

基于非负贝叶斯正则化的冲击载荷光纤识别法*

蔡芳盛, 严刚, 曾捷, 黄继伟, 汤剑飞

(南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室 南京, 210016)

摘要 针对目前冲击载荷识别中存在的传感器质量不可忽略和识别结果带有负分量问题,提出基于非负贝叶斯正则化的复合材料结构冲击载荷光纤识别方法。首先,将光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating,简称FBG)传感器集成于复合材料筒舱结构上,获取其动态响应信号;其次,建立冲击载荷识别模型,将冲击载荷识别问题表示为时域离散的反卷积问题;最后,考虑到冲击载荷的非负特性,通过贝叶斯层次化建模获得其后验概率密度函数,最大化概率密度函数得到冲击载荷的最大后验概率解。结果表明,FBG传感器可以较好地实现多个传感点冲击响应的同步测量,非负贝叶斯正则化方法可以有效地克服传统 Tikhonov 正则化的不足,自适应确定算法参数,消除没有物理意义的负分量,使得重建的冲击载荷时间历程与实际历程相吻合。

关键词 载荷识别;复合材料结构;光纤布拉格光栅;非负贝叶斯正则化

中图分类号 O327

引言

在航空航天领域,复合材料已被广泛应用到各类飞行器结构上,但时常发生的外界异物撞击对复合材料结构造成的冲击力可能会产生表面观察不到的内部损伤,严重威胁飞行安全。研究表明,复合材料层板结构由于冲击破坏可能造成高达 60%~80% 的压缩强度降低^[1]。因此,建立一个集成于复合材料结构体上的健康监测系统,及时监测到外界冲击并且重建冲击载荷的时间历程,对保障飞行安全及提供检修依据具有重要意义^[2]。

国内外学者对冲击载荷时间历程重建进行了许多研究,根据类型可大致分为 2 类:①采用基于大样本训练的机器学习方法,但这种方法缺点在于需要花费大量时间进行训练和学习,不适用于工程实践^[3-4];②采用基于模型的方法,该方法通过建立冲击载荷和结构响应之间的响应模型来重建冲击力,模型的建立耗时短,具有一定的工程实用价值。Seydel 等^[5]将最优化平滑滤波算法应用于复合材料加筋结构的冲击模型重建出冲击载荷时间历程。严刚^[6]结合文献^[5]的模型,采用微种群遗传算法近似求解了冲击载荷时间历程。Hu 等^[7]通过有限元和

模态叠加法建立了未知输入与结构系统响应之间的内在联系,并采用二次规划最优算法求解待定系数,进而重建了冲击载荷时间历程。

基于模型的方法,通常把冲击载荷识别问题表示为时域离散的反卷积问题,但该方法由于其不稳定性需要引入正则化以获得稳定有界的解^[8]。

目前最常用的一种正则化方法是 Tikhonov 正则化,在 Tikhonov 正则化中,正则化参数的选取比较困难,而正则化解的准确性直接取决于正则化参数选取的合适与否。

近年来发展了一类基于贝叶斯理论的正则化方法,用于冲击载荷时间历程重建,该类方法能够从数据中自适应地确定正则化参数最优解^[9-10]。Zhang 等^[11]基于贝叶斯理论,建立了由频响函数组成的冲击载荷时间历程重建模型,并利用马尔可夫链蒙特卡罗方法对模型的不确定性进行正则化参数进行确定。Yan^[12]提出了一种基于贝叶斯理论的方法重建冲击载荷,并运用数值模拟方法验证了该方法的有效性。Sun 等^[13]提出了一种基于时域的贝叶斯推理方法应用于桥模型上节点激振力的识别。以上基于贝叶斯理论方法重建的冲击载荷仍然具有明显的振荡和负值项,与冲击载荷具有的非负特征

* 国家自然科学基金资助项目(11602104);航空科学基金资助项目(20185644006);上海航天科技创新基金资助项目(SAST2018-015);江苏省重点研发计划资助项目(BE2018047);直升机旋翼动力学国家级重点实验室基金资助项目(61422202207);江苏高校优势学科建设工程基金资助项目

收稿日期:2020-12-22;修回日期:2021-02-29

不符。因此,需要对此类正则化方法进行改进,消除没有物理意义的负值项。

在冲击载荷识别的传感器使用方面,通常都采用加速度传感器或压电陶瓷传感器测量结构动态响应^[14]。在某些体积相对较小或质量较轻的结构上,这类传感器的布置可能会因其自身以及众多传输线缆不可忽略的质量影响结构的动力学特性^[15]。FBG传感器因其具有质量轻、体积小、耐腐蚀及抗电磁干扰等优良特性,且集信号传感与传输于一体,便于组成分布式传感监测网络,已被用于航空航天复合材料结构上的冲击监测^[16-17]。

