文章编号:1674-2974(2024)05-0095-11 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2024051

基于遗传算法的斜拉桥基准模型参数修正方法

马海英[1],邱媛[1],夏烨[1†],赖明辉[2],李清岭[3]
[1. 同济大学 土木工程学院,上海 200092;
2. 四川省公路规划勘察设计研究院有限公司,四川 成都 610041;
3. 上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司,上海 200092]

摘 要:健康监测对于斜拉桥结构全寿命的安全使用十分重要,而使用传感器采集斜拉桥数据进行健康监测存在盲区.结合Benchmark模型对桥梁结构进行监测,能够在给定状态下,比较和评价不同的健康监测方法标准,对桥梁的设计、运营以及管养等方面有重要意义.本文基于背景工程,提出用于斜拉桥结构健康监测的基准模型.首先,使用Matlab建立斜拉桥的鱼骨梁简化有限元模型,并建立斜拉桥的板壳单元精细模型,作为简化补充模型和模态矫正模型;其次,采用正交试验设计,对建模过程中的待修正参数进行斜拉桥动力特性参数的显著性分析;最后,基于遗传算法对模型参数进行修正,提出了动态自适应技术和并列选择的方法优化遗传算法结构,干涉遗传选择过程,并赋予初始种群更高的离散性,与调用GA函数的方法对模型进行修正进行比较,验证了改进后的遗传算法具有更高的计算效率,模态参数误差较小.

关键词:斜拉桥;基准模型;鱼骨梁模型;板壳单元模型;健康监测;改进遗传算法
中图分类号:TU398.9 **文献标志码**:A

Parameter Updating Method of Benchmark Model for Cable-stayed Bridges Based on Genetic Algorithm

MA Haiying[1],QIU Yuan[1],XIA Ye[1†],LAI Minghui[2],LI Qingling[3]
[1. College of Civil Engineering,Tongji University, Shanghai 200092, China;
2. Sichuan Highway Planning, Survey, Design and Research Institute Ltd., Chengdu 610041, China;
3. Shanghai Urban Construction Design & Research Institute(Group)Co. Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: Health monitoring plays an important role in guaranteeing the structural safety of a cable-stayed bridge throughout its life. However, the use of sensor data for health monitoring of cable-stayed bridges has some limitations. Combining the Benchmark model to monitor bridge structures can compare and evaluate different health monitoring methods criteria in a given state, which is valuable for bridge design, operation and management. This paper proposes a modified Benchmark model for health monitoring technology of cable-stayed bridges. Firstly, a simplified finite element model of the spine-beam model is established using Matlab software to conduct the dynamic analysis and model modification of the structure. In addition, a detailed finite element model is established as a

* **收稿日期**:2023-05-11
基金项目:中央高校基本科研业务经费资助项目(2023-2-YB-17),Fundamental Research Funds for the Central Universities(2023-2-YB-17)
作者简介:马海英(1981—),女,山东胶州人,同济大学副教授,博士
† 通信联系人,E-mail:yxia@tongji.edu.cn

simplified supplementary model and modal correction model. Then, an orthogonal test design is used to perform a significance analysis on the dynamic characteristic parameters of the cable-stayed bridge for the parameters to be modified in the modeling process, and the sensitive parameters are clarified. Finally, the model parameters are modified based on the genetic algorithm, and the dynamic adaptive technique and the method of parallel selection are proposed to optimize the structure of the genetic algorithm, which interferes with the genetic selection process and gives higher dispersion to the initial population. Compared with the GA function, the method with the improved genetic algorithm has higher computational efficiency and smaller error for model parameters.

Key words: cable-stayed bridges; Benchmark model; spine-beam model; plate-shell model; health monitoring; improved genetic algorithm

斜拉桥是柔性索锚结构,具有跨越能力强、施工方法多样、环境适应能力较强等优点.全世界的大型斜拉桥几乎都安装了健康监测系统,我国对斜拉桥的健康监测技术研究也很多.针对桥梁的健康监测研究中,不少方法是直接基于数据驱动的,传感器在实桥上的布设上相对离散,对于大跨度的桥梁,存在很多"监测盲点",无法得知传感器未布置处构件的健康状态.因此桥梁健康监测技术难以提供单一构件甚至更微小的材料尺度上的健康状态评估,对桥梁的全寿命安全周期的状态评估是必要的[1].建立有限元模型能对传感器位置上的构件状态进行分析,而利用Benchmark模型能够快速得到反映桥梁动力特性的基准有限元模型,为健康监测和后续的损失预警提供了基础.

近年来,研究人员开展了一系列基于Benchmark模型的结构健康监测研究,如监测方法、模态不确定参数识别、模型修正、损伤识别和振动控制等.Xia等[2-5]提出了一种新的混凝土结构中性轴指标监测方法.Lozano-Galant等[6-8]采用SSI法识别斜拉桥等结构的力学参数.殷红等[9]基于VDM-SSI展开对结构模态参数识别的研究.桥梁的有限元模型是一种能够反映桥梁结构力学性能和工作性能的虚拟模型,Dyke等[10]以密苏里州的Cape Ghirado桥为基础,提出了斜拉桥的Benchmark模型.

目前,按修正对象不同,模型修正方法有模型矩阵修正、模型参数修正以及建立结构响应面函数[11-13]并对其中的参数进行修正的方法.遗传算法自20世纪80年代诞生以来,其应用范围越来越广泛,许多研究者使用遗传算法来识别模态参数并对模型进行修正[14-15].然而,遗传算法也有很多缺点,在使用时可以对遗传算法进行改进,向胜涛等[16]提出了基于改进量子遗传算法的静力多尺度有限元模型交互修正方法,秦世强等[17]提出一种通过双角度算子判定目标函数的改进稳态遗传算法,这些改进的遗传算法可以提高遗传算法的效率以及得到更加满意的结果.

本文建立两种不同功能的有限元模型:一种是用于Benchmark平台研究的Matlab鱼骨梁模型,另一种是Abaqus板壳单元模型.然后从遗传算法的基本原理出发,提出了动态自适应技术和并列选择的方法优化遗传算法结构,干涉遗传选择过程,并赋予初始种群更高的离散性,与调用GA函数的方法对模型进行修正的效果进行比较.

1 基准模型

1.1 项目背景

本文研究基于某大跨斜拉桥展开.主桥采用(230+230) m独塔双索面钢箱梁斜拉桥,主桥布置如图1所示.主梁采用自重较轻的钢箱梁,以减小地震作用下主梁对桥塔的惯性力,主梁选用扁平钢箱梁,梁高3.3 m,全宽37.3 m,主梁横断面布置如图2所示.

