

基于中性轴指标的混凝土梁桥长期监测与性能评估

夏 焯¹, 王 鹏², 孙利民^{1,3}

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 上海临港经济发展(集团)有限公司 规划设计管理中心, 上海 201306;

3. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 提出基于中性轴的长期监测指标体系与性能评估方法。依托河北高速某分离式立交桥, 建立基于监测指标的健康监测系统, 并采集结构应变信息; 采用多分辨率小波分析, 从原始应变中分离由交通荷载引起的静态响应, 根据设定的峰值显著程度拾取峰值-谷值对, 拟合应变幅分布并导出实测中性轴参数序列; 从累积数据中提取中性轴指标, 比较分析不同评估周期的统计特性差异。结果表明, 日周期下中性轴指标受环境干扰少, 可表征结构在长期监测中的性能退化。

关键词: 混凝土梁桥; 中性轴指标; 长期监测; 性能评估; 结构健康监测

中图分类号: TU997

文献标志码: A

Long-Term Monitoring and Performance Assessment for Concrete Beam Bridge Based on Neutral Axis Index

XIA Ye¹, WANG Peng², SUN Limin^{1,3}

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Planning and Design Management Center, Shanghai Lingang Economic Development (Group) Co., Ltd., Shanghai 201306, China; 3. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: A long-term monitoring index system based on neutral axis (NA) position and the corresponding performance assessment method were proposed. Based on a detachable viaduct in Hebei expressway, a health monitoring system based on monitoring indicators was established, and the structural strain information was collected. Static response caused by traffic loads was separated from original strain signals by the multi-resolution wavelet analysis. The peak-valley pairs were

picked in accordance with the designated peak prominence. Then the strain amplitude distribution was fitted and the measured NA arrays were derived. Finally, the neutral axis index was extracted from the accumulated data, and the statistical characteristics of different evaluation periods were compared and analyzed. The results show that the proposed neutral axis index in daily periods is less disturbed by the environment, which can represent the performance degradation of the structure in the long-term monitoring.

Key words: concrete beam bridge; neutral axis index; long-term monitoring; performance assessment; structural health monitoring

近年来,桥梁健康监测得到了广泛应用,其目标结构多为跨径长、形式复杂的大型或特大型桥梁^[1]。然而,对于占据公路桥梁主体的中小型桥梁,相关的理论研究和实践工作尚处于起步阶段。统计数据表明,美国约60%的公路桥梁为多梁式结构,而且危桥中梁桥的比例高达70%^[2]。欧洲的一项调查显示了类似的结果,即梁桥约占公路桥梁的64%^[3]。据此,探索中小跨径梁桥的监测方法和指标体系并进行实践验证与推广,已成为目前亟待解决的问题^[4]。鉴于中小跨径梁桥具有机理简单、受力明确、结构类似、损伤相近、分布普遍、预算有限等共同特征^[5],如何通过较少的传感器测点提取可靠的关键指标,并兼顾指标对梁桥群体的普适性和对结构状态的指示能力,吸引了众多学者的关注。中性轴^[6]作为梁桥通用参数,与结构的受弯性能紧密相关,具有损伤识别以及状态评估的潜力^[7]。

数值模拟以及实验室试验是对中性轴特性进行概念验证的有效手段。Plude等^[8]在某组合梁桥有限元模

收稿日期: 2019-03-18

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC1500605); 国家自然科学基金(51978508)

第一作者: 夏 焯(1983—),男,副研究员,硕士生导师,工学博士,主要研究方向为桥梁健康监测。

E-mail: yxia@tongji.edu.cn

通信作者: 孙利民(1963—),男,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为桥梁健康监测与振动控制。

E-mail: lmsun@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

型中,设计了盖板开裂、组合作用损失和桥面板退化等三类损伤工况,结果表明,中性轴相比自然频率、应变分布性能更为显著。Nakamura等^[9]对比了空心钢管、灌浆钢管、钢管混凝土等三类构件在不同加载阶段的中性轴位置。空心钢管的中性轴位置保持不变,而钢管混凝土的中性轴位置随结构的屈服、破坏而不断升高,验证了中性轴位置对非对称损伤的敏感性。Stroh等^[10]研究了组合钢箱梁试件在循环荷载作用下的中性轴位置变化规律。随着循环次数的增加,箱梁顶板混凝土的裂缝不断开展,导致顶板刚度减小,中性轴沿截面向下移动,最后成功实现了损伤定位。Papastergiou等^[11]在类似的试验中得到了相同的结论。Park等^[12]将中性轴指标应用于纤维增强复合材料(FRP)桥面板和钢管间组合作用的评估,考察了中性轴指标对于各类建筑材料的适用性。

数值模拟和试验无法提供在役桥梁所处的真实环境,研究者们开展了短期实桥监测以评估中性轴指标面向复杂工程结构的实际指示能力。Gangone等^[13]选取了某公路桥梁作为监测对象,设置了主梁不均匀沉降、外侧横隔板断开、内侧横隔板断开3类损伤工况,中性轴位置相对于梁高发生了5%~28%的改变,具有一定的损伤指示能力^[14]。Sigurdardottir等^[15]对一座预应力混凝土人行桥进行了短期监测以及荷载试验,得出混凝土收缩、徐变以及非线性温度梯度是中性轴定位的主要误差来源,短期荷载测试相比长期监测具有更好的精度,以及长标距传感器显著增加了识别损伤的可能性。据此,对某组合桥梁的大尺度模型引入了小体量的混凝土分层和裂缝,发现中性轴位置对于桥面板中的微小损伤足够敏感^[16]。Chakraborty等^[17]观察到某组合桥梁在车辆荷载激励下,中性轴位置按一定的概率特性发生波动,采用荷载激励下的最大应变计

算中性轴位置,可有效减小波动范围^[18]。亦有研究尝试用概率分布模型描述实测中性轴位置的变化规律,如韦伯分布^[19]、或高斯分布^[15]。除统计学方法外,Xia^[20]基于青马大桥健康监测系统的应变时程信号,综合多尺度小波分析和卡尔曼滤波器,改善了中性轴位置估计结果的离散程度。

对于在役桥梁的长期监测,相关研究仍稍显薄弱,如何建立一个适用于长期监测的中性轴评估模式,仍是一个艰巨的挑战。本文以混凝土梁桥作为典型结构,提出了适用于该群体的指标体系与分析流程,并以实际工程为依托,对可行性展开了论证。首先,介绍阜长线分离式立交桥及监测系统,以及基于活载应变幅的中性轴位置测量方法。其次,长期监测的数据处理与分析过程,采用中性轴指标的统计特征值作为结构的长期监测指标。最后,基于实桥数据进行案例分析,验证指标体系指示长期结构性性能变化的稳定性、可靠性、准确性。

