

基于 Kalman 滤波的有限测点桁架 结构疲劳损伤监测*

白石^{1,2}, 任鹏³, 周智³, 武文华⁴, 欧进萍^{1,3}

(1. 哈尔滨工业大学土木工程学院 哈尔滨, 150090) (2. 智性科技南通有限公司 南通, 226010)

(3. 大连理工大学土木工程学院 大连, 116024) (4. 大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室 大连, 116024)

摘要 发展一种基于 Kalman 滤波的应变响应估计方法, 采用自行研发的疲劳应变数字化无线传感器, 对有限测点桁架结构进行监测, 实现桁架结构未测杆件的疲劳损伤评估。通过引入虚拟系统噪声对系统输入进行处理, 在未知激励条件下对有限测点之外的拓展点应变响应进行估计; 用平面主桁架数值模型验证了算法的可行性; 设计平面钢桁架模型, 进行桁架结构高周疲劳试验。试验结果表明, 基于疲劳传感器的实测应变响应, 该算法有效估计了拓展点应变响应, 并与拓展点实测数据吻合良好; 联合有限测点和估计点的应变响应数据, 对该桁架结构实施了疲劳损伤评估。

关键词 Kalman 滤波; 有限测点; 疲劳损伤监测; 桁架结构; 疲劳传感器

中图分类号 TU323.4; O329; TH825

引言

桁架结构为众多杆件构成的有序铰接体系, 适用于大跨度空间公共建筑与海洋平台等大型基础设施。由于长期承受交变荷载作用, 桁架结构服役期间的疲劳耐久性问题突出, 疲劳损伤与寿命预测问题尚待解决。桁架结构疲劳损伤的现场监测, 亦成为结构健康监测领域的重点研究课题^[1]。由于技术制约和成本原因, 现有传感器网络难以覆盖结构的全部易损区域, 例如大型已建桁架的内部杆件、海洋平台水下部分以及特种结构的极端温度作用位置等。即使实现了传感器网络覆盖, 疲劳传感器本身的长期耐久性和恶劣服役环境下易损坏问题, 致使绝大多数疲劳监测研究停留在构件级别, 或者基于阶段监测数据的统计分析, 尚没有长期获取结构疲劳信息以及全历程损伤评估的技术手段^[2]。

对桁架结构进行包括疲劳损伤在内的状态评估工作通常采用基于动力学理论的损伤诊断方法^[3]。该类研究方法以环境激励下提取稳定的模态信息作为基础, 但在实际情况中往往只得到少数几阶低阶模态, 甚至一些极端情况下(如强震、涡振等)难以识

别。识别到的模态信息往往过于整体, 难以构建局部损伤敏感的特征参量^[4], 也难以定量描述具体损伤特征^[5]。作为对局部损伤与应力重分布非常敏感的物理量, 应变响应数据既可用于分析结构的整体动力特性, 同时也可作为疲劳分析的有效数据^[6-7]。近年的研究中, Papadimitriou 等^[8]结合最优状态估计理论, 通过有限测点响应估计未测构件的应变响应, 进行了金属结构的疲劳寿命预测。该研究中, 白噪声激励作为系统输入, 卡尔曼(Kalman)滤波进程可以对结构动力学系统的状态向量进行统计推断, 得到接近实测的估计状态序列。笔者以有限元数值模拟得到有限测点的阶段应变响应数据, 待估计点的应变响应则通过相应的有限元计算结果予以验证。采用频域分析方法对桁架数值模型的各个杆件进行了疲劳寿命预测。

本研究中, 为发展工程化的疲劳监测技术手段, 采用笔者课题组自行研发的疲劳应变数字化无线传感器实时获取疲劳信息。考虑引入虚拟系统噪声的方法对实际监测中未知系统输入进行处理, 基于 Kalman 滤波进程实现未测杆件应变响应估计。通过某钢桁梁桥主桁架结构数值模型验证该算法的可行性。设计平面钢桁架模型, 通过桁架结构高周疲

* 国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)资助项目(2011CB013705); 国家科技支撑计划资助项目(2011BAK02B01)

