

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.07.010

基于遗传算法的高速铁路桥梁损伤识别

杨宏印^{1,2}, 张威¹, 曹鸿猷³, 吴楠昊¹, 刘章军¹

(1. 武汉工程大学 土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430073; 2. 桥梁结构健康与安全国家重点实验室, 湖北 武汉 430034; 3. 武汉理工大学 土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070)

摘要:针对高速铁路桥梁结构服役局部损伤问题,文章提出一种改进损伤识别因子并结合遗传算法的损伤识别方法。推导了任意单元长度组合的车辆-轨道-桥梁耦合单元及其动力方程,遗传算法采用锦标赛策略及最优保存策略 2 种选择算子,引入灾变及邻域搜索机制。通过对不同损伤工况进行多次独立重复计算,对算法的稳定性与准确性进行统计分析。结果表明:在信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)大于 25 dB 时,识别效果好,极少数误判的结果大概率存在于真实损伤位置的附近或对称处;与单个单元损伤情况相比,多个单元损伤工况平均第一次出现最优解的迭代次数略高,但整体都偏低;SNR 与识别率(identification rate, IR)呈“扁 S”型 Logistic 曲线关系。

关键词:车辆-轨道-桥梁耦合系统;动力响应;损伤识别;遗传算法;高斯白噪声

中图分类号:U446.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2024)07-0925-07

Damage identification of high-speed railway bridge based on genetic algorithm

YANG Hongyin^{1,2}, ZHANG Wei¹, CAO Hongyou³, WU Nanhao¹, LIU Zhangjun¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430073, China; 2. State Key Laboratory for Health and Safety of Bridge Structures, Wuhan 430034, China; 3. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: Aiming at the problem of local damage in service of high-speed railway bridge structure, this paper proposes a damage identification method based on improved damage identification factor and genetic algorithm. The train-rail-bridge coupling element and its dynamic equation of arbitrary element length combination are derived. The genetic algorithm adopts two selection operators, tournament strategy and optimal preservation strategy, and introduces disaster and neighborhood search mechanism. The stability and accuracy of the algorithm are analyzed statistically by repeated calculation of different damage conditions. The results show that when the signal-to-noise ratio(SNR) is greater than 25 dB, the identification effect is good, and a small number of misjudgments have a high probability of being near or symmetric to the real damage location. Compared with the damage condition of a single unit, the average number of iterations of the first optimal solution in multi-unit damage conditions is slightly higher, but the overall number is lower. SNR and identification rate(IR) form a flat S-shaped Logistic curve relationship.

Key words: train-rail-bridge coupling system; dynamic response; damage identification; genetic algorithm; white Gaussian noise

收稿日期:2021-11-16; **修回日期:**2022-01-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51708429);湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队计划资助项目(T2020010);武汉市城乡建设局科技计划资助项目(201919);武汉工程大学第十三届研究生教育创新基金资助项目(CX2021120)和桥梁结构健康与安全国家重点实验室开放课题资助项目(2017-04-GF)

作者简介:杨宏印(1986—),男,湖北荆门人,博士,武汉工程大学副教授,硕士生导师,通信作者, E-mail: yhyhust@163.com; 曹鸿猷(1986—),男,湖北黄冈人,博士,武汉理工大学教授,硕士生导师; 刘章军(1973—),男,湖北黄冈人,博士,武汉工程大学教授,博士生导师。

