DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.043
开放科学(资源服务)标识码OSID:

考虑结构性能退化的桥梁有限元模型动态校准方法

陈戈[1],钟万波[1],范爱民[1],郑兴[1],路伟[1],乔争气[2],周广东[3]
(1. 中铁交通投资集团有限公司,南宁 530219; 2. 中铁大桥勘测设计院集团有限公司 第四设计院,武汉 430050; 3. 河海大学 土木与交通学院,南京 210098)

摘　要:随着服役时间的增加,桥梁结构性能不断退化,构件病害不断加深并向邻近构件扩展。基于随机搜索的有限元模型多次独立修正也难以反映桥梁服役性能的动态变化规律。基于Cuckoo Search Algorithm(CS算法)提出一种考虑结构性能退化的桥梁有限元模型动态校准方法:将CS算法编码对应的待修正参数集合分为病害构件、与病害构件相邻构件和其他构件3组;采用不同策略对每组编码进行初始化,设置每次修正时待修正参数上限为上一次修正结果;通过设定不同步长控制因子限定每组编码的搜索范围,并采用一座单跨桁架桥对方法的有效性进行验证。算例分析结果表明:基于CS算法的有限元模型动态校准方法能对桥梁的有限元模型进行动态修正,动态修正后的有限元模型能反映病害随时间不断加深以及向邻近构件扩展的桥梁服役性能时变规律。

关键词:桥梁;结构性能退化;有限元模型;模型修正;CS算法;动态校准
中图分类号:U446.3　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**2096-6717(2026)04-0179-09

Dynamic calibration method for finite element models of bridges considering structural performance degradation

CHEN Ge[1], *ZHONG Wanbo*[1], *FAN Aimin*[1], *ZHENG Xing*[1], *LU Wei*[1], *QIAO Zhengqi*[2], *ZHOU Guangdong*[3]
(1. China Railway Communications Investment Group Co., LTD., Nanning 530219, P. R. China; 2. Fourth Design Institute, China Railway Major Bridge Reconnaissance & Design Institute Co., LTD., Wuhan 430050, P. R. China; 3. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, P. R. China)

Abstract: As the service life increases, the bridge performance deteriorates continuously, and the damage to structural components intensifies and spreads to adjacent components. The process of multiple independent updates of finite element models based on random search algorithms fails to reflect the dynamic variation of bridge service performance. The present paper puts forward a dynamic calibration method for bridge finite element models considering structural performance degradation based on the Cuckoo Search Algorithm (CS

收稿日期:2024-03-04
基金项目:国家自然科学基金(51978243)
作者简介:陈戈(1973-),男,高级工程师,主要从事大跨桥梁受力性能研究,E-mail:chenge01@crecg.com。
周广东(通信作者),男,博士,教授,E-mail:dagongzhougd@163.com。
Received: 2024-03-04
Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51978243)
Author brief: CHEN Ge (1973-), senior engineer, main research interest: mechanical properties of long-span bridges, E-mail: chenge01@crecg.com.
ZHOU Guangdong (corresponding author), PhD, professor, E-mail: dagongzhougd@163.com.

algorithm). Firstly, the set of parameters to be updated, which corresponds to the code of the CS algorithm, is divided into three groups: diseased components, adjacent components to diseased components, and other components. Subsequently, a range of strategies are employed to initiate each group. The upper limit of the parameters to be updated is set to the previous update result. In conclusion, the search range for each group of codes is limited by setting different control factors for step sizes. At the end of the paper, a single-span truss bridge was used to verify the effectiveness of the proposed method. The research results indicate that the dynamic calibration method for finite element models based on the CS algorithm can dynamically calibrate the finite element model of bridges. The dynamically calibrated finite element model can describe the time-varying behavior of the service performance of bridges as the damage deepens and spreads to adjacent components.

Keywords: bridges; structural performance degradation; finite element model; model updating; Cuckoo Search Algorithm; dynamic calibration

基于有限元模型的数值模拟是认识和了解桥梁服役状态的一种有效途径。然而,由于施工误差、模型简化、材料不均匀等原因,以施工图纸为基础建立的有限元模型不可避免地与实际桥梁存在差异。因此,为了降低有限元模型与实际桥梁之间的差异,提升有限元模型计算结果的可靠性,需要对桥梁的有限元模型进行修正[1-3]。

对有限元模型修正方法的研究已有几十年的历史,学者提出了多种方法。这些方法按照是否考虑不确定性可以分为确定性修正方法和不确定性修正方法;按照修正目标的个数可分为单目标修正方法和多目标修正方法;按照修正目标的类型可以分为动力修正方法、静力修正方法和静动力联合修正方法;按照是否采用代理模型可以分为代理模型方法和直接修正方法[4-6]。彭涛等[7]利用静力位移和动力模态频率等结构实测静动力响应构造修正目标函数,提出了基于带精英策略快速非支配排序遗传算法的混凝土斜拉桥有限元模型多目标修正方法。Huang等[8]基于响应面法对大跨度预应力混凝土箱梁桥有限元模型进行了修正,在此模型上分析了混凝土收缩徐变及预应力损失。Hwang等[9]利用结构的前3阶频率残差构建多目标函数,对一座钢板梁桥有限元模型进行了修正。Yin等[10]利用频响函数数据,结合Kriging模型对桁架结构模型进行修正。冀伟等[11]为了缩小波形钢腹钢箱-混凝土组合箱梁桥有限元计算值与实测值之间的偏差,提出了采用响应面法和Fmincon算法相结合的桥梁有限元模型修正方法,并利用一座实际桥梁对方法进行了验证。杨宏印等[12]基于贝叶斯模型、动态权重目标函数和响应面,提出了一种用于重载铁路桥梁的有限元模型修正方法。刘纲等[13]通过隔代随机吸引度因子扩大萤火虫算法搜索路径,通过自适应步长因子使萤火虫算法在寻优过程中随迭代次数逐渐缩小随机搜索范围,并将其用于刚构桥的有限元模型修正。秦世强等[14]提出了一种具有相似比例的位移置信准则,与中性轴位置、自振频率联合,构建模型修正目标函数,并开展了赣江大桥的初始有限元模型修正。胡文哲等[15]采用Kriging元模型建立了大跨度桥梁的多尺度代理模型,并基于多目标进化算法和演化控制算法提出了一种大跨桥梁多尺度有限元模型更新方法。

