

桥梁结构基于高维模型拟合响应面的参数识别

官 华, 陈德伟, 白植舟

(同济大学 桥梁工程系, 上海 200092)

摘要: 为提高响应面法在桥梁结构参数识别中的计算精度, 提出了基于高维模型拟合响应面的参数识别方法. 即采用 HDMR 响应面法拟合结构响应面, 并基于该响应面进行结构参数的识别. 研究了 HDMR 响应面的基本构造方法, 阐述了在响应面基础上通过有约束最小二乘优化实现参数识别的一般过程. 以一座连续梁及一座独塔斜拉桥为算例进行分析, 探讨了该方法在结构参数识别中的计算精度及效率. 结果表明, 相比传统响应面法, 该方法在计算精度上具有显著优势. 同时也验证了该方法在大型桥梁结构参数识别中的可靠性和适用性.

关键词: 结构参数识别; 高维模型拟合响应面法; 最小二乘优化; 桥梁结构

中图分类号: TU311.2

文献标志码: A

Bridge Structural Parameters Identification Method Based on HDMR Response Surface

GUAN Hua, CHEN Dewei, BAI Zhizhou

(Department of Bridge Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: A method for structural parameters identification based on high dimensional model representation (HDMR) response surface is proposed to improve the response surface method applied to bridge structure parameters identification. With the HDMR response surface method, the implicit function relationship between structural parameters and responses is obtained, which is then applied to identifying the structural parameters through a constrained least square optimization strategy. The construction process of HDMR response surface is researched and based on which the implementation program of structural parameters identification is presented. Numerical examples, which contain a continuous beam structure and a single pylon cable-stayed bridge, are given to investigate the computational accuracy and efficiency of the proposed method in structural

parameters identification. The analysis results show that the proposed method possesses a remarkable advantage in computational accuracy, which is reliable and applicable in the parameters identification of large bridge structures.

Key words: structural parameters identification; high dimensional model representation (HDMR) response surface method; least square optimization; bridge structure

桥梁结构参数(如材料特性等)的实际值与规范值往往存在偏差, 因此, 在桥梁施工控制中尤其需要对结构参数进行识别. 目前结构参数识别最常用的方法为最小二乘法, 该方法通常先根据有限元分析建立结构响应增量(如位移)关于待识别参数增量的影响矩阵, 再基于结构响应实测值, 通过最小二乘优化得到结构参数识别值^[1]. 由于影响矩阵与待识别参数增量相关, 参数识别结果的精度则取决于待识别参数增量的取值. 因此, 该方法存在计算精度不易控制的缺点, 而要得到较为理想的结果则通常需要在有限元基础上进行多次试算或迭代计算^[2].

采用响应面法^[3-6] (response surface method, RSM) 将结构响应与结构参数之间的复杂隐式函数关系通过显式函数近似表达出来, 在此基础上进行参数识别则可以克服上述缺点^[2]. 该方法已在结构可靠度分析中得以广泛应用, 近年来也逐步应用于结构参数识别中. 郭勤涛等^[2]对基于 RSM 法的结构动力有限元模型修正进行了分析研究, 并将其应用于“H”型梁及 GARTEUR 飞机有限元模型修正中. 邓苗毅等^[7]则利用结构静力测试结果, 对基于静力响应面的结构有限元模型修正进行了分析研究. 周林仁与欧进萍^[8]则基于结构动力响应, 采用 RSM 法对大跨径桥梁结构参数进行识别. 然而, 传统 RSM 法通常采用形式简单的二次多项式为响应面函数,

收稿日期: 2010-10-08

第一作者: 官 华(1983—), 男, 博士生, 主要研究方向为桥梁施工控制理论. E-mail: gh_1983@hotmail.com

通讯作者: 陈德伟(1956—), 男, 研究员, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为桥梁设计及施工控制理论.

E-mail: chendewei@tj@hotmail.com

其拟合精度往往不能满足参数识别的精度要求^[9],而基于高阶多项式的响应面函数存在阶数不易确定及容易导致病态回归方程的缺点^[10].如何获得形式简单且精度高的响应面函数是该方法的研究重点.