随着高速铁路的发展,高速列车的冲击加速了桥梁结构的损伤和积累,如何实现快速、经济且准确的状态评估与损伤识别是交通基础设施管理中亟待解决的关键问题^[1]。

多数学者在利用动力响应进行损伤识别方面开展了研究工作。文献[2]采用延时矢量方差算法,通过分析实测动态响应的非线性特征来识别移动车辆荷载作用下桥梁的损伤;文献[3]利用希尔伯特变换从移动车辆响应中提取出高空间分辨率的损伤桥梁振型,提出一种基于间接法识别的桥梁振型的损伤定位指标。该方法具有空间分辨率高、振型识别效率高的特点,且不需要无损桥梁的参考振型。但文献[2-3]模型中车速较慢,在一定程度上限制了实际应用空间。文献[4]考虑到损伤识别过程中有限元模型的误差和测量噪声的不确定性,提出一种基于状态空间域动态响应灵敏度的统计损伤识别方法,数值结果表明所提的统计方法优于蒙特卡洛(Monte Carlo)法;文献[5]以桥梁位移响应的小波相关性构造目标函数,提出一种基于有限元模型修正理论的简支梁桥损伤分步评估方法;文献[6]使用小波包变化对单点加速度动力响应进行分解和重构,提出连续梁桥结构的损伤识别指标和方法。文献[5-6]在理论上证明只需设置一个测点即可定位结构损伤,解决桥梁结构检测中需布置多个测点的问题。但文献[4-6]均以移动力模型出发进行分析,未考虑到惯性力的影响。文献[7]基于移动车辆动力响应采用遗传算法实现桥梁结构不同损伤状态的识别,分析初始种群数量及搜索空间对算法识别率(identification rate, IR)的影响,但未考虑不同噪声影响,未对多个桥梁单元的损伤进行分析。

当前在不影响正常行车条件下对高速铁路桥梁进行损伤识别的研究较少。针对高速铁路桥梁局部损伤识别问题,在满足精度前提下,以较大单元长度划分桥梁。考虑多个单元损伤和噪声影响,通过降低桥梁不同单元的刚度,选用 5 辆列车编组以 270 km/h 的速度通过简支梁,采用改进的遗传算法对桥梁进行损伤识别。

1 高速铁路车辆-轨道-桥梁耦合振动方程

整个耦合系统共分为车辆、轨道-桥梁系统。将无砟轨道考虑为连续弹性支承梁轨道模型^[8],并采用直接刚度法对轨道和桥梁进行耦合,车辆和轨道系统之间通过 Hertz 接触理论进行联系。车辆系统按照文献[9]考虑,共 10 自由度。在考

虑各种耦合关系及不平顺的情况下,对结构进行离散化处理,得到的任意长度组合的耦合单元如图 1 所示。

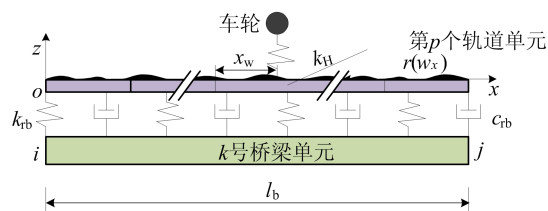


图 1 任意长度组合的耦合单元

1.1 车辆-轨道垂向耦合关系

根据线性化的 Hertz 弹性接触理论,采用切线斜率法求解压缩刚度 k_H ^[10]为:

$$k_H = \frac{d[P(t)]}{d[\Delta z(t)]} = \frac{3}{2G} P_0^{1/3} \quad (1)$$

其中: G 为轮轨接触常数,取 $G = 3.86R^{-0.115} \times 10^{-8} \text{ m/N}^{2/3}$; R 为车轮滚动圆半径; P_0 为车辆静轴重。

轮轨接触点的法向弹性压缩量为:

$$\Delta z(t) = z_w(t) - z_r(x_w, t) - r(x_w) \quad (2)$$

其中: $z_w(t)$ 为 t 时刻车轮垂向位移大小; $z_r(x_w, t)$ 为 t 时刻车轮作用大小; x_w 处的轨道垂向位移大小; x_w 为车轮的位置; $r(x_w)$ 为车轮作用 x_w 处的不平顺数值。

车轮接触点上的轨道垂向位移可由轨道单元节点位移向量 \mathbf{z}_r^c 和对应的三次 Hermite 插值形函数得到,即

$$\begin{cases} z_r(x_w, t) = \mathbf{N}_{x=x_w} \mathbf{z}_r^c \\ \mathbf{z}_r^c = [z_{r1} \quad \phi_{r1} \quad z_{rj} \quad \phi_{rj}]^T, \\ \mathbf{N} = [N_1 \quad N_2 \quad N_3 \quad N_4], \\ N_1 = 1 - 3(x/l)^2 + 2(x/l)^3, \\ N_2 = x(1 - x/l)^2, \\ N_3 = 3(x/l)^2 - 2(x/l)^3, \\ N_4 = x((x/l)^2 - x/l) \end{cases} \quad (3)$$

其中: \mathbf{N} 为轨道和桥梁单元位移的三次 Hermite 插值向量; l 为单元长度。

轮轨间接触力可表示为:

$$F_{in} = -a_{in} k_H \Delta z(t) \quad (4)$$

其中, $a_{in} = \begin{cases} 1, & \Delta z(t) \geq 0; \\ 0, & \Delta z(t) < 0. \end{cases}$

