

结合模态区间分析和 IARR 的不确定性损伤识别^{*}

方圣恩^{1,2}, 张宝¹

(1. 福州大学土木工程学院 福州, 350108)

(2. 福州大学土木工程防震减灾信息化国家地方联合工程研究中心 福州, 350108)

摘要 针对结构不确定性损伤识别中经典区间算法容易发生扩张的问题, 提出将模态区间分析和改进解析冗余度(improved analytical redundancy reduction, 简称 IARR)相结合的损伤识别方法。首先, 将结构静力平衡方程用约束条件方程组表示, 通过改进解析冗余度使得方程组仅包含平动变量; 其次, 把与假定损伤单元相关的方程集中在同一子集, 代入区间变量将方程扩展成区间形式, 通过模态区间运算判断各约束条件的满足情况来实现损伤定位; 最后, 采用静载作用下的试验钢梁验证所提出的方法, 结合刚度参数、挠度参数和外荷载 3 种随机变量, 建立各梁段约束条件方程。结果表明: 考虑测试误差、参数不确定性时, 能通过约束条件的不满足有效定位梁的小损伤。

关键词 不确定性损伤识别; 模态区间分析; 改进解析冗余度; 约束满足问题; 钢梁试验

中图分类号 O327; TU311

引言

结构健康监测与安全状态评估的核心内容之一是基于静动力响应测试数据来识别结构可能存在的损伤^[1], 但工程结构中总是存在不确定性因素, 导致确定性损伤识别方法实用性不强^[2]。为此, 在概率统计框架下考虑上述不确定性因素, 量化参数的不确定性^[3], 建立概率损伤识别过程, 是近几年的研究热点。具体来说, 可以采用随机有限元^[4], 通过对模型参数摄动式的随机模拟来获取参数的概率统计特征; 也可以基于统计模式识别^[5], 基于响应时程数据的统计特征构建表征结构状态的统计模式向量, 通过比较不同状态下的模式向量在特征空间的距离来判断损伤; 或者利用贝叶斯公式建立贝叶斯推断过程^[6], 基于结构参数先验分布和当前实测信息不断更新参数后验概率分布, 建立概率损伤指标来判断结构是否发生损伤。可以说, 概率统计理论在损伤识别实用化进程中非常重要。对几何尺寸大、构件数目和种类繁多、材料性能复杂的土木工程结构而言, 大样本量的实测数据在测试时间和成本上难以接受, 且工程上更关心的是结构参数和响应的上下界, 因此经典区间分析(classic interval analysis, 简称 CIA)的优势就得到了利用^[7-8]。

可以由包含不确定性的实测响应数据得到结构健康特征量, 并以区间量或区间向量的形式来表示^[8]。将结构不确定性量用有界区间数表示, 通过区间修正方法得到完好与损伤结构的区间模型, 根据损伤存在可能性指标判断结构各单元损伤情况^[9], 其单元刚度参数上下界可以由一阶泰勒级数展开式来表示^[10]。区间建模技术可以有效提取结构损伤特征, 与自适应神经模糊推断系统相结合, 可实现对结构损伤的快速诊断^[11]。但是, 传统的区间算法容易发生区间扩张, 使估计的参数区间范围大于真实区间, 造成识别结果精度不足。为此, 文献^[12]提出了模态区间分析(modal interval analysis, 简称 MIA)方法, 通过定义逻辑谓词和语义函数进行区间分析, 用不规范区间考虑了变量之间的相关性, 从而得出参数的精确区间包络线, 可以与响应面法相结合用于区间参数的识别^[13]。

约束满足问题(constraint satisfaction problem, 简称 CSP)^[14-15]用于损伤识别时需要测量节点或截面的转角位移, 虽然通过解析冗余度(analytical redundancy reduction, 简称 ARR)可以剔除转角未知量, 但无法实现损伤定位。笔者提出的改进解析冗余度方法可以仅用相对容易测量的位移或振型来判断结构是否发生损伤并定位, 分析过程无需构建结构数值模型并进行模型修正, 属于一

^{*} 国家自然科学基金资助项目(51578158); 福州大学“旗山学者”奖励支持计划资助项目(GXRC-1688)
收稿日期: 2017-12-30; 修回日期: 2018-11-15

