

doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2015.06.019

斜拉桥恒载索力长期变化趋势分析与评估

任 远, 刘小玲, 黄 侨

(东南大学 交通学院, 210096 南京)

摘 要: 为获取恒载索力,以在役斜拉桥封闭交通时的索力监测数据为研究对象,通过温度与索力的相关性分析,得到索力与温度呈线性关系的结论,并通过有限元模型计算结果进行验证;通过有限元模型对不同斜拉索索力的温度敏感性进行分析,得出温度对塔两侧较短索、边跨辅助墩附近较长索以及中跨长索索力影响较大的结论;利用斜率关联度和变权综合原理,根据成桥后9年内的数次封桥监测数据,对索力状态进行评估.结果表明,提出的索力评估模型能有效反映索力的均匀变化和非均匀变化趋势.

关键词: 斜拉桥;索力;健康监测;温度效应;评估

中图分类号: U446.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2015)06-0103-06

The long-term trend analysis and assessment of the cable forces due to dead load in cable-stayed bridges

REN Yuan, LIU Xiaoling, HUANG Qiao

(School of Transportation, Southeast University, 210096 Nanjing, China)

Abstract: To obtain the cable force under dead load, the data was recorded during the closure of bridge by the health monitoring system of an existing bridge. Firstly, the linear relationship was obtained between the cable force and temperature through correlation analysis, and the results were verified by simulation results of finite element model. Secondly, the temperature sensitivity of the different cable force was analyzed using the finite element model. The stay cables deeply affected by the temperature include the short cables on both sides of the tower, longer cables near the assist pier of side span and long cables of the mid-span. Finally, nine years' monitoring data were selected and assessed based on correlation of slope coefficient and variable weight synthesis principle. The results show that the cable force assessment model effectively reflects the uniform change and non-uniform change of cable forces.

Keywords: cable-stayed bridge; cable force; health monitoring; temperature effect; assessment

斜拉索索力可直接反映索结构桥梁持久状况下的内力状态,是监控大跨斜拉桥运营安全的重要指标之一,也是斜拉桥健康监测系统(health monitoring systems, HMS)^[1]中重点监测的对象.对斜拉索实施有效的状态评估不仅是桥梁安全性的重要保障,同时还能通过其性能退化趋势以实现寿命预测,为维修、加固决策提供科学依据.

正常运营状态下,索力监测数据包含温度、车辆荷载、噪声、风等影响因素,如何提取恒载状态下的索力作为统一评估的基础是亟待解决的重要问题之一.已有研究表明,温度作用引起的索力、线形、频率等波动有时会淹没或掩盖结构的损伤^[2].针对索力和温度的关系,已有学者从数值分析、施工控制等^[3-4]方面作了详细研究,然而对于索力监测数据的温度效应分析未见详实报道.

对于斜拉索的状态评估方法涉及安全系数法^[5]、综合评估法^[6-7]、考虑随机车载或随机车载-风载联合作用的拉索疲劳可靠性评估法^[8-9].这些方法多针对于带活载的评估,对于恒载状态下

收稿日期: 2015-04-15.
基金项目: 国家自然科学基金(51208096);江苏省交通运输科技项目重大专项(2014Y02).
作者简介: 任 远(1981—),女,博士,讲师;
黄 侨(1958—),男,教授,博士生导师.
通信作者: 黄 侨,quanghit@126.com.

的索力退化评估尚缺乏深入的分析 and 研究。

本文以一座钢斜拉桥——南京长江第三大桥(以下简称“南京三桥”)的封桥监测数据为研究基础,探索了无活载作用下的群索长期变化趋势。首先基于相关性分析分离出温度影响,其次通过有限元模型验证监测数据的可靠性,最后提取数年封桥索力数据,对其进行评估,研究恒载索力的长期变化趋势。

1 监测状况介绍

南京三桥为一座钢塔钢箱梁双索面五跨连续斜拉桥,其跨径布置为 $63+257+648+257+63=1\,288\text{ m}$ 。该桥于 2005 年 10 月建成通车,次年其健康监测系统投入使用。该系统安装了各类传感器,监测项目包含温度、索力、主梁挠度、梁塔振动、应力等。南京三桥安装的温度传感器采用的是美国的 R.M.YOUNG 41372 型温湿度传感器,具有 $\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的测量精度。该桥共有 168 根斜拉索,每根斜拉索上均安装了压力环传感器,测试精度为 1%。