针对目前冲击载荷时间历程识别中存在的不足,笔者提出基于非负贝叶斯正则化的复合材料结构冲击载荷光纤识别方法^[18]。首先,介绍了FBG传感器应变传感的基本原理,建立了冲击载荷识别模型,利用FBG传感器获取模型所需的结构动态应变响应,计算得到冲击点与传感点之间的脉冲响应函数;其次,研究了非负贝叶斯正则化方法基本理论,对脉冲响应函数进行非负贝叶斯正则化处理,用于重建冲击载荷时间历程;最后,搭建了实验系统,在复合材料筒舱结构上进行实验验证,并对实验结果进行分析。

1 FBG 应变传感原理

FBG是在光纤内部制备的一种特殊传感器,通过紫外线曝光法将衍射光栅写入到单模光纤的纤芯内部,FBG结构示意图^[19]如图1所示。

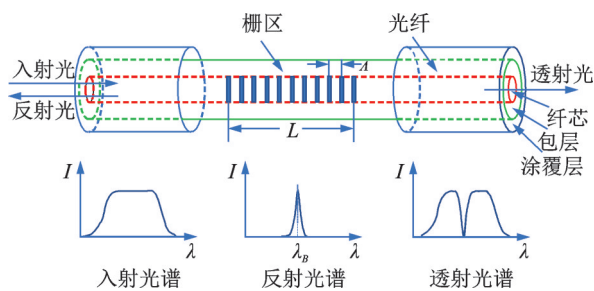


图1 FBG结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of FBG structure

在光栅区域内,光纤折射率经过周期性调制,使得光栅区域具有滤光片的作用。当具有宽带光谱的入射光进入光栅区域后,光栅区域会反射一个带有特定中心波长的反射光,该特定中心波长被称为布拉格波长,记为 λ_B ,其计算公式^[19]为

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (1)$$

其中: n_{eff} 为在整个光栅长度 L 上的平均有效折射率; Λ 为光栅周期。

当有效折射率 n_{eff} 和光栅周期 Λ 之一或两者同时发生变化时,反射光的光谱中心波长 λ_B 就会发生一定程度上的偏移。当测量时间很短时可以忽略环境温度微小变化对光栅的影响。因此,FBG传感器在轴向力作用下中心波长偏移量可表示为

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - P_{\text{eff}})\Delta\epsilon \quad (2)$$

其中: $\Delta\epsilon$ 为光纤轴向应变变化量; P_{eff} 为FBG的有效光弹性常数。

P_{eff} 的计算公式为

$$P_{\text{eff}} = \frac{n_{\text{eff}}^2}{2} [\rho_{12} - \nu(\rho_{11} + \rho_{12})] \quad (3)$$

其中: ρ_{11} 和 ρ_{12} 为FBG传感器的材料弹光常数; ν 为泊松比。

假设光纤的初始应变为0,则可得FBG传感器测量点应变与中心波长偏移量之间的关系为

$$\epsilon_B = \frac{1}{1 - P_{\text{eff}}} \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} \quad (4)$$

其中: ϵ_B 为测量点应变; $\Delta\lambda_B$ 为FBG传感器中心波长偏移量。

基于波分复用技术,FBG传感器可以在光信道中复用多路通道。在一定条件下,一根单模光纤上可以分布多达几十个FBG传感器,并且可以识别每个传感器的反射布拉格波长^[20]。波分复用技术使得FBG传感器可以在复合材料结构体上组成分布式传感网络,实现结构上多点冲击响应的同步测量,为冲击载荷识别模型的建立提供数据基础。

2 冲击载荷识别模型

冲击载荷识别问题属于动力学反问题中的第2类反问题,即已知系统输出响应和系统结构特性求解输入激励。在研究复合材料结构冲击载荷时间历程重建问题时,可以将该结构当作一个线性时不变系统。假设存在对复合材料结构确定位置的冲击激励 $f(t)$,那么系统中序列为 s 的传感点处,冲击响应 $y_s(t)$ 与冲击激励之间的关系可以表示为

$$y_s(t) = \int_0^t h_s(\zeta) f(t - \zeta) d\tau \quad (5)$$

其中: $h_s(\zeta)$ 为传感点与激励点之间的脉冲响应函数。

假设系统初始条件为0,可以将式(5)在时域内离散成1组代数方程表达式,由矩阵形式表达为

$$Y_s = H_s F \quad (6)$$

$$F = [f(1) \ f(2) \ \dots \ f(N)]^T \quad (7)$$

$$Y_s = [y_s(1) \quad y_s(2) \quad \dots \quad y_s(N)]^T \quad (8)$$

$$H_s = \begin{bmatrix} h_s(1) & 0 & \dots & 0 \\ h_s(2) & h_s(1) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_s(N) & h_s(N-1) & \dots & h_s(1) \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中: F, Y_s, H_s 分别为进行时域离散化后的冲击载荷向量、序列为 s 传感点系统响应向量和脉冲响应函数矩阵; $f(n), y_s(n), h_s(n)$ 分别为 $f(t), y_s(t)$ 及 $h_s(t)$ 在 $t = n\Delta t$ 时刻的值, Δt 为采样间隔, $n = 1, 2, \dots, M, \dots, N; N$ 为总采样点数。

