

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2020.10.009

改进响应面法在桥梁结构有限元模型修正中的应用

杨雅勋¹, 杨福利¹, 陈东^{1,2}

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064;

2. 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司天津分公司 天津 300042)

摘要: 为了获得精确的桥梁结构有限元计算模型, 提供健康监测和受力性能再分析的基准有限元模型, 对桥梁结构有限元模型修正方法进行研究, 提出以二阶多项式与径向基函数相结合的改进响应面法。将该方法应用到一座系杆拱桥的有限元模型修正中, 选择该桥的铺装层厚度、拱肋、主梁、横梁及吊杆的弹性模量和密度作为待修正参数, 采用D-最优试验设计方法进行试验设计, 对试验设计得到的一系列样本点进行方差分析。以F检验法筛选出对各测点挠度和各阶频率影响显著的参数, 建立改进后的响应面模型, 并计算出关于设计参数的响应值。结合现场试验得到的静动力测试数据构造目标函数, 对目标函数进行优化求解得到各参数的最优解, 代入到初始有限元模型中, 完成对初始有限元模型的修正。结果表明: 各构件的弹性模量及其二次项和铺装层厚度对挠度影响高度显著, 一些构件的弹性模量和密度对频率影响显著, 以显著性较高的参数拟合的响应面模型具有较高的精度, 修正后的有限元模型的计算值与现场试验实测值的误差显著降低。修正后的系杆拱桥有限元模型与实际结构更加吻合, 可作为基准有限元模型, 对今后桥梁结构的健康监测、静动力性能分析、损伤识别具有重要意义和实用价值。

关键词: 桥梁工程; 有限元模型; 改进响应面法; 系杆拱桥; 显著性分析

中图分类号: U447

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2020)10-0083-09

Application of Improved Response Surface Method in Modification of Bridge Structure FE Model

YANG Ya-xun¹, YANG Fu-li¹, CHEN Dong^{1,2}

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an Shaanxi 710064, China;

2. Tianjin Branch, Shanghai Municipal Engineering Design General Institute (Group) Co., Ltd., Tianjin 300042, China)

Abstract: In order to obtain the accurate finite element calculation models of bridge structures and provide the benchmark finite element models for health monitoring and re-analysis of mechanical performance, the modification methods of bridge structure finite element models are studied, and an improved response surface method combining second-order polynomial and radial basis function is proposed. This method is applied to the modification of the finite element model of a tied arch bridge. Selecting the pavement thickness, the elastic moduli and densities of arch ribs, main girder, beams and hangers of the bridge as the parameters to be corrected, the test design is conducted by using D-optimal test design method, and the analysis of variance on a series of sample points obtained from the experimental design is conducted. The parameters that significantly affect the deflection of each measuring point and the frequency of each order are screened out by F test method, the improved response surface model is established, and the response values about design

收稿日期: 2019-11-06

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB1600300); 国家自然科学基金项目(51878059)

作者简介: 杨雅勋(1979-), 男, 陕西西安人, 博士, 副教授。(yyx@chd.edu.cn)

parameters are calculated. The objective function is constructed based on the static and dynamic test data obtained from the field test. The objective function is optimized and solved to obtain the optimal solution of each parameter, which is substituted into the initial finite element model to complete the modification of the initial finite element model. The result shows that (1) The elastic modulus of each member and its quadratic term and the thickness of the deck pavement have a highly significant influence on the deflection. The elastic modulus and the densities of some members have a significant influence on the frequency. The response surface model fitted with more significant parameters has higher accuracy. The error between the calculated value of the modified finite element model and the measured value of the field test is significantly reduced. (2) The modified finite element model of the tied arch bridge is more consistent with the actual structure, and can be used as a reference finite element model. It can be used as a benchmark finite element model, which is of great significance and practical value for future health monitoring, static and dynamic performance analysis, and damage identification of bridge structures.

Key words: bridge engineering; finite element model; improved response surface method; tied arch bridge; significance analysis

0 引言

采用有限元模型对工程结构分析已成为现在工程设计必不可少的环节。模型建立过程中的多种因素的简化、截面尺寸误差、材料性能参数、连续介质离散化的精度及施工过程中某些不确定因素的影响等都会使初始有限元模型计算结果与实测结果存在偏差^[1]。因此,务必考虑对初始有限元模型修正,使其与桥梁实际受力性能一致。

国内外已对有限元模型修正进行了一系列的研究,提出了几种模型修正方法,主要有矩阵修正法、灵敏度法和响应面法等^[2]。矩阵修正法将质量矩阵、刚度矩阵作为修正对象对有限元模型进行修正,但复杂结构的矩阵不容易得出,且修正后的矩阵往往不具有稀疏、对称的性质,丧失了其物理意义^[3-5]。灵敏度法对于修正参数选取有较大随机性和单一性,每次迭代必须调用程序计算,计算量较大,修正效率低^[6-8]。响应面法由于其精确性和高效性在优化设计、可靠度分析和有限元模型修正中得到广泛应用^[9-11]。

本研究对传统响应面法进行改进,并将改进后响应面法应用到一座系杆拱桥的有限元模型修正中,以铺装层的厚度及各构件的弹性模量和密度为待修正参数,采用 F 检验法寻找显著性高的参数,通过函数拟合构造响应面模型,再根据试验数据,在响应面内优化求解,得到最优解对有限元模型进行修正。在响应面法的基础上,利用成桥荷载试验数据对一座系杆拱桥模型进行修正,修正前后误差明显降低,验证了该方法在系杆拱桥模型修正中的有效性。