收稿日期: 2015-09-06; 修回日期: 2016-05-13

劳试验,将有限测点无线疲劳传感器与应变响应估计算法联合使用。最后,利用有限测点和估计点杆件的应变响应数据,对该桁架结构进行疲劳损伤评估。

1 疲劳传感器

随着结构健康监测传感手段的发展,进行疲劳监测的局部应变传感器,如电阻应变片、聚偏二氟乙烯(polyvinylidene fluoride,简称 PVDF)压电薄膜以及光纤光栅等,均已成为成熟的技术。然而,这些一般传感器采集设备体积较大,对传输导线精度要求较高,给实际的工程应用带来不便。此外,疲劳问题影响因素较多,单一参量无法准确表征。基于阶段监测数据的统计分析获取疲劳荷载谱,难以长期实时记录疲劳累积损伤并快速预警。

笔者通过借鉴树木年轮仿生机理,将疲劳表征为应力/应变幅值、水平和循环次数,发展了一种可实时记录疲劳表征参数的疲劳应变数字化无线传感器^[9-11]。该型传感器采用雨流计数方法对材料应变响应进行循环计数,形成考虑不同应变幅值与水平的疲劳累积全历程“记忆性”数字化算法;在相关代码调试器中对该算法进行了编译;具体硬件实现上采用模块化设计,包括应变传感探头处理模块、数字信号处理模块、无线传输模块以及电源能量模块,分别实现了以电阻应变片及 PVDF 压电薄膜为传感探头的系统软件内嵌与硬件集成。

由于样机制作数量有限,笔者在后续试验研究中仅布设 1 个以电阻应变片为传感探头的无线传感器,以进行示范性验证,其余测点采用光纤光栅传感器获取桁架杆件应变响应数据,其疲劳表征参数选取以及基于雨流计数的循环次数记录方法与样机(见图 1)原理相同。

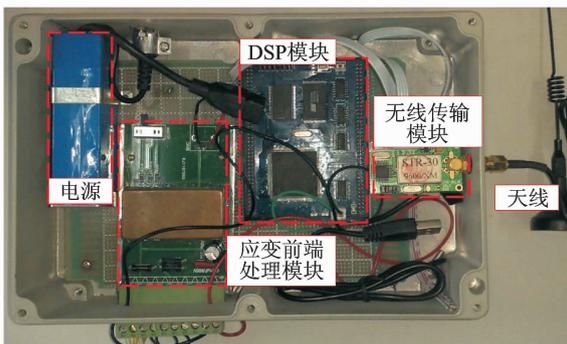


图 1 疲劳应变数字化无线传感器样机

Fig. 1 Prototype of fatigue strain digitizing sensor

2 基于 Kalman 滤波的应变响应估计

有限元分析中,如将桁架杆单元视为轴向受力杆件,则单元应变即为杆件轴向粘贴传感器的实测应变。桁架结构应变响应估计方法^[12]已有相关论述,现简略描述如下,并在线性时不变 Kalman 滤波进程中引入未知系统输入的处理。

基于 Kalman 滤波进行应变响应估计的核心是建立状态空间模型^[13]。随机激励 $w(t)$ 作用下, n 自由度的结构二阶运动方程为

$$M\ddot{\mathbf{x}}(t) + D\dot{\mathbf{x}}(t) + K\mathbf{x}(t) = \mathbf{w}(t) \quad (1)$$

其中: M 、 D 和 K 分别为结构系统的质量、阻尼和刚度矩阵; w 为 n 阶系统(过程)噪声向量; x 为节点位移向量; \dot{x} 为节点速度向量。

定义系统状态向量 y 由节点位移向量 x 和节点速度向量 \dot{x} 组成, B_1 为阶数调整矩阵,结构系统的状态方程为

$$\dot{y}(t) = Ay(t) + Bw(t) \quad (2)$$

$$\text{其中: } A = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}D \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ M^{-1}B_1 \end{bmatrix}.$$

有限元分析和疲劳传感器中采用离散时间数据,故假定传感器采样频率为 $1/\Delta t$,定义 y_k 为时刻 k (给定时间点 $k\Delta t$) 的状态变量,离散时间系统的状态方程为

$$y_k = Fy_{k-1} + Gw_{k-1} \quad (3)$$

$$\text{其中: } F = e^{A\Delta t}; G = F(I - e^{-A\Delta t})A^{-1}B.$$

实际工程中,随机激励或称系统噪声通常不能测定,导致 Kalman 滤波难以工作。引入虚拟系统噪声的方法,将未知系统输入和原系统状态联合作为增广状态向量进行处理。进一步假设系统噪声作一个动态系统的输出为

$$w_k = hw_{k-1} + \zeta_{k-1} \quad (4)$$

其中: h 为一常数; ζ_k 为零均值白噪声且与 w_k 不相关。

联立式(4)与原系统状态方程(3),构建增广状态方程

$$z_k = F'z_{k-1} + \zeta'_{k-1} \quad (5)$$

$$\text{其中: } z_k = \begin{Bmatrix} y_k \\ w_k \end{Bmatrix}; F' = \begin{bmatrix} F & G \\ 0 & hI \end{bmatrix}; \zeta'_{k-1} = \begin{Bmatrix} 0 \\ \zeta_{k-1} \end{Bmatrix}.$$