当采用 M 个传感点重建冲击载荷时间历程时, 将每个传感点的系统响应向量和脉冲响应函数矩阵进行组装, 冲击力和传感器网络测得系统响应向量之间的关系可写为

$$Y = HF \quad (10)$$

其中

$$Y = [Y_1 \quad Y_2 \quad \dots \quad Y_M]^T \quad (11)$$

$$H = [H_1 \quad H_2 \quad \dots \quad H_M]^T \quad (12)$$

由上可知, 冲击载荷时间历程重建问题可以定义为式(6)和式(10)表示的基本模型。如果对式(6)直接求逆, 可得

$$F = H_s^{-1} Y_s \quad (13)$$

由于模型误差以及 FBG 传感器测量信号具有宽带噪声, 模型中的脉冲响应函数矩阵 H_s 通常为不适定的, 其奇异值中存在大量趋近于 0 的值。对式(6)直接求逆重建冲击载荷将有可能不收敛, 需要引入正则化以获得稳定有界的近似解。

3 非负贝叶斯正则化理论

由于模型中的脉冲响应函数矩阵 H_s 不适定, 且传统基于贝叶斯理论方法重建的冲击载荷中仍然具有明显的振荡和负值项^[18]。因此, 引入基于标准贝叶斯正则化改进的非负贝叶斯正则化来重建冲击载荷时间历程。结合贝叶斯统计思想和层次化贝叶斯模型, 将未知冲击载荷向量封装入后验概率密度函数 $p(F, \tau, \alpha, \beta | Y_s)$ 中^[21-22], 得到

$$p(F, \tau, \alpha, \beta | Y_s) \propto p(Y_s | F, \tau) p(F | \alpha, \beta) \times p(\tau) p(\alpha) p(\beta) \quad (14)$$

其中: $p(Y_s | F, \tau)$ 为似然函数; $p(F | \alpha, \beta), p(\tau), p(\alpha), p(\beta)$ 分别为冲击载荷 F, τ, α 及 β 的先验概率

密度函数; α 和 β 为描述 f_n^2 概率密度的参数, f_n 为 $f(n)$ 的简写。

假设模型输出与测量之间的预测误差服从正态分布, 那么似然函数可表示为

$$p(Y_s | F, \tau) \propto \tau^{N/2} \exp\left(-\frac{\tau}{2} \|H_s F - Y_s\|^2\right) \quad (15)$$

其中: $\|\cdot\|$ 表示欧几里得范数; τ 为精度, 是方差的倒数^[8]。

对于未知的冲击载荷向量 F , 为确保其每个分量 f_n 非负, 假设 f_n^2 非负且独立均匀分布, 以 Gamma 分布形式^[18]表示为

$$p(f_n^2 | \alpha, \beta) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} (f_n^2)^{\alpha-1} \exp(-\beta f_n^2) \quad (16)$$

其中: $\Gamma(\cdot)$ 为 Gamma 函数。

当 $f_n \geq 0$ 时, f_n 为关于 f_n^2 的严格单调函数, f_n 必有反函数, 由式(16)可得 f_n 的概率密度函数为

$$p(f_n | \alpha, \beta) = \begin{cases} \frac{2\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} (f_n^2)^{\alpha-1} e^{-\beta f_n^2} & (f_n \geq 0) \\ 0 & (f_n < 0) \end{cases} \quad (17)$$

因此, 冲击载荷 F 的先验概率密度函数可由其各组成部分概率密度函数的乘积表示, 即

$$p(F | \alpha, \beta) = \begin{cases} \left(\frac{2\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)}\right)^N (f_1 f_2 \dots f_N)^{2\alpha-2} \exp\left(-\beta \sum_{n=1}^N f_n^2\right) & (f_n \geq 0) \\ 0 & (f_n < 0) \end{cases} \quad (18)$$

将参数 τ, α, β 的共轭先验概率密度函数以 Gamma 分布的形式^[18]表示, 即

$$p(\tau) \propto \frac{\beta_1^{\alpha_1}}{\Gamma(\alpha_1)} \tau^{\alpha_1-1} \exp(-\beta_1 \tau) \quad (\tau \geq 0) \quad (19)$$

$$p(\alpha) \propto \frac{\beta_2^{\alpha_2}}{\Gamma(\alpha_2)} \left(\alpha - \frac{1}{2}\right)^{\alpha_2-1} e^{-\beta_2 \left(\alpha - \frac{1}{2}\right)} \quad (\alpha \geq \frac{1}{2}) \quad (20)$$

$$p(\beta) \propto \frac{\beta_3^{\alpha_3}}{\Gamma(\alpha_3)} \beta^{\alpha_3-1} \exp(-\beta_3 \beta) \quad (\beta \geq 0) \quad (21)$$

其中: $\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2, \alpha_3, \beta_3$ 为共轭先验概率密度函数的超参数。

将式(15)和式(18)~(21)代入式(14), 可得后验概率密度表达式为

$$p(F, \tau, \alpha, \beta | Y_s) \propto \exp(\xi) \quad (22)$$

$$\xi = N\alpha \ln \beta - N \ln \Gamma(\alpha) + (2\alpha - 1) \sum_{n=1}^N \ln f_n - \beta \sum_{n=1}^N f_n^2 \quad (23)$$

