

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311535

基于分布式光纤声振传感的索结构监测*

况卓林, 李素贞

(同济大学土木工程学院 上海 200092)

摘要:索结构凭借自身良好的抗拉性能被广泛应用于工程领域。因而拉索索力是影响其安全性的重要因素,对其进行测试十分必要。现工程中索力测试多采用自振频率法,其大多是通过加速度计或计算机视觉测量拉索自振频率,从而计算拉索索力值。而近年发展出的相位敏感光时域反射计(φ -OTDR)仅凭1根成本较低的通信光纤即可实现结构内全部拉索的自振频率测量,具有较好的测试前景。然而在实际中,用于确定分布式光纤系统灵敏度的有效光弹系数并不唯一。为确保 φ -OTDR应用于索力测试的数据来源可靠,本研究通过将传感光纤粘贴于拉索搭建了用于索结构监测的分布式光纤传感系统性能标定平台,基于数字图像相关法对不同设计工况下的拉索跨中位移信号进行测量,并通过分析拉索模型将跨中位移信号转换为轴向信号,最后通过对比拉索轴向信号以及 φ -OTDR采集信号从而实现了分布式光纤传感系统的标定实验。

关键词: 标定; 相位敏感光时域反射计; 传感光纤; 应变; 索结构

中图分类号: TH82 TU990.3 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 560.20

Cable structure monitoring based on distributed optical fiber acoustic sensing

Kuang Zhuolin, Li Suzhen

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Cable is widely used in engineering due to the good tensile performance. The cable tension is an important factor affecting the safety, which is necessary to be tested. Currently, the testing of cable tension mostly is calculated by the frequency method, which is to measure the cable frequency based on accelerometer or computer vision. Recently, the φ -OTDR has been developed, which can measure the frequency of several cables with just one low-cost communication fiber. It has a great prospect in the testing of cable tension. However, the coefficient of effective optical elasticity used to determine the sensitivity of the distributed fiber optical system is not unique in practice. To ensure the reliability of the data collected by φ -OTDR in the testing of cable tension, this study establishes a performance calibration platform for the distributed fiber optical system for cable monitoring by attaching the sensing fiber to the cable, and the mid-span displacement of cable under different testing conditions are measured by using the digital image correlation method. The mid-span displacement is converted into the axial displacement of cable by analyzing the dynamic model of cable. Finally, based on the converted axial signal of cable and the phase collected by φ -OTDR, the performance calibration of distributed fiber optical sensing system is realized.

Keywords: calibration; phase sensitive time domain reflectometer; sensing fiber; strain; cable structure

0 引言

随着经济不断发展,索结构凭借自身柔性、轻便、运输方便以及良好的抗拉性能被广泛应用于大跨度空间结

构^[1]、斜拉桥^[2]及悬索桥^[3]等桥梁结构、玻璃幕墙结构^[4]以及输电塔线结构^[5]。不同于传统刚性结构,拉索一般不具备抗压能力而具备较好的抗拉性能,其应用于工程中时一般基频较低,以300 m长的斜拉索为例,其基频一般约为0.4 Hz^[6]。

拉索在较小的外荷载影响下就易产生无法忽略不计的几何非线性效应,这对结构的施工阶段以及使用阶段均具有较大影响意义,在施工阶段需要对索力进行测量,并据此调整索力变化以确保结构形状以及能力分布满足设计要求;在使用阶段,受腐蚀、疲劳影响的拉索索力可能会因此发生变化而引起整个结构的内力重分布以及变形,其是评价结构安全性以及耐久性重要指标之一。

基于上述分析,有必要采取相应手段对拉索进行索力测试以保证结构安全可靠。目前,拉索索力测量手段主要可分为直接法与间接法^[7],其中直接法包括压力传感器^[8]以及千斤顶拉拔测试法^[9]等,此类方法一般适用于施工阶段;而间接法较为典型的是磁通量法^[10]和振动频率法^[11],其中磁通量法成本较高应用有限;而振动频率法则因计算方便而被广泛应用,一般来说,拉索振动测试方法可通过将加速度计安装于拉索表面或基于计算机视觉的振动测试方法^[12]测量获得,但前者在使用后拆卸效率低下,而后者则是无法同时进行多根拉索的振动信号测量。而相位敏感光时域反射计则是一种以传感光纤为基本传感单元的分布式应变测量手段,其最早是由 Taylor 等^[13]于 1993 年提出,该技术仅需 1 根成本较低的传感光纤即可通过测量后向瑞利散射 (rayleigh backscattering, RBS) 的相位变化从而实现结构中全部拉索的振动实时测量,拥有较好的拉索监测应用前景。

为确保相位敏感光时域反射计 (phase sensitive optical time domain reflectometer, φ -OTDR) 数据来源的可靠性以推广其在拉索测试的应用,对其进行性能标定十分必要。 φ -OTDR 灵敏度指传感光纤受扰时所采集相位信号与传感光纤伸长量的比例系数,理论上,其可通过传感光纤的折射率、入射光的波长、有效光弹系数 3 个参数直接进行计算^[14]。但在实际中,由于参数的不确定性和光缆结构的多样性,有效光弹系数往往无法直接确定。对此,如何设计一种快速有效的测试方法来标定 φ -OTDR 的灵敏度,对实现工程中应变的定量测量具有重要意义。然而,现阶段少有工作关注灵敏度的标定工作, Dong 等^[15]利用高精度纳米定位平移台标定了 φ -OTDR 系统的动态应变与相位信号的关系,但存在过高标定成本等问题。

对此,本研究从工程应用角度出发,通过将传感光纤固定在拉索上表面,搭建了用于索结构监测的 φ -OTDR 灵敏度标定实验。本实验首先通过分析拉索力学模型获得了索在自由振动时垂度与轴向伸长信号之间的关系;随后从拉索振动性质的角度出发,设计了不同幅值以及不同自振频率的测试工况;最后在测试过程中,通过数字图像相关法识别了拉索最低点的振动时序信号,并基于前述力学关系将该信号转换为拉索的轴向伸长信号,通过对比拉索轴向信号以及 φ -OTDR 采集相位信号确定了 φ -OTDR 系统灵敏度指标,并讨论了实验所采用 φ -OTDR 系统于低频工况下的时频域性能。

