

基于 Livelink 数据交互的光纤布拉格光栅-力学结构多物理场感知仿真方法

刘杉, 刘宏月*

上海大学机电工程与自动化学院, 上海 200444

摘要 提出一种基于 Livelink 数据交互的光纤布拉格光栅-力学结构感知仿真方法。通过 Livelink 模块将光纤布拉格光栅(FBG)传感仿真模型与 COMSOL 有限元多物理场耦合模型结合,建立了 COMSOL 与 MATLAB 的交互式模型,实现了应力和温度等多物理场下 FBG 对力学结构感知信号的仿真分析。采用基于自适应滑动窗口的效率优化模块,提高了 FBG 反射光谱的仿真速度。同时,基于典型工字梁结构与光纤布拉格光栅传感器,实现了光纤布拉格光栅-力学结构多物理场感知仿真分析模型的验证。实验结果表明:工字梁静载实验中,仿真与实测的 FBG 中心波长偏移量误差小于 4.6%,其均方根误差小于 0.0048;冲击载荷实验中,仿真结果与实测数据具有较好的吻合度,进一步验证了本文提出仿真方法的正确性,可为 FBG 传感网络的排布提供仿真依据。

关键词 光纤光学; 光纤布拉格光栅; Livelink 数据交互; 仿真分析; 传感

中图分类号 TN253

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1106001

Multiphysical Field Sensing Simulation Method for Fiber Bragg Grating-Based Mechanical Structures Based on Livelink Data Interaction

Liu Shan, Liu Hongyue*

School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200444, China

Abstract In this paper, a sensing simulation method for fiber Bragg grating (FBG)-based mechanical structures, based on Livelink data interaction, is proposed. The proposed simulation method combines the FBG sensing simulation model with the COMSOL finite element multiphysical field coupling model using the Livelink module. An interactive model based on the combination of COMSOL and MATLAB was established to realize the simulation analysis of the FBG sensing signal from mechanical structures under multiple physical fields such as stress and temperature. Moreover, an efficiency optimization module based on an adaptive sliding window was adopted to improve the speed of simulation of the FBG reflectivity spectrum. Finally, a typical H-beam structure and FBG sensors were used to verify the FBG-based mechanical structure sensing simulation model. Results show that the error of the FBG center wavelength offset between simulation and experiment is less than 4.6%, and the root-mean-square error is less than 0.0048. In an impact-loading experiment, simulation results were in good agreement with the measured data, which further verifies the correctness of the simulation method proposed in this paper. Furthermore, this simulation method can lay the foundation for the arrangement of FBG sensor networks.

Key words fiber optics; fiber Bragg gratings; Livelink data interaction; simulation analysis; sensing

OCIS codes 060.3735; 060.2370; 300.2570

1 引 言

作为光纤传感技术中的主要方法,光纤布拉格光栅(FBG)技术具有波长选择性好、耦合性好、嵌入性好等优点,被广泛应用于多个传感领域^[1-9],特别

是结构监测领域^[10-13]。为了将 FBG 更好地适用于力学结构的检测中,提高 FBG 传感器网络排布效率,需要在结构有限元仿真的基础上,对 FBG 与力学结构的耦合感知进行仿真分析。FBG-力学结构协同仿真分析是目前 FBG 传感仿真分析及有限元

收稿日期: 2020-01-17; 修回日期: 2020-02-23; 录用日期: 2020-03-13

基金项目: 国家自然科学基金(51308108, 51275239)、中国博士后科学基金项目(2013M540407)、中国博士后科学基金特别资助项目(2014T70457)、江苏省博士后科学基金项目(1301026B)

* E-mail: lhy320208@shu.edu.cn

分析的难点问题。

针对 FBG 和力学结构的仿真问题,现阶段已有很多学者进行了相关研究。2014 年,易金聪等^[14]根据有限元软件对翼型结构进行了模态分析,基于区域应变、模态振幅对 FBG 网络布局进行研究,过程冗余且计算量大。2016 年,郑艳等^[15]在基于 FBG 传感器的薄板应力波检测中,利用有限元软件对薄板与冲击杆进行了动力学仿真,确定了板表面应力波检测节点。2017 年,谢涛等^[16]利用有限元方法分析了等强度悬臂梁与 FBG 的应力特性,并根据仿真参数研制了倾角传感器。2018 年,宋雪刚等^[17]利用 FBG 传感器进行了梁系统的载荷标定,并对梁系统进行了载荷识别的力学仿真分析。以上研究虽进行了力学结构的有限元分析,但缺少了 FBG 信号的响应分析。Zhao 等^[18]于同年通过有限元软件对所提出的悬臂式膜片压力传感器的结构进行了力学仿真分析。Tan 等^[19]于 2019 年提出了一种提高光纤光栅应变灵敏度的方法,并针对粘贴有 FBG 传感器的悬臂梁结构进行力学仿真分析。文献[18-19]均是将仿真计算得到的应变通过理论公式转化为 FBG 中心波长偏移量后,再进行验证分析。这些方法都存在不足之处,多采用 FBG 传感分析与力学结构仿真单独研究,比较繁琐,无法直接仿真得到监测系统中 FBG 的响应信号数据。综上,虽然 FBG 和力学结构的有限元分析已有广泛研究,但目前通过 COMSOL 和 MATLAB 协同建立 FBG-力学结构模型,并进行其应力、温度等多物理场的耦合分析的报道较少。