1.2 桥梁单元方程

桥梁单元动力方程为:

$$\mathbf{M}_b^c \ddot{\mathbf{z}}_b^c + \mathbf{C}_b^c \dot{\mathbf{z}}_b^c + \mathbf{K}_b^c \mathbf{z}_b^c = \mathbf{P}_b^c - \int_0^{l_b} \mathbf{N}_b^T q_b(x, t) dx \quad (5)$$

引入车辆系统时,只需在式(15)中增加相应的维度。使用“对号入座”法则^[11]进行组装,形成整体矩阵,得到车辆-轨道-桥梁耦合时变系统的动力方程组,进而选用 Newmark- β 法进行求解。

2 算例验证

选取文献[12]的算例来验证任意长度组合的耦合单元计算方法及自编程序的正确性,采用 12 辆列车编组,以 374 km/h 的速度通过 6 跨简支梁为例。与文献[12]结果比较,取本文模型中的过渡段长度为 0,桥梁单元取 3 m,桥梁阻尼比取 0.18,轨道单元为 0.6 m,桥梁、轨道及列车的其他参数见文献[12]。本文计算结果与文献[12]结果对比如图 2 所示,可见两者幅值和趋势基本一致,验证了本文方法及程序的正确性。

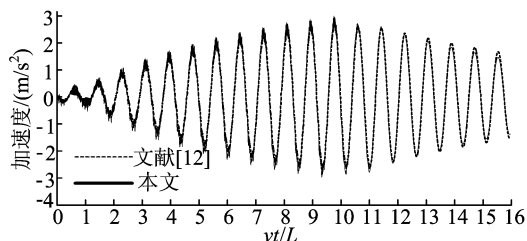


图 2 简支梁跨中垂向振动加速度对比

3 遗传算法

遗传算法是建立在自然选择和种群遗传基础上的迭代进化,具有广泛适用性的随机性优化搜索方法。基本遗传算法局部搜索能力差,容易陷入局部最优、退化等情况,本文对此进行了改进。

3.1 选择

采用锦标赛策略及保存最优策略 2 种方式。保存最优策略主要优点为历代以来出现最优个体不被丢弃,出现退化现象。

1) 锦标赛策略选择。从种群中随机选择 m 个个体比较适应度,选取最优个体作为父代进行交叉、变异操作,重复 N 次。

2) 保存最优策略选择。从当前的群体中选取最优父代,不进行交叉、变异操作,直接复制到下一代。

3.2 灾变

如前所述,基本遗传算法容易陷入局部最优。若提高初始种群数量,必然会增加大量的求解时间,故使用灾变算子,提高其种群多样性。灾变算子简洁步骤如下:① 灾变次数初始化;② 当前进

化阶段进行交叉变异后,评估种群适应度,进行排序;③ 随机生成 m 个数量的个体用于替换当前适应度靠后个体,直至达到最大灾变次数。

3.3 邻域搜索

为了提高局部搜索能力,在种群进化到若干代后,对当前最优解的所有变量依次进行加 1、减 1 操作,然后评估适应度,择优选取。

3.4 改进的损伤识别因子及适应度函数

采用的适应度函数源于模态置信准则,把加速度曲线视为桥梁的振型,越接近真实损伤。MAC(message authentication codes)值越接近于 1,OBJ(object)值越接近于 0。为充分利用各个测点的监测数据,对每个测点赋予 1 个权重系数。

$$N_{\text{MAC}} = \frac{(\mathbf{a}_{ci}^T \mathbf{a}_{ti})^2}{(\mathbf{a}_{ti}^T \mathbf{a}_{ti})(\mathbf{a}_{ci}^T \mathbf{a}_{ci})} \quad (16)$$

$$N_{\text{OBJ}} = \sum_{i=1}^m \frac{\omega_i (1 - \sqrt{N_{\text{MAC}}})^2}{N_{\text{MAC}}} \quad (17)$$