采用贝叶斯推断方法最大化式(22)中的后验概率密度函数,可获得参数集的最大后验估计为

$$\{\hat{F}, \hat{\tau}, \hat{\alpha}, \hat{\beta}\} = \arg \max_{\{F, \tau, \alpha, \beta\}} \left\{ p(F, \tau, \alpha, \beta | Y_s) \right\} \quad (24)$$

求解式(24)的最大值等价于求解以下4个方程^[18],即

$$\begin{aligned} (\tau H_s^T H_s + 2\beta I) F - \alpha' \begin{pmatrix} 1/f_1 \\ 1/f_2 \\ \vdots \\ 1/f_N \end{pmatrix} - \tau H_s^T Y_s = 0 \quad (25) \\ -2 \sum_{n=1}^N \ln f_n - N \ln \beta + N \frac{\Gamma'(\alpha)}{\Gamma(\alpha)} + \beta_2 - \frac{(\alpha_2 - 1)}{(\alpha - 1/2)} = 0 \quad (26) \end{aligned}$$

$$\sum_{n=1}^N f_n^2 - \frac{(N\alpha + \alpha_3 - 1)}{\beta} + \beta_3 = 0 \quad (27)$$

$$\frac{1}{2} \|H_s F - Y_s\|^2 - \frac{\alpha'_1}{\tau} + \beta_1 = 0 \quad (28)$$

其中: $\alpha' = 2\alpha - 1$; $\alpha'_1 = (N/2 + \alpha_1 - 1)$; $\Gamma'(\alpha)$ 为 $\Gamma(\alpha)$ 的1阶导数。

在设定参数集 $\{\hat{F}, \hat{\tau}, \hat{\alpha}, \hat{\beta}\}$ 初值后,根据式(25)~(28),采用交叉迭代算法可获得参数集的最优解^[18],交叉迭代算法流程如图2所示。

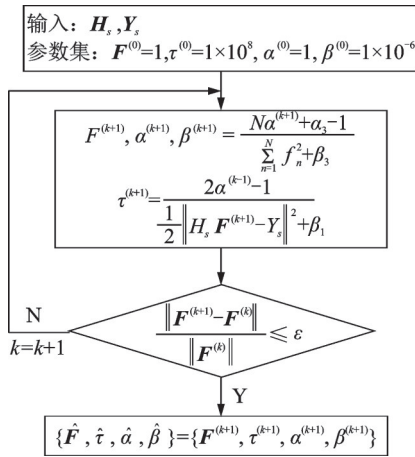


图2 交叉迭代算法流程图

Fig.2 The cross-iteration algorithm flowchart

在交叉迭代算法的第 k 次迭代循环中, $F^{(k+1)}$ 的最优解可由非线性 Gauss-Seidel 迭代算法求得,非线性 Gauss-Seidel 迭代算法流程如图3所示。

将式(27)代入式(26),可得

$$\begin{aligned} \frac{\Gamma'(\alpha)}{\Gamma(\alpha)} - \frac{(\alpha_2 - 1)}{N(\alpha - 1/2)} - \ln(N\alpha + \alpha_3 - 1) = \\ \frac{2}{N} \sum_{n=1}^N \ln f_n - \frac{\beta_2}{N} - \ln \left(\sum_{n=1}^N f_n^2 + \beta_3 \right) \quad (29) \end{aligned}$$

在交叉迭代算法的第 k 次迭代循环中,可利用式(29)采用二分法确定 $\alpha^{(k+1)}$ 的最优解。

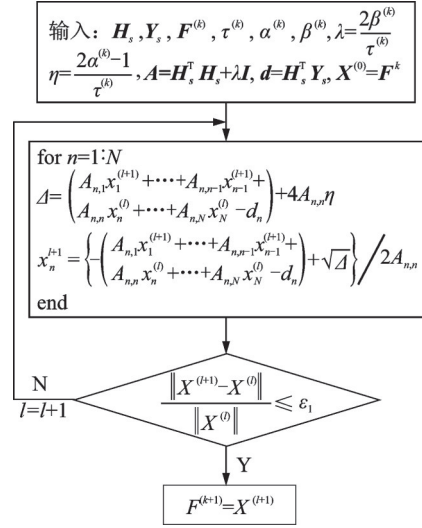


图3 非线性 Gauss-Seidel 迭代算法流程图

Fig.3 The nonlinear Gauss-Seidel iterative algorithm flowchart

4 实验研究

4.1 实验装置

为了验证基于非负贝叶斯正则化的冲击载荷光纤识别方法在复合材料结构上的可行性和有效性,建立了冲击载荷重建实验系统。该系统主要由复合材料筒舱结构、MOI Si255 光纤光栅解调仪(最高为 5 kHz)、PCB 086C01 力锤、NI-9232 数据采集卡及计算机组成,实验设备与实验结构如图4所示。

