

引用本文: 黄新敬, 程彤遥, 马金玉, 等. 基于 FBG 传感器阵列反演结构振动位移的监测方法[J]. 光通信技术, 2024, 48(1): 7-12.

基于 FBG 传感器阵列反演结构振动位移的监测方法

黄新敬¹, 程彤遥¹, 马金玉^{1*}, 张志鹏¹, 黄漪², 李健¹

(1. 天津大学 精密测试技术及仪器全国重点实验室, 天津 300072; 2. 中国铁路设计集团有限公司, 天津 300308)

摘要: 针对现有振动位移监测方法易受环境影响且精度不高的问题, 提出了一种基于光纤布喇格光栅(FBG)传感器阵列反演结构振动位移的监测方法。该方法使用 FBG 传感器阵列获取结构振动过程中的多点应变和单点加速度数据, 先利用基于正交曲率的曲线重构算法和获得的应变数据重构结构各点的动态位移, 然后运用卡尔曼滤波算法将曲线重构算法导出的位移数据与同位置处的单点加速度数据相融合, 获得更为准确的位移数据。实验结果表明: 该方法可成功重构出监测结构任意时刻的振动形态, 悬臂铝板和简支管道的振动位移重构相对均方根误差分别小于 5.5% 和 7%。

关键词: 光纤布喇格光栅; 振动监测; 动态变形; 位移; 卡尔曼滤波

中图分类号: TN65; TB53; TN247 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2024)01-0007-06

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2024.01.002

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Monitoring method of structural vibration displacement based on the inversion of FBG sensor array

HUANG Xinjing¹, CHENG Tongyao¹, MA Jinyu^{1*}, ZHANG Zhipeng¹, HUANG Yi², LI Jian¹

(1. State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. China Railway Design Corporation, Tianjin 300308, China)

Abstract: Aiming at the problem that the existing vibration displacement monitoring methods are easy to be affected by the environment and the accuracy is not high, a monitoring method of structural vibration displacement based on the inversion of fiber Bragg grating(FBG) sensor array is proposed. This method uses FBG sensor array to obtain multi-point strain and single point acceleration data in the process of structural vibration. Firstly, the curve reconstruction algorithm based on orthogonal curvature and the obtained strain data are used to reconstruct the dynamic displacement of each point of the structure. Then, the displacement data derived from the curve reconstruction algorithm is fused with the single point acceleration data at the same position by Kalman filtering algorithm to obtain more accurate displacement data. The experimental results show that the method can reconstruct the vibration shape of the monitoring structure at any time successfully, and the relative root-mean-square error of the vibration displacement reconstruction of the cantilever aluminum plate and the simple supported pipeline is less than 5.5% and 7% respectively.

Key words: fiber Bragg gratings, vibration monitoring, dynamic deformation, displacement, Kalman filter

0 引言

管道、桥梁、高层建筑等大型结构在运营期间, 因环境、操作等因素产生的振动会加剧结构自身的疲劳

收稿日期: 2023-07-17。

基金项目: 国家自然科学基金项目(批准号: 62073233)资助。

作者简介: 黄新敬(1987—), 男, 博士, 天津大学精密仪器与光电子工程学院副教授, 博士生导师, 主要从事磁声振动传感及其应用技术研究工作。

* 通信作者: 马金玉(1986—), 女, 博士, 工程师, 主要研究方向为光纤声振感知、精密测控系统、电子测量与仪器。



与磨损, 甚至直接导致结构严重损坏。若能实时、清晰、直观地监测结构的振动位移和变形, 对掌握结构健康状态具有重要意义^[1-2]。常见的分布式位移或变形的重构方法有模态法、Ko 法和曲率法等^[3]。模态法基于模态叠加原理, 根据力学关系求出应变到位移的转换矩阵, 然后通过使用这个矩阵来计算全场位移^[4-6]。但是, 该方法的精度易受传感器的布置方式、仿真建模和模态分析过程准确性的影响。Ko 法基于经典梁理论, 通过测量结构表面有限点的应变值, 结合位移计算公式得到对应位置的变形量^[7-8]。然而, 该方法对简支梁的位移场重构效果存在较大误差。曲率法从曲线