ζ'_k 为虚拟系统噪声,其协方差矩阵为

$$\mathbf{Q}_k = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & E[\zeta_k \zeta_k^T] \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中: $E[\zeta_k \zeta_k^T]$ 可依据人为经验适当选定。

以上处理方法最初由 Bucy 和 Joseph 提出^[14], 用于构建有色噪声输入的系统状态方程。一方面, 文献[15]中说明并验证了引入适当的虚拟系统噪声会使得滤波进程更加侧重量测值的更新, 从而提高未建模系统噪声和不确定系统模型下进行 Kalman 滤波的鲁棒性; 另一方面, 未知系统输入 ω_k 被处理为增广状态向量 \mathbf{z} 的一部分, 将不会影响到 Kalman 滤波的运行。

桁架杆单元的各单元应变可由各节点位移直接求出, 两者的关系矩阵即为观测矩阵 \mathbf{C} 。文献[15]已做了较为详细的推导。对于桁架杆单元可得

$$\boldsymbol{\varepsilon}_m = \mathbf{C} \boldsymbol{\delta}_n = [\mathbf{B}_m \quad \mathbf{T}_m] \boldsymbol{\delta}_n \quad (7)$$

其中: $\boldsymbol{\varepsilon}_m$ 为整体集成后的 m 阶单元应变向量; $\boldsymbol{\delta}_n$ 为整体集成后的 n 阶节点位移向量; \mathbf{B}_m 为应变矩阵, 可由单元的形函数矩阵和相应几何关系得到; \mathbf{T}_m 称为坐标转换矩阵, 可将节点位移从局部坐标系向整体坐标系进行转换; $\mathbf{C} = [\mathbf{B}_m \quad \mathbf{T}_m]$ 为经整体集成后的 $m \times n$ 阶观测矩阵。

$$\mathbf{B}_m = \begin{bmatrix} -\frac{1}{l} & 0 & \frac{1}{l} & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{T}_m = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos\theta & \sin\theta \\ 0 & 0 & -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$$

其中: l 为桁架杆单元长度; θ 为整体集成时该杆件轴向相对整体坐标系的旋转角度。

可知考虑增广状态向量的观测方程为

$$\boldsymbol{\varepsilon}_k = \mathbf{C}' \mathbf{z}_k + \mathbf{v}_k \quad (8)$$

其中: $\mathbf{C}' = [\mathbf{C} \quad 0]$; \mathbf{v}_k 为零均值量测噪声, \mathbf{v}_k 协方差矩阵为 \mathbf{R}_k ; δ_{kj} 为 Kronecher- δ 函数, 即如果 $k=j$, 那么 $\delta_{kj}=1$; 如果 $k \neq j$, 那么 $\delta_{kj}=0$, 并且对任意时刻 k 和 j 存在 $E[\zeta_k \mathbf{v}_j^T] = 0$ 。

考虑先验和后验状态估计均值 $\hat{\mathbf{z}}_k^-$ 和 $\hat{\mathbf{z}}_k^+$ 及其对应的估计误差协方差矩阵 \mathbf{P}_k^- 和 \mathbf{P}_k^+ , 执行 Kalman 滤波进程每一步如下

$$\mathbf{P}_k^- = \mathbf{F}' \mathbf{P}_{k-1}^+ \mathbf{F}'^T + \mathbf{Q}_{k-1}$$

$$\hat{\mathbf{z}}_k^- = \mathbf{F}' \hat{\mathbf{z}}_{k-1}^+$$

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_k^- \mathbf{C}'^T (\mathbf{C}'_L \mathbf{P}_k^- \mathbf{C}'_L^T + \mathbf{R}_k)^{-1}$$

$$\mathbf{P}_k^+ = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{C}'_L) \mathbf{P}_k^-$$