高维模型拟合 (high dimensional model representation, HDMR) 方法是 Rabitz 及其团队^[11]提出的一种获取高维复杂系统“输入-输出”函数关系的数学方法.该方法因形式简单、响应面拟合精度高的特点得以广泛发展,至今已成功应用于大气化学、分子动力学模拟及结构可靠度分析等^[12-14]领域.因此,本文提出采用 HDMR 方法拟合结构响应面(简称 HDMR 响应面法),并基于该响应面实现结构参数的识别.结合算例分析,讨论了本文方法的计算精度及计算效率.

1 响应面模型的建立

1.1 基于二阶多项式的 RSM 法

传统 RSM 法采用的响应面函数多为不含交叉项的二次多项式

$$\tilde{g}(x) = \alpha_0 + \sum_{i=1}^N \alpha_i x_i + \sum_{i=1}^N \alpha_{ii} x_i^2 \quad (1)$$

式中: $x_i (i=1, 2, \dots, N)$ 为第 i 个待识别参数, α_0, α_i 与 α_{ii} 则为待确定未知系数, 其个数为 $2N+1$. 上述未知系数可通过有限元抽样分析并结合回归分析予以确定, 具体方法可参阅文献^[3], 本文不做详细阐述.

1.2 HDMR 响应面法

1.2.1 HDMR 扩展

假定 N 维输入变量为 $x = (x_1, x_2, \dots, x_N)$, 系统响应变量则为 $g(x)$, 根据 HDMR 方法, $g(x)$ 可表达为

$$g(x) = g_0 + \sum_{i=1}^N g_i(x_i) + \sum_{i_1 < i_2} g_{i_1 i_2}(x_{i_1}, x_{i_2}) + \dots + \sum_{i_1 < \dots < i_m} g_{i_1 i_2 \dots i_m}(x_{i_1}, x_{i_2}, \dots, x_{i_m}) + \dots + g_{12 \dots N}(x_1, x_2, \dots, x_N) \quad (2)$$

式中: g_0 为常数项; $g_i(x_i)$ 为一阶项, 表示变量 x_i 独立作用时对响应变量的影响量; $g_{i_1 i_2}(x_{i_1}, x_{i_2})$ 为二阶项, 表示变量 x_{i_1} 与 x_{i_2} 对于响应变量的耦合影响量; 更高阶项表示 m 个输入变量耦合作用对响应变量的影响量; $g_{12 \dots N}(x_1, x_2, \dots, x_N)$ 则表示所有输入变量耦合作用的残余影响量. 对于实际工程, 通常取前二阶扩展式即可满足精度要求, 即

$$\tilde{g}(x) = g_0 + \sum_{i=1}^N g_i(x_i) + \sum_{i_1 < i_2} g_{i_1 i_2}(x_{i_1}, x_{i_2}) \quad (3)$$

引入 cut-HDMR^[15] 表达式, 即利用 $g(x)$ 在穿过输入变量空间内某参考点 $r = (r_1, r_2, \dots, r_N)$ 的线、面及超平面上的样本值来表达响应面函数 $\tilde{g}(x)$, 参考点 r 一般取为样本中心点. 式(3)中的各分项函数可表示为

$$g_0 = g(r) \quad (4)$$

$$g_i(x_i) = g^i(x_i) - g_0 \quad (5)$$

$$g_{i_1 i_2}(x_{i_1}, x_{i_2}) = g^{i_1 i_2}(x_{i_1}, x_{i_2}) - g_{i_1}(x_{i_1}) - g_{i_2}(x_{i_2}) - g_0 \quad (6)$$

其中

$$g^i(x_i) = g(r_1, r_2, \dots, r_{i-1}, x_i, r_{i+1}, \dots, r_N) \quad (7)$$

$$g^{i_1 i_2}(x_{i_1}, x_{i_2}) = g(r_1, r_2, \dots, r_{i_1-1}, x_{i_1}, r_{i_1+1}, \dots, r_{i_2-1}, x_{i_2}, r_{i_2+1}, \dots, r_N) \quad (8)$$

式(7), (8)中: $g^i(x_i)$ 与 $g^{i_1 i_2}(x_{i_1}, x_{i_2})$ 可采用移动最小二乘法(moving least-squares, MLS)^[16]进行确定.