黄新敬,程彤遥,马金玉,等: 基于 FBG 传感器阵列反演结构振动位移的监测方法

的几何关系出发, 根据应变信息计算出曲率信息, 利用多点曲率信息估计曲线的形状^[9-10]。虽然该方法计算简便、实时性好, 但是随着采样点的增加, 几何变换引入的累积误差会不断增大, 难以保证重构的精度。

结构形变(位移分布)的重构算法都需要利用结构表面若干位置处的应变传感器测量值。应变传感器包括电传感器和光纤传感器两大类。与传统的电传感器^[11-13]相比, 光纤布喇格光栅(FBG)具有抗电磁干扰、传输损耗低、便于组建不同形式的传感器网络等优势, 已经成为当前振动形态监测领域的重要器件^[14-17]。因此, 本文提出一种基于 FBG 传感器阵列反演结构振动位移的监测方法, 先后采用曲线重构算法和卡尔曼滤波算法将振动结构的应变、加速度信息转换成分布式位移进行监测。

1 算法介绍

1.1 基于正交曲率的曲线重构算法

FBG 正交传感网络布设方案如图 1 所示。正交传感网络由基材和 2 根 FBG 应变传感阵列构成, FBG 应变传感阵列等距正交粘贴于基材上。将传感网络布设于待测结构表面, 获取结构形变过程中 FBG 正交对(a、b 方向)测得的正交应变 $\varepsilon_{a,i}$ 、 $\varepsilon_{b,i}$ (i 为光栅点个数)。设结构表面距离中性轴的厚度为 h , 根据材料力学理论, 通过式(1)可计算出对应的正交曲率 $k_{a,i}$ 、 $k_{b,i}$ 。

$$k_{u,i} = \frac{2}{h} \varepsilon_{u,i} \quad (1)$$

其中, u 取值为 a 、 b 。

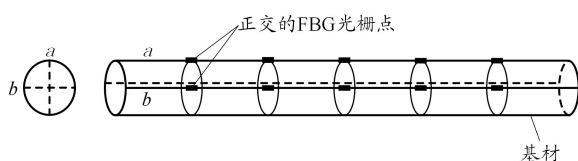


图 1 FBG 正交传感网络布设方案

空间曲线重构示意图如图 2 所示。将待测空间曲线分割成许多半径不相等的微弧段 Δs 。设 O_0 、 O_1 、 O_2 是空间曲线上的三点, 以 O_0 为原点建立固定坐标系 A , 并以该点处相互正交的曲率方向为 X 轴和 Y 轴, O_0O_1 弧段在 O_0 处的切线方向为 Z 轴建立运动坐标系 B_0 。 O_0O_1 弧段的正交曲率 k_1 、弯曲方向 α_1 及对应圆心角 θ_1 可以由式(2)~式(4)计算得到。根据几何原理, 可计算出 O_1 点的运动坐标系 B_1 。