1 基于响应面法的有限元模型修正理论

1.1 修正参数及响应参数的选取

通常选择材料的弹性模量、密度、泊松比阻尼比、摩擦系数、支座刚度等作为待修正参数。当基于动力测试数据对模型进行修正时,响应值通常为模态振型和模态频率,当基于静力测试数据对模型进行修正时,响应值通常为挠度和应变。

1.2 试验设计与参数显著性检验

以有限的试验次数获得最有效的试验数据的关键在于试验设计,样本数据的增加能够使模型的精确度提高,但大量的数据会使计算效率显著降低^[12]。因此,在不影响精度的前提下,选择最具代表性的样本数据是试验设计的中心原则。 D -最优设计是一种基于最小化协方差矩阵 $|(X'X)^{-1}|$ 的计算机随机生成的设计,在拟合响应面模型时,其样本个数为 $n = (k+1)(k+2)/2$ (k 为待修正参数的数量),与其他试验设计相比,具有较高的精度且试验次数少^[12]。

参数显著性检验是对参数响应值进行方差分析,结合 F 检验法,挑选显著性高的参数。其基本原理是将总离差平方和分解为由各个试验因素引起的离差平方和 SS_A 和试验数据本身偏差引起的离差平方和 SS_E ,然后,构造服从 F 分布的统计量 F_A ;通过计算出的 F_A 值进行假设检验,判定参数的显著性。

统计量:

$$F_A = \frac{\frac{SS_A}{d_A}}{\frac{SS_E}{d_E}} \sim F(d_A, d_E), \quad (1)$$

式中, d_A 为因素自由度, d_E 为偏差自由度。在方差分析中, 对于给定的显著性水平 α , 当 $F \geq F_{1-\alpha}(n_e, n_e)$ 即 $P \leq \alpha$ 时, 则称该因素对其影响显著; 否则, 该因素对响应值的影响不显著。

1.3 改进响应面法

对于修正参数较多, 输入值和响应值之间存在高度非线性问题, 传统响应面法构造的响应面模型往往精度不高, 所以更适合局部模型的建立, 而径向基函数的方法可用于全局显式模型的建立^[13]。改进响应面法是将二阶多项式与径向基函数相结合作为响应面的模型函数, 旨在提高模型与实际结构在参数取值的全局范围内的契合度, 提高模型修正的精度。

根据最佳一致理论中的哈文条件的等价定义^[14], 径向基函数是未知函数唯一的最佳一致逼近形式^[13]。根据不同的径向基函数的函数近似结果, 发现对不同类型的测试函数、高斯函数的均方根误差均较小, 说明高斯径向基函数具有良好的拟合适应性、较高的精度和应用的广泛性^[15]。所以, 选择高斯函数作为径向基函数, 随着空间维数的增加, 计算量呈线性增长, 对模型的非线性模拟适应能力强^[16-19]。因此, 将多项式函数和径向基函数相结合作为响应面函数, 形成混合响应面^[20-23], 即改进响应面法。

传统响应面法一般选用二阶多项式作为响应面模型函数式^[24], 其函数形式如式 (2); 对传统响应面法进行改进, 在二阶多项式后增加高斯函数项, 旨在提高响应面拟合精度, 其方程形式如式 (3):

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2, \quad (2)$$

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^n a_i \cdot \exp\left(-\frac{\|x - x_i\|}{(2\sigma)^2}\right), \quad (3)$$

式中, $x_i \in [x_i^l, x_i^u]$, x_i^l, x_i^u 为待修正参数的取值下限和取值上限; $\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$ 为组成响应面模型的多项式系数; a_i 为高斯函数待定系数; $\|x - x_i\|$ 表示实测值到第 i 个样本均值的范数; σ 为高斯函数宽度参数。

文献 [13] 通过大量的数值算例验证, 总结出 σ 取值的经验公式:

$$\sigma = \begin{cases} 1 & \left(\frac{r_0}{2} \leq 1\right) \\ \frac{2}{r_0} & \left(\frac{r_0}{2} > 1\right) \end{cases}, \quad (4)$$

式中 r_0 为设计空间内最远两点的距离。

检验响应面拟合程度可靠性的标准有:

$$R^2 = 1 - \frac{SS_E}{SS_T} (0 \leq R^2 \leq 1), \quad (5)$$

$$R_{adj}^2 = 1 - \frac{SS_E/d_E}{SS_T/d_T} = 1 - \frac{d_T}{d_E} (1 - R^2) (0 \leq R_{adj}^2 \leq 1), \quad (6)$$

式中, d_E 为偏差的自由度; d_T 为总自由度; SS_E 为误差的离差平方和; SS_T 为总离差平方和; R^2 和 R_{adj}^2 的值越靠近 1, 响应面的可靠性越高。

1.4 优化求解

构造目标函数对响应面模型进行优化求解^[25]。目标函数表达式如式 (7):

$$F = \sum_{i=1}^n (f_i - f_{ii})^2, \quad (7)$$

式中, f_i 为响应面模型的计算值, f_{ii} 为结构的实测值。在参数取值区间内, 当目标函数 F 取最小值时, 得到参数最优解, 即修正后的参数取值。

2 有限元模型修正

2.1 工程概况与有限元模型建立

贵州岑巩黄弓大桥为 (52 + 70 + 52) m 的三跨系杆拱桥, 拱轴线为二次抛物线, 主拱矢高 14 m。主拱圈和纵梁均为 2 m × 1.2 m 的矩形截面, 中横梁为 1.35 m × 0.8 m 的矩形截面, 横撑为 1.2 m × 1 m 的内八角形箱形截面, 均为钢筋混凝土材料; 吊杆采用消除预应力镀锌高强钢丝束。材料参数见表 1。根据桥梁的结构信息, 采用 ANSYS 建立主桥的有限元模型如图 1 所示。

