

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2020.06.004

基于布谷鸟搜索算法的动载荷识别

高文静, 周焕林, 陶 然

(合肥工业大学 土木与水利工程学院, 合肥 230009)

摘要: 工程结构经常受到动荷载的作用, 对结构产生不利的影响。为了准确有效地获取结构承载状态, 提出了基于 Newmark- β 法的布谷鸟搜索算法识别动载荷。该算法将时间离散成若干个时间步, 采用 Newmark- β 法对离散后系统的运动方程求解, 得到动载荷作用下的结构响应; 然后将动载荷响应作为优化变量, 以计算响应和测量响应之间的差异为目标函数, 利用布谷鸟搜索算法最小化目标函数, 实现动载荷的反演。为了验证算法的准确性和有效性, 以受动态载荷作用的简支桥梁为例进行反演, 分别讨论了鸟巢数量、测点位置、测点数量以及测量噪声对反演结果的影响。数值算例表明, 该方法可准确有效地反演动载荷。

关键词: 反问题; 桥梁; 动载荷识别; Newmark- β 法; 布谷鸟搜索算法

中图分类号: TU311

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2020)06-030-10

Dynamic load identification based on the cuckoo search algorithm

GAO Wenjing, ZHOU Huanlin, TAO Ran

(School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, P. R. China)

Abstract: Engineering structures are often subjected to dynamic loads, which have negative influence on the structures. In order to accurately and effectively detect the load states of structures, a cuckoo search (CS) algorithm based on the Newmark- β method is developed to identify dynamic loads. Firstly, the time is discretized into several time steps, and the discretization equation of motion is obtained. The motion equation of the discrete motion system is solved and the response of the structure under dynamic load is calculated by the Newmark- β method. Secondly, the dynamic response is selected as the optimization variable. The objective function of the dynamic load identification problem is defined as the difference between the calculated response and the measured response of the dynamic load. The dynamic load is determined through minimization of the objective function with the CS algorithm. Finally, a simply supported beam bridge subjected to dynamic load is taken as an example to verify the accuracy and effectiveness of the algorithm. The effects of the nest number, the locations of measurement points, the number of measurement points and the measurement noise on the inversed results are discussed in numerical examples. The results show that the CS algorithm can be an accurate and effective inverse system method for dynamic load identification.

收稿日期: 2020-01-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11672098)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (11672098).

作者简介: 高文静(1995—), 女, 硕士研究生, 研究方向为动载荷识别, (E-mail)1300694494@qq.com。

通讯作者: 周焕林, 男, 博士, 教授, 研究方向为计算力学和结构工程, (E-mail)zhouhl@hfut.edu.cn。

Keywords: inverse problem; bridge; dynamic load identification; Newmark- β method; cuckoo search algorithm

振动是一类复杂的动力学问题,在实际工程中大量存在。船舶、飞机、航天器、车辆和桥梁等结构经常受到各种激励的作用产生振动,振动会对这些结构产生不利的影响。在结构安全性和可靠性研究中,分析结构所受的动态载荷具有重要意义。但是,受到经济和技术等多方面条件的限制,通过直接测量很难得到结构所受的动态载荷。如何快速准确地反演施加在结构上的动态载荷成为了工程实际中迫切需要解决的一个关键问题。

动态载荷识别问题属于结构动力学第二类反问题,它是根据已知的结构系统参数和响应来反演外部动态载荷。各国学者对反演动态载荷做了大量的研究,将多种反演算法应用于该问题求解,例如共轭梯度法^[1]、最小二乘 QR 分解法^[2]、广义截断奇异值分解法^[3]等。Wang 等^[4]改进了正则化算子,构造了一种新的正则化方法,反演了复合材料圆柱壳表面的多源动载荷;Xu 等^[5]提出了不完全测量激励的加权自适应最小二乘估计法,通过在目标函数中引入加权正定矩阵和利用先前迭代信息的学习系数来提高算法的收敛性能;Ma 等^[6]提出了一种基于 L 曲线准则的同伦方法,并与传统方法和 Tikhonov 正则化法的精度与效率进行了比较;Li 等^[7]提出了一种新的基于格林函数法和正交多项式拟合技术的结构动态载荷重构方法;Liu 等^[8]用插值的方法构造动载荷的各类形函数,利用奇异值分解法分析整体核函数矩阵的不适定性,实现动载荷的反演;Law 等^[9]提出了一种基于测得的简支梁的弯矩和加速度响应的时域法来识别车辆的轴重;Chen 等^[10]对共轭梯度法和预处理共轭梯度法进行改进,提出了一种改进的预处理共轭梯度法用于识别移动的双轴时变力;Pan 等^[11]提出了一种由三角函数和矩形函数组成冗余字典和加权 l_1 范数正则化的混合方法识别移动载荷,用快速迭代收缩阈值算法求解由加权 l_1 范数正则化方法建立的运动方程,并用贝叶斯信息准则方法选择最优正则化参数。