其中, ω_i 、 \mathbf{a}_{ti} 、 \mathbf{a}_{ci} 分别为第 i 个测点位置的权重系数、加速度实测值以及计算值。

3.5 高斯白噪声

高斯白噪声的概率密度函数满足正态分布统计特性,同时其功率谱密度函数是常数的一类噪声。实测数据是在某种损伤状态下使用有限元模型计算值添加一定的高斯白噪声来进行模拟^[13],具体表达式为:

$$\mathbf{a}_{ti} = \mathbf{a}_{ci} + \mathbf{a}_{ci, \max} n_{\text{rand}} s_n \quad (18)$$

其中: n_{rand} 是均值为 0、方差为 1 的高斯白噪声; s_n 为噪声程度,与信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)之间的转换见文献[14]。

4 数值算例

为统计分析所提损伤识别方法的稳定性与准确性,以 32 m 简支梁为例,考虑轨道随机不平整,如图 3 所示。

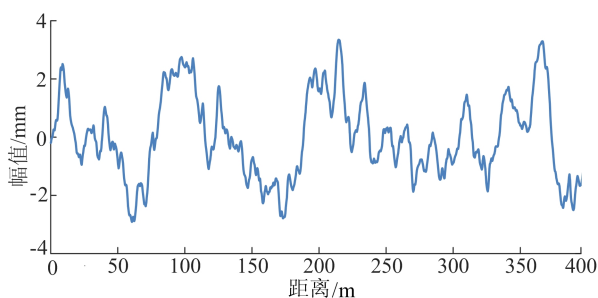


图 3 轨道垂向不平整样本

采用 5 辆列车编组以 270 km/h 的速度通

过简支梁,全系统模型如图 4 所示。使用遗传算法进行 500 次独立重复计算分析。计算采

用的轨道、车辆参数参考文献[8],桥梁参数见表 1 所列。

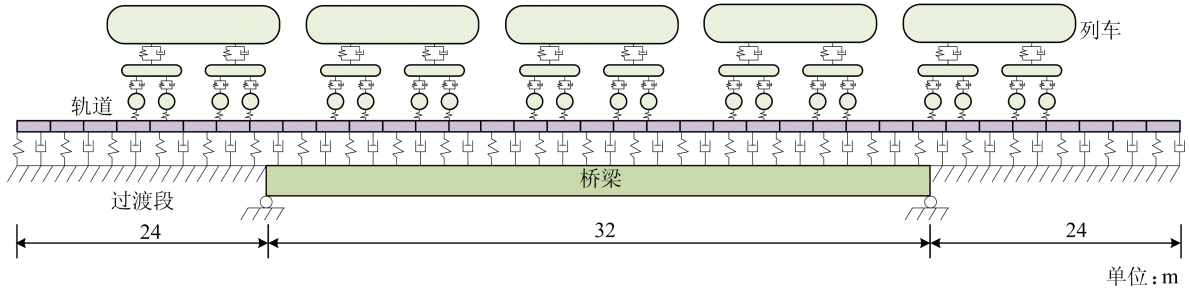


图 4 车辆-轨道-桥梁耦合系统模型

表 1 桥梁简支梁参数

参数	数值
跨度 L_B/m	32
弹性模量 E_b/GPa	34.5
惯性矩 I_b/m^4	11.1
线密度 $\rho/(10^3 \text{ kg/m})$	43.63
梁单元长度 l/m	1.6

4.1 单个单元损伤识别

考虑噪声影响,用信噪比 R_{SN} 表示,1 个单元的损伤,其位置及损伤程度均未知。搜索空间包含 $C_{20}^1 \times 5 = 100$ 个元素,搜索空间较小,识别速度较快。为了研究该算法对单个单元损伤的识别效果,统计识别率 R_1 和平均第 1 次出现最优解迭代次数 n_{ANS} ,在工况下进行分析,具体工况见表 2 所列,识别结果如图 5、图 6 所示。

表 2 单个单元工况 1~工况 5 损伤信息及 R_1

工况	损伤单元	损伤程度/%	R_{SN}/dB	$R_1/\%$	n_{ANS}
1	1	2	25	99.4	2.157
2	10	2	25	99.2	2.618
3	1	4	25	100.0	2.146
4	10	4	25	100.0	2.543
5	10	2	20	93.8	2.623
6	10	2	15	78.0	2.535