$$k_i = \sqrt{k_{a,i}^2 + k_{b,i}^2} \quad (2)$$

$$\alpha_i = \arctan \frac{k_{b,i}}{k_{a,i}} \quad (3)$$

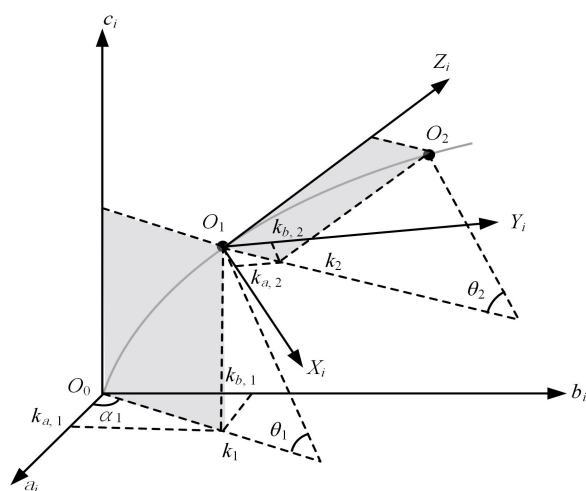


图 2 空间曲线重构示意图

$$\theta_i = k_i \Delta s \quad (4)$$

由于各微弧段 $O_{i-1}O_i$ 十分微小, 其扭转状态可以忽略, 因此可以将其视作是密切平面上的曲线。同样, 在曲线上的各点建立运动坐标系 $B_1, B_2, \dots, B_i$, 将 B_i 中点的坐标数据 $\{X_i, Y_i, Z_i\}$ 统一到固定坐标系 $A\{a_i, b_i, c_i\}$ 中, 并将不同切平面上的微弧段连接起来, 重构出光滑完整的空间曲线。由坐标系转换理论可知, 运动坐标系中任一点的坐标可以通过左乘一个变换矩阵 M_i 转换为绝对坐标, 如式(5)所示。

$$A = M_i B_i \quad (5)$$

记 $\{a_{i+1}, b_{i+1}, c_{i+1}\}$ 为第 $i+1$ 个点在 A 中的坐标, 其在 B_i 中的坐标记为 $\{X_{i+1}, Y_{i+1}, Z_{i+1}\}$, 可以得到

$$\begin{bmatrix} a_{i+1} \\ b_{i+1} \\ c_{i+1} \\ 1 \end{bmatrix} = M_i \begin{bmatrix} X_{i+1} \\ Y_{i+1} \\ Z_{i+1} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

运动坐标系 B_i 可以经过平移和旋转变换为 B_{i+1} , 如式(7)所示。

$$B_{i+1} = P_i R_i B_i \quad (7)$$

其中, P_i 和 R_i 分别为运动坐标系 B_i 到运动坐标系 B_{i+1} 的平移矩阵和旋转矩阵。

令 $C_i = P_i R_i$, 综合式(5)和式(7)可得变换矩阵之间满足式(8)的递推关系。

$$M_{i+1} = M_i C_{i+1}^{-1} \quad (8)$$

根据上述推导过程, 可求得各点在固定坐标系 A 中的坐标 $\{a_i, b_i, c_i\}$, 完成空间曲线的重构。

1.2 卡尔曼滤波算法

由于上述曲线重构过程中某点的位移是根据前

一点的位移递推得到的, 存在累积误差。当受到噪声干扰或结构跨度较长时, 位移计算精度会受到较大影响。为了提高系统的测量精度, 本文使用卡尔曼滤波算法融合曲线重构后的位移和某点的测量加速度, 并根据最小均方根原理估计最优位移。具体步骤如下:

1) 设 $t-1$ 时刻结构某点处的位移、速度和加速度分别为 $x(t-1)$ 、 $v(t-1)$ 和 $e(t-1)$, 位移和速度引入的系统噪声分别为 $w_1(t-1)$ 和 $w_2(t-1)$, 则 t 时刻该点的位移 $x(t)$ 和速度 $v(t)$ 可用式(9)、式(10)^[18-19]表示。

$$x(t) = x(t-1) + v(t-1)\Delta t + 0.5e(t-1)(\Delta t)^2 + w_1(t-1) \quad (9)$$

$$v(t) = v(t-1) + e(t-1)\Delta t + w_2(t-1) \quad (10)$$

2) 结合曲线重构的计算结果, 由式(6)得到固定方向上的测量位移记为 $d_x(t)$, 其可以用真实位移 $x(t)$ 和测量噪声 $u(t)$ 表示为

$$d_x(t) = x(t) + u(t) \quad (11)$$

3) 将位移 x 和速度 v 定义为状态变量, 并建立状态空间模型, 则状态向量 S 可表示为

$$S = [x \ v]^T \quad (12)$$

4) 设由 FBG 加速度计获取的离散测量加速度为 $e(t)$, 则根据式(9)~式(12)可得

$$\begin{cases} S(t) = ES(t-1) + Fe(t) + w(t-1) \\ d_x(t) = GS(t) + U(t) \end{cases} \quad (13)$$