近年来,学者们把对迭代初值不敏感的启发式算法引入动载荷识别问题中,丰富了反问题的求解方法。Vosoughi 等^[12]利用有限元法和遗传算法反演动态载荷参数;Pan 等^[13]将识别问题转化为一个约束优化问题,用萤火虫算法进行结构损伤检测和移动载荷的识别。作为一种新兴的演化算法,布谷鸟搜索算法(cuckoo search,CS)^[14]由 Yang 等于 2009 年提出,一些学者已将布谷鸟算法应用到反演问题中。徐浩杰等^[15]采用布谷鸟搜索算法对双跨简支梁及桁架进行了局部损伤识别;Chen 等^[16]提出了一种拟牛顿算法的改进布谷鸟搜索算法,用于求解几何导热反问题。然而,布谷鸟搜索算法作为新兴的演化类算法,还未被应用于动载荷的反演。笔者基于布谷鸟搜索算法反演动力学问题中的动载荷。采用 Newmark- β 法^[17]求解正问题,通过最小化动载荷的实际响应和计算响应之间的差异,将识别问题转化为优化问题,从而利用布谷鸟搜索算法实现动载荷的反演。

1 基于 Newmark- β 法的正问题

对具有 f 个自由度的系统动力学模型,其运动方程为

$$M\ddot{\mathbf{X}} + C\dot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}\mathbf{X} = \mathbf{F}(t), \quad (1)$$

式中: M 、 C 、 \mathbf{K} 分别为质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵; $\mathbf{F}(t)$ 为动态力; \mathbf{X} 为系统位移。

将时间离散成若干个时间步,时间步长为 Δt ,在 $t + \Delta t$ 时刻有

$$M\ddot{\mathbf{X}}_{t+\Delta t} + C\dot{\mathbf{X}}_{t+\Delta t} + \mathbf{K}\mathbf{X}_{t+\Delta t} = \mathbf{F}_{t+\Delta t}。 \quad (2)$$

已知 t 时刻的位移、速度,则可以计算加速度

$$\ddot{\mathbf{X}}_t = M^{-1}(\mathbf{F}_t - C\dot{\mathbf{X}}_t - \mathbf{K}\mathbf{X}_t)。 \quad (3)$$

假设在 t 和 $t + \Delta t$ 之间的加速度是介于 $\ddot{\mathbf{X}}_t$ 和 $\ddot{\mathbf{X}}_{t+\Delta t}$ 之间的某一常量,引入如下速度和位移关系:

$$\dot{\mathbf{X}}_{t+\Delta t} = \dot{\mathbf{X}}_t + [(1-\beta)\ddot{\mathbf{X}}_t + \beta\ddot{\mathbf{X}}_{t+\Delta t}] \Delta t, \quad (4)$$

$$\mathbf{X}_{t+\Delta t} = \mathbf{X}_t + \dot{\mathbf{X}}_t \Delta t + \left[\left(\frac{1}{2} - \alpha \right) \ddot{\mathbf{X}}_t + \alpha \ddot{\mathbf{X}}_{t+\Delta t} \right] \Delta t^2, \quad (5)$$

式中参数 α 和 β 根据积分的精度和稳定性要求来确定。当 $\beta \geq 0.50$ 和 $\alpha \geq 0.25$ ($0.5 + \beta$)² 时该算法无条件稳定^[17]; 本研究中 β 取 0.50, α 取 0.25。

由式(4)和式(5)可得

$$\ddot{\mathbf{X}}_{t+\Delta t} = \frac{1}{\alpha \Delta t^2} (\mathbf{X}_{t+\Delta t} - \mathbf{X}_t) - \frac{1}{\alpha \Delta t} \dot{\mathbf{X}}_t - \left(\frac{1}{2\alpha} - 1 \right) \ddot{\mathbf{X}}_t, \quad (6)$$

$$\dot{\mathbf{X}}_{t+\Delta t} = \frac{\beta}{\alpha \Delta t} (\mathbf{X}_{t+\Delta t} - \mathbf{X}_t) + \left(1 - \frac{\beta}{\alpha} \right) \dot{\mathbf{X}}_t + \left(1 - \frac{\beta}{2\alpha} \right) \Delta t \ddot{\mathbf{X}}_t. \quad (7)$$