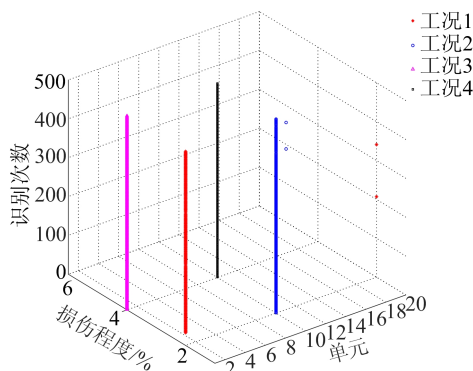


图 5 工况 1~工况 4 损伤识别结果

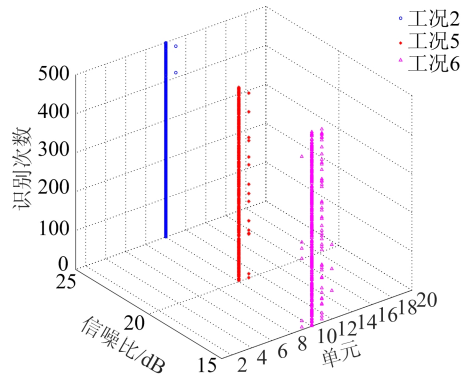


图 6 工况 2、工况 5、工况 6 损伤识别结果

由图 5 可知:总体上该算法对桥梁单个单元损伤识别准确率较高,只有工况 1、工况 2 有部分点发生对称或邻近飘逸,且桥梁中部损伤识别稳定性略低于桥梁端部;对于工况 1~工况 4, R_1 均逐渐增长,说明仅是桥梁发生较小损伤后会出现误判,当桥梁损伤程度较大时,该算法能以极高概率正确识别。

由图 6 可知, R_{SN} 越高, R_1 也就越高,当 $R_{SN} \geq 25 \text{ dB}$ 时,识别效果较好。工况 1~工况 6 平均第 1 次出现最优解迭代次数不大于 3,说明该算法能迅速找到最优值,能快速收敛。

出现该种误判情况,原因归结如下:① 损伤程度相同时,端部单元损伤对桥梁跨中加速度的时间历程曲线影响相对于桥梁中部较小,相应地,添加的噪声影响也就愈小;② 简支梁是对称结构,真实位置损伤与对称或邻近位置损伤造成的桥梁跨中加速度动态响应相差较小;③ R_{SN} 越高,噪声影响越小,对算法的识别干扰性就越小。

说明采用该算法要保证采集仪器的精确性和测试方法的准确性;识别结果为较小损伤时,判断是否由对称或邻近位置损伤误判所致;对单个单元损伤识别,保证 $R_{SN} \geq 25 \text{ dB}$ 即可。

4.2 多个单元损伤识别

以 2 个单元损伤为例说明,其位置及损伤程度均未知,搜索空间包含 $C_{20}^2 \times 5^2 = 4\ 750$ 个元素。此时,搜索空间急剧变大,故计算时间相应增多,工况 7~工况 10 损伤情况见表 3 所列,工况 7~工况 10 的识别结果分别如图 7~图 10 所示。

表 3 多个单元工况 7~工况 10 损伤信息及 R_1

工况	损伤单元	损伤程度/%	R_{SN}/dB	$R_1/\%$	n_{ANS}
7	1	2	25	99.4	6.536
	2	2			
8	1	2	25	98.4	5.894
	20	2			
9	1	2	25	97.2	4.846
	10	2			
10	10	2	25	99.6	5.425
	11	2			