本文使用不同方式对主梁进行建模,首先采用Matlab建立反映结构整体性能的鱼骨梁模型,该模型能实现Benchmark模型的功能,如动力分析、模型修正、快速状态评估并对灾害进行实时预警等.然后采用Abaqus建立主梁的精细分析模型,该模型对斜拉桥主梁的空间受力行为模拟更精确,能够校核简化模型.

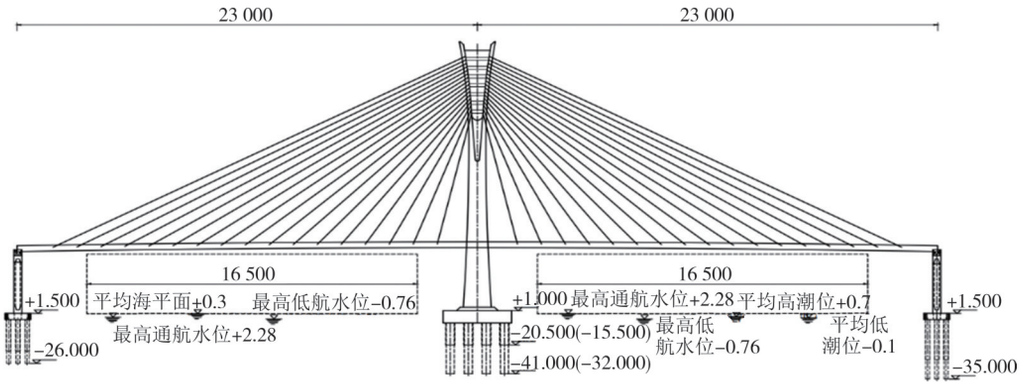


图 1　某独塔斜拉桥主桥桥型布置(单位:cm)

Fig.1　Layout of a cable-stayed bridge with single-tower(unit:cm)

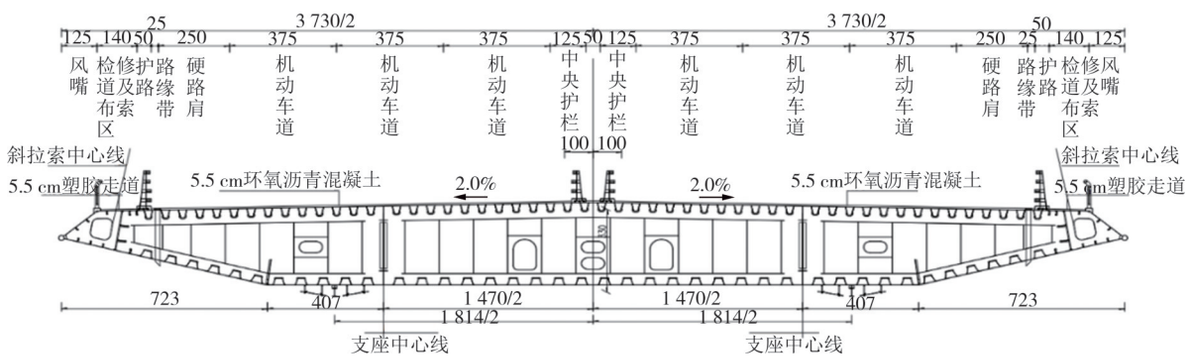


图 2　主梁钢箱梁标准断面(单位:cm)

Fig.2　Standard cross section of steel box girder(unit:cm)

1.2　鱼骨梁模型

1.2.1　结构离散

按照控制截面的需求,鱼骨的“脊梁”部分采用空间刚架单元对钢箱梁进行简化,按 3 m或4 m为一个节段进行离散,该部分包含主梁的截面特性信息,“脊梁”的密度设置一个极小但不为0的数;“鱼刺”部分模拟主梁上横隔板的作用,具体上是模拟横向质量分布,采用刚性的空间刚架单元将斜拉索端点与脊梁进行连接,间距为12 m,其密度 d_{dia} 按式(1)进行计算:

$$d_{\mathrm{dia}}=\frac{A_{\mathrm{g}}Ld}{A_{\mathrm{dia}}L_{\mathrm{dia}}N_{\mathrm{dia}}} \tag{1}$$

式中:A_{g} 为钢箱梁截面面积;L 为主梁全长;d 为钢材密度;A_{dia} 为“鱼骨”的单位面积,取1;L_{dia} 为主梁宽度;N_{dia} 为主梁横隔板的数量.

主塔是混凝土空心箱形倒Y型桥塔,采用空间刚架单元对主塔的箱型截面进行模拟.

斜拉索是仅受拉不可受压的非线性单元,但是由于结构的自由振动是在静力平衡位置的微幅振动,其中索单元的 E_{eq} 由平衡位置斜拉索的最终拉力决定,所以斜拉索可以采用Ernst公式[式(2)]修正的等效弹性模量的空间桁架刚度矩阵进行模拟:

$$E_i=\frac{E_{\mathrm{e}}}{1+\dfrac{E_{\mathrm{e}}\gamma l_x^2}{12\sigma^3}} \tag{2}$$

式中:E_i 为第 i 根拉索的修正弹性模量;E_{e} 为斜拉索的弹性模量;l_x 为斜拉索水平投影长;γ 为拉索的容重;σ 为斜拉索的应力,这里取值为斜拉桥在平衡位置处由成桥索力带来的拉索应力.

1.2.2　边界条件模拟

主塔底部是深达基岩的桩基,可以视为固定约束.模态分析基于斜拉桥成桥时的平衡位置,因此不考虑橡胶支座与阻尼器的具体影响,将边界条件简化为图3所示情况.

1.2.3　模态分析结果

采用高斯消去法求解 $|K-\omega^2M|=0$ 线性方程组的特征值,得到大桥的自振频率和振型.本文列举了一至十阶振型,如图4所示.

