DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.260248

SRSM-PSO 算法在斜拉桥有限元模型修正中的应用

刘　鹏
(西安市政设计研究院有限公司,陕西 西安 710068)

摘　要： 为实现模型修正过程中多维变量-响应迭代优化的拟合精度及快速收敛,首先,联合随机响应面法(SRSM)及粒子群优化算法(PSO),融合斜拉桥结构模态实测数据建立融入模态置信度的目标函数,构建了基于SRSM-PSO优化算法的斜拉桥结构有限元模型修正方法;其次,以一新建斜拉桥结构为背景,建立初始有限元模型,结合桥梁实测模态数据进行了斜拉桥结构有限元模型修正,验证了修正方法的可行性。研究结果表明:桥梁初始仿真模型与实际结构的服役状态存在一定的偏差,应进行模型修正;确定斜拉桥结构主体构件材料特性等6个待修正关键参数,修正后斜拉索弹性模量增幅为29.7%,主塔质量密度增幅为24.1%;修正后模型的动力特性与实测值较为吻合,可为后续斜拉桥结构受力性能的深入研究及评估提供更准确的基准仿真模型。

关键词： 桥梁工程;斜拉桥;有限元模型修正;SRSM-PSO算法;参数敏感性
中图分类号： U441;TU997　　**文献标志码：** A　　**文章编号：** 1009-7716(2026)11-0001-06

Application of SRSM-PSO Algorithm in Finite Element Model Updating of Cable-Stayed Bridges

LIU Peng
(Xi'an Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Xi'an 710068, China)

Abstract: To achieve the fitting accuracy and fast convergence of multi-dimensional variable-response iterative optimization in the process of model modification, firstly, combing the stochastic response surface method (SRSM) and particle swarm optimization algorithm (PSO), the objective function concluding integrating the modal confidence degree has been established by considering the measured modal data of cable-stayed bridge structure. Secondly, based on a new cable-stayed bridge structure, the initial FE model is established. The finite element model of cable-stayed bridge has been modified based on the measured modal data of the bridge, and the feasibility of the modified method was verified. The results show that there is a certain deviation between the initial finite element model of the bridge and the service state of the actual structure, and the model should be modified. Six key parameters such as material properties of main structural components of cable-stayed bridge have been selected. After modification, the elastic modulus of the cable is increased by 29. 7%, and the mass density of the main tower is increased by 24. 1%. The dynamic characteristics of the modified model are fit well with the measured results, which can provide a more accurate benchmark simulation model for the further study and evaluation of the mechanical properties of cable-stayed bridge structures.

Keywords: bridge engineering; cable-stayed bridge; FE model updating; SRSM-PSO algorithm; parameter sensitivity

0　引　言

相对中小跨径而言,斜拉桥的结构构成及受力状态较为复杂,而仅基于桥梁设计或竣工图纸建立的斜拉桥结构仿真分析模型将较难精准模拟结构的真实受力状态[1-3]。基于建立的初始有限元模型,联合实桥现场试验数据开展结构基准有限元模型的精细化修正,是后续进行斜拉桥结构精细化仿真及评估的首要工作。

有限元模型修正的研究主要是通过构造结构响应的目标函数并采用迭代优化算法,确定能充分考虑服役状态的结构参数最优表征值。其中,模型修正过程中迭代优化方法较多采用回归分析模型,如响应面[4-8],高斯回归分析[9]、贝叶斯理论[10]及智能算法[11-15]等。马印平等[16]采用响应面法对一组合桁梁桥仿真模型进行修正;付雷等[13]建立了联合响应面-鲸鱼优化算法的模型修正方法,并开展了某一悬索桥仿真模型的修正。与传统响应面法相比,万华