将式(6)和式(7)代入式(2)得到

$$\begin{aligned} \left(\frac{1}{\alpha \Delta t^2} \mathbf{M} + \frac{\beta}{\alpha \Delta t} \mathbf{C} + \mathbf{K} \right) \mathbf{X}_{t+\Delta t} = \mathbf{F}_{t+\Delta t} + \left[\left(\frac{1}{2\alpha} - 1 \right) \mathbf{M} + \frac{\Delta t}{2} \left(\frac{\beta}{\alpha} - 2 \right) \mathbf{C} \right] \ddot{\mathbf{X}}_t + \\ \left[\frac{1}{\alpha \Delta t} \mathbf{M} + \left(\frac{\beta}{\alpha} - 1 \right) \mathbf{C} \right] \dot{\mathbf{X}}_t + \left(\frac{1}{\alpha \Delta t^2} \mathbf{M} + \frac{\beta}{\alpha \Delta t} \mathbf{C} \right) \mathbf{X}_t. \end{aligned} \quad (8)$$

由式(8)可知 $t + \Delta t$ 时刻的有效刚度矩阵 $\bar{\mathbf{K}}$ 和有效载荷向量 $\bar{\mathbf{F}}$ 为:

$$\bar{\mathbf{K}} = \mathbf{K} + \frac{1}{\alpha \Delta t^2} \mathbf{M} + \frac{\beta}{\alpha \Delta t} \mathbf{C}, \quad (9)$$

$$\bar{\mathbf{F}} = \mathbf{F}_{t+\Delta t} + \left[\frac{1}{\alpha \Delta t^2} \mathbf{X}_t + \frac{1}{\alpha \Delta t} \dot{\mathbf{X}}_t + \left(\frac{1}{2\alpha} - 1 \right) \ddot{\mathbf{X}}_t \right] \mathbf{M} + \left[\frac{\beta}{\alpha \Delta t} \mathbf{X}_t + \left(\frac{\beta}{\alpha} - 1 \right) \dot{\mathbf{X}}_t + \frac{\Delta t}{2} \left(\frac{\beta}{\alpha} - 2 \right) \ddot{\mathbf{X}}_t \right] \mathbf{C}. \quad (10)$$

将式(9)和式(10)代入式(8), 得 $t + \Delta t$ 时刻的位移

$$\mathbf{X}_{t+\Delta t} = \bar{\mathbf{K}}^{-1} \bar{\mathbf{F}}_{t+\Delta t}. \quad (11)$$

再由式(6)和式(7)计算 $\ddot{\mathbf{X}}_{t+\Delta t}$ 和 $\dot{\mathbf{X}}_{t+\Delta t}$ 。

因此, Newmark- β 法求解正问题的具体过程如下:

- 1) 建立刚度矩阵 \mathbf{K} 、质量矩阵 \mathbf{M} 和阻尼矩阵 \mathbf{C} ;
- 2) 由初始位移和速度, 计算初始加速度;
- 3) 选择时间步长 Δt 和参数 α 、 β , 计算有效刚度和 $t + \Delta t$ 时刻的有效载荷;
- 4) 求解 $t + \Delta t$ 时刻的位移、加速度和速度。

2 反问题

2.1 目标函数

动载荷反问题是在测点响应已知的情况下反演载荷的大小和形式。以测点的横向加速度计算值和测量值之间的误差为目标函数, 即

$$J(\mathbf{P}) = \min \| \ddot{\mathbf{v}}(\mathbf{P}, t) - \ddot{\mathbf{v}}^*(t) \|. \quad (12)$$

式中: $\ddot{\mathbf{v}}(\mathbf{P}, t)$ 代表测点横向加速度计算值, $\ddot{\mathbf{v}}^*(t)$ 代表测点横向加速度测量值, t 代表测点加速度的采样时刻, \mathbf{P} 为待识别动载荷。

目标函数 $J(\mathbf{P})$ 满足

$$J(\mathbf{P}) < \varepsilon \quad (13)$$

时, 迭代终止, 这里 ε 为收敛条件。

2.2 布谷鸟搜索算法

布谷鸟搜索算法是一种新型元启发式算法。该算法通过模拟布谷鸟的寄生育雏行为, 利用 Lévy 飞行搜

索机制求解最优化问题。自然界中的布谷鸟会在一个区域内按照随机或者类随机的方式寻找最好的鸟巢,并在此产蛋孵化。为了模拟布谷鸟寻巢的方式,设定以下 3 个理想状态^[14]:

- 1) 每只布谷鸟每次只产一个蛋,在随机选择的鸟巢中进行孵化;
- 2) 在随机选择的一组鸟巢中,最好的鸟巢将会被保留到下一代;
- 3) 每次迭代中鸟巢数量 n 是固定的,鸟巢中外来的鸟蛋被宿主鸟发现的概率为 $p_a \in [0, 1]$ 。

基于以上 3 个理想状态,鸟巢位置更新方式表示为

$$\mathbf{x}_i^{(g+1)} = \mathbf{x}_i^{(g)} + \alpha \oplus L(\lambda), \quad i=1, 2, \dots, n. \quad (14)$$