种无模型的损伤识别方法。为了进一步考虑损伤识别中的不确定性,笔者将MIA和ARR相结合,提出模态区间约束条件和模态区间中心预处理方法,通过对比结构损伤前后参数区间约束条件变化情况,实现损伤定位。最后,用一根试验钢梁验证了所提出方法的可行性。

1 经典和模态区间分析

1.1 经典区间算法

CIA^[7]理论将 $[\underline{x}, \bar{x}] = \{x \in \mathbf{R} \mid \underline{x} \leq x \leq \bar{x}\}$ 称为实闭区间,记为 $x^I = [\underline{x}, \bar{x}]$,其中: \bar{x}, \underline{x} 为上、下界。上标 I 为区间数;所有实闭区间的集合记为 $I(\mathbf{R})$,相应地, n 维区间向量 $\mathbf{x}^I = (x_1^I, x_2^I, \dots, x_n^I)^T$,所有 n 维区间向量的集合记为 $I(\mathbf{R}^n)$ 。

区间宽度 W 和区间中心 O 定义为

$$W(x^I) = \bar{x} - \underline{x} \quad (1a)$$

$$O(x^I) = \frac{(\underline{x} + \bar{x})}{2} \quad (1b)$$

区间四则运算与传统数学运算法有显著区别^[7],函数 $f(x)$ 的区间运算过程通常都会发生区间扩张现象,即估计的 $f(x)$ 区间大于真实区间。例如:一元函数 $f_1(x) = x(10-x)$ 和 $f_2(x) = 10x - x^2$,二者在传统数学上完全一样,但若 x 为区间数 $x^I = [4, 6]$,则由区间运算可得 $f_1(x^I) = [16, 36]$, $f_2(x^I) = [4, 44]$,而准确的区间解为 $[24, 25]$,为前述计算的两个区间所包含,即发生了区间扩张现象,对 $f_2(x^I)$ 来说更严重。原因有两方面:a.函数区间分析过程中,表达式中同一变量 x^I 的两次出现被看作是两个完全独立的变量,从而产生了区间扩张;b.不同的函数表达式导致不同的扩张结果,这是由于区间的弱分配律和区间包含特性所致,且扩张程度会随着区间变量和运算次数增多而变大。

1.2 模态区间分析

MIA^[12]可以看作是CIA和模态逻辑理论的有机结合,利用模态逻辑谓词对区间进行语义学解释,从而得到符合模态逻辑语义解释的区间分析方法。若 $I(\mathbf{R}) := \{[a, b] \mid a, b \in \mathbf{R}, a \leq b\}$,引入存在量词 E 和全局量词 U ,则模态区间的规范化表示为

$$x^I = [a, b]^I = \begin{cases} ([a, b], E) & (a \leq b) \\ ([a, b], U) & (a > b) \end{cases} \quad (2)$$

其中: $([a, b], E)$ 为“规范区间”或“存在区间”; $([a, b], U)$ 为“不规范区间”或“全局区间”。

可见,通过引入逻辑谓词,使模态区间也具有绝对值相同、符号相反的区间(像实数那样),这是CIA所不具备的。具体应用上,MIA通过对偶算子Dual实现规范到不规范区间的变换,即 $\text{Dual}([a, b]) = [b, a]$,由此延伸出MIA中的两个理论。

1) 强制最优理论:模态扩展函数 $C(\mathbf{X})$ 为定义在模态区间向量 $\mathbf{X}' = (x'_1, x'_2, \dots, x'_n)$ 所包含的经典区间向量 $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 上的完全单调函数,每个 x'_i 都可以看作独立变量,则 \mathbf{X}' 可以扩展为 $\mathbf{X}'\mathbf{D}$ 。若 $\mathbf{X}'\mathbf{D}$ 中的任一变量与 \mathbf{X}' 单调性不一致,则将变量在 $C(\mathbf{X})$ 中作对偶Dual,由此计算出的结果将是精确区间解