已有的有限元模型修正方法均以桥梁结构某一时刻的实测结果为目标进行修正,未考虑桥梁服役性能随时间不断退化的特性。虽然可以对服役期桥梁进行多次修正以保证有限元模型的可靠性,但每次修正均对待修正参数进行随机搜索,极有可能造成待修正参数(如构件刚度、材料密度等)的本次修正结果大于上次修正结果,导致修正结果不符合大跨桥梁性能随时间不断退化的客观规律。不仅如此,由于多次修正各自相互独立,修正后力学参数不能相互关联,从而难以有效模拟桥梁某一位置病害在此位置不断加重并不断向周边扩散的特性。基于此,笔者提出基于Cuckoo Search Algorithm(CS算法)的桥梁有限元模型动态校准方法,每次修正均基于上一次修正结果展开,且通过偏向概率考虑病害扩散和加重的客观规律,从而保证有限元模型修正结果能同时反映结构性能退化、构件病害扩展和构件病害加重的桥梁服役期特征。

1 动态校准方法

1.1 CS算法

CS算法是Yang和Deb受杜鹃群体行为的启发,结合Lévy飞行提出的一种高效元启发式优化算法[16]。CS算法包括种群初始化、基于Lévy飞行的种群移动、移动前和移动后种群的优胜劣汰3大步骤[17-18]。Lévy飞行是一种典型的随机游走机制,即在一系列直线飞行过程中突然90°转弯,从而形成以Lévy分布为基础的间歇性搜索模式[19-20]。

CS算法引入如下假设：1）每只杜鹃鸟每次只能产一个卵，且把卵随机产在一个宿主鸟巢里。2）盛放优质鸟卵的最优鸟巢继承给下一代。3）可利用的宿主鸟巢数量相对固定，杜鹃产下的卵以一定概率被宿主发现，宿主鸟在抛弃鸟卵或者放弃鸟巢中二选一，紧接着建立一个全新的鸟巢。

对CS算法进行改进，提出偏向搜索CS算法，其核心步骤包括种群初始化和结合Lévy飞行的种群移动。偏向搜索CS算法中，每一个鸟巢代表一组待修正参数值，所有鸟巢形成一个种群；种群初始化即随机产生待修正参数值的组合；结合Lévy飞行的种群移动包括杜鹃产卵和宿主发现两个环节，杜鹃产卵即产生新的待修正参数组合，宿主发现即以一定概率（发现概率）用新待修正参数组合代替旧待修正参数组合。与普通CS算法的统一搜索模式不同，偏向搜索CS算法将鸟巢编码按照病害构件对应待修正参数、与病害构件相连构件对应待修正参数和其余构件对应待修正参数将种群的编码分成3组，每组设置不同的搜索空间和步长。其中，病害构件编码在更靠近下限的空间进行初始化，同时病害构件编码以更小的步长进行更新，以反映病害在某一位置不断加重的特性；与病害构件相连构件编码的搜索空间大于病害构件，步长也大于病害构件，反映出病害以一定概率向周边扩散的规律；其余构件编码在最大的搜索空间初始化，步长也最大，体现出病害以一定概率在新构件中出现。

1.2　种群初始化

采用直接编码的方式对鸟巢进行编码，所有鸟巢的编码按行排列，形成种群。在基本CS算法中，利用随机数将所有鸟巢随机分布在搜索空间中，形成初始种群。鸟巢编码、种群编码和种群初始化如式(1)～式(3)所示。

$$\boldsymbol{x}_i=\left(x_{i,1},x_{i,2}\cdots x_{i,M}\right) \tag{1}$$

$$\boldsymbol{X}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{x}_1\\ \boldsymbol{x}_2\\ \vdots\\ \boldsymbol{x}_N\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}x_{1,1}\,x_{1,2}\cdots x_{1,M}\\ x_{2,1}\,x_{2,2}\cdots x_{2,M}\\ \vdots\quad\vdots\quad\ddots\quad\vdots\\ x_{N,1}\,x_{N,2}\cdots x_{N,M}\end{bmatrix} \tag{2}$$

$$\boldsymbol{x}_i^0=\boldsymbol{x}^{\mathrm{b}}+\boldsymbol{\alpha}\oplus\left(\boldsymbol{x}^{\mathrm{q}}-\boldsymbol{x}^{\mathrm{w}}\right) \tag{3}$$

式中：$\boldsymbol{x}_i$为第i个鸟巢的编码$(i=1,2\cdots N)$，N为鸟巢的个数；$x_{i,j}$为第i个鸟巢中第j个待修正参数的值$\left(j=1,2\cdots M\right)$，$M$为待修正参数的个数；$\boldsymbol{X}$为鸟巢种群的编码；$\boldsymbol{x}_i^0$为第$i$个鸟巢的初始编码；$\boldsymbol{\alpha}$为$[0,1]$之间均匀分布随机数组成的向量；$\oplus$为点对点相乘；$\boldsymbol{x}^{\mathrm{w}}$和$\boldsymbol{x}^{\mathrm{q}}$分别为待修正参数下限值和上限值组成的向量。