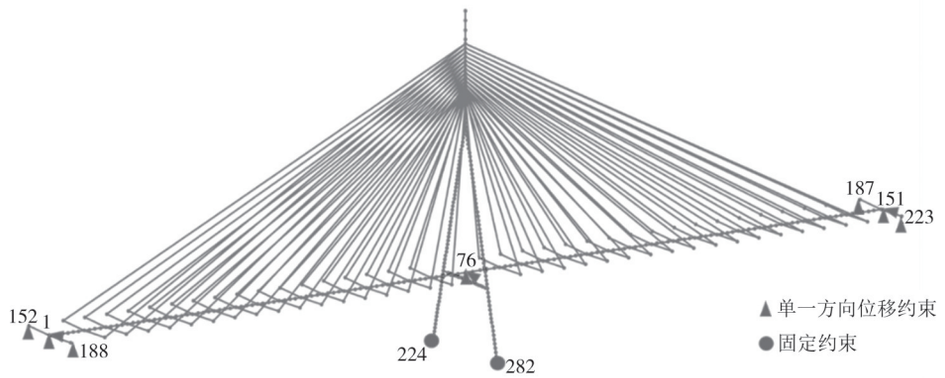
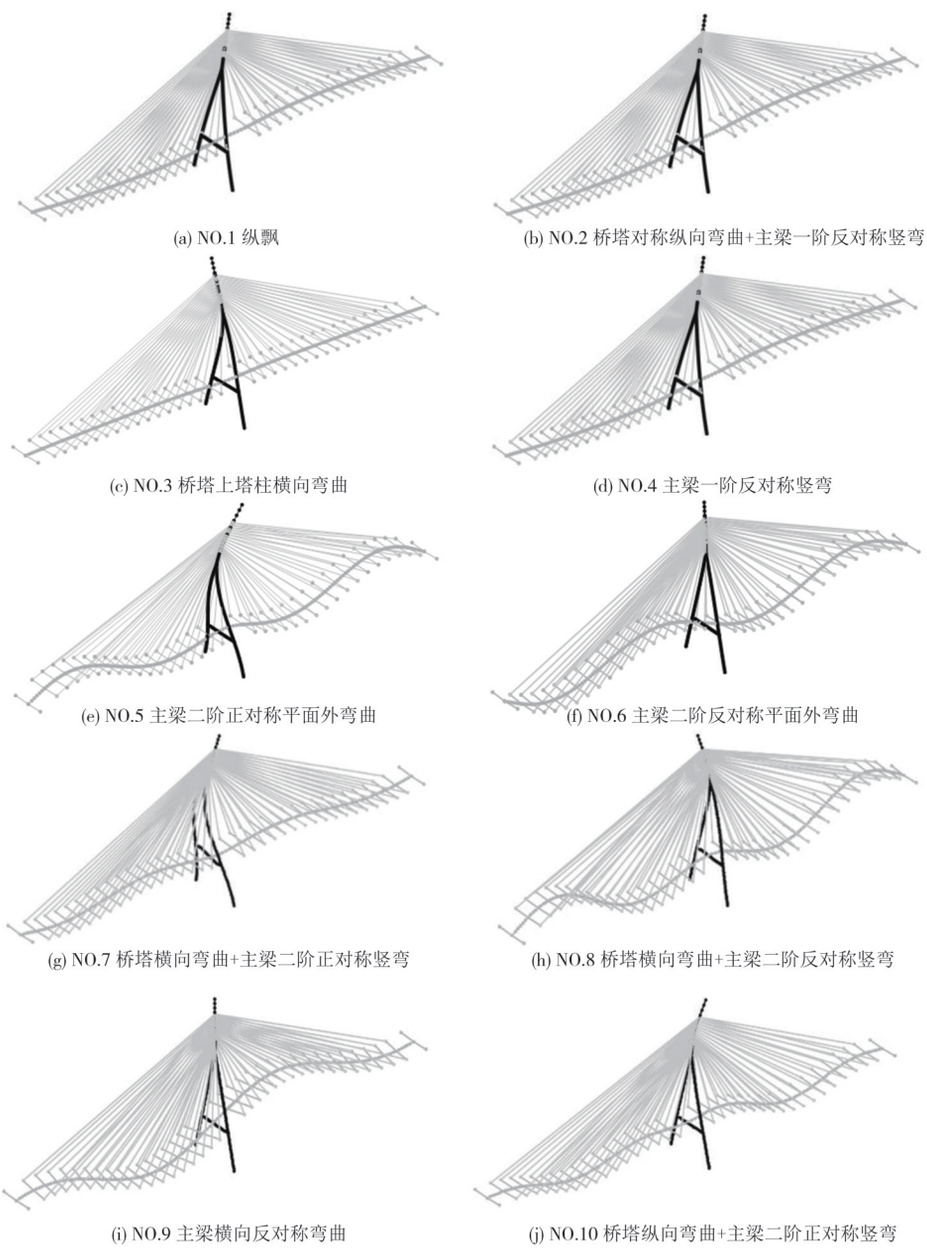


图3 边界条件设置

Fig.3 Boundary condition



(a) NO.1 纵飘

(b) NO.2 桥塔对称纵向弯曲+主梁一阶反对称竖弯

(c) NO.3 桥塔上塔柱横向弯曲

(d) NO.4 主梁一阶反对称竖弯

(e) NO.5 主梁二阶正对称平面外弯曲

(f) NO.6 主梁二阶反对称平面外弯曲

(g) NO.7 桥塔横向弯曲+主梁二阶正对称竖弯

(h) NO.8 桥塔横向弯曲+主梁二阶反对称竖弯

(i) NO.9 主梁横向反对称弯曲

(j) NO.10 桥塔纵向弯曲+主梁二阶正对称竖弯

图4 鱼骨梁模型振型

Fig.4 Mode shapes of spine-beam model

1.3 板壳单元模型

简化的Matlab模型能够满足大部分的健康监测技术研究需求,但是在以下方面,还是存在一定缺陷:

1)鱼骨梁上刚度与质量的分配不够准确,与真实结构的受力情况有差距;

2)鱼骨梁模型的单元划分尺寸较大,无法计算钢箱梁截面中尺寸较小的板件、U肋、焊缝等局部结构的受力,不能进行构件层面的损伤识别.

因此,可通过建立更精细的板壳单元模型,对后续研究需求进行补充,同时简化模型的模态参数应与精细模型相差不大,该模型可对简化模型的模态参数进行比对校核.

1.3.1 结构离散

精细有限元模型与鱼骨梁模型的区别主要在于对主梁的模拟方式不同.

钢箱梁截面的顶板、底板、腹板、横隔板等(U肋对模态影响不大所以忽略)均采用Abaqus软件中的S4R板壳单元进行模拟,钢箱梁的纵横向均按0.5 m的间隔进行离散,其中不同局部构件之间采用约束方式“Tie”进行连接,如图5所示.