$$f^*(\mathbf{X}') = C(\mathbf{X}'\mathbf{D}) = f^{**}(\mathbf{X}') \quad (3)$$

其中: f^* 和 f^{**} 为语义函数。

2) 部分强制最优理论:若 $C(\mathbf{X})$ 只对 \mathbf{X}' 中的部分 \mathbf{X} 完全单调,则对于完全单调的部分,若 $\mathbf{X}'\mathbf{D}$ 中的任一变量与 \mathbf{X}' 的单调性不一致,则将该单一变量在函数中作对偶。对于不完全单调的部分,对 \mathbf{X}' 不规范区间向量中除一个变量外的其余所有变量作对偶,将 $\mathbf{X}'\mathbf{D}$ 转化为 $\mathbf{X}'\mathbf{D}\mathbf{T}^*$,并对所计算结果取并集,由此计算出的结果将是近似区间解

$$f^*(\mathbf{X}') \subseteq$$

$$C(\mathbf{X}'\mathbf{D}\mathbf{T}_1^*) \cup C(\mathbf{X}'\mathbf{D}\mathbf{T}_2^*) \cdots \cup C(\mathbf{X}'\mathbf{D}\mathbf{T}_k^*) \quad (4)$$

其中: $\mathbf{X}'\mathbf{D}\mathbf{T}_k^*$ 为在 \mathbf{X}' 不规范区间向量中除第 k 个变量外,其余所有变量变换为对偶形式。

可见,MIA与CIA的运算规则类似,但MIA的四则运算法则中存在不规范区间,并在分析过程用不规范区间考虑了变量之间的相关性,有效避免了区间扩张,这也是MIA和CIA最大不同之处。仍以函数 $f_2(x) = 10x - x^2$ 在变量 $x = [4, 6]$ 时为例,CIA的计算结果为 $[4, 44]$,而MIA应用强制最优理论的计算结果为精确解 $[24, 25]$,由此可见后者有效解决了区间扩张问题。限于篇幅,此处不再详细介绍MIA,具体理论可参见文献^[12]。

2 不确定性损伤识别

2.1 约束满足问题及改进解析冗余度

CSP是人工智能领域的一个重要基本问题^[16],由一个变量集合和一个约束集合组成。经典CSP通过一个三元组 $[\mathbf{X}, \mathbf{D}, \mathbf{C}]$ 定义

$$\begin{cases} \mathbf{X} = \{X_1, X_2, \dots, X_n\} \\ \mathbf{D} = \{D_1, D_2, \dots, D_n\} \\ \mathbf{C} = \{C_1(x), C_2(x), \dots, C_m(x)\} \end{cases} \quad (5)$$

其中: \mathbf{X} 为 CSP 中变量集合; \mathbf{D} 为 \mathbf{X} 中各变量的取值域集合; \mathbf{C} 为约束条件集合, 可以定义为函数方程及不等式等。

若找到赋值 $X_1 = x_1, X_2 = x_2, \dots, X_n = x_n$, 使 \mathbf{C} 中所有约束条件都满足, 则集合 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 就是该 CSP 的一个解。损伤识别问题中, 当一个或多个 $C_i(x)$ 无法满足时, 就称为发生了不一致, 表示为

$$\forall x \in \mathbf{X} \{ \neg(C_1(x)) \vee \dots \vee (C_m(x)) \} \quad (6)$$

结构静力分析时, 可将结构刚度方程写成矩阵的形式

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{tt} & \mathbf{K}_{t\theta} \\ \mathbf{K}_{\theta t} & \mathbf{K}_{\theta\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta_t \\ \Delta_\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_t \\ \mathbf{P}_\theta \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{cases} \mathbf{K}_{tt}\Delta_t + \mathbf{K}_{t\theta}\Delta_\theta = \mathbf{P}_t \\ \mathbf{K}_{\theta t}\Delta_t + \mathbf{K}_{\theta\theta}\Delta_\theta = \mathbf{P}_\theta \end{cases} \quad (7)$$

其中: Δ_t 和 Δ_θ 分别为节点平动和转动位移; \mathbf{K}_{tt} 和 $\mathbf{K}_{\theta\theta}$ 对应平动和转动的部分刚度矩阵; 交叉项为 $\mathbf{K}_{\theta t} = \mathbf{K}_{t\theta}$; \mathbf{P}_t 和 \mathbf{P}_θ 为作用在结构上的集中荷载和力矩。