为了解决 FBG 与力学结构的耦合分析问题,本文基于 Livelink 数据交互模块提出了 FBG-力学结构多物理场感知仿真方法,实现了应变和温度等多物理场条件下 FBG 对力学结构感知信号的仿真分析。同时,设计了基于自适应滑动窗口的效率优化模块,以提高 FBG 反射光谱的仿真求解速度。以典型工字梁结构为模型,进行了仿真方法的理论及实验验证,仿真与实测数据具有较好的吻合度。

2 基本理论模型

本文将 FBG 传感仿真与有限元多物理场分析相结合,提出了基于 Livelink 数据交互的 FBG-力学结构多物理场感知仿真方法,其涉及基本理论包括:FBG 传输矩阵理论、COMSOL 多物理场耦合分析理论以及 Livelink 数据交互理论,具体理论介绍如下。

2.1 FBG 传输矩阵理论

在 FBG 建模过程中,利用传输矩阵计算 FBG 的传输特性^[20]。传输矩阵法的原理是:将复杂的光栅结构分解成 M 段均匀的光栅,然后将每个光栅的结果结合起来,得到整个光栅的反射光谱^[21]。这种对光栅进行分段均匀建模的方法是建立在一个 2×2 矩阵模型的基础之上,该模型用于描述光栅的每个均匀截面 z ,其公式为

$$\mathbf{T}_z = \begin{bmatrix} \cosh(\Omega dz) - i\hat{\sigma} \sinh(\Omega dz) \frac{(\Omega dz)}{\Omega} & -\frac{i\kappa \hat{\sigma} \sinh(\Omega dz)}{\Omega} \\ \frac{i\hat{\sigma} \sinh(\Omega dz)}{\Omega} & \cosh(\Omega dz) + \frac{i\hat{\sigma} \sinh(\Omega dz)}{\Omega} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: $\hat{\sigma}$ 为总的直流耦合系数, $\hat{\sigma} = \sigma + \delta$,其中直流耦合系数 $\sigma = 2\pi \frac{\Delta n_{\text{eff}}}{\lambda_j}$,FBG 归一化频率失谐量 $\delta = 2\pi \left(\frac{n_{\text{eff}}}{\lambda_j} - \frac{1}{2\Lambda} \right)$; n_{eff} 和 Λ 分别为初始 FBG 纤芯有效折射率和栅格周期;交流耦合系数 $\kappa = \pi \frac{\Delta n_{\text{eff}}}{\lambda_j}$, λ_j 为 FBG 入射波长, Δn_{eff} 为光纤折射率的空间平均直流变化;光纤耦合系数 $\Omega = \sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}^2} L$, L 为 FBG 长度; dz 为第 z 均匀段的长度。将第 z 段光栅电场幅度分别表示为 A_z 和 B_z ,FBG 的初始边界条件为 $A_0 = A \left(\frac{L}{2} \right) = 1$, $B_0 = B \left(\frac{L}{2} \right) = 0$, $A_M = A \left(-\frac{L}{2} \right)$, $B_M = B \left(-\frac{L}{2} \right)$,则光栅整体可以表示为

$$\begin{bmatrix} A_M \\ B_M \end{bmatrix} = \mathbf{T} \begin{bmatrix} A_0 \\ B_0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中: $\mathbf{T} = \mathbf{T}_M \cdot \mathbf{T}_{M-1} \cdot \mathbf{T}_z \cdots \mathbf{T}_1$,则 FBG 的反射系数 $r = \frac{\mathbf{T}_{21}}{\mathbf{T}_{11}}$ 。

当 FBG 受到轴向力作用时,其有效折射率变化量为

$$n_1 = -P_e \cdot n_{\text{eff}} \cdot \epsilon, \quad (3)$$

栅格周期变化量为

$$\Lambda_1 = \epsilon \cdot \Lambda, \quad (4)$$

式中: P_e 为光纤有效弹光系数; ϵ 为应变。温度变化引起的有效折射率和栅格周期的变化分别为

$$n_2 = H_1 \cdot n_{\text{eff}} \cdot \Delta T, \quad (5)$$

$$\Lambda_2 = H_p \cdot \Delta T \cdot \Lambda, \quad (6)$$

式中: H_1 和 H_p 分别为光纤的热光系数和热膨胀系

数; ΔT 为温度变化量。则 FBG 的有效折射率、栅格周期和栅区长度分别变为

$$n'_{\text{eff}} = n_{\text{eff}} + n_1 + n_2, \quad (7)$$

$$\Lambda' = \Lambda + \Lambda_1 + \Lambda_2, \quad (8)$$

$$L' = (1 + \varepsilon + H_p \cdot \Delta T) \cdot L. \quad (9)$$

本文采用 MATLAB 软件对上述理论进行了数值仿真编程,构建了基于 MATLAB 的 FBG 应变/温度-波长仿真模型,并将其作为本文 FBG-力学结构多物理场感知仿真方法的 FBG 传感仿真部分。

