

基于最优径向基神经网络的大跨度悬索桥 有限元模型修正

杨文甫¹,陈鑫^{2,3}

(1.广东盛翔交通工程检测有限公司,广东 广州 511400;2.中铁大桥科学研究院有限公司,湖北 武汉 430034;

3.桥梁结构健康与安全国家重点实验室,湖北 武汉 430034)

摘要:为对大跨度悬索桥结构行为进行精确预测与分析,提出一种有限元模型修正方法。采用遗传算法构建最优径向基神经网络用于表示结构响应与结构参数之间的映射关系,以结构动力响应作为输入,分别采用数值仿真数据和健康监测数据对某大跨度悬索桥进行模型修正。结果表明:遗传算法优化后的最优径向基神经网络,可以有效表示结构响应与待修正参数之间的函数关系。通过最优径向基神经网络修正可有效提高有限元模型计算精度。基于数值仿真数据修正后,其计算误差均在1.5%以内。将健康监测数据实测动力特征作为特征量,采用最优径向基神经网络可对大跨悬索桥进行有效修正。修正后,最大计算误差由修正前20.37%降低至7%以内,误差最大降幅达77.91%。

关键词:悬索桥;模型修正;响应面;径向基函数;遗传算法

中图分类号:U446

文献标志码:A

0 引言

大跨度桥梁结构的动态行为预测分析通常是基于数值有限元模型进行^[1]。然而,这些数值模型通常是理想化的表示,可能涉及建模简化或不确定的系统参数,例如边界条件、几何结构、材料特性或动力相互作用等,使得有限元计算结果通常难以准确反映实际结构响应^[2]。通过将实测结构响应与数值计算结果进行匹配,实现有限元模型的精确修正,可有效降低计算模型的不确定性,提高数值模型计算精度。

响应面法最早由Box等^[3]于1951年提出,近年来逐渐在结构有限元修正领域中得到广泛应用^[4-5]。响应面法的基本思想是通过使用少量数据集建立一个可以有效表示所有数据点的输入和输出的相关模型,即代理模型,实现有限元模型修正。郭勤涛等^[6]首次将响应面法应用于结构模型修正;Ren等^[7]采用阶乘设计定量地确定了每个修正参数相对于结构响

应的重要性,并基于中心复合试验设计构建响应面模型,对箱梁模型进行了有效修正;周林仁等^[8]通过引入径向基函数来代替传统的多项式响应面,有效提高了模型修正精度;魏锦辉等^[9]通过在最优点附近不断调整参数、更新样本,形成响应面模型,有效解决了有限元模型修正过程中易陷入局部最优的问题,拓展了响应面法在高度非线性问题中的应用;苏国韶等^[10]采用二次二阶矩法,建立了高斯过程动态响应面,并将该响应面模型用于静力可靠度评估,有效提高了计算精度和计算效率;孙全胜等^[11]采用环境振动试验建立动力响应面,并基于该响应对自锚式悬索桥进行了修正;Shan等^[12]针对大型桥梁结构的复杂性,将桥梁结构进行分区,提出了一种基于子结构的模型修正方法,并成功应用于斜拉悬索组合桥梁的模型修正;Petersen等^[13]采用结构高阶振形建立响应面模型用于浮桥模型修正,分析了噪声对模型修正精度的影响;Hester等^[14]探讨桥梁边界条件差异对结构动力特性的影响,采用静动力联合响应对桥梁边界条件进行了修正。然而,由于大跨悬

收稿日期:2022-10-20(修改稿)

资助项目:国家重点研发计划项目(编号:2017YFF0108700);广东省交通运输厅科技项目(编号:科技-2017-02-015)