式中: $\mathbf{x}_i^{(g)}$ 表示第 g 次迭代中的第 i 个鸟巢位置; α 为步长因子; \oplus 为元素乘积; n 为鸟巢数量; $L(\lambda)$ 为 Lévy 飞行搜索路径,服从分布

$$L(\lambda) \sim u = k^{-\lambda}. \quad (15)$$

式中: u 是正态随机变量; k 是迭代次数; λ 为 Lévy 指数,本研究中取 $\lambda = 1.5$ 。搜索步长为

$$\mu \sim \frac{u}{|V|^{1/\lambda}}. \quad (16)$$

式中 u 和 V 可以表示为

$$u \sim N(0, \sigma^2), \quad V \sim N(0, 1), \quad (17)$$

式中: N 为正态分布; σ^2 由下式求得

$$\sigma^2 = \left[\frac{\Gamma(1+\lambda)}{\lambda \Gamma((1+\lambda)/2)} \cdot \frac{\sin(\pi\lambda/2)}{2^{(\lambda-1)/2}} \right]^{1/\lambda}, \quad (18)$$

式中: $\Gamma(z)$ 为伽马函数,定义为

$$\Gamma(z) = \int_0^\infty k^{z-1} e^{-k} dk. \quad (19)$$

寄宿在宿主鸟巢中的蛋都有 p_a 的概率被宿主发现。一旦被发现,则按下式重新更新鸟巢位置

$$\mathbf{x}_i^{(g+1)} = \mathbf{x}_i^{(g)} + r(\mathbf{x}_i^{(g)} - \mathbf{x}_j^{(g)}). \quad (20)$$

式中 r 为服从 0 到 1 分布的随机数。 $\mathbf{x}_i^{(g)}$ 和 $\mathbf{x}_j^{(g)}$ 分别为第 g 次迭代中的鸟巢 i 和鸟巢 j 的位置, $g = 1, 2, 3, \dots, G$ 。本研究中布谷鸟的蛋被发现的概率 p_a 取为 0.25。

2.3 载荷识别过程

载荷识别过程如图 1 所示,主要分为以下几个步骤:

1) 给定发现概率 p_a 、迭代终止容许值 ϵ 、最大迭代步 G 等所需参数值;

2) 选定时间步长,得到离散后的运动方程,输入边界条件;

3) 用布谷鸟搜索算法生成一组初始值,根据式(12)计算出每一个鸟巢的适应度,选出位置最好的鸟巢,并得到当前目标函数的最小值;

4) 验算目标函数是否满足式(13),若满足,则输出最优解,若不满足转至第 5 步;

5) 通过式(14)的 Lévy 飞行产生新的鸟巢,并根据目标函数保留当前最优鸟巢;

6) 按概率遗弃部分鸟巢,根据式(20)生成相应数量的新鸟巢;

7) 找出满足目标函数收敛条件或满足当前最大迭代步的最好的鸟巢,回到第 3 步。

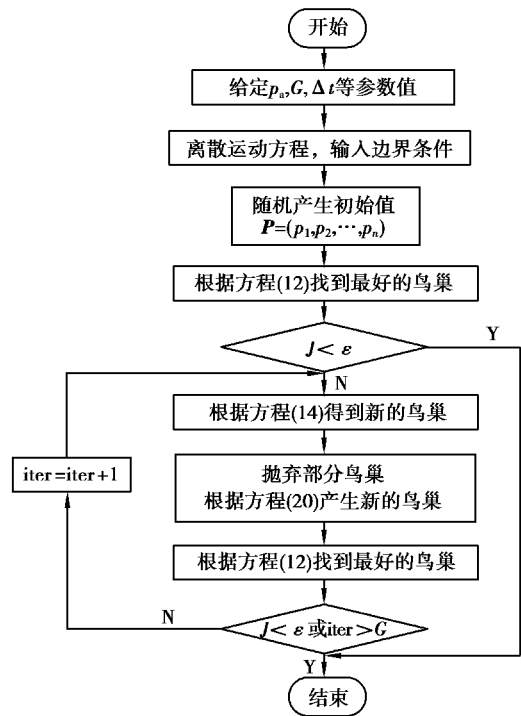


图 1 载荷识别流程图

Fig. 1 The load identification flow chart

3 数值算例

为模拟测量响应信号时的噪声干扰,取包含噪声的真实桥梁测量响应为

$$\mathbf{R}_{\text{measure}} = \mathbf{R}_{\text{calculate}} (1 + E_p \times \mathbf{N}_{\text{noise}}) \quad (21)$$

式中: $\mathbf{R}_{\text{measure}}$ 为测量响应值; $\mathbf{R}_{\text{calculate}}$ 为计算响应值; E_p 为噪声水平; $\mathbf{N}_{\text{noise}}$ 为满足标准正态分布的随机数。