表 1 材料参数

Tab. 1 Material parameters

结构	材料	弹性模量/($\times 10^{10}$ Pa)	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
拱肋	C40 混凝土	$E_1 = 3.25$	$D_1 = 2\,549$
纵梁	C50 混凝土	$E_2 = 3.45$	$D_2 = 2\,549$
横梁	C40 混凝土	$E_3 = 3.25$	$D_3 = 2\,549$
吊杆	高强钢丝	$E_4 = 20.5$	$D_4 = 7\,850$

2.2 静动载试验

2.2.1 静载试验

按照作用效应等效的原则进行荷载试验, 获得主拱圈跨中和纵梁跨中各测点的数据。为保证其合理有效性, 按影响线的最不利位置进行加载, 并保证各截面的加载效率在 0.95 ~ 1.05 之间, 本次静载试验共采用 4 辆 35T 的三轴加载车, 设置 4 个工况:

(1) 工况 1: $L/2$ 拱肋、纵梁截面最大正弯矩中

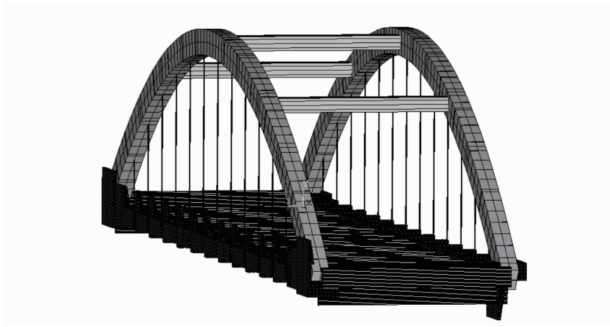


图 1 黄弓大桥有限元模型

Fig. 1 Finite element model of Huanggong Bridge

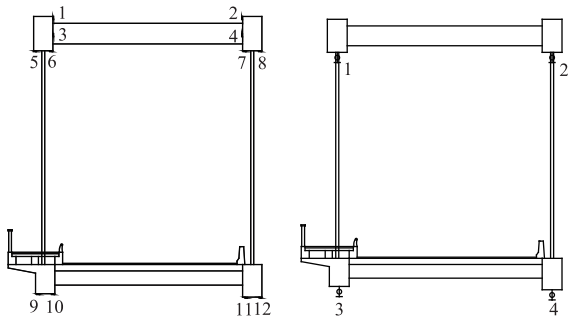
载工况；

(2) 工况 2: $L/2$ 拱肋、纵梁截面最大正弯矩偏载工况。

(3) 工况 3: $L/4$ 拱肋、纵梁截面最大正弯矩中载工况；

(4) 工况 4: $L/4$ 拱肋、纵梁截面最大正弯矩偏载工况。

荷载试验中应变和挠度测点布置图如图 2 所示，现场实验如图 3 所示。测试多组数据取平均值并进行处理，消除沉降影响，由于残余应变和残余挠度在合理范围内，消除残余应变和残余挠度，得到各工况下的应变和挠度测试数据见表 2。



(a) 应变测点布置示意图 (b) 挠度测点布置示意图

图 2 荷载试验测点布置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of arrangement of measuring points in load test



(a) 试验加载图 (b) 数据采集图

图 3 现场荷载试验

Fig. 3 Field load test

表 2 静载试验应变值

Tab. 2 Strain values in static load test

测点		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
工况 1	计算值/ $\mu\epsilon$	-32	-37	-13	-14	16	19	21	20	49	54	60	55
	实测值/ $\mu\epsilon$	-23	-27	-9	-10	11	14	17	16	33	40	42	37
工况 2	计算值/ $\mu\epsilon$	-23	-47	-10	-20	14	18	24	22	39	50	71	74
	实测值/ $\mu\epsilon$	-17	-34	-8	-14	10	13	17	17	28	35	47	52
工况 3	计算值/ $\mu\epsilon$	-71	-64	-12	-8	46	59	51	51	69	95	90	87
	实测值/ $\mu\epsilon$	-45	-33	-10	-5	31	33	33	32	51	54	55	53
工况 4	计算值/ $\mu\epsilon$	-60	-71	-8	-10	36	55	62	52	56	74	110	104
	实测值/ $\mu\epsilon$	-35	-40	-7	-7	24	34	35	33	34	52	64	62

表 3 静载试验挠度值

Tab. 3 Deflection values in static load test

测点		d_1/mm	d_2/mm	d_3/mm	d_4/mm	测点		d_1/mm	d_2/mm	d_3/mm	d_4/mm
工况 1	计算值	3.65	3.71	6.44	6.67	工况 3	计算值	7.71	8.14	10.36	10.62
	实测值	3.14	3.15	5.41	5.54		实测值	6.36	7.01	8.97	9.15
工况 2	计算值	3.18	4.53	5.31	7.71	工况 4	计算值	6.86	8.69	9.70	12.48
	实测值	2.64	3.86	4.27	6.66		实测值	5.94	7.42	7.79	10.53

2.2.2 动载试验

采用行车激励的方法对桥梁进行动力测试，使

用加速度传感器进行数据收集。在主桥的拱肋 $L/2$ 截面和桥面 $L/2$ 截面的拱肋上缘和桥面分别布置测

点，测试结构振动频率。以一辆 35T 的激励车分别以 15，30，45 km/h 速度对桥梁进行激励，采集多组数据并进行处理，对比个阶模态对数据进行处理后得到各阶频率实测值，并将实测值与计算值对比见表 4。