结构参数变量均包含在刚度(子)矩阵 \mathbf{K} 中, 即认为损伤引起的参数变化反映为刚度的降低。式(7)分解为方程组时就形成了 CSP, 每个方程代表 1 个约束条件。为消除难以实测的 Δ_θ , ARR 法以包含了 Δ_t, Δ_θ 的部分约束方程为基础, 假定 Δ_t 为已知量来表示 Δ_θ , 形成以 Δ_θ 为因变量的转换方程, 再代入剩余的 CSP 方程组中, 最终得到只含 Δ_t 的方程组^[15]。由于转换后方程组仍包含了与损伤单元相关的方程, 使所构造的 CSP 只能用于判断整体结构是否发生损伤, 无法进行损伤定位。

为此, 笔者提出了 IARR 方法, 预先假定可能损伤单元, 通过消除与 Δ_θ 相关的方程组, 剔除了与假定损伤单元相关的方程, 同时补充了与损伤单元无关的方程来形成新的 CSP 求解方程组

$$\mathbf{K}'_{tt}\Delta_t + \mathbf{K}'_{t\theta}\Delta_\theta = \mathbf{P}_\theta \quad (8a)$$

$$\mathbf{K}'_{\theta t}\Delta_t + \mathbf{K}'_{\theta\theta}\Delta_\theta = \mathbf{P}_\theta \quad (8b)$$

将式 8(b) 求解结果代入式 8(a) 中, 得到不包含 Δ_θ 方程组子集 $\mathbf{K}_i\Delta_t = \mathbf{P}_i$, 以此作为约束关系集合, 将结构损伤识别问题就变成一个只包含可测量 Δ_t 的 CSP, 展开式为

$$\begin{cases} C_1(x) : k_{t11}\Delta_{t1} + k_{t12}\Delta_{t2} + \dots + k_{t1n}\Delta_{tn} - P_{t1} = 0 \\ C_2(x) : k_{t21}\Delta_{t1} + k_{t22}\Delta_{t2} + \dots + k_{t2n}\Delta_{tn} - P_{t2} = 0 \\ \vdots \\ C_m(x) : k_{tm1}\Delta_{t1} + k_{tm2}\Delta_{t2} + \dots + k_{tmn}\Delta_{tn} - P_{tm} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

IARR 方法可以为每个结构单元建立相应的 CSP, 约束条件 $C_i(x)$ 根据其与假定损伤单元是否

相关分为 2 类: a. 无损约束条件 $\dot{C}(x)$, 与假定损伤单元无关; b. 有损约束条件 $\ddot{C}(x)$, 与假定损伤单元相关。结构在不同损伤状态下的约束条件满足情况如表 1 所示。约束条件满足时 ($C_i(x) = 0$) 记为真, True(T); 不满足时 ($C_i(x) \neq 0$) 记为假, False(F)。例如, 结构无损状态下各约束条件均为 T, 若假定单元发生损伤, 则与该单元无关的 $\dot{C}(x) = 0$, 为 T, 而相关的 $\ddot{C}(x)$ 此时不为 0, 即 F; 当损伤发生于非假定单元时, $\dot{C}(x)$ 不等于 0, 为 F, 而此时 $\ddot{C}(x) = 0$, 即 T。因此, 通过结构在不同状态下各单元对应的约束条件满足情况, 可以判断哪个单元发生损伤, 即实现损伤定位。

表 1 结构约束条件满足情况

Tab. 1 Satisfaction of structural constraints conditions

结构状态	约束条件	
	$\dot{C}(x)$	$\ddot{C}(x)$
无损	T($\dot{C}(x) = 0$)	T($\ddot{C}(x) = 0$)
假定单元发生损伤	T($\dot{C}(x) = 0$)	F($\ddot{C}(x) \neq 0$)
其余单元发生损伤	F($\dot{C}(x) \neq 0$)	T($\ddot{C}(x) = 0$)

2.2 结合 MIA 的不确定性损伤识别

实际工程结构参数 x 往往带有不确定性, 满足某一概率分布或处于一定取值范围, 后者可用区间数 x^l 表示, 此时相应的 CSP 约束条件方程也扩展成区间形式, 通过 MIA 计算判断约束条件是否满足, 即约束区间值是否包含 0 值。和表 1 类似, 结构区间约束条件如表 2 所示。