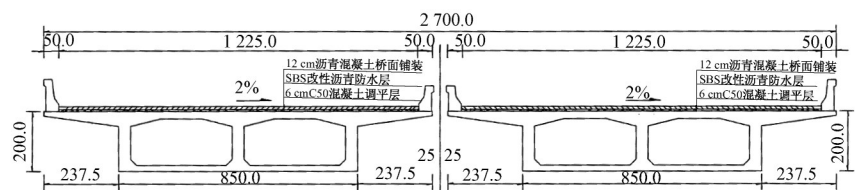
1 工程背景

1.1 实桥健康监测系统

阜长线分离式立交桥位于河北省保阜高速线上,是一座典型的混凝土梁桥,经过长年的运营后其结构安全状况引起了管理者的关注。该梁桥左幅全长为141.2 m,跨径组合为(32.0+32.0+37.0+32.0)m预应力混凝土连续箱梁;右幅桥梁全长为187.20 m,跨径组合为(25.0+25.0+25.0)m装配式部分预应力混凝土连续T梁+(35.0+37.0+32.0)m预应力混凝土连续箱梁。桥梁立面照、箱梁标准断面如图1所示。



a 立面照



b 箱梁标准断面图

图1 阜长线分离式立交桥(单位:cm)

Fig.1 Detachable viaduct on Fuchang line (unit: cm)

以阜长线分离式立交桥左幅第四跨为研究对象,部署结构健康监测系统,并通过各类传感器采集结构状态信息。应变监测跨中截面(编号03),1/4跨

和3/4跨截面(编号02、04)。对每个应变测点,配置温度传感器进行温度补偿。在梁1/4跨和3/4跨截面的两侧腹板上各布置一组应变传感器,每组2个测

点,用于获取截面应变分布,进而评估中性轴位置。同时,考虑交通荷载下梁1/2跨倾向于承受更大的弯矩并发生更显著的变形,在该位置(03截面)的两侧

腹板上各布置3个应变传感器。各测点编号及布设位置如图2所示。

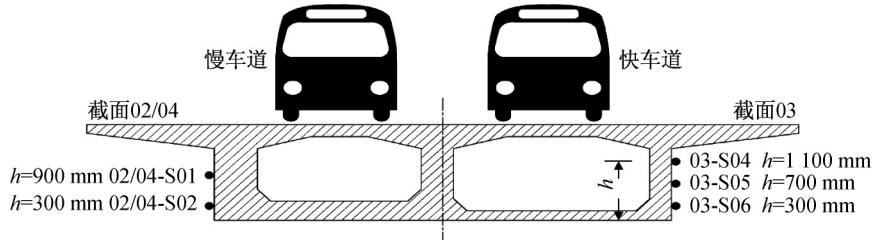


图2 应变测点断面布置

Fig.2 Layout of strain sensors on cross sections

1.2 活载应变幅与中性轴测量

中性轴作为截面的固有性质,仅与截面形式、尺寸相关而与荷载无关,在未发生损伤的情况下保持恒定。当混凝土开裂、分层、碳化、剥落及力筋腐蚀等改变截面特性的现象发生时,中性轴才可能随之移动,因而可作为结构的监测指标。需要说明的是,中性轴位置与“正应力零点”两者并不能简单等价,后者仅是前者在限定条件下的表现形式。例如,由于截面上存在预加轴力,预应力结构的正应力零点实为真实中性轴位置与轴力效应的叠加;对于纯弯曲梁,截面正应力零点与中性轴位置保持一致。针对以交通荷载为主的桥上活载,主梁的活载响应主要由弯曲变形支配,产生的应力应变增量遵循中性轴位置在截面上分布,因此活载应变分量可以近似估计中性轴位置,中性轴位置简称为NA(neutral axis position)。

以阜长线分离式立交桥监测系统为例,当车辆驶过监测截面时,布设在该截面的应变传感器信号将由平稳段进入激励段,并随车辆位置的变化依次经历波峰、波谷(图3),通过对比信号峰谷间的数值变化,可以提取由车辆荷载激励引起的应变幅值,并以此估计该截面的中性轴位置参数。

对于截面02,由车辆荷载引起的活载应变幅分布如图4所示。理想情况下,顶部应变 ϵ_t 和底部应变 ϵ_b 间的关系可按式表达:

$$\frac{\epsilon_t}{\epsilon_b} = \frac{y_t}{y_b} \quad (1)$$

式中: y_t 为顶部测点与中性轴的距离; y_b 为底部测点与中性轴的距离。根据图4中的应变分布关系,容易得到:

$$y_b = \frac{\epsilon_b}{\epsilon_b - \epsilon_t} d \quad (2)$$

式中: d 为两应变测点间的竖直距离。中性轴位置 h_{NA} 表达如下:

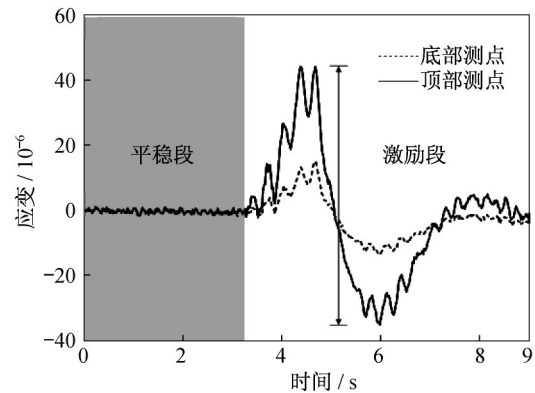


图3 交通荷载激励下的应变时程

Fig.3 Time history of strain under traffic loads

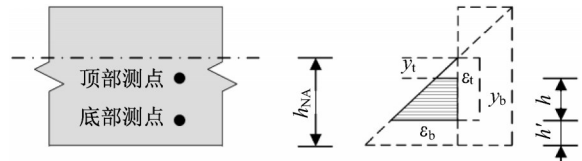


图4 基于活载应变幅的中性轴位置示意图

Fig.4 Neutral axis position estimation based on live loads induced strain amplitude

$$h_{NA} = y_b + d' = \frac{\epsilon_b}{\epsilon_b - \epsilon_t} d + d' \quad (3)$$

式中: d' 为底部应变测点距截面底的距离。

h_{NA} 整合了实测应变数据和结构设计参数,蕴含了桥梁状态变化信息。对于截面02与04,任一侧腹板的应变分布可根据2个测点唯一确定,并按式(3)完成 h_{NA} 的计算;对于截面03,对任一侧腹板上3个测点的应变进行线性拟合,可以更精准地获取应变分布模式,进而确定 h_{NA} 实测值。

一般地,车辆横向分布不均会产生偏心荷载作用,导致结构承受横向弯矩。在双向弯矩的作用下,实测的活载应变为2个主轴方向上弯曲应变的叠加,使得两侧腹板的 h_{NA} 发生相反的变化。取两侧腹