表 4 自振频率对比

Tab. 4 Comparison of natural frequencies

项目	自振频率/Hz		相对误差/%
	初始计算值	实测值	
一阶频率	1.740	1.99	-12.95
二阶频率	2.481	2.88	-13.82
三阶频率	3.199	3.61	-11.28
四阶频率	3.828	4.22	-9.28

2.3 有限元模型修正

2.3.1 修正参数及响应值选取

对本桥结构特点进行分析，得出可能造成模型与实桥存在偏差的因素有：材料特性参数、几何尺寸、边界条件等。研究中模型是根据施工图建立的，截面几何尺寸误差较小，桥墩与纵梁简支连接，桥墩变形对频率响应影响较小，但施工过程中标高控制误差的存在会使成桥后的桥面铺装层厚度产生误差，以材料参数和桥面铺装层厚度作为修正对象，在设计值上下 20% 内进行取值，参数及修正范围见表 5。

表 6 D-最优试验设计参数

Tab. 6 D-optimal test design parameters

样本	待修正参数								
	$E_1/(\times 10^{10} \text{ Pa})$	$D_1/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$E_2/(\times 10^{10} \text{ Pa})$	$D_2/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$E_3/(\times 10^{10} \text{ Pa})$	$D_3/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$E_4/(\times 10^{10} \text{ Pa})$	$D_4/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	T/cm
1	3.9	2 931.3	2.82	3 058.8	3.9	3 058.8	16	9 420	14.4
2	3.9	2 159.6	4.14	3 058.8	2.6	2 039.2	24	6 280	21.6
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
64	2.6	2 263.1	4.14	2 039.2	2.6	2 039.2	16	8 583.55	14.4
65	3.9	2 039.2	2.76	2 039.2	3.5	2 758.95	24	6 280	21.6

表 7 D-最优试验设计响应值

Tab. 7 D-optimal test design response values

样本	响应值						
	f_1/Hz	f_2/Hz	f_3/Hz	d_1/mm	d_2/mm	d_3/mm	d_4/mm
1	2.436 8	3.377 5	3.815 2	3.93 8	3.940	6.298	6.442
2	2.992 3	3.901 9	4.363 1	2.994	2.999	5.807	5.983
...	...	...	...	...	...	...	...
64	3.129 1	3.771 7	4.609 5	3.909	3.913	6.799	6.984
65	2.763 2	3.909 6	4.451 7	3.456	3.457	5.937	6.086

本次分析中设置显著性水平为 0.05，当 $p \in$

表 5 模型修正参数选取

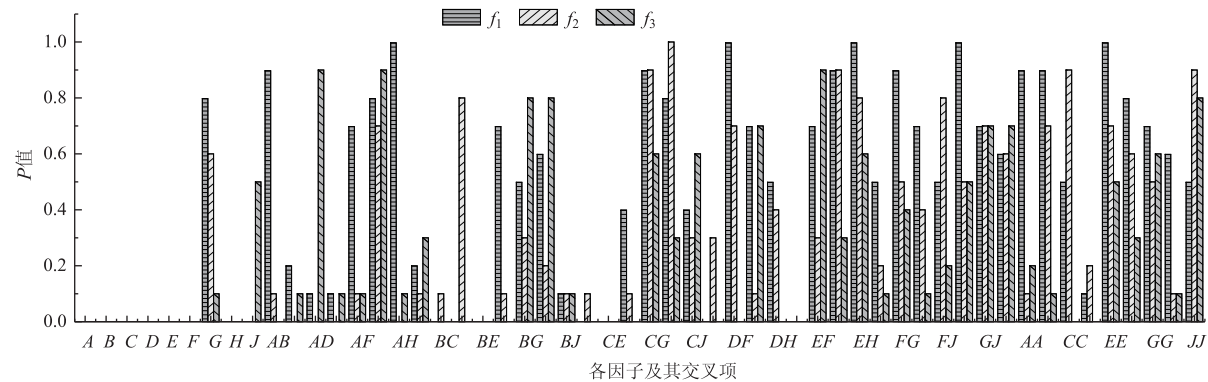
Tab. 5 Model correction parameter selection

因子	参数描述	修正范围
A	拱肋弹性模量 $E_1/(\times 10^{10} \text{ Pa})$	[2.6, 3.9]
B	拱肋密度 $D_1/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	[2 039.2, 3 058.8]
C	纵梁密度 $D_2/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	[2 039.2, 3 058.8]
D	纵梁弹性模量 $E_2/(\times 10^{10} \text{ Pa})$	[2.76, 4.14]
E	横梁密度 $D_3/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	[2 039.2, 3 058.8]
F	横梁弹性模量 $E_3/(\times 10^{10} \text{ Pa})$	[2.6, 3.9]
G	吊杆密度 $D_4/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	[6 280, 9 420]
H	吊杆弹性模量 $E_4/(\times 10^{10} \text{ Pa})$	[16, 24]
J	桥面铺装层厚度 T/cm	[14.4, 21.6]