表 2 结构区间约束条件满足情况

Tab. 2 Satisfaction of structural interval constraints conditions

结构状态	约束条件	
	$\dot{C}(x^l)$	$\ddot{C}(x^l)$
无损	T($0 \in \dot{C}(x^l)$)	T($0 \in \ddot{C}(x^l)$)
假定单元发生损伤	T($0 \in \dot{C}(x^l)$)	F($0 \notin \ddot{C}(x^l)$)
其余单元发生损伤	F($0 \notin \dot{C}(x^l)$)	T($0 \in \ddot{C}(x^l)$)

除了结构参数不确定性, 实际测试中还存在仪器系统误差、测量噪声、环境温度湿度变化及人为因素等不确定性因素, 部分因素难以量化。分析过程若考虑过多的不确定性组合, 会导致求解的结构响应区间范围变得很大, 使结构发生较大程度损伤时才能被识别, 无法体现“早发现、早处理”的目标。分析中未考虑的不确定性因素也会使响应区间发生“偏差”, 表现为结构无损伤时响应区间不包含零值。为了在简化问题的同时避免上述“偏差”, 笔者采用区间中心 O (式(1)) 预处理结构在无损状态下的响应区间

$$\begin{cases} \dot{O}(\dot{C}^u(x^I)) = \frac{(\dot{C}^u + \overline{C}^u)}{2} \\ \ddot{O}(\ddot{C}^u(x^I)) = \frac{(\ddot{C}^u + \overline{C}^u)}{2} \end{cases} \quad (10)$$

其中:上标 u 表示无损(undamaged)。

以此 \dot{O} 和 \ddot{O} 值修正结构无损状态和损伤状态下的区间,得到修正区间式(11),用于结构损伤识别。

$$\begin{cases} \dot{C}^u(x^I) = [\underline{\dot{C}}^u - \dot{O}, \overline{\dot{C}}^u - \dot{O}] \\ \dot{C}^d(x^I) = [\underline{\dot{C}}^d - \dot{O}, \overline{\dot{C}}^d - \dot{O}] \\ \ddot{C}^u(x^I) = [\underline{\ddot{C}}^u - \ddot{O}, \overline{\ddot{C}}^u - \ddot{O}] \\ \ddot{C}^d(x^I) = [\underline{\ddot{C}}^d - \ddot{O}, \overline{\ddot{C}}^d - \ddot{O}] \end{cases} \quad (11)$$

具体的不确定性损伤识别流程如图 1 所示。

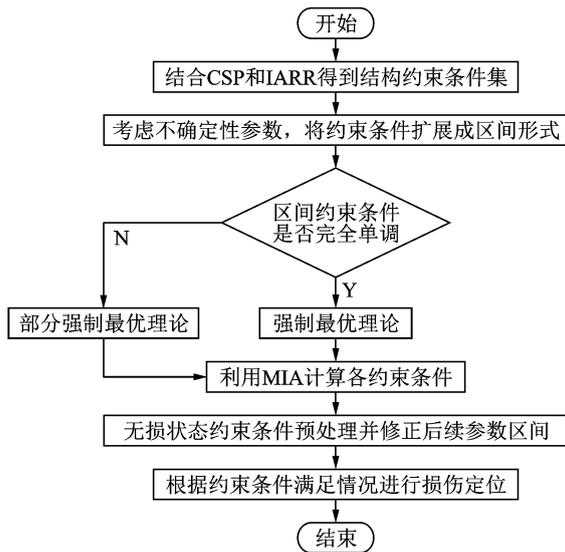


图 1 不确定性损伤识别流程

Fig. 1 Flow chart of uncertainty-based damage identification

3 钢梁试验算例

实际工程中监测处于交通生命线上桥梁结构的健康状态是十分必要的,而主梁又是桥梁主体结构中最关键和最常受损的构件。为结合工程实际并验证所提出的不确定性损伤识别方法,笔者实测了一根薄壁矩形截面钢梁,几何尺寸如图 2 所示。钢材实测屈服强度为 343 MPa,抗拉极限为 450 MPa,弹性模量为 202 GPa。试验通过在钢梁截面上切口来模拟损伤,采用千斤顶静力加载方式得到钢梁的挠度,作为目标响应。