收稿日期：2026-03-11
作者简介：刘鹏(1982—),男,硕士,正高级工程师,从事桥梁工程设计及研究工作。

平[9]等将高斯过程理论融入至响应面模型,建立了改进高斯响应面的修正方法,该方法的回归效果更优。张建新[10]用贝叶斯理论和马尔科夫蒙特卡洛法建立了模型修正分析框架,并用DRAM算法对一框架结构的敏感参数进行了修正。唐煜等[14]基于人工蜂群算法建立了有限元模型局部刚度的修正方法,实现了一刚构斜拉桥塔梁结合局部区域的模型修正。TRAN-NGOC等[15]采用粒子群算法和遗传算法实现了南澳铁路桥有限元模型的修正,并进行了对比,发现粒子群优化算法相对更具有优势;对于斜拉桥结构而言,其待修正参数较多,其结构响应与参数变量(材料或截面特性、边界约束等)间的关系非常复杂,基于回归分析模型构建多维变量-响应关系时难免出现拟合误差。苏宏升[17]等提出了随机响应面法,即通过分析多维输入变量-输出响应的混沌关系式,在多变量情况下的计算优势相当显著。而在多维变量的最优化取值确定方面,TRAN-NGOC[15]等提出的粒子群优化算法可通过空间追踪的思路确定,联合SRSM-PSO迭代优化算法在解决多维变量的优化问题方面将具备非常显著的优势,该方法在有限元模型修正方面的研究仍较为缺乏。

从构建多维变量-响应的迭代优化算法角度出发,提出了斜拉桥结构的有限元模型修正算法。联合随机响应面法和粒子群优化算法建立了基于SRSM-PSO算法的模型修正流程,构建了融合模态置信度的目标函数。以一新建斜拉桥为算例分析,分析了主体结构构件参数变量的敏感性,求解与实桥结构状态较符合的参数最优表征值,验证优化算法的可行性,获取的斜拉桥结构基准有限元模型可为后续结构的仿真评估提供理论支撑。

1　基于SRSM-PSO算法结构有限元模型修正框架

1.1　目标函数

目前,通常基于结构静动力特性响应构建有限元模型修正的目标函数,其中,动力指标通常选用模态置信度、频率及模态柔度等。为从优化算法角度提高仿真模型修正的精准及效率,仅选用模态置信度变量以构造目标函数:

$$f=\sum_{i=1}^{n\,\mathrm{mod}}\left|MAC(\phi_i^{\exp},\phi_i^{fe})-1\right|=\sum_{i=1}^{n\,\mathrm{mod}}\left|\frac{(tr(\phi_i^{\exp})\phi_i^{fe})^2}{(tr(\phi_i^{\exp})\phi_i^{\exp})(tr(\phi_i^{fe})\phi_i^{fe})}-1\right| \tag{1}$$

式中,f为模型修正的目标函数;$MAC(\phi_i^{\exp},\phi_i^{fe})$为模态置信度;$\phi_i^{\exp}$、$\phi_i^{fe}$分别为第$i$阶振型频率试验值和有限元模型计算值。

模型修正过程中,通过迭代优化算法控制频率试验值与计算值间的差异,使得目标函数的适应度值满足$\left|f^k-f^{k-1}\right|\leqslant 10^{-5}$,以达到迭代收敛。优化迭代算法是模型修正过程中需要解决的首要关键问题,文献[17]提出了随机响应面法,即通过分析多维输入变量-输出响应的混沌关系式,在多变量情况下的计算优势相当显著。而在多维变量的最优化取值确定方面,文献[15]提出的粒子群优化算法可通过空间追踪的思路确定,联合SRSM-PSO迭代优化算法对于解决多维变量的优化问题更具优势。

1.2　随机响应面法(SRSM)

SRSM的基本原理是通过将输入—输出过程模拟为黑箱,通过一个包含未知参数的混沌多项式模拟整个过程,即通过特征样本确定表达式中的未知系数以求解输出变量的概率统计信息。对于斜拉桥结构的频率计算模型,建立输出值与输入变量如材料特征参数之间的关系,为:

$$\boldsymbol{Y}=F(\boldsymbol{X})=F(x_1,x_2,...,x_n) \tag{2}$$

式中:$\boldsymbol{Y}$、$\boldsymbol{X}=(x_1,x_2,...,x_n)$分别为输出响应(即频率值)及输入变量(即材料特征参数);F为混沌计算模型。