其中, $w(t-1)$ 和 $U(t)$ 分别是系统噪声和传感器的测量噪声, 均可近似为零均值的高斯白噪声; E 、 F 为状态转移矩阵、 G 为观测矩阵, Q 和 R 是离散的噪声协方差矩阵, 各矩阵表达式如下:

$$E = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$F = \begin{bmatrix} \Delta t^2/2 \\ \Delta t \end{bmatrix}$$

$$G = [1 \ 0]$$

$$Q = \begin{bmatrix} \Delta t^3/3 & \Delta t^2/2 \\ \Delta t^2/2 & \Delta t \end{bmatrix} q$$

$$R = r[\Delta t^{-1}] \quad (15)$$

其中, q 和 r 分别为加速度噪声方差和位移噪声方差。由于随机过程的噪声未知, 因此需要进一步递推。 t 时刻的预测位移 $\hat{x}^-(t)$ 由 $t-1$ 时刻的最优估计位移 $\hat{x}^+(t-1)$ 和测量加速度 $e(t)$ 预测得出。根据卡尔曼滤波的估计原则, 最优估计值的协方差 $P(t)$ 应当最小, 使其更接近真实值, 协方差的递推公式如式(16)所示, 其中,

$\bar{P}(t)$ 为预测协方差矩阵, $P(t-1)$ 为 $t-1$ 时刻最优估计位移的协方差矩阵。

$$\begin{cases} \hat{x}^-(t) = E\hat{x}^+(t-1) + Fe(t-1) \\ \bar{P}(t) = E P(t-1) E^T + Q \end{cases} \quad (16)$$

5) 根据测量值对状态向量进行修正, 得到 t 时刻的最优估计位移的协方差矩阵为

$$\begin{cases} \hat{x}^+(t-1) = \hat{x}^-(t) + K(t)[d_x(t) - G\hat{x}^-(t)] \\ P(t) = [I - K(t)G] \bar{P}(t) \end{cases} \quad (17)$$

其中, I 为单位矩阵, $K(t)$ 为卡尔曼滤波的增益矩阵, 其表达式为

$$K(t) = \bar{P}(t) G^T [G \bar{P}(t) G^T + R]^{-1} \quad (18)$$

6) 根据式(17)求出最优估计位移。

2 实验验证

2.1 系统搭建

本文在悬臂铝板和两端简支管道上开展振动位移监测及可视化实验研究。系统的 FBG 传感器布设方案和实验系统示意图如图 3、图 4 所示。FBG 传感器阵列和 FBG 加速度计被正交粘贴于直径为 1 mm 的记忆合金丝上, 构成了正交传感网络。这个网络用于获取结构分布测点处的应变和加速度信息, 其灵敏度为 1.2 pm/ $\mu\epsilon$ 。另外, FBG 加速度计的灵敏度为 70 pm/g, 可用于测量振动加速度信息。为满足多通道、实时测量的要求, 系统选用 16 通道的光纤光栅解调仪, 其波长测量精度为 ± 2 pm。