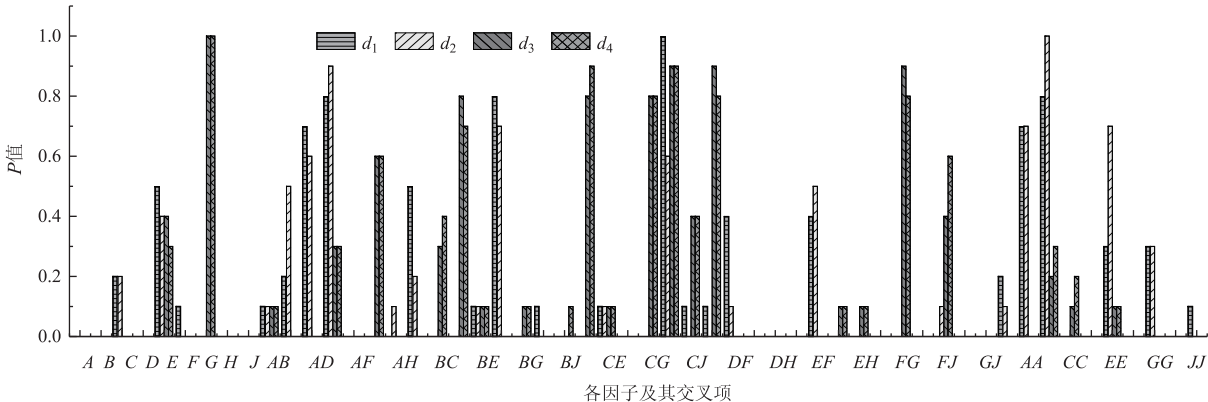
2.3.2 试验设计与参数显著性分析

根据实桥的结构特点与本次模型修正的目的，选择工况 1 作用下拱顶截面挠度 d_1 ， d_2 ，纵梁跨中挠度 d_3 ， d_4 及前三阶频率 f_1 ， f_2 ， f_3 作为响应值进行试验设计。由于待修正参数较多，按照取最少样本点获得最有效的数据原则，选择 D-最优准则的计算机生成设计。试验设计得到 65 个（55 个设计试验点 + 5 个不匹配点 + 5 个最佳重复点）随机样本点见表 6，将样本点数据代入有限元模型得到响应值见表 7，并进行方差分析。根据各参数类型及其对应显著水平值得显著性分析图，如图 4 所示：

$[0, 0.001]$ 时，该参数影响高度显著；当 $P \in (0.001, 0.05]$ ，该参数影响显著；当 $P \in (0.05, 1]$ 时，该参数影响不显著。参数对频率的显著性分析结果表明，主效应中 E_1 ， D_1 ， E_2 ， D_2 对前三阶频率影响高度显著， E_3 ， D_3 ， E_4 对前三阶频率影响显著；大部分参数交互项和二次项对前三阶频率影响不显著。参数对挠度的显著性分析结果表明，主效应中弹性模量对挠度影响高度显著；部分参数的交互作用对挠度影响显著，主要为各构件弹性模量交互项；纵梁弹性模量二次项，纵梁密度二次项对挠度影响高度显著，其他二次项分别对 d_1 ， d_2 ， d_3 ， d_4



(a) 参数对频率的显著性分析



(b) 参数对挠度的显著性分析

图 4 参数显著性分析

Fig. 4 Parameter significance analysis

的显著性有不同程度的影响。桥面铺装层厚度对挠度影响高度显著，分析原因，主要为铺装层层厚度在一定程度上改变了桥梁的整体刚度。

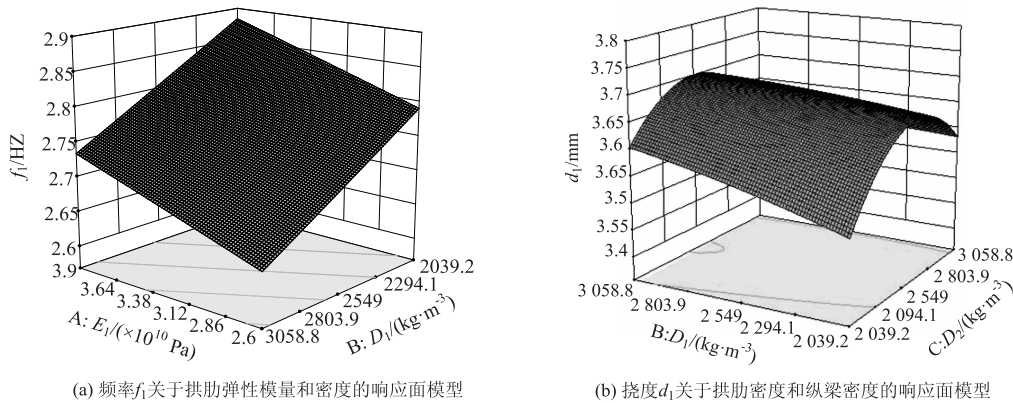
2.3.3 响应面拟合

先对影响的不显著参数予以排除，再根据样本点响应值，采用含高斯函数项的二次多项式进行拟

合，得到响应面模型。由于响应面的模型较多，下面仅给出 f_1 关于 E_1 、 D_1 响应面模型和 d_1 关于 D_1 、 D_2 的响应面模型如图 5。 R^2 和 R^2_{adj} 的计算值见表 8，其值均接近于 1，说明响应面的拟合效果较好。

2.3.4 优化求解

将设计参数代入响应面模型得到计算值，构造



(a) 频率 f_1 关于拱肋弹性模量和密度的响应面模型

(b) 挠度 d_1 关于拱肋密度和纵梁密度的响应面模型

图 5 部分响应面模型

Fig. 5 Partial response surface models

计算值与实测值目标函数并进行优化求解, 采用粒子群优化算法求解, 得到修正后的参数见表 9。将修

正后的全部参数代入有限元模型计算, 得到频率和挠度的计算值并与实测值进行对比见表 10。

表 8 响应面精度检验

Tab. 8 Response surface accuracy test

准则	f_1/Hz	f_2/Hz	f_3/Hz	d_1/mm	d_2/mm	d_3/mm	d_4/mm
R^2	0.999 9	0.999 8	1	0.999 5	0.999 8	1.000	1.000 0
R_{adj}^2	0.999 4	0.999 7	0.999 8	0.999 4	0.995 7	0.999 9	1.000 0