作者简介:杨文甫,男,硕士,高级工程师.E-mail:ccpa2020@163.com

索桥的结构复杂性和高度非线性,以往研究中所采用的响应面模型往往难以精确反映结构参数与结构响应之间的映射关系,在应用于大跨悬索桥时,其模型修正精度仍有待提高。近年来,桥梁健康监测得到了广泛发展,但以往研究多基于模型试验或实桥荷载试验,健康监测系统未得到有效利用,适用范围有限。本文采用遗传算法构建最优径向基神经网络用于表示结构响应与结构参数之间的映射关系,以结构动力响应作为输入,分别采用数值仿真数据和健康监测系统实测数据对某大跨度悬索桥进行模型修正。

1 有限元模型修正过程和方法

1.1 径向基神经网络原理

神经网络包含输入层、隐含层和输出层3个环节。径向基神经网络采用径向基函数作为隐含层的激活函数,具有训练方便快捷、不易陷入局部最优等优点,在高度非线性问题中应用较为广泛^[15]。

令 P 为输入矢量,隐含层与输出层单元数分别为 S^1 和 S^2 ,则径向基神经元的输出可表示为:

$$a_i^1 = \exp[-(\|W_i^1 - P\| \cdot b_1)^2] \quad i = 1, 2, \dots, S^1 \quad (1)$$

式中: W_i^1 为输入矢量 P 与隐含层的第 i 个神经元之间的权值矢量; b_1 为伸展常数,即偏差。

输出层的输出可以表示为:

$$a_j^2 = \sum_{i=1}^{S^1} W_{ji}^2 a_i^1 + b_2 \quad j = 1, 2, \dots, S^2 \quad (2)$$

式中: W_{ji}^2 为隐含层第 i 个输出值与输出层第 j 个神经元之间的权值矢量; b_2 为偏差。

通过样本数据进行径向基神经网络训练,即可确定隐含层与输出层的权值与偏差。

1.2 最优径向基神经网络求解

径向基神经网络的优化可分为网络结构的优化和网络初始权值和阈值优化两个部分。其中网络结构优化主要包含径向基的层数和各径向基的节点数。已有研究表明:神经网络隐含层数达到3层时,已具有较高的精度,过高的隐含层数对计算精度的提高并不明显,反而会造成计算效率的显著下降。隐含层的节点数可根据输入层节点数来选取,如下式所示:

$$N_1 = 2N_2 + 1 \quad (3)$$

式中: N_1 为隐含层节点数; N_2 为输入层节点数。

因此,径向基神经网络的优化即可看成是径向基神经网络初始权值和阈值的优化。

将径向基神经网络预测值与期望值的误差作为目标函数输出,如式(4)所示。通过不断迭代搜索,直到径向基神经网络权值和阈值满足误差要求,得到最优径向基神经网络。

$$J_m = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^q \sum_{t=1}^r [\bar{y}(k) - y_t(k)]^2 \quad (4)$$

式中: q 为径向基神经网络训练样本中输入输出对数量; r 为径向基神经网络输出节点数量; $\bar{y}(k)$ 为期望值; $y_t(k)$ 为预测值。

径向基神经网络优化的具体步骤如图1所示。

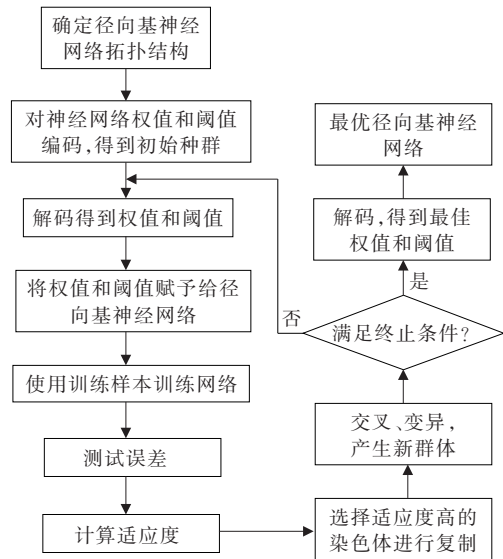


图1 遗传算法优化的径向基神经网络流程图

1.3 基于最优径向基神经网络的模型修正

令结构响应与待修正参数之间存在某种函数关系,如式(5)所示:

$$y = f(p) \quad (5)$$

式中: y 为结构响应,即有限元模型修正中的特征量; p 为待修正参数。

式(5)可以表示为:

$$p = f^{-1}(y) \quad (6)$$

式中: $f^{-1}(\cdot)$ 为反函数。

通过对待修正参数与对应结构响应的样本数据进行训练,得到径向基神经网络。然后,通过遗传算法优化,建立最优径向基神经网络,用于表示该函数关系 $f^{-1}(\cdot)$,即可通过实测结构响应实现有限元模型

修正。有限元模型修正的具体步骤如图 2 所示。

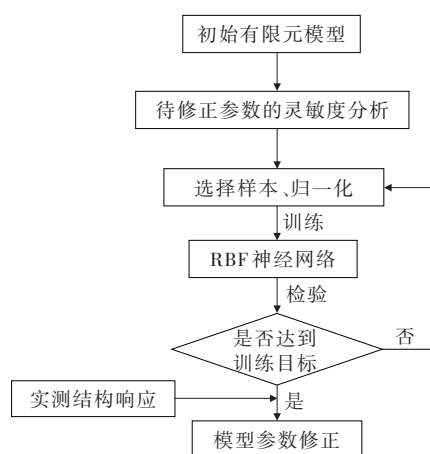


图 2 有限元模型修正流程图

2 初始有限元分析

2.1 结构振动监测系统

某山区悬索桥主跨为 1 196 m, 主梁采用扁平流线形钢箱梁。为保障该桥的长期健康与安全, 在大桥建成时安装有健康监测系统。该桥结构振动采用单向加速度传感器进行测量, 主跨跨中上游、塔顶布置有纵桥向振动测点, 主跨八分点上游、塔顶布置有横桥向振动测点, 主跨八分点上游、主跨四分点下游布置有竖向振动测点, 全桥共布置 22 个振动测点。结构振动监测数据连续采集, 连续存储, 采样频率为 20 Hz。结构振动测点布置如图 3 所示。

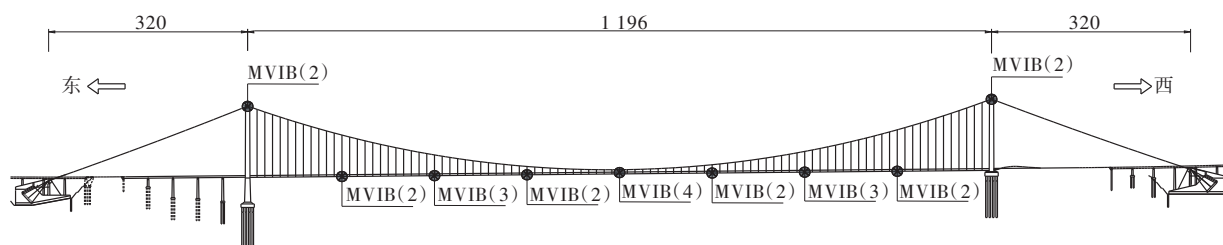


图 3 结构振动测点布置图(单位:m)

2.2 初始有限元模型的建立

根据该桥设计图, 采用 Midas/Civil 建立初始有限元模型。主梁、桥塔采用梁单元模拟, 主缆、吊索采用只受拉桁架单元模拟。桥塔支座约束竖向和横桥向位移, 未考虑桩土作用的影响。根据设计资料, 初始有限元模型中材料基本参数为: 桥塔选用 C50 混凝土, 弹性模量为 3.45×10^4 MPa, 密度为 $2\,549 \text{ kg/m}^3$, 泊松比为 0.2; 主梁、主缆、吊索、索夹选用钢材, 弹性模量为 2.06×10^4 MPa, 密度为 $7\,850 \text{ kg/m}^3$, 泊松比为 0.3。索夹重量作为集中荷载施加于主缆上。