2.2 COMSOL 多物理场耦合分析理论

COMSOL Multiphysics 是以有限元法(Finite Element Method)为架构的数值模拟工具,它可将软件内建立的各式物理模型以及偏微分自建模板相结合来进行多物理场耦合分析^[22]。本文提出的方法采用其结构力学模块,通过所包含的固体力学及固体传热进行多物理场耦合分析。固体力学主要应用的理论为线弹性假设理论以及耦合场分析理论,不管是静态分析还是瞬态分析,COMSOL 都拥有对应的内置假设方程^[23]。当有限元力学结构进行静态分析时,可使用标准的线弹性方程,即

$$-\nabla \cdot \sigma = f, \quad (10)$$

则应变-位移关系可表示为

$$\varepsilon' = \frac{1}{2}[(\nabla u)^T + (\nabla u)], \quad (11)$$

式中: σ 为应力; f 为体积力; u 为位移。当进行瞬态分析时,线弹性方程变为

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = f + \nabla \cdot \sigma, \quad (12)$$

式中: ρ 为密度。当与固体传热模块进行多物理场分析时,设置参数,使温度场与结构的热膨胀相耦合,从而达到结构多物理场仿真分析的目的。基于以上有限元分析理论,建立了基于 COMSOL 的多物理场耦合分析模型,作为本文 FBG-力学结构多物理场感知仿真方法的结构有限元分析部分。

2.3 Livelink 数据交互原理

COMSOL Multiphysics 具有 Livelink 数据接口,通过 Livelink 模块中包含的 API 语句与接口相关控制语句相结合,进而设置 COMSOL 有限元结构模型的实际使用参数,包括模型的属性、载荷参数及应用函数等,实现 COMSOL 与 Server 的联通,即 COMSOL 模型信息能够被 Livelink 中的 COMSOL API 语句所调用^[24]。

本文通过 MATLAB Java 接口编程实现与 Livelink 模块中 API 函数的交互式建模,有效地解

决模型数据的传递和调用问题。通过 MATLAB 控制语句设置 COMSOL 有限元结构模型的实际使用参数;同时, MATLAB 调用语句利用 API 函数可对有限元分析结果进行提取调用,为后续 MATLAB 的 FBG 传感仿真分析提供基础数据。本文基于 Livelink 数据交互理论,将基于 MATLAB 的 FBG 传输矩阵理论与 COMSOL 多物理场耦合分析理论相结合,最终提出了 FBG-力学结构多物理场感知仿真方法,实现了 MATLAB 与 COMSOL 多物理场耦合分析的交互式建模。

2.4 基于 Livelink 数据交互的 FBG-力学结构多物理场感知仿真方法

2.4.1 方法框架

本文结合 FBG 和力学结构模型,提出了基于 Livelink 数据交互的 FBG-力学结构多物理场感知仿真方法。方法框架如图 1 所示,仿真方法主要包括三个部分:基于 MATLAB 的 FBG 应变-波长仿真模型、COMSOL 多物理场耦合仿真分析模型以及两个模型的 Livelink 数据交互模块。

该仿真方法中,建立基于 MATLAB 的初始 FBG 应变-波长仿真模型,利用传输矩阵法实现 FBG 传感仿真分析,并进行相关光学参数的设定,包括光栅长度、有效折射率、啁啾系数、折射率调制深度、传输矩阵等基本参数;建立含有初始参数的 COMSOL 典型力学结构多物理场耦合仿真分析模型,为其设置物理场、边界参数、网格等初始条件;利用 Livelink 数据交互模块实现上述两个模型的交互式建模,采用 MATLAB 为 COMSOL 有限元分析提供初始力学和环境温度载荷参数,COMSOL 将计算得到的有限元应变结果返回至 MATLAB,然后采用基于自适应滑动窗口的效率优化模块提高反射光谱仿真求解速度,建立 FBG-力学结构的多物理场感知仿真分析模型,得到 FBG 在应力及温度等多物理场下反射光谱和中心波长的变化情况。

2.4.2 关键问题的解决

在本文所提出的仿真方法中,需解决的关键问题包括:基于 Livelink 的 MATLAB 与 COMSOL 的数据交互问题和仿真效率模块的优化设计,具体解决方法如下。

1) 基于 Livelink 的 MATLAB 与 COMSOL 数据交互问题

针对 FBG 与力学结构协同仿真的问题,在此仿真方法中,利用 MATLAB 分析中的 COMSOL Multiphysics with MATLAB 客户端和 COMSOL 分