1 φ -OTDR 基本原理

1.1 系统结构

φ -OTDR 工作系统如图 1 所示,该系统在测试期间激光器会不断发射连续脉冲光,脉冲光在经过调制以及放大后会被调制为信号较强的超窄脉冲光,之后即被注入传感光纤,该脉冲光在传感光纤中传输时,会由于材料中存在不均匀等现象而产生瑞利散射,其中后向的瑞利散射光会经过环形器而被光电探测器捕捉并转化为电信号用以后续分析。

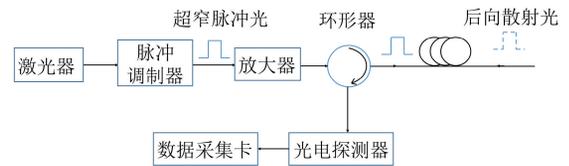


图 1 φ -OTDR 结构

Fig. 1 The architecture of φ -OTDR

而每个脉冲光所产生的后向瑞利散射曲线可与光纤长度方向所对应,该曲线上每个点均携带了传感光纤上各通道于某一时刻的振动信号大小,而不同 RBS 曲线于同一位置的点所组成的时序数列,即代表测试 φ -OTDR 采集到的该通道时序信号,具体信号采集过程如图 2 所示。

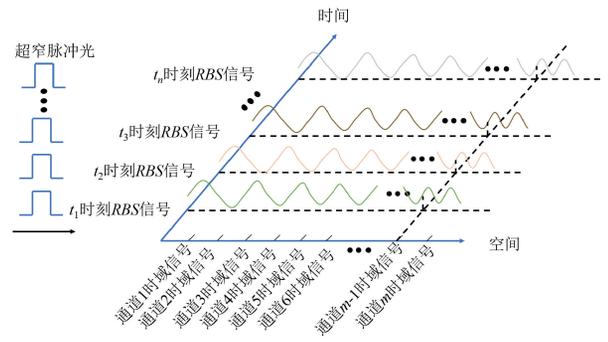


图 2 后向瑞利散射信号采集过程

Fig. 2 The signal collection of Rayleigh backscattering

1.2 传感原理

早期的 φ -OTDR 系统一般仅聚焦于光功率而没有提取后向瑞利散射信号相位变化,得到的光幅值信号仅能定性反应实际场地的振动情况,无法精准还原外部实际扰动源,因而一般仅能用于周界安防等领域。由于瑞利散射光的相位变化与外部扰动呈线性变化,因此只要能够获得瑞利散射光的相位变化即可实现传感光纤周界扰动信号的定量还原,但早期迫于技术限

制相位解调技术一直难以实现。而近年来为解决该问题,基于相位解调的 φ -OTDR系统开始有所发展,其基本原理如下:

设 φ -OTDR系统中入射光的中心波长为 λ ,则该系统中光波的传播常数为:

$$\beta = \frac{4\pi n(x)}{\lambda} \quad (1)$$

其中, $n(x)$ 为传感光纤各处折射率。则脉冲光在长度为 L 的光纤中传输时,产生的相位为:

$$\varphi = \beta L \quad (2)$$

当传感光纤受到外界扰动而引发微小弯曲时,也会产生一个轴向的应变变化,因而致使光纤的折射率、长度与直径均发生了变化。引起光波于传感光纤产生额外相位变化可分为3部分,分别为光纤长度变化、光纤折射率变化、光纤直径变化。因此,合计的相位差为^[16]:

$$\Delta\varphi = \beta L \left(\frac{\Delta L}{L} \right) + \left(\frac{\partial\beta}{\partial n} \right) \Delta n L + \left(\frac{\partial\beta}{\partial D} \right) \Delta D L \quad (3)$$

其中, D 为传感光纤中纤芯直径。式(3)中第1项代表传感光纤受扰后所产生伸长量引起的相位差,第2项代表传感光纤受扰后由于光弹效应所产生的折射率变化引起的相位差,第3项代表传感光纤受扰后所产生直径变化引起的相位差。

通常情况下,实际中传感光纤受扰后造成的纤芯直径变化所引起的相位差十分微小,而折射率变化与光纤长度变化所引起的相位差则往往占据了主要地位,因此式(3)中第3项一般均可忽略不计。则可将其改写为:

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi n}{\lambda} \Delta L + \frac{4\pi C_e}{\lambda} \Delta L = \frac{4\pi}{\lambda} (n + C_e) \Delta L \quad (4)$$

其中, C_e 为传感光纤有效光弹系数, ε 为传感光纤受扰时所产生的轴向应变。至此由式(4)即可得知传感光纤相位差与外界扰动呈线性正比关系,整理后即可获得 φ -OTDR系统的灵敏度关系式:

$$K = \frac{\Delta\varphi}{\Delta L} = \frac{4\pi}{\lambda} (n + C_e) \quad (5)$$

其中, K 为 φ -OTDR系统灵敏度。

2 标定实验相关原理

2.1 拉索力学模型

一般柔性拉索可看作为一条理想悬链线,其精确解应为悬链线方程,但由于悬链线方程内含双曲函数,精确对其进行求解也较为繁杂。因而工程中一般采用简化模型,文献^[17]表示一般两端高度差与跨度之比小于10%时,可近似将拉索的悬链线模型看作平抛抛物线模型。对此,本文考虑选用如图3所示的两端等高平抛抛物线模型,