采用 Lanczos 法进行特征值分析, 得到大桥前 5 阶振形均以主梁竖向振动和横向振动为主, 前 5 阶振形如图 4 所示。

2.3 初始有限元误差分析

根据初始有限元模型, 计算该桥自振频率并与健康监测系统实测值比较, 结果如表 1 所示。

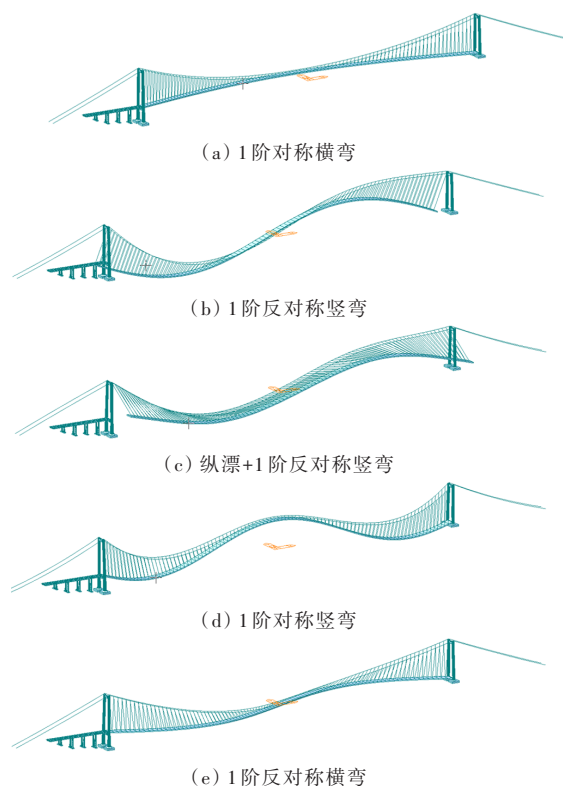


图 4 大桥前 5 阶振形

表1 修正前模型计算频率与监测频率

模态阶次	振形描述	实测值/ Hz	初始有限元 计算值/Hz	相对误 差/%
1	1阶对称横弯	0.062 6	0.057 4	-8.31
2	1阶反对称竖弯	0.103 8	0.095 1	-8.38
3	纵漂+1阶反对称竖弯	0.159 3	0.137 7	-13.56
4	1阶对称竖弯	0.180 2	0.143 5	-20.37
5	1阶反对称横弯	0.136 9	0.149 8	9.42

由表1可知:纵漂+1阶反对称竖弯和1阶对称竖弯自振频率误差绝对值最大,分别达到13.56%和20.37%,其他频率误差绝对值均在10%以内。初始有限元模型计算结果与实测值基本吻合,验证了模型的有效性。但计算结果与实测响应仍存在一定偏差,仅从初始有限元模型难以得到精度的结构响应,需要对该模型进行修正。

3 有限元模型修正

3.1 修正参数的选择

将桥塔弹性模量、吊索弹性模量、主缆弹性模量、主梁弹性模量、保山侧桥塔密度、腾冲侧桥塔密度、吊索密度、主缆密度、主梁密度作为初始修正参数。按照式(7)计算不同参数的灵敏度:

$$S_{\text{SEN}_j}^i = \left| \left(\Delta \phi_j / \phi_j \right) / \left(\Delta p_i / p_i \right) \right| \quad (7)$$

式中: $S_{\text{SEN}_j}^i$ 为第*i*个待修正参数对应第*j*阶特征值的灵敏度; p_i 为第*i*个待修正参数的初始值; Δp_i 为第*i*个待修正参数的摄动量; ϕ_j 为第*j*阶特征值; $\Delta \phi_j$ 为第*j*阶特征值在待修正参数改变后的改变量。