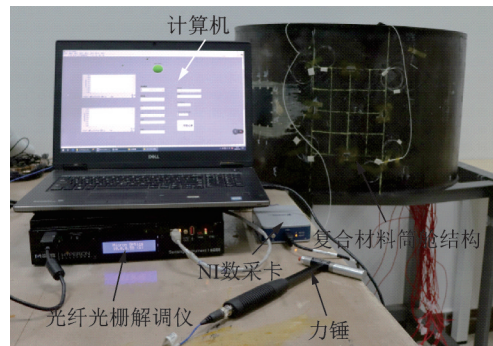


图4 实验设备与实验结构

Fig.4 Experimental setup and test structure

实验对象为碳纤维复合材料筒舱结构,高为 400 mm,直径为 650 mm。实验筒舱结构壳体铺层总共为 14 层,铺层顺序为 $[\pm 45^\circ, 0^\circ, 90^\circ, 0^\circ, 90^\circ, 0^\circ]_s$,单层厚度均为 0.15 mm。

监测区域示意图如图 5 所示,监测区域位于筒壳体表面,区域尺寸为 180 mm×200 mm。在监测区域上表面粘贴 4 个 FBG 传感器(命名为 1~4),其所测得的响应信号分别用 S_1, S_2, S_3 和 S_4 表示,采用波分复用形式组成传感网络,用于采集外界冲击载荷作用下结构的动态响应。实验设置 4 个冲击载荷加载点,分别命名为 I_{P1}, I_{P2}, I_{P3} 和 I_{P4} 。FBG 传感器坐标与冲击载荷加载点坐标分别如表 1 和表 2 所示。

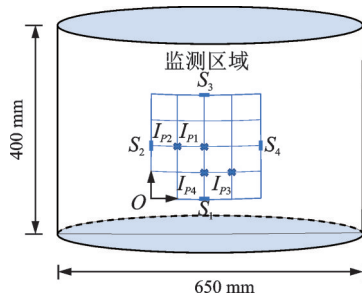


图 5 监测区域示意图

Fig.5 Schematic diagram of monitoring area

表 1 FBG 传感器坐标

Tab.1 Coordinates of FBG sensors

传感器	1	2	3	4
坐标/mm	(90,0)	(0,100)	(90,200)	(180,100)

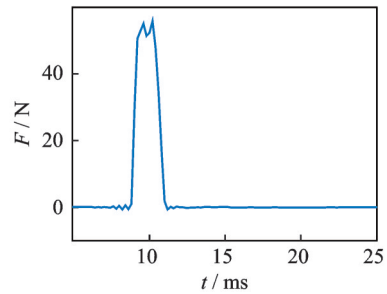
表 2 冲击载荷加载点坐标

Tab.2 Coordinates of impact force loading points

加载点	I_{P1}	I_{P2}	I_{P3}	I_{P4}
坐标/mm	(90,100)	(45,100)	(135,50)	(90,50)

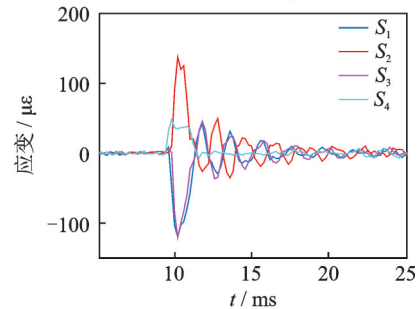
实验过程中,将实验结构放置于实验台,采用 PCB 086C01 力锤对结构载荷加载点依次施加冲击载荷,力锤冲击信号经 NI-9232 数采卡采集后传输至计算机。结构动态应变响应由分布在 4 个传感点上的 FBG 传感器转换为光信号,经 MOI Si255 光纤光栅解调仪解调转换为电信号后输入计算机,与冲击信号同时采集,采样频率设置为 5 kHz。

实验过程分成 2 步:①进行预冲击获得各传感点与冲击载荷加载点之间的脉冲响应函数;②在每个载荷加载点施加 1 个参考冲击载荷,通过粘贴于 4 个传感点的 FBG 传感器感知并记录相应的响应信号。力锤作用于加载点 I_{P1} 时各传感器信号如图 6 所示。其中,图 6(a)为施加于 I_{P1} 点处的参考冲击载荷时间历程;图 6(b)为各传感点对应的冲击响应信号。其余点位的参考冲击载荷时间历程和响应信号与此类似。