以用于索结构监测的分布式光纤系统进行性能标定实验。记拉索跨度为 l ,弧长为 S ,拉索垂度为 h ,对其进行力学分析后,即可获得拉索弧长、跨度以及垂度之间的关系式^[18]:

$$S = l + \frac{3h^2}{8l} \quad (6)$$

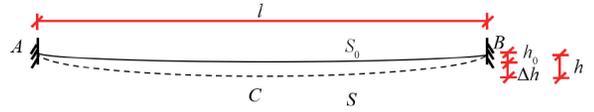


图3 拉索力学模型

Fig. 3 The mechanic model of tensioned cable

当拉索发生自由振动时,其弧长 S 也会相应发生改变。若记拉索受扰前后的弧长分别为 L_0 以及 L' ,垂度分别为 h_0 以及 h' ,则可依据式(6)进行简单变换从而获得拉索受扰前后的弧长—垂度关系式,将受扰前后的关系式进行作差运算后即可获得以下关系式:

$$h' = \sqrt{\frac{3l}{8} \Delta S + h_0^2} \quad (7)$$

其中,拉索轴向伸长量 $S = \Delta S - S_0$ 。

基于式(7)即可建立拉索受扰时垂度与轴向信号间的关系,将其与未受扰时的垂度 h_0 作差即可获得于拉索最低点在其平衡位置附近的位移信号:

$$G = \sqrt{\frac{3l}{8} \cdot \Delta S + h_0^2} - h_0 \quad (8)$$

其中, G 表示拉索最低点的位移信号。

至此,本节即建立了拉索所受扰后所产生的轴向信号与跨中最低点振动信号之间的关系,基于此关系,后续分布式光纤传感系统标定实验中即可将通过已知应变扰动信号来标定 φ -OTDR系统灵敏度的问题转换为通过已知最低点振动信号标定 φ -OTDR系统灵敏度的问题。

在后续标定实验中,通过将传感光纤粘贴于拉索上表面进行,即可近似认为传感光纤伸长量 ΔL 应与拉索伸长量 ΔS 相等,再结合1.2节中式(5)所建立灵敏度公式进行简单变换后,即可建立分布式光纤传感系统的标定关系式:

$$K = \frac{\Delta\varphi}{\Delta L} \quad (9)$$

$$\Delta L = \frac{8[(G + h_0)^2 - h_0^2]}{3l} \quad (10)$$

对于上述式(9)与(10),拉索初始垂度 h_0 、跨度 l 均可通过标定实验现场测量获得,这意味着只要分别获得了相位差信号 $\Delta\varphi$ 与拉索最低点的位移信号 G 两个标定待测量,即可实现分布式光纤传感系统的灵敏度标定工作。其中,标定待测量 $\Delta\varphi$ 可由 φ -OTDR系统直接采集

获得,而关于标定待测量 G ,本研究主要是通过图像相关法对拉索最低点进行图像计算予以获得,具体内容可参见 2.2 节。

2.2 数字图像相关法

数字图像相关法(digital image correlation, DIC)总体目标是通过图像方法以获得待测物体发生变形后,感兴趣区域(region of interest, ROI)内的位移场以及应变场^[19]。在实际计算中,该方法首先截取参考配置图像中小部分区域作为参考子集,随后确认它们在当前配置图像中各自的位置,通过匹配当前配置图像中参考子集的位置以获得 ROI 内的位移及应变信息。其中,子集即图像内以像素点为基准的一系列坐标点,其示意关系如图 4 所示,子集 A 与子集 B 分别为未变形的参考配置图像和变形后的当前配置图像中同一子集, $(x_{ref,i}, y_{ref,j})$ 与 $(x_{cur,i}, y_{cur,j})$ 分别为子集 S 在 A、B 两区域时各子集点 $(i=1,2,3, j=1,2,3)$ 。若视这种变换过程为线性关系,将位移关系按一阶泰勒展开,即可获得以下像素坐标关系式:

$$\tilde{x}_{cur,i} = x_{ref,i} + u_{rc} + \frac{\partial u}{\partial x_{rc}}(x_{ref,i} - x_{ref,c}) + \frac{\partial u}{\partial y_{rc}}(y_{ref,j} - y_{ref,c}) \quad (11)$$

$$\tilde{y}_{cur,j} = y_{ref,j} + v_{rc} + \frac{\partial v}{\partial x_{rc}}(x_{ref,i} - x_{ref,c}) + \frac{\partial v}{\partial y_{rc}}(y_{ref,j} - y_{ref,c}) \quad (12)$$

$$\mathbf{p}_{rc} = \left\{ u, v, \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y}, \frac{\partial v}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y} \right\} \quad (13)$$

其中, u, v 分别表示参考配置图像中参考子集于 x, y 方向产生的位移分量, \mathbf{p}_{rc} 表示使中子集由参考配置图像转换当前配置图像的位移向量,下标 ref, cur 代表参考配置图像以及参考配置图像,下标 i, c 则分别代表子集中各个点的编号以及中心点的编号,下标 rc 表示参考子集由参考配置图像转换为当前配置图像的转换过程, w 表示待测物体发生翘曲的变形函数。

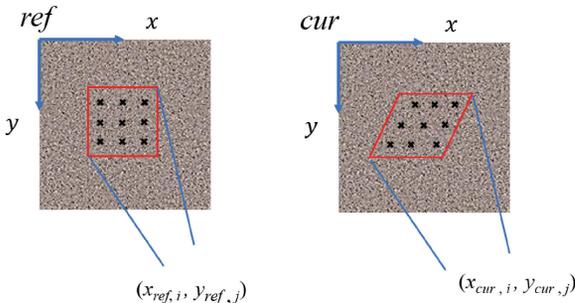


图 4 变形前后 ROI 内子集关系示意图

Fig. 4 Diagram of subsets relationships within ROI before and after deformation

基于以上关系,结合相关搜索算法^[20]搜索与 ROI 匹配的潜在区域后即可采用相关函数评价两个区域匹配程度,即:

$$C_{CC} = \frac{\sum_{(i,j) \in S} (f(\tilde{x}_{ref}, \tilde{y}_{ref}) - f_m)(g(\tilde{x}_{ref}, \tilde{y}_{ref}) - g_m)}{\sqrt{\sum_{(i,j) \in S} [f(\tilde{x}_{ref}, \tilde{y}_{ref}) - f_m]^2 \sum_{(i,j) \in S} [g(\tilde{x}_{ref}, \tilde{y}_{ref}) - g_m]^2}} \quad (14)$$

$$C_{LS} = \frac{\sum_{(i,j) \in S} \frac{f(\tilde{x}_{ref}, \tilde{y}_{ref}) - f_m}{\sqrt{\sum_{(i,j) \in S} [f(\tilde{x}_{ref}, \tilde{y}_{ref}) - f_m]^2}} - \frac{g(\tilde{x}_{ref}, \tilde{y}_{ref}) - g_m}{\sqrt{\sum_{(i,j) \in S} [g(\tilde{x}_{ref}, \tilde{y}_{ref}) - g_m]^2}}}{\sqrt{\sum_{(i,j) \in S} [g(\tilde{x}_{ref}, \tilde{y}_{ref}) - g_m]^2}} \quad (15)$$

其中, f 和 g 分别为参考及当前图像灰度函数,其作用为返回子集内指定点 (x, y) 灰度值, f_m 与 g_m 分别为参考、当前配置图像内子集的灰度平均值。式(14)为归一化互相关准则,当 C_{CC} 接近于 1 则表示匹配效果良好。式(15)为归一化最小二乘准则,当 C_{LS} 接近于 0 则表示匹配效果良好。

在通过以上两类互相关函数匹配与 ROI 相似的区域后,即可通过相关数字图像理论^[19]计算 ROI 内全位移场。

3 分布式光纤性能标定实验

3.1 现场布置

本次标定实验所搭建系统如图 5 所示,其中拉索搁置于固定在平台上的定滑轮且两端通过悬挂配重 M 予以施加预拉力,考虑到本次标定仅对拉索施加小扰动且拉索两端张力相对较大,拉索两端在实验过程中近似为固定不动,因此考虑将拉索两端视为固定边界条件。实验过程中所采用传感光纤为紧套光纤,其悬空部分与拉索采用胶带固定,而拉索所受激励则通过切断悬挂于正中配重 m 的绳子予以施加。在后续标定实验中,所采用的不同设计工况是通过调节不同的两端悬挂配重 M 及正中悬挂配重 m 予以实现的。此外,记定滑轮中心点距离地面 h_1 ,拉索悬挂部分最低点距离地面 h_2 ,通过 h_1 减去 h_2 即可获得拉索初始垂度 h_0 , φ -OTDR 空间分辨率及脉冲重复频率分别设为 4 m、2 000 Hz,两端定滑轮间距为 4 m。

为通过数字图像相关法获得拉索最低点的位移信息以实现后续标定,分别布置高清摄像机与白色背景纸于拉索悬挂部分跨中位置正后方以及正前方,其中,白色背景纸的作用则是降低图像方法测量结果中的环境噪声。此外,由于数字图像相关方法需要待测物体本身表面带有灰度场区分明显的人工散斑场,但标定实验中所采用

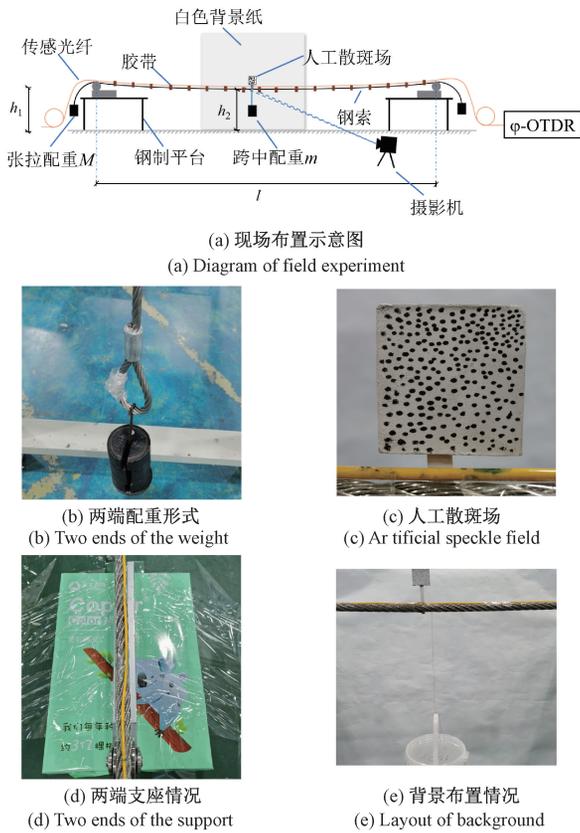


图 5 现场实验布置情况

Fig. 5 The layout of field experiment

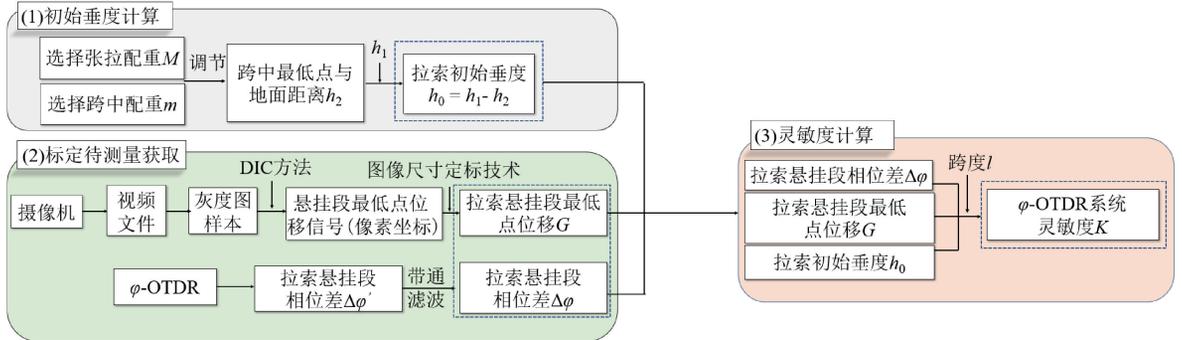


图 6 ϕ -OTDR 标定实验流程图

Fig. 6 Diagram of the calibration experiment for ϕ -OTDR

第 3 部分内容为 ϕ -OTDR 系统灵敏度计算。该部分主要基于前述步骤获得初始垂度、相位差、最低点位移信号及跨度 l 计算 ϕ -OTDR 系统灵敏度,从而实现分布式连续的定量测量。

