_{i2} 与未知损伤向量转置 α^T 的乘积 a_{i1} 、 a_{i2} 都趋近于 0,那么就可以确定损伤工况为该组合损伤;如果有包含某一单损伤工况的所有组的正交向量 β_{i1} 、 β_{i2} 与未知损伤向量转置 α^T 乘积 a_{i1} 、 a_{i2} 都趋近于 0,那么就可以确定损伤工况为此单损伤,并可用单损伤识别的方法加以确定,并计算出损伤程度。

4 结论

以索力构造损伤向量是基于索力相对稳定,易于监测、便于应用的特点,并且斜拉索本身包含了桥面和主塔结构的空間位置信息,因此以索力作为损伤识别指标具有可行性。通过对索力损伤向量的研究,得出以下结论:

(1) 只要是同一损伤工况,不同损伤程度的损伤向量之间都具有高度相关性;不同损伤工况之间,即使损伤程度相同,其损伤向量之间相关性也较差。由此可显

示基于索力构建损伤向量的损伤识别具有显著可行性。

(2) 该文方法不但可以识别单损伤情况,结合损伤程度的分析,也可以较好地识别多损伤情况;并且可以有效地区分损伤个数。

参考文献:

- [1] 李惠,欧进萍.斜拉桥结构健康监测系统的设计与实现系统设计[J].土木工程学报,2006(4).
- [2] Sumitomo S, Matsui Y, Kono M, Okamoto T, Fujii K. Long Span Bridge Health Monitoring System in Japan [C]. SPIE, 2001, 4337: 517—524.
- [3] Wong K Y, Lau C K, Flint A R. Planning and Implementation of the Structural Health Monitoring System for Cable-Supported Bridges in Hong Kong [C]. SPIE, 2000, 3995: 266—275.
- [4] 丁幼亮,李爱群,廖长青.面向结构安全评估的大跨斜拉桥基淮有限元模型[J].东南大学学报(自然科学版),2007(2).
- [5] 邓扬,李爱群,丁幼亮,等.苏通大桥结构健康状态评估技术研究与应用(3):主梁损伤定位[J].防灾减灾工程学报,2010(3).
- [6] 孙宗光,高赞明,倪一清.基于神经网络的损伤构件及损伤程度识别[J].工程力学,2006(2).
- [7] 赵翔.拉索损伤对斜拉桥结构性能影响的研究[D].东南大学博士学位论文,2005.
- [8] 赵玲,李爱群,廖长青,等.大跨斜拉桥的拉索损伤识别,桥梁建设[J].2004(5).
- [9] 杨杰,李爱群,丁幼亮,等.苏通大桥结构健康状态评估技术研究与应用(1):拉索损伤识别[J].防灾减灾工程学报,2010(3).
- [10] 李延强.基于最敏感索力指标的斜拉桥主梁损伤识别研究[D].北京交通大学博士学位论文,2013.
- [11] 李延强,赵世英,杜彦良.基于最敏感斜拉索张力指标的斜拉桥主梁损伤识别方法[J].中国铁道科学,2014(2).
- [12] 陈一飞.基于长期监测的索桥结构分析评价与识别[D].大连海事大学博士学位论文,2018.
- [13] 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.
- [14] 曹素功,黄立浦,张勇.桥梁健康监测数据的结构化存储与分析[J].中外公路,2019(2).
- [15] 孙宗光,陈一飞,邵元.基于概率统计的运营状态下索力变异性分析与评价[J].桥梁建设,2018(3).
- [16] 张清华,李乔,唐亮.基于损伤敏感性指标的斜拉桥结构损伤定位研究[J].工程力学,2008(5).
- [17] 方圣恩.基于有限元模型修正的结构损伤识别方法研究[D].中南大学博士学位论文,2010.