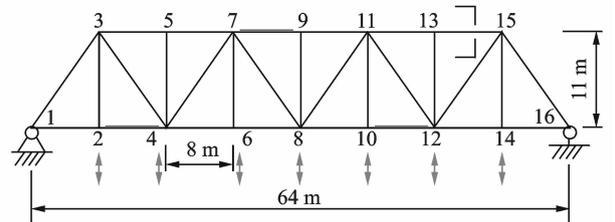
$$\hat{\mathbf{z}}_k^+ = \hat{\mathbf{z}}_k^- + \mathbf{K}_k (\boldsymbol{\varepsilon}_k^L - \mathbf{C}'_L \hat{\mathbf{z}}_k^-)$$

$$\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}_k = \mathbf{C}'_L \hat{\mathbf{z}}_k^+ \quad (9)$$

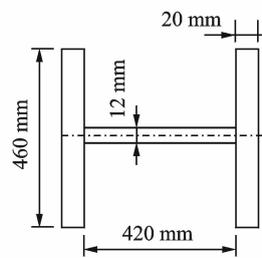
其中: $\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}_k$ 为时间点 $k \Delta t$ 的应变估计量; \mathbf{K}_k 为增益矩阵。

3 数值案例

以下承式钢桁梁桥主桁架为例进行数值仿真计算, 该主桁架简化力学模型如图 2(a) 所示。桁架整体为筒支结构, 主桁架平面呈三角形腹杆体系布置, 节间长度为 8 m, 桁高为 11 m; 每个节点板附加质量为 90 kg。; 杆件采用 Q345 钢和 H 形截面, 如图 2(b) 所示; 杆件截面水平板尺寸为 420 mm \times 12 mm, 竖板尺寸为 460 mm \times 20 mm, 可得截面面积为 23 440 mm², 线密度为 7 800 kg/m。



(a) 主桁架立面图
(a) Two-dimensional main truss



(b) I-I截面图
(b) I-I cross section

图 2 下承式钢桁梁桥主桁架结构模型

Fig. 2 Truss model of a through steel truss bridge

桁架有限元模型由 16 个节点联接 29 根桁架杆单元构成。对除支座外的所有下弦杆节点竖向自由度施加适当简谐激励, 混入 10% 的白噪声形成有色系统噪声, 采用 Newmark- β 法求解所有杆件的应变响应。假定所有腹杆为已知测点并布设应变传感器, 各弦杆为假设未进行应变监测的拓展点, 首先利

用有限元模型建立如式(5)和(8)的状态方程和观测方程,对桁架所有节点模拟施加一定的虚拟系统噪声,再利用上述 Kalman 滤波算法对拓展点应变响应进行估计。

图 3 为跨中下弦杆节点 8 竖向自由度虚拟系统噪声与实际施加激励的对比,两者的相关系数为 0.015 5,即人为施加的虚拟系统噪声与实际激励不相关。杆单元 4(节点编号 2~4)、14(节点编号 7~9)和 20(节点编号 10~12)的应变响应估计值与实际计算值对比以及系统状态估计误差协方差如图 4 所示,两者符合良好,状态估计误差可收敛。