为校核该方法的识别精度,取由测量响应识别动载荷的相对误差为

$$e_r = \frac{\|\mathbf{P}_{\text{identified}} - \mathbf{P}_{\text{true}}\|}{\|\mathbf{P}_{\text{true}}\|} \times 100\% \quad (22)$$

式中: $\mathbf{P}_{\text{identified}}$ 为识别的动载荷; \mathbf{P}_{true} 为真实动载荷。

3.1 定位激励载荷的识别

如图 2 所示的等截面(抗弯刚度 EI 为常数, E 为弹性模量, I 为惯性矩) Euler-Bernoulli 梁,梁长 $L = 10$ m,梁的质量均匀分布(单位长度梁的质量为 468 kg/m),弹性模量为 2.1×10^{11} N/m²。在距离梁左端支座 5 m 处施加一个动态集中载荷,梁的运动满足小变形理论并在弹性范围内,且不考虑梁的自重和阻尼的影响,初始时刻静止,动态集中载荷形式如下:

$$P(t) = \begin{cases} F \sin(\omega t) & 0 \leq t \leq 2t_d; \\ 0 & t < 0, t > 2t_d. \end{cases} \quad (23)$$

式中: F 为载荷的振幅, $F = 50$ kN; ω 为载荷激振频率, $\omega = 50$; t_d 为正弦载荷的周期。时间步长 Δt 取为 0.000 4 s,收敛条件给定为 $\epsilon = 10^{-5}$,最大迭代步 G 为 800。

图 2 中 x 为横坐标轴,表示梁截面的位置; v 为纵坐标轴; $v(x, t)$ 表示 x 截面处 t 时刻的横向位移。

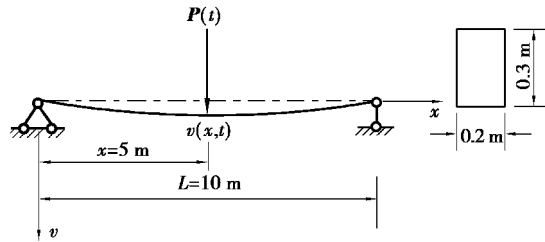


图 2 定位激励载荷识别简支梁

Fig. 2 A simply supported beam for dynamic load identification at fixed position

3.1.1 选取鸟巢数量

测点位置位于桥梁的 $L/2$ 处, $E_p = 0\%$, 分别选取 5, 10, 15, 20 个鸟巢进行载荷反演,反演结果的相对误差如表 1 所示。

表 1 鸟巢数量对计算结果的影响

Table 1 Influence of nest number

鸟巢数量	相对误差/%
5	0.003 13
10	0.003 18
15	0.003 11
20	0.003 10

由表 1 可知用 5、10、15 和 20 个鸟巢的反演计算均具有良好的识别效果,鸟巢数量取 20 时相对误差最小。为了确保求解结果精度及稳定性,本研究中选择 20 个鸟巢用于动载荷识别。

3.1.2 测点位置的影响

分别选取测点位于桥梁 $L/4$ 、 $3L/8$ 、 $9L/20$ 和 $L/2$ 处的横向加速度值作为测量响应值来反演动载荷,

$E_p=0\%$,反演结果的相对误差如表 2 所示。

表 2 测点位置对计算结果的影响

测点位置	相对误差/%
$\frac{1}{4}L$	0.612 58
$\frac{3}{8}L$	0.133 48
$\frac{9}{20}L$	0.005 82
$\frac{1}{2}L$	0.003 10

可以看出,测点位置与载荷施加点的距离对反演结果的影响较大,随着测点位置与载荷施加点距离减小,相对误差也越小,反演结果越准确,测点位置位于 $L/2$ 处识别精度最高。利用 $3L/4$ 、 $5L/8$ 和 $11L/20$ 处的测点反演,得到的结果与 $L/4$ 、 $3L/8$ 、 $9L/20$ 处一致。

3.1.3 测点数量的影响

选取 4 组不同数量的测点,分别求出 $E_p=0\%$ 时反演结果的相对误差,结果如表 3 所示。

表 3 测点数量对计算结果的影响

测点位置	测点数量	相对误差/%
$\frac{1}{2}L$	1	0.003 10
$\frac{1}{2}L, \frac{9}{20}L$	2	0.002 76
$\frac{1}{2}L, \frac{9}{20}L, \frac{3}{8}L$	3	0.002 69
$\frac{1}{2}L, \frac{9}{20}L, \frac{3}{8}L, \frac{1}{4}L$	4	0.002 68

结果表明,采用 2 个测点识别的结果较 1 个测点的相对误差降低了 10.97%,3 个测点识别结果的相对误差较 2 个测点的降低了 2.54%,4 个测点的识别结果的相对误差较 3 个测点的降低了 0.37%。可以看出随着测点数量增加,反演结果误差相应减小,反演得到的结果趋于真实值,当测点数量达到一定值时,再增加测点数量对结果影响不大。