(a) 参考冲击载荷

(a) Reference impact force



(b) 冲击响应

(b) Impact responses

图 6 力锤作用于加载点 I_{P1} 时各传感器信号

Fig.6 Signals from each sensor when impact hammer acts on impact point I_{P1}

4.2 实验结果与分析

为比较不同方法对冲击载荷时间历程的识别效果,采用各传感器采集到的各组动态响应信号,进行不同方法的冲击载荷时间历程重建。

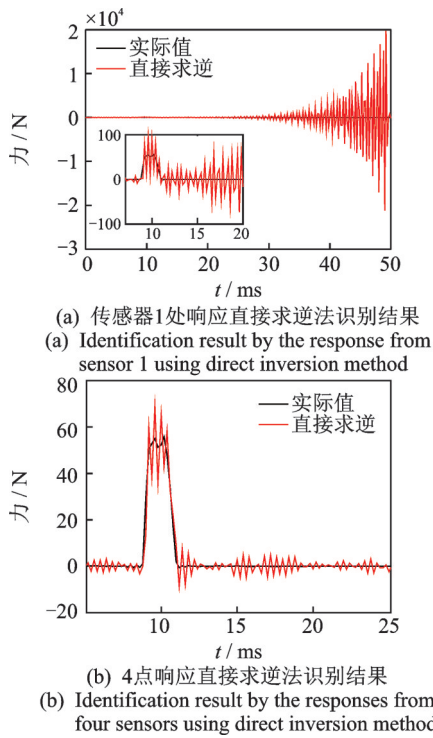
4.2.1 直接求逆法

以力锤作用于点 I_{P1} 时传感器测得响应为例,采用直接求逆法重建冲击载荷时间历程,直接求逆法加载点 I_{P1} 处识别结果如图 7 所示。

图 7(a)为力锤作用在加载点 I_{P1} 时,采用传感器 1 所测单点响应信号直接求逆的重建结果与实际值的对比。由图可见,由于直接求逆时传递函数矩阵的不适定性,重建结果尾部存在振荡现象且不收敛,与实际结果比较,存在几个数量级的偏差。图 7(b)为同一加载点 I_{P1} 采用传感器 1~4 所测 4 点响应信号直接求逆的重建结果与实际值的对比。由图可知,相比于采用单个传感器所测响应信号直接求逆,采用 4 个传感器所测响应直接求逆所得结果可以比较好地与实际冲击信号吻合,但仍然存在较大的振荡现象。

4.2.2 Tikhonov 正则化、贝叶斯正则化和非负贝叶斯正则化

首先,力锤作用于点 I_{P1} 时,以传感器 1 和 2 所测单点响应为例,分别通过 Tikhonov 正则化、贝叶斯

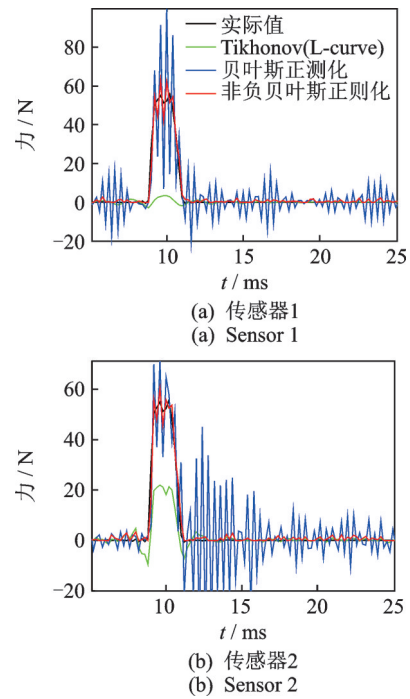
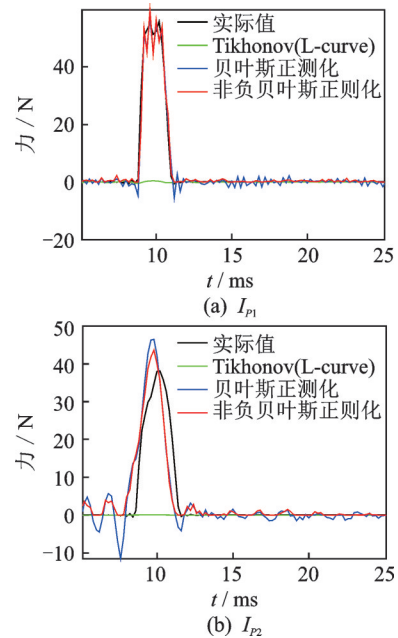
图7 直接求逆法加载点 I_{p1} 处识别结果Fig.7 Identification results for impact point I_{p1} by direct inversion method

正则化和非负贝叶斯正则化重建冲击载荷时间历程,传感器1和2所测响应加载点 I_{p1} 处识别结果如图8所示,其中Tikhonov正则化通过L曲线法选取正则化参数。

图8(a,b)分别为力锤作用于加载点 I_{p1} 处时,利用传感器1和2所测响应,通过3种正则化方法进行冲击载荷重建的结果与实际值的对比。由图可见:虽然Tikhonov正则化法解决了直接求逆法的不稳定问题,没有直接求逆法重建结果中所表现的明显振荡现象,但是由于通过L曲线法选取正则化参数不合适,重建结果与实际值仍存在很大的误差;非负贝叶斯正则化法自适应地选择了合适的正则化参数,消除了其他正则化方法重建结果中存在的无物理意义载荷负分量,使得识别的冲击载荷与实际值基本吻合,取得了很好的重建效果。

其次,以力锤作用于点 I_{p1} 和 I_{p2} 为例,利用传感器1~4所测4点响应,分别通过Tikhonov正则化、贝叶斯正则化和非负贝叶斯正则化重建加载点 I_{p1} 和 I_{p2} 处冲击载荷时间历程,4点响应加载点 I_{p1} 和 I_{p2} 处识别结果如图9所示。