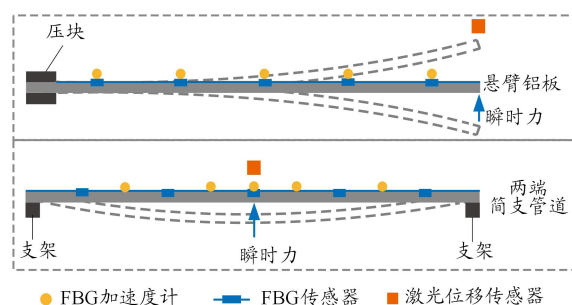


图3 FBG传感器布设示意图

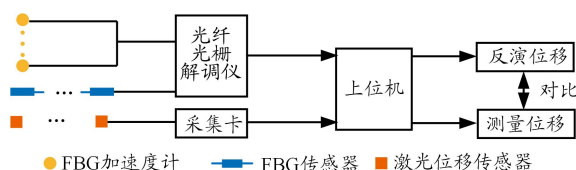


图4 实验系统示意图

黄新敬,程彤遥,马金玉,等: 基于 FBG 传感器阵列反演结构振动位移的监测方法

实验过程如下:首先,分别在悬臂铝板和两端简支管道结构上施加垂直方向上的瞬时力,使其产生动态变形;然后,FBG 传感器将测量数据经解调仪解调后输送至上位机,上位机通过 Labview 软件进行运算处理,实现结构振动形态的实时重构与可视化;最后,将实验结果与激光位移传感器的测量值进行对比,以验证系统测量的准确性。

2.2 悬臂铝板振动位移重构实验

本文在 1 m(长) $\times$ 0.1 m(宽) $\times$ 0.004 m(厚)的悬臂铝板上进行振动位移监测实验,悬臂铝板振动位移监测实验装置图如图 5 所示。悬臂铝板的一端通过压块固定,另一端可自由移动。FBG 加速度计和 FBG 传感器分布在距离悬臂铝板固定端 0.1、0.3、0.5、0.7、0.9 m 处,构成正交传感网络。激光位移传感器固定于铁架台上,2 个测量点分别位于悬臂铝板上表面 0.3、0.7 m 处。用适当的力拨动悬臂铝板的端,使其产生振动,上位机实时计算并显示测量点位移。当 $t=4$ s 时,悬臂铝板形态反演结果如图 6 所示。可以看出,板左端固定端位移值为 0,随着距离悬臂铝板左端固定端的距离的增加,位移量逐渐变大,且增速加快,说明该方法成功地反演出了悬臂铝板的弯曲变形特征。