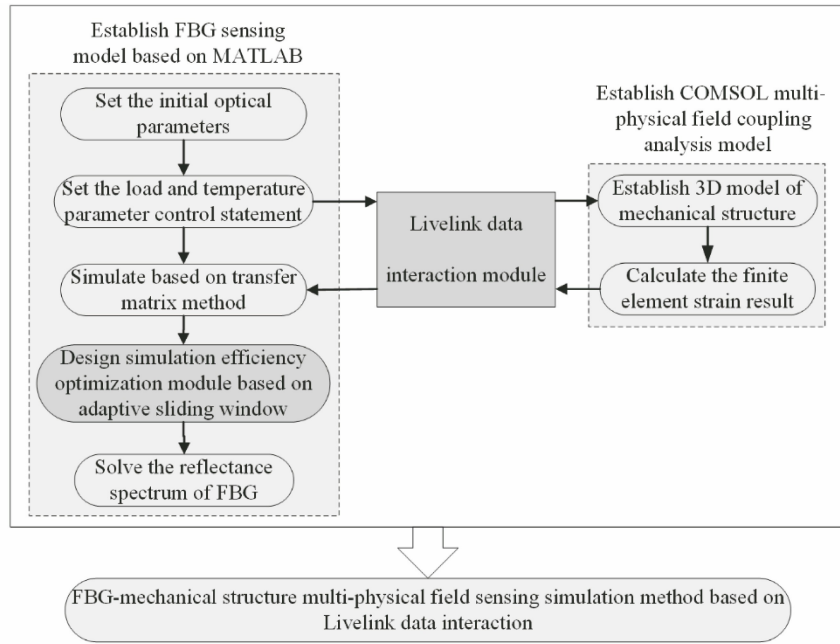


图 1 方法框架组成

Fig. 1 Method framework

析中的 Livelink 模块实现 MATLAB 和 COMSOL 的数据传递与调用,如图 2 所示。整个数据传递与调用过程均使用了 Livelink 模块中的 COMSOL API 函数,首先在 MATLAB 为 COMSOL 提供为有限元分析模型施加的力、温度等载荷参数时,可以通过添加 API 语句 `model.param.set('F/T')` 对施加载荷值进行设置及修改;然后在 MATLAB 获得 COMSOL 有限元分析结果时,设置求解语句 `model.study('std1').run` 后,通过 `mphinterp`、`mphmean`、`mphglobal` 等 API 函数对结果数据进行提取,以供 MATLAB 进行 FBG 传感仿真分析,从而达到 FBG-力学结构的应力和温度等多物理场耦合分析的目的。

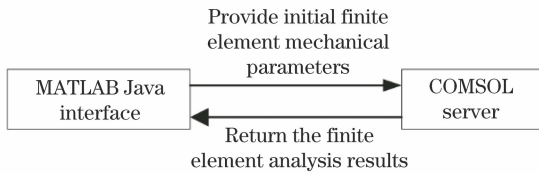


图 2 数据交互方法框图

Fig. 2 Data interaction method framework

2) 仿真方法效率优化模块设计

为了提高 FBG 反射光谱的仿真求解效率,提出了一种基于自适应滑动窗口的光谱求解分析方法,其流程图如图 3 所示。所提出的方法可根据应变参数的变化实时计算光谱窗口宽度区间,即有效的波长求解域,使其随着中心波长的偏移自适应滑动,

以达到快速求解 FBG 反射光谱的目的。为了保证光谱特征的完整性及显示效果,选择每个反射光谱主峰左、右的第 3 个次峰分别作为其窗口宽度的下限和上限,从而得到每个光谱的最适波长求解范围。

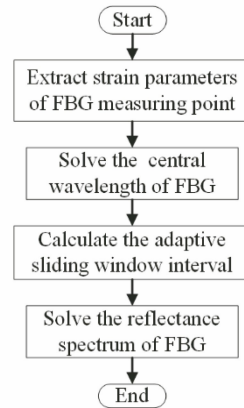


图 3 光谱求解方法流程图

Fig. 3 Flow diagram of spectral solution method

根据应变/温度-波长理论转化公式及 (5)~(8) 式可得

$$\Delta\lambda = 2n_{\text{eff}}\Delta\Lambda + 2\Delta n_{\text{eff}}, \quad (13)$$

即

$$\Delta\lambda = 2n_{\text{eff}}\Lambda(\epsilon + H_p \cdot \Delta T) + 2n_{\text{eff}}\Lambda(H_1 \cdot \Delta T - P_e\epsilon), \quad (14)$$

将(14)式化简,可得

$$\Delta\lambda = 2n_{\text{eff}}\Lambda[(H_p + H_1) \cdot \Delta T + (1 - P_e)\epsilon]. \quad (15)$$

当应变和温度值为零时,在仿真反射光谱图中,每个光谱上下限距离中心波长均为 0.34 nm,定义滑动窗口的宽度区间为

$$\Delta\lambda' \in [\lambda_{\min}, \lambda_{\max}], \quad (16)$$

式中: $\lambda_{\min} = \lambda_B + \Delta\lambda - 0.34$, $\lambda_{\max} = \lambda_B + \Delta\lambda + 0.34$, λ_B 为 FBG 初始中心波长, $\Delta\lambda$ 为理论上 FBG 的中心波长漂移量。依据以上理论公式及传输矩阵理论可计算出每个应变/温度参数对应的 FBG 反射光谱及中心波长值,同时保证了光谱求解的正确性和高效率。

综上所述,本文所提出的基于 Livelink 数据交互的 FBG-力学结构感知仿真方法主要包括基于传输矩阵理论的 FBG 仿真分析和 COMSOL 有限元力学分析,解决了 MATLAB 与 COMSOL 的数据交互问题,实现了数据的传递与调用,同时设计了基于自适应滑动窗口的仿真效率优化模块,提高了 FBG 反射光谱的仿真求解速度。

3 FBG-工字梁结构感知案例分析

3.1 基于 Livelink 数据交互的 FBG-力学结构多物理场感知仿真方法

为了验证本文所提出仿真方法的准确性,针对

FBG-工字梁结构进行了不同载荷工况下的仿真分析,仿真分析步骤及模型参数设置如下。

1) 基于传输矩阵理论的 FBG 传感仿真分析模型建立

首先在 MATLAB 中建立基于传输矩阵理论的 FBG 传感模型。初始 FBG 的栅区长度为 10 mm,直径为 125 μm ,弹性模量为 70 GPa,光栅周期 $\Lambda = 0.53 \mu\text{m}$,纤芯有效折射率 $n_{\text{eff}} = 1.45$,光纤有效弹光系数 $P_e = 0.22$,热膨胀系数 $H_p = 5.5 \times 10^{-7}$,热光系数为 $H_1 = 6.7 \times 10^{-7}$ 。

