

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107610

# 基于被动激励的结构应变监测系统在线校准方法\*

荆根强<sup>1,2</sup>, 段发阶<sup>2</sup>, 彭璐<sup>1</sup>, 崔建军<sup>3</sup>

(1. 交通运输部公路科学研究所 北京 100088; 2. 天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室 天津 300072;  
3. 中国计量科学研究院 北京 100029)

**摘要:**针对在役桥梁结构应变监测系统全天时工况下的在线校准问题,提出了一种基于被动激励的在线校准方法,建立了在线校准系统模型。该模型以桥梁正常通行车辆的动态荷载为激励源,通过应变监测系统与参考系统对结构应变响应参数的同步测量,构建校准溯源链,实现在役应变监测系统不间断工作状态下的在线校准。根据结构应变监测系统计量性能评测需要,建立了基于大样本数据的期间测量误差、基本误差及置信区间的量化分析模型。依托广东九江大桥开展了试验验证,结果表明,所提方法具有现场实施的可行性,由不同数据集计算所得的在线校准结果一致性较好,在包含概率大于90%时,基本误差区间的半宽度偏差不大于 $\pm 0.005$ 。

**关键词:** 计量学; 在线校准; 结构应变监测; 被动激励

**中图分类号:** TB92 TH711 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8040

## On-line calibration method for structural strain monitoring system based on passive excitation

Jing Genqiang<sup>1,2</sup>, Duan Fajie<sup>2</sup>, Peng Lu<sup>1</sup>, Cui Jianjun<sup>3</sup>

(1. Research Institute of Highway Ministry of Transport, Beijing 100088, China; 2. State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 3. National Institute of Metrology, China, Beijing 100029, China)

**Abstract:** Aiming at the on-line calibration problem of in-service strain monitoring systems (SMS) for bridge structures under all-day working conditions, an on-line calibration method based on passive excitation is proposed, and an on-line calibration system model is established. In this model, the dynamic load of normal passing vehicles on the bridge is used as the excitation source. Through synchronously measuring the structural strain response parameters of the SMS and the reference system, the traceability chain of calibration is constructed to realize the on-line calibration under the continuous working state of the in-service SMS. According to the requirements of the measurement performance evaluation of the SMS, a quantitative analysis model of period measurement error, basic error and confidence interval based on large sample data is established. Experiment verification was carried out on Jiujiang Bridge in Guangdong Province. The results show that the proposed method has feasibility for field implementation, and the on-line calibration results calculated from different data sets have good consistency. When the coverage probability is greater than 90%, the half-width deviation of the basic error interval is less than  $\pm 0.005$ .

**Keywords:** metrology; on-line calibration; structural strain monitoring; passive excitation

## 0 引言

应变监测是桥梁、大坝、高层建筑等结构健康监测的

重要任务。应变传感系统的计量性能是结构监测数据准确性的保障,也是结构监测系统发挥其损伤检测、性能评估、安全预警、寿命预测等作用的基本前提<sup>[1-6]</sup>。

应变监测的常用传感器包括光纤光栅式应变计、电

收稿日期:2021-03-13 Received Date: 2021-03-13

\* 基金项目:中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(2020-9045)、交通运输行业重点科技项目(2020-ZD2-004)资助。

阻式应变计、振弦式应变计等。其共性原理是通过结构变形的传导作用,将结构应变测量转化为对传感元件自身应变的测量问题,然后利用传感元件的长度变化与特定物理参量(如光波长、电阻、固有频率等)的耦合关系,实现应变的间接测量<sup>[7-10]</sup>。

应变测量的原理决定了监测结果的可靠性不仅取决于传感器自身的计量性能,也与传感器的固定、张拉状态密切相关。为满足桥梁结构全寿命周期内应变状态参量连续获取的需要<sup>[11-12]</sup>,传感器在其服役期内,既要开展溯源性校准,又不能任意改变其安装状态。因此,在役结构应变监测系统必然面临野外环境、持续监测和被动激励条件下的在线校准问题。

在传感系统校准方法领域,国内外近20年来开展了广泛的研究,已形成一定的范式。其基本思路是:在特定激励源作用下,通过一种测量方法与另一种测量方法的同步测量比较来建立溯源链。气浮质量法(levitation mass method, LMM)是一种经典的力传感器校准方法<sup>[13]</sup>。该方法通过特定激励源驱动标准质量块运动产生惯性力,由被校准传感器测量输出力值;同时,通过运动测量系统测量标准质量块的加速度,依牛顿第二定律测算标准力值;通过传感器的输出和标准力值的同步比较实现力传感器的动态校准。此方法中驱动标准质量块运动的激励源主要有冲击激励、振荡激励、台阶激励3种<sup>[14]</sup>。德国联邦物理技术研究院<sup>[15]</sup>、美国国家标准技术研究院<sup>[16]</sup>等研究机构均通过类似方法实现了力传感系统的动态校准。LMM方法在实施过程中不影响被校准系统的连续正常工作,与在线校准的实际需求是一致的,但对激励源和测量系统的工作条件要求苛刻,无法满足现场在线校准的要求。

外部激励条件下的数据分析是桥梁结构状态评估的重要技术手段。桥梁荷载试验采用载重车辆对桥梁进行动态或静态加载,同时监测桥梁结构响应以实现结构损伤探测、性能评估、承载力分析等<sup>[17-19]</sup>。基于结构振动监测的运行模态分析(operational modal analysis, OMA)方法,通过综合环境激励下桥梁结构的响应数据进行结构模态分析,可在无需中断交通的条件下进行桥梁状态评估<sup>[20-21]</sup>。目前,在针对大型桥梁的结构性能研究中,以车辆荷载、环境振动等作为激励条件,仍是最为便捷可行的试验模式<sup>[22-23]</sup>。但由于车辆荷载和环境条件的不可控性,以此类被动激励为基础的在线校准,将面临理论模型和实施方案的多重挑战。