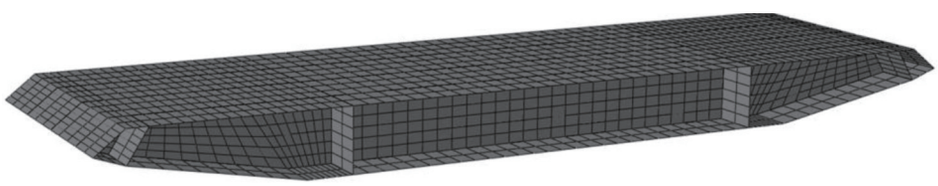


图5 板壳模型横截面示意

Fig.5 Schematic cross-section of plate-shell model

其余构件的离散方式和鱼骨梁模型一致,桥塔采用Abaqus中的B33空间梁单元进行模拟,拉索采用由初始索力进行弹性模量折减的T3D2空间桁架单元进行模拟.模型整体示意与支座布置如图6所示,桥塔底部为固定约束,梁端和跨中为横桥向和竖直方向的单向约束.

主塔底部是深达基岩的桩基,可以视为固定约束.模态分析基于斜拉桥成桥时的平衡位置,因此不考虑橡胶支座与阻尼器的具体影响,将边界条件简化为图3所示情况.



图6 Abaqus模型

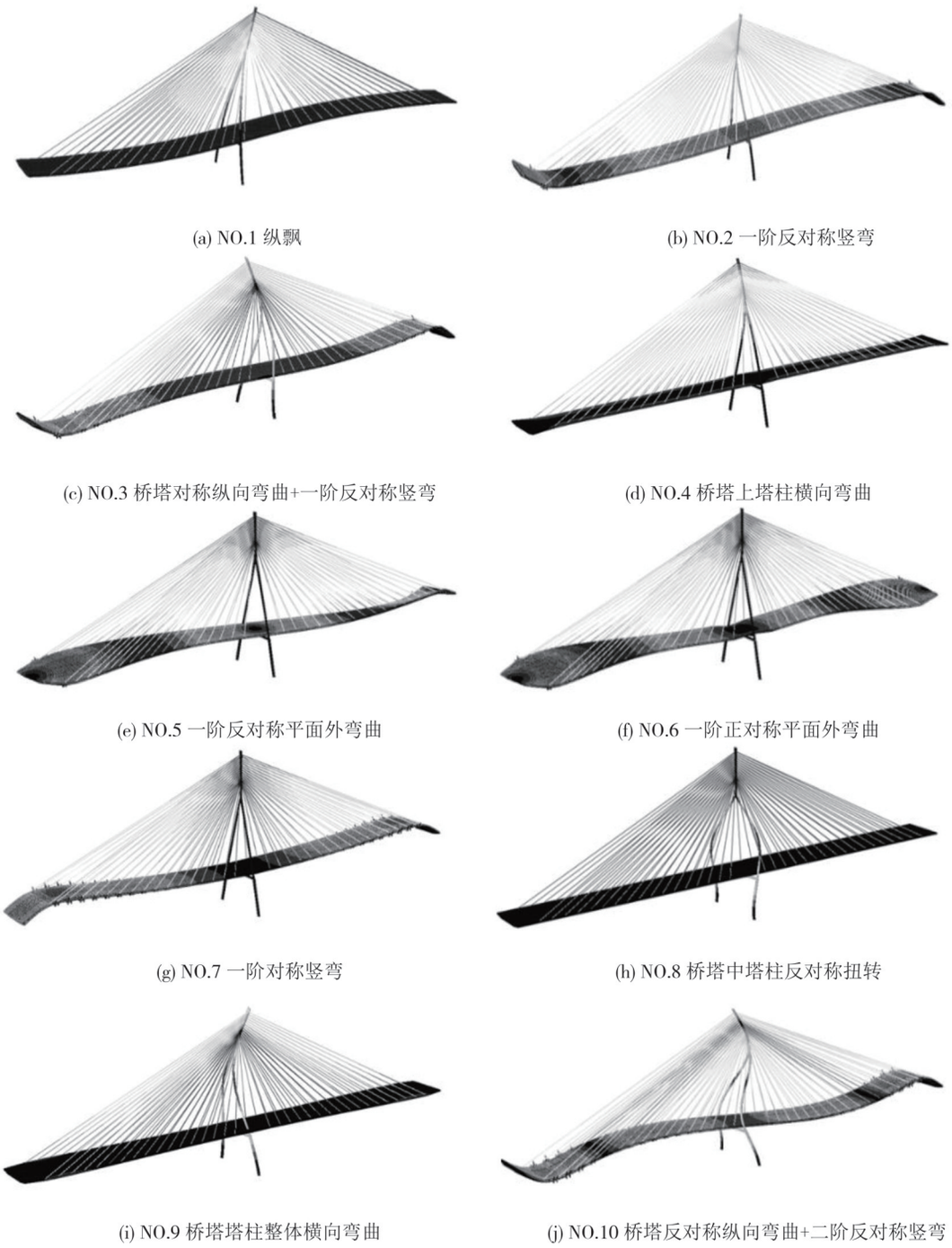
Fig.6 Abaqus model

1.3.2 模态分析结果

在Abaqus中对结构进行自由振动模态分析,一到十阶振型如图7所示,将其与Matlab模型的动力特性参数进行对比,差异的主要原因是对主梁采用“鱼骨”的形式进行简化后,主梁上的刚度和质量分布不能等同于实际的主梁.

1.4 模型对比

表1为模型对比结果,可以看出,鱼骨梁模型相比于板壳单元模型节点和单元数大大减少,计算效率优于鱼骨梁模型,满足动力分析的要求.根据二者的计算结果可以看出,模态出现顺序除了第一、二阶模态外其他没有一一对应.在简化模型的建模过程中,采用刚性横梁模拟横隔板的作用,同时忽略了截面形状的影响,这可能会导致简化模型与空间面外等相关的模态与精细化模型不一致.因此为了得到基准有限元模型,需要对简化模型进行模型修正.



(a) NO.1 纵飘 (b) NO.2 一阶反对称竖弯

(c) NO.3 桥塔对称纵向弯曲+一阶反对称竖弯 (d) NO.4 桥塔上塔柱横向弯曲

(e) NO.5 一阶反对称平面外弯曲 (f) NO.6 一阶正对称平面外弯曲

(g) NO.7 一阶对称竖弯 (h) NO.8 桥塔中塔柱反对称扭转

(i) NO.9 桥塔塔柱整体横向弯曲 (j) NO.10 桥塔反对称纵向弯曲+二阶反对称竖弯

图7 板壳单元模型振型图

Fig.7 Mode shapes of plate-shell model

表1 模型对比

Tab. 1 Comparison of model

模型类型	建模说明	模型规模	模型作用
板壳单元模型	主梁采用S4R板壳单元,主塔采用B33梁单元,拉索采用Ernst公式修正弹性模量的T3D2桁架单元进行建模	节点:160 283 单元:145 694 自由度:978 435	①模型校核 ②静力和局部分析
鱼骨梁模型	采用空间刚架单元和空间桁架单元在Matlab里编写刚度矩阵和质量矩阵的m文件进行建模	节点:383 单元:450 自由度:2 298	①动力分析 ②快速状态评估 ③实时预警

2　基于改进的遗传算法的模型修正

2.1　遗传算法特点

20世纪80年代,Holland教授开创了遗传算法机器学习的新概念.它是一种基于概率的随机搜索优化算法.该算法具有较好的全局搜索性能;利于处理机制不明问题,不需要了解复杂系统的内部变化规律;可扩展性好,能够在多种软件上实现,也可以和多种算法混用.但是,遗传算法也有很多不足之处:适应性函数的确定方式多样,没有通用的方法;早熟现象,指的是在遗传算法初期,种群得到某一极值时,快速繁殖该个体使得整个种群停止进化.该问题是遗传算法中的关键问题,引起的因素有很多,有以下几点:

1)随机产生的初始种群相似个体较多,不够离散,具有随机性.