SRSM的求解实质是通过混沌关系式求解输出响应的概率特征值,主要步骤为:首先,选取标准正态变量作为混沌多项式的输入变量,即若输入变量$\boldsymbol{X}$为非正态分布则需进行转换,见式(2);然后,建立输出响应与随机变量的多项式,见式(3);最后采用LHS抽样方法选取配点以求解采样点对应的输出响应,最终确定混沌多项式的未知系数a_0、a_i、a_{ii}及a_{ij}。

$$\boldsymbol{X}=F^{-1}(\boldsymbol{\Phi}(\boldsymbol{\varepsilon})) \tag{3}$$

式中:$F^{-1}(\cdot)$为变量$\boldsymbol{X}$的累积分布函数反函数;$\boldsymbol{\Phi}(\boldsymbol{\varepsilon})$随机变量$\boldsymbol{\varepsilon}$的标准正态分布。

$$y=a_0+\sum_{i_1=1}^{n}a_{i_1}H_1(\varepsilon_1)+\sum_{i_1=1}^{n}\sum_{i_2=1}^{i_2}a_{i_1}a_{i_2}H_2(\varepsilon_1,\varepsilon_2)+\sum_{i_1=1}^{n}\sum_{i_2=2}^{i_2}\sum_{i_3=3}^{i_3}a_{i_1}a_{i_2}a_{i_3}H_3(\varepsilon_1,\varepsilon_2,\varepsilon_3)+\cdots \tag{4}$$

式中:a_0、a_i、a_{ii}及a_{ij}为混沌多项式中待求的未知系数;$H_i(\varepsilon)$为随机变量ε的i阶Hermite正交多项式[17]。

1.3　粒子群优化算法(PSO)

粒子群优化算法(PSO算法)原理是通过位置和

速度随机的粒子群搜索最优粒子的空间位置,当粒子发现当前的最好位置(pbest)及现在的位置以总结运动经验,所有粒子群的运动经验集合可得到最优值 gbest,即 gbest 是 pbest 中的最优值,粒子通过对比决定下一步的运动逐步迭代确定最优解。假定 n 维搜索空间中的第 i 个粒子的位置和速度分别为 $X_i=(x_{i,1},x_{i,2},\cdots x_{i,n})$ 和 $V_i=(v_{i,1},v_{i,2},\cdots v_{i,n})$;每一次迭代中,粒子通过更新其位置及速度的最优解来更新自己,确定个体极值 pbest $(p_{i,1},p_{i,2},\cdots p_{i,n})$ 及整体最优解 gbest(p_g),当确定这两个最优值时,粒子将进一步更新自己的速度及位置:

$$\begin{cases} v_{i,j}=(t+1)=wv_{i,j}(t)+c_1r_1[p_{i,j}-x_{i,j}(t)]+c_2r_2[p_{g,j}-x_{i,j}(t)] \\ x_{i,j}(t+1)=x_{i,j}(t)+v_{i,j}(t+1) \end{cases} \tag{5}$$

式中:w、c_1、c_2 分别为惯性权重和学习因子,通常 $c_1=c_2\in(0\sim4)$,r_1、r_2 分别为服从均匀分布的随机数。

1.4　基于 SRSM-PSO 算法的模型修正流程

联合 SRSM 及 PSO 迭代优化算法,建立基于 SRSM-PSO 算法的斜拉桥有限元模型修正的计算步骤为:

(1)首先建立斜拉桥结构初始有限元模型,并确定初始输入设计变量,假定设计变量变化范围,采用超立方抽样方法(LHS 法)创建样本点;

(2)基于有限元模型求解样本点对应的频率输出响应 y_i,建立忽略交叉项的二次混沌多项式,见式(6):

$$y=a_0+\sum_{i=1}^{n}a_i\varepsilon_i+\sum_{i=1}^{i_2}a_{ii}(\varepsilon_i^2-1) \tag{6}$$