板的 h_{NA} 均值,可有效降低上述误差因素的影响,提高 h_{NA} 的估计准确度。

2 基于长期监测的中性轴指标

2.1 分析流程

h_{NA} 作为真实中性轴高度的可靠估计,虽是由应变分布推导而来,但本质上反映了材料刚度沿截面的分布。刚度分布与结构的承载能力、变形能力直接相关,故 h_{NA} 可指示桥梁安全性、使用性在运营过程中的变化。然而,单次 h_{NA} 测量受限于短时或特定荷载激励,时窗短、不确定性大、难以反映数据内在规律和结构退化趋势,作为性能评估的依据尚不充分。为此,在第1.2节中 h_{NA} 计算方法的基础上,进一步提出了适用于长期监测的指标分析流程。

首先,设定每次分析截取的时窗长度,对期间采样得到的原始应变进行预处理。桥梁在长期监测过程中的应变响应是一种混合的非平稳信号,其中包含了诸多与结构受弯行为无关的成分,若直接使用则导致NA估计的误差明显增大。通过多分辨率小波分析(MRA)对原始信号进行分解和重构,可提取交通荷载作用下的有效应变。接着,拾取应变信号在每次车辆通过时产生的峰值-谷值对,并计算相应的活载应变幅。根据活载应变幅沿截面高度的分布,估计 h_{NA} 并存入数据库。值得注意的是,对于同一监测截面上的不同测点,应保证各峰值-谷值数组的同步性,避免不同车辆激励的响应发生混淆。确定合适的评估周期,使用统计方法提取各截面的离散 h_{NA} 在该周期内表现的长期特征,作为桥梁的安全指标。最后,与监测历史和阈值区间进行比对,评估结构的安全储备和性能变化。

2.2 基于小波变换的应变成分分离

温度效应是导致实测应变发生偏离的主要原因之一。一方面,考虑到用于应变幅计算的峰值、谷值两点间隔极短,此期间温度变化的影响基本得到消除;另一方面,不同温度时段的截面所处的状态可能存在细微的不同,其影响需通过后续的分析降低。而对于交通荷载,根据桥梁结构在移动车辆下的强迫振动理论^[21],其引起的结构应变可进一步分解为长周期响应趋势与短周期扰动的叠加,或称静态响应与动态响应,如图5所示。静态响应为桥梁主要承重构件(即主梁)在车辆作用下产生的弯曲应变,与 h_{NA} 直接相关必须保留;动态响应为在车辆行驶过程中,由于路面不平整、伸缩缝跳车、车轮轮周

不圆等因素发生的随机振动,应予以消除。基于小波变换的MRA非常适合处理非平稳信号及提取特征成分,提取静态响应。

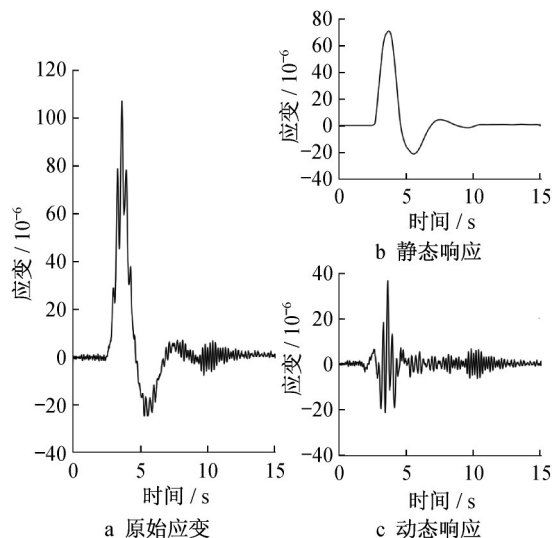


图5 交通荷载引起的静态响应与动态响应

Fig.5 Static and dynamic responses under traffic loads

2.3 峰值-谷值对拾取

由单次中性轴测量可以获取应变峰值与谷值,从而计算活载应变幅。在桥梁的长期监测过程中,对于每次分析所截取的信号长度,准确拾取车辆激励所产生的峰值-谷值对并排除其他小幅波动的干扰,需保证以下两点:(1)同一测点处拾取的峰值与谷值是一一对应的,即二者按照激励车辆进行配对;(2)同一截面处不同测点的拾取结果是同步的。为满足上述要求,采用基于峰值显著程度的拾取方法,如图6所示。

峰值显著程度的含义如图7所示。一般地,对一段给定长度的信号,以数值大于相邻点的某一点为局部极大值点(或称峰值点),而该点出现的时刻为峰值时刻。显而易见,峰值点和峰值时刻不唯一。

设定合理阈值,令仅显著程度超过阈值的峰值点被保留,从而实现了对车辆激励应变峰值的精准拾取。

特别地,存在这样一种情况,当多个车辆以密集车队的形式通过时,可能会导致各激励对应的峰谷发生“交错”或“重叠”。实际测得的应变作为一个叠加结果,峰谷不再代表准确的单车激励作用。实测峰谷沿截面的分布仍符合中性轴确定的比例关系,故不会影响 h_{NA} 的计算,结合阈值可进一步剔除不理想数据。

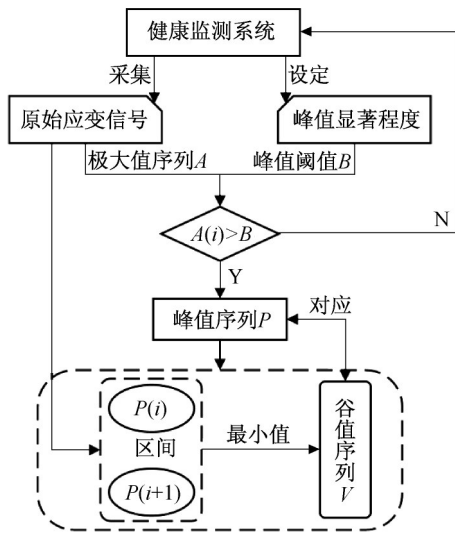


图6 峰值-谷值对拾取流程图

Fig.6 Flowchart of peak-valley pair picking principle

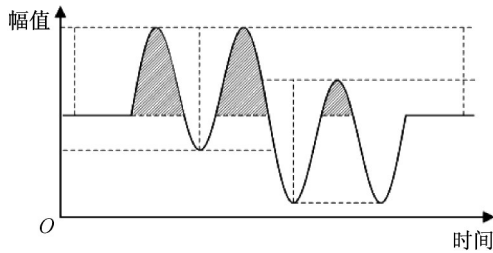


图7 峰值显著程度

Fig.7 Peak prominence

2.4 长期特征评估

鉴于 h_{NA} 的数值具有一定的波动性,虽然静态响应的分离和峰值-谷值对的拾取在一定程度上提高了估计精度,但仍无法完全消除测量误差的影响。进一步地,考虑波动本身就是实测 h_{NA} 内在规律模式的一种体现,因此采用数据的统计特征值作为监测指标表征结构的安全储备和状态变化。具体而言,对于指定截面,认为 h_{NA} 服从固定的分布模式,一般可采用正态分布^[15,22]进行描述,即 $h_{NA} \sim N(\mu, \sigma)$,并将其定义为截面的 μ 指标及 σ 指标。当截面是完好的或健康的时,有:

$$\mu_o \in U(\mu_c, \delta_\mu), \sigma_o \in U(\sigma_c, \delta_\sigma) \quad (4)$$