3.1.4 噪声影响

选取位于 $L/2$ 处的测点加速度响应值作为计算响应值,在 4 种不同的噪声水平(0%、1%、3%、5%)下进行载荷反演,研究噪声水平对反演结果的影响,结果见图 3。

根据反演结果计算出在 4 种噪声水平下动载荷识别的相对误差分别为 0.003 10%、1.074 26%、3.310 72%、5.569 36%。由图 3 和反演结果的相对误差可以看出噪声水平对反演结果的影响较大,在噪声水平为 1% 时,反演结果与真实值相差较小,随着噪声水平增加,反演结果的误差逐渐增大。

3.1.5 与共轭梯度法(CGM)比较

选取 $L/2$ 处的测点加速度响应值作为计算响应值,在 3 种不同噪声水平(1%、3%、5%)下,采用共轭梯度法反演动载荷。反演结果的相对误差与布谷鸟搜索算法进行对比,结果如表 4 所示。

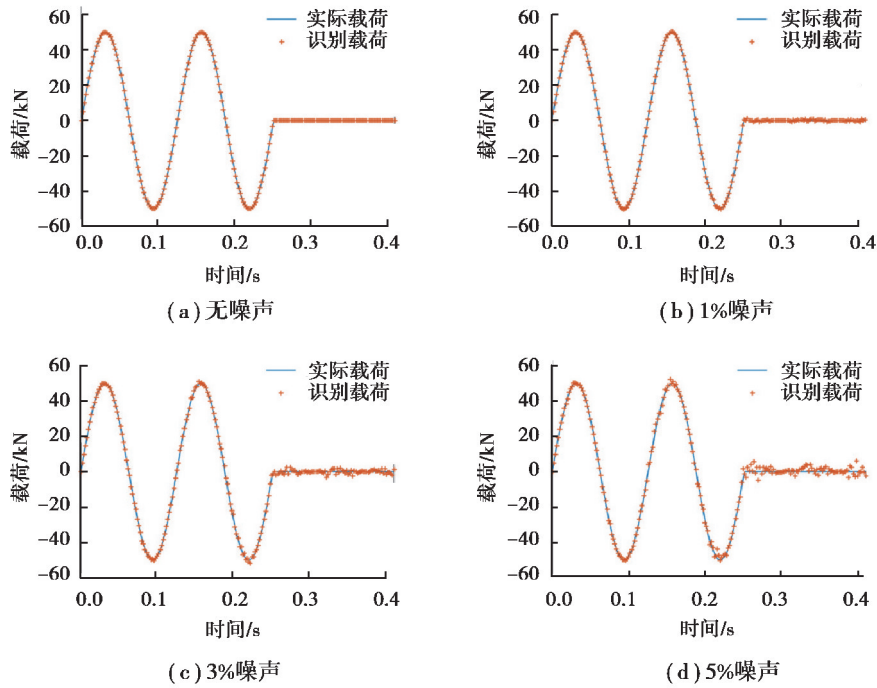


图 3 不同噪声水平对动载荷识别结果的影响

Fig. 3 The influences of different noise levels on the identification of dynamic loads

表 4 共轭梯度法 (CGM) 与布谷鸟搜索算法 (CS) 识别结果误差比较

Table 4 Comparison of errors identified by CGM and CS

噪声水平 / %	相对误差 / %	
	CGM	CS
1	3.30	1.07
3	4.68	3.31
5	6.48	5.57

由表 4 可以看出,在不同噪声水平下,共轭梯度法识别动载荷结果的相对误差均大于布谷鸟搜索算法。相比于共轭梯度法,布谷鸟搜索算法反演得到的动载荷更加趋近于动载荷真实值,反演结果更加准确。

3.2 移动载荷的识别

如图 4 所示的等截面梁,单位长度梁的质量为 $1\,404\text{ kg/m}$,弹性模量为 $2.1 \times 10^{11}\text{ N/m}^2$ 。

时变载荷自梁左端以 $c=10\text{ m/s}$ 的速度匀速向右移动,梁的运动满足小变形理论并在弹性范围内,且不考虑梁的自重和阻尼的影响。初始时刻静止,时间步长 Δt 取 0.005 s ,收敛条件给定为 $\epsilon=10^{-1}$,最大迭代步 G 为 $1\,000$ 。时变载荷形式如下

$$P(t) = \begin{cases} 40 [1 + 0.3\sin(25\pi t) + 0.2\sin(60\pi t)] \text{ kN} & 0 \leq t < 0.6; \\ 40 [1 + 0.3\sin(25\pi t) + 0.2\sin(60\pi t) + 3e^{-35(t-0.6)} \sin(125(t-0.6))] \text{ kN} & 0.6 \leq t \leq 1. \end{cases} \quad (24)$$