(3)将样本点概率变换将其转换至原始概率分布空间得到样本集 X;采用有限元仿真分析计算频率输出响应矩阵 Y,将 (X,Y) 带入式(8)后求解系数矩阵 $A=(a_0,a_i,a_{ii})$;

(4)基于步骤(3)中求解的混沌多项式的输入变量进行大量抽样,求解输出响应;

(5)将步骤(4)中求解大量输出响应值带入式(1),采用 PSO 算法迭代求解多维输入参数的最优目标函数值,最终确定多维输入参数的最优值以作为修正参数。

基于 SRSM-PSO 算法的斜拉桥结构有限元模型修正流程如图 1 所示。

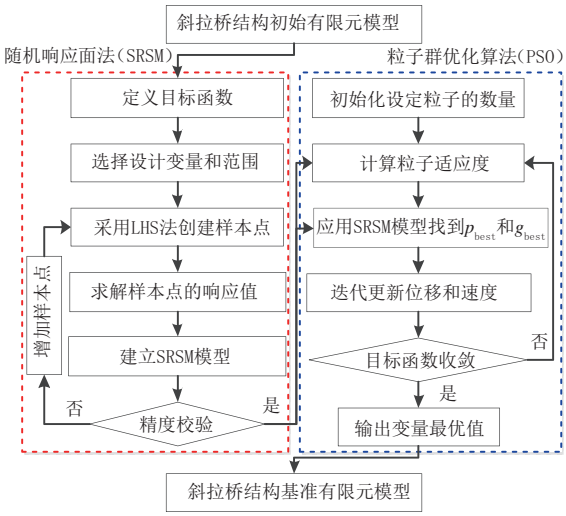


图 1　基于 SRSM-PSO 算法斜拉桥结构有限元模型修正方法

2　背景桥梁

以跨径布置为 102 m+208 m+102 m 的钢桁塔斜拉桥为依托(见图 2)。主梁为梁高 3 m 的双边箱结构。主塔为由 4 个钢箱型钢柱组成的框架性结构。全桥采用 32 对平行钢绞线拉索斜拉索,索间距为 12 m。以竣工图纸为基准建立初始有限元模型(见图 2)。主塔、主梁采用梁单元模拟,斜拉索采用桁架单元模拟,塔梁间支座采用约束竖向位移的弹性连接模拟,桩基按 m 法考虑桩土相互作用,约束桩侧向位移及桩底位移。全桥主体结构初始材料参数取值如表 1 所示。

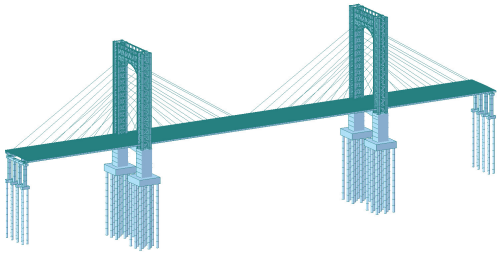


图 2　背景桥梁全桥有限元模型

表 1　主体结构材料特性

材料特性	弹性模量/MPa	泊松比	密度/(kg·m^{-3})
主梁及主塔(Q345qD)	2.05×10^5	0.2	7 850
拉索(平行钢绞线)	1.95×10^5	0.2	7 850

基于建立的全桥有限元模型,采用子空间迭代法获取斜拉桥结构的主振型及理论频率值(见图 3)。由图可知,斜拉桥主梁一阶振型为反对称竖弯,频率为 0.444 Hz,二阶振型为正对称竖弯,为 0.509 Hz,这主要是由于钢塔的刚度相对较柔,与主塔纵弯相耦合的主梁一阶反对称竖弯振型较易出现。三阶振型为主梁的一阶横弯,频率为 0.815 Hz,这主要是由于主梁横向刚度相对竖向刚度较大。