由于南京三桥是对称结构,上游索力传感器运行情况较好,因而仅取四分之一的斜拉索,即南塔上游岸侧和江侧的 42 根斜拉索数据作分析。具体编号见图 1,其中 S 表示南塔, A 表示岸侧, J 表示江侧,上游岸侧从最短索至最长索依次编号为 SA1~SA21,江侧依次为 SJ1~SJ21。

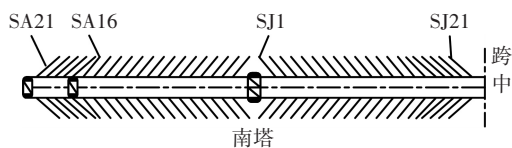


图 1 拉索传感器编号示意

2 索力与温度相关性分析

选取 2007 年 3 月 25 日的 4:00—8:00 的监测数据进行分析。这段时间南京三桥因大雾天气封桥。封桥期间桥梁结构没有汽车活载作用和温差作用,便于分析索力与温度的相关性。

观察群索监测数据的变化幅度及趋势,结合有限元模型中温度效应计算结果,选取温度敏感性较高的 SA15 号索作为研究对象,以 5:00—7:00 两小时的封桥数据为例进行分析。通过线性拟合得到 $Y=3\,219.6+2.76X$, 其中, Y 是索力监测值, kN; X 为温度监测值, $^{\circ}\text{C}$ 。该号斜拉索索力和温度的 Spearman 相关系数为 0.94, 属于显著线性相关^[10]。拟合结果见图 2, SA15 号索计算得到温度变化率为 $2.76\text{ kN}/^{\circ}\text{C}$ 。

这个时段的实测温度变化范围仅有 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。为了进一步验证索力和温度的线性相关性,又分析

了 2007 年一年内的两次大雾封桥数据。一次是 2007 年 3 月 25 日,封桥时间段为 4:00—8:00,另一次是 2007 年 12 月 15 日,封桥时间段为 5:00—11:00。图 3 给出了两次封桥索力和温度的关系。可以看出封桥期间的索力和温度仍符合线性规律,同时在一包含活载的索力、温度数据中,线性规律依然可以推演。从 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 至 $11\text{ }^{\circ}\text{C}$, 以及 $14\text{ }^{\circ}\text{C}$ 至 $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度跨越范围,仍然可以证明索力与温度呈线性相关的结论,经过两段封桥数据的拟合,得到图 3 中直线方程为 $Y=3\,219+2.84X$, 相关系数为 0.98。斜率值 $2.84\text{ kN}/^{\circ}\text{C}$ 与上述 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下拟合的 $2.76\text{ kN}/^{\circ}\text{C}$ 较为接近。

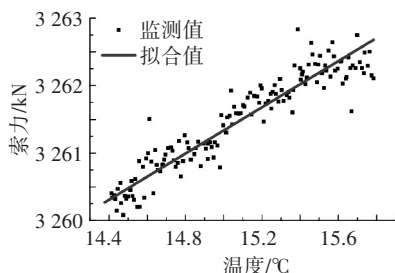


图 2 SA15 号索力与温度线性拟合

以上述 42 根斜拉索为例,参照中国 JTG D60—2004《公路桥涵设计通用规范》规定的钢桥有效温度标准值,以成桥温度 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为基准,温度变化量为 $-29\sim 26\text{ }^{\circ}\text{C}$, 计算得到温度引起的斜拉索索力变化为 $-5.7\%\sim 5.2\%$ 。因此可认为在恒载索力评估中均匀温度变化较大时,斜拉索索力的温度效应不容忽视。