本文针对桥梁结构应变监测系统全天时工作状态下的在线校准问题,从不阻断正常交通的便捷性原则出发,提出了一种基于被动激励的在线校准方法。该方法以桥梁正常通行时的车辆动态荷载为激励条件,通过应变监测系统与参考测量系统对结构响应参量的同步测量建立

校准链,通过基于大样本数据的计量特性分析模型实现在线校准特性的量化表征。

## 1 原理与模型

### 1.1 在线校准原理

结构应变监测系统服役过程中的在线校准,相对于实验室内校准来说存在着诸多难点,尤其是现场复杂工况下,不宜采用人工激励源,因此输入激励条件具有不可控性。本文提出在通行车辆这一被动激励作用下,利用参考传感系统与待校准传感系统进行同步测量比对的在线校准模型,其原理如图1所示。

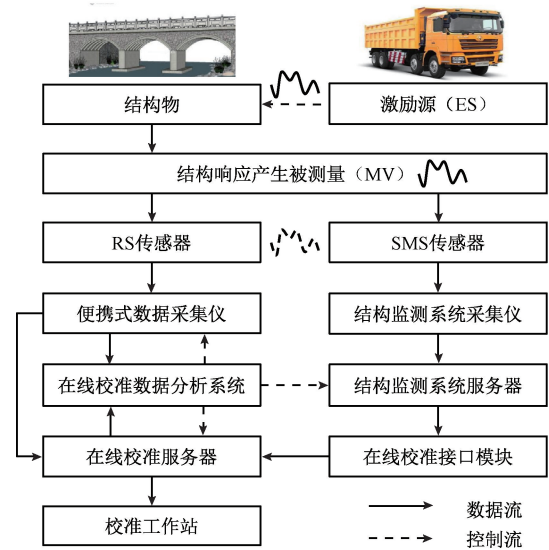


图1 在线校准模型的原理图

Fig. 1 Principle diagram of the on-line calibration model

该校准模型由被测量(measured variable, MV)、激励源(excitation source, ES)、参考系统(reference system, RS)和在用结构监测系统(structural monitoring system, SMS)4个要素构成。在正常交通条件下,通行车辆的组合加载效应(激励源)作用于桥梁结构上,在结构局部产生应变。SMS和RS传感器同时对该应变参量进行测量,并经采集仪获取测量数据序列。其中,RS传感器已经过溯源性校准,并确定具有准确、稳定的测量性能,用于提供在线校准过程中的参考量值。通过该模型,SMS可在正常的结构应变监测条件下,仅通过提供应变的实时监测数据而实现在线校准和计量特性评价。

为确保SMS和RS传感器所测参量的一致性,采用如图2所示的安装模式。图2中,RS传感器与SMS传感器并排近距离安装,可对桥梁结构的同一应变截面进行测量,传感器的安装方向应与梁体发生应变的方向一致。为解决由于绝对测量结果差异对后续数据处理带来的不

便,宜在 RS 传感器安装时对其进行预张紧调节,使其与 SMS 的测量结果保持同一水平上,再进行在线校准数据观测。

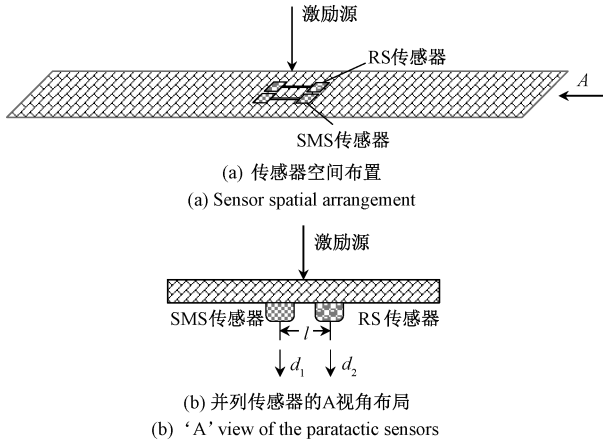


图 2 传感器安装模式  
Fig. 2 Installation mode of the sensors

考虑到结构应变空间分布的不均匀性,以及 SMS 和 RS 测量频率和时序差异等因素,SMS 和 RS 的实际测量值序列中融入了被测参量时-空差异的影响。SMS 和 RS 对被测应变参量进行测量所获取的数据序列,按照如图 3 所示的分析模型,对数据序列进行匹配后,分析待校准结构应变监测系统的计量特性。

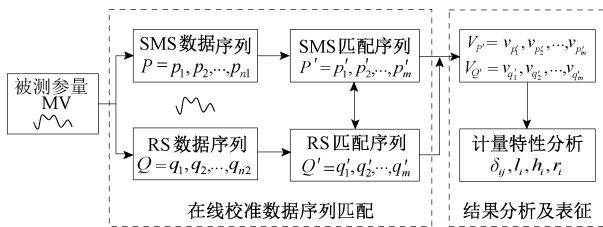


图 3 在线校准数据序列分析  
Fig. 3 Data sequence analysis for online calibration

在交通荷载、大地脉动、水流、风力等综合作用下,桥梁的应变响应是多种频率叠加后的时变信号。因此,SMS 和 RS 所测量的数据序列应经过匹配解决错位和尺度差异问题,实现同步和对应后,再进行计量特性分析<sup>[24]</sup>。

1.2 瞬时测量误差建模

对结构应变监测系统在线校准时,SMS 和 RS 分别按各自设定的测量频率连续同步采集应变监测数据,并按时间排序形成测量数据序列。设 SMS 传感器安装位置的结构真实应变变量值序列为:

$$P = p_1, p_2, \dots, p_i, \dots, p_n \quad (1)$$

SMS 的测量示值序列为:

$$\tilde{P} = \tilde{p}_1, \tilde{p}_2, \dots, \tilde{p}_i, \dots, \tilde{p}_n \quad (2)$$