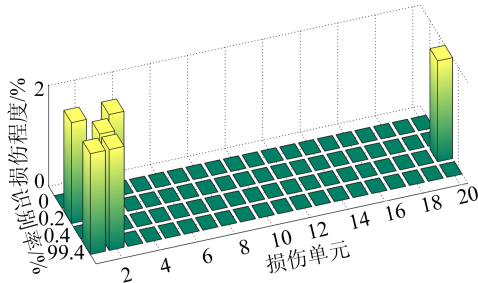


图 7 工况 7 识别结果

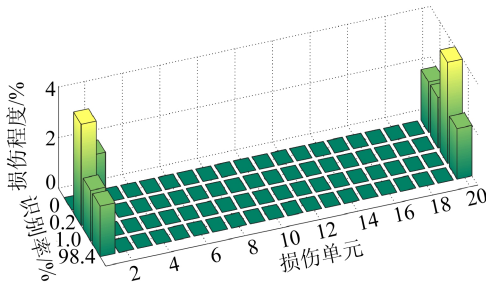


图 8 工况 8 识别结果

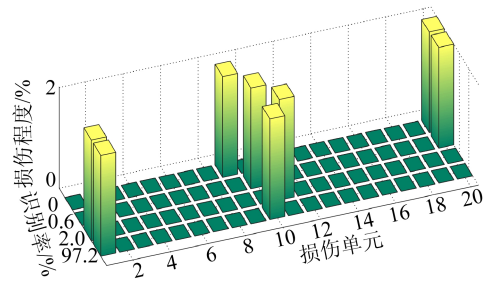


图 9 工况 9 识别结果

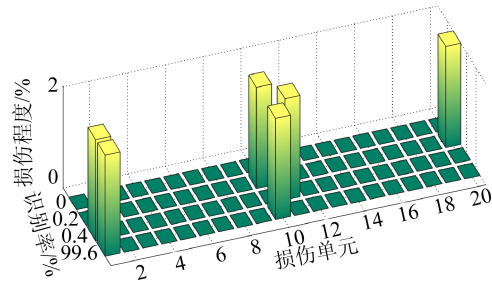


图 10 工况 10 识别结果

从工况 7~工况 10 可以看出,算法对多个单元识别成功率较高,具有共同的特点,以工况 9 为例有 481 次识别为 1 号单元损伤 2%,10 号单元损伤 2%,记为 481 # 1&2%、10&2%,下同。15 # 1&2%、11&2%; 3 # 10&2%、20&2%; 1 # 10&2%、20&2%。其识别结果都包络真实损伤位置附近及其对称处,出现误判的识别结果都与真实损伤情况十分接近,与单个单元出现误判的原因一致。

为了分析噪声对多个单元损伤识别的影响,分别更改工况 7~工况 10 中的 R_{SN} ,其余条件不变,建立工况 11~工况 14,对识别率 R_1 进行统计分析,结果见表 4 所列,并进行 Logistic 曲线拟合处理,如图 11 所示。

表 4 不同 R_{SN} 下各 R_1 统计结果

R_{SN}/dB	-5	0	5	10	15	20	25	30
工况 11	1.8	4.6	13.4	29.8	61.8	88.8	99.4	100.0
工况 12	10.0	20.4	36.0	50.0	76.6	89.0	98.4	100.0
工况 13	0.2	0.8	3.4	15.4	43.6	82.0	97.2	100.0
工况 14	0	1.0	7.4	32.6	70.0	96.8	99.6	100.0

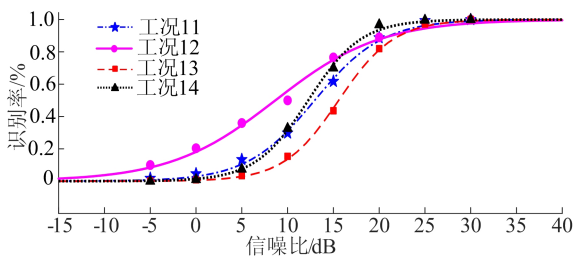


图 11 R_{SN} 与 R_1 曲线关系

$$R_1 = \frac{1}{1 + p \exp(qR_{SN})} \quad (19)$$

式(19)为信噪比 R_{SN} 和识别率 R_1 的拟合 Logistic 曲线形式,各工况拟合系数及拟合优度指标见表 5 所列,由表 5 可知,拟合效果较好。从图 11 可以看出, R_{SN} 越高, R_1 也就越高,当 R_{SN} 大于 25 dB 时,识别效果较好,具有良好的鲁棒性。

(下转第 985 页)

- ance analysis of concrete-filled steel tubular single pylon cable-stayed bridge with swivel construction[J]. IOP Conference Series (Earth and Environmental Science), 2019, 218 (1):1-6.
- [8] SHAO J H, DUAN M J, YANG W, et al. Research on the critical technique of synchronous rotation construction with large angle for T-shape curve rigid frame bridge[J]. Scientific Reports, 2022, 12(1):1-16.
- [9] 王立峰,王二强,孙永存,等.万吨级斜拉桥转体施工过程的力学特性[J]. 交通运输工程学报, 2015, 15(3):52-61.
- [10] 牛远志,李恒跃,全伟,等.超大吨位斜拉桥水平转体铰型式研究[J]. 铁道工程学报, 2015, 32(6):34-39, 56.
- [11] WANG J W, SUN Q S. Experimental research on com-

- pressive strength of UHPC spherical hinge[J]. International Journal of Structural Integrity, 2019, 11 (2): 354-378.
- [12] 许超,王常峰,窦国昆,等.桥梁转体施工临时支座的设计与抗倾覆稳定性分析[J]. 铁道建筑, 2018, 58(11):50-52, 62.
- [13] 张聪聪. 转体桥球铰稳定与施工模拟分析[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2016.
- [14] 颜惠华,王长海,罗力军. 桥梁转体施工中球铰静摩擦系数计算方法[J]. 世界桥梁, 2015, 43(4):74-78.