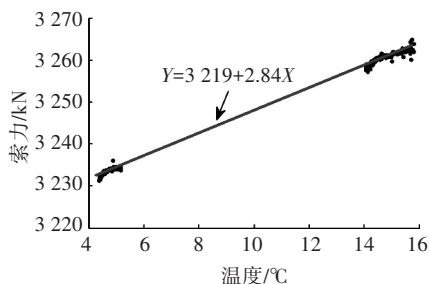


图 3 2007 年两天大雾封桥的 A15 索力和温度关系

3 索力-温度关系的模型验证

理论上,一个相对准确的模型能基本模拟实际结构的受力行为。通过在有限元模型中施加相应的温度荷载得到索力的变化行为,可以验证监测数据的可靠性。基于此,根据南京三桥的几何参数和材料特性(如表 1 所示)建立空间“鱼骨梁”模型(图 4),在有限元模型中,钢箱梁、主塔、桥墩均采用空间梁单元模拟,斜拉索采用只受拉杆单元,结构非线性因素中仅考虑了垂度效应,横隔板、二期铺装质量通过节点荷载施加。

表 1 结构模型参数

部件名称	材料名称	几何参数	热膨胀系数/ 10^{-5}°C
钢箱梁	Q345D	梁高 3.2 m, 宽 37.2 m(包括风嘴)	1.20
斜拉索	高强低松弛钢丝 ^[11]	109~241 丝, 直径 7 mm	1.36
钢主塔	Q370qD	塔高 170.8 m, 空心矩形截面 6.8 m×5.0 m	1.20
混凝土主墩	50 号混凝土	墩高 35.2 m, 截面 12 m×8.4 m	1.00
辅助墩	40 号混凝土	分离式矩形截面空心墩, 墩高 30 m, 辅助墩顺桥向宽 3.5 m	1.00
过渡墩	40 号混凝土	分离式矩形截面空心墩, 墩高为 24.8 m、28.8 m, 过渡墩顺桥向宽 3 m	1.00

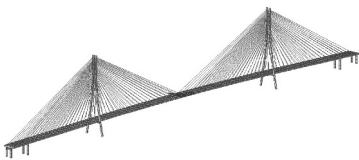


图 4 三维有限元模型

该桥已经过联合静动力模型修正^[12], 具体过程不再赘述. 为验证模型的正确性, 在此进行了成桥荷载试验与模型计算结果的对比. 荷载试验的 18 辆货车(单辆货车前轴重 63 kN, 后轴重 222 kN)布置在中跨的跨中区域, 布载方式见图 5(a), 模型的加载方式见图 5(b).

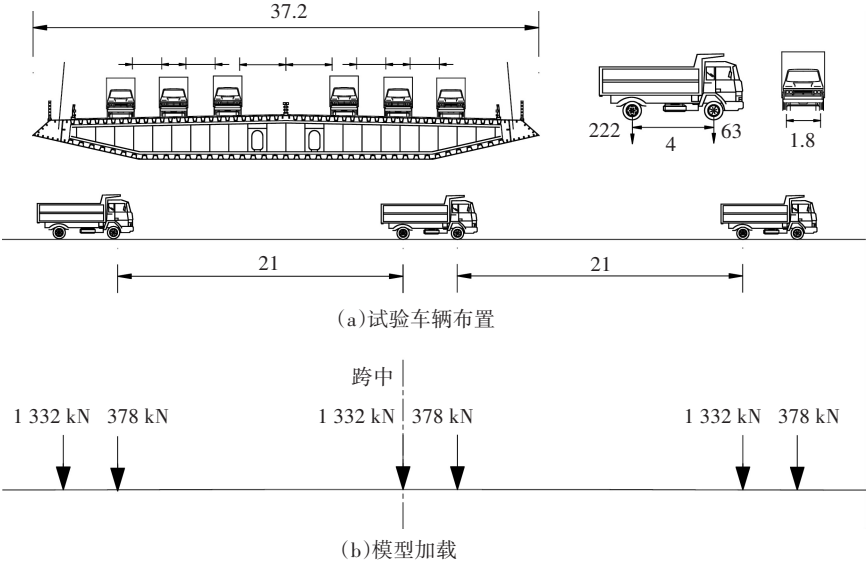


图 5 静载试验布载形式与模型加载对照(m)

表 2 给出了荷载试验测量值与上述模型的计算值. 统计项中包括南塔江侧 19#~21#索力、跨中挠度以及竖向一阶频率. 其中 3 根实测斜拉索索力的平均相对误差为-1.7%.

