

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1904978

激光投射式位移计在线校准方法与系统设计*

袁鑫¹, 荆根强², 彭璐², 崔建军³, 洪汉玉¹

(1. 武汉大学电气信息学院 湖北武汉 430205; 2. 交通运输部公路科学研究所 北京 100088;
3. 中国计量科学研究院 北京 100029)

摘要:激光投射式位移计(LDM)是桥梁形变监测的常用传感器,为解决其现场工作状态下的在线校准问题,提出了一种在线比较校准方法。首先,以经过溯源的位移传感器作为参考传感器,在共源随机激励条件下,同步采集RS及待校准激光位移计的现场测量数据;然后,利用基于特征点的分段匹配算法对2传感器数据序列进行匹配,解决因激励源变化和传感器响应特性差异所导致的错位问题,从而获取2传感器对同一输入量的对应测量结果;最后,对匹配后的数据序列进行统计学分析,输出校准结果。依据现场环境,设计并搭建了在线校准模拟系统,并在系统中引入激光干涉仪作为参考数据源,以验证所提方法的有效性。实验结果表明,所提出的在线校准方法与采用激光干涉仪进行同步比较校准的结果高度吻合,且具有在桥梁结构监测现场进行在线校准的可行性。

关键词:计量学;在线校准;激光位移计;数据序列匹配

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 and system design for laser-projection displacement meter

Yuan Xin¹, Jing Genqiang², Peng Lu², Cui Jianjun³, Hong Hanyu¹

(1. School of Electrical and Information Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China;
2. Research Institute of Highway, Ministry of Transport, Beijing 100088, China;
3. National Institute of Metrology, Beijing 100029, China)

Abstract: Laser-projection displacement meter (LDM) is widely utilized for bridge deflection monitoring. A comparative calibration method is proposed to fulfill the on-line and in-situ calibration requirement of LDM. First, a laser displacement meter with traceable calibration is adopted as the reference sensor (RS). The in-situ measured value series by the RS and the LDM under calibration are acquired simultaneously under the same time-varying excitation source. Then, two series are matched based on feature points sectioning method. The phase differences caused by the variation of excitation source and diverse response characteristics of sensors are solved. The sequentially comparative measured values with the certain inputs are obtained. Finally, the statistical analysis is performed to the matched data series, which can produce the result of LDM under calibration. An on-line calibration simulation system is designed and set up according to the real in-situ condition. A verification subsystem using laser interferometer as a reference is adopted to evaluate the proposed method. Experimental results show that the proposed method has a high consistency with the method of simultaneously comparative measurement by using laser interferometer as a reference. Especially, the proposed method can be used under in-situ conditions of bridge deflection monitoring application.

Keywords: metrology; on-line calibration; Laser-projection displacement meter; data series matching

0 引言

激光投射式位移计 (laser-projection displacement meter, LDM) 是动态监测目标位置与参考位置之间相对位移的传感器,常用于桥梁等动态挠曲度及平行位移的长期监测^[1-5],在大坝、码头、高层建筑等变形、振动、位移监测领域也有广泛应用^[6-7]。目前,对 LDM 的溯源性校准主要依据相关校准规范^[8],采集 LDM 输出量值与参考仪器的输出结果进行比对,采用最小二乘法获得参比直线,并计算得到线性度、基本误差、灵敏度等校准结果。然而此方法主要用于传感器安装前的溯源性校准,对于野外长期、无间断工作的在用系统则难以实施^[9-13]。

针对传感器在线校准问题,国内外学者已经开展了大量有益的尝试。Bi 等^[14]提出了一种基于标准球的坐标测量机 (coordinate measuring machine, CMM) 外部校准方法,利用与 CMM 同步运动的激光传感器在线获取距离参考数据。Du 等人^[15]利用惯性测量单元和位置传感器融合数据,结合扩展卡尔曼滤波 (extended kalman filter, EKF) 方法来估计运动学参数,实现了机器人的运动参数在线校准。孙彬等^[16]针对三角法激光位移传感器测量过程中的倾角误差问题,提出了量化补偿模型。LI 等^[17]提出了集成系统中里程计的在线校准及定位补偿方法。魏振忠等^[18]提出了一种基于平面的全局校准方法,通过获取靶标平面分别在视觉系统和激光跟踪仪坐标系中的平面方程,求解坐标转换矩阵,实现系统全局校准。SHI 等^[19]提出了一种可用于微纳级在线校准的夹持装置。上述针对特定领域的在线校准方法为相关研究奠定了基础,但仍受限于具体的应用条件而无法通用。