2) 基于 COMSOL 的 FBG-工字梁结构有限元模型建立

在 COMSOL 中建立含有初始参数的 FBG-工字梁结构有限元求解模型,其三维模型及光纤光栅测点 1 的位置如图 4 所示。工字梁结构模型及具体尺寸如图 5 所示,其左端完全固支,设置初始弹性模量为 273 GPa,泊松比为 0.33。在有限元网格划分过程中,由于工字梁结构与光纤结构尺寸相差较大,在进行有限元网格划分的过程中可通过建立细化的扫描网格来提高准确率、节省计算时间。

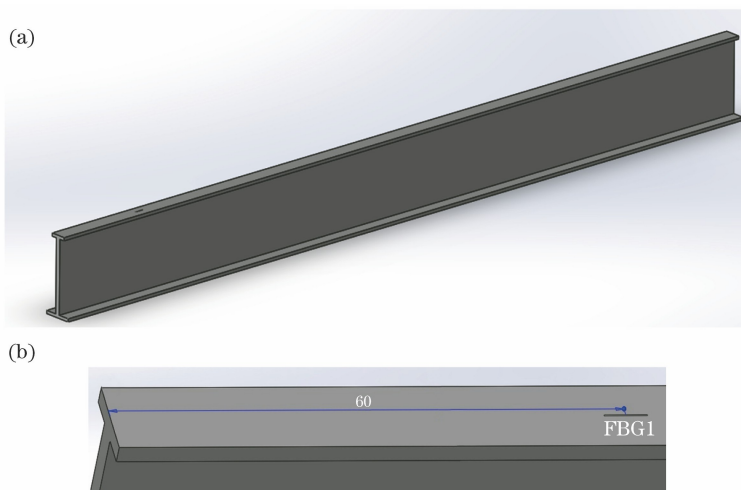


图 4 FBG-工字梁模型图。(a)整体模型图;(b) FBG 局部图

Fig. 4 FBG-H beam model. (a) Overall model diagram; (b) FBG local diagram

3) FBG-工字梁的结构感知模型建立

利用 Livelink 数据交互模块建立 FBG-工字梁的结构感知模型,通过 MATLAB 调用 COMSOL 建立的初始力学参数模型,分别作为 FBG-工字梁模型施加静载荷和冲击载荷两种不同的载荷工况,进行有限元力学计算。同时,根据 Livelink 中的 mphinterp 函数提取有限元应变结果,计算得出 FBG 中心波长偏移量后,通过仿真优化模块设置两

种载荷工况下反射光谱求解的自适应滑动窗口区间,求解得出不同工况下测点在多物理场耦合环境下正确的反射光谱图。

在静载荷施加的过程中,为 FBG-工字梁结构添加固体力学和传热物理场,设定初始温度为 20 $^{\circ}\text{C}$,在工字梁上表面的自由端取中点均匀施加载荷(从 0 到 300 N),故 FBG1 感知的物理场包括应变场和温度场。添加温度物理场之后,FBG-工字梁结构会

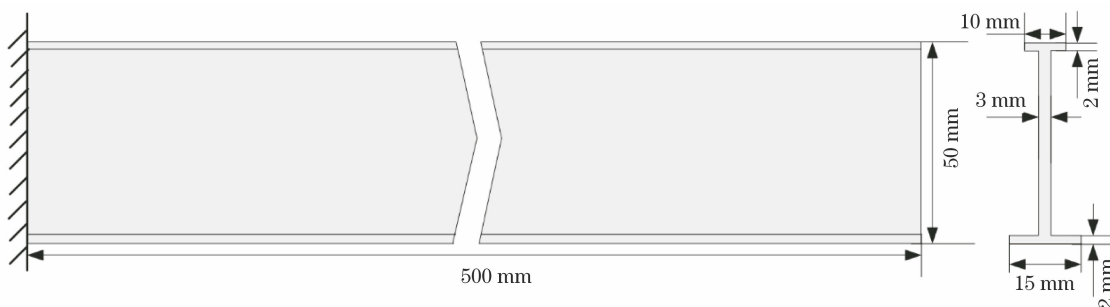


图 5 工字梁尺寸图

Fig. 5 H-beam dimensions

发生热膨胀现象,因此在温度增加过程中,相同的静载荷工况下 FBG1 的中心波长偏移量也随之增加,其中初始标准状态为载荷 0 N,温度 20 °C。若只添加温度场时,FBG1 的中心波长漂移量变化如图 6 所示。对于此仿真方法,FBG1 总的中心波长漂移量即为应变和温度场引起的中心波长偏移量之和,如图 7 所示。