表 2 荷载试验测量值与模型计算值对比

测试位置	模型计算值	实测值	相对误差/%
SJ21	457.8 kN	465.8 kN	-1.7
SJ20	482.0 kN	507.0 kN	-4.9
SJ19	465.9 kN	459.4 kN	1.4
跨中挠度	42.9 cm	44.3 cm	3.2
竖向一阶频率	0.261 9 Hz	0.263 7 Hz	-0.7

为了对比索力变化的计算值和实测值, 模型中温度模拟至关重要. 对于桥梁结构的温度作用类型, 各国规范做了不同的规定. 依据中国 JTG D60—2004《公路桥涵设计通用规范》中温度作用类型的定义以及相关实测主梁梯度温度的最新研究^[13], 得到关键部件温度作用类型, 在模型中赋

予单位温度作用见表 3, 模型计算得到各温度作用引起的索力变化见图 6.

表 3 温度作用力类型

作用名称	具体作用	模型中温度作用施加值
整体升温	当地气温	1 $^{\circ}\text{C}$
索梁负温差	$\pm 10^{\circ}\text{C}$	-0.5 $^{\circ}\text{C}$
主梁正温度梯度	多段折线模式 ^[12]	顶板升温 0.5 $^{\circ}\text{C}$
主塔正温度梯度	$\pm 5^{\circ}\text{C}$	东侧面升温 1 $^{\circ}\text{C}$

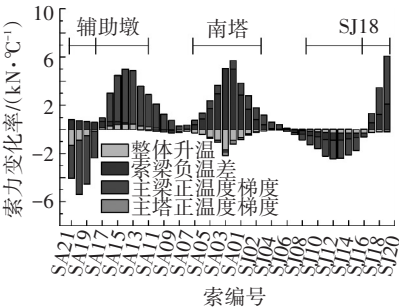


图 6 各类温度作用引起的索力变化计算值

从图 6 可看出,各个温度效应对于不同长度索的索力影响程度不同.根据索力变化率的变化情况,可找到变化的 3 个“拐点”:边跨辅助墩,南塔柱以及江侧 SJ18 号拉索.依据这 3 个结点可总结索力的温度效应规律:

1) 索梁温差和主梁温度梯度对于索力的变化起主要作用,但对于不同长度的斜拉索索力影响程度不同.主梁温度梯度对边跨辅助墩附近的拉索(SA10~SA16 索和 SA18~SA21 索)索力影响最大,对江侧 SJ18 索附近的拉索(SJ12~SJ17 索和 SJ20~SJ21 索)索力影响亦较大;索梁温差对南塔柱附近的拉索(SA1~SA3 索和 SJ1~SJ3 索)索力影响很大,对其他索的影响相对较小.

2) 整体升温 and 主塔温度梯度对于索力的影响非常小,基本可以忽略.

综上所述,温度对索力影响较大的区域为主塔两侧较短的索、边跨辅助墩附近的拉索以及中跨 SJ18 附近较长的拉索.

由于桥梁周围温度场变化的复杂性,实际结构在升温 1 °C 时,并非对应着恰好的单位温度作用力,也不完全是每种温度作用均会同时发生.因此认为,通过有限元模型温度效应计算值验证监测数据的可靠性,只能是一种近似的手段.基于表 3 中定义的 4 种温度作用,假设可以形成的各种不利温度作用的组合,得到索力温度效应的包络图,以此包络图基本可以圈定温度影响量的范围,进而可以判断温度传感器的工作状态.图 7 列出了监测拟合值与模型计算包络图的对比结果.

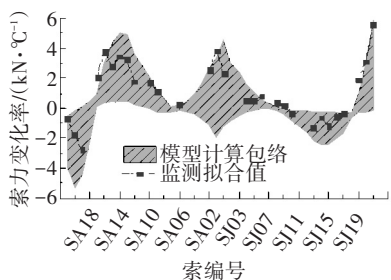


图 7 温度引起的监测索力变化值与模型计算值对比

从图 7 可看出,监测拟合值基本上都处在模型计算的包络图中,两者整体的变化趋向一致,表明了监测数据的正确性.