同样地,在对其他冲击载荷加载点进行载荷识别时,非负贝叶斯正则化法也表现出良好的识别结果。

图8 传感器1和2所测响应加载点 I_{p1} 处识别结果Fig.8 Identification results for impact point I_{p1} by the response from sensor 1 and 2图9 4点响应加载点 I_{p1} 和 I_{p2} 处识别结果Fig.9 Identification results for impact point I_{p1} and I_{p2} by the response from four sensors

4.3 实验结果误差评估

为了定量表示冲击载荷识别结果的效果,定义整体相对误差为

$$E_1 = \frac{\|F_{\text{ture}} - F_{\text{re}}\|_2}{\|F_{\text{ture}}\|_2} \times 100\% \quad (30)$$

其中: F_{true} 为力锤测量所得参考冲击载荷; F_{re} 为冲击载荷识别结果。

定义峰值相对误差^[8]为

$$E_2 = \frac{|\max(F_{true}) - \max(F_{re})|}{|\max(F_{true})|} \times 100\% \quad (31)$$

利用这 2 种误差评估方法对各方法冲击载荷识别结果进行误差评估。

首先,引入整体相对误差和峰值相对误差,对利用单点 FBG 传感器所测响应,分别通过 Tikhonov 正则化法、贝叶斯正则化法与非负贝叶斯正则化法识别的点 I_{P1} 处冲击载荷结果进行误差评估,各传感器响应加载点 I_{P1} 处识别误差如图 10 所示。由图可见,Tikhonov 正则化法和贝叶斯正则化法冲击载荷识别结果的误差水平整体大于非负贝叶斯正则化法。识别结果中:Tikhonov 正则化法最小整体相对误差为 63.86%,最小峰值相对误差为 60.18%;贝叶斯正则化法最小整体相对误差为 45.95%,最小峰值相对误差为 3.41%;非负贝叶斯正则化法最大整体相对误差为 23.65%,最大峰值相对误差为 16.47%。

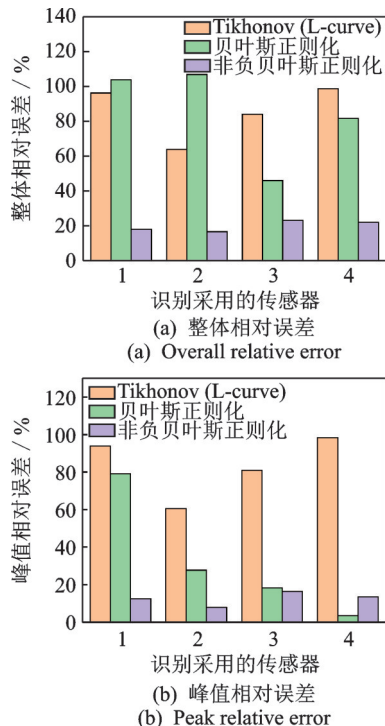


图 10 各传感器响应加载点 I_{P1} 处识别误差

Fig.10 Error of identification results for impact point I_{P1} by the response from each sensor

其次,对利用 4 个传感器所测响应,分别通过 Tikhonov 正则化法、贝叶斯正则化法与非负贝叶斯正则化法识别的不同加载点处冲击载荷结果进行误

差评估,4 个传感器响应识别不同加载点冲击载荷误差如图 11 所示。由图可知:通过 Tikhonov 正则化法利用 FBG 传感器所采集信号识别的冲击载荷结果误差较大;而通过贝叶斯正则化法和非负贝叶斯正则化法重建误差则显著下降。在对 4 个加载点冲击载荷时间历程的识别结果中,由于 L 曲线法对正则化参数选取的不合适,Tikhonov 正则化法最小整体相对误差为 96.62%,最小峰值相对误差为 99.18%,基本不能识别冲击载荷;非负贝叶斯正则化识别结果中,最大整体相对误差为 42.87%,最大峰值相对误差为 17.66%。证明通过非负贝叶斯正则化法利用 FBG 传感器采集响应识别冲击载荷时间历程,具有明显有效的优化作用。

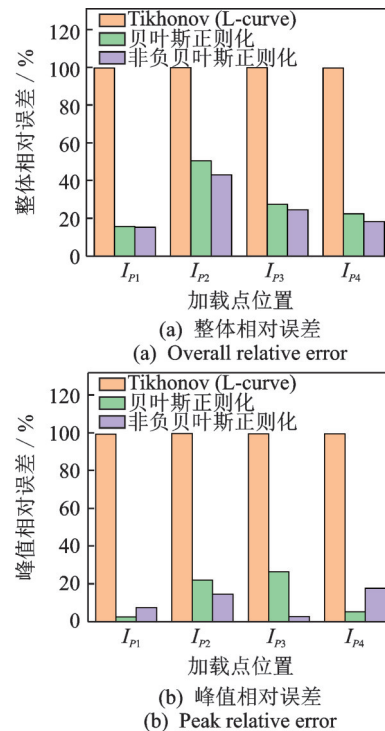


图 11 4 个传感器响应不同加载点识别误差

Fig.11 Error of identification results for different impact points by the response from four sensors

5 结 论

1) 将 FBG 传感器集成于复合材料结构上,能够有效地感知结构受到冲击载荷作用下的动态响应信号。

2) 与 Tikhonov 正则化和贝叶斯正则化方法相比,非负贝叶斯正则化方法可以自适应地选择正则化参数,消除没有物理意义的负分量,使得重建的冲击载荷时间历程与实际历程更加吻合。