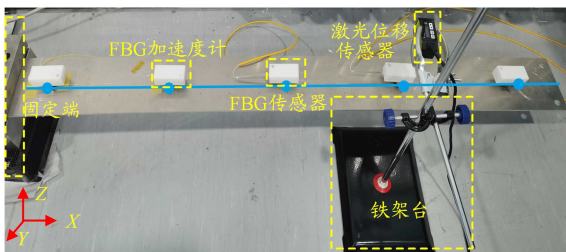


图 5 悬臂铝板振动位移监测实验装置图

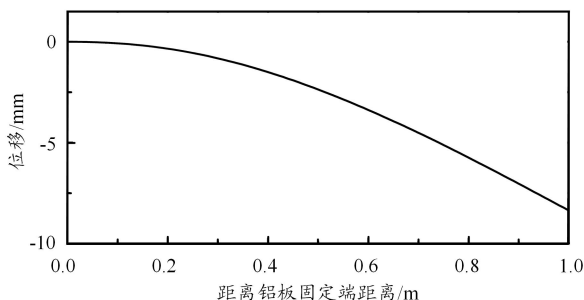
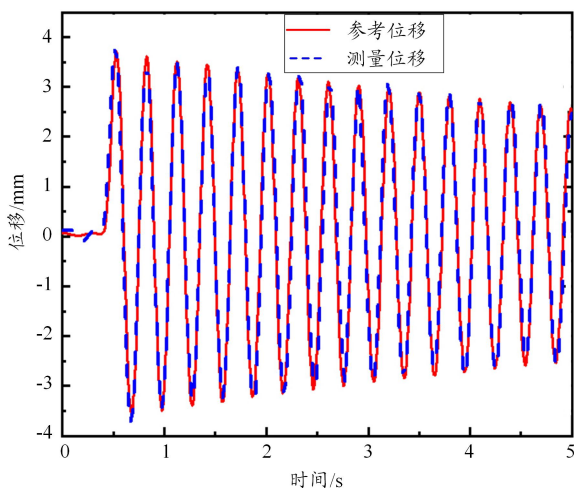
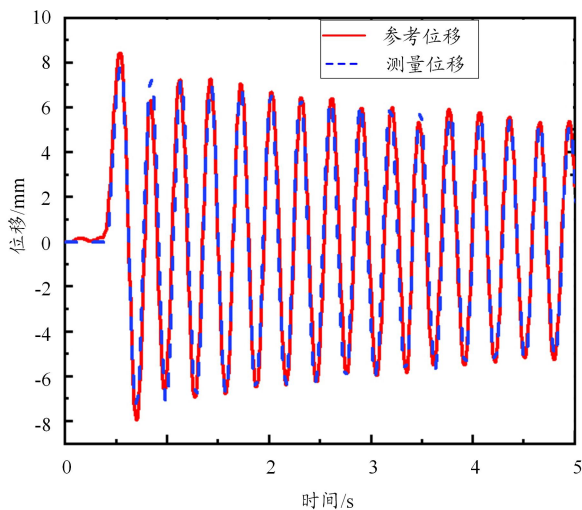


图 6 $t=4$ s 时悬臂铝板形态反演结果

本文分别记录测量点处经卡尔曼滤波估计前后的重构位移(测量位移),并与激光位移传感器所测的参考位移进行比较。图 7 为悬臂铝板上表面 2 个不同测量点在 0~5 s 内的振动位移重构曲线对比图。可以看出,经过卡尔曼滤波估计及短时间的调整,测量位



(a) 悬臂铝板上表面 0.3 m 处



(b) 悬臂铝板上表面 0.7 m 处

图 7 悬臂铝板上表面 0.3、0.7 m 处的振动位移对比曲线

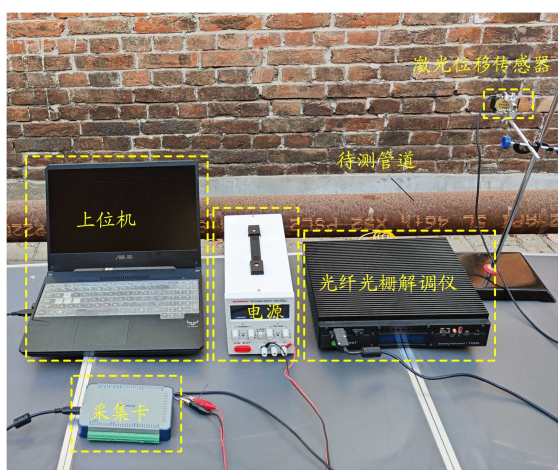
移与参考位移在时域上吻合良好。两测量点数据融合前后的相对均方根误差如表 1 所示。可以看出,经过卡尔曼滤波后的位移测量精度得到了明显的改善,悬臂铝板的振动位移重构相对均方根误差小于 5.5%。

表 1 悬臂铝板不同测量点的相对均方根误差

上表面距离/m	传统曲线重构算法 相对均方根误差/%	本文方法 相对均方根误差/%
0.3	9.28	5.36
0.7	10.61	5.44

2.3 简支管道振动位移重构实验

本文对两端简支管道进行振动位移重构实验,实验实物图和 FBG 传感器布设示意图如图 8 所示。将一根长 12 m、直径为 0.108 m、壁厚为 0.004 m 的钢管两端放置于支架上,中间悬空;采用 FBG 加速度计和



