

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2014.08.017

基于响应面法的桥梁动力学有限元模型修正

万利军, 单 炜, 姜 华

(东北林业大学 寒区科学与工程研究院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要: 针对动力学频率测试中模型的试验值与理论值误差较大的问题, 结合大型桥梁缩尺模型试验, 采取基于响应面法的有限元模型修正技术, 获取了符合结构本真状态的有限元动力修正模型。选取二次多项式作为响应面函数的数学模型, 在修正参数的显著性分析和中心复合试验设计基础上, 运用最小二乘法对试验设计的样本空间数据进行拟合, 以目标达到法为迭代标准, 得到了自锚式悬索桥响应面的显示函数关系, 并直观地给出典型响应的空间曲面模型。 R^2 和 $RMSE$ 指标验证结果表明: 经修正后各阶频率峰值误差明显降低; 除横向二阶频率外, 其余各阶频率修正效果理想, 基频最小误差仅为 0.96%; 基于响应面法的有限元动力模型修正准确可靠; 经修正后的有限元模型可作为结构再分析的基准模型。

关键词: 桥梁工程; 自锚式悬索桥; 模态试验; 响应面法; 模型修正

中图分类号: U448.25; U442

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2014) 08-0096-06

Modification of Finite Element Model of Bridge Dynamics Based on Response Surface Method

WAN Li-jun, SHAN Wei, JIANG Hua

(Institute of Cold Region Science and Engineering, Northeast Forestry University, Harbin Heilongjiang 150040, China)

Abstract: Aiming at the problem of the larger error between the model tested value and theoretical value in dynamic frequency test, by employing large bridge reduced scale model test, and adopting the finite element model modification technology based on the response surface method, we obtained the finite element dynamic modification model which coincides with the true state of structure. Selecting a quadratic polynomial as the mathematical model of response surface function, based on the significance analysis of corrected parameters and the central composite experiment design, by employing the least squares method to fit the sample space data of experimental design, we obtained explicit function expressions for response surface of self-anchored suspension bridge with the iterative standard of achieving target, and intuitively provided the spatial curved surface model of typical responses. The verification results of R^2 and root mean square error model show that (1) the peak value error of each order frequency is significantly cut down after modification; (2) except the lateral second-order frequency, the modification result is well, and the minimum error of the fundamental frequency is only 0.96%; (3) the dynamic modification finite element model based on the response surface methodology is accurate and reliable; (4) the updated finite element model can be used as the reference model for structure further analysis.

Key words: bridge engineering; self-anchored suspension bridge; modal test; response surface method; model modification

收稿日期: 2014-01-13

基金项目: 哈尔滨市建设系统科学研究计划项目 (201107)

作者简介: 万利军 (1976-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 博士. (wlj2017@163.com)

0 引言

自有限元解析算法出现以来,人们在有限单元改进,精细化建模方式及求解算法上做了大量工作。然而,有限元模型建立过程中需对结构特征尺寸、模型阶次、边界条件等进行一定的简化和处理,从而导致了有限元模型响应和结构实测响应之间出现了一定的差异。因此有必要利用测试结果对有限元模型进行修正,得到符合结构本真状态的有限元模型。精准的有限元动力模型的获取,既是结构动力学安全分析的前提,也是改进结构抗风、抗震等方面设计的依据。

响应面方法(Response Surface Method, RSM)是解决精细化模型与快速分析之间矛盾的有效手段之一,是区别于传统的模型修正的新方法,其基本思想^[1-3]是在试验设计的有限次理论计算基础上,拟合得到结构响应和待修正参数之间的显式函数关系-响应面模型,并利用响应面模型代替有限元模型,实现对结构参数的优化修正。该修正方法可与通用有限元分析程序结合,进行有限元模型优化修正的二次开发,并可用于结构的进一步预报。