4 群索状态评估原理

索力评估最常见的方法是变权综合法^[6].一组监测索力属于序列指标,这类指标的变化包含基准线的平移变化和围绕及基准线上下波动两种情况,即均匀变化和非均匀变化.因此,斜拉索状态评估可采用“均匀变化得分乘以非均匀变化系

数”的形式确定其评价结果.每根拉索的索力评分值通过对比与初始值的变化量获得,然后通过变权得到群索的均匀变化得分值.非均匀变化系数表示了曲线之间的相似程度,可借用灰色关联分析理论来计算非均匀变化系数,具体计算公式为

$$V = U \times r = \left(\sum_{i=1}^n w_i y_i \right) \times r. \quad (1)$$

式中: V 为群索评估值 ($0 \leq V \leq 100$); U 为均匀变化得分, $U = \sum_{i=1}^n w_i y_i$, 其中 n 为索力测点总数, y_i 为第 i 个索的评估值 ($0 \leq y_i \leq 100$), 计算方法见式(2), w_i 为第 i 个索的权重, 计算方法见式(3); r 为非均匀变化系数, 计算公式见式(4).

显然,式(1)中包含了索力评估的 3 个步骤:

第一步: 计算每根索力的评估值 y_i

采用线性适度模型,规定索力摄动 $\pm 40\%$ 及以上时评分为 0, 确定为索力上下限值;索力摄动为 0 时评分 100, 以适度指标模型线性插值.计算公式为

$$y_i = \begin{cases} 100 \left(\frac{x_i - 0.6x_i^{(0)}}{x_i^{(0)} - 0.6x_i^{(0)}} \right), & 0.6x_i^{(0)} < x_i < x_i^{(0)}; \\ 100 \left(\frac{1.4x_i^{(0)} - x_i}{1.4x_i^{(0)} - x_i^{(0)}} \right), & x_i^{(0)} < x_i < 1.4x_i^{(0)}; \\ 0, & x_i \leq 0.6x_i^{(0)} \text{ 或 } x_i \geq 1.4x_i^{(0)}. \end{cases} \quad (2)$$

式中 $x_i^{(0)}$ 为单个索力的监测初始值, x_i 为单个索力的当前监测值.

如果某个索力缺少监测值,则令其评分为 100 分,权重为 0.

第二步: 计算权重 w_i

在索力状态评估过程中,评估模型中某个指标的评估值发生重大变化时往往不能在常权综合评估结果中明显地表现出来,从而会忽视了桥梁某些损伤、病害.变权综合原理考虑到评估的均衡性,通过放大摄动剧烈索力的权重,能较好地反映

结构的局部退化.取均衡函数 $B = \sum_{k=1}^n y_k^\alpha$, 相应的权重计算公式为

$$w_i = \frac{\partial B}{\partial y_i} / \sum_{k=1}^n \frac{\partial B}{\partial y_k} = y_i^{\alpha-1} / \sum_{k=1}^n y_k^{\alpha-1}. \quad (3)$$

式中 α 为均衡系数 ($0 < \alpha \leq 1$).

α 取值反映对均衡性的要求, $\alpha < 0.5$, 则表示评判者对桥梁局部缺陷容忍程度较低, $\alpha > 0.5$, 则表示评判者比较容忍某方面的缺陷.从较严格的角度推荐取 0.2, 可适用于一般工程的需要.

第三步:计算关联度

前两步的计算实际上是索力指标的均匀平动得分,而灰色关联度分析理论可解决非均匀转动得分.因保序性要求,非均匀变化系数采用斜率关联度,计算公式为

$$r = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^{n-1} \left[1 + \left| \frac{x_k}{x_{k+1}} - \frac{x_k^{(0)}}{x_{k+1}^{(0)}} \right| \right]^{-1} \quad (4)$$

通过上述3个步骤的计算,最终可得到群索的综合评估值.上述评估方法的具体应用评价结果见表4.