式中:  $p_i$  和  $\tilde{p}_i (i = 1, 2, \dots, n)$  分别为 SMS 在第  $i$  时刻测量的真值和示值。

同样,设 RS 安装位置的真实应变变量值序列为:

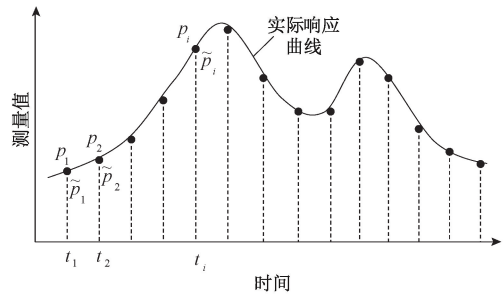
$$Q = q_1, q_2, \dots, q_i, \dots, q_n \quad (3)$$

RS 的测量示值序列为:

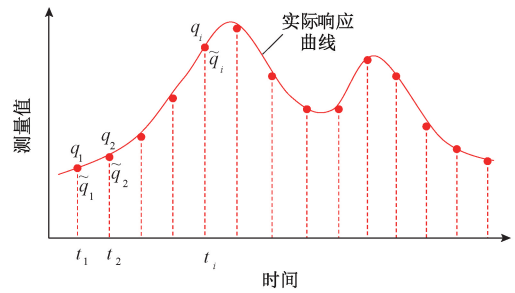
$$\tilde{Q} = \tilde{q}_1, \tilde{q}_2, \dots, \tilde{q}_i, \dots, \tilde{q}_n \quad (4)$$

式中:  $q_i$  和  $\tilde{q}_i (i = 1, 2, \dots, n)$  分别为 RS 在第  $i$  时刻测量的真值和示值。

上述测量过程如图 4 所示。



(a) Structure response and its indicating value sequence at SMS mounting point



(b) Structure response and its indicating value sequence at RS mounting point

图 4 SMS 和 RS 的待测参量和示值

图 4 MVs and the indicating values of the SMS and RS

然而现实中,在结构应变的空间分布不均匀时,由于 SMS 和 RS 安装位置不同,其被测参量将存在空间差异。同时,因两传感器测量的频率差异和时滞效应,严格意义上的同步测量也难以实现。SMS 和 RS 实际测量过程的时空差异如图 5 所示。

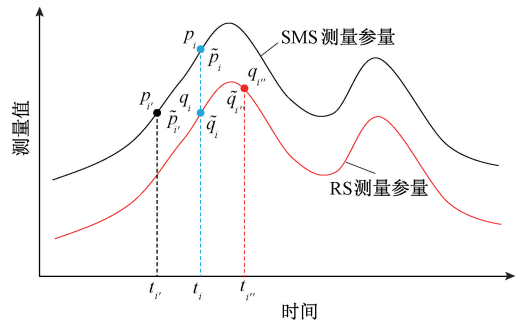


图 5 SMS 和 RS 测量的时空差异

Fig. 5 Temporal and spatial disparities between SMS and RS

以第  $i$  个测量时刻为例,在图 5 中,由于空间差异, SMS 安装位置和 RS 安装位置的结构应变值  $p_i$  和  $q_i$  不完全相同。同时,名义上 SMS 和 RS 对第  $i$  个时刻的测量,实际可能是对第  $i'$ 、 $i''$  时刻的测量。

记  $\Delta d_{s,i}$  为 SMS 在第  $i$  测量时刻的示值误差,则根据以上分析:

$$\Delta d_{s,i} = \tilde{p}_{i'} - p_i = \tilde{p}_i - (p_i + p_{t,i}) \quad (5)$$

式中:  $p_{t,i}$  为 SMS 测量时间差异的影响量。

同样,记  $\Delta d_{r,i}$  为 RS 在第  $i$  测量时刻的示值误差,有:

$$\Delta d_{r,i} = \tilde{q}_{i''} - q_i = \tilde{q}_i - (q_i + q_{t,i}) \quad (6)$$

式中:  $q_{t,i}$  为 RS 测量时间差异的影响量。

式(5)和(6)相减,并整理得:

$$\Delta d_{s,i} = \Delta d_{r,i} + \tilde{p}_i - \tilde{q}_i + q_i - p_i + q_{t,i} - p_{t,i} \quad (7)$$

记  $\Delta d_{s-r,i} = \tilde{p}_i - \tilde{q}_i$ ,  $\Delta d_{sp,i} = p_i - q_i$ ,  $\Delta d_{tm,i} = p_{t,i} - q_{t,i}$ , 则式(7)可表示为:

$$\Delta d_{s,i} = \Delta d_{r,i} + \Delta d_{s-r,i} - \Delta d_{sp,i} - \Delta d_{tm,i} \quad (8)$$

式中:  $\Delta d_{s-r,i}$  为 SMS 和 RS 在第  $i$  个时刻测量的示值之差;  $\Delta d_{sp,i}$  为 SMS 和 RS 安装位置处结构实际响应值之差,代表了实际被测量值的空间差异;  $\Delta d_{tm,i}$  为 SMS 和 RS 测量时间差异的补偿值。

由式(8)可知,在结构应变监测系统运行过程中,对其进行在线校准时,瞬时示值误差为以下 4 个要素的叠加:

- 1) SMS 与 RS 的瞬时示值差;
- 2) RS 的示值误差;
- 3) SMS 与 RS 测量位置的实际量值差;
- 4) SMS 与 RS 测量频率差异的影响量。

## 2 在线校准量化指标设计

由于应变的测量结果与传感器的安装和张拉状态紧密相关。为更好的实现在线校准的量值比对,应通过 RS 传感器的张紧度调节,使 RS 与结构应变监测系统 SMS 处于相同的测值水平。另一方面,应变传感器作为线位移传感器的一种形式,对其基本误差的计算是实现在线校准的重要环节。