激励源的选择是大型结构监测传感器在线校准的难点。以车辆通行的组合加载效应作为激励源是适合于现场实施的可行方案^[20-21]。Jing 等^[22]通过试验方法验证了在特定共同激励源条件下,激励源变化对于在线校准结果的影响不显著。

本文针对桥梁等大型结构监测系统全天时工作状态下的传感器校准问题,提出了一种新的适用于结构监测现场实施的在线校准方法。以简支梁模型桥为平台,以模拟随机加载信号作为激励源,搭建了仿真系统,通过基于特征点的分段匹配算法消除因传感器采样频率差异带来的相位误差,通过激光干涉仪的并行测量验证了本方法的可行性。

1 原理与系统

1.1 在线校准系统原理与设计

桥梁等大型结构监测系统处于全天时、连续工作状

态,对关键传感器的校准不能以中断其正常监测过程为代价。因此,校准工作须在原有系统在线工作条件下完成。本文方法以预先定义的数据接口模块建立校准系统与现有监测系统的数据链路,以一种松耦合、非干扰的方式实现在线计量。其实现原理如图 1 所示。

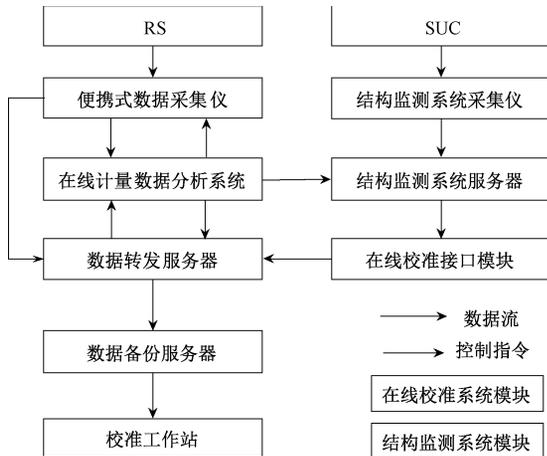


图 1 系统原理

Fig.1 Schematic of the proposed system

图 1 中,由待校准传感器 (sensor under calibration, SUC)、结构监测系统采集仪、结构监测系统服务器所构成的系统为在用桥梁结构监测系统。由参考传感器 (reference sensor, RS)、便携式数据采集仪、在线计量数据分析软件、数据转发服务器、数据备份服务器、校准工作站、在线校准接口模块等共同构成在线校准专用系统。

在线校准过程由在线计量数据分析系统启动,其通过 1 路控制指令控制便携式数据采集仪获取 RS 的实时测量数据;同时,发送指令给结构监测系统服务器和数据转发服务器,使 SUC 的测量数据可以实时传回在线计量数据分析系统。经现场初步分析确定无异常后,RS 和 SUC 数据将结构化存储于备份服务器,以便后期细化分析和输出校准结果。

常规桥梁监测系统中,LDM 的发射端通常安装于固定结构上,作为位置参考基准;激光接收端安装于桥身待监测位置,可随其产生位移。当桥梁结构在荷载作用下发生形变,从而使激光接收端产生垂直方向位移时,激光在接收端靶面上的投影位置变化以电信号形式传输至采集模块,经运算获得桥梁监测点的位移数据。

针对以上应用场景,本文提出的 LDM 在线校准系统 (虚线框内) 如图 2 所示。该系统利用经过溯源性校准的激光位移传感器作为 RS。实际校准中,RS 与 SUC 的测量点应尽量保持一致,使得两者的测量对象在校准所允许的不确定度范围内可以视为相同。



图 2 LDM 在线校准系统

Fig.2 Online calibration system of LDM

以通行车辆的组合加载效应作为桥梁结构形变的激励源,由 SUC 和 RS 同步连续采集桥梁结构在同一位置的形变数据。从 SUC 监测系统和 RS 参考测量系统中实时获取在线监测数据,以起止时间戳进行粗配准后,通过时间序列分析方法进行精准匹配,经对 2 组数据序列的对比分析,获取 SUC 的校准结果。