在桥梁有限元模型动态校准方法中，为了反映结构服役性能随时间不断退化的特性，对各次待修正参数的上限和下限进行如下设置。假定第k次修正后待修正参数的值为$\left(x_1^k,x_2^k\cdots x_M^k\right)$，则第$k+1$次修正时，待修正参数的上限为$\left(x_1^k,x_2^k\cdots x_M^k\right)$，待修正参数的下限为$\left(\rho_1x_1^k,\rho_2x_2^k\cdots\rho_{\mathrm{M}}x_M^k\right)$，$\rho_i$为小于1的系数。

进一步地，为了体现桥梁病害在某一构件位置不断加重和沿此位置向周边扩散的规律，在偏向搜索CS算法中将鸟巢种群编码分组排列。即按照病害构件对应待修正参数、与病害构件相连构件对应待修正参数和其余构件对应待修正参数将种群的编码分组排列，如式(4)所示。其中，病害构件是指通过现场检测发现病害的构件，与病害构件相连构件是指与病害构件直接相连并存在相互传力的构件，其余构件是指结构中剩余的构件。

$$\boldsymbol{X}=\left[\boldsymbol{X}^{\mathrm{d}}\,\boldsymbol{X}^{\mathrm{a}}\,\boldsymbol{X}^{\mathrm{l}}\right] \tag{4}$$

式中：$\boldsymbol{X}^{\mathrm{d}}$、$\boldsymbol{X}^{\mathrm{a}}$和$\boldsymbol{X}^{\mathrm{l}}$分别为病害构件待修正参数的编码、与病害构件相连构件待修正参数的编码和其余构件待修正参数的编码。从而，初始种群按式(5)～式(8)产生。

$$\boldsymbol{x}_i^{\mathrm{d},0}=\boldsymbol{x}_i^{\mathrm{d,b}}+\boldsymbol{\alpha}_{\mathrm{d}}\oplus\left(\boldsymbol{x}_i^{\mathrm{d,q}}-\boldsymbol{x}_i^{\mathrm{d,w}}\right) \tag{5}$$

$$\boldsymbol{x}_i^{\mathrm{a},0}=\boldsymbol{x}_i^{\mathrm{a,b}}+\boldsymbol{\alpha}_{\mathrm{a}}\oplus\left(\boldsymbol{x}_i^{\mathrm{a,q}}-\boldsymbol{x}_i^{\mathrm{a,w}}\right) \tag{6}$$

$$\boldsymbol{x}_i^{\mathrm{l},0}=\boldsymbol{x}_i^{\mathrm{l,b}}+\boldsymbol{\alpha}_{\mathrm{l}}\oplus\left(\boldsymbol{x}_i^{\mathrm{l,q}}-\boldsymbol{x}_i^{\mathrm{l,w}}\right) \tag{7}$$

$$\boldsymbol{x}_i^0=\left[\boldsymbol{x}_i^{\mathrm{d},0}\,\boldsymbol{x}_i^{\mathrm{a},0}\,\boldsymbol{x}_i^{\mathrm{l},0}\right] \tag{8}$$

式中：$\boldsymbol{x}_i^{\mathrm{d},0}$、$\boldsymbol{x}_i^{\mathrm{d,w}}$和$\boldsymbol{x}_i^{\mathrm{d,q}}$分别为第$i$个鸟巢中病害构件待修正参数的初始编码、下限和上限；$\boldsymbol{x}_i^{\mathrm{a},0}$、$\boldsymbol{x}_i^{\mathrm{a,w}}$和$\boldsymbol{x}_i^{\mathrm{a,q}}$分别为第$i$个鸟巢中与病害构件相连构件待修正参数的初始编码、下限和上限；$\boldsymbol{x}_i^{\mathrm{l},0}$、$\boldsymbol{x}_i^{\mathrm{l,w}}$和$\boldsymbol{x}_i^{\mathrm{l,q}}$分别为第$i$个鸟巢中其余构件待修正参数的初始编码、下限和上限；$\boldsymbol{\alpha}_{\mathrm{d}}$为$[0,\omega_{\mathrm{d}}]$之间随机数组成的向量；$\boldsymbol{\alpha}_{\mathrm{a}}$为$[0,\omega_{\mathrm{a}}]$之间随机数组成的向量；$\boldsymbol{\alpha}_{\mathrm{l}}$为$[0,\omega_{\mathrm{l}}]$之间随机数组成的向量。同时，设置$0\leqslant\omega_{\mathrm{d}}<\omega_{\mathrm{a}}<\omega_{\mathrm{l}}\leqslant1$，$\omega_{\mathrm{d}}$、$\omega_{\mathrm{a}}$和$\omega_{\mathrm{l}}$可根据具体问题的特性和参数分析进行调整。

1.3　种群移动

在CS算法的每一个循环中，杜鹃和宿主鸟执行两个顺序搜索。首先，杜鹃产卵，引导当前所有鸟巢向已知最好的鸟巢移动。杜鹃通过随机游走的方式选择一个鸟巢进行产卵，即通过结合Lévy飞行的移动方式形成鸟巢的新编码，用新编码替换鸟巢的旧编码。杜鹃产卵后，执行宿主识别。宿主鸟以一定概率发现杜鹃鸟卵，并将被发现的这部分杜鹃鸟卵抛弃。如果杜鹃卵与宿主卵非常相似，那么这个杜鹃卵被发现的可能性较小，未被发现的杜鹃鸟卵则替换掉原来的卵（鸟巢）。