3.1 钢梁计算模型和约束条件

静载试验时钢梁两端边界条件为简支,在距左

端支座 1/3 梁长处施加竖直向下的集中荷载 P 。试验前先建立钢梁的计算模型,将梁划分为 6 个识别区域(梁段),每个梁段对应的约束条件如图 3 所示。梁段划分长度根据识别精度要求来确定,刚开始可以先粗划分,确定可能发生损伤的梁段后,再针对此梁段进行细分,以准确定位损伤。弹性模量 E 、竖向挠度 d 及外荷载 P 为随机变量; E 的区间范围根据试验结果设为 $[190, 210]$ GPa; d 的不确定性根据千分表的精度设为 ± 0.001 mm; P 的不确定性力根据千斤顶的力传感器精度设为 ± 100 N。

限于篇幅,算例中假定梁段 4 发生损伤并建立该梁段的 CSP,相应的求解方程组和约束条件如表 3 所示。其中,支座处竖向位移为 0,故相应的约束条件 C_1, C_{13} 和竖向挠度变量 d_1, d_{13} 恒为 0,不在图表中列出。得到的约束条件方程为

$$\begin{aligned} \dot{C}_3 &= 1.26 \times 10^{-4} Ed_3 - 0.25P - 1.01 \times 10^{-4} Ed_5 + 2.52 \times 10^{-5} Ed_7 \\ \dot{C}_7 &= 0.292P + 1.22 \times 10^{-4} Ed_3 - 2.69 \times 10^{-4} Ed_5 + 3.74 \times 10^{-4} Ed_7 - 3.86 \times 10^{-4} Ed_9 + 2.69 \times 10^{-4} Ed_{11} \\ \dot{C}_8 &= 0.404P + 6.51 \times 10^{-5} Ed_3 - 9.74 \times 10^{-5} Ed_5 + 8.02 \times 10^{-5} Ed_7 - 4.87 \times 10^{-5} Ed_9 + 2.69 \times 10^{-5} Ed_{11} \\ \dot{C}_9 &= 3.36 \times 10^{-4} Ed_5 - 1.93 \times 10^{-4} Ed_3 - 1.08P - 3.95 \times 10^{-4} Ed_7 + 3.69 \times 10^{-4} Ed_9 - 2.35 \times 10^{-4} Ed_{11} \\ \dot{C}_{10} &= 0.108P + 1.93 \times 10^{-5} Ed_3 - 3.36 \times 10^{-5} Ed_5 + 4.95 \times 10^{-5} Ed_7 - 7.72 \times 10^{-5} Ed_9 + 7.39 \times 10^{-5} Ed_{11} \end{aligned}$$

其中: E, d 及 P 为区间变量(为简化表示,不作上标 I)。

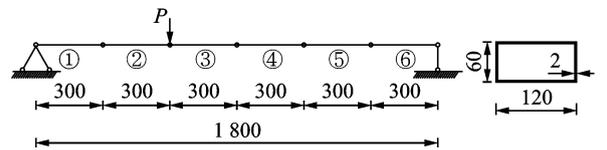


图 2 试验钢梁示意图(单位:mm)

Fig. 2 Schematic diagram of experimental steel beam (unit: mm)

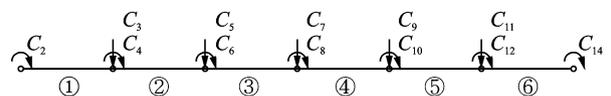


图 3 钢梁梁段划分及约束条件

Fig. 3 Segment division and corresponding constraints of steel beam

表 3 试验钢梁约束条件

Tab. 3 Constraints of experimental steel beam

项目	内容
假定损伤梁段	④
转角变量	$\theta_2, \theta_4, \theta_6, \theta_8, \theta_{10}, \theta_{12}, \theta_{14}$
竖向位移变量	$d_3, d_5, d_7, d_9, d_{11}$
用于求解的方程组	$C_2, C_4, C_5, C_6, C_{11}, C_{12}, C_{14}$
与损伤单元无关的约束条件方程	C_3
与损伤单元有关的约束条件方程	C_7, C_8, C_9, C_{10}