1.2 试验验证系统原理与设计

为验证 LDM 在线校准系统的可行性,本文以激光干涉仪为核心仪器设计了在校准试验验证系统,其原理如图 3 所示。

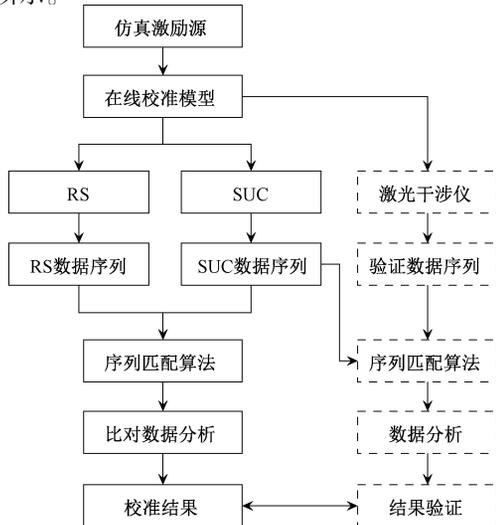


图 3 在线校准及验证方法

Fig.3 Outline of the calibration and verification method

验证系统以简支梁模型桥为基础,利用可编程直线模组作为激励源,模拟实际应用场景中车辆驶过桥梁产生的组合加载效应。在同一监测点设置 SUC 和 RS 2 组 LDM。利用激光干涉仪同步采集实验数据,将其作为 SUC 和 RS 2 组 LDM 在线校准试验的参照组(见图 3 中虚线框部分),以 SUC 相对于 RS 的校准结果和 SUC 相对于激光干涉仪的校准结果进行比较,以验证本文方法的可行性。验证系统构成如图 4 所示。

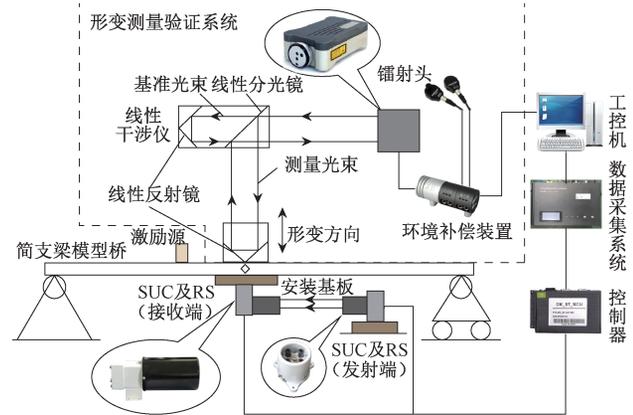


图 4 试验验证系统构成

Fig.4 Schematic of the calibration and verification system

激励源的运动导致监测点“◇”处产生位移变化, SUC 和 RS 同步采集这一位移变化,在各自系统中记录位移变化的序列数据。同时,激光干涉仪作为对照传感器(comparison sensor, CS)以更高频率、更高准确度对监测点的位移进行测量,并记录用于验证的参照数据序列。对 SUC 和 RS 进行匹配和数据分析,计算 SUC 的计量性能指标;同时,以 CS 为基准分析 SUC 的计量性能,通过比较验证本文方法的可行性。

2 在线校准数据分析方法

在位移数据采集过程中,由于不同传感器间采样频率和时滞特征差异, SUC 与 RS 数据序列间往往存在明显的位置偏差,可能对校准结果产生较大影响。为此,需要对校准数据序列进行匹配,以得到“同名点”对,并通过统计学分析方法得到 SUC 的线性度、示值误差等校准结果。

2.1 基于特征点的分段匹配算法

在时间序列数据匹配方面,常用的有基于欧氏(Euclidean)距离度量的匹配算法和利用动态时间规整(dynamic time warping, DTW)的匹配算法。其中, Euclidean 方法要求所匹配的数据序列具有相同的长度,对时间序列的突变点和错位也很敏感;而 DTW 方法对采

样序列进行匹配的时间复杂度较高。针对在线校准需求,本文提出了一种准确、高效的基于特征点分段的匹配算法。

图5所示为SUC与RS的数据序列,设SUC数据序列为:

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

RS数据序列为:

$$Q = q_1, q_2, \dots, q_m \quad (2)$$

式中: n 为SUC采样点数; m 为RS采样点数。

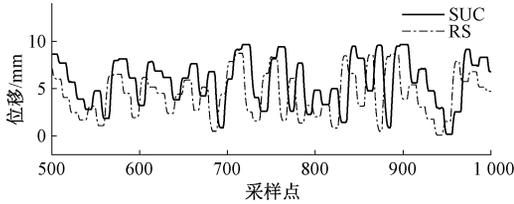


图5 SUC与RS的输出序列
Fig.5 SUC and RS output series

考虑到2序列峰值、谷值处特征较为明显,可将其作为特征点优先匹配,再处理特征点之间数据,以提高匹配准确性。然而,采用直接求极值提取特征点的方法无法避免激励源信号噪声引入的异常数据干扰。因此需对算法进行优化,加入数据筛查过程以去除伪特征点。

首先,对SUC采样序列进行平滑:

$$p'_i = \sum_{s=-j}^j p_{i+s} / \text{span} \quad (3)$$

其中:

$$j = (\text{span} - 1) / 2 \quad (4)$$

式中: span 为平滑尺度,其大小与激励信号保持时间、频率和采样频率有关,实际应用中宜针对不同传感器和激励源特性来确定; p'_i 为平滑后的数据,将序列 P' 中的极值点依次保存,并找出该点对应的原序列采样数据 p_i , 以 p_i 作为真实特征点。同样,对RS序列按上述方法进行操作,得到特征点提取结果如图6所示。

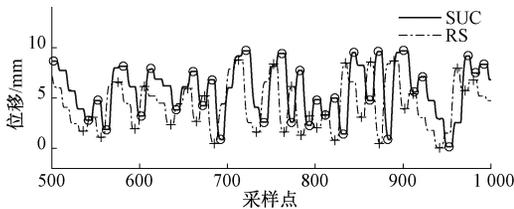


图6 特征点提取结果
Fig.6 Feature points extraction

以特征点为节点对序列进行分段,2连续特征点之间的序列段作为分段区间。设采集到的特征点总数为 K , 为不失数据完整性,将2序列起始点均设为序列初始特征点 t_0 , 将序列终止点设为序列最后一个特征点 t_{k+1} ,

则2初始序列被分为 $K + 1$ 段。

设输入为SUC采样序列上任意一点 p_i , 目标输出为RS上与 p_i 相匹配的点 q_j , j 表示其为RS采样序列的第 j 个采样点。

根据 p_i 的位置信息对照特征点序列定位出待匹配点 p_i 所属的特征区间,设其位于原始采样序列的第 k 段,则 j 由式(5)确定。

$$j = \frac{(i - t_{k-1}) \times (t'_k - t'_{k-1})}{(t_k - t_{k-1})} + t'_{k-1} \quad (5)$$

为直观显示匹配效果,在SUC待匹配序列任意区间中随机选取12个采样点进行匹配,结果如图7所示。

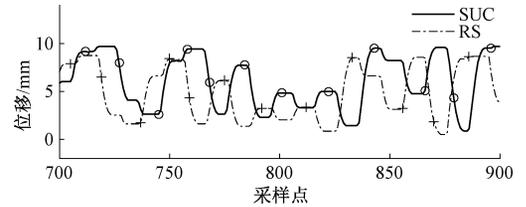


图7 随机点匹配结果
Fig.7 Random point matching

由图7可知,基于特征点的分段匹配对传感器采样频率漂移具有良好的适应性。通过此方法,对任意SUC测量数据均可在RS序列中找到相应的匹配点。

2.2 传感器的计量特性分析

基本误差和线性度是线位移传感器的重要计量指标,文献[8]中给出了实验室条件下线位移传感器计量性能分析和校准的标准方法。限于在线校准的现场条件,本文提出以下计量特性分析方法。

按图4搭建LDM在线校准数据采集系统,同时获取SUC和RS的输出数据序列。利用特征点分段匹配算法进行匹配,并将输出结果划分为 N (N 为自然数,按文献[8]建议值为11) 个区间,整理得到数据序列 $Y = y_1, y_2, \dots, y_N$ 和 $L = L_1, L_2, \dots, L_N$ 。 L_i ($i = 1, 2, \dots, N$) 为RS在第 i 个区间中输出值的平均值(简称RS的第 i 个校准点), y_i ($i = 1, 2, \dots, N$) 为SUC在第 i 个区间中输出值的平均值(简称SUC的第 i 个校准点),利用最小二乘法计算得到参比直线方程 $Y_i = Y_0 + KL_i$, 求出SUC第 i 个校准点的拟合输出值 Y_i 后,取式(6)中绝对值最大者为传感器的线性度。

$$l_i = \frac{y_i - Y_i}{Y_{FS}} \times 100\%, i = 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