杜鹃产卵的随机游走是由一系列连续随机步长组成的随机过程。采用Lévy飞行描述随机游走。Lévy飞行的步长S可以通过式(9)计算。

$$S=\frac{u}{|\nu|^{\frac{1}{\beta}}} \tag{9}$$

式中:S为随机游走的步长;u和ν分别为来自正态分布的系数,β为介于区间[1, 2]的参数,文献中建议取值为1.5[19]。u和ν的取值如式(10)、式(11)所示。

$$u\sim N\left(0,\sigma_u^2\right),\ \nu\sim N\left(0,\sigma_\nu^2\right) \tag{10}$$

$$\sigma_u=\left\{\frac{\Gamma\left(1+\beta\right)\sin\left(\pi\beta/2\right)}{\Gamma\left[\left(1+\beta\right)/2\right]2^{(\beta-1)/2}\beta}\right\}^{1/\beta},\ \sigma_\nu=1 \tag{11}$$

式中:u为服从均值为0、方差为σ_u^2的正态分布;ν为服从均值为0、方差为σ_ν^2的正态分布;σ_u的数值由标准卡方分布确定,σ_ν数值取1。

在基本CS算法中,杜鹃产卵得到新解的方式为

$$\boldsymbol{x}_i^{t+1}=\boldsymbol{x}_i^t+\delta\oplus L(\lambda)=\boldsymbol{x}_i^t+\delta_0 S\left(\boldsymbol{x}_i^t-\boldsymbol{x}_{\text{best}}^t\right) \tag{12}$$

式中:$\boldsymbol{x}_i^{t+1}$和$\boldsymbol{x}_i^t$分别为第$t+1$次和第t次迭代时第i个鸟巢的编码;δ为步长;$L(\lambda)$为Lévy分布;δ_0为步长控制因子;$\boldsymbol{x}_{\text{best}}^t$为第$t$次迭代后种群中的最优鸟巢。

在偏向搜索CS算法中,为了反映桥梁病害在某一位置不断加重和沿此位置向周边扩散的规律,病害构件、与病害构件相连构件和其余构件分别设置不同的步长,即

$$\boldsymbol{x}_i^{\text{d},t+1}=\boldsymbol{x}_i^{\text{d},t}+\delta_{\text{d}} S\left(\boldsymbol{x}_i^{\text{d},t}-\boldsymbol{x}_{\text{best}}^{\text{d},t}\right) \tag{13}$$

$$\boldsymbol{x}_i^{\text{a},t+1}=\boldsymbol{x}_i^{\text{a},t}+\delta_{\text{a}} S\left(\boldsymbol{x}_i^{\text{a},t}-\boldsymbol{x}_{\text{best}}^{\text{a},t}\right) \tag{14}$$

$$\boldsymbol{x}_i^{\text{l},t+1}=\boldsymbol{x}_i^{\text{l},t}+\delta_{\text{l}} S\left(\boldsymbol{x}_i^{\text{l},t}-\boldsymbol{x}_{\text{best}}^{\text{l},t}\right) \tag{15}$$

$$\boldsymbol{x}_i^{t+1}=\left[\boldsymbol{x}_i^{\text{d},t+1}\ \boldsymbol{x}_i^{\text{a},t+1}\ \boldsymbol{x}_i^{\text{l},t+1}\right] \tag{16}$$

式中:$\boldsymbol{x}_i^{\text{d},t+1}$和$\boldsymbol{x}_i^{\text{d},t}$分别为第$t+1$次和第$t$次迭代时第$i$个鸟巢中病害构件待修正参数的编码;$\boldsymbol{x}_i^{\text{a},t+1}$和$\boldsymbol{x}_i^{\text{a},t}$分别为第$t+1$次和第$t$次迭代时第$i$个鸟巢中与病害构件相连构件待修正参数的编码;$\boldsymbol{x}_i^{\text{l},t+1}$和$\boldsymbol{x}_i^{\text{l},t}$分别为第$t+1$次和第$t$次迭代时第$i$个鸟巢中其余构件待修正参数的编码;$\boldsymbol{x}_{\text{best}}^{\text{d},t}$、$\boldsymbol{x}_{\text{best}}^{\text{a},t}$和$\boldsymbol{x}_{\text{best}}^{\text{l},t}$分别为第$t$次迭代后种群中的最优鸟巢病害构件、与病害构件相连构件和其余构件待修正参数的编码;δ_{d}、δ_{a}和δ_{l}分别为病害构件、与病害构件相连构件和其余构件待修正参数的步长控制因子,且$\delta_{\text{d}}<\delta_{\text{a}}<\delta_{\text{l}}$,$\delta_{\text{d}}$、$\delta_{\text{a}}$和$\delta_{\text{l}}$可根据具体问题进行调整。

杜鹃产卵完成后,执行宿主识别。根据发现概率p对每个种群的每个分量进行杜鹃鸟卵识别,具体为

$$\boldsymbol{x}_i^{t+1}=\boldsymbol{x}_i^t+\mu\left(\boldsymbol{x}_j^t-\boldsymbol{x}_k^t\right) \tag{17}$$

$$\mu=\begin{cases}1, & \gamma<p\\ 0, & \gamma\geqslant p\end{cases} \tag{18}$$

式中:$\boldsymbol{x}_j^t$和$\boldsymbol{x}_k^t$分别为第t次迭代后种群中随机抽取的第j个鸟巢和第k个鸟巢;γ为[0,1]之间均匀分布的随机数;$p\in[0,1]$为被发现的概率。如果随机数大于发现概率,杜鹃鸟卵被识别;反之,则杜鹃鸟卵未被识别。被识别的杜鹃鸟卵会被替换,在算法中表现为种群移动。