表 1 为所谓拓展点杆件应变响应估计误差的均值与估计值与实际计算值相关系数。可以看出,该算法得到的应变响应估计结果是有效且精确的,估

计误差的均值在 $40 \mu\epsilon$ 以内,利用拓展点估计值进行桁架杆件的疲劳损伤评估具有可行性。

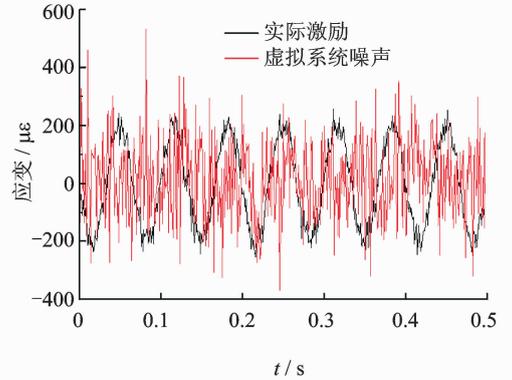
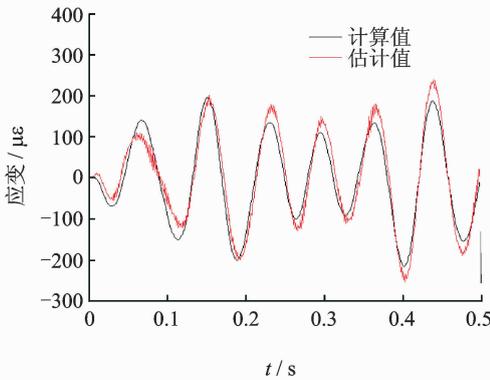
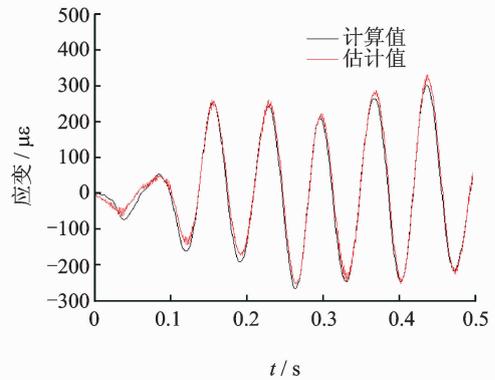


图 3 虚拟系统噪声与实际激励对比

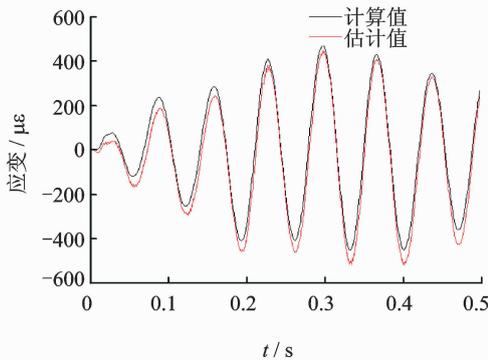
Fig. 3 Comparison between virtual systematic noise and actual excitation



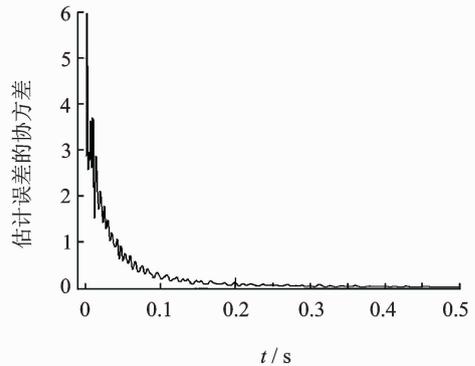
(a) 杆单元 4
(a) Element 4



(b) 杆单元 14
(b) Element 14



(c) 杆单元 20
(c) Element 20



(d) 状态估计误差协方差
(d) Error covariance of state estimation

图 4 应变响应估计结果

Fig. 4 Results of strain response estimation

表 1 主桁架杆件应变响应估计误差分析

Tab. 1 Error analysis of strain responses of the main truss

拓展点杆件	节点编号	估计误差均值/ $\mu\epsilon$	相关系数	拓展点杆件	节点编号	估计误差均值/ $\mu\epsilon$	相关系数
1	1~2	7.4	0.971 7	16	8~10	-37.5	0.996 6
4	2~4	6.5	0.969 6	18	9~11	24.6	0.995 5
6	3~5	-12.8	0.999 5	20	10~12	-41.3	0.997 4
8	4~6	-5.1	0.938 2	22	11~13	36.1	0.998 7
10	5~7	-7.4	0.999 0	24	12~14	-32.7	0.998 8
12	6~8	-17.1	0.915 7	26	13~15	27.3	0.999 7
14	4~9	10.4	0.994 9	28	14~16	-24.3	0.999 4

对误差为 0.18%。

4 试验验证

4.1 试验设计

试验平面桁架结构及其加载固定装置如图 5 所示。杆件材料选用 Q235 钢,实测弹性模量约 200 GPa。铰接点采用轴承-螺栓形式,以保证每个杆件都有独立连接且在平面内不受转动约束的影响,使得受力方式为平面内二力杆。加载系统选用 YE5872A 型功率放大器及 JZK-10 型激振器;桁架结构与激振器之间采用图 5 中所示的连接方式,可实现激振器对结构施加稳定的交变荷载。在激振器与桁架结构铰接点之间设置拉压式微型力传感器,以监测荷载时程。