(责任编辑 张 镛)

(上接第 930 页)

表 5 拟合系数及拟合优度指标

工况	系数 p	系数 q	相关系数	误差平方和
11	33.160	-0.270 3	0.997 5	0.003 2
12	187.200	-0.336 2	0.991 9	0.007 3
13	4.537	-0.174 8	0.998 8	0.001 8
14	69.910	-0.346 8	0.998 9	0.001 5

5 结 论

为不影响高速铁路正常行车条件,针对高速铁路桥梁结构服役局部损伤问题,本文提出一种改进损伤识别因子并结合遗传算法的高速铁路桥梁损伤识别方法。在遗传算法中采用锦标赛策略和保存最优策略联合选择算子,引入灾变和邻域搜索机制,通过数值算例,验证了所提方法的可行性和正确性,并得到如下结论。

1) 从整体上看,在信噪比 R_{SN} 大于 25 dB 时,识别效果好;从局部上看,极少数误判的结果大概率存在于真实损伤的附近或对称处。

2) 与单个单元损伤情况相比,多个单元中平均第 1 次出现最优解的迭代次数略高,但整体偏低,说明算法收敛较快。

3) R_{SN} 与 R_I 呈“扁 S”型 Logistic 曲线关系。开始阶段 R_I 成指数增长,到达一定程度后变得饱和,最后稳定在 1.0 时停止增长。

[参 考 文 献]

- [1] 杨永斌,王志鲁,史康,等.基于车辆响应的桥梁间接测量与监测研究综述[J]. 中国公路学报, 2021, 34(4):1-12.
- [2] ZHU J, ZHANG Y. Damage detection in bridge structures under moving vehicle loads using delay vector variance

method[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2019, 33(5):04019049.

- [3] 贺文字,何健,任伟新.基于间接法识别的桥梁振型的损伤定位方法[J]. 振动与冲击, 2018, 37(24):13-17.
- [4] MAO L, WENG S, LI S J, et al. Statistical damage identification method based on dynamic response sensitivity[J]. Journal of Low Frequency Noise Vibration and Active Control, 2018, 39(3):560-571.
- [5] 闫宇智,战家旺,张楠,等.基于小波相关性的简支梁桥损伤评估方法[J]. 振动与冲击, 2018, 37(12):67-74.
- [6] 孙增寿,李晓鹏,韩培琰,等.基于小波包样本熵的连续梁桥损伤识别[J]. 振动·测试与诊断, 2018, 38(5):916-921, 1077-1078.
- [7] 毛云霄,王英杰,肖军华,等.基于过桥车辆响应的遗传算法桥梁损伤识别[J]. 振动·测试与诊断, 2018, 38(4):696-703, 869.
- [8] LOU P, ZENG Q Y. Formulation of Equations of motion of finite element form for vehicle-track-bridge interaction system with two types of vehicle model[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2005, 62(3): 435-474.
- [9] 朱志辉,龚威,张磊,等.基于分离迭代和耦合时变的列车-轨道-桥梁耦合系统高效动力分析混合算法[J]. 中国铁道科学, 2018, 39(1):66-74.
- [10] 朱志辉,王力东,龚威,等.多种垂向轮轨关系的对比及改进的车-线-桥系统迭代模型的建立[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(6):1585-1593.
- [11] 娄平,曾庆元.车辆-轨道-桥梁系统竖向运动方程的建立[J]. 铁道学报, 2004, 26(5):71-80.
- [12] YANG Y B, YAU J D. Resonance of high-speed trains moving over a series of simple or continuous beams with non-ballasted tracks[J]. Engineering Structures, 2017, 143:295-305.
- [13] 曹晖,秀萍.构损伤识别中噪声的模拟[J]. 振动与冲击, 2010(5):106-109.

(责任编辑 吴 亮)