随机游走和宿主识别所得新解均采用贪婪方式进行选择,即得到新解后,将新解和原解的目标函数值进行比较,如果新解较优,则用新解取代原解,反之则保持原解不变。

有限元模型动态校准方法的流程如图1所示。

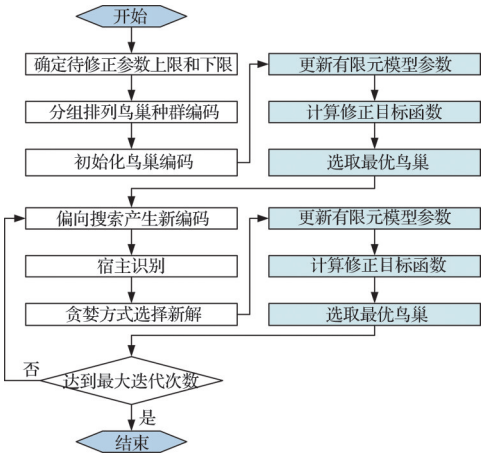


图1 有限元模型动态校准流程图

Fig. 1 Flowchart of dynamic calibration for finite element models

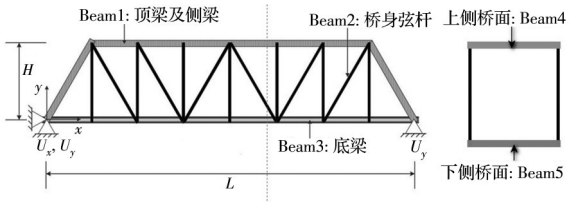
2 方法验证

采用一座单跨桁架桥来验证有限元模型动态校准方法的有效性。通过构件惯性矩的多次折减来模拟病害不断加深的规律,利用某一病害构件相邻构件的惯性矩折减来模拟病害扩展的特性。基于惯性矩折减后的有限元模型计算得到桁架桥的振动频率,并将其作为目标频率。假定构件病害位置未知,根据目标频率,采用偏向搜索CS算法对有限元模型进行修正,验证方法是否能对构件惯性矩进行合理修正。

2.1 桁架桥简介

单跨桁架桥的桥高H=5.5 m,桥长L=32 m,桥宽B=6 m,由每段长4 m的8段桁架节段紧密连接共同构成。桁架桥实拍图和结构简图如图2所示,杆件的力学参数如表1所示。

(a) 实拍图



(b) 结构简图

图 2　单跨桁架桥

Fig. 2　A single-span truss bridge

表 1　单跨桁架桥构件参数

Table 1　Parameters of the single-span truss bridge components

构件	编号	横截面积/m^2	横向惯性矩/m^4	竖向惯性矩/m^4
顶梁及侧梁	Beam1	2.19×10^{-3}	3.83×10^{-6}	3.55×10^{-6}
桥身弦杆	Beam2	1.19×10^{-3}	1.87×10^{-6}	1.87×10^{-6}
底梁	Beam3	3.03×10^{-3}	8.47×10^{-6}	8.61×10^{-6}
上侧连梁	Beam4	2.96×10^{-3}	2.71×10^{-6}	2.48×10^{-6}
下侧桥面梁	Beam5	4.00×10^{-1}	333.30×10^{-6}	5.33×10^{-1}

2.2　有限元模型

采用 ANSYS 的 BEAM 单元建立该桥的有限元模型。考虑到桥面混凝土为后续铺装层，主要功能为承担车辆荷载并传输给下侧桥面梁，下侧桥面型钢起结构骨架作用，建模时把混凝土板质量和惯性矩等效给下侧钢桁架构件，以此简化有限元模型。桥面与地面连接处，左侧 6 个自由度全部约束，另一侧同样约束 6 个方向自由度。桁架桥有限元模型如图 3 所示，前 10 阶频率如表 2 所示。

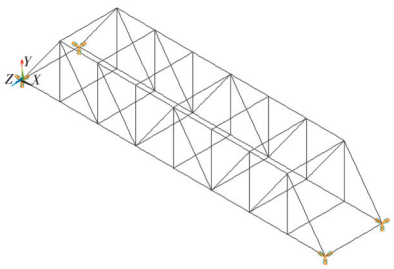


图 3　桁架桥有限元模型图

Fig. 3　Finite element model of the single-span truss bridge

2.3　动态校准

2.3.1　校准目标

考虑到结构动力特性是开展桥梁抗风、抗震和服役性能评估的关键参数，以频率作为修正目标，

表 2　单跨桁架桥前 10 阶频率

Table 2　First 10 frequencies of the single-span truss bridge

阶次	频率/Hz	阶次	频率/Hz
第 1 阶	0.45	第 6 阶	1.94
第 2 阶	0.61	第 7 阶	2.11
第 3 阶	0.74	第 8 阶	2.16
第 4 阶	0.97	第 9 阶	2.22
第 5 阶	1.55	第 10 阶	2.45

具体如式(19)、式(20)所示。

$$g_i=\frac{f_i-f_i^*}{f_i^*}\times100\% \tag{19}$$

$$g=\sum_{i=1}^{10}g_i \tag{20}$$

式中：g_i 为第 i 阶频率的误差；f_i 为有限元模型计算的第 i 阶频率；f_i^* 为第 i 阶目标频率；g 为校准目标函数。

2.3.2　动态修正结果

为了方便论述，对桁架桥杆件进行编号，如图 4 所示。

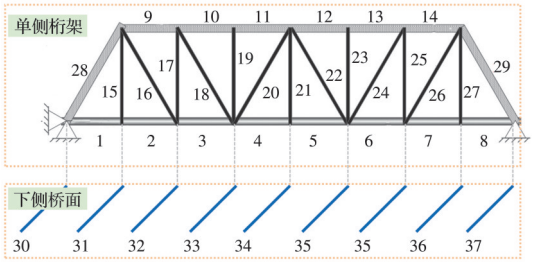


图 4　桁架桥杆件编号

Fig. 4　Component numbers of the single-span truss bridge

1)第 1 次修正

假定服役一段时间后下侧桥面 33 号杆件出现病害，如图 5 所示。将下侧桥面 33 号杆件横向惯性矩折减到原来的 80%，通过有限元模型计算得到前 10 阶目标频率分别为 0.450 451、0.600 886、0.738 449、0.972 500、1.557 534、1.933 222、2.020 334、2.085 700、2.192 246、2.380 756 Hz。在有限元模型修正时，将此桥梁所有 74 根杆件的横向惯性矩作为待修正参数，则每个鸟巢的编码包含 74 个元素。参考已有研究[21]，采用正交试验方法确定偏向搜索 CS 算法的最优参数。基于正交试验结