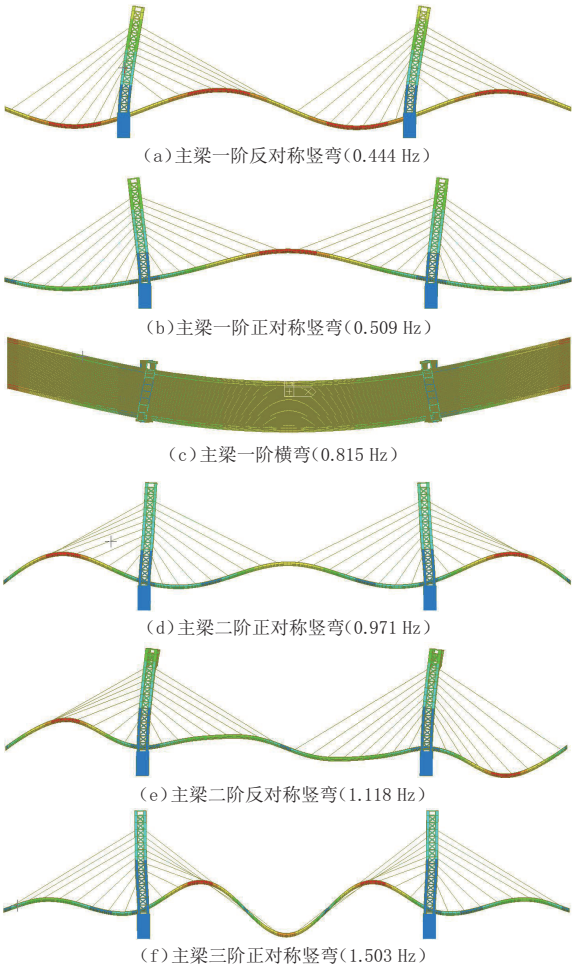


图3　斜拉桥结构主振型及频率理论值

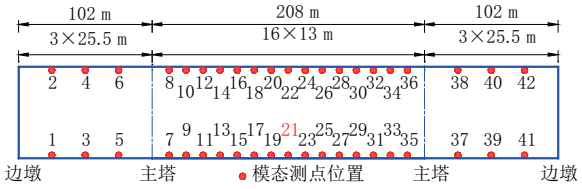


图4　斜拉桥主梁模态测点布置图

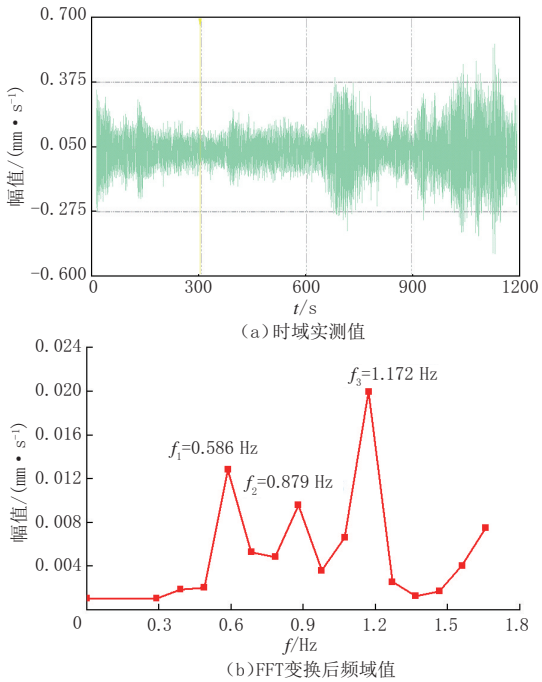


图5　模态测点21#时域及频域实测值

表2　主振型频率实测值

主振型模态	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7	f_8	f_9
频率实测值/Hz	0.59	0.88	1.17	1.76	1.95	2.25	3.13	3.52	4.10