3.3 标定预实验

不同于常规点式传感器, ϕ -OTDR 为一种分布式传感系统,其采集信号间接反应各通道于单元通道长度范围内的平均应变,因此,如何建立分布式光纤传感系统与其他测量手段之间的联系,并基于该关系进行标定工作

拉索以及传感光纤自身均缺少拥有较明显区分度的天然散斑场,且由于两者自身并不易于直接在其表面上制作人工散斑场,因而本次标定实验中基于图像方法的位移识别部分主要是通过拉索上粘贴自带人工散斑场且尺寸已知的标记木板来实现。

3.2 标定流程

ϕ -OTDR 系统灵敏度标定流程可如图 6 所示分为 3 部分,分别分为计算初始垂度、标定待测量获取和灵敏度计算。

第 1 部分为初始垂度计算。首先基于不同实验设计工况调整两端张拉配重 M 及悬挂于跨中的配重 m ,予以拉索所受预拉力 T 及悬挂段最低点与地面距离 h_2 ,随后根据现场滑轮轴线距离地面的距离 h_1 实测值与 h_2 作差即可获得初始垂度 h_0 。

第 2 部分为两个标定待测量获取。对于悬挂段最低点位移信号 G ,首先需要在配重 m 释放时,通过摄像机记录粘贴于拉索跨中的人工散斑场运动轨迹视频,再运用相关软件将拍摄运动轨迹样本剪辑并转换为灰度图样本,随后即可通过 DIC 方法以计算出像素坐标下的拉索悬挂段最低点位移信号,最后结合定标技术,通过已知尺寸的人工散斑场标记木板即可将像素坐标系下的悬挂段最低点位移转换为真实坐标系下的位移;对于后续标定所采用的相位差 $\Delta\phi$,通过对因配重 m 释放所引起的相位差 $\Delta\phi'$ 进行带通滤波去除设备自带底噪即可获得。

是本章研究的重难点之一。本节基于前述所建立平台进行标定预实验,其中两端张拉配重 $M = 8 \text{ kg}$,跨中配重 $m = 100 \text{ g}$ 。

在本次实验中,配重 m 释放所引发的相位瀑布图及配重所在通道附近的相位时域信号分别如图 7(a)、(b) 所示,在重物释放之前所有位置的相位信号水平位置均在 0 附近,约 1 s 后重物释放,通道 24、25 相位信号水平立即产生明显变化且其振动波形强度呈自由衰减趋势最后逐渐趋向于稳定。频域如图 7(c)、(d) 所示,通道 24、

25 均存在较明显主峰,而通道 24 的主频又显著大于通道 25。综上,通道 24 拥有最为强烈的响应且其信号特征能够最大程度契合实际情况,因此后续标定预实验工作主要基于通道 24 进行。

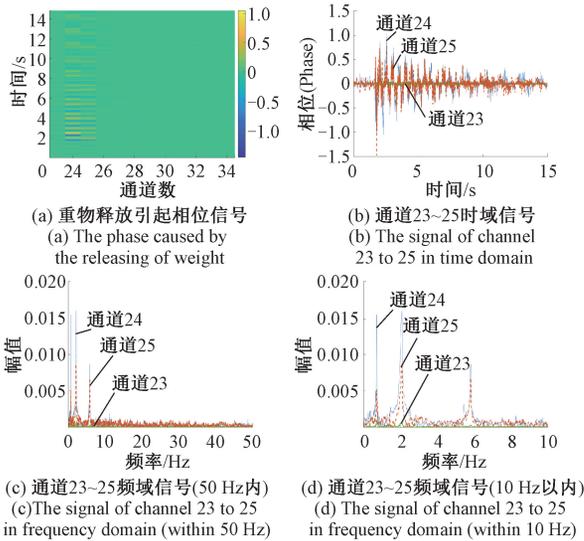


图7 重物释放引起的相位信号

Fig. 7 The signal of phase caused by releasing of weight

获得跨中人工散斑场的位移信号及相位信号后,即可参照 3.2 节所描述的标定实验流程,通过式(8)及(9)对 φ -OTDR 的灵敏度 K 进行标定。之后,结合灵敏度 K 换算的 φ -OTDR 及 DIC 方法测试所得拉索轴向响应信号如图 8 所示,其中图 8(a)、(b) 表明两种方法所得时域波形具有较好的吻合度;而频域信号则如图 8(c)、(d) 所示,两种方法均于 0.7、2.1 Hz 附近存在较高频率分量,这表明两者在频域也具有较好的一致性。