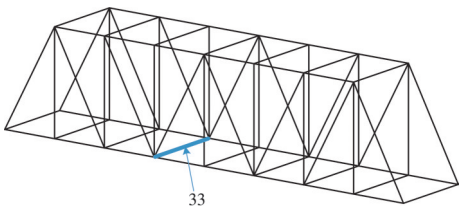


图 5　33 号杆件的具体位置

Fig. 5　Location of the component 33

果,设定偏向搜索CS算法的种群大小为50,迭代次数为50,ω_d、ω_a和ω_l分别取0.9、0.95和1,步长控制因子δ_d、δ_a和δ_l分别取0.005、0.075和0.01,发现概率p取0.2。待修正参数上限值设定为初始值,下限值设定为初始值的0.6倍。

偏向搜索CS算法的迭代过程如图6所示。由图6可见,迭代次数到达50次后,目标函数值趋于稳定,表明算法已经收敛。各阶频率误差如图7所示。前10阶频率的误差均小于0.14%,表明算法具有较好的精度。由图8的横向惯性矩修正结果可知,偏向搜索CS算法将33号杆件的横向惯性矩修正为原始值的82%,与实际情况较为吻合,表明算法具备较高的可靠性。

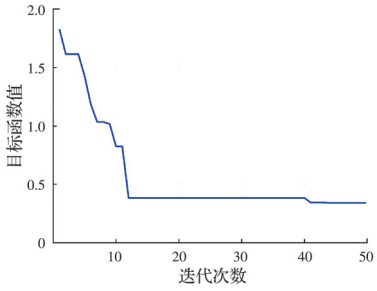


图6 第1次修正的目标函数值变化曲线

Fig. 6 Variation of the objective function for the first updating

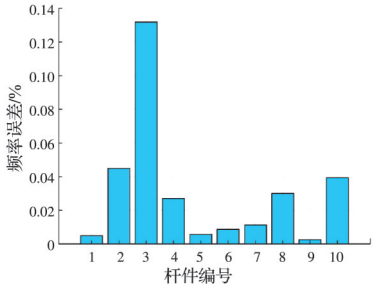


图7 第1次修正后各阶频率的误差

Fig. 7 Frequency errors after the first updating

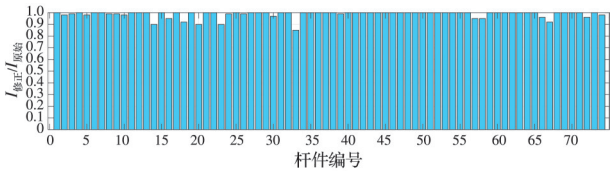


图8 杆件横向惯性矩的第1次修正结果

Fig. 8 Lateral moments of inertia after the first updating

2)第2次修正

假定随着服役时间的增加33号杆件的病害进一步加深,与之相连的18号杆件也出现病害,如图9所示。将18号构件的横向惯性矩减小至原始值的80%,将33号杆件横向惯性矩减小到原始值的60%,此时前10阶目标频率分别为0.450 329、0.612 656、0.706 698、0.973 635、1.551 764、1.934 302、2.021 142、2.077 025、2.191 542、2.277 483 Hz。设置所有杆件横向惯性矩上限值为第1次修正后的值,下限值设为第1次修正后的0.60倍。偏向搜索CS算法的参数设置为与第1次修正相同。算法的修正迭代过程如图10所示,各阶频率误差如图11所示,修正后各杆件的横向惯性矩如图12所示。修正后前10阶频率误差均小于0.12%。CS算法从众多可能损伤构件中找到了损伤最大的18号构件和33号构件。33号杆件修正后的横向惯性矩为原始值的67%,18号杆件修正后的横向惯性矩为原始值的85%,与实际情况吻合良好。

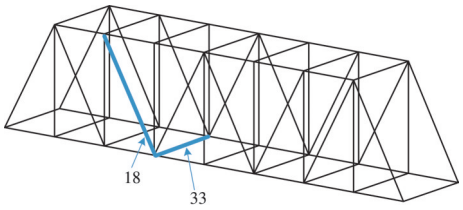


图9 18号和33号杆件的具体位置

Fig. 9 Locations of components 18 and 33

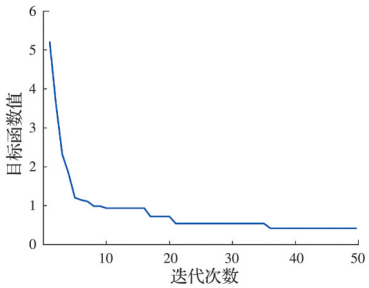


图10 第2次修正的目标函数值变化曲线

Fig. 10 Variation of the objective function for the second updating

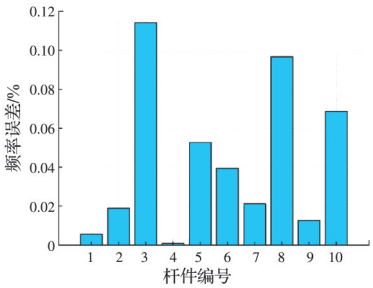


图11 第2次修正后各阶频率的误差

Fig. 11 Frequency errors after the second updating

3)第3次修正

类似地,随着服役时间的进一步增加,桁架桥的服役性能进一步退化。33号杆件和18号杆件的横向惯性矩分别减小到原始值的40%和60%,与之相连的4号杆件横向惯性矩减小到原始值的85%,如图13所示。同样,杆件横向惯性矩上限设为第2