3) 本研究方法在复合材料筒舱结构冲击载荷

识别的应用中具有可行性和有效性,其体积小,质量轻,能够抗电磁干扰,可为航空航天轻型复合材料结构的载荷识别提供理论支撑。

参 考 文 献

- [1] PETIT S, BOUVET C, BERGEROT A, et al. Impact and compression after impact experimental study of a composite laminate with a cork thermal shield[J]. Composites Science and Technology, 2007, 67(15/16): 3286-3299.
- [2] STASZEWSKI W J, MAHZAN S, TRAYNOR R. Health monitoring of aerospace composite structures - active and passive approach[J]. Composites Science and Technology, 2009, 69(11/12):1678-1685.
- [3] SAREGO G, ZACCARIOTTO M, GALVANETTO U. Artificial neural networks for impact force reconstruction on composite plates and relevant uncertainty propagation[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2018, 33(8):38-47.
- [4] GHAJARI M, SHARIF-KHODAEI Z, ALIABADI M H, et al. Identification of impact force for smart composite stiffened panels[J]. Smart Materials and Structures, 2013, 22(8):85014.
- [5] SEYDEL R, CHANG F. Impact identification of stiffened composite panels(I): system development[J]. Smart Materials and Structures, 2001, 10(2):354-369.
- [6] 严刚. 航空结构冲击载荷与损伤识别技术方法研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2009.
- [7] HU N, FUKUNAGA H, MATSUMOTO S, et al. An efficient approach for identifying impact force using embedded piezoelectric sensors[J]. International Journal of Impact Engineering, 2007, 34(7):1258-1271.
- [8] 严刚, 孙浩. 基于贝叶斯压缩感知的复合材料结构冲击载荷识别研究[J]. 振动工程学报, 2018, 31(3): 483-489.
- YAN Gang, SUN Hao. Identification of impact force for composite structure using Bayesian compressive sensing [J]. Journal of Vibration Engineering, 2018, 31(3):483-489. (in Chinese)
- [9] YAN G, SUN H, BÜYÜKÖZTÜRK O. Impact load identification for composite structures using Bayesian regularization and unscented Kalman filter[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2017, 24(5):e1910.
- [10] SUN H, FENG D, LIU Y, et al. Statistical regularization for identification of structural parameters and external loadings using state space models[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2015(11):843-858.
- [11] ZHANG E, ANTONI J, FEISSEL P. Bayesian force reconstruction with an uncertain model[J]. Journal of Sound and Vibration, 2012, 331(4):798-814.
- [12] YAN G. A Bayesian approach for impact load identification of stiffened composite panel[J]. Inverse Problems in Science & Engineering, 2014, 22(6): 940-965.
- [13] SUN H, BÜYÜKÖZTÜRK O. Identification of traffic-induced nodal excitations of truss bridges through heterogeneous data fusion[J]. Smart Materials and Structures, 2015, 24(7):75032.
- [14] LA V, ZEMČÍK R, KROUPA T, et al. Reconstruction of impact force on curved panel using piezoelectric sensors[J]. Procedia Engineering, 2012, 48:367-374.
- [15] REZAYAT A, DE-PAUW B, LAMBERTI A, et al. Reconstruction of impacts on a composite plate using fiber Bragg gratings (FBG) and inverse methods[J]. Composite Structures, 2016, 149:1-10.
- [16] 刘铁根, 王双, 江俊峰, 等. 航空航天光纤传感技术研究进展[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(8):1681-1692.
- LIU Tiegeng, WANG Shuang, JIANG Junfeng, et al. Advances in optical fiber sensing technology for aviation and aerospace application[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(8):1681-1692. (in Chinese)
- [17] PARK C, KIM J, JUN S. Localizations and force reconstruction of low-velocity impact in a composite panel using optical fiber sensors[J]. Advanced Composite Materials, 2012, 21(5/6):357-369.
- [18] YAN G, SUN H. A non-negative Bayesian learning method for impact force reconstruction[J]. Journal of Sound and Vibration, 2019, 457:354-367.
- [19] 杨明红, 饶云江, 靳伟, 等. 光纤传感网器件与技术[M]. 北京:科学出版社, 2018:7-8.
- [20] WEI F, LIU D, MALLIK A, et al. Magnetic field sensor based on a Tri-Microfiber coupler ring in magnetic fluid and a fiber Bragg grating[J]. Sensors, 2019, 19(23):5100.
- [21] LI Q, LU Q. A hierarchical Bayesian method for vibration-based time domain force reconstruction problems [J]. Journal of Sound and Vibration, 2018, 421:190-204.
- [22] WANG J, ZABARAS N. Hierarchical Bayesian models for inverse problems in heat conduction[J]. Inverse Problems, 2005, 21(1):183-206.



第一作者简介:蔡芳盛,男,1995年11月生,硕士。主要研究方向为光纤监测技术在结构健康监测领域的应用。

E-mail:cfsnuaa@163.com