表 9 优化求解后的参数

Tab. 9 Parameters after optimization

类型	E_1/Hz	$D_1/(\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	E_2/Hz	$D_2/(\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	E_3/Hz	$D_3/(\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	E_4/Hz	$D_4/(\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	T/cm
初始值	3.25	2 549	3.45	2 549	3.25	2 549	2.0	7 850	18
修正后	3.78	2 319	4.08	2 612	3.71	2 606	2.13	7 824	18.7
偏差/%	16.31	-9.02	18.26	2.47	14.15	2.24	6.50	-0.33	3.89

表 10 工况 1 修正前后响应值对比

Tab. 10 Comparison of response values before and after correction of working condition 1

类型	初始值/ Hz	实测值/ Hz	修正值/ Hz	初始相对 误差/%	修正后 相对误差/%
f_1	1.740	1.99	1.983	-12.56	-0.35
f_2	2.481	2.88	2.862	-13.85	-0.62
f_3	3.199	3.61	3.582	-11.39	-0.78

类型	初始值/ mm	实测值/ mm	修正值/ mm	初始相对 误差/%	修正后 相对误差/%
d_1	3.652	3.14	3.183	16.31	1.37
d_2	3.711	3.15	3.176	17.81	0.83
d_3	6.442	5.41	5.507	19.08	1.79
d_4	6.674	5.54	5.621	20.47	1.46

由表 9 可以发现, 有限元模型修正后, 各构件的弹性模量均增大, 吊杆的弹性模量较初始值增加了 0.065 倍; 拱肋、纵梁、横梁的弹性模量值较初始值都增加了 0.14 倍以上; 铺装层厚度比初始值增加了约 0.04 倍, 拱肋的密度较初始值则减少了 0.09 倍, 其余各构件密度较初始值变化不大, 均在 0.03 倍之内。分析原因可能为: (1) 拱肋结构、纵梁、横向联系中钢筋的存在增大了构件的弹性模量, 而初始有限元模型中未考虑钢筋的影响; (2) 施工中使用的水泥或者混凝土标号高于设计值; (3) 拱肋浇注过程中振捣不完全, 造成密实度降低。修正后的弹性模量可视各钢筋混凝土构件的整体弹性模量, 反映了各构件的实际刚度。

由表 10 可以发现, 修正后的频率响应值误差由初始的 13% 左右降至 1% 以内, 修正后的挠度响应值误差由 20% 降至 1.8% 以内, 在可接受的范围内。结果表明: 响应面法可以实现对系杆拱桥结构有限元模型修正, 且精度能满足工程要求。

2.3.5 结构静动力响应验证

将原有限元模型中的参数改为修正值, 计算不同工况下的响应值, 并与实测值对比, 图 6 表明, 修正后的有限元模型响应值与实测值偏差明显降低。

3 结论

以贵州岑巩黄弓大桥为例, 结合静动力测试数据, 采用改进响应面法, 对该桥的有限元模型进行了修正, 得到以下几点结论:

(1) 利用统计学原理, 结合径向基函数, 将传统响应面法进行改进, 增加了对模型非线性模拟的适应性, 提高了响应面的拟合精度。基于静动力测试数据在响应面内优化求解, 以修正参数进行 D-最优试验设计, 避免了采样点的主观性, 降低了样本点采集数量, 提高了样本点质量; 缩减有限元模型的调用频率, 模型修正的效率提高。

(2) 建立了贵州岑巩黄弓大桥有限元模型, 结合静动力测试数据得到对挠度的主要响应因素为弹性模量 E 二次项效应, 并将铺装层厚度作为修正参数, 分析得出铺装层厚度对频率影响不显著, 对挠度影响高度显著。因此, 在今后的分析中铺装层厚度对桥梁的静力特性的影响不可忽略。

(3) 利用改进的响应面法修正后的系杆拱桥有限元模型, 其计算值更接近于实测值, 频率误差由原来的 13% 左右降至 1% 以内, 挠度误差由原来的 20% 左右降至 1.8% 以内, 在结构静动力响应验证中, 修正后有限元模型的响应值与实测值相吻合, 为以后的桥梁结构受力性能再分析、承载能力评估等提供了基准有限元模型, 对桥梁服役期内的健康监测与结构损伤识别具有重要意义与实用价值。