2)固定的交叉率和变异率不能同时适应整个遗传进化过程,如高交叉率和低变异率会使得种群在初期确定某个局部解然后种群达到稳定,降低其全局搜索能力;反之则会使得遗传求解过程很难收敛,优势个体不易传承优势基因.

针对以上不足,本文从遗传算法原理出发,运用了以下两个方法进行改进.

2.2　动态自适应遗传参数

参考部分文献[18-23]提出的自适应遗传算法,假设在群体出现优势个体后一定能得到繁殖,在繁殖代数较多时,优势个体增长近似于“连续复利模型”,采用自然对数函数模拟初始遗传参数到最终遗传参数的变化规律.在算法开始阶段,设置高交叉率和低变异率,使初始种群中具有优势基因型的个体更快被发现,加快基因交流;在算法稳定阶段,即种群中的整体平均适应值接近最小适应函数值时,设置低交叉率和高变异率,使种群的优势个体不被破坏,同时产生更多变异个体向最优解逼近.一般来说,交叉率P_c取值范围为0.6~0.8之间,变异率P_m为0.001~0.1之间,交叉率和变异率数值直接与现阶段遗传计算状态相关,按式(3)(4)确定交叉率P_c和变异率P_m,其中a_1、a_2、b_1和b_2由P_c和P_m的初始值和最终值确定,δ中的$\bar{f}$为当前种群的平均适应函数值,f_{min}为目前为止的最低适应函数值.

$$P_c = a_1 + b_1 \ln(\bar{f} - f_{min}) \tag{3}$$

$$P_m = a_2 + b_2 \ln(\bar{f} - f_{min}) \tag{4}$$

如图8所示,其中a_1、a_2、b_1和b_2为函数曲线的控制参数,将$\bar{f} - f_{min}$定义为k_{gen},可以根据初始遗传参数P_{c0}、P_{m0}和最终遗传参数P_{c1}、P_{m1}以及最大遗传代数通过分别解二元一次方程进行确定.交叉率P_c的变化范围在0.5~0.8之间,变异率P_m的变化范围在0.01~0.1之间.

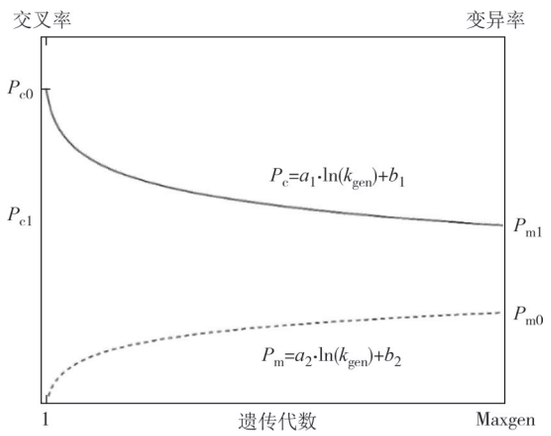


图8　遗传参数函数曲线

Fig.8　Function curve of genetic parameter

2.3　并列选择算法

并列选择算法是用来处理多目标问题的常用方法[24].本文不研究参数敏感性和各子函数与总函数的关系,直接从遗传算法原理出发寻求解决多目标问题途径.具体说来,先将初始种群等数量分割为一系列子种群并构建子函数(子函数仅与某一阶的频率振型有关),在每个子种群中进行交叉、变异和选择运算,确定出该子种群的最优个体;然后将各子种群合并为种群,在种群中再进行交叉、变异、选择运算使各子种群的优势基因得到交流,如此不断进行“分割-并列选择-合并”,最终求出Pareto解,改进的遗传算法流程图如图9所示.

3　基准模型修正

3.1　修正准则

建模参数决定了有限元模型,参数型模型修正的首要问题是修正哪些参数的问题.导致一座桥梁产生误差的因素有很多,比如边界条件的不确定性、材料不确定性、接触方式不确定性等.依据不同的准则进行模型修正,所得到的结果有不同的物理含义.对实际桥梁而言,材料标号不一致、构件退化、接触不良等都会导致桥梁模态参数发生改变.每一阶模态受到各个因素的影响程度都不同,各模态之间可

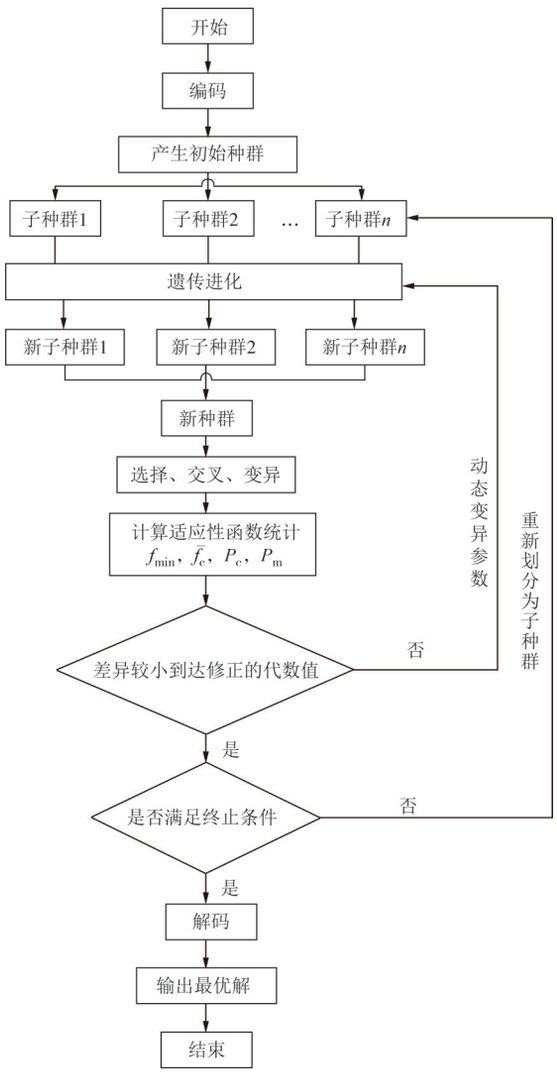


图9 改进的遗传算法流程图

Fig.9 Improved GA flowchart

能是互相冲突的,它是一个多目标问题.求多目标的最优解,是使各模态的误差达到极小.一些误差因素可以用具有明确物理意义的建模参数进行量化,而一些误差如构件之间接触不良无法用特定参数量化,最终反映到结果上是构件的刚度退化.因此未考虑或无法参与修正的因素所引起的模态误差都会被"分担"到修正的参数上,所以合理选取修正参数是模型修正的关键步骤.