表4 7次恒载索力评估结果

时间	均匀变化得分	非均匀变化系数	综合得分
2007年3月	98.58	0.993	97.93
2008年4月	97.80	0.992	97.03
2009年4月	96.12	0.986	94.80
2009年12月	94.08	0.978	92.02
2010年10月	93.24	0.977	91.06
2011年11月	90.46	0.969	87.63
2013年12月	89.15	0.965	86.04

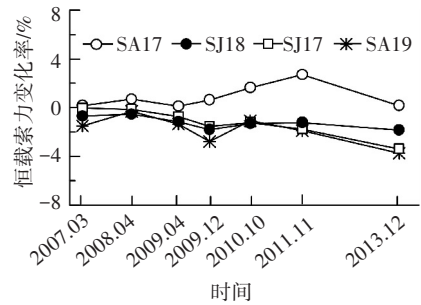
5 索力长期变化趋势分析

南京三桥每年都可能因大雾天气而临时封闭交通.封桥时候的传感器监测数据可以避免车辆活载和温差作用的影响,更加有利于分析恒载索力的长期时变性.笔者选取2007年至2013年之间的7次封桥监测数据,将每一次的监测数据统一到成桥时20℃温度下,使得历年恒载索力具有可比性.取南塔上游的岸侧和江侧正常工作的数根长索为例,即SA7、SA17、SA19、SA21、SJ17、SJ18、SJ20以及SJ21.将七次恒载索力数据与结构初始索力对比,得到各期恒载索力变化率,见图8.图8(c)中两个传感器SA7和SJ20于2011年后出现故障,故仅列出了前五期的数据分析结果.

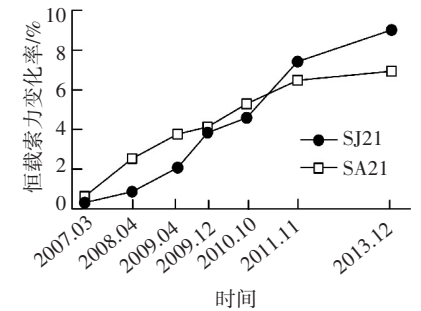
从7次斜拉桥恒载索力监测结果可看出:

- 1)与成桥初始索力结果相比,恒载下桥梁索力变化较小,单根最大变化不超过成桥索力的9%,整体索力总和减小,但变化量不超过成桥索力的1%.
- 2)整体索力出现了轻微的重分布现象.索力变化分成两种趋势,第一类为波动趋势,大部分的斜拉索索力每年处在波动的状况,索力波动范围不大,不超过4%,结构处于稳定状态,如图8(a)所示;第二类为单调变化趋势,某些斜拉索索力处于长期单调变化,分为增长趋势和下降趋势.从图8(b)中可以看出南塔两侧最长的索分担了其他

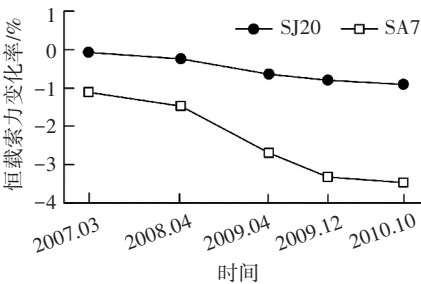
索的索力,处于一直增长的趋势,2013年达到了9%.各索的增长速率并不相同,岸侧的索增长趋于缓和,江侧的索增长较快.图8(c)给出了部分索力下降的情况,不难看出,索力下降较为平缓,最大不超过4%.



(a) 索力波动趋势



(b) 索力增长趋势



(c) 索力下降趋势

图8 7年的斜拉索恒载索力变化趋势

3)JTG/T J21—2011《公路桥梁承载能力检测评定规程》中规定,索力偏差率超过±10%应分析原因,检定其安全系数是否满足相关规范要求,并应在结构检算中加以考虑.鉴于此,养护单位宜继续跟踪索力增长趋势和下降趋势的拉索,即:42根拉索中的SA21、SJ21、SA6、SA7、SA9和SJ20六根斜拉索的索力变化情况,以期获得更加完整准确的索力退化曲线,为索力预警和预测奠定基础.