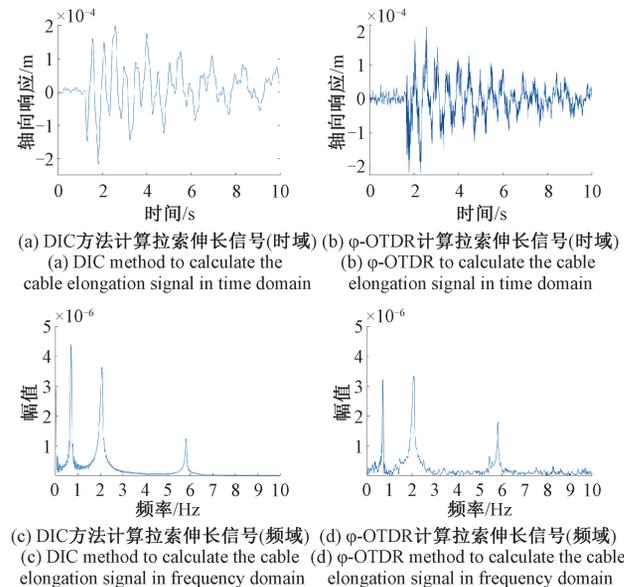


图8 标定预实验结果

Fig. 8 The result of pre-calibration experiment

3.4 设计工况

分布式光纤标定实验类似于常规工程测试中背对背标定法^[21],其思路在于对比 DIC 方法与分布式传感系统测量到的同一扰动源所引发的拉索轴向信号,以完成对未知性能分布式传感系统的性能标定工作。本节通过对两种测试手段于不同工况下的信号以实现分布式光纤传感的性能标定工作。实验中考虑了如表 1 所示的扫幅、扫频两种形式工况组合。

表1 标定实验工况

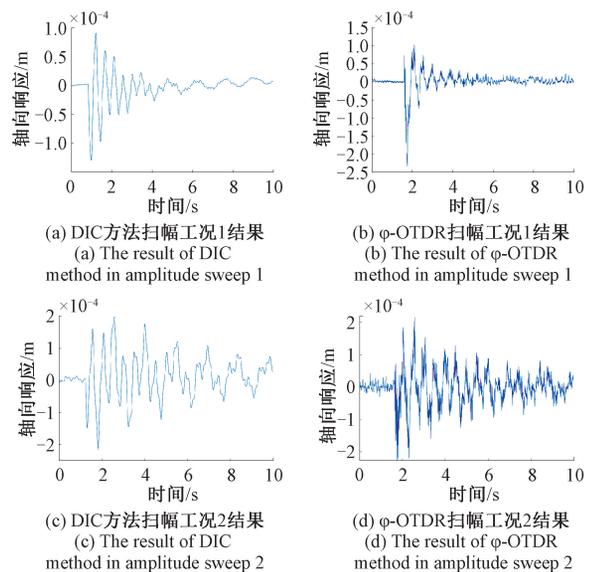
Table 1 The case of calibration experiment

工况	序号	配重 m/g	配重 M/kg
扫幅工况	1	50	8
	2	100	8
	3	150	8
	4	200	8
扫频工况	1	100	6
	2	100	8
	3	100	10
	4	100	12
	5	100	14

3.5 结果讨论

1) 扫幅工况测试结果

扫幅工况组合的测试结果如图 9 所示。受限于摩擦力等因素,时域范围内 φ -OTDR 采集信号某些峰存在一定漂移,且相较于 DIC 方法而言, φ -OTDR 由于硬件噪声等问题采集信号自身存在较多毛刺分量。为更进一步进行讨论,取两种方法于每种工况下测试信号第一个值为正的峰表示为如图 10 所示的变化曲线,结果显示两种测试手段测试结果高度吻合。



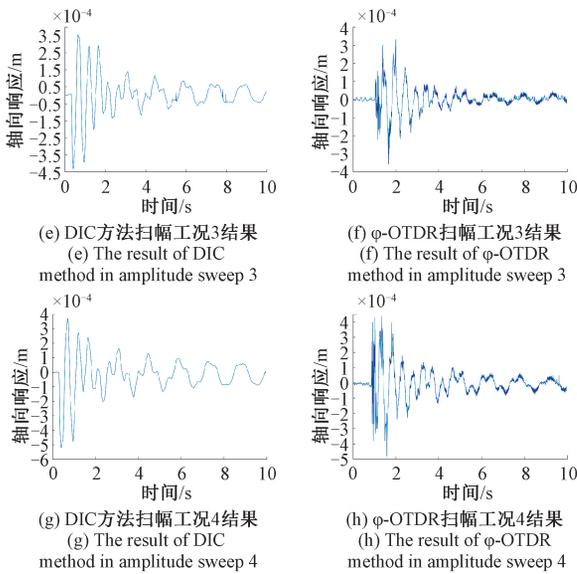


图 9 扫幅工况测试结果

Fig. 9 The result of amplitude sweep

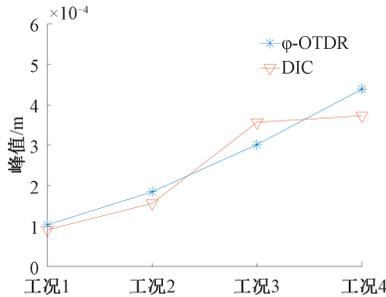


图 10 两种方法采集信号与扰动源间关系

Fig. 10 The relationship between the signal of collection and the disturbance

2) 扫频工况测试结果

扫频工况组合的测试结果如图 11 所示,可以发现两者采集信号各个峰值的对应频率能够较好的吻合。为进一步评估 φ -OTDR 测量频率精准度,记 φ -OTDR 采集信号中频率占比最高两个峰值为峰一、峰二,将两种方法测得峰一、峰二对应频率汇总至表 2。