式中: μ_o 为实测 h_{NA} 的分布均值; σ_o 为分布标准差; μ_c 、 σ_c 分别对应的理论值; U 为表征指标波动范围的开集; δ_μ 、 δ_σ 分别对应的邻域半径; $U(\mu_c, \delta_\mu)$ 中心为 μ_c ,半径为 δ_μ 的开区间。设定评估周期为 T ,若指标的实测值 μ_o 、 σ_o 位于各自的合理范围内,则可判断结构是安全的。

在工程实践中,由于材料的离散、施工的偏差、环境的作用等因素的影响,通常无法仅参照桥梁设

计资料和计算结果给出 μ_c 、 σ_c 及 δ_μ 、 δ_σ 的合理取值,宜设定一段时间作为基准期并根据实测结果指定各项参数。此外,评估周期 T 的选取亦值得细心考量。一方面,过小的 T 易导致周期内样本太少而不具有代表性,进而无法准确反映真实的分布特征,使得随机误差较大;另一方面,过大的 T 将导致数据的利用率太低,不利于判断指标的发展趋势及制定合理的阈值区间。后续将讨论评估周期的优化问题。

3 实桥数据分析

3.1 采样与预处理

对阜长线分离式立交桥监测系统从2018年3月至2018年11月的应变数据进行分析。为便于显示,应变曲线均以初始时刻的应变值为基准进行归零处理。

根据原始应变的波形特征,选用sym6小波对各测点数据进行静态响应成分的分离。以测点02-S02的信号片段为例,如图8a所示,原始应变由于动态响应及噪声的干扰,难以进行准确的峰值-谷值定位。通过多分辨率小波分析对原始信号进行5层分解,并提取其在第5层的近似A5作为所需的静态响应成分。对比两者形态可以发现,原信号与A5的变化趋势一致,而后者在响应段更为平滑。类似地,可以对位于截面03、04的测点进行相同处理,如图8b、8c所示。为进一步验证其合理性,计算各测点在处理前后的相关系数 r 和残差 $\hat{\epsilon}$,按式(5)~(6)计算:

$$r = \left| \frac{E\{[X - E(X)][Y - E(Y)]\}}{\sqrt{D(X)}\sqrt{D(Y)}} \right| \quad (5)$$

$$\hat{\epsilon} = X - Y \quad (6)$$

式中: $E(\bullet)$ 表示均值计算; $D(\bullet)$ 表示方差计算。依次将测点的原始信号代入 X ,A5代入 Y ,得到的结果见图8和表1。

根据图8和表1,三个测点的 r 值都接近于1,可见相关性极好,充分重现了原始信号的响应趋势。考察 $\hat{\epsilon}$ 的均值,发现残差均值都近似为0,与动态响应的特征相符。由此可以证明,A5作为结构在交通荷载下的静态响应是准确的、可靠的。

成分分离后,拾取其峰值-谷值对并导出活载应变幅。选图8中的测点02-S02、03-S03、04-S04(测点位置参见图2),分别作为截面02、03、04的拾取参照。设定不同的峰值显著程度阈值并测试拾取效果,最终确定适用于各参照的阈值取值,如表2所示。仍以图8

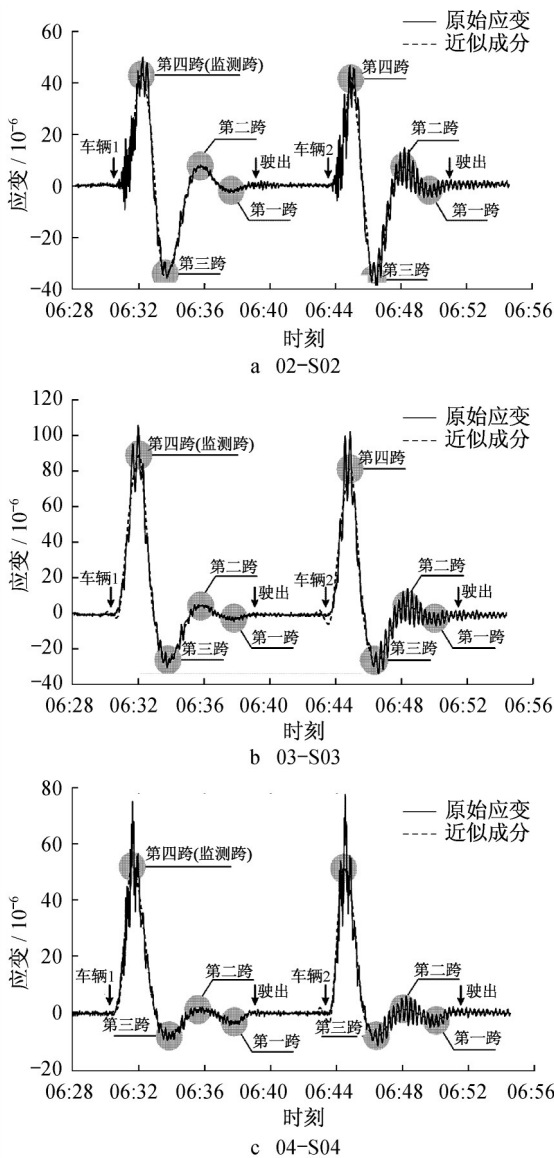


图8 应变成分分离

Fig.8 Strain component separation

表1 相关系数与残差计算

Tab.1 Correlation coefficient and residual calculation

测点	r	$E(\hat{\epsilon})/10^{-6}$
02-S02	0.974	995
03-S03	0.982	970
04-S04	0.974	926

的信号片段为例,共有2辆车依次经过桥面,分别产生2个激励段。每一个激励段均可进一步划分为峰-谷-峰-谷的组成,与阜长线分离式立交桥的四跨连续梁结构相对应。其中,第1个峰在车辆驶入监测桥跨时产生,而第1个谷在车辆抵达相邻跨时开始出现。按表2的阈值对每个激励段中的第1组峰值-谷值对进行拾取,并按参照点的拾取时刻截取同截面其他测点的应