采用第4节的索力状态评估方法,对7次封桥状态下的南塔上游岸侧和江侧的42根索索力进行评估,详细评估结果见表4.表4的数据显示索力退化的趋势,均匀变化得分和非均匀变化系数均出现降低.从等级上看,依据JTG/T H21—2011《公路桥梁技术状况评定标准》中的技术状

况分类界限,2009 年之前索力属于 1 类状况,2009 年 4 月之后,索力属于 2 类.综合而言,索力的变化状况是,单根索的偏差越来越大以及群索分布波动日益加剧.

6 结 论

1)斜拉索的索力与温度间呈现出显著的线性相关,考虑较大的年温差变化时,部分斜拉索索力的影响量可达 $\pm 5\%$,在评估中不容忽视.

2)有限元模型中索力的温度效应计算结果表明索梁温差和主梁温度梯度对索力的影响占据主要作用,但影响区域不同.主梁温度梯度对边跨辅助墩附近的拉索以及中跨 SJ18 附近较长的拉索索力影响较大;索梁温差对主塔两侧较短索的索力影响较大,这一结果与监测结果吻合.

3)2007 年至 2013 年之间的 7 次封桥状态下的恒载索力变化趋势表明,索力总量有减小趋势,7 年来减小量约为 143 kN,各斜拉索之间出现了轻微的索力重分布现象,最大变化量可达到成桥索力的 9%.索力变化分成两种趋势,波动趋势和单调变化趋势.

4)基于灰色理论的变权综合索力评估方法能有效地反映索力的均匀变化和非均匀变化趋势.通过观察恒载索力的长期变化走向,可为桥梁管养部门提供斜拉索诊断和重点监测、养护的决策依据.

参考文献

- [1] FARRAR C R, HEMEZ F M, SHUNK D D, et al. A review of structural health monitoring literature: 1996–2001 [M]. Los Alamos, NM: Los Alamos National Laboratory, 2004.
- [2] 李爱群,丁幼亮,王浩,等. 桥梁健康监测海量数据分析与评估——“结构健康监测”研究进展[J]. 中国科学:技术科学,2012(08): 972–984.

- [3] LI X, REN W, BI K. FBG force-testing ring for bridge cable force monitoring and temperature compensation [J]. Sensors and Actuators a – Physical, 2015, 223: 105–113.
- [4] 赵珏冰,孙测世,彭剑,等. 温度变化对拉索频率与索力的影响[J]. 应用力学学报, 2013, (06): 904–908.
- [5] CHENG J, XIAO R C. Main cable safety factors assessment of long-span suspension bridges based on inverse reliability method[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(1): 58–61.
- [6] WU H C, XIANG Y Q. Assessment the cable tension and the linetype state of cable-stayed bridge based on variable weight synthesis [J]. China Railway Science, 2006, 27(6): 42–48.
- [7] 熊文,涂雪,肖汝诚. 基于变异系数与趋势因子的斜拉桥索力评估[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2012, 39(11): 1575–1580.
- [8] DAN D H, ZHAO Y M, YANG T, et al. Health condition evaluation of cable-stayed bridge driven by dissimilarity measures of grouped cable forces [J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2013, (818967): 1–12.
- [9] 李岩,吕大刚,盛洪飞. 考虑随机车载–风载联合作用的斜拉桥拉索疲劳可靠性分析[J]. 中国公路学报, 2012, 25(2): 60–66.
- [10] CAO Y H, YIM J, ZHAO Y, et al. Temperature effects on cable stayed bridge using health monitoring system: a case study [J]. Structural Health Monitoring – an International Journal, 2011, 10(5): 523–537.
- [11] 陈志华,刘占省. 拉索线膨胀系数试验研究[J]. 建筑材料学报, 2010(5): 626–631.
- [12] 李西芝. 大跨斜拉桥养护管理与健康监测的数据融合技术与方法研究[D]. 南京:东南大学, 2012.
- [13] 缪长青,史长华. 大跨悬索桥扁平钢箱梁温度梯度与温度影响研究[J]. 中国科学:技术科学, 2013(10): 1155–1164.

(编辑 赵丽莹)