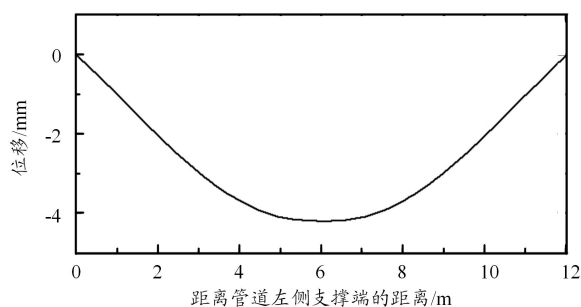
(a) 管道测振实验实物图



(b) FBG 传感器布设图

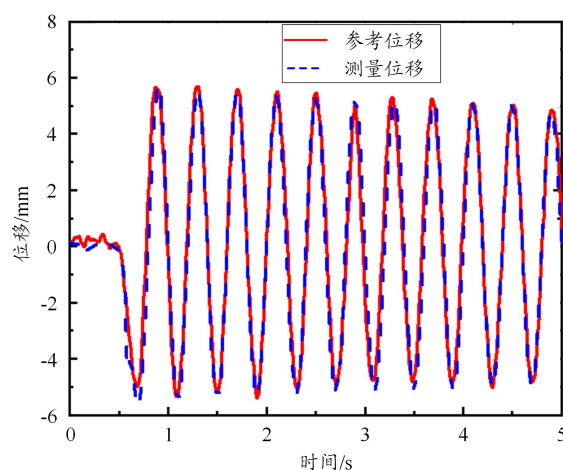
图 8 管道振动位移重构实验实物图和 FBG 传感器布设图

FBG 传感器(两者间隔 2.4 m)构成的正交传感网络分布在简支管道表面;测量点分别位于简支管道表面 2.4、6 m 处。在简支管道上方中心处施加力后释放,记录各点动态位移。当 $t=4$ s 时,简支管道的形态反演结果如图 9 所示。可以看出,简支管道左右两端固定端的位移值为 0,越靠近简支管道中央,位移量越大,且位移量左右对称分布,说明该方法同样成功地反演出

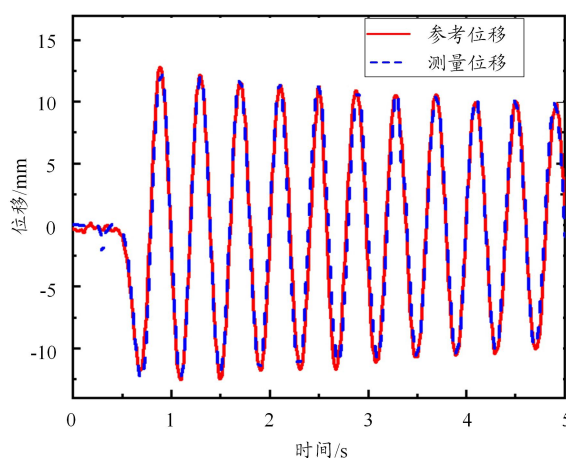
图 9 $t=4$ s 时管道形态反演结果

两端简支管道在振动过程中的形变特征。

图 10 为简支管道表面 2 个不同测量点在 0~5 s 内的振动位移重构曲线对比图。可以看出,测量位移与参考位移在时域上吻合良好。两测量点数据融合前后的相对均方根误差如表 2 所示。可以看出,经过卡尔曼滤波后的位移测量精度得到了明显的改善,简支管道的振动位移重构相对均方根误差小于 7%。



(a) 简支管道表面 2.4 m



(b) 简支管道表面 6 m

图 10 简支管道表面 2.4、6 m 处的振动位移对比曲线

表 2 简支管道不同测量点相对均方根误差

管道表面距离/m	传统曲线重构算法 相对均方根误差/%	本文方法 相对均方根误差/%
2.4	11.14	6.73
6	10.06	6.44

3 结束语

本文提出了一种使用曲线重构算法和卡尔曼滤波

黄新敬,程彤遥,马金玉,等: 基于 FBG 传感器阵列反演结构振动位移的监测方法

波算法监测结构振动位移形变的方法。该方法采用 FBG 传感器阵列构成正交传感网络,重构结构表面的连续分布式位移,并结合某点的 FBG 加速度计数据进行卡尔曼滤波融合,以提高局部测点的测量精度。实验结果表明:与传统的曲线重构算法相比,本文方法提高了位移测量精度,稳定性好,可实时重构出监测结构任意时刻的振动形态,悬臂铝板和简支管道的振动位移重构相对均方根误差分别小于 5.5%和 7%。