令 y_{ij} 为SUC在第 i 个区间中的第 j 个输出值,其中 $j = 1, 2, \dots, M$, M 为SUC原始数据中处于第 i 个区间的个数。根据参比直线方程求出SUC在第 i 个校准点处的拟合输出值 Y_i 后,取式(7)中绝对值最大者为传感器的基本误差。

$$\delta_{ij} = \frac{y_{ij} - Y_i}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (7)$$

式中: Y_{FS} 为 LDM 满量程输出。

2.3 传感器测量结果的统计特性

l_i, δ_{ij} 的大小反映了 SUC 各点测量结果偏离参比直线的程度,其值越小,表明传感器测量结果的线性度和示值误差越小,传感器计量性能越好。

对于能直接以数字方式或其他方式输出长度尺寸的位移传感器,除了可以采用式(7)计算基本误差外,也可从统计学角度,分析 SUC 与 RS 数据序列的线性相关性和拟合残差的统计特性,以评估待 SUC 的线性度和示值准确性。

此处设 $X = x_1, x_2, \dots, x_n, Y = y_1, y_2, \dots, y_n$ 分别代表匹配后的 SUC 和 RS 数据序列,则 X 与 Y 的线性相关系数为:

$$R = \frac{S_{xy}}{\sqrt{S_{xx}} \sqrt{S_{yy}}} \quad (8)$$

其中,

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}),$$

$$S_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2, S_{yy} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2。$$

拟合残差的统计特性分析及可视化表示,可以直观地反映 SUC 和 RS 数据序列的一致程度。以 RS 数据作为拟合目标数据,2 数据序列的线性关系可以表示为: $Y = \beta_0 + \beta_1 X + \varepsilon$, 其中 ε 是随机误差项,与散点图中各点偏离拟合直线的垂直距离有关。对于线性模型,应满足 $\varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$, 且 σ^2 越小,线性模型的线性度越好。

实际应用中,对拟合残差样本数据进行统计分析,得到残差的统计直方图。同时计算拟合残差均值 \bar{X} 和实验方差 S^2 , 以 \bar{X} 和 S^2 作为总体均值 μ 和方差 σ^2 的估计,可构造出正态分布 $N(\mu, \sigma^2)$ 图。根据 2 图的一致性可直观分析 SUC 与 RS 计量性能的一致程度。

3 实验与讨论

3.1 实验条件及激励源布置

依据图 4 布置试验装置,其中,简支梁模型桥长 5 m, 模型框架高 1.35 m, 宽 0.9 m, 梁体选用多槽结构铝型材,便于传感器安装,具体参数如表 1 所示。

采用 STP-DM-ST 型 LDM 作为 RS, 经溯源性校准,其主要参数如表 2 所示。数据采集单元采用与 LDM 相配套的 FAROPT FAR-J-1/01 型在线监测数据采集仪。

表 1 简支梁模型桥性能参数

Table 1 Simple supported beam model bridge performance parameters

名称	参数
主体材质	铝合金(6063-T5)
弹性模量	6.90E+10 N/m ²
泊松比	0.33
抗剪模量	2.58E+10 N/m ²
张力强度	1.85E+0.8 N/m ²
压服强度	1.45E+08 N/m ²

表 2 LDM 性能参数

Table 2 Performance parameters of the LDM

名称	参数
测量范围	Y 轴: -24~24 mm; X 轴: -15~15 mm
响应频率	>25 Hz
测量精度	0.1 mm
线性度	0.896%
基本误差	1.574%

以 LySeiKi ZP140-200 精密型电动平移台为激励源,通过控制软件将一组随机数序列转化为运动控制参数,将其传入 USB9030 运动控制卡并驱动线性模组,用于模拟通行车辆的组合加载效应。激励源相关性能参数如表 3 所示。

表 3 激励源(精密型电动平移台 ZP140-200)性能参数

Table 3 Performance parameters of the excitation source (precision electric translation stage ZP140-200)

名称	参数
行程	200 mm
台面承载	30 kg
分辨率	20 μ m
最大速度	20 mm/s
重复定位精度	5 μ m
直线度	6 μ m
回程间隙	2 μ m