3.2 试验过程

试验加载系统由反力架、支座、油压千斤顶及力传感器等组成,如图 4 所示。按图 2 将梁划分为 6 段,除支座外的分段梁截面下共布置 5 个千分表。试验中钢梁在第 4 梁段中间截面转角处采用切割方式模拟单损伤(图 4 右上角),分为 3 种损伤程度逐步增加的工况,切割宽度均为 0.8 cm,长度分别为 1, 2 和 3 cm。值得注意的是,切割宽度仅为该梁段长度(300 mm)的 2.7%,3 种切口对箱梁截面惯性矩降低的程度分别为 1.4%,2.1%和 2.7%。可见,对钢梁来说是很小的损伤,目的是为了增加识别的难度。

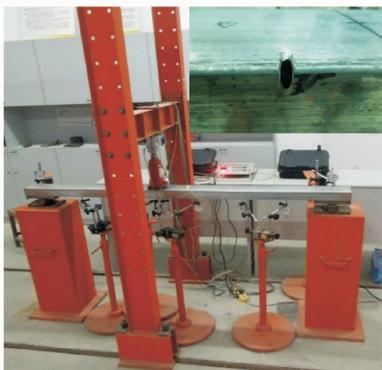


图 4 试验钢梁静力加载及损伤模拟

Fig. 4 Static loading and damage simulation of experimental steel beam

试验前首先进行预加载,以检查测量系统的稳定性并压实梁与支座、加载系统间的缝隙。正式加载时荷载步为 1 kN,逐步加载至 4 kN 后维持该荷载,并记录钢梁在无损伤状态下的挠度数据。然后,在预定位置切割,每个工况切割完毕后,记录钢梁在受损状态下的挠度。

3.3 损伤识别结果

结合梁计算模型和实测挠度数据进行了不确定性损伤识别过程,如表 4 所示。表中不仅列出与损

伤梁段 4 相关的 4 个约束条件 $C_7 \sim C_{10}$,也将无损梁段 1,2 的约束条件 C_3 进行对比。约束条件值为 T 说明无损伤,为 F 时说明发生损伤。由表 4 可见:a. $P < 4$ kN 的无损状态下, $C_3, C_7 \sim C_{10}$ 均为 T,表示梁未发生损伤,与实际情况相符;b. $P = 4$ kN、切割长度为 1 cm 时, $C_3, C_7 \sim C_{10}$ 均为 T,未能识别出该工况的损伤,可能是由于损伤程度太小所致;c. $P = 4$ kN、切割长度为 2 cm 时, C_{10} 为 F,说明梁存在损伤,损伤位置为第 4 或第 5 梁段(因为 C_{10} 为这两段共同的约束条件);d. $P = 4$ kN、切割长度增加到 3 cm 时, C_8 和 C_{10} 均变为 F,说明梁的损伤在增大,且此时可以确认损伤位置处于第 4 段。

表 4 静力损伤试验约束条件满足情况

Tab. 4 Scenarios of damages in static test

荷载/ kN	切口 宽度/ cm	切口 长度/ cm	切割 梁段	约束条件方程					梁状态
				C_3	C_7	C_8	C_9	C_{10}	
2	—	—	—	T	T	T	T	T	无损
3	—	—	—	T	T	T	T	T	无损
4	—	—	—	T	T	T	T	T	无损
4	0.8	1	—	T	T	T	T	T	无损
4	0.8	2	④	T	T	T	T	F	损伤
4	0.8	3	—	T	T	F	T	F	损伤

4 结 论

1) 通过引入模态逻辑谓词, MIA 能有效处理约束条件方程在 CIA 运算过程中单一变量多次出现所导致的区间扩张现象,大幅提高了区间估计精度。

2) IARR 法可以消除约束条件方程中难以测量的转角,使分析过程仅需要易于测量的挠度。同时通过调整约束条件方程的子集构成,使损伤定位得以实现。

3) 试验梁难免存在测量误差及系统参数不确定性的影响,但由于采用了区间中心预处理方法,使所提出方法具有一定的抗干扰能力。

4) 总体上, MIA, IARR 与 CSP 的有机结合,能够对不确定性因素影响下钢梁的小损伤进行定位,具有较好的理论和实用意义。

参 考 文 献

- [1] Farrar C R, Worden K. An introduction to structural health monitoring [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A-Mathematical Physical and Engi-