3　基于现场试验的斜拉桥有限元模型修正

3.1　现场模态试验

基于第2节斜拉桥结构的自振特性理论分析结果,同时根据测试精度要求、测试简便性及现场实际情况,采用环境随机激振测试方法,获取全桥结构自由振动响应的数值信号,以达到识别桥梁主振型模态。全桥模态测试点以桥梁中心线基准对称布设,模态测点布置见图4。以跨中测点21#实测结果为例进行傅里叶变换(FFT),时域及频域实测值结果见图5。由图5结果可知,前3阶实测频率值分别为0.586、0.879、1.172 Hz。根据现场模态试验实测分析可得斜拉桥结构的前9阶主振型模态频率,结果如表2所示,为后续进行有限元模型修正提供基准模态频率值。

3.2　斜拉桥结构有限元模型修正

3.2.1　修正参数的灵敏度分析

为校准斜拉桥结构有限元模型,采用灵敏度分析手段确定合理的模型修正参数是前提。对于斜拉桥结构而言,通常选取主体构件如主梁、主塔及拉索构件的材料特征参数作为初始修正参数,如钢主梁弹性模量E_T和质量密度D_T、主塔弹性模量E_L和质量密度D_L、斜拉索弹性模量E_C和质量密度D_C。为保证模型修正结果的精确性,斜拉桥结构主体构件的材料特征参数修正范围设定为[0.80,1.20]。进行修正参数的灵敏度分析时,采用蒙特卡洛抽样法研究不同修正参数取值下斜拉桥结构主振动模态的差异性,并通过模态保证准则值MAC以确定主振型的匹配,其中主振型模态选取斜拉桥结构的前9阶振型特征。初拟修正参数对斜拉桥结构前9阶主振型频率的Spersman灵敏度系数[18,21]如图6所示。

由图5结果可知,斜拉桥结构前3阶主振型模态主要取决于主塔的弹性模量及密度、主梁弹性模量,主梁密度及斜拉索密度次之,斜拉索弹性模量最小;对于斜拉桥结构的主振型模态主要以主梁及主塔的振动模态为主,因此选取斜拉桥结构前9阶的振动频率为基准值,采用参数灵敏度分析结果对构件参

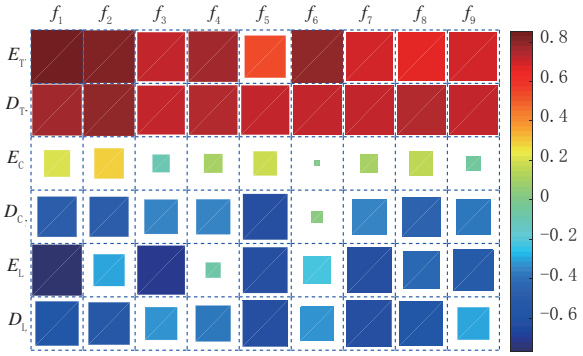


图6　参数灵敏度分析

数特性 E_T、D_T、E_L、D_L、E_C、D_C进行修正。

3.2.2　迭代优化

采用编程语言编制SRSM-PSO算法,对修正参数进行迭代优化分析。选取前9阶主振动频率为修正项,以模态保证准则值MAC进行适配,其中目标函数收敛的判断准则选定为$\left|f^k - f^{k-1}\right| \leqslant 10^{-5}$。待修正6个参数的调整系数随迭代次数的变化过程如图6所示,目标函数的收敛值随迭代次数的变化过程见图7。由图7和图8可知,当目标函数迭代次数超过30次,待修正参数的调整系数达到稳定,且目标函数值小于10^{-5},则可获取基于SRSM-PSO算法的最优化修正参数值。