在激励源布置及 LDM 安装方面,参考文献[22]的方法,将 LDM 接收端安装于靠近激励源位置的桥身上,将发射端固定于远离激励源一侧的模型桥支座上。

3.2 LDM 校准与验证试验

采集 SUC、RS 及 CS 原始数据,利用前述算法分别对 SUC-RS 和 SUC-CS 2 组序列进行匹配,获取经配对的位

移数据集,并分别建立散点图,如图8所示。图8(a)为共同激励源条件下 SUC 与 RS 位移测量结果的散点图,图8(b)为 SUC 与 CS 位移测量结果的散点图。比较可知,尽管2图中散点分布情况有差异,但直线拟合的结果具有良好的 consistency。

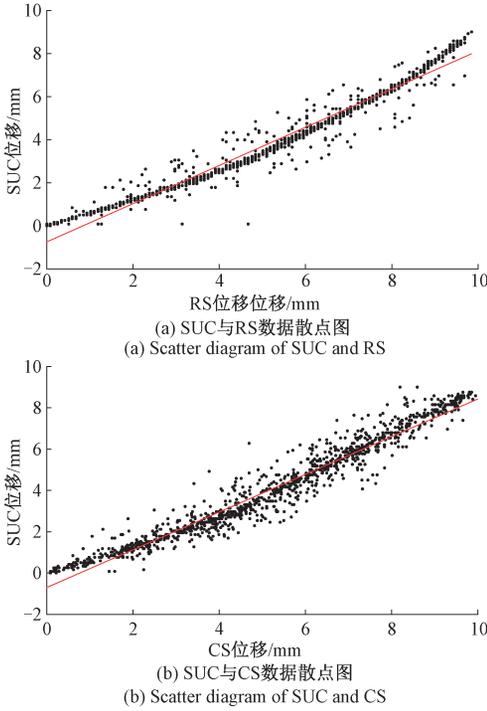


图8 采样序列数据拟合

Fig.8 Data fitting of sampling series

对2组数据线性拟合的残差进行分析,绘制残差分布图及统计直方图,如图9所示。由图9(a)~(b)可知,SUC-RS和SUC-CS线性拟合的残差主要分布于 $(-2\sigma, 2\sigma)$ 区间,据统计比例分别为98.32%和97.80%。

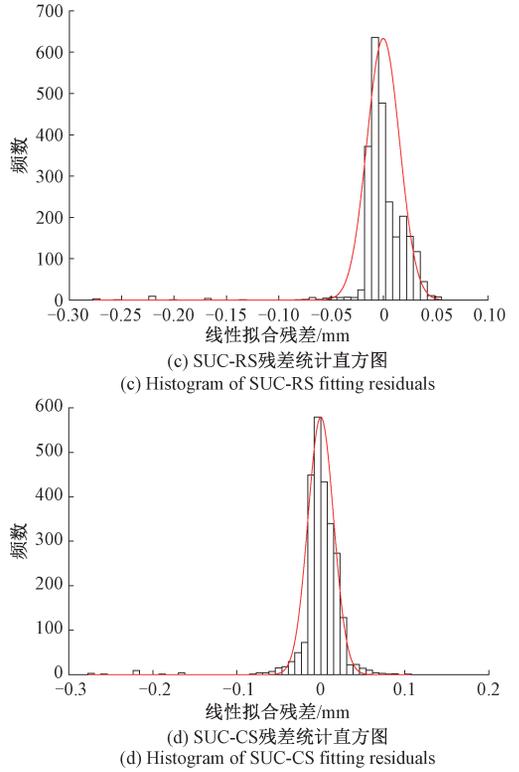
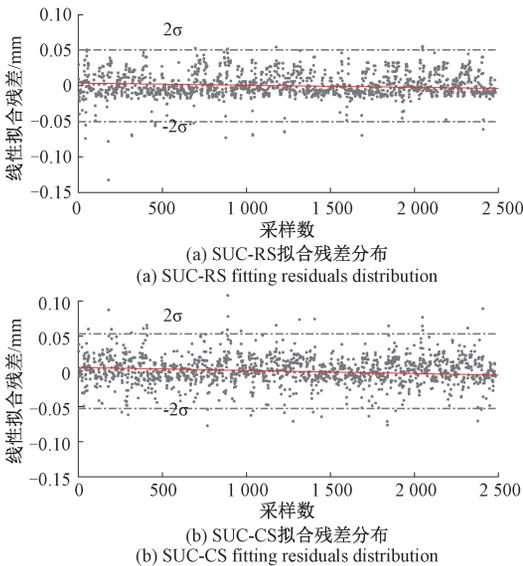