本文考虑的修正对象是具有明确物理意义的建模参数,并假定同部件的不同单元都按相同比例进行变化.

3.2 参数选取

本章通过调整材料参数修正结构的模态参数,根据材料参数物理意义的不同可分为:修正类型Ⅰ表示的是由建模方式不同引起的误差,在建立鱼骨梁模型时对主梁质量分布的假设使得其难以达到实际钢箱主梁截面特性;修正类型Ⅱ表示的是由材料标号所引起的误差,误差主要来源于实际情况的复杂性.其中,"鱼骨梁"的质量分布,由主梁纵梁质量和横梁质量两部分组成,如式(5)所示,公式左边为主梁的实际总重量,右边为分别按鱼骨梁模型换算密度计算的主梁质量.A_g为主梁横截面面积,l为主梁跨度,V_t为"鱼骨梁"模型中横梁的单位体积,这里取1,w_t为横梁长度,n'为模型中横梁数量.当确定主梁纵梁与横梁的质量比γ后,d_t和d_g可由式(6)确定.表2中列举了主梁和主塔上主要参与构件刚体矩阵和质量矩阵的10种参数.

$$G = d_g A_g l + V_t w_t d_t n' \tag{5}$$

$$d_g = \frac{G}{(1+\gamma)A_g l},\ d_t = \frac{\gamma G}{(1+\gamma)V_t w_t n'} \tag{6}$$

表2 待修正参数

Tab. 2 Parameters to be corrected

修正类型	项目	符号	单位
Ⅰ	主梁纵横梁质量比	γ	—
Ⅱ	钢材弹性模量	E_s	Pa
	主梁截面惯性矩1	I_{gy}	m^4
	主梁截面惯性矩2	I_{gz}	m^4
	主梁钢材密度	d_s	kg/m^3
	主梁钢材泊松比	v_s	—
	混凝土弹性模量	E_c	Pa
	主塔截面惯性矩1	I_{ty}	m^4
	主塔截面惯性矩2	I_{tz}	m^4
	主塔混凝土密度	d_c	kg/m^3
	主塔混凝土泊松比	v_c	—

3.3 适应性函数的确定

本文将有限元模型计算后的模态与目标模态的残差作为修正标准,其适应性函数可以用式(7)表示[$f_i(\lambda,\Phi)$表示的是关于第i阶模态的频率和振型的函数].它是一个多目标优化问题,各分目标函数[$f_i(\lambda,\Phi)$]之间可能是互相冲突的,因此对Fitness函数求最优解的过程实质上是使得各子函数达到极小化,该最优解又称作Pareto最优解.

$$f(x_1, x_2, \cdots, x_n) = \sum f_i(\lambda, \Phi) \tag{7}$$

子函数由各阶振型的频率残差和振型置信率组成,形式如式(8)所示.其中,$\boldsymbol{\lambda}_{Ai}$是各数据点频率的振型向量,$\boldsymbol{\Phi}_{Ei}$是修正模型(精细板壳单元模型)的某一阶振型向量,$\boldsymbol{\lambda}_{Ai}$越接近$\boldsymbol{\lambda}_{Ei}$,MAC值越大,$f_i$越小,修正结果就越接近最优解.

$$f_i(\lambda, \Phi) = \left| \frac{\boldsymbol{\lambda}_{Ai} - \boldsymbol{\lambda}_{Ei}}{\boldsymbol{\lambda}_{Ei}} \right| \left(\frac{1 - \mathrm{MAC}_i}{\mathrm{MAC}_i} \right) \tag{8}$$

3.4 参数敏感性分析

为了分析各参数对结构模态的敏感性,若不进行试验设计,需要计算3^{10}次,这是不符合实际的.本文选择正交试验设计方法设计10个因素3种水平,共计27次试验,得到L27(3^{10})正交试验设计表,其中3种水平分别取相关参数的80%、100%和120%.

根据L27(3^{10})正交试验设计表,计算Matlab模型各阶模型的频率.因为分析因素大于3个,可以采用多因素方差分析各因素对各阶频率的显著性.原假设为:各控制变量不同水平下观测变量各总体的均值无显著性差异,控制变量各效应和交互作用效应同时为0.本文采用陈希孺等[25]提出的方法,计算得到表3所示的各因素与各阶频率的显著性关系表.表中的值取的是原假设的逆否命题对应的发生概率p,例如第九行第二列的值代表E_s可以解释第一阶振型99.9%的变化原因,一般而言超过95%即可认为有明显的相关性.因此,根据表中参数与模态频率的相关性排除了泊松比参数v_s和v_c,另外由于I_{gy}、I_{gz}、I_{ty}和I_{tz}仅与个别阶振型或高阶振型相关,出于计算效率考虑不作考虑.最后选定修正的建模参数有E_s、d_s、E_c和d_c.