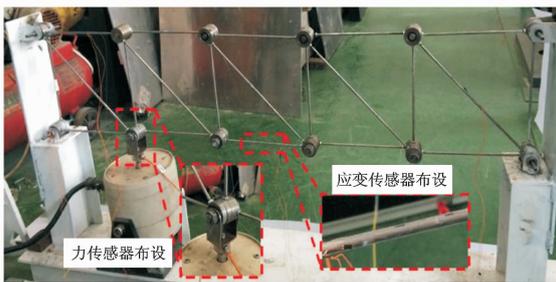


图 5 试验桁架模型实物图

Fig. 5 Experimental truss model

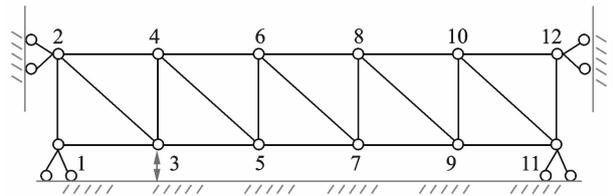


图 6 桁架结构模型示意图

Fig. 6 Diagrammatic sketch of truss model

4.2 应变响应估计

将所有弦杆作为已知测点,所有腹杆作为拓展点。其中,10 号弦杆(节点编号 5~7)布设疲劳应变数字化无线传感器,其余杆件布设光纤光栅传感器,两类传感器以相同的采样频率(100 Hz)同步采集数据。

尽管该桁架杆件已设计尽量减小平面刚度,但是由于激振器功率限制(荷载峰值在 500 N 左右),所有杆件承受高周疲劳作用,故加载时间持续 7 d,每天 20 h 以上。上弦杆共 5 个光纤光栅传感器采用波分复用的方式连接,以节省解调仪通道用量;下弦杆中 2,6 号杆件以及 14,18 号杆件分别连接一个通道。试验加载到第 4 d,发现由于裸光纤粘结剂脱粘导致 4,8 号杆件不能继续监测,在第 3 d 之后仅采用 5 个底部弦杆作为已知测点。考虑篇幅限制,仅以振动时出平面运动较小的 19 号腹杆(节点编号 10~11)作为拓展点显示。

选取第 4 d 初始 2 s 数据,针对 19 号腹杆进行基于实测荷载的计算分析和应变响应估计,结果如图 7,8 所示。结果表明,基于同步实测荷载的计算值与实测值相差较大,有振动相位的差别。主要原因为桁架结构铰接点与激振器之间设置拉压式微型

该平面桁架的有限元模型如图 6 所示。杆件刚度由实测弹性模量与截面几何计算得到,精确质量称重,假设第 1 阶模态阻尼系数为 0.05。对桁架结构有限元模型进行初步校核,采用小锤敲击与峰值提取法得到实验桁架结构第 1 阶固有频率为 200.19 Hz,而对应的有限元模型为 199.82 Hz,相

力传感器,由于长时间振动造成连接较为松散,存在实际施加于整体结构的激励与实测荷载不一致的情况。另一方面,基于应变响应估计算法得到的估计值与光纤光栅传感器的实测值具有很好的一致性。以上结果验证了在有限测点并且在部分传感器由于缺乏耐久性而失效的条件下,仍然能够有效地进行拓展点应变时程估计。