从在线校准的应用实际出发,本文提出期间测量误差和基本误差两项量化指标的计算方法。前者反映了 SMS 与 RS 测值的整体差异,后者则用于表征 SMS 在被动激励条件下的计量特性。

### 2.1 期间测量误差

将上文中瞬时测量误差模型所关注的某一时刻(第  $i$  时刻)拓展至在线校准的一个数据分析周期,则除了式(8)中的现有项之外,环境条件变化、激励源特性等影响因素也应当一并考虑在内。

于是,本文提出 SMS 在线校准期间测量误差的测量模型:

$$\Delta d_s = \Delta d_{s-r} + \Delta d_r - \Delta d_{sp} - \Delta d_{tm} - \Delta d_T + \delta_E \quad (9)$$

式中:  $\Delta d_s$  为 SMS 在线校准期间测量误差的代表值;  $\Delta d_{s-r}$  为在线校准期间 SMS 与 RS 应变示值差的代表值;  $\Delta d_r$  为在线校准相近条件下 RS 应变示值误差的代表值,由上一级计量机构校准得到;  $\Delta d_{sp}$  为在线校准期间 SMS 与 RS 安装位置的实际应变差异的影响量;  $\Delta d_{tm}$  为在线校准期间 SMS 与 RS 测量频率差异的影响量;  $\Delta d_T$  为在线校准期间环境温度变化对 SMS 示值误差评定的影响量;  $\delta_E$  为激励源特性、数据传输过程等因素对 SMS 示值误差评定的影响量。上述代表值可根据传感系统计量性能评价的需要确定,如选用最大值、平均值、中位值等。

特别的,应变“示值”指在线校准期间应变的变化量,而非相对于传感器初始安装状态的绝对应变。

式(9)中,  $\Delta d_{sp}$  可以进一步表示为:

$$\Delta d_{sp} = \nabla d \cdot l \quad (10)$$

式中:  $\nabla d$  为在线校准期间 SMS 和 RS 传感器安装区域的实际应变梯度的代表值;  $l$  为 SMS 和 RS 传感器的安装距离。

### 2.2 基本误差及置信区间

基本误差是线位移传感器的重要计量指标,现行国家校准规范 JJF 1305-2011 中,给出了实验室条件下线位移传感器基本误差的计算方法。该方法以正、反两个行程为一个循环,共测量 3 个循环,以建立参比直线方程  $Y_i = Y_0 + KL_i$ 。然后,参照图 6 的校准曲线,取式(11)中绝对值最大者为基本误差。

$$\delta_{ij} = \frac{y_{ij} - Y_i}{Y_{FS}} \times 100\%, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (11)$$

式中:  $Y_{FS}$  为拟合直线上最大输入值  $L_{max}$  和最小输入值  $L_{min}$  所对应的输出值之差。

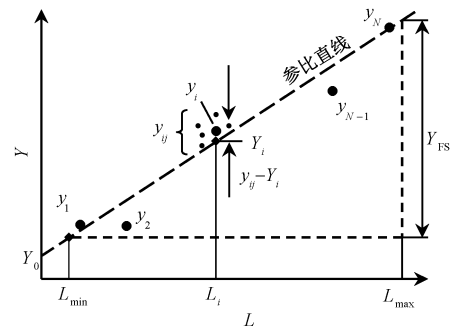


图 6 校准曲线示意图

Fig. 6 Schematic diagram of calibration curve

限于车辆通行的被动激励条件,应变测量数据无法明确区分正、反行程,本文对现有基本误差计算方法进行拓展,提出以下方法。

如图7所示,将经过匹配的SMS和RS典型数据段按量值和数据索引划分为 $N \times N$ 个区块。其中,区块在横轴方向的坐标位置用于规范数据的先后顺序,纵轴方向的坐标用于确定校准点。

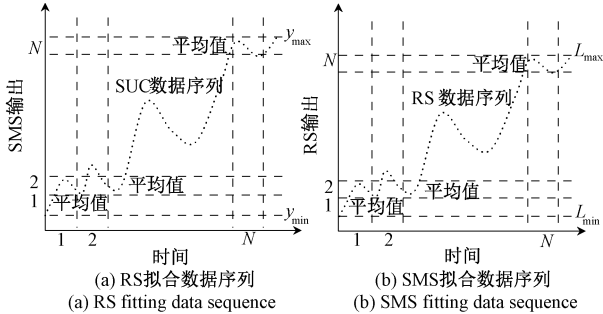


图7 参比直线拟合数据序列构建示意图

Fig. 7 Schematic diagram for building reference linear fitting data sequence

SMS和RS的边缘区块作为参比直线拟合的关键区块。取SMS和RS关键区块中数据的平均值,组成数据序列 $Y = y_1, y_2, \dots, y_M$ 和 $X = x_1, x_2, \dots, x_M$ 。其中, $M$ 为SMS或RS边缘区块的个数。对 $Y$ 和 $L$ 按照最小二乘法进行拟合,得在线校准的参比直线。

在计算图6中各变量时,应去除由于区块划分所引入的增量部分。这是由于,实验室校准时, $y_{ij}$ 对应的是同一校准点(量值)的测量值,而在线校准条件下,区域内测量值并非对应的同一量值,因而 $y_{ij}$ 的范围被放大了。

为此,在式(10)中, $y_{ij}$ 、 $Y_i$ 和 $Y_{FS}$ 的计算应考虑合理的偏移量。设SMS数据段中第 $i$ 个边缘区块中数据的最大值、最小值和平均值分别为 $Y_{\max,i}$ 和 $Y_{\text{mean},i}$ , $i = 1, 2, \dots, M$ , $M$ 为SMS数据段中边缘区块的数量。对于每个校准点,有上下2个边缘区块,故 $M = 2N$ 。