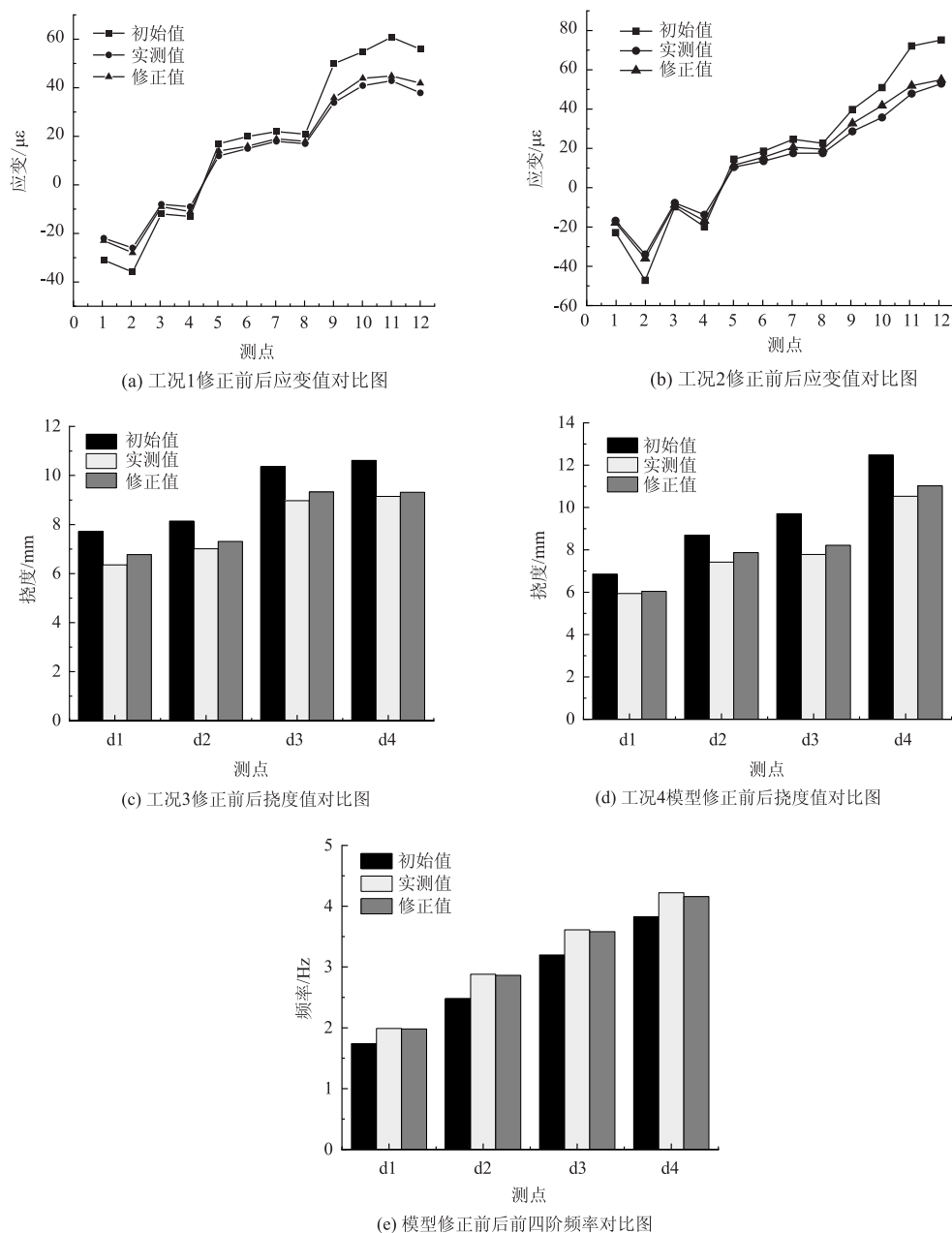


图6 模型修正前后计算结果对比图

Fig. 6 Comparison of calculation results before and after model correction

参考文献:

References:

- [1] 李辉, 丁桦. 结构动力模型修正方法研究进展 [J]. 力学进展, 2005, 35 (2): 170-180.
LI Hui, DING Hua. Progress in Model Updating for Structural Dynamics [J]. Advances in Mechanics, 2005, 35 (2): 170-180.
- [2] 梁鹏, 李斌, 王秀兰, 等. 基于桥梁健康监测的有限元模型修正研究现状与发展趋势 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2014, 34 (4): 52-61.
- [3] BERMAN A, FLANNELLY W G. Theory of Incomplete Models of Dynamic Structures [J]. AIAA Journal, 1971, 9 (8): 1481-1487.
- [4] ZHAO W, FAN F, WANG W, et al. Non-linear Partial Least Squares Response Surface Method for Structural Reliability Analysis [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2017, 161: 69-77.
- LIANG Peng, LI Bin, WANG Xiu-lan, et al. Present Research Status and Development Trend of Finite Element Model Updating Based on Bridge Health Monitoring [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2014, 34 (4): 52-61.