图9 数据序列拟合残差的统计分布

Fig.9 Distribution of fitting residuals

从图9(c)~(d)比较发现,2组残差分布的规律性因RS和CS计量性能的差异而不同,且实际残差的统计直方图并非严格的正态分布,而是正偏态分布,相比而言SUC-RS拟合残差的统计直方图偏度更大。这说明,suc非线性会因RS的非线性原因而被进一步放大。

对于SUC传感器,分别以RS和CS的比对测量结果作为参考值,根据最小二乘法计算得到参比直线方程的斜率 K 和截距 Y_0 ,按式(6)~(8)计算SUC线性度、基本误差、相关系数等参数,结果如表4所示。

分析表4数据可知,2组试验数据的线性拟合参数和相关系数具有较好的一致性;从线性度和基本误差结果看,2组试验所得结果的偏差小于1%;从残差分析结果看,2组试验数据拟合残差的统计特征基本一致性也较好。这表明用经溯源校准的同类传感器作为RS,在现场环境中对suc进行在线校准具有可行性。同时,RS本身的线性度和基本误差,将可能对在线校准目标传感器的相应指标起到放大作用。

4 结论

针对在用桥梁结构监测系统LDM难以实现现场在线校准的问题,提出了一种基于数据匹配的LDM在线校

表4 校准试验和验证试验中主要的统计学参数

Table 4 Main statistical parameters in calibration and verification tests

名称	组别	拟合斜率 K	拟合截距 Y_0	相关系数	线性度/ %	基本误差/ %	残差均值/ mm	残差标准差/ mm
校准试验	SUC-RS	0.90	-0.79	0.966	6.85	8.80	-0.002 2	0.025 2
验证试验	SUC-CS	0.92	-0.69	0.963	5.89	7.85	-0.004 2	0.026 5

准方法。以公路桥梁挠度形变检测为目标场景,以简支梁模型桥为试验平台搭建了基于LDM的挠度形变监测系统,并在该系统上进行了LDM在线校准试验。同时,为验证在线校准方法的可行性,利用激光干涉仪搭建了对照验证系统。通过对上述一系列试验结果的分析可以得到如下结论:在给定共同激励源条件下,通过对参考LDM和待校准LDM数据序列的匹配和分析,可以实现待校准LDM的在线校准;此方法与实验室状态下的传感器校准结果有良好的一致性,且具有现场在线实施的良好适用性。

参考文献

- [1] 蓝章礼,张洪,周建庭.基于激光和视频的桥梁挠度测量新系统[J].仪器仪表学报,2009,30(11):2405-2410.
LAN ZH L, ZHANG H, ZHOU J T. Novel system for measuring bridge deflections based on laser and video [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(11):2405-2410.
- [2] 张奔牛,李星星,宋军,等.激光投射式位移传感技术在桥梁挠度检测中的应用研究[J].传感技术学报,2009,22(5):755-759.
ZHANG B N, LI X X, SONG J, et al. Application study on laser projection sensor for bridge deflection detection [J]. Journal of Transduction Technology, 2009, 22(5):755-759.
- [3] OU J P, Li H. Structural health monitoring in mainland China: review and future trends [J]. Structural Health Monitoring, 2010, 9(3):219-231.
- [4] ZHOU L R, YAN G R, WANG L, et al. Review of benchmark studies and guidelines for structural health monitoring [J]. Advances in Structural Engineering, 2013, 16(7):1187-1206.
- [5] CAO Y H, ZHANG Y, ZHAO Y, et al. Distributed health monitoring system for Zhanjiang bay bridge [J]. Advances in Structural Engineering, 2011, 14(1):1-12.
- [6] YANG Y, LI Q S, YAN B W. Specifications and applications of the technical code for monitoring of building and bridge structures in China [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2017, 9(1):1687814016684272.
- [7] ANNAMDAS V G M, BHALLA S, SOH C K. Applications of structural health monitoring technology in Asia [J]. Structural Health Monitoring, 2017, 16(3):324-346.
- [8] 全国几何量工程参量计量技术委员会.线位移传感器校准规范:JJF1305-2011 [S].北京:中国质检出版社,2011:1.
National Geometric Engineering Parametric Metrology Technical Committee. Calibration specification for linear displacement sensors:JJF1305-2011 [S]. Beijing: China Quality Inspection Press, 2011:1.
- [9] GUO Y X, TANG X Q, ZHOU X D, et al. Continuous measurements with single setup for position-dependent geometric errors of rotary axes on five-axis machine tools by a laser displacement sensor [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 99(5-8):1589-1602.
- [10] KUESTER M, INTARATEP N, BORGOLTZ A, et al. Laser displacement sensors for wind tunnel model position measurements [J]. Sensors, 2018, 18(12):4085.
- [11] LI H W, LIANG ZH Q, PEI J J, et al. New measurement method for spline shaft rolling performance evaluation using laser displacement sensor [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2018, 31(1):69.
- [12] 彭希锋,陈爽,李海星,等.基于激光位移传感器的面角度测量技术研究 [J].仪器仪表学报,2017,38(11):2735-2743.
PENG X F, CHEN SH, LI H X, et al. Study on the plane angle measurement technology based on laser displacement sensors [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(11):2735-2743.
- [13] 皮世威,刘强,孙鹏鹏.基于激光干涉仪的旋转轴误差快速检定方法 [J].仪器仪表学报,2017,38(10):2484-2491.
PI SH W, LIU Q, SUN P P. Geometric error detection for rotary feed drive based on laser interferometer [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(10):2484-2491.
- [14] BI CH, FANG J G, LI K, et al. Extrinsic calibration of a