记:

$$\bar{Y}_{\max} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M Y_{\max,i}, \hat{Y}_{\max} = \max(Y_{\max,i}),$$

$$\bar{Y}_{\text{ofs}+} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (Y_{\max,i} - Y_{\text{mean},i}) \quad (12)$$

$$\bar{Y}_{\min} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M Y_{\min,i}, \hat{Y}_{\min} = \min(Y_{\min,i}),$$

$$\bar{Y}_{\text{ofs}-} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (Y_{\min,i} - Y_{\text{mean},i}) \quad (13)$$

则,由于区块划分所引入的SMS监测值增量为:

$$Y_{\text{ofs}+,i} =$$

$$\begin{cases} \bar{Y}_{\text{ofs}+} \cdot (Y_{\max,i} - \bar{Y}_{\max}) / (\hat{Y}_{\max} - \bar{Y}_{\max}), & \hat{Y}_{\max} \neq \bar{Y}_{\max} \\ \bar{Y}_{\text{ofs}+}, & \hat{Y}_{\max} = \bar{Y}_{\max} \end{cases} \quad (14)$$

或者,

$$Y_{\text{ofs}-,i} =$$

$$\begin{cases} \bar{Y}_{\text{ofs}-} \cdot (Y_{\min,i} - \bar{Y}_{\min}) / (\hat{Y}_{\min} - \bar{Y}_{\min}), & \hat{Y}_{\min} \neq \bar{Y}_{\min} \\ \bar{Y}_{\text{ofs}-}, & \hat{Y}_{\min} = \bar{Y}_{\min} \end{cases} \quad (15)$$

同理,由于区块划分所引入的RS测量值增量为:

$$L_{\text{ofs}+,i} =$$

$$\begin{cases} \bar{L}_{\text{ofs}+} \cdot (L_{\max,i} - \bar{L}_{\max}) / (\hat{L}_{\max} - \bar{L}_{\max}), & \hat{L}_{\max} \neq \bar{L}_{\max} \\ \bar{L}_{\text{ofs}+}, & \hat{L}_{\max} = \bar{L}_{\max} \end{cases} \quad (16)$$

或

$$L_{\text{ofs}-,i} =$$

$$\begin{cases} \bar{L}_{\text{ofs}-} \cdot (L_{\min,i} - \bar{L}_{\min}) / (\hat{L}_{\min} - \bar{L}_{\min}), & \hat{L}_{\min} \neq \bar{L}_{\min} \\ \bar{L}_{\text{ofs}-}, & \hat{L}_{\min} = \bar{L}_{\min} \end{cases} \quad (17)$$

式中:与RS相关的各符号含义同上。

经修正后,结构应变监测系统的基本误差为式(18)、(19)中绝对值最大者。

$$\delta_{i+} = \frac{(y_{i+} - Y_{\text{ofs}+,i}) - [Y_0 + K(L_{i+} - L_{\text{ofs}+,i})]}{Y_{FS} + Y_B} \times$$

$$100\%, \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (18)$$

$$\delta_{i-} = \frac{(y_{i-} - Y_{\text{ofs}-,i}) - [Y_0 + K(L_{i-} - L_{\text{ofs}-,i})]}{Y_{FS} + Y_B} \times$$

$$100\%, \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (19)$$

式中: $y_{i+}$ 和 $y_{i-}$ 分别为SMS第 $i$ 个边缘区块的最大值和最小值; $L_{i+}$ 和 $L_{i-}$ 分别为RS第 $i$ 个边缘区块的最大值和最小值; $Y_B$ 为SMS区块的高度。

由于在线校准基本误差的计算依赖于复杂的现场条件,以及数据的选取过程,因而,本文引入置信度的概念,采用包含概率为 $p$ (取90%~99%)的区间半宽度来表示。

### 3 实验与讨论

#### 3.1 实验条件及激励源特性

依托沈海高速(G15)佛山至开平段九江大桥(原桥)结构健康监测项目,开展了本文方法的现场验证试验。在图8(a)中“ $\Delta$ ”标记位置的箱梁内侧布置在线校准系统,传感器在桥梁箱梁截面内的布局如图8(b)所示,在线校准系统的现场安装状态如图8(c)所示。

现场试验所用光纤应变传感器的技术参数如表1所示,表中#669和#592传感器分别用于构建结构应变监测系统和参考系统。

光纤应变数据采集采用SEN-01型光纤解调仪,测量波长范围1525 nm~1565 nm,最大允许误差 $\pm 0.5$  pm,分辨率0.1 pm,采集频率(1~100) Hz。