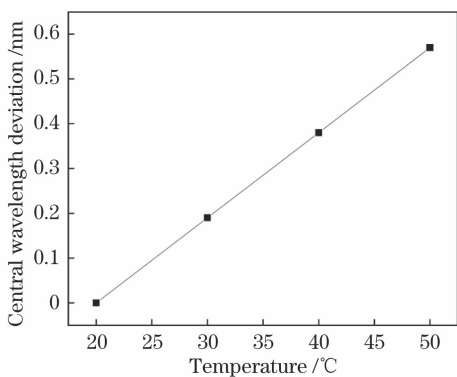


图 6 FBG1 中心波长漂移量随温度场变化情况

Fig. 6 Variation of FBG1 central wavelength deviation with temperature

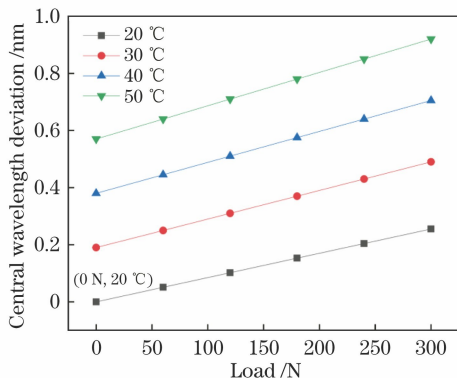


图 7 FBG1 总中心波长漂移量变化情况

Fig. 7 Variation of FBG1 total central wavelength deviation with load

3.2 FBG-工字梁结构静载荷感知实验分析

为验证仿真方法的正确性和适用性,本文进行

了静载荷工况下的 FBG-工字梁结构力学实验,为了保证实验数据的准确性,实验环境设置为恒温 20 °C,在工字梁上表面的自由端取中点均匀施加载荷 F_1 (从 0 到 300 N),每隔 60 N 采集一次数据,卸载亦然。实验平台示意图和对应的实际实验平台如图 8 和图 9 所示。

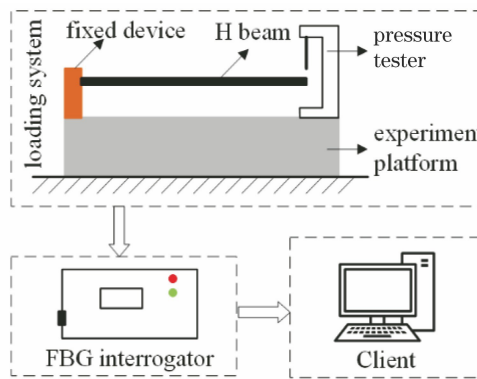


图 8 实验平台示意图

Fig. 8 Schematic diagram of experimental platform

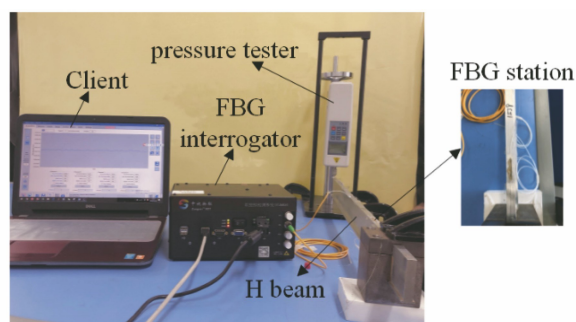


图 9 实际实验平台

Fig. 9 Experimental platform construction diagram

将光纤光栅解调仪采集得到的中心波长偏移量与仿真方法得到的中心波长偏移量进行计算分析,如图 10 所示,随着载荷的增加,FBG 的中心波长偏移量均匀增加,反之亦然,分别将仿真与实测中心波长偏移量进行线性拟合优度与灵敏度的计算,得到仿真方法的拟合优度值为 1,灵敏度为 0.85 pm/N,

实测数据拟合优度值为 0.999,灵敏度为 0.82 pm/N,这说明仿真与实测数据均有很好的线性度,同时仿真方法的灵敏度较高。对比仿真与实测的 FBG 中心波长偏移量数据,计算得到其误差值小于 4.6%,均方根误差小于 0.0048。综上,说明仿真计算得到的结果与实测数据具有较好的吻合性。

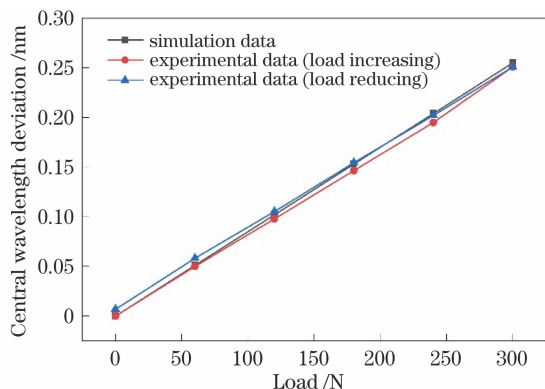


图 10 实测和仿真方法得到的中心波长偏移量对比图
Fig. 10 Comparison of the central wavelength offsets obtained by the measured and simulated methods

仿真方法计算 FBG 的反射光谱如图 11 所示,可以看出随着载荷的增加,FBG 的反射光谱均匀地向右移动,每隔 60 N 其中心波长向右偏移 0.051 nm,且每次波长的求解域随着中心波长向右滑动,说明