为进一步评估 φ -OTDR 系统测量精度,以 DIC 方法测试频率为参照,引入以下形式的相对误差评估式:

$$\varepsilon = \frac{\Delta f}{f_{DIC}} \quad (16)$$

其中, ε 为 φ -OTDR 相对误差, Δf 为 φ -OTDR 测试频率与 DIC 方法测试频率之间误差, f_{DIC} 为通过 DIC 方法测试频率。

以表 2 中汇总测试结果为例,若取 Δf 为扫频工况内两种方法之间绝对误差的平均值,可得到如图 12 所示的

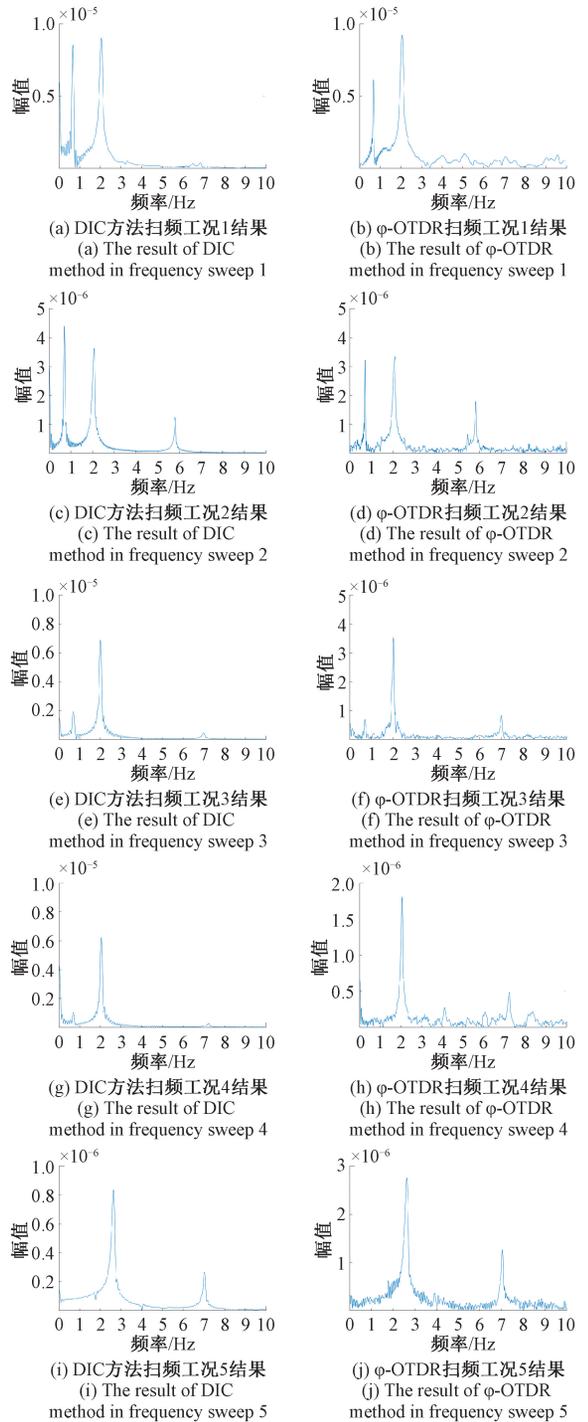


图 11 扫频工况测试结果

Fig. 11 The result of frequency sweep

参照 DIC 方法的 φ -OTDR 测量频率——相对误差关系。显然测试频率越大, φ -OTDR 系统与 DIC 方法之间的相对误差越小,当外界扰动频率为 1Hz 时,两者之间相对误差约为 0.69%;当外界扰动频率为 0.1Hz 时,两者之间相对误差约为 6.9%。

表2 扫频工况下 φ -OTDR 及 DIC 方法测试结果Table 2 The result of φ -OTDR and DIC method in frequency sweep

扫频工况	参数	1	2	3	4	5
峰一	φ -OTDR	0.663 8	0.694 3	2.014 0	2.052 0	2.625 0
	DIC	0.665 3	0.695 8	1.996 0	2.039 0	2.631 0
峰二	φ -OTDR	2.052 0	2.075 0	6.996 0	7.233 0	7.034 0
	DIC	2.051 0	2.069 0	6.989 0	7.227 0	7.025 0

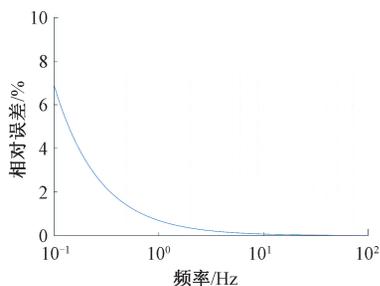


图12 频率测量精度评估

Fig. 12 The evaluation of frequency measuring accuracy

4 结 论

分布式光纤传感系统的标定实验是数据来源可靠的基本保证,只有确保了硬件基础才能对结构进行正确测试评估。本研究聚焦于用于索结构监测的分布式光纤传感系统,基于拉索力学模型以及数字图像相关法进行了性能标定工作,主要结论如下:

1) 通过拉索的力学模型对拉索轴向信号与跨中最低点位移进行分析,之后结合 DIC 方法提出了分布式光纤传感系统标定方法。通过标定预实验验证了提出标定实验的可靠性,并确定了 φ -OTDR 灵敏度。

2) 基于两种标定工况组合,确保了将分布式光纤传感系统应用于索结构监测时的数据可靠性。通过对比 φ -OTDR 采集信号与 DIC 方法于标定工况下的测试数据,对分布式光纤传感系统的精度进行了详细评估,实验结果表明 φ -OTDR 能对外部扰动源进行线性还原,并且面对 1 Hz 的扰动扰动时,其测试信号主频与 DIC 方法间相对误差仅 0.69%,具有良好的动态性能。

参考文献

[1] 熊学玉, 杨敬平. 拉索与拉杆在大跨度空间结构中的比较及分析[J]. 工业建筑, 2012, 42(3): 138-142.
XIONG X Y, YANG J P. Comparison and analysis of cable and rod in the long-span space structure [J]. Industrial Construction, 2012, 42(3): 138-142.

[2] 段殿臣. 斜拉桥拉索健康监测技术综述[J]. 上海公

路, 2021(2): 72-75, 167.

DUAN D CH. Review of health monitoring technology of cable-stayed bridge[J]. Shanghai Highways, 2021(2): 72-75, 167.

[3] 杨国俊, 田骐玮, 吕明航, 等. 大跨度悬索桥隧道式锚碇力学特性研究综述[J]. 吉林大学学报(工学版), 2022, 52(6): 1245-1263.