有限元模型中待修正参数改变后,均经主缆找形和无应力索长计算,重新确定初始平衡状态。初始修正参数的灵敏度分析结果如图5所示。

由图5可知:主梁弹性模量、主梁密度、主缆弹性模量、主缆密度灵敏度较高,均达到0.05以上,其余参数灵敏度较小,均小于0.02。因此,选取主梁弹性模量、主梁密度、主缆弹性模量、主缆密度4个参数作为待修正参数。

3.2 基于仿真数据的模型修正

采用均匀设计方法,对待修正参数确定训练样本点。将有限元模型计算的前5阶自振频率作为输入,将待修正参数进行归一化处理后作为输出,训

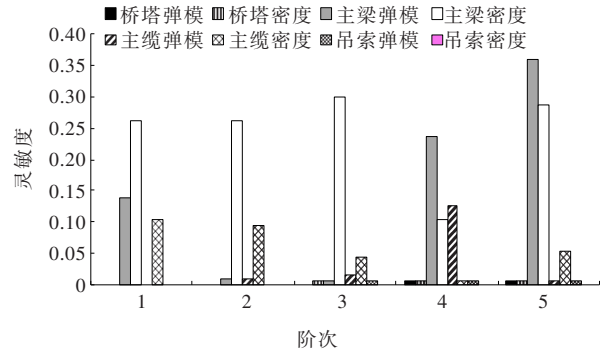


图5 初始修正参数的灵敏度

练径向基神经网络。采用遗传算法对径向基神经网络权值和阈值进行优化得到最优径向基神经网络。

遗传算法优化过程中的误差变化如图6所示。

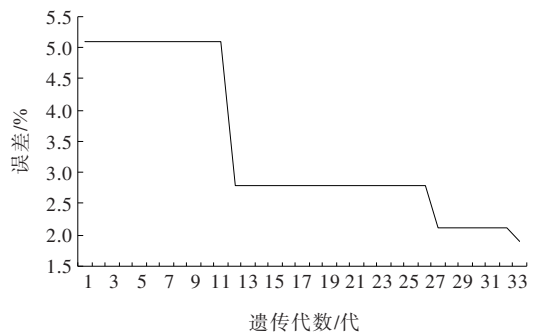


图6 遗传算法误差迭代曲线

由图6可得:经过33代遗传优化后,误差降低至2%以下,得到径向基神经网络最优权值和阈值。

经遗传算法优化的最优径向基神经网络训练误差变化如图7所示。

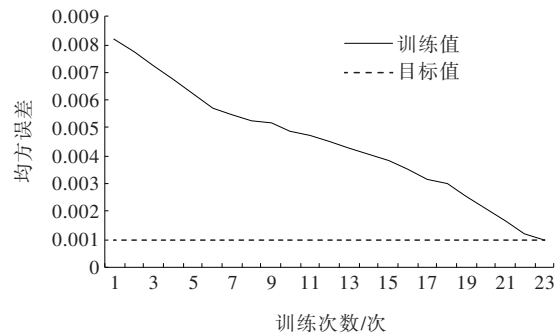


图7 径向基神经网络训练误差曲线

由图7可得:最优径向基神经网络经过23次训练后,达到目标误差0.001。

采用数值仿真结果检验最优径向基神经网络的有效性。在有限元模型中,给定待修正参数一任意摄动值,将有限元计算得到的前5阶自振频率作为输入,采用计算得到的最优径向基神经网络进行模型

修正,修正结果如表 2 所示。

表 2 基于仿真数据的修正结果

修正参数	摄动因子	修正因子	相对误差/%
主梁弹性模量	1.1	1.093 8	-0.563 6
主梁弹性模量密度	0.9	0.893 1	-0.766 7
主缆弹性模量	0.9	0.904 5	0.500 0
主缆密度	1.1	1.113 1	-1.190 9