- neering Sciences, 2010, 365(1851): 303-315.
- [2] Simoen E, De Roeck G, Lombaert G. Dealing with uncertainty in model updating for damage assessment: a review[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2015, 56/57(56): 123-149.
- [3] 方圣恩,林友勤,夏樟华. 考虑结构参数不确定性的随机模型修正方法[J]. 振动、测试与诊断, 2014, 34(5): 832-837.
Fang Shengen, Lin Youqin, Xia Zhanghua. A stochastic model updating method considering the uncertainties of structural parameters[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2014, 34(5): 832-837. (in Chinese)
- [4] Xu Hao, Cheng Li, Su Zhongqing, et al. Damage visualization based on local dynamic perturbation: theory and application to characterization of multi-damage in a plane structure[J]. Journal of Sound and Vibration, 2013, 332(14): 3438-3462.
- [5] Ren Weixing, Lin Youqin, Fang Shengen. Structural damage detection based on stochastic subspace identification and statistical pattern recognition: I theory[J]. Smart Materials and Structures, 2011, 20(11): 115009.
- [6] Figueiredo E, Radu L, Worden K, et al. A Bayesian approach based on a Markov-chain Monte Carlo method for damage detection under unknown sources of variability[J]. Engineering Structures, 2014, 80: 1-10.
- [7] Moore R E, Kearfott R B, Cloud M J. Introduction to interval analysis[M]. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2009: 157-170.
- [8] 王永刚,张景绘. 区间算法在结构健康检查中的应用[J]. 振动与冲击, 2005, 24(4): 35-38, 43.
Wang Yonggang, Zhang Jinghui. Interval arithmetic for inspecting health of an existing structure[J]. Journal of Vibration and Shock, 2005, 24(4): 35-38, 43. (in Chinese)
- [9] 王晓军,杨海峰,邱志平. 结构损伤的非概率区间识别方法. 固体力学学报, 2010, 31(1): 94-100.
Wang Xiaojun, Yang Haifeng, Qiu Zhiping. Non-probabilistic interval identification method for structural damage[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2010, 31(1): 94-100. (in Chinese)
- [10] Wang Xiaojun, Yang Haifeng, Qiu Zhiping. Interval analysis method for structural damage identification based on multiple load cases[J]. Journal of Applied Mechanics, 2012, 79(5): 051010.
- [11] Zhu Futao, Wu Yunjie. A rapid structural damage detection method using integrated ANFIS and interval modeling technique [J]. Applied Soft Computing, 2014, 25: 473-484.
- [12] Gardenes E, Sainz M A, Jorba L, et al. Modal intervals[J]. Reliable Computing, 2001, 7(2): 77-111.
- [13] 骆勇鹏,黄方林,鲁四平,等. 不确定性参数识别的模态区间逆响应面法[J]. 振动、测试与诊断, 2016, 36(5): 979-983.
Luo Yongpeng, Huang Fanglin, Lu Siping, et al. Modal interval inverse response surface method for uncertain parameter identification[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2016, 36(5): 979-983. (in Chinese)
- [14] Casas J R, Matos J C, Figueiras J A, et al. Bridge monitoring and assessment under uncertainty via interval analysis[C]//2005 Proceedings of the Ninth International Conference on Structural Safety and Reliability. Rome, Italy: [s. n.], 2005: 487-494.
- [15] García O, Vehí J, E Matos J C, et al. Structural assessment under uncertain parameters via interval analysis[J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2008, 218(1): 43-52.
- [16] Russell S J, Norvig P. Artificial intelligence: a modern approach[M]. 3rd ed. [S. l.]: Prentice Hall, 2010: 202-233.



第一作者简介:方圣恩,男,1980年8月生,博士、教授。主要研究方向为结构健康监测与损伤识别。曾发表《An interval model updating strategy using interval response surface models》(《Mechanical Systems and Signal Processing》2015, Vol. 60/61)等论文。
E-mail: shengen.fang@fzu.edu.cn