YANG G J, TIAN Q W, LYU M H, et al. Review of mechanic characteristics of tunnel-type anchorage of long-span suspension bridge [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology edition), 2022, 52(6): 1245-1263.

[4] 王晓龙, 李厚杰, 赵纯, 等. 拉索幕墙预应力拉索张拉施工技术要点[J]. 建筑结构, 2022, 52(1): 2980-2983.

WANG X L, LI H J, ZHAO CH, et al. Key points of prestressed cable tension construction technology for cable curtain wall [J]. Building Structure, 2022, 52(1): 2980-2983.

[5] 曹枚根, 张若愚, 朱云祥, 等. 输电线路铁塔面内预应力拉索抗风加固及设计参数影响研究[J]. 工业建筑, 2022, 52(8): 48-56.

CAO M G, ZHANG R Y, ZHU Y X, et al. Research on wind resistant reinforcement of in-plane cables of transmission line tower and influence of design parameters[J]. Industrial Construction, 2022, 52(8): 48-56.

[6] 陈政清, 李寿英, 邓羊晨, 等. 桥梁长索结构风致振动研究新进展[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2022, 49(5): 1-8.

CHEN ZH Q, LI SH Y, DENG Y CH, et al. Recent challenges and advances on study of wind-induced vibrations of bridge cables [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2022, 49(5): 1-8.

[7] 谢鹏, 雷冬, 杜文康, 等. 不同激励下基于边缘检测方法的单根拉索振动频率的同步测量[J]. 实验力学, 2022, 37(1): 41-51.

XIE K, LEI D, DU W K, et al. Determination of optimal point for stay-cable vibration measurement by edge

- detection[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2022, 37(1): 41-51.
- [8] 张龙龙, 钟山. 基于振弦式压力传感器的桥梁索力监测探讨[J]. *交通世界*, 2022, 15: 29-31, 34.
ZHANG L L, ZHONG SH. Discussion on cable tension monitoring of bridge based on vibrating pressure Sensor[J]. *Transpo World*, 2022, 15: 29-31, 34.
- [9] 李庭波. 索力测试频率法的研究及其工程应用[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2007.
LI T B. The research and practical application of frequency method of cable force measurement [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2007.
- [10] 郑灿. 基于频率法的索力测试方法及索的损伤研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
ZHENG C. Cable force measurement by vibration-frequency method and research on cable damage [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
- [11] 姜建山, 唐德东, 周建庭. 桥梁索力测量方法与发展趋势[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2008(3): 379-382, 466.
JIANG J SH, TANG D D, ZHOU J T. Progress and developing trend of cable stress measuring methods of bridge[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong*, 2008(3): 379-382, 466.
- [12] 陈拔, 颜全胜. 基于计算机视觉的拉索振动测试[J]. *甘肃科学学报*, 2022, 34(5): 71-78.
CHEN B, YAN Q SH. A study on computer vision-based cable vibration measurement [J]. *Journal of Gansu Sciences*, 2022, 34(5): 71-78.
- [13] TAYLOR H F, LEE C E. Apparatus and method for fiber optic intrusion sensing[P]. U. S. Patent 5, 1993.
- [14] 司召鹏, 卜泽华, 毛邦宁, 等. 基于相位解调的相位敏感光时域反射计研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(11): 109-122.
SI ZH P, BU Z H, MAO B N, et al. Review of research on phase sensitive optical time-domain reflectometer based on phase demodulation [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(11): 109-122.
- [15] DONG Y, CHEN X, LIU E, et al. Quantitative measurement of dynamic nanostrain based on a phase-sensitive optical time domain reflectometer[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(28): 7810-7815.
- [16] PAN Z, LIANG K, YE Q, et al. Phase-sensitive OTDR system based on digital coherent detection [C]. 2011 Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition, IEEE, 2011: 1-6.
- [17] 胡国荣. 输电线路基础[M]. 北京: 中国电力出版社, 1993: 31-32.
HU G R. Transmission line foundation [M]. Beijing: China Electronic Power Press, 1993: 31-32.
- [18] BLABER J, ADAIR B, ANTONIOU A. Ncorr: Open-source 2D digital image correlation matlab software[J]. *Experimental Mechanics*, 2015, 55(6): 1105-1122.
- [19] XIAO D, ZHANG Z, REN H, et al. Calibration principle for acoustic emission sensor sensitivity [C]. *Advances in Acoustic Emission Technology: Proceedings of the World Conference on Acoustic Emission*, 2015: 33-45.
- [20] PAN B, XIE H, GUO Z, et al. Full-field strain measurement using a two-dimensional Savitzky-Golay digital differentiator in digital image correlation [J]. *Optical Engineering*, 2007, 46(3), DOI: 10.1117/1.2714926.
- [21] XIAO D, ZHANG Z, REN H, et al. Calibration principle for acoustic emission sensor sensitivity [C]. *Advances in Acoustic Emission Technology: Proceedings of the World Conference on Acoustic Emission-2013*, 2015: 33-45.

作者简介



况卓林, 2020 年于重庆交通大学获得学士学位, 2023 年于同济大学获得硕士学位, 主要研究方向为生命线工程监测。

E-mail: zksuce@126.com

Kuang Zhuolin received his B. Sc. degree from Chongqing Jiaotong University in 2020, and received his M. Sc. degree from Tongji University in 2023. His main research interest is lifeline structural health monitoring.



李素贞(通信作者), 2000 年于同济大学获得学士学位, 2003 年于同济大学获得硕士学位, 2007 年于日本茨城大学获得博士学位, 现为同济大学副教授, 主要研究方向为生命线工程监测。

E-mail: Lszh@tongji.edu.cn

Li Suzhen (Corresponding author) received her B. Sc. degree from Tongji University in 2000, received her M. Sc. degree from Tongji University in 2003, and received her Ph. D. degree from Ibaraki University in 2007. She is currently an associate professor at Tongji University. Her main research interests include lifeline structural health monitoring.