由表 2 可知:基于最优径向基神经网络求解得到的修正因子与实际摄动因子十分吻合,待修正参数相对误差均在 1.5% 以内。表明遗传算法优化后的

最优径向基神经网络,可以有效表示结构响应与待修正参数之间的函数关系。通过最优径向基神经网络修正可有效提高有限元模型计算精度。

3.3 基于实测数据的模型修正

将健康监测系统监测得到的实桥前 5 阶自振频率作为输入,采用计算得到的最优径向基神经网络进行模型修正,修正结果如表 3 所示。

表 3 基于实测数据的修正结果

修正参数	主梁弹性模量	主梁密度	主缆弹性模量	主缆密度
修正因子	1.08	1.12	0.98	1.03

修正前后结构自振频率计算结果如表 4 所示。

表 4 修正前后结构自振频率

模态 阶次	振形描述	实测值/ Hz	修正前		修正后	
			频率/Hz	误差/%	频率/Hz	误差/%
1	1 阶对称横弯	0.062 6	0.057 4	-8.31	0.060 8	-2.87
2	1 阶反对称竖弯	0.103 8	0.095 1	-8.38	0.100 6	-3.08
3	纵漂+1 阶反对称竖弯	0.159 3	0.137 7	-13.56	0.150 1	-5.78
4	1 阶对称竖弯	0.180 2	0.143 5	-20.37	0.172 1	-4.50
5	1 阶反对称横弯	0.136 9	0.149 8	9.42	0.142 6	4.16
6	2 阶对称竖弯	0.219 6	0.198 7	-9.52	0.210 2	-4.28
7	2 阶反对称竖弯	0.250 6	0.218 8	-12.42	0.233 6	-6.78
8	1 阶扭转	0.261 2	0.243 3	-6.85	0.245 3	-6.09

由表 4 可知:采用最优径向基神经网络修正后,计算结果与实测值的误差大幅降低,修正后误差均在 7% 以内,误差最大降幅为 77.91%,且计算结果与实测值的误差分布较修正前更为均匀。表明将健康监测系统实测动力特征作为特征量,采用最优径向基神经网络可对大跨悬索桥进行有效修正。

4 结 论

(1) 遗传算法优化后的最优径向基神经网络,可以有效表示结构响应与待修正参数之间的函数关系。通过最优径向基神经网络修正可有效提高有限元模型计算精度。基于数值仿真数据修正后,其计算误差均在 1.5% 以内。

(2) 通过参数灵敏度分析可有效选取待修正参数,降低了计算成本和复杂性,大大提高了有限元模型修正的工程适用性。主梁及主缆材料参数是影响大跨度悬索桥动力特性的主要因素。

(3) 将健康监测系统实测动力特征作为特征量,采用最优径向基神经网络可对大跨悬索桥进行有效修正。修正后,最大计算误差由修正前的 20.37% 降低至 7% 以内,误差最大降幅达 77.91%。

参考文献:

- [1] FARRAR C R,WORDEN K.Structural health monitoring:A machine learning perspective[M].New York:Wiley,2012.
- [2] 林鸣,颜东煌,张国刚.基于环境振动试验的洞庭湖大桥主塔模型修正[J].中外公路,2017,37(6):174-178.
- [3] BOX G E P,WILSON K B.On the experimental attainment of optimum conditions[J].Journal of the Royal Statal Society, Series B:Statistical Methodology,1951,13(1):1-38.
- [4] 任伟新,陈华斌.基于响应面的桥梁有限元模型修正[J].土木工程学报,2008,41(12):73-78.
- [5] LIN X S,ZONG Z H,NIU J.Finite element model validation of bridge based on structural health monitoring (Part II): Uncertainty propagation and model validation[J].Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 2015,2(4):279-289.