在 1%、3% 和 5% 三种噪声水平下,选取 3 个测点的加速度响应组合用布谷鸟搜索算法识别移动时变载荷,结果见图 5。

从图 5 可以看出,利用 3 测点组合进行载荷识别的结果较好,大部分时刻反演值与真实值相近,在 5% 的噪声水平下反演结果仍具有较高的识别精度。然而,在 $t=0$ 时刻和 $t=0.975 \sim 1.000\text{ s}$ 时间段内,识别结果与真实值的误差较大,精度较差,受噪声水平的影响明显。

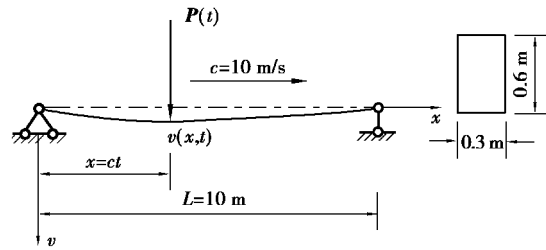


图 4 移动载荷识别模型

Fig. 4 Moving force identification model

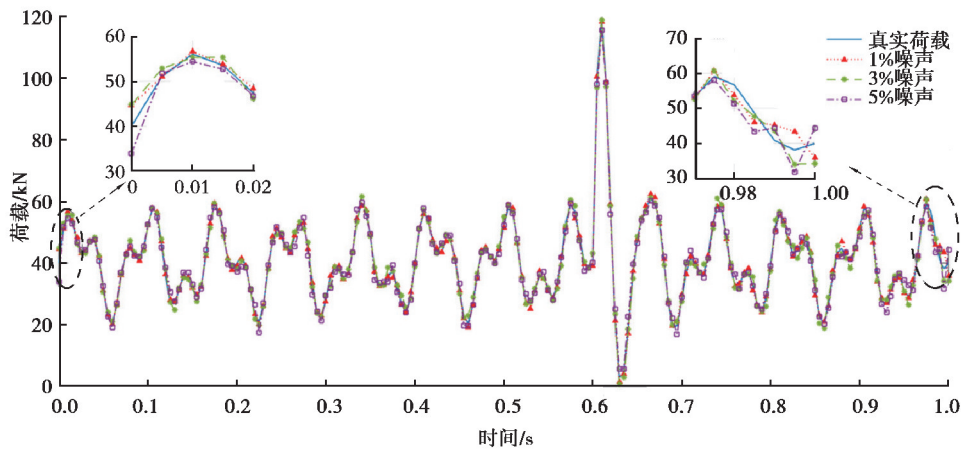


图 5 不同噪声水平对布谷鸟搜索算法识别移动时变载荷的影响

Fig. 5 Affects of different noise levels on the identification of dynamic loads by the cuckoo search (CS) algorithm

表 5 不同测点组合不同噪声水平下共轭梯度法和布谷鸟搜索算法识别结果误差比较

Table 5 Comparison of the relative error by CGM with that by CS at different measurement points and different levels of noise

测点位置	噪声水平/%	相对误差/%	
		CGM	CS
$\frac{1}{4}L$	1	*	6.88
	3	*	13.72
	5	*	15.59
$\frac{1}{2}L$	1	33.39	2.51
	3	66.20	5.92
	5	*	7.35
$\frac{1}{4}L, \frac{1}{2}L$	1	32.99	2.76
	3	57.44	3.65
	5	95.74	5.19
$\frac{1}{4}L, \frac{1}{2}L, \frac{3}{4}L$	1	22.41	2.47
	3	35.65	3.52
	5	63.74	4.42

表 5 对比了 4 种测点组合下共轭梯度法和布谷鸟搜索算法识别结果的相对误差。表中符号“*”表示识别误差超出允许误差限值 100%，此时识别结果不可接受。从表 5 可以看出，当测点数为多个时，共轭梯度法识别动载荷的结果才可以接受，而布谷鸟搜索算法识别结果均可接受。布谷鸟搜索算法识别结果的相对误差均小于共轭梯度法，且识别误差均小于 20%。利用不同测点组合识别动载荷，布谷鸟搜索算法识别结果更加精确。

表 5 中的数据还揭示了测点位置、测点数量以及测量噪声对布谷鸟搜索算法的影响。在同一噪声水平下，测点位于 $L/4$ 处的载荷识别结果的误差较 $L/2$ 处大，在噪声水平分别为 1%、3% 和 5% 时，后者的识别误差幅值分别比前者降低了 4.37%、7.80% 和 8.24%，可以看出载荷识别结果受测点位置的影响明显。当噪声水平相同时，测点数量对识别结果的影响较大，随着测点数量增多，载荷识别结果的误差减小，精度增加。当测点位置和测点数量都相同时，噪声水平增大，载荷识别结果的误差增加，反演结果逐渐偏离真实载荷值。