变值,进而导出相应的活载应变幅。由于截面02与03的可用测点较多,故仅选取部分测点进行对比,如图9a,9b所示;而对于截面04,给出04-S03、04-S04共2个正常测点的分析结果,如图9c所示。根据各截面的应变幅分布估计 h_{NA} ,计算结果如图9和表3(含车辆1、2数据)所示。

表2 拾取参照的峰值显著程度阈值

Tab.2 Peak prominence threshold for picking references

截面	拾取参照	阈值/ 10^{-6}
02	02-S02	50
03	03-S03	70
04	04-S04	48

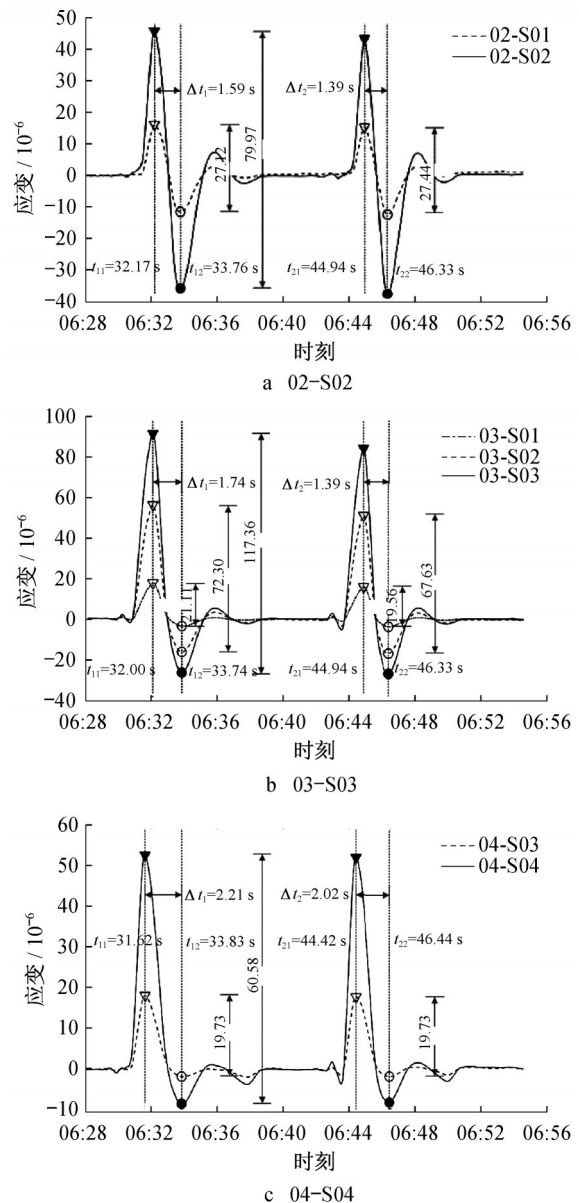


图9 峰值-谷值对拾取与应变幅

Fig.9 Comparison of peak-valley pair picking and strain amplitude

表3 信号片段的实测 h_{NA}
Tab.3 Measured h_{NA} of signal fragments

截面	测点	峰值/ 10^{-6}	谷值/ 10^{-6}	应变幅/ 10^{-6}	中性轴位置/mm
02	02-S01	15.35(14.83)	-11.78(-12.62)	27.12(27.44)	1 203.7(1 207.6)
	02-S02	43.81(42.20)	-36.16(-38.11)	79.97(80.31)	
	02-S03	10.24(11.76)	-10.83(-11.27)	21.07(23.03)	
	02-S04	30.34(34.66)	-32.95(-33.87)	63.29(68.53)	
03	03-S01	17.43(15.56)	-3.68(-4.00)	21.11(19.56)	1 274.4(1 276.1)
	03-S02	55.86(50.67)	-16.43(-16.96)	72.30(67.63)	
	03-S03	90.75(83.58)	-26.61(-26.64)	117.36(110.22)	
	03-S04	10.30(11.76)	-4.25(-3.92)	14.54(15.68)	
	03-S05	39.28(42.19)	-14.26(-13.96)	53.54(56.15)	
	03-S06	64.74(68.98)	-23.37(-22.88)	88.10(91.87)	
04	04-S01	—	—	—	1 189.8(1 193.9)
	04-S02	—	—	—	
	04-S03	18.09(17.81)	-1.64(-1.92)	19.73(19.73)	
	04-S04	52.31(51.75)	-8.27(-8.26)	60.58(60.01)	

3.2 指标评估周期对比研究

基于积累的 h_{NA} 数据,对不同评估周期下的长期指标进行比较。首先验证指标的合理性。考虑每小时、每日、每月3种周期取值,截取相应周期长度内的 h_{NA} 数据,进行概率特性分析。图10为截面02-04分别按小时、按日、按月统计得到的频率分布直方图,并进行了正态性检验。对比图10各工况,均符合正态分布规律,短(小时、日)周期下的拟合分布更为集中,而长(月)周期下的离散程度显著增加,具体表现为概率曲线的变宽、变矮。事实上,过短的评估周期可能受制于样本数量从而导致缺乏代表性,过长的评估周期中存在较多的异常数据干扰因而不确定性增大,故合理的周期取值对于保证指标性能的相对稳定十分重要。进一步地,使用正态概率图验证 h_{NA} 样本的分布规律。为检查数据是否服从正态分布,图10各图中右侧给出正态概率图,展示的是样本的累积频率分布和标准正态分布的累积概率分布间的关系,横轴显示样本点,纵轴表示概率(0.001~0.999),如各样本点的位置与理论直线接近或重合,则代表其具有良好的正态性。由图10可见,日周期(图10第2列)下的观测点与理论值吻合得最好,小时周期(图10第1列)次之,而月周期(图10第3列)的结果最差。

同样地,对于03与04截面,按上述方法进行不同周期取值下概率特性对比,结果如图10所示。可以看出,短周期下的数据分布更为集中,正态特征更明显。

提取图10中的样本统计参数(μ 与 σ),即中性轴指标,汇总结果如图11所示。由图11可见,随评估周期的延长,各截面 h_{NA} 分布的总体趋势为均值下降,标准差增加。对比不同截面,在同一周期下,总有 $\mu_{\text{截面03}} > \mu_{\text{截面02}} > \mu_{\text{截面04}}$, 以及

$\sigma_{\text{截面03}} < \sigma_{\text{截面02}} < \sigma_{\text{截面04}}$ 。显而易见,标准差的变化与应变测点的布置方式紧密相关,更多的测点数量结合线性拟合可以有效提升 h_{NA} 估计准确性。最后,对上述 h_{NA} 样本进行KS(Kolmogorov-Smirnow)检验。对于假设检验问题 H_0 ,即样本所来自的总体分布服从某特定分布,KS检验采用基于累积分布函数的思想,将样本的频率分布 $F(x)$ 与理论分布 $G(x)$ 进行对比,其检验统计量:

$$D = \max |F(x) - G(x)| \quad (7)$$

给定样本容量 N 与显著水平 α ,可唯一确定临界值 $D_{N,\alpha}$,若有 $D \geq D_{N,\alpha}$,则拒绝原假设,反之,认为 H_0 成立。依次对图9中的数据按 $\alpha = 0.01$ 与 $\alpha = 0.05$ 完成假设检验,结果如表4所示。