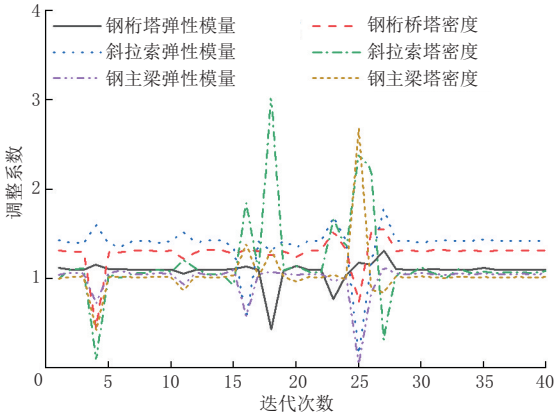


图7　参数迭代过程

3.2.3　修正结果

基于SRSM-PSO优化迭代算法获取斜拉桥结构主体构件材料特性参数的修正值,得到了斜拉桥结构前9阶修正前后的主振型频率值,结果如图9所示。由图9结果可知,修正后的前2阶主振型频率与实测频率值的误差均在5%内,高阶振型频率误差值较大,但均小于5%。这表明修正后的斜拉桥结构有限元模型的计算值与实测值吻合良好,可为后续反映斜拉桥实际结构受力状态提供较为精准的基准仿真模型。

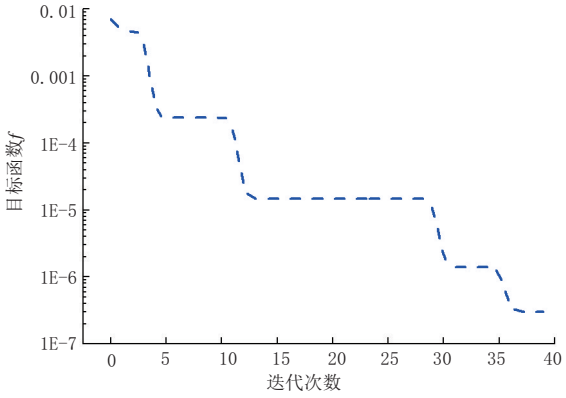


图8　静动力目标函数收敛过程

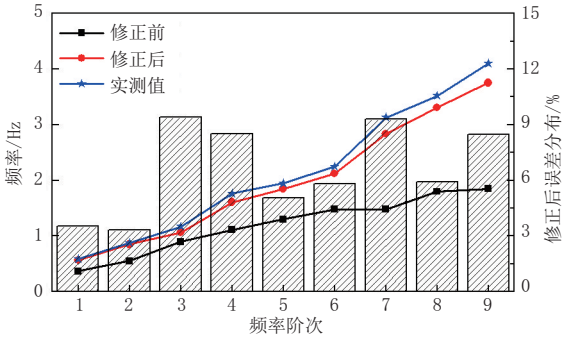


图9　修正前后结构频率比较

基于SRSM-PSO算法对斜拉桥结构主体构件的材料特性参数进行修正,模型修正前后的参数取值结果如表3所示,由表3结果可知,斜拉索弹性模量的变化幅度最大,主塔质量密度次之,主梁质量密度最小;修正后的参数取值均较修正前取值大,这主要是由于斜拉桥结构的整体刚度相对理论模型偏大,说明新建斜拉桥结构的动力特性良好。

表3　有限元模型修正前后参数的比较

参数	E_T/MPa	D_T/(kg·m^{-3})	E_C/MPa	D_C/(kg·m^{-3})	E_L/MPa	D_L/(kg·m^{-3})
修正前	2.06×10^5	7 850	1.95×10^5	7 850	2.06×10^5	7 850
修正后	2.27×10^5	10 338	2.77×10^5	8 667	2.16×10^5	7 995
变化幅度/%	9.3	24.1	29.7	7.7	4.9	1.8

4　结　语

本文提出了一种基于随机响应面-粒子群优化算法的有限元模型修正方法,以一新建斜拉桥结构为背景桥梁建立初始有限元模型,验证了该方法的可行性,主要结论如下:

(1)联合SRSM及PSO算法的优化迭代优势,建立了基于SRSM-PSO算法的斜拉桥结构有限元模型

修正方法。

(2)基于桥梁设计或竣工图纸建立的有限元模型与实际斜拉桥结构的动力特性实测结果存在一定的偏差,应对桥梁结构有限元模型进行修正,且新建桥梁的整体刚度相对偏大,表明动力特性较好。

(3)经实桥算例验证,SRSM-PSO算法在有限元模型修正方面的满足精度要求,优化效果较好;且修正后的斜拉桥结构模型的模态频率与实测结果更吻合,这表明该算法可对斜拉桥结构的初始有限元模型进行合理修正,并能为后续的斜拉桥结构受力性能的深入研究及评估提供更准确的基准仿真模型。

参考文献:

[1] Sanayei M, Bell E S, Javdekar C N. Bridge Deck Finite Element Model Updating Using Multi-Response NDT Data[C]// Structures Congress. 2005: 1-9.