表3　多因素对各阶频率的显著性关系

Tab.3　Significant relationship between multiple factors on each order of frequency

振型	E_s	I_{gy}	I_{gz}	d_s	v_s	E_c	I_{ty}	I_{tz}	d_c	v_c
振型一	0.999	0.616	0.888	0.999	0.080	0.989	0.931	0.884	0.999	0.268
振型二	0.997	0.645	0.629	0.999	0.335	0.866	0.722	0.912	0.938	0.616
振型三	0.998	0.962	0.817	0.999	0.403	0.999	0.827	0.891	0.999	0.238
振型四	0.943	0.839	0.500	0.997	0.348	0.979	0.684	0.334	0.949	0.163
振型五	0.863	0.626	0.586	0.999	0.626	0.961	0.768	0.493	0.945	0.347
振型六	0.983	0.268	0.979	0.999	0.431	0997	0.927	0.18	0.985	0.662
振型七	0.682	0.766	0.695	0.999	0.573	0.807	0.084	0.545	0.928	0.355
振型八	0.061	0.932	0.974	0.469	0.003	0.999	0.419	0.001	0.999	0.054
振型九	0.999	0.622	0.999	0.999	0.03	0.999	0.999	0.030	0.999	0.027
振型十	0.853	0.882	0.999	0.999	0.084	0.999	0.977	0.659	0.986	0.253

3.5 修正结果

为了对比改进遗传算法的优化效力,通过Matlab的内置命令行调用GA函数来更新模型[26].图10绘制了每一代种群的适应度的平均值和最小值与遗传代数的曲线,它表达的是直接调取GA函数的方式对模型进行修正的过程.在修正的过程中,种群在第10代达到最小适应值,其后的计算都无法“突破”局部最优解,造成早熟现象.

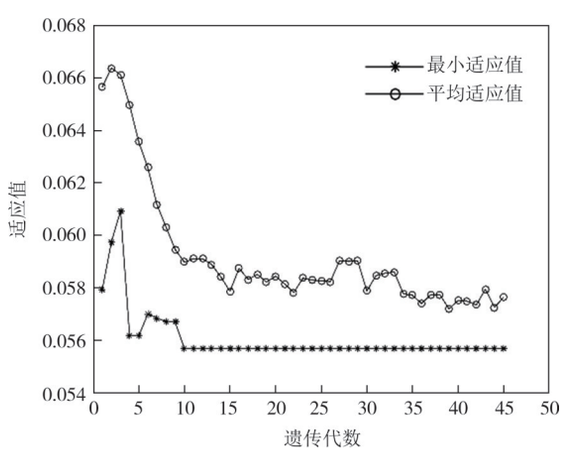


图10　GA函数优化过程

Fig.10　Optimized process of general GA function

采用改进遗传算法对模型进行修正,结果如图11所示.改进的遗传算法的模拟自然选择在动态遗传参数的调整下没有发生早熟现象,并且通过交叉和突变产生了有利的个体,使整个过程逐渐接近最优解决方案.

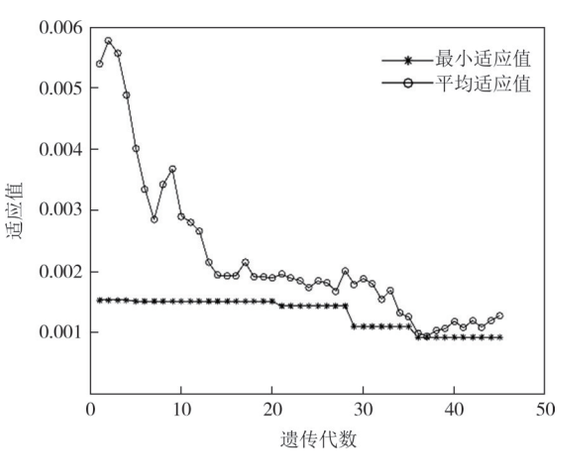


图11　改进的GA函数优化过程

Fig.11　Optimized process of improved GA function

通过对比图10和图11的优化过程,可以看到两组算法都计算了45代个体,未改进前最优适应值为

0.055,且第10代后不再产生更优个体;而改进后的算法,初始适应值为0.001 5,比未改进前低很多,而且在35代后仍在产生更优解.相比GA算法,不论是以第一代还是第N代计算结果作为识别结果,改进的算法效率都更高.

更新后的参数如表4所示,其中钢材弹模和混凝土密度的修正幅度较大.表5为修正后的对比,从表中可以看出,改进的遗传算法的误差比遗传算法的误差小,最高误差为8.3%,而一般遗传算法的误差有一半模态在10%以上.

表4 修正后的参数

Tab. 4 Modified parameters

	钢材弹模/Pa	钢材密度/($kg.m^{-3}$)	混凝土弹模/Pa	混凝土密度/($kg.m^{-3}$)
修正前	2.06E11	7 850	3.40E10	2 400
修正后	2.45E11	7 310	3.68E10	1 920
变幅	18.9	−6.9	8.2	−20

表5 修正前后各模态频率对比

Tab.5 Comparisons for mode frequencies before and after modification

模态序号	模态识别频率/Hz	未修正		改进前		改进后	
		频率/Hz	误差/%	GA修正频率/Hz	误差/%	GA修正频率/Hz	误差/%
1	0.29	0.33	13.8	0.32	10.3	0.31	6.9
2	0.69	0.58	−15.9	0.76	10.1	0.65	−5.8
3	1.23	1.06	−13.8	1.14	−7.3	1.22	−0.8
4	1.53	1.69	10.5	1.70	11.1	1.59	3.9
5	1.85	1.81	−2.2	1.96	5.9	1.85	0.0
6	2.1	1.98	−5.7	2.21	5.2	1.97	−6.2
7	2.25	2.06	−8.4	2.12	−5.8	2.12	−5.8
8	2.53	2.22	−12.3	2.68	5.9	2.34	−7.5
9	2.64	2.34	−11.4	2.37	−10.2	2.42	−8.3
10	2.77	2.63	−5.1	3.08	11.2	2.58	−6.9

4 结 论

本文提出了改进的遗传算法和基准模型,可应用于斜拉桥Benchmark模型修正,主要是研究结论有:

1)通过对比动力特性参数,简化模型的前五阶频率大于有限元精细化模型结果,主要是由于简化模型的约束力度要大于精细结构.同时,模态出现顺序除了第一、二阶模态外其他没有一一对应.主要原因是主梁简化后的刚度由纵向主梁通过截面特性参数计算得出,主梁质量采用分布荷载形式平均作用于横梁,这和原结构不一致,简化模型表现出不同的动力特性,因此简化模型需要进一步修正.

2)采用理论分析和设计正交试验表计算各参数显著性的方法对修正参数进行筛选,最后选定修正的建模参数有E_s、d_s、E_c和d_c.

3)动态适应性参数有利于推迟种群出现早熟的时间;并列选择的自然选择流程虽然增加了每一代完成种群进化的时间,但增加了种群重组时的离散性,优势个体出现概率增加.修正后的模型结果表明:与GA函数相比,改进后的遗传算法具有更高的计算效率,模态参数误差较小.

本文的研究中主要以精细板壳单元模型的结果作为修正目标,在下一步研究中,将结合背景工程测量数据继续修正和完善提出的基准模型.