根据表4,短周期下的 h_{NA} 样本能在更高的显著水平接受 H_0 。对于截面02与03,短周期指标接受假设的显著水平 $\alpha = 0.01$ 。截面04由于正态性稍差,对应显著水平 $\alpha = 0.05$ 。此外,所有截面在长周期下均拒绝了 $\alpha = 0.05$ 的假设检验。由此可见,严格意义上,仅短周期指标的理论依据是充分的,而长周期指标虽然在频率分布模式和正态概率对比上较为趋近理论分布,但仍无法通过量化检验。在实桥监测中,短周期指标能更好地反映结构在长年运营过程中的退化趋势。值得注意的是,“短周期指标”与“长期”监测并不矛盾。长期指标的关键在于该指标可以在长时间的监测中指示结构的变化,而不受其他因素的干扰,因此可以通过短周期指标实现长期监测。

以2018年6月的 h_{NA} 数据为对象,考察小时周期指标与日周期指标的指示能力,如图12所示。在小时周期下, μ 指标表现为围绕真实 h_{NA} 参数的回复性变动且幅度较小, σ 指标呈现出一定的变异性,在部

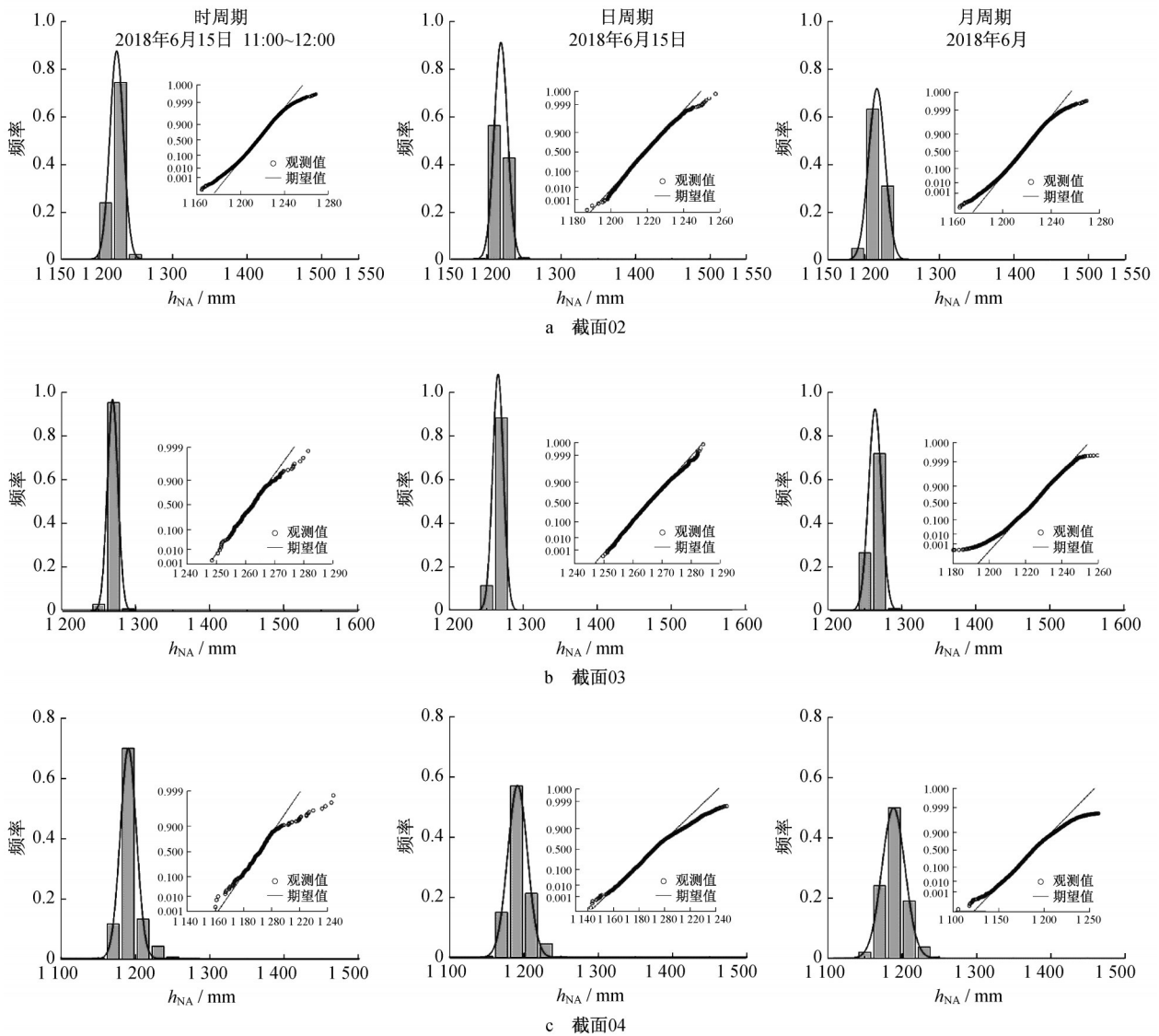


图 10 各截面的 h_{NA} 概率分布
 Fig.10 h_{NA} probability distribution of each section

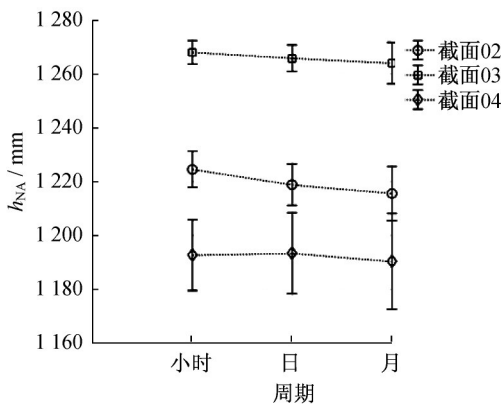


图 11 各截面 h_{NA} 分布
 Fig.11 h_{NA} distribution for each section

表 4 假设检验: h_{NA} 服从正态分布
 Tab.4 Hypothesis test: h_{NA} subjects to normal distribution