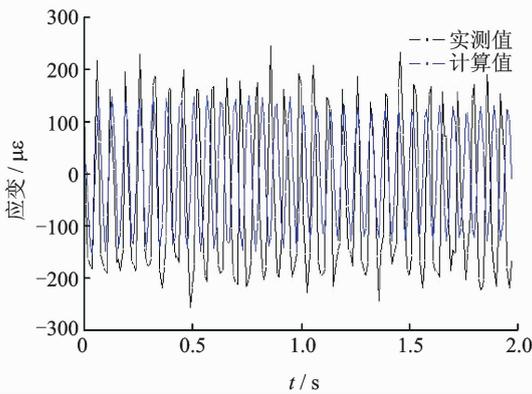


图 7 19 号杆件实测与计算应变响应

Fig. 7 Measured and calculated strain responses of element 19

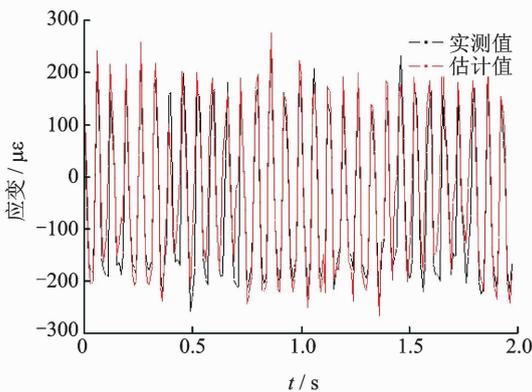


图 8 19 号杆件实测与估计应变时程

Fig. 8 Measured and estimated strain responses of element 19

4.3 疲劳损伤评估

根据疲劳传感器采用的雨流计数方法,得到桁架杆件的疲劳表征参数,以 19 号杆件为例,如图 9 所示。利用实测和估计杆件的长期应变时程数据(共计 150 h),基于 Miner 线性疲劳累积损伤模型以及 Q235 钢材的 S-N 曲线(具体疲劳累积损伤计算方法参考文献[10~11,16])得到该桁架结构所有杆件的疲劳累积损伤雨流矩阵直方图,如图 10 所示。在所有的拓展点杆件中,3 号杆件疲劳损伤较为显著;由实测应变响应直接计算的疲劳损伤的杆

件中,4 和 13 号杆件疲劳损伤较大;主要原因是加载期间观察到靠近加载点附近桁架杆件有明显出平面运动,存在间歇性的弯、扭联合作用,另外光纤光栅沿杆件轴向粘贴的相差角度对应变监测也具有不利影响,后续研究中需着重考虑。

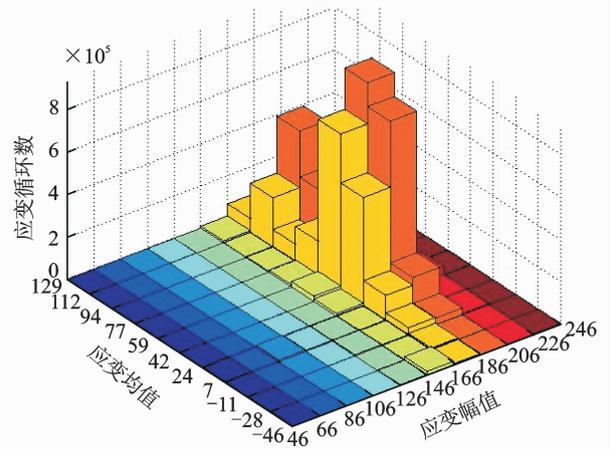


图 9 杆件 19 雨流计数结果

Fig. 9 Results of rain-flow counting of element 19

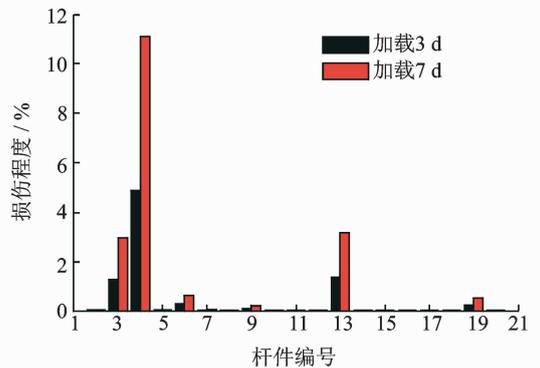


图 10 桁架结构所有杆件疲劳损伤评估结果

Fig. 10 Fatigue damage assessment of all elements

5 结论

1) 在应变响应估计算法中引入虚拟系统噪声,对实际监测中未知系统输入进行处理。该算法被数值和实验证实可准确估计未测杆件(拓展点)应变。

2) 自制平面桁架结构以所有弦杆(后期试验仅使用下弦杆)为实测杆件,估计了腹杆应变时程。该示范性试验结果表明应变响应估计效果良好。

3) 联合应用疲劳应变数字化无线传感器以及光纤光栅传感器获取疲劳信息。结合应变响应估计算法,在部分疲劳传感器损坏的不利条件下,仍能够对实测和未测(拓展)杆件同步实施疲劳损伤评估,