仿真方法能够很好地体现载荷变化情况下对应的光谱变化。

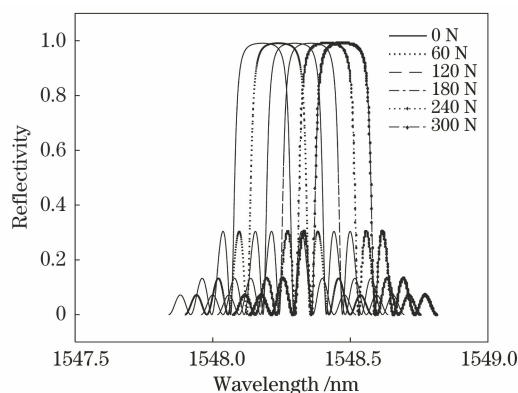


图 11 载荷均匀增加过程中反射光谱的变化情况
Fig. 11 Variation of reflectance spectra with uniform increase of load

3.3 FBG-工字梁结构冲击载荷感知实验分析

为了验证仿真方法在冲击载荷领域的适用性,在工字梁上表面中轴线上距离自由端 60 mm 处施加冲击载荷 F_2 ;由于本实验使用的冲击设备没有实时采集动态信号的功能,故在冲击点正下方腹板上粘贴 FBG 传感器以识别冲击载荷。即两种载荷工况下的光纤光栅测点位于工字梁 FBG1 位置,而 FBG2 只作为冲击载荷的采集计算测点,具体位置如图 12 所示。

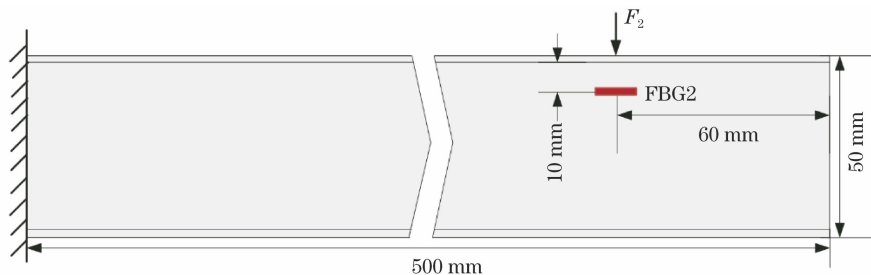


图 12 冲击载荷施加位置
Fig. 12 Impact loading position

为了将仿真结果与其进行对比,同时在仿真方法中的载荷冲击点位置施加相同载荷 F_2 。图 13 为采集得到的 FBG1 测点处的中心波长偏移量与仿真方法得到的结果对比图,从图中可以看出,实测和仿真方法计算的 FBG1 中心波长偏移量趋势基本吻合,FBG1 测点的信号响应皆随时间缓慢减弱,响应时间均约为 100 ms。因此,此仿真方法在冲击载荷响应分析中具有很好的适用性。

4 结 论

提出一种基于 Livelink 数据交互的 FBG-力学结构多物理场感知仿真方法,建立了基于 MATLAB

的 FBG 应变/温度-波长仿真模型和 COMSOL 多物理场耦合分析模型,通过 MATLAB 和 COMSOL 数据交互模块实现了上述两个模型的交互式联合分析。同时,为了提高 FBG 反射光谱求解速度,仿真方法中设计了基于自适应滑动窗口的仿真效率优化模块。本文所提出的方法克服了 MATLAB 仿真方法中难以三维建模进行多物理场耦合仿真分析以及 COMSOL 无法精确进行 FBG 反射光谱求解的问题,实现了 FBG-力学结构的应变、温度耦合分析,也进一步提高了仿真速度。最后,通过典型工字梁结构实验验证了此方法的可行性,为多物理场耦合的 FBG-力学结构仿真提供了新的方向,同时为结构监

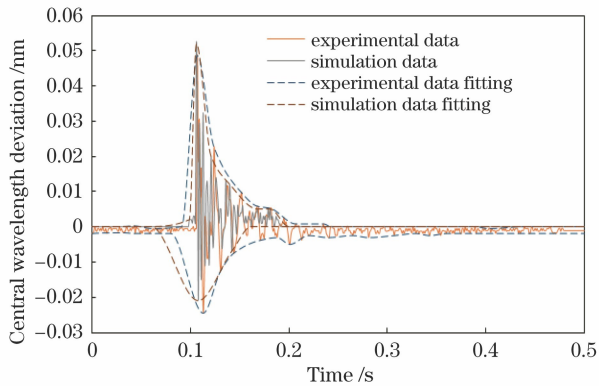


图 13 施加载荷 F_2 后实测和仿真 FBG1 中心波长偏移量对比图

Fig. 13 Comparison of FBG center wavelength deviation obtained by measured and simulated methods after load F_2