近年来,基于响应面的有限元模型修正在桥梁工程领域中开始得到推广应用,其中 A. L. Cundy 等^[4]提出利用响应面模型对结构动力损伤进行预测,并结合实验室悬臂梁的动力测试结果进行了验证;Sheng-En Fang 等^[5]运用 D -最优的试验设计,用一阶响应面模型代替有限元模型,对完整和损伤系统的动力响应进行预测;周林仁、欧进萍^[6]分析了修正环节中待修正参数和特征量间的关系,通过构造正定径向基函数的响应面模型,对一座斜拉桥缩尺模型的模态频率进行有限元模型修正;宗周红等^[7-8]依据连续刚构桥健康监测成果,运用二阶响应面方法,采用中心差分设计完成该桥的动力学有限元模型修正;郭勤涛等^[9-10]在研究响应面重构技术的基础上,对结构进行动力学模型修正,深化阐述了高阶响应面模型的试验设计方法,并通过三参数边界条件悬臂梁模型和 H 形梁结构模型进行了实例验证。任伟新^[11-12]研究了环境振动下结构模态特征和二阶响应面模型,并通过实验室工字钢梁进行了验证。目前,基于响应面法的桥梁动力学有限元模型修正,正由试验模型向实桥结构过渡,由局部构件向整体桥型发展。但是,因自锚式悬索桥构造复杂、模型试验耗费大的特点,鲜有结合自锚式悬索桥动力试验进行有限元模型修正的报道。

本文在前人研究的基础上,依托某大跨自锚式悬索桥缩尺模型的模态试验,选取二阶多项式响应面模型,融合统计理论、试验设计和有限元方法,尝试响应面修正技术在自锚式悬索桥动力学有限元模型修正中的具体应用,探求可由于结构动力学再分析的基准模型,从而拓展该方法的应用领域。

1 二阶多项式响应面的数学模型解析

从几何观点看,响应面法是利用样本空间点与样本响应值所组成的超曲面,来代替复杂的函数关系。在初始样本点附近,进行真值的线性或非线性搜索,从而达到真值和理论值相符合的一种数学方法。假设方差分析筛选出的 k 个待调整变量为 $x = [x_1, x_2, \dots, x_k]$, 与之对应的有限元模型动力响应特征信息为 f_{FEM} , 实测模态特征信息为 f_{CS} , 目标函数为有限元计算值与实测值的差值平方和, 即:

$$y = \sum_{j=1}^N g_j(x_1, x_2, \dots, x_k) = \sum_{j=1}^N (f_{FEM} - f_{CS})^2, \quad (1)$$

式中, J 为试验次数, J 从 1 ~ N 取值。

选取含线性项、交叉项与平方项的二阶响应面多项式 $\hat{g}(x)$ 来逼近 $g(x)$, 即:

$$\hat{g}(x) = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_i \sum_j \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2, \quad (2)$$

由此,待调整参数组成的待调向量组 $x = [x_1, x_2, \dots, x_k]$, 即转化为有约束的优化问题,即要求 $\hat{y} = \hat{g}(x_1, x_2, \dots, x_k) \rightarrow 0$, 从而得到相对应的优化向量 $x = [x_1^*, x_2^*, \dots, x_k^*]$ 。结构参数确定以后,结构有限元模型修正就转变为结构参数的优化问题,模型修正的过程就是利用结构的实测动力特征值进行参数优化的过程。

2 实验室物理模型

某双塔三跨对称体系自锚式悬索桥实验室物理模型与实桥的几何缩尺比为 1:50。模型全长 11.12 m, 模型跨径组合为 (0.92 + 2.16 + 4.96 + 2.16 + 0.92) m, 主梁全宽为 0.8 m, 桥塔高度 1.71 m。模型由两根主缆、49 对吊索、j 叠合主梁、H 型桥塔及支撑系统与鞍座组成。模型严格按刚度相似法^[12]进行设计,附加质量法对模型进行恒载配重。在主缆配重中,为避免附加质量纵向连续所产生的附加刚度,影响模态测试结果,主缆配重采用间断的小铅块

进行。

为了识别模型的动力学参数,试验在主梁上设置了 30 个竖向振动测点,12 个水平振动测点及 3 个纵向振动测点。分别布置于过渡跨中心、锚固跨四分点、中跨八分点位置。数据采集采用北京东方振动研究所开发的 INV303/306 型智能信号采集处理分析系统。参数识别采用随机子空间法,利用 DASP 智能分析系统进行模态的动态识别。用于模型修正的数据是自振频率。

3 有限元模型修正

3.1 初始有限元模型的建立

试验模型分析以空间杆系有限元结构为基础,模型由上部梁、下部桥墩、主塔、缆索系统、永久支撑系统、临时支承系统组成。主梁、主塔及墩采用空间梁单元模拟,吊索和主缆采用桁架单元模拟,试验模型离散为 331 个节点,306 个单元。模型配重依据模型相似化原理对恒载采用面荷载和集中荷载方式进行,有限元三维空间分析模型如图 1 所示。