参考文献

[1] 安永辉, 欧进萍. 大跨度钢桁桥健康监测的Benchmark模型研究[C]//第十九届全国桥梁学术会议论文集(下册). 北京: 人民交通出版社, 2010.
AN Y H, OU J P. Benchmark model for health monitoring of long-span steel truss bridges[C]// Proceeding of 19th National Bridge Academic Conference. Beijing: China Communication Press, 2010.(in Chinese)

[2] XIA Y, MA H Y, SU D. Strain mode based damage assessment for plate like structures[J]. Journal of Vibroengineering, 2013, 15: 37-45.

[3] XIA Y, WANG P, SUN L M. Neutral axis position based health monitoring and condition assessment techniques for concrete box girder bridges[J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2019, 19(1): 1940015.

[4] XIA Y, JIAN X D, YAN B, et al. Infrastructure safety oriented traffic load monitoring using multi-sensor and single camera for short and medium span bridges[J]. Remote Sensing, 2019,

11(22):26-51.

[5] XIA Y, LEI X M, WANG P, et al. Long-term performance monitoring and assessment of concrete beam bridges using neutral axis indicator[J]. Structural Control & Health Monitoring, 2020, 27(12): 1545-1555.

[6] LOZANO-GALANT J A , NOGAL M , PAYA-ZAFORTEZA I , et al. Structural system identification of cable-stayed bridges with observability techniques [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2013, 10(11): 1331-1344.

[7] LOZANO-GALANT J A, TURMO J. An algorithm for simulation of concrete cable-stayed bridges built on temporary supports and considering time dependent effects [J]. Engineering Structures, 2014, 79: 341-353.

[8] LOZANO-GALANT J A, NOGAL M, TURMO J, et al. Selection of measurement sets in static structural identification of bridges using observability trees [J]. Computers and Concrete, 2015, 15(5): 771-794.

[9] 殷红, 董康立, 彭珍瑞. 基于VMD-SSI的结构模态参数识别[J]. 振动与冲击, 2020, 39(10):81-91.
YIN H, DONG K L, PENG Z R. Structural modal parameter identification based on VMD-SSI [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(10):81-91.(in Chinese)

[10] DYKE S J, CAICEDO J M, MOON S J, et al. Phase II benchmark control problem for seismic response of cable-stayed bridges[J]. Struct Control, 2003, 10: 137-168.

[11] 刘海庆, 曹晓宇, 方彦武, 等. 基于响应面法的钢箱梁桥有限元模型修正[J]. 武汉理工大学学报, 2016,38(7):69-75.
LIU H Q, CAO X Y, FANG Y W, et al. Finite element model modification of steel box girder bridge based on response surface method [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2016, 38(7):69-75.(in Chinese)

[12] 李延强, 刘晓慧, 陈泽林, 等.基于索力响应面法的斜拉桥模型修正[J].铁道学报,2021,43(2):168-174.
LI Y Q, LIU X H, CHEN Z L, et al. Updating of cable-stayed bridge model based on cable force response surface method [J]. Journal of the China Railway Society, 2021,43(2):168-174.(in Chinese)

[13] 张立业, 汪波, 王兵见, 等.基于响应面法的斜拉桥动力模型修正方法[J].公路交通科技,2022,39(8):46-52,61.
ZHANG L Y, WANG B, WANG B J, et al. A method for modifying dynamic model of cable-stayed bridge based on response surface method [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2022, 39 (8): 46-52,61.(in Chinese)

[14] CHISARI C , BEDON C , AMADIO C. Dynamic and static identification of base-isolated bridges using genetic algorithms [J]. Engineering Structures, 2015, 102(1):80-92.

[15] TRAN-NGOC H , KHATIR S, DE R G, et al. Model updating for Namo Bridge using particle swarm optimization algorithm and genetic algorithm[J]. Sensors, 2018, 18(12):4131.

[16] 向胜涛,王达.基于改进量子遗传算法的模型交互修正方法[J].浙江大学学报(工学版),2022,56(1):100-110.
XIANG S T, WANG D. Model interactive modification method based on improved quantum genetic algorithm [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2022, 56 (1): 100-110.(in Chinese)

[17] 秦世强,张亚州,康俊涛.基于改进稳态遗传算法的桥梁有限元模型修正[J].中山大学学报(自然科学版),2020,59(4):79-88.
QIN S Q, ZHANG Y Z, KANG J T. Bridge finite element model updating based on improved steady state genetic algorithm [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2020, 59(4):79-88. (in Chinese)

[18] 荆龙江. 预应力混凝土斜拉桥损伤识别理论及应用研究[D].杭州:浙江大学,2007.
JING L J. Study on theory and application of damage identification for P.C. cable-stayed bridge[D]. Hangzhou:Zhejiang University, 2007.(in Chinese)

[19] 谢海龙.遗传算法在桥梁有限元模型修正中的应用[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2018,31(1):33-38.
XIE H L. Application of genetic algorithm in bridge finite element modle updating [J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University (Natural Science Edition), 2018,31(1):33-38.(in Chinese)

[20] 尉钰. 基于改进遗传算法的桥梁模型动力优化[D].西安:长安大学,2010.
YU Y. Dynamic optimization of bridge model based on improved genetic algorithm [D]. Xi'an: Chang'an University, 2010. (in Chinese)

[21] 燕乐纬. 基于遗传算法的结构动力优化[D].重庆:重庆大学,2007.
YAN L W. Dynamic optimization of structure based on genetic algorithm [D]. Chongqing: Chongqing University, 2007. (in Chinese)

[22] SRINIVAS M, PATNAIK L M. Adaptive probabilities of crossover and mutation in genetic algorithms [J]. IEEE Translate on Systems,Man and Cybernetics, 1994,24(4):656-667.

[23] 王富民,张扬,田社平.遗传算法与惩罚函数法在机械优化设计中的应用[J].中国计量学院学报,2004,15(4):34-37.
WANG F M, ZHANG Y, TIAN S P. Application of genetic algorithm and penalty function model in machine optimal design [J]. Journal of China University of Metrology, 2004, 15 (4): 34-37.(in Chinese)

[24] 周强. 基于遗传算法的有限元模型修正方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2009.
ZHOU Q. Finite element model updating methodstudy based on the genetic algorithm[D].Harbin:Harbin Institute of Technology, 2009.(in Chinese)

[25] 陈希孺, 倪国熙. 数理统计学教程[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社, 2009.
CHEN X R, NI G X. Mathematical statistics course[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2009.(in Chinese)

[26] 雷英杰, 张善文. Matlab遗传算法工具箱及应用[M].西安: 西安电子科技大学出版社, 2014.
LEI Y J, ZHANG S W. Matlab genetic algorithm toolbox and its application [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2014. (in Chinese)