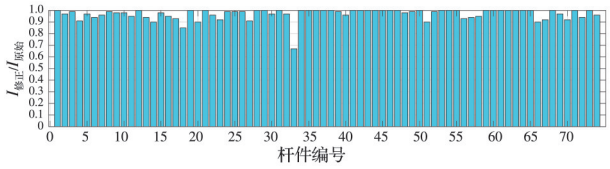


图 12　杆件横向惯性矩的第 2 次修正结果

Fig. 12　Lateral moments of inertia after the second updating

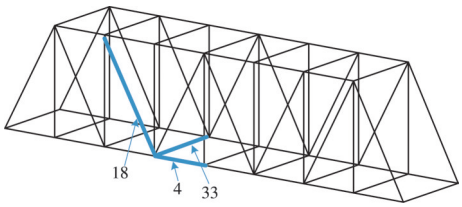


图 13　33 号、18 号和 4 号杆件的具体位置

Fig. 13　Locations of components 33, 18 and 4

次修正后的值，下限值设为第 2 次修正后的 0.60 倍。

偏向搜索 CS 算法的修正结果如图 14～图 16 所示，修正后前 10 阶频率误差均小于 0.20%。33 号、18 号和 4 号杆件的横向惯性矩分别为初始值的 46%、55% 和 83%，与预设病害具有很好的一致性。其余杆件的横向惯性矩也有一定减小，正好符合随着服役时间的增加结构各杆件性能均不同程度退化的特征。

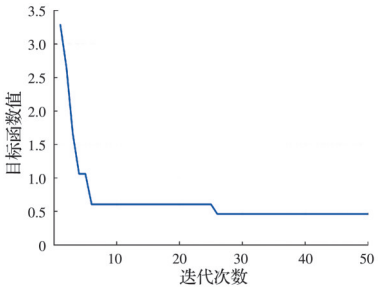


图 14　第 3 次修正的目标函数值变化曲线

Fig. 14　Variation of the objective function for the third updating

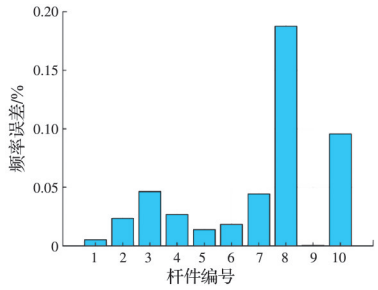


图 15　第 3 次修正后各阶频率的误差

Fig. 15　Frequency errors after the third updating

2.3.3　修正结果讨论

3 次修正结果如图 17 所示，图中各构件的 4 个数值分别表示未修正结果、第 1 次修正结果、第 2 次修正结果和第 3 次修正结果。从图 17 可以看出：1）各次修正后，病害构件的横向惯性矩均逐渐减小，实现了考虑性能时变的动态校准；2）未发生病害时，4 号构件在第 1 次和第 2 次修正后的横向惯性矩几乎没有变化，说明偏向搜索 CS 算法不是盲目调整结构构件的刚度，而是根据桥梁服役性能退化规律进行合理修正。

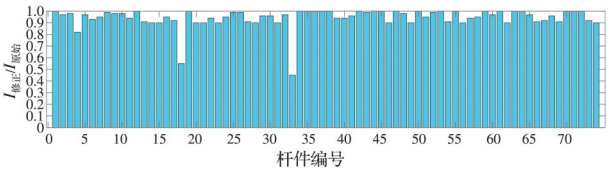


图 16　杆件横向惯性矩的第 3 次修正结果

Fig. 16　Lateral moments of inertia after the third updating

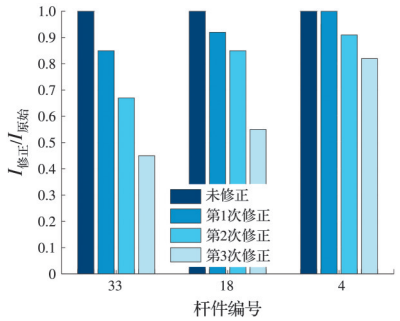


图 17　3 次修正结果对比

Fig. 17　Comparison of the three updating results

3　结论

桥梁服役年限长达几十年甚至上百年，基于不同时刻实测值的有限元模型独立修正，仅能满足有限元模型计算结果与实测结果一致的要求，不能反映结构性能随时间不断变化以及构件病害逐渐加深和扩展的客观规律。为此，提出了基于偏向搜索 CS 算法的有限元模型动态校准方法，主要结论如下：

1）通过将基本 CS 算法中待修正参数搜索空间的上限设置为上一次修正结果，可保证待修正参数本次修正结果不超过上一次修正结果，体现结构性能不断退化的规律。通过将基本 CS 算法的编码分为病害构件、与病害构件相邻构件和其他构件，分别采用不同的初始化参数和步长控制因子限制搜索范围，以反映病害逐渐加深和邻近扩展的特性。

2）算例验证结果表明：在动态校准过程中，偏向搜索 CS 算法能把有限元模型每阶频率误差修正到 1.00% 以内；每次修正均能准确找到性能退化的构件，并获得较为准确的待修正参数结果；每次修正后病害构件的横向惯性矩均逐渐减小，实现了考

虑结构性能时变的有限元模型动态校准,可为基于有限元模型的桥梁服役性能评估提供参考。

参考文献

[1] 张方, 张开权, 邓捷超, 等. 桥梁评估与加固2020年度研究进展[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(增刊1): 151-165.
Zhang F, Zhang K Q, Deng J C, et al. State-of-the-art review of bridge assessment and reinforcement in 2020 [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021, 43(S1): 151-165. (in Chinese)