图 1 有限元分析模型

Fig. 1 Finite element analytical model

3.2 修正参数选取

模型修正参数的选取以边界条件、叠合主梁的弹性模量比及恒载配重 3 方面共 4 个参数进行调整。其选取理由如下:结构固有振动特性对其边界条件的变异十分敏感,结合本桥的支座设置方式与纵向半漂浮体系特征,主要应选取竖向弹性支承与水平限位支承作为边界条件的待修正参数,并分别以相应的支承刚度模拟其对动力特性的影响;从结构振动特征分析,影响主梁振动的主要因素为其刚度特征^[13],并取决于几何构造和弹性模量,而后者对试验模型刚度影响更为显著,因此将叠合梁桥面板与钢加劲主梁两种不同材料的弹性模量比作为试验模型有限元修正的参数;从多自由度体系结构的振动方程可以得出,试验模型自身的体积质量及质量分布情况,一定程度决定了模型固有振动的特性值,而试验模型因相似化处理后,材料选择的不同致使

体积质量发生变化,必须对模型采取配重才能真实的模拟实桥的动力状态,各种配重荷载中,以二期恒载配重对结构动力特性影响最为显著。因此模型以二期恒载配重作为主要修正参数,来调整其对实际结构的影响。

参数范围的选取,直接影响着响应面拟合的精度,参数范围过小,可能无法涵盖参数的真实值,结果的准确性无法确定;参数取值过大,试验点远离真实值,试验设计效果不明显,使试验设计耗费过大。经多次试算后,确定修正参数的具体取值范围见表 1。

表 1 修正参数取值范围

Tab. 1 Values range of modified parameters

参数	最小值	最大值	初始中值
支座竖向刚度/($\times 10^7 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	15	25	20
支座横向刚度/($\times 10^5 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	20	40	30
叠合梁弹性模量比值 (加劲梁/桥面板)	2.51	3.05	2.78
恒载配重/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	2.376	2.904	2.64

3.3 基于中心复合试验设计的参数显著性分析

中心复合试验设计^[14]是集旋转性、正交性、正交旋转性等优良特性的响应面设计方法之一,并可在敏感的试验区对数据进行人工干预,设计过程根据二次多项式的特点来构造,因此适合二次多项式响应面。中心复合试验设计由 $2k$ 析因设计添加 n_c 个中心点和 $2k$ 个轴向点组成,其类型分别为:立方点、中心点和轴线点。立方体点为试验因子的组成部分,即模型的顶点或析因的一部分,由部分因子设计或全因子设计试验构成,共计 n_f 个,用于估算模型的线性项和交叉项;轴向点位于样本空间轴线上,扩展设计区域,用于响应曲面纯平方项的估计,其向量形式为 $(\pm\alpha, 0, \dots, 0)$, $(0, \pm\alpha, \dots, 0)$, $\dots$, $(0, 0, \dots, \pm\alpha)$;中心点的作用为检查弯曲、估算模型拟合误差,检验模型是否失拟,其向量形式为 $(0, \dots, 0)$,误差估计方法采用最小二乘法。

参数范围确定后,以模态试验特征值的结果为参照,选取有限元模型前六阶频率为响应特征。中心复合试验设计共完成 31 次试验,将中心复合试验设计的参数样本序列组合,作为干预有限元计算的参数,进行有限元模型的迭代计算,每组样本试验值与相应的有限元计算值组成一次试验的设计样本,全部 31 次试验组合成试验样本空间。

运用方差分析的 F 检验法^[15]分析修正参数对各

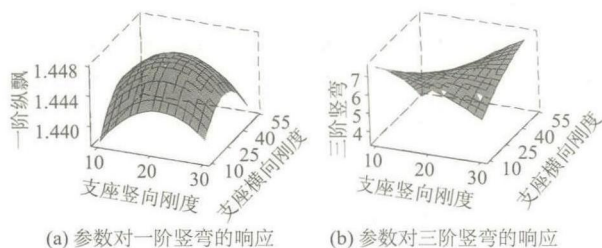


图3 典型响应面图

Fig. 3 Diagram of typical response surface

响应面模型和复杂模型则不合适,而 R^2 和 $RMSE$ 更加有效。相对均方根误差 $RMSE$,表达式如下:

$$RMSE = \frac{1}{N_{grid}} \sqrt{\sum [y(j) - y_{reg}(j)]^2} \quad (3)$$

R^2 判定系数,表达式如下:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{j=1}^{N_{grid}} (y_{reg}(j) - y(j))^2}{\sum_{j=1}^{N_{grid}} (y(j) - \bar{y})^2} \quad (4)$$