- [5] PARK W, KIM H K, JONGCHIL P. Finite Element Model Updating for a Cable-stayed Bridge Using Manual Tuning and Sensitivity-based Optimization [J]. *Structural Engineering International*, 2012, 22 (1): 14–19.
- [6] 韩建平, 骆勇鹏. 基于响应面法的结构有限元模型静动力修正理论及应用 [J]. *地震工程与工程振动*, 2013, 33 (5): 128–137.
HAN Jian-ping, LUO Yong-peng. Static and Dynamic Finite Element Model Updating of Structures Based on Response Surface Method: Theory and Application [J]. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2013, 33 (5): 128–137.
- [7] SANAYEI M, KHALOO A, GUL M, et al. Automated Finite Element Model Updating of a Scale Bridge Model Using Measured Static and Modal Test Data [J]. *Engineering Structures*, 2015, 102: 66–79.
- [8] REN W, CHEN H. Finite Element Model Updating in Structural Dynamics by Using the Response Surface Method [J]. *Engineering Structures*, 2010, 32 (8): 2455–2465.
- [9] 宗周红, 高铭霖, 夏樟华. 基于健康监测的连续刚构桥有限元模型确认 (I): 基于响应面法的有限元模型修正 [J]. *土木工程学报*, 2011, 44 (2): 90–98.
ZONG Zhou-hong, GAO Ming-lin, XIA Zhang-hua. Finite Element Model Validation of the Continuous Rigid Frame Bridge Based on Structural Health Monitoring Part I: FE Model Updating Based on the Response Surface Method [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2011, 44 (2): 90–98.
- [10] FANG S E, ZHANG Q H, REN W X. An Interval Model Updating Strategy Using Interval Response Surface Models [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2015, 60/61: 909–927.
- [11] FANG S E, PERERA R. A Response Surface Methodology Based Damage Identification Technique [J]. *Smart Materials and Structures*, 2009, 18 (6): 1–14.
- [12] 何为, 唐斌, 薛卫东. 优化试验设计方法及数据分析 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.
HE Wei, TANG Bin, XUE Wei-dong. Optimization Test Design Method and Data Analysis [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2012.
- [13] 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.
SUI Yun-kang, YU Hui-ping. Improvement of Response Surface Methodology and Its Applications to Engineering Optimization [M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [14] 于志玲, 张阳. 最佳一致逼近理论中哈尔 (Haar) 条件的等价定义 [J]. *南开大学学报: 自然科学版*, 2006, 39 (3): 101–103.
- YU Zhi-ling, ZHANG Yang. The Equivalent Definition of Haar Condition in Best Uniform Approximation Theory [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis*, 2006, 39 (3): 101–103.
- [15] 郁胜, 周林仁. 基于径向基函数响应面方法的超大跨悬索桥有限元模型修正 [J]. *铁道科学与工程学报*, 2014, 11 (1): 1–9.
YU Sheng, ZHOU Lin-ren. Finite Element Model Updating of Large Suspension Bridge Based on Radial Basis Function Response Surface [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2014, 11 (1): 1–9.
- [16] 陆征然, 张茂胜, 郭超. 基于随机有限元的修正剑桥模型可靠性研究 [J]. *沈阳建筑大学学报: 自然科学版*, 2018, 34 (4): 703–710.
LU Zheng-ran, ZHANG Mao-sheng, GUO Chao. Reliability Analysis of Modified Cambridge Model Based on Stochastic Finite Elements Methods [J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science Edition*, 2018, 34 (4): 703–710.
- [17] 陈喆, 何欢, 陈国平, 等. 考虑不确定性因素的有限元模型修正方法研究 [J]. *振动工程学报*, 2017, 30 (6): 921–928.
CHEN Zhe, HE Huan, CHEN Guo-ping, et al. The Research of Finite Element Model Updating Method Considering the Uncertainty [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2017, 30 (6): 921–928.
- [18] 杜进生, 张天能, 周赤伟. 基于二阶泰勒级数展开和风驱动优化算法的结构有限元模型修正 [J]. *建筑结构学报*, 2019, 40 (2): 206–214.
DU Jin-sheng, ZHANG Tian-neng, ZHOU Chi-wei. Updating of Finite Element Model of Structures Using Second-order Taylor Expansions and Wind Driven Optimization [J]. *Journal of Building Structures*, 2019, 40 (2): 206–214.
- [19] 杨荷. 基于改进响应面法的水布垭面板堆石坝材料参数反演与分析 [D]. 武汉: 武汉大学, 2017.
YANG He. Inversion and Analysis of Material Parameters of Shuibuya CFRD Based on Improved Response Surface Method [D]. Wuhan: Wuhan University, 2017.
- [20] SHAN D, 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: 147–156.
- [21] ASTROZA R, EBRAHIMIAN H, CONTE J P, et al. Performance Comparison of Kalman-based Filters for Nonlinear Structural Finite Element Model Updating [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2019, 438: 520–542.

(下转第133页)

- [12] CHEN C H, SCHONFELD P. Work Zone Optimization for Two-lane Highway Maintenance Projects [J]. Transportation Research Record, 2004, 1877: 95-105.
- [13] VON DER HEIDEN N, GEISTEFELDT J. Capacity of Freeway Work Zones in Germany [J]. Transportation Research Procedia, 2016, 15: 233-244.
- [14] 杨少伟. 道路勘测设计 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2004: 36-51.
- YANG Shao-wei. Road Survey and Design [M]. Beijing: China Communications Press, 2004: 36-51.
- [15] JTG B01—2014, 公路工程技术标准 [S].
- JTG B01—2014, Technical Standard of Highway Engineering [S].
- [16] American Association of State Highway and Transportation Officials. A Policy on Geometric Design of Highways and Streets [R]. Washington, D. C: US Department of Transportation, 2004.
- [17] 程学庆, 田芳铭, 鞠蕾, 等. 基于 VISSIM 的交通事件检测仿真及数据处理 [J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2012, 36 (1): 69-73.
- CHENG Xue-qing, TIAN Fang-ming, JU Lei, et al. Simulation and Data Processing of Traffic Incident Detection System Based on VISSIM [J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering Edition, 2012, 36 (1): 69-73.
- [18] 陈昊, 陆建. 基于 VISSIM 仿真的高速公路事故交通影响 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2015, 35 (增1): 226-229.
- CHEN Hao, LU Jian. Traffic Impact of Highway Accident on Based on VISSIM Simulation [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2015, 35 (S1): 226-229.
-
- (上接第91页)
- [22] 胡星星, 裘乐森, 张树有, 等. 基于混合响应面法的滚压成型回弹角预测控制及应用 [J]. 浙江大学学报: 工学版, 2013, 47 (11): 2010-2019.
- HU Xing-xing, QIU Le-miao, ZHANG Shu-you, et al. Application of a Hybrid RSM for Springback Predictive Control in Roll Forming [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science Edition, 2013, 47 (11): 2010-2019.
- [23] 张松涵, 高芳清, 张伟伟. 基于组合函数响应面的桥梁有限元模型修正 [J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2015, 34 (5): 18-24.
- ZHANG Song-han, GAO Fang-qing, ZHANG Wei-wei. Bridge Finite Element Model Updating Based on Combination Function Response Surfaces [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science Edition, 2015, 34 (5): 18-24.
- [24] 张铮鑫, 刘黔会, 黄方林. 面向桥梁工程的响应面技术在有限元模型修正中的应用探讨 [J]. 公路工程, 2018, 43 (4): 145-149.
- ZHANG Zheng-xin, LIU Qian-hui, HUANG Fang-lin. Research on Response Surface Technique for Bridge Engineering in Finite Element Model Correction [J]. Highway Engineering, 2018, 43 (4): 145-149.
- [25] 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 Tao, TIAN Zhong-chu, ZHANG Jian-ren, 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.