测系统中 FBG 传感器网络排布研究提供了理论和实验参考。

参 考 文 献

- [1] Polygerinos P, Seneviratne L D, Razavi R, et al. Triaxial catheter-tip force sensor for MRI-guided cardiac procedures[J]. *ASME Transactions on Mechatronics*, 2013, 18(1): 386-396.
- [2] Bettini P, Guerreschi E, Sala G. Development and experimental validation of a numerical tool for structural health and usage monitoring systems based on chirped grating sensors[J]. *Sensors*, 2015, 15(1): 1321-1341.
- [3] Zhang F Y, Jiang M S, Sui Q M, et al. Acoustic emission localization technique based on fiber Bragg grating sensing network and signal feature reconstruction [J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(7): 074210.
张法业, 姜明顺, 隋青美, 等. 基于光纤光栅的冲击激励声发射响应机理与定位方法研究 [J]. *物理学报*, 2017, 66(7): 074210.
- [4] Zhang Z Y, Liu C T. Design of vibration sensor based on fiber Bragg grating[J]. *Photonic Sensors*, 2017, 7(4): 345-349.
- [5] Tian C B, Wang Z F, Sui Q M, et al. Design and optimization of FBG implantable flexible morphological sensor to realize the intellisense for displacement[J]. *Sensors*, 2018, 18(7): 2342.
- [6] Shrestha P, Kim J H, Park Y, et al. Impact localization on composite structure using FBG sensors and novel impact localization technique based on error outliers[J]. *Composite Structures*, 2016, 142: 263-271.
- [7] Meng Y, Su X M, Pang Y. Characteristics of Fabry-Perot cavity based on dynamic grating in Er-doped fiber and fiber Bragg grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(10): 1006003.
孟瑜, 苏雪梅, 庞妍. 掺铒光纤动态光栅与光纤 Bragg 光栅 Fabry-Perot 腔特性研究 [J]. *光学学报*, 2018, 38(10): 1006003.
- [8] Li K, Xin J T, Meng F Y, et al. Sensing demodulation system using US-FBG spectral linear region[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(1): 31-37.
李凯, 辛璟焘, 孟凡勇, 等. 利用超短 FBG 光谱线性区的传感解调系统 [J]. *光学精密工程*, 2018, 26(1): 31-37.
- [9] Tu X H, Zhao Y C. Temperature and stress sensing characteristics of symmetrically fused tapered fiber grating [J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68(24): 244204.
涂兴华, 赵宜超. 对称熔融拉锥型光纤光栅温度和应力传感特性 [J]. *物理学报*, 2019, 68(24): 244204.
- [10] Ibrar Jahan M A, Honnunar R V, Versha R. Analysis of FBG sensor for accurate pressure sensing with improved sensitivity[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2018, 5(2): 5452-5458.
- [11] Shrestha P, Park Y, Kwon H, et al. Error outlier with weighted Median Absolute Deviation threshold algorithm and FBG sensor based impact localization on composite wingstructure [J]. *Composite Structures*, 2017, 180: 412-419.
- [12] Kaur G, Kaler R S. Sensitivity enhancement of FBG sensor for portlandite monitoring [J]. *Optical Fiber Technology*, 2018, 46: 83-87.
- [13] Yan S, Zhang J J, Sun B Z, et al. *In situ* measurement of strains at different locations in 3-D braided composites with FBG sensors[J]. *Composite Structures*, 2019, 230: 111527.
- [14] Yi J C. Shape perception and active monitoring for smart structure using FBG sensor array[D]. Shanghai: Shanghai University, 2014: 27-43.
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: 27-43.
- [15] Zheng Y. Stress wave detection technology of sheet based on fiber Bragg grating [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2016: 27-42.
郑艳. 基于光纤光栅传感的薄板应力波检测技术 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016: 27-42.
- [16] Xie T, Wang X, Li C, et al. Fiber Bragg grating differential tilt sensor based on mercury column piston structure [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(3): 0306002.
谢涛, 王行, 李川, 等. 水银柱活塞差动式光纤布拉格光栅倾角传感器 [J]. *光学学报*, 2017, 37(3): 0306002.

- [17] Song X G, Liu P, Cheng ZM, et al. An algorithm of dynamic load identification based on FBG sensor and kalman filter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 0328012.
宋雪刚, 刘鹏, 程竹明, 等. 基于光纤光栅传感器和卡尔曼滤波器的载荷识别算法[J]. *光学学报*, 2018, 38(3): 0328012.
- [18] Zhao Y, Zheng H K, Lv R Q, et al. A practical FBG pressure sensor based on diaphragm-cantilever [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2018, 279: 101-106.
- [19] Li R Y, Tan Y G, Chen Y Y, et al. Investigation of sensitivity enhancing and temperature compensation for fiber Bragg grating (FBG)-based strain sensor [J]. *Optical Fiber Technology*, 2019, 48: 199-206.
- [20] Lü J Y. Theoretical and experimental study of fiber grating temperature/strain sensing [D]. Nanjing: Southeast University, 2018: 11-15.
吕俊宇. 光纤光栅温度/应变复合传感理论与实验研究[D]. 南京: 东南大学, 2018: 11-15.
- [21] Meng F Y, Lu J Z, Yan G, et al. Research on distributed double-parameter sensing characteristics of long chirped fiber Bragg grating[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(9): 2210-2216.
孟凡勇, 卢建中, 闫光, 等. 长啁啾光纤光栅分布式双参量传感特性研究[J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(9): 2210-2216.
- [22] Sivakumar N, Kanagasabapathy H, Srikanth H P. Analysis of perforated piezoelectric sandwich smart structure cantilever beam using COMSOL[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2018, 5(5): 12025-12034.
- [23] Li Z P, Li X Y. Research on the measurement of vehicle steering torque based on SAW principle [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2016, 29(5): 764-768.
李志鹏, 李晓英. 基于 SAW 原理汽车转向扭矩测量的研究[J]. *传感技术学报*, 2016, 29(5): 764-768.
- [24] Zhao X L, Qi Q J, Guo C C. COMSOL and MATLAB joint simulation method [J]. *China New Technologies and New Products*, 2014(24): 17-18, 19.
赵晓磊, 齐秋菊, 郭春超. COMSOL 与 MATLAB 联合仿真的实现方法 [J]. *中国新技术新产品*, 2014(24): 17-18, 19.