式中, y 和 $y_{reg}(j)$ 分别为设计空间各点的每一次响应面校验点真值和对应的有限元计算值; $\bar{y}$ 为设计空间中各点真值的平均值; N_{grid} 为校验点数量。

R^2 判定系数、 $RMSE$ 值代表了响应面与有限元分析计算之间的差异程度,均在0~1之间取值。 R^2 值越接近1,表明回归的响应面模型在试验设计空间内越能准确地描述系统输入与输出间的关系;而 $RMSE$ 值则相反,其值越接近0,表明模型越准确。

拟合得到的响应面的可靠性,依据式(4)与(5)进行校验,校验结果见表2。由表2可知, R^2 接近1,同时 $RMSE$ 接近0,响应面函数计算值和真值之间的差异程度很小,这说明在参数设计空间内,响应面函数能有效地反映结构响应和参数之间的关系,回归的响应面模型可以替代带有限元模型应用于模型修正。

表2 各阶响应面的精度检验值

Tab. 2 Accuracy test values of response surface in each order

模态阶次	Z_1	V_1	V_2	T_1	T_2	V_3
$RMSE$	0.000 943	0.000 932	0.000 053	0.000 128	0.000 129	0.003 102
R^2	0.997 65	0.991 12	0.992 33	0.998 79	0.989 65	0.965 32

3.5 模型修正

模型响应共计6个,即6个目标函数,模型修正属于有约束非线性规划的多目标最优化问题。采取目标达到法^[15],将实测的各阶频率作为与各个响应目标函数对应的目标值,在参数的取值范围对响应面模型进行优化,得到修正后的参数值,完成模型修正。

再将修正后的参数代替参数初始值进行有限元模型计算,得到修正后模型的频率。修正后的参数值如表3所示,修正后模型的频率和实测频率比较如表4所示。从表4中可以看出,修正后的有限元模型的模态频率和实测频率的相对误差绝对值的最高值降低,数据表明修正后的有限元模型的模态频率和实测频率吻合程度高。

表3 修正后的参数值

Tab. 3 Modified parameter values

参数	支座竖向刚度/ ($\times 10^7 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	支座横向刚度/ ($\times 10^5 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	弹性模量比 (加劲梁/ 桥面板)	恒载配重/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)
初始值	20	30	2.78	2.64
修正值	19.899	50	2.861 8	2.64
修正率/%	-0.51	66.67	2.94	0

表4 修正后频率与实测频率汇总

Tab. 4 Modified and measured frequency values

模态阶次	有限元频率/Hz	修正后频率/Hz	实测频率/Hz	修正前相对误差/%	修正后相对误差/%
纵向一阶	1.447	1.407	1.372	5.47	2.55
竖向一阶	3.174	3.216	3.256	-2.52	-1.23
竖向二阶	3.648	3.792	3.756	-2.88	0.96
横向一阶	4.214	4.489	4.721	-10.74	-4.91
横向二阶	5.696	5.840	6.223	-8.47	-6.15
竖向三阶	6.506	6.760	7.001	-7.07	-3.44

4 结论

(1) 选取二次多项式作为响应面法的数学模型,运用最小二乘法对试验设计的样本数据进行拟合,以目标达到法为迭代标准,得到了自锚式悬索桥响应面的显示函数关系,并直观地给出典型响应的空间曲面模型。

(2) R^2 和 $RMSE$ 模型验证结果表明:基于响应面法的有限元动力修正准确可靠。从修正结果表明:经修正后各阶频率峰值降低,除横向二阶频率外,其余各阶频率修正效果理想,基频最小误差仅为0.96%;经修正后的模型可准确反映结构的动力学基本特征,可作为结构进一步分析的基准模型。

(3) 模型修正后实测数值和有限元计算值的离散性降低,数据离散原因主要是由试验误差引起,同时表明了有限元修正不能对试验误差进行干预。

(4) 修正过程表明:基于响应面法的动力有限元模型修正过程的模块性较强,易于工程推广应用。

参考文献:

References:

- [1] 邹铁方,余志,蔡铭,等.人车碰撞事故再现仿真结

- 果不确定性问题研究[J]. 公路交通科技, 2010, 27 (7): 110-113.
- ZOU Tie-fang, YU Zhi, CAI Ming, et al. Research on Uncertainty of Simulation Results in Vehicle-pedestrian Accident Reconstruction [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27 (7): 110-113.
- [2] 刘扬, 鲁乃唯. 钢管混凝土组合高墩连续刚构桥体系可靠指标计算方法[J]. 公路交通科技, 2011, 28 (9): 89-95.
- LIU Yang, LU Nai-wei. Calculation of System Reliability Index of CFST Continuous Rigid Frame Bridge with High-rise Piers [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28 (9): 89-95.
- [3] BOX G E P, WILSON K B. On the Experimental Attainment of Optimum Conditions [J]. Journal of the Royal Statistical Society Series B, 1951, 13 (1): 1-34.
- [4] CUNDY A L. Use of Response Surface Meta-models in Damage Identification of Dynamic Structures [D]. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2003.
- [5] FANG Sheng-en, PERERA R. Damage Identification by Response Surface Based Model Updating using D-optimal Design [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2011, 25 (2): 717-733.
- [6] 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): 8-14.
- ZHOU Lin-ren, OU Jin-ping. Finite Element Model Updating of Long-Span Cable-Stayed Bridge Based on the Response Surface Method of Radial Basis Function [J]. China Railway Science, 2012, 33 (3): 8-14.
- [7] 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.
- [8] 宗周红, 褚福鹏, 牛杰. 基于响应面模型修正的桥梁结构损伤识别方法[J]. 土木工程学报, 2013, 46 (2): 115-122.
- ZONG Zhou-hong, CHU Fu-peng, NIU jie. Damage Identification Methods of Bridge Structures Using Response Surface Based on Finite Element Model Updating [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46 (2): 115-122.
- [9] 郭勤涛, 张令弥, 费庆国. 结构动力学有限元模型修正的发展—模型确认[J]. 力学进展, 2006, 36 (1): 36-42.
- GUO Qin-tao, ZHANG Ling-mi, FEI Qing-guo. From FE Model Updating to Model Validation: Advances in Modeling of Dynamic Structures [J]. Advances in Mechanics, 2006, 36 (1): 36-42.
- [10] 朱跃, 张令弥, 郭勤涛. 基于 SVR 方法的有限元模型确认中不确定性建模研究[J]. 振动与冲击, 2010, 29 (9): 119-122, 150.
- ZHU Yue, ZHANG Ling-mi, GUO Qin-tao. SVR Based Uncertainty Modeling Method for Structures Finite Element Model Validation [J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29 (9): 119-122, 150.
- [11] REN Wei-xin, CHEN Hua-bing. Finite Element Model Updating in Structural Dynamics by Using the Response Surface Method [J]. Engineering Structures, 2010, 32 (8): 2455-2465.
- [12] REN Wei-xin, FANG Sheng-en, DENG Miao-yi. Response Surface Based Finite Element Model Updating by Using Structural Static Responses [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2011, 137 (4): 248-257.
- [13] 沈锐利, 齐东春, 唐茂林. 杭州江东大桥静力特性全桥模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44 (1): 74-80.
- SHEN Rui-li, QI Dong-chun, TANG Mao-lin. Model Test Study of the Static Property of the Jiangdong Bridge in Hangzhou [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44 (1): 74-80.
- [14] 道格拉斯·蒙哥马利. 实验设计与分析[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2009: 1-116.
- MONTGOMERY D. Design and Analysis of Experiments [M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2009: 1-116.
- [15] 吕栋雷, 曹志耀, 邓宝, 等. 利用方差分析法进行模型验证[J]. 计算机仿真, 2006, 23 (8): 46-48.
- LÜ Dong-lei, CAO Zhi-yao, DENG Bao, et al. Application of Variance Analysis in Model Validation [J]. Computer Simulation, 2006, 23 (8): 46-48.
- [16] 宗周红, 任伟新. 桥梁有限元模型修正和模型确认[M]. 北京: 人民交通出版社, 2012: 13-37.
- ZONG Zhou-hong, REN Wei-xin. Finite Element Model Updating and Model Validation of Bridge Structures [M]. Beijing: China Communications Press, 2012: 13-37.