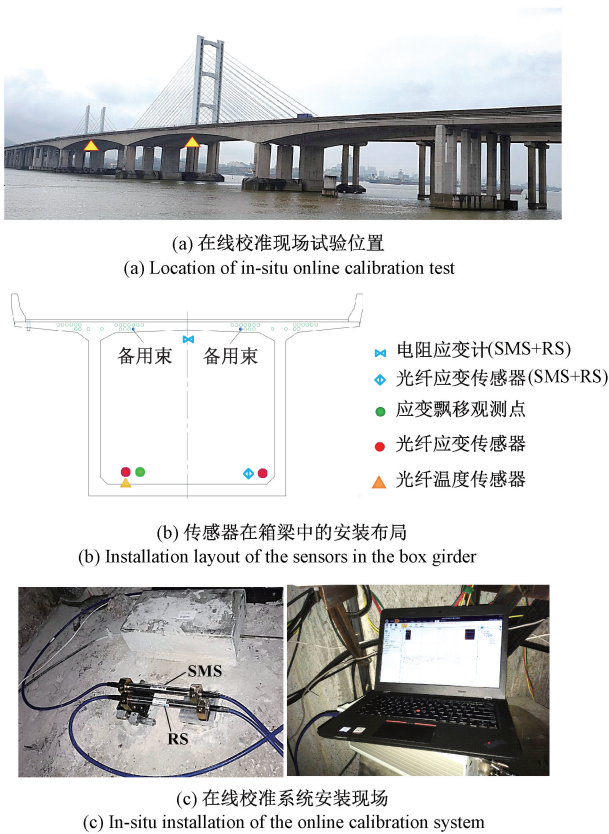


图8 在线校准现场试验条件

Fig. 8 In-situ test conditions for the online calibration

表1 光纤应变传感器参数

Table 1 The parameters of the fiber strain sensors

编号	应变系数 / $\mu\epsilon \cdot \text{nm}^{-1}$	温度修正系数 / $\mu\epsilon \cdot \text{nm}^{-1}$	初始波长 /nm	温补参考 波长/nm
#669	778.043 7	-789.500 4	1 553.151	1 532.358
#592	726.028 7	-669.866 1	1 545.491	1 529.323

公路大桥在自由车辆荷载作用下的主要激振频率主要集中在(2~4) Hz 之间<sup>[25]</sup>。本文所试桥梁在2011年曾开展动载试验,采用35 t 载重卡车进行跳车试验时所产生的振动能量主要分布在2.2 Hz 左右,其功率谱密度如图9(a)所示。从本次试验中实测的箱梁底部应变数据看,其功率谱密度图中,在2.4 Hz 处有明显的峰值,说明在通行车辆激励下,箱梁底部产生了明显的应变,如图9(b)所示。

### 3.2 数据处理与分析

在正常通行车辆激励条件下,采用前述方案连续完成了总时长达8天的应变数据采集,累计获取在线校准有效数据700余万条。由于激励源输入的不可控性,作者采用基于R语言的可视化数据分析程序对原始数据进行了筛选。对典型数据段进行处理,并拟合得到参比直线的过程如图10所示。

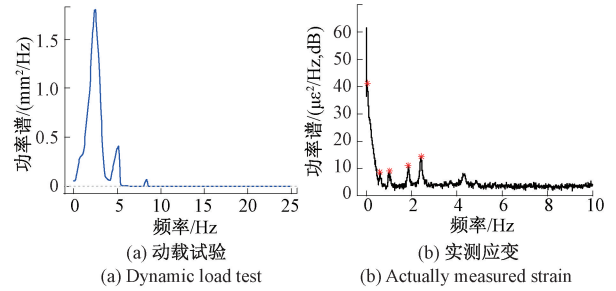


图9 交通荷载激励的功率谱

Fig. 9 The power spectrum of traffic load excitation

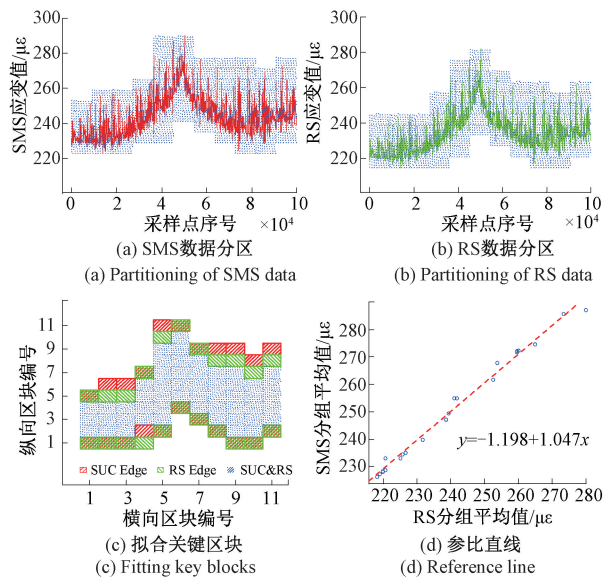


图10 典型数据段的处理过程

Fig. 10 Processing of typical data segments

试验中,光纤传感系统初始采集频率为20 Hz。以 $\Delta t$ 表示计算平均应变值的时间间隔,若原始数据采样频率为 $f_0$ ,则 $\Delta t$ 时间段涉及的数据序列长度为 $w = \Delta t \cdot f_0$ ,以 $S_d$ 表示选取的数据段总长度。数据集Set-A、Set-B、Set-C的 $\Delta t$ 分别取5、2.5和1 s,  $S_d$ 分别取100 000、50 000和20 000,3个数据集的 $S_d/w$ 均为1 000。所试光纤应变监测系统的基本误差及其置信区间半宽度分析结果如表2所示。

从表2表的结果看,基本误差备选值的分布区间并不对称。图11显示了基本误差分子的分布特征,由图可见,其分布的不对称性较为明显。

然而,通过表2中不同数据集计算结果的横向比较,发现各组之间基本误差包含区间的半宽度具有良好的一致性。这种一致性可以通过图12直观表示,图中“P.95”表示包含概率为95%。同一包含概率下,Set-A、Set-B、Set-C 3组数据所计算的基本误差区间的半宽度一致,偏差均不大于0.005。

表 2 SMS 基本误差的分布特性

**Table 2 Distribution characteristics of the SMS basic error**

数据集	包含概率	下限值	上限值	区间半宽度
Set-A	$p = 0.90$	-0.033 2	0.050 4	0.041 8
	$p = 0.95$	-0.041 0	0.051 3	0.046 2
	$p = 0.99$	-0.049 2	0.060 8	0.055 0
Set-B	$p = 0.90$	-0.038 6	0.049 7	0.044 2
	$p = 0.95$	-0.040 2	0.051 6	0.045 9
	$p = 0.99$	-0.050 1	0.059 5	0.054 8
Set-C	$p = 0.90$	-0.042 6	0.043 4	0.043 0
	$p = 0.95$	-0.047 9	0.044 8	0.046 3
	$p = 0.99$	-0.060 0	0.050 4	0.055 2