可在理论和技术上为疲劳在线监测和快速损伤预警提供一种有效手段。

参 考 文 献

- [1] Li Hui, Ou Jinping. Structural health monitoring: from sensing technology stepping to health diagnosis [J]. *Procedia Engineering*, 2011, 14(2259):753-760.
- [2] 贺光宗, 陈怀海, 贺旭东. 多轴向随机激励下结构疲劳失效的判定方法 [J]. *振动、测试与诊断*, 2015, 35(3): 248-252.
- He Guangzong, Chen Huaihai, He Xudong. Structural fatigue failure determining method under ultraxial ambient excitation [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2015, 35(3):248-252. (in Chinese)
- [3] 孙晓丹, 欧进萍. 基于动力检测的损伤指标评价方法 [J]. *振动与冲击*, 2009, 28(1): 9-13.
- Sun Xiaodan, Ou Jinping. Assessment of vibration-based damage indexes in structural health monitoring [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2009, 28(1):9-13. (in Chinese)
- [4] 侯吉林, 欧进萍, Lukasz J. 联合整体和局部动态信息的空间桁架模型修正试验 [J]. *振动与冲击*, 2013, 32(16):100-105.
- Hou Jilin, Ou Jinping, Lukasz J. Model updating experiment of space truss using global and local dynamic information [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2013, 32(16):100-105. (in Chinese)
- [5] 吴佰建, 李兆霞, 汤可可. 大型土木结构多尺度模拟与损伤分析——从材料多尺度力学到结构多尺度力学 [J]. *力学进展*, 2007, 37(3):321-336.
- Wu Buojian, Li Zhaoxia, Tang Keke. Multi-scale modeling and damage analysis of large civil structure-multi-scale mechanics from material to structure [J]. *Advances in Mechanics*, 2007, 37(3): 321-336. (in Chinese)
- [6] 曾欣, 徐赵东. 基于应变能量分布变化的大跨桥损伤识别 [J]. *振动、测试与诊断*, 2012, 32(2): 267-270.
- Zeng Xin, Xu Zhaodong. Damage detection strategy for long-span bridge based on strain energy distribution change [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2012, 32(2):267-270. (in Chinese)
- [7] 郭彤, 李爱群. 基于长期监测数据的桥面板焊接细节疲劳寿命评估 [J]. *土木工程学报*, 2009, 42(6): 66-72.
- Guo Tong, Li Aiqun. Fatigue life assessment of welds in bridge decks using long term monitoring data [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2009, 42(6): 66-72. (in Chinese)
- [8] Papadimitriou C, Fritzen C P, Ntotsios E. Fatigue predictions in entire body of metallic structures from a limited number of vibration sensors using Kalman filtering [J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2010, 18(5):554-573.
- [9] 白石, 王旭, 廖科源, 等. 无线智能疲劳监测系统的研制与实验验证 [J]. *物联网技术*, 2011, 1(9):69-72.
- Bai Shi, Wang Xu, Liao Keyuan, et al. Development and experimental verification of wireless intelligent fatigue monitoring system [J]. *Internet of Things Technologies*, 2011, 1(9):69-72. (in Chinese)
- [10] 白石, 周智, 申宇, 等. 基于 PVDF 的无线智能疲劳监测系统 [J]. *航空学报*, 2014, 35(8): 2190-2198.
- Bai Shi, Zhou Zhi, Shen Yu, et al. A wireless intelligent fatigue monitoring system [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2014, 35(8):2190-2198. (in Chinese)
- [11] Bai Shi, Li Xuan, Ou Jinping, et al. A wireless fatigue monitoring system utilizing a bio-inspired tree ring data tracking technique [J]. *Sensors*, 2014, 14(3):4364-4383.
- [12] Ren Peng, Zhou Zhi. Strain response estimation for fatigue monitoring of offshore truss structure [J]. *Pacific Science Review*, 2014, 16(1):30-36.
- [13] Kalman R E. A new approach to linear filtering and prediction problems [J]. *Journal of Basic Engineering*, 1960, 82(1):35-45.
- [14] Simon D. 最优状态估计——卡尔曼、 H_∞ 及非线性滤波 [M]. 张勇刚, 李宁, 奔粤阳, 译. 北京: 国防工业出版社, 2013:135-136.
- [15] Sanayei M, Saletnik M J G. Parameter estimation of structures from static strain measurements, I: formulation [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1996, 122(5):555-562.
- [16] Lee Y L, Pan J, Hathaway R B, et al. Fatigue testing and analysis theory and practice [M]. Burlington, USA: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005: 160-169.



第一作者简介:白石,男,1981年2月生,博士、工程师。主要研究方向为结构健康监测、结构疲劳分析等。曾发表《A wireless fatigue monitoring system utilizing a bio-inspired tree ring data tracking technique》(《Sensors》2014, Vol. 14, No. 3)等论文。

E-mail: stone3214@163.com