[2] 《中国公路学报》编辑部. 中国桥梁工程学术研究综述·2021[J]. 中国公路学报, 2021, 34(2): 1-97.
Editorial Department of *China Journal of Highway and Transport*. Review on China's bridge engineering research: 2021[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(2): 1-97. (in Chinese)

[3] 单德山, 罗凌峰, 李乔. 桥梁健康监测2020年度研究进展[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(增刊1): 129-134.
Shan D S, Luo L F, Li Q. State-of-the-art review of the bridge health monitoring in 2020[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021, 43(S1): 129-134. (in Chinese)

[4] 张宁, 余凯, 崔闯, 等. 大跨度桥梁钢桥面板跨尺度疲劳损伤评估方法[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2024, 46(3): 161-170.
Zhang N, Yu K, Cui C, et al. Multiscale fatigue damage assessment method for orthotropic steel deck of long-span bridges[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2024, 46(3): 161-170. (in Chinese)

[5] 亓兴军, 杨洪超, 张斌, 等. 正常交通下大跨斜拉桥主梁刚度评定的虚拟静载试验方法[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2025, 47(6): 177-184.
Qi X J, Yang H C, Zhang B, et al. Virtual static load test method for stiffness evaluation of main girder of long-span cable-stayed bridge under normal traffic [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2025, 47(6): 177-184.(in Chinese)

[6] 邓扬, 张强, 钟国强, 等. 桥梁拉索动力响应监测数据质量评价方法[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2025, 47(5): 208-217.
Deng Y, Zhang Q, Zhong G Q, et al. Data quality evaluation method for dynamic response monitoring of bridge cables[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2025, 47(5): 208-217.(in Chinese)

[7] 彭涛, 田仲初, 张建仁, 等. 基于多目标优化的混凝土斜拉桥静动力有限元模型修正[J]. 振动与冲击, 2018, 37(21): 108-116.
Peng T, Tian Z C, Zhang J R, et al. Static and dynamic finite element model updating for a concrete cable-stayed bridge based on multi-objective optimization[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(21): 108-116. (in Chinese)

[8] Huang H D, Huang S S, Pilakoutas K. Modeling for assessment of long-term behavior of prestressed concrete box-girder bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2018, 23(3): 04018002.

[9] Hwang Y, Jin S S, Jung H Y, et al. Experimental validation of FE model updating based on multi-objective optimization using the surrogate model[J]. Structural Engineering and Mechanics, 2018, 65(2): 173-181.

[10] Yin H, Ma J J, Dong K L, et al. Model updating method based on Kriging model for structural dynamics[J]. Shock and Vibration, 2019: 8086024.

[11] 冀伟, 邵天彦. 波形腹板钢箱-混凝土箱梁桥的有限元模型修正[J]. 西南交通大学学报, 2021, 56(1): 1-11.
Ji W, Shao T Y. Finite element model updating of box girder bridges with corrugated steel webs[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2021, 56(1): 1-11. (in Chinese)

[12] 杨宏印, 吴楠昊, 王波, 等. 基于贝叶斯法和响应面法的重载铁路桥梁模型修正[J]. 中国铁道科学, 2022, 43(6): 47-54.
Yang H Y, Wu N H, Wang B, et al. Model updating of heavy haul railway bridge based on Bayesian method and response surface method[J]. China Railway Science, 2022, 43(6): 47-54. (in Chinese)

[13] 刘纲, 陈奇, 雷振博, 等. 基于改进萤火虫算法的有限元模型修正[J]. 工程力学, 2022, 39(7): 1-9.
Liu G, Chen Q, Lei Z B, et al. Finite element model updating method based on improved firefly algorithm[J]. Engineering Mechanics, 2022, 39(7): 1-9. (in Chinese)

[14] 秦世强, 袁永刚, 韩硕, 等. 基于试验数据和位移置信准则的铁路斜拉桥多目标模型修正[J]. 铁道学报, 2023, 45(6): 151-160.
Qin S Q, Yuan Y G, Han S, et al. Multi-objective model updating of cable-stayed bridge based on experimental data and displacement assurance criterion[J]. Journal of the China Railway Society, 2023, 45(6): 151-160. (in Chinese)

[15] 胡文哲, 崔闯, 王昊, 等. 基于多目标进化算法的多尺度有限元模型更新方法[J]. 工业建筑, 2023, 53(8): 161-167.
Hu W Z, Cui C, Wang H, et al. Multi-scale finite element model update method based on a multi-objective evolutionary algorithm[J]. Industrial Construction, 2023, 53(8): 161-167. (in Chinese)

[16] Minh H L, Sang-To T, Khatir S, et al. Damage identification in high-rise concrete structures using a bio-inspired meta-heuristic optimization algorithm[J]. Advances in Engineering Software, 2023, 176: 103399.

[17] Yang X S, Deb S. Multiobjective cuckoo search for design optimization[J]. Computers & Operations Research, 2013, 40(6): 1616-1624.

[18] Yang X S, Deb S. Cuckoo search: recent advances and applications[J]. Neural Computing and Applications, 2014, 24(1): 169-174.

[19] Reynolds A M, Frye M A. Free-flight odor tracking in drosophila is consistent with an optimal intermittent scale-free search[J]. PLoS One, 2007, 2(4): e354.

[20] 吴一全, 周建伟. 布谷鸟搜索算法研究及其应用进展[J]. 智能系统学报, 2020, 15(3): 435-444.
Wu Y Q, Zhou J W. Overview of the cuckoo search algorithm and its applications[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2020, 15(3): 435-444. (in Chinese)

[21] 伊廷华, 张旭东, 李宏男. 基于小生境猴群算法的传感器优化布置方法研究[J]. 工程力学, 2014, 31(9): 112-119, 151.
Yi T H, Zhang X D, Li H N. The niching monkey algorithm for optimal sensor placement[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(9): 112-119, 151. (in Chinese)

（编辑　胡英奎）