4 结 论

以通行车辆的加载效应为主要分量的被动激励源,与经过桥梁的交通流紧密相关,虽然具有一定的规律性,但对于在线校准任务来说是不可控的。本研究并未拘泥于对被动激励源特性的研究,而是从在线校准系统模型、误差分析模型等研究出发,通过同步比较去除激励源随机性对校准结果的影响。本研究的另一思想是,利用结构应变监测数据的高冗余性,充分挖掘大样本数据中所蕴含的传感系统计量特性信息,建立基本计量特性的统计计算模型。

实际工程试验验证表明:1)所提出的在线校准计量特性分析模型,对于不同数据集具有良好的一致性;2)该方法的在线校准结果与激励条件无关,具有被动不可控激励条件下开展在线校准的推广性。

参考文献

[ 1 ] SEO J, HU J W, LEE J. Summary review of structural health monitoring applications for highway bridges [ J ]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2016, 30(4) : 04015072.

[ 2 ] VENU G M A, SURESH B, CHEE K S. Applications of structural health monitoring technology in Asia [ J ]. Structural Health Monitoring, 2016: 324-346.

[ 3 ] YANG Y, LI Q, YAN B. Specifications and applications of the technical code for monitoring of building and bridge structures in China [ J ]. Advances in Mechanical Engineering, 2016, 9(1) : 897-971.

[ 4 ] YAS G, FARHAD A, JUN L, et al. In situ data analysis for condition assessment of an existing prestressed concrete bridge [ J ]. Journal of Aerospace Engineering, 2018, 31(6) : 04018106.

[ 5 ] HUANG H B, YI T H, LI H N, et al. Strain-based performance warning method for bridge main girders under variable operating conditions [ J ]. Journal of Bridge Engineering, 2020, 25(4) :04020013.

[ 6 ] PHARES B, LU P, WIPF T, et al. Field validation of a statistical-based bridge damage-detection algorithm [ J ]. Journal of Bridge Engineering, 2013, 18 ( 11 ) : 1227-1238.

[ 7 ] 江舒,李涛,林杰俊,等.船用光纤光栅应变传感器开发与应用研究 [ J ]. 仪器仪表学报, 2020, 41(6) : 35-42.

JIANG SH, LI T, LIN J J, et al. Development and

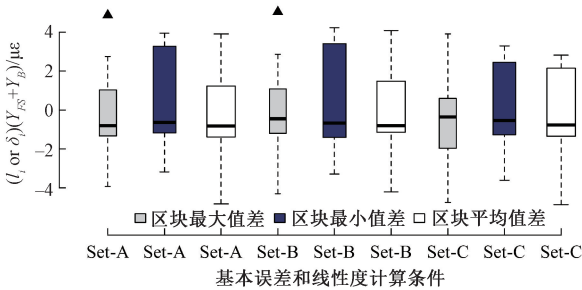


图 11 不同计算条件的结果分布

Fig. 11 Result distribution under different calculation conditions

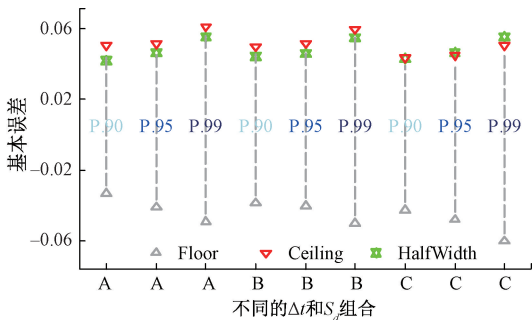


图 12 基本误差分布区间

Fig. 12 Distribution interval of basic errors

以图 10(a)~(b)所示数据段为例,计算在线校准期间测量误差,结果如表 3 所示。

表 3 期间测量误差

**Table 3 Period measurement errors**  $\mu\epsilon$

代表值	$\Delta d_s$	$\Delta d_{s-R}$	$\Delta d_R$	其他影响量
最大值	1.40	-0.14	1.54	0
平均值	3.15	1.90	1.25	0
中位值	3.35	1.93	1.42	0

表中,其他影响量  $\Delta d_{sp}$ 、 $\Delta d_{lm}$ 、 $\Delta d_T$ 、 $\delta_E$  暂按 0 计算,但作为不确定度来源,在进行不确定度评定时不可忽略。