周期	截面	长期指标/mm		显著水平 α	
		μ	σ	0.01	0.05
小时	02	1 224.53	6.62	接受	接受
	03	1 268.01	4.33	接受	接受
	04	1 192.68	13.15	拒绝	接受
日	02	1 218.79	7.70	接受	接受
	03	1 265.82	4.89	接受	接受
	04	1 193.32	15.06	拒绝	接受
月	02	1 215.56	10.04	拒绝	拒绝
	03	1 263.98	7.70	拒绝	拒绝
	04	1 190.32	17.82	拒绝	拒绝

分时刻发生显著增加。以截面 02 为例,在 σ 指标中共计 357 组数据中,有 341 例位于 10 mm 以下,证明

h_{NA} 参数此时处于极低的波动水平,仍有 16 例的幅度明显超过 10 mm,占比约为 4.5%,主要因为对应

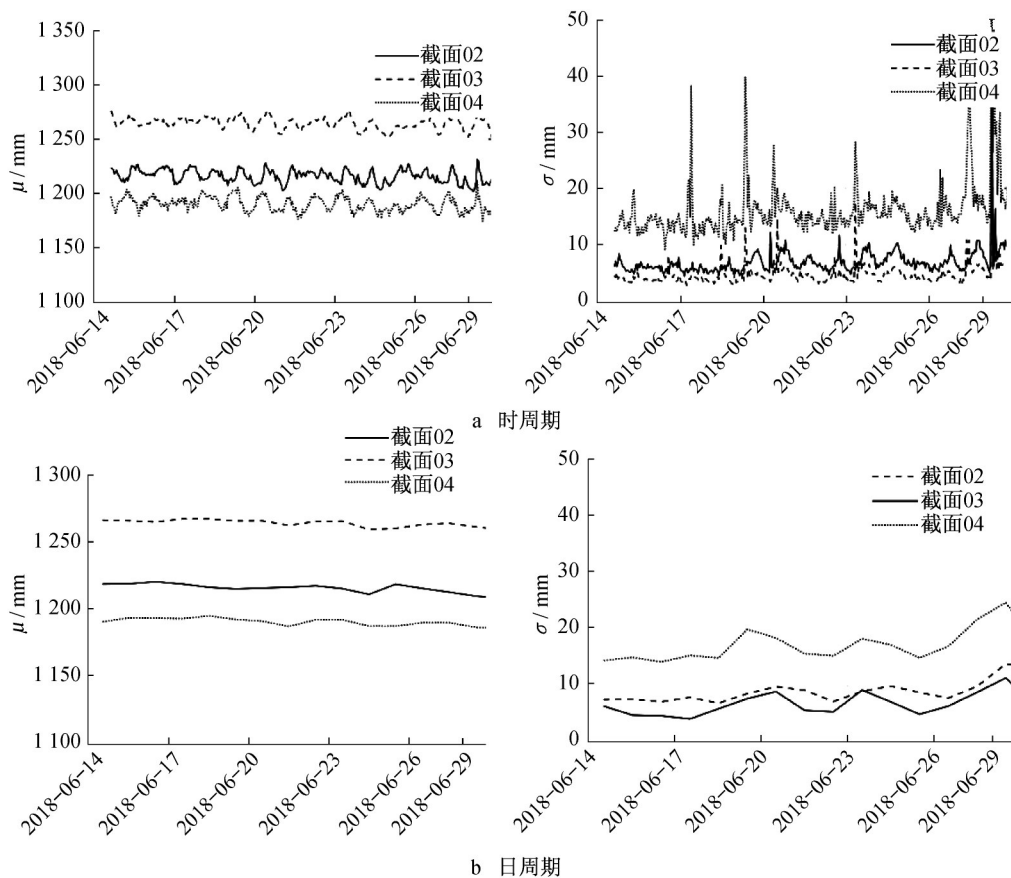


图12 μ 指标与 σ 指标

Fig.12 μ Index and σ Index

时刻的样本数极少,导致 σ 指标有较大估计误差。然而, σ 指标异常时对应的 μ 指标变化仍处于正常区间,可见结构安全。

在日周期下, μ 指标的数值基本不变,具有更好的稳定性; σ 指标的变异性依然存在,但相比小时周期有了一定程度的减小。综合来看,一方面两种短周期模式均可以通过 μ 和 σ 两项指标的结合使用实现结构安全的准确评估,另一方面日周期指标可能具有更优秀的指标性能。

3.3 基于日周期指标的趋势分析

考虑到指标的可靠性与稳定性、对结构的指示能力,以及数据的利用率等多项因素,以日周期指标为核心,基于2018年3月至11月间的采样数据,对指标变化趋势进行量化分析,据此评估该桥的安全储备和退化程度。

图13为不同监测截面导出的日周期指标分析结果。期间,由于系统开发、调试、维护以及其他事件的影响,导致系统运行存在部分中断,有效覆盖时间总计160 d。不难发现,各截面的长期监测指标,在所研究的时段中保持相对稳定。根据图13a,截面02的 μ 指标在1 210 mm上下浮动,而 σ 指标亦维

持在较低水平。图13b中,截面03的指标走势与截面02一致。特别地,由于系统运行初期(2018年3月到4月)性能尚不完善,对于测点数量较多的截面03,不同测点间的采样同步性较差,降低了 h_{NA} 估计的准确性,进而影响日周下的统计特征,使 σ 指标明显增大,在更新采集程序后(2018年5月到11月), σ 指标恢复至正常水平。此外,因采样不同步产生的随机误差可在均值计算过程中抵消,故 μ 指标未发生明显改变。对于图13c,截面04相比截面02, μ 指标稍小,并且 σ 指标更大,与前文讨论一致。综合上述结果,可以推断,在监测时段内,阜长线分离式立交桥处于安全状态。

总体而言,任一截面的 h_{NA} 在日周期内有着稳定的分布模式,概率特性几乎不随时间推移而变化,温度效应等干扰因素基本被消除,即 h_{NA} 与目标结构的性能唯一地相关。进一步地,基于 μ 指标与 σ 指标的中性轴指标体系及其对应的长期监测方法能有效归纳中性轴的规律模式和内在特征,从而表征在长期监测过程中结构性能改变和退化趋势,实现混凝土梁桥的安全评估。