薄壁箱形高墩日照温度场及墩顶位移研究

刘治伸¹,张伊飞²,宋飞²,苏巨峰³,任翔²

(1.北京市运输事业发展中心,北京市 100161;2.西安科技大学 建筑与土木工程学院,陕西 西安 710054;
3.长安大学 公路学院,陕西 西安 710064)

摘要:薄壁空心墩在高墩大跨连续刚构桥中得到了广泛应用,日照作用下超高薄壁空心墩的墩顶偏位对于桥墩施工期和成桥后整体结构线形和受力产生不利影响。该文基于陕西省某特大桥180 m高薄壁空心墩,选取施工过程中8月28日至29日和10月11日至12日各24 h的温度场及墩顶位移测试数据,结合有限元分析方法对日照作用下超高薄壁空心墩温度场及墩顶位移随时间的变化规律进行研究。结果表明:南北墩壁温差受环境温度和昼夜温差影响较大,8月环境气温高,昼夜温差小,南北墩壁温差较小,墩顶偏位较小;10月环境气温低,昼夜温差大,南北墩壁温差较大,墩顶偏位大;墩顶位移与日照壁面温差变化规律一致;墩高达到180 m时,在8℃壁面温差下产生最大52.6 mm的墩顶位移。采用实体有限元法分析得到的墩顶位移和规范计算出的墩顶位移与实测值相比均吻合较好,具有较高的精度。

关键词:日照作用;薄壁空心墩;温度场;墩顶偏位;数值分析

中图分类号:U443.22

文献标志码:A

0 前言

在中国高山、峡谷、江河、湖海地区,高墩大跨连续刚构桥因其经济、适用而得到了广泛应用。随着墩身朝着高墩、轻型的方向不断发展,温度作用对桥墩的影响越来越显著^[1-5]。混凝土桥墩受日照作用

时,向阳侧混凝土表面温度迅速升高,背阳侧温度变化较小,由于混凝土材料热传导系数较小,温度从向阳侧向背阳侧的传递过程中有明显的滞后效应,导致桥墩横截面产生由向阳侧向背阳侧的温度梯度,从而使桥墩发生弯曲变形,在桥墩施工节段顶部产生水平向的墩顶位移,且墩越高,这种影响越大,将对桥墩节段施工线形、内力及成桥后整体结构线形

- [6] 郭勤涛,张令弥,费庆国.用于确定性计算仿真的响应面法及其试验设计研究[J].航空学报,2006,27(1):55-61.
- [7] REN W X, CHEN H B. Finite element model updating in structural dynamics by using the response surface method [J]. Engineering Structures, 2010, 32(8): 2455-2465.
- [8] 周林仁,欧进萍.基于径向基函数响应面方法的大跨度斜拉桥有限元模型修正[J].中国铁道科学,2012,33(3):8-15.
- [9] 魏锦辉,任伟新.结构有限元模型修正的自适应响应面方法[J].振动与冲击,2013,32(8):114-119.
- [10] 苏国韶,赵伟,燕柳斌,等.高斯过程动态响应面法及其在悬索桥结构可靠度分析中的应用[J].中国公路学报,2013,26(6):87-95.
- [11] 孙全胜,宫剑.基于响应面法的自锚式悬索桥有限元模型修正[J].中外公路,2014,34(1):153-156.
- [12] SHAN D S, LI Q, KHAN I, et al. A novel finite element model updating method based on substructure and response surface model [J]. Engineering Structures, 2015, 103(15): 147-156.
- [13] PETERSEN Ø W, ØISETH O. Sensitivity-based finite element model updating of a pontoon bridge [J]. Engineering Structures, 2017, 150: 573-584.
- [14] HESTER D, KOO K, XU Y, et al. Boundary condition focused finite element model updating for bridges [J]. Engineering Structures, 2019, 198: 109514.
- [15] 隋允康,宇慧平.响应面方法的改进及其对工程优化的应用[M].北京:科学出版社,2011.

收稿日期:2022-06-10(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51408484);陕西省重点研发计划项目(编号:2018SF-359)

作者简介:刘治伸,男,硕士,高级工程师.E-mail:543952177@qq.com