[2] 宗周红,夏樟华.联合模态柔度和静力位移的桥梁有限元模型修正方法[J].中国公路学报,2008,21(6):43-49.

[3] 方志,张国刚,唐盛华,等.混凝土斜拉桥动力有限元建模与模型修正[J].中国公路学报,2013,26(3):77-85.

[4] 韩建平,骆勇鹏,郑沛娟,等.基于响应面的刚构-连续组合梁桥有限元模型修正[J].工程力学,2013,30(12):85-90.

[5] 邓苗毅,任伟新,王复明.基于静力响应面的结构有限元模型修正方法[J].实验力学,2008,23(2):103-109.

[6] 单德山,孙松松,黄珍,等.基于试验数据的吊拉组合模型桥梁有限元模型修正[J].土木工程学报,2014(10):88-95.

[7] Deng L, Cai C S. Bridge Model Updating Using Response Surface Method[J]. Journal of Bridge Engineering, 2010, 15(5):553-564.

[8] 谢伟平,曹晓宇,肖伯强,等.基于模态测试的宽幅钢箱梁桥有限元模型建立、修正与分析[J].振动与冲击,2018,37(1):98-105.

[9] 万华平,任伟新,魏锦辉.基于高斯过程响应面的结构有限元模型修正方法[J].振动与冲击,2012,31(24):82-87.

[10] 张建新.基于贝叶斯方法的有限元模型修正研究[D].重庆:重庆大学,2014.

[11] 韩万水,刘修平,邓露,等.基于实数编码遗传算法的桥梁有限元模型修正方法[J].交通运输工程学报,2019,19(2):14-24.

[12] 刘海弯,刘虹延,李铎.基于粒子群算法的连续刚构有限元模型修正[J].兰州工业学院学报,2018,25(4):11-14;21.

[13] 付雷,马闻达,高鹏,等.基于RSM-WOA的桥梁结构有限元模型修正[J].中国科技论文,2021,16(8):875-882.

[14] 唐煜,岳杰,华旭刚.基于人工蜂群算法的桥梁有限元模型局部刚度修正[J/OL].铁道科学与工程学报:1-11.

[15] TRAN-NGOC H, KHATIR S, DE ROECK G, et al. Model updating for NamO bridge using particle swarm optimization algorithm and genetic algorithm[J]. Sensors, 2018, 18(12):1-20.

[16] 马印平,刘永健,刘江.基于响应面法的钢管混凝土组合桁梁桥多尺度有限元模型修正[J].中国公路学报,2019,32(11):51-61.

[17] 苏宏升,董晓阳.基于改进随机响应面法的含风电电力系统概率潮流计算[J].太阳能学报,2021,42(6):289-296.

[18] Wan H P, Ren W X. Parameter Selection in Finite-Element-Model Updating by Global Sensitivity Analysis Using Gaussian Process Metamodel[J]. Journal of Structural Engineering, 2015, 141(6): 04014164.

[19] Fang S E, Ren W X, Perera R. A stochastic model updating method for parameter variability quantification based on response surface models and Monte Carlo simulation[J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2012, 33(2): 83-96.

[20] Helton J C, Johnson J D, Sallaberry C J, et al. Survey of sampling-based methods for uncertainty and sensitivity analysis[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2006, 91(10 - 11): 1175-1209.

[21] Kala Z. Sensitivity assessment of steel members under compression [J]. Engineering Structures, 2009, 31(6): 1344-1348.