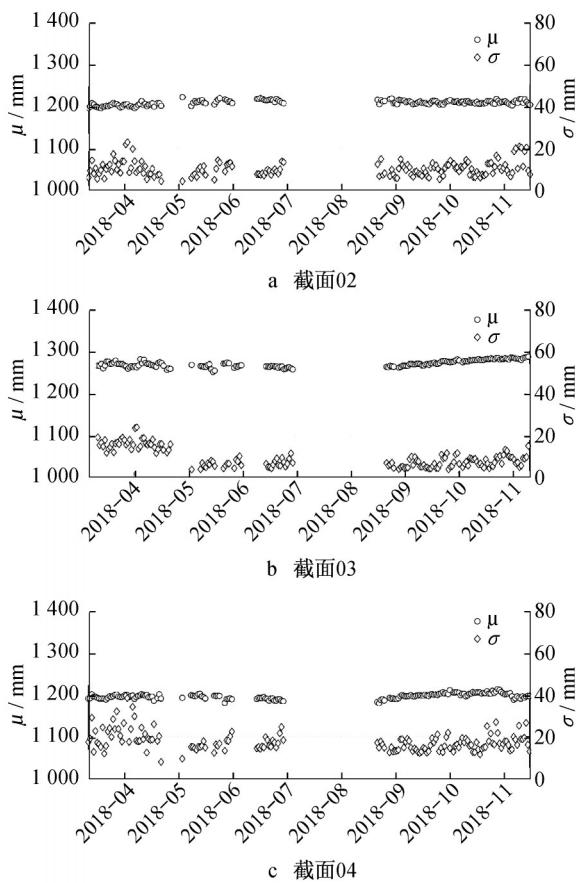


图13 日周期指标变化趋势

Fig.13 Trends of periodic index by day

4 结论

针对分布广、数量多、形式简单、机理明确的中小跨径桥梁群体,选取混凝土梁桥作为其中的典型,研究了通用的中性轴位置参数和相应的实用指标体系,并通过实桥监测系统获取数据进行分析,验证了基于中性轴指标的长期监测与评估方法,主要结论如下:

(1)提出适用于长期监测与评估的中性轴指标处理方法,提高了实测 h_{NA} 计算的准确性。温度效应通过极短的峰谷拾取间隔和统计分析过程基本被消除。多分辨率小波分析可以剥离车辆振动等动态扰动因素的影响,有效地从原始应变中分离得到主梁在交通荷载下的静态响应趋势,从而实现信号的去噪与平滑。

(2)对时、日、月3种评估周期进行比较,发现短周期(小时、月)指标的正态性更好,而长周期(月)指标无法通过正态分布检验。时周期与日周期对比显示,后者对应的指标性能更为稳定,适用于结构的长期监测与评估。

(3)分析了实桥监测数据,结果表明日周期指标数值未发生明显改变。 h_{NA} 的长期概率特性稳定,仅与目标截面的构造尺寸以及健康状态相关,验证了指标体系的准确性和可靠性。

参考文献:

- [1] 淡丹辉,孙利民.大型桥梁健康监测系统的实践与展望[C]//第四届全国公路科技创新高层论坛.北京:[s.n.],2008:684-690.
DAN Danhui, SUN Limin. Practice and prospect of large bridge health inspection system. [C]//The fourth national highway Science and Technology innovation Forum. Beijing:[s.n.],2008:684-690.
- [2] SVIRSKY A. The national bridge inventory database [J]. Retrieved from National Bridges, 2014.
- [3] KAUNDINYA I, HEIMBECHER F. Identification and classification of European bridge and tunnel types [C/CD]//IABSE-IASS 2011: London Symposium Report, Taller, Longer, Lighter.London:[s.n.],2011.
- [4] 中国公路学报编辑部.中国桥梁工程学术研究综述(2014)[J].中国公路学报,2014,27(5):1.
Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's Bridge Engineering Research (2014) [J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(5):1.
- [5] 张彬,朱栋,徐建炜,等.浙江省中小跨径混凝土桥梁整体状况与典型病害研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2013,32(S1):742.
ZHANG Bin, ZHU Dong, XU Weijian, *et al.* Overall situation and typical diseases of medium and small span concrete bridges in Zhejiang Province [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science Edition), 2013, 32 (S1):742.
- [6] 徐振华.基于中性轴位置变化的桥梁损伤识别方法[J].四川建筑科学研究,2016,42(2):43.
XU Zhenhua. The method of damage identification based on the variation of neutral-axis location [J]. Sichuan Building Science, 2016,42(2):43.
- [7] 叶肖伟,刘坦,董传智,等.基于卡尔曼滤波和中性轴位置的结构损伤识别[J].浙江大学学报(工学版),2017,51(10):2012.
YE Xiaowei, LIU Tan, DONG Chuanzhi, *et al.* Structural damage detection based on Kalman filter and neutral axis location [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science),2017,51(10):2012.
- [8] PLUDE R, CHRISTENSON J, DEWOLF J, *et al.* Quantifying damage measures for a composite steel girder bridge using finite element analysis [J]. Structural Health Monitoring, 2011, 2:1831.
- [9] NAKAMURA S, HOSAKA T, NISHIUMI K. Bending

- behavior of steel pipe girders filled with ultralight mortar [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2004,9(3):297.
- [10] STROH S, SEN R, ANSLEY M. Load testing a double-composite steel box girder bridge [J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2010 (2200):36.
- [11] PAPASTERGIOU D, LEBET J. Design and experimental verification of an innovative steel - concrete composite beam [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2014,93:9.
- [12] PARK K, KIM S, LEE Y, *et al.* Degree of composite action verification of bolted GFRP bridge deck-to-girder connection system [J]. *Composite Structures*, 2006,72(3):393.
- [13] GANGONE M V, WHELAN M J, JANOYAN K D. Wireless monitoring of a multispan bridge superstructure for diagnostic load testing and system identification [J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2011,26(7):560.
- [14] GANGONE M V, WHELAN M J, JANOYAN K D, *et al.* Development of performance assessment tools for a highway bridge resulting from controlled progressive monitoring [J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2014,10(5):551.
- [15] SIGURDARDOTTIR D H, GLISIC B. Neutral axis as damage sensitive feature [J]. *Smart Materials and Structures*, 2013,22(7):75030.
- [16] SIGURDARDOTTIR D H, GLISIC B. Detecting minute damage in beam-like structures using the neutral axis location [J]. *Smart Materials and Structures*, 2014,23(12):125042.
- [17] CHAKRABORTY S, DEWOLF J T. Development and implementation of a continuous strain monitoring system on a multi-girder composite steel bridge [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2006,11(6):753.
- [18] CARDINI A J, DEWOLF J T. Long-term structural health monitoring of a multi-girder steel composite bridge using strain data [J]. *Structural Health Monitoring*, 2009,8(1):47.
- [19] OSHIMA Y, KADO M. Long-term monitoring of composite girders using optical fiber sensor [C]// *Proceedings of the Sixth International IABMAS Conference. Bridge Maintenance, Safety, Management, Resilience and Sustainability. Lake Maggiore: IABMAS, 2012:777-784.*
- [20] XIA H. SHM-based condition assessment of in-service bridge structures using strain measurement [D]. Hong Kong: The Hong Kong Polytechnic University, 2012.
- [21] 李国豪. 桥梁结构稳定与振动 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1992.
- LI Guohao. *Stability and vibration of bridge structures* [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1992.
- [22] SIGURDARDOTTIR D H. Strain-based monitoring methods for beam-like structures [D]. Princeton: Princeton University, 2015.