4 结 论

笔者将布谷鸟搜索算法应用于动载荷识别，利用 Newmark- β 法求解运动系统响应的动力学问题，以计算加速度和测量加速度之间的误差为目标函数，针对定位激励载荷和移动载荷两种不同类型的载荷，比较了共轭梯度法和布谷鸟搜索算法的计算结果，并研究了鸟巢数量、测点位置、测点数量以及噪声水平对反演结果的影响。研究表明：相比于共轭梯度法，布谷鸟搜索算法识别结果更准确。对于布谷鸟搜索算法，鸟巢数量对反演结果的影响较小，随着鸟巢数量增加，识别精度增加有限，不同的鸟巢数量均可得到较好的反演结果；对于定位激励载荷的识别，随着测点位置与载荷施加位置的距离增大，反演结果相对误差增大，对移动载荷的识别，识别结果受测点位置的影响明显；随着测点数量增加，反演结果相对误差减小，识别精度提高；随着噪声水平增加，反演结果相对误差增大，识别精度降低。因此，选择合适的鸟巢数量和测点位置、增加测点数量并减小测量噪声可以使反演结果更加准确有效。本研究中提出的基于 Newmark- β 法的布谷鸟搜索算法能够准确有效地反演动载荷。

参考文献：

- [1] Wang L J, Han X, Xie Y X. A new conjugate gradient method for solving multi-source dynamic load identification problem[J]. International Journal of Mechanics and Materials in Design, 2013, 9(3): 191-197.
- [2] 陈震, 王震, 余岭, 等. 预处理最小二乘 QR 分解法识别桥梁移动荷载的优化分析及试验研究[J]. 振动工程学报, 2018, 31(4): 545-552.
CHEN Zhen, WANG Zhen, YU Ling, et al. Optimization analysis and experimental study of preconditioned least square QR-factorization for moving force identification[J]. Journal of Vibration Engineering, 2018, 31(4): 545-552. (in Chinese)
- [3] Chen Z, Chan T H T. A truncated generalized singular value decomposition algorithm for moving force identification with ill-posed problems[J]. Journal of Sound and Vibration, 2017, 401:297-310.
- [4] Wang L J, Han X, Liu J, et al. A new regularization method and application to dynamic load identification problems[J]. Inverse Problems in Science and Engineering, 2011, 19(6): 765-776.
- [5] Xu B, He J, Rovekamp R, et al. Structural parameters and dynamic loading identification from incomplete measurements: approach and validation[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2012, 28: 244-257.
- [6] Ma C, Hua H X. Force identification technique by the homotopy method [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2015, 29(10): 4083-4091.
- [7] Li K, Liu J, Han X, et al. A novel approach for distributed dynamic load reconstruction by space-time domain decoupling [J]. Journal of Sound and Vibration, 2015, 348:137-148.

- [8] Liu J, Meng X H, Zhang D Q, et al. An efficient method to reduce ill-posedness for structural dynamic load identification[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, 95: 273-285.
- [9] Law S S, Chan T H T, Zeng Q H. Moving force identification: a time domain method[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1997, 201(1): 1-22.
- [10] Chen Z, Chan T H T, Nguyen A. Moving force identification based on modified preconditioned conjugate gradient method[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2018, 423: 100-117.
- [11] Pan C D, Yu L, Liu H L, et al. Moving force identification based on redundant concatenated dictionary and weighted l_1 -norm regularization[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2018, 98: 32-49.
- [12] Vosoughi A R, Anjabin N. Dynamic moving load identification of laminated composite beams using a hybrid FE-TMDQ-GAs method[J]. *Inverse Problems in Science and Engineering*, 2017, 25(11): 1639-1652.
- [13] Pan C D, Yu L. Structural damage detection and moving force identification based on firefly algorithm[M]// *Advances in swarm and computational intelligence*. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2015: 57-64.
- [14] Yang X S, Deb S. Cuckoo search via lévy flights[C]// *2009 World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing (NaBIC)*, December 9-11, 2009, Coimbatore, India. IEEE, 2009: 210-214.
- [15] 徐浩杰, 刘济科, 吕中荣. 基于布谷鸟算法的结构损伤识别[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2015, 54(4): 19-22.
XU Haojie, LIU Jike, LÜ Zhongrong. Structural damage identification based on cuckoo search algorithm[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2015, 54(4): 19-22. (in Chinese)
- [16] Chen H L, Yu B, Zhou H L, et al. Improved cuckoo search algorithm for solving inverse geometry heat conduction problems[J]. *Heat Transfer Engineering*, 2019, 40(3/4): 362-374.
- [17] 张雄, 王天舒, 刘岩. 计算动力学[M]. 2版. 北京:清华大学出版社, 2015.
ZHANG Xiong, WANG Tianshu, LIU Yan. *Computational dynamics*[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2015. (in Chinese)

(编辑 罗 敏)