- application of the FBG strain sensor for ship[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(6): 35-42.
- [ 8 ] 丁梓涵, 赵其华, 彭社琴, 等. 光纤和电阻应变片在结构变形测试中的对比试验研究[J]. 传感技术学报, 2015, 28(8): 1149-1154.
- DING Z H, ZHAO Q H, PENG SH Q, et al. Research on comparison of optical fiber and the resistance strain gauge in the structural deformation test [ J ]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2015, 28 ( 8 ): 1149-1154.
- [ 9 ] 崔云先, 张子超, 丁万昱, 等. NiCr 高温薄膜电阻应变计制备及耐高温性能研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(7): 1548-1555.
- CUI Y X, ZHANG Z CH, DING W Y, et al. Study on fabrication of NiCr films based high temperature resistance strain gauge and its high temperature performance [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(7): 1548-1555.
- [ 10 ] PENG L, JING G Q, LUO ZH, et al. Temperature and strain correlation of bridge parallel structure based on vibrating wire strain sensor [ J ], Sensors 2020, 20(3): 658.
- [ 11 ] BIONDINI, FABIO, FRANGOPOL, et al. Life-cycle performance of civil structure and infrastructure systems: Survey [ J ]. Journal of Structural Engineering, 2018, 144(1): 06017008.
- [ 12 ] 韩林海, 杨有福, 杨华, 等. 基于全寿命周期的钢管混凝土结构分析理论及其应用[J]. 科学通报, 2020, 65: 3173-3184.
- HAN L H, YANG Y F, YANG H, et al. Life-cycle based analytical theory of concrete-filled steel tubular structures and its applications [ J ]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65: 3173-3184.
- [ 13 ] FUJII Y. Toward dynamic force calibration [ J ]. Measurement, 2009, 42(7): 1039-1044.
- [ 14 ] FUJII Y. Toward establishing dynamic calibration method for force transducers [ J ]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2009, 58 ( 7 ): 2358-2364.
- [ 15 ] BRUNS T, KUMME R, KOBUSCH M, et al. From oscillation to impact: The design of a new force calibration device at PTB [ J ]. Measurement, 2002, 32 ( 1 ): 85-92.
- [ 16 ] VLAJIC N, CHIJIJOKE A. Traceable dynamic calibration of force transducers by primary means [ J ]. Metrologia, 2016, 53(4): S136-S148.
- [ 17 ] JI H S, SON B J, CHANG S Y. Field testing and capacity-ratings of advanced composite materials short-span bridge superstructures [ J ]. Composite Structures, 2007, 78(2): 299-307.
- [ 18 ] ZHU J, ZHANG Y. Damage detection in bridge structures under moving vehicle loads using delay vector variance method [ J ]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2019, 33(5): 04019049.
- [ 19 ] LI Y, QIN L, LI Z, et al. Dynamic performance of strengthened concrete-filled steel tubular arch bridge due to moving vehicles [ J ]. Journal of Aerospace Engineering, 2019, 32(1): 04018113.
- [ 20 ] 林贤坤, 覃柏英, 张令弥, 等. 基于不中断交通运行模态分析的模态挠度法在桥梁状态评估中的应用 [ J ]. 振动与冲击, 2013, 32(14): 52-57, 76.
- LIN X K, QIN B Y, ZHANG L M, et al. Application of modal deflection method in condition assessment of a bridge based on operational modal analysis without interrupting traffic [ J ]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(14): 52-57, 76.
- [ 21 ] NI Y C, ALAMDARI M M, YE X W, et al. Fast operational modal analysis of a single-tower cable-stayed bridge by a Bayesian method [ J ]. Measurement, 2021(12): 109048.
- [ 22 ] JEFFREY T H, FENG X, GANG C, et al. Detection of soil-abutment interaction by monitoring bridge response using vehicle excitation [ J ]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2015, 5(4): 389-395.
- [ 23 ] YANG Y B, LI Y C, CHANG K C. Constructing the mode shapes of a bridge from a passing vehicle: A theoretical study [ J ]. Smart Structures & Systems, 2014, 13(5): 797-819.
- [ 24 ] 荆根强, 袁鑫, 段发阶, 等. 激光位移计在线校准数据序列匹配方法 [ J ]. 红外与激光工程, 2019, 48(5): 0506006.
- JING G Q, YUAN X, DUAN F J, et al. Matching method for data sequences from on-line calibration of laser displacement meter [ J ]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(5): 0506006.
- [ 25 ] 侯立群, 欧进萍. 基于时频分析的运营桥梁模态参



数识别方法[J]. 振动工程学报, 2009, 22(1): 19-25.

HOU L Q, OU J P. Modal parameters identification of bridge in serve based on time-frequency analysis [J].

Journal of Vibration Engineering, 2009, 22(1): 19-25.

## 作者简介



**荆根强**, 2001 年和 2004 年于华中科技大学分获工学学士和硕士学位, 2021 年于天津大学获得博士学位。现为交通运输部公路科学研究所研究员, 主要研究方向为精密测试技术、智能仪器、在线计量、远程计量技术等。

E-mail: gq. jing@rioh. cn

**Jing Genqiang** received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Huazhong University of Science and Technology in 2001 and 2004, respectively, and received his Ph. D. degree from Tianjin University in 2021. Now, he is a research fellow in Research Institute of Highway Ministry of Transport. His main research interest includes precision test technology, intelligent instrument, on-line metrology, remote metrology, etc.



**段发阶**, 分别于 1989 年、1992 年和 1994 年在天津大学获得工学学士、工学硕士和工学博士学位, 现为天津大学教授, 博士生导师。主要研究方向为激光及光电测试技术、计算机视觉检测技术、光纤传感技术、自动控制技术等。

E-mail: fjduan@ tju. edu. cn

**Duan Fajie** received B. Sc. , M. Sc. and Ph. D. degrees all from Tianjin University in 1989, 1992 and 1994, respectively.

Now, he is a professor and Ph. D. supervisor in Tianjin University. His main research interest includes laser and photoelectric test, computer vision detection, optical fiber sensing, automatic control technologies, etc.



**彭璐**(通信作者), 2010 年和 2013 年于韩国全南国立大学, 分别获得工学学士和工学博士学位。现为交通运输部公路科学研究所副研究员, 主要研究方向为精密测试技术、在线计量等。

E-mail: lu. peng@rioh. cn

**Peng Lu** (Corresponding author) received his B. Sc. and Ph. D. degrees both from Chonnam National University, Korea in 2010 and 2013, respectively. Now, he is an associate research fellow in Research Institute of Highway Ministry of Transport. His main research interest includes precision testing technology, on-line metrology, etc.



**崔建军**, 2001 年于北京化工大学获得学士学位, 2006 年于中国计量科学研究院获得硕士学位, 2015 年于天津大学获得博士学位, 现为中国计量科学研究院副研究员, 主要研究方向为几何量计量及智能传感技术。

E-mail: ycuijj@163. com。

**Cui Jianjun** received his B. Sc. degree from Beijing University of Chemical Technology in 2001, M. Sc degree from National Institute of Metrology, China in 2006 and Ph. D degree from Tianjin University in 2015. Now, he is an associate research fellow in National Institute of Metrology, China. His main research interest includes geometric quantity measurement and intelligent sensing technology, etc.