参考文献:

- [1] 胡明月,吴邵庆,董蓁良. 基于实测应变的典型热防护结构位移场实时重构[J]. 东南大学学报(自然科学版),2021,51(4):664-671.
- [2] 何凯. 柔性结构分布式光纤形态感知与三维重构技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2018.
- [3] 易金聪. 基于 FBG 传感阵列的智能结构形态感知与主动监测研究[D]. 上海:上海大学,2014.
- [4] LI L, ZHONG B S, LI W Q, et al. Structural shape reconstruction of fiber Bragg grating flexible plate based on strain modes using finite element method[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2018, 29(4): 463-478.
- [5] 戴苏亚,丁可. 基于模态法的形变重构技术应用研究[J]. 电子机械工程,2022,38(4):36-39,55.
- [6] ZHOU J Z, CAI Z H, KANG L, et al. Deformation sensing and electrical compensation of smart skin antenna structure with optimal fiber Bragg grating strain sensor placements[J]. Composite Structures, 2019, 211: 418-432.
- [7] 袁慎芳,闫美佳,张巾巾,等. 一种适用于梁式机翼的变形重构方法[J]. 南京航空航天大学学报,2014,46(6):825-830.
- [8] ESPOSIT M, GHERLONE M. Composite wing box deformed-shape reconstruction based on measured strains: optimization and comparison of existing approaches[J]. Aerospace Science and Technology, 2020, 99: 105758-1-10578-13.
- [9] 张新华. 基于光纤光栅的结构形状传感技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2018.
- [10] 南荣昌. 基于 FBG 的相控阵天线结构形变重构方法与实验 [D]. 西安:西安电子科技大学,2021.
- [11] 程英雷. 埋入式压电加速度传感器及其在混凝土结构震动中的监测研究[D]. 济南:济南大学,2020.
- [12] 高昕星,胡明祎,兰日清,等. 面向工程振动环境监测需求的 MEMS 加速度计及其应用[J]. 仪表技术与传感器,2022(1):1-10.
- [13] GLII B, YAO Y, TUNG S T E, et al. Strain sensing sheets for structural health monitoring based on large-area electronics and integrated circuits[J]. Proceedings of the IEEE, 2016, 104(8): 1513-1528.
- [14] 巫涛江,余晓毅,张春娟,等. 基于光纤光栅传感网络的电梯健康状态监测系统[J]. 压电与声光,2020,42(6):796-799,805.
- [15] 杨志,鞠婉秋,李永倩. FBG 波长高精度解调的研究进展[J]. 光通信技术,2021,45(3):4-9.
- [16] 吴明泽,洪连进. 基于强度解调的低成本光纤悬臂式加速度计[J]. 压电与声光,2022,44(3):377-380.
- [17] REGHUPRASAD A E, COLOMBERO C, GODIO A. Serially connected cantilever beam-based FBG accelerometers: design, optimization and testing[J]. Sensors, 2023, 23(6): 3188-1-3188-14.
- [18] ZHU H P, GAO K, XIA Y, et al. Multi-rate data fusion for dynamic displacement measurement of beam-like supertall structures using acceleration and strain sensors [J]. Structural Health Monitoring, 2020, 19(2): 520-536.
- [19] SARWAR M Z, PARK J W. Bridge displacement estimation using a co-located acceleration and strain[J]. Sensors, 2020, 20(4): 1109-1-1109-13.