- laser displacement sensor in a non-contact coordinate measuring machine[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2017, 30(4): 1528-1537.
- [15] DU G L, ZHANG P, LI D. Online robot calibration based on hybrid sensors using Kalman Filters [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2015, 31: 91-100.
- [16] 孙彬, 李兵. 一种量化的激光位移传感器倾角误差补偿模型[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(5): 996-1004.
SUN B, LI B. A quantitative error compensation model of the inclination angle of the laser displacement sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(5): 996-1004.
- [17] LI L L, SUN H X, YANG S, et al. Online calibration and compensation of total odometer error in an integrated system[J]. Measurement, 2018, 123: 69-79.
- [18] 魏振忠, 孙文, 张广军, 等. 激光跟踪视觉导引测量系统的全局校准方法[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(11): 2262-2267.
WEI ZH ZH, SUN W, ZHANG G J, et al. Global calibration method for laser-tracking measurement system based on vision guiding[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(11): 2262-2267.
- [19] SHI Q, YU ZH Q, WANG H P, et al. Development of a highly compact microgripper capable of online calibration for multisized microobject manipulation [J]. IEEE Transactions on Nanotechnology, 2018, 17(4): 657-661.
- [20] XIAO F, CHEN G S, HULSEY J L, et al. Characterization of non-stationary properties of vehicle-bridge response for structural health monitoring [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2017, 9(5):

1687814017699141.

- [21] KEENAHAN J, OBRIEN E J, MCGETRICK P J, et al. The use of a dynamic truck-trailer drive-by system to monitor bridge damping [J]. Structural Health Monitoring, 2014, 13(2): 143-157.
- [22] JING G Q, DUAN F J, ZHANG ZH, et al. Study on the dependency of SHM sensors' online calibration on excitation sources [C]. 3rd International Conference on Information Technology and Intelligent Transportation Systems, 2019: 175-182.

作者简介



袁鑫, 2017年于武汉工程大学获得学士学位, 现为武汉工程大学硕士研究生, 主要研究方向为精密测试技术、在线计量等。

E-mail: qcmhssk@163.com

Yuan Xin received his B. Sc. degree from Wuhan Institute of Technology in 2017. He is currently a master student at Wuhan Institute of Technology. His main research interests include precision testing, on-line metrology, etc.



荆根强(通信作者), 分别在2001年和2004年于华中科技大学获得学士学位硕士学位, 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、公路工程仪器在线计量、远程计量技术等。

Email: gq.jing@rioh.cn

Jing Genqiang (Corresponding author) received his B. Sc. degree and M. Sc. degree both from Huazhong University of Science and Technology in 2001 and 2004, respectively. He is currently a researcher at Research Institute of Highway, Ministry of Transport. His main research interests include precision testing, on-line metrology, remote metrology, etc.