将式(4)~(8)代入式(3)则有

$$\begin{aligned} \tilde{g}(x) = & \sum_{\substack{i_1=1, i_2=1 \\ (i_1 < i_2)}}^N g(r_1, \dots, r_{i_1-1}, x_{i_1}, r_{i_1+1}, \dots, \\ & r_{i_2-1}, x_{i_2}, r_{i_2+1}, \dots, r_N) - (N-2) \cdot \\ & \sum_{i=1}^N g(r_1, \dots, r_{i-1}, x_i, r_{i+1}, \dots, r_N) + \\ & [(N-1)(N-2)/2] g(r) \end{aligned} \quad (9)$$

1.2.2 MLS 法拟合 HDMR 响应面函数

为方便表示, 将 x_i 及 (x_{i_1}, x_{i_2}) 统一记为 $x_K (K=1$ 或 2 , 分别表示一维或二维变量), 分项函数 $g^i(x_i)$ 与 $g^{i_1 i_2}(x_{i_1}, x_{i_2})$ 则统一记为 $g'(x_K)$, 根据 MLS 法, 有 $g'(x_K)$ 的近似表达式为

$$\tilde{g}'(x_K) = p^T(x_K) a(x_K) \quad (10)$$

式中: $p^T(x_K) = \{p_1(x_K), p_2(x_K), \dots, p_S(x_K)\}$ 由 S 个多项式的基本分项构成, 通常取二次多项式.

$K=1$ 时,

$$p^T(x_K) = p^T(x_i) = (1, x_i, x_i^2) \quad (S=3) \quad (11)$$

$K=2$ 时,

$$p^T(x_K) = p^T(x_{i_1}, x_{i_2}) = (1, x_{i_1}, x_{i_2}, x_{i_1} x_{i_2}, x_{i_1}^2, x_{i_2}^2) \quad (S=6) \quad (12)$$

$a(x_K) = \{a_1(x_K), a_2(x_K), \dots, a_S(x_K)\}^T$ 则为待确定的关于 x_i 的未知系数表达式向量.

假设 $x_K^I (I=1, 2, \dots, t)$ 为参数样本点, 据 MLS 法, 样本点处的近似响应值 $\tilde{g}'(x_K^I)$ 与真实响应值 $g'(x_K^I)$ 之间的加权误差平方和为

$$J = \sum_{I=1}^t w(x_K - x_K^I) [\tilde{g}'(x_K^I) - g'(x_K^I)]^2 \quad (13)$$

写成矩阵形式为

$$J = [P a(x_K) - d]^T W [P a(x_K) - d] \quad (14)$$

其中,

$$\mathbf{P} = [\mathbf{p}(\mathbf{x}_K^1), \mathbf{p}(\mathbf{x}_K^2), \dots, \mathbf{p}(\mathbf{x}_K^I)]^T \quad (15)$$

$$\mathbf{d} = \{g'(\mathbf{x}_K^1), g'(\mathbf{x}_K^2), \dots, g'(\mathbf{x}_K^I)\}^T \quad (16)$$

\mathbf{W} 为加权函数对角阵

$$\mathbf{W} = \text{diag}[w(\mathbf{x}_K - \mathbf{x}_K^1), \dots, w(\mathbf{x}_K - \mathbf{x}_K^I)] \quad (17)$$

本文采用四次样条(quartic spline)加权函数^[17],有

$$w(\mathbf{x}_K - \mathbf{x}_K^I) = w(\bar{s}) = \begin{cases} 1 - 6\bar{s}^2 + 8\bar{s}^3 - 3\bar{s}^4 & (\bar{s} \leq 1) \\ 0 & (\bar{s} > 1) \end{cases} \quad (18)$$

其中 $\bar{s} = \frac{\|\mathbf{x}_K - \mathbf{x}_K^I\|}{s_{ml}}$, $\|\mathbf{x}_K - \mathbf{x}_K^I\|$ 为任意点 \mathbf{x}_K 到第 I 个样本点之间的距离, s_{ml} 为第 I 个样本点的影响区域,为使影响区域内包含足够的样本点且不失精度,本文取 s_{ml} 为 2 倍的样本点步长。

式(14)取极小值,则有 $\frac{\partial J}{\partial \mathbf{a}} = 0$,可得

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}_K)\mathbf{a}(\mathbf{x}_K) - \mathbf{B}(\mathbf{x}_K)\mathbf{d} = 0 \quad (19)$$

$$\mathbf{a}(\mathbf{x}_K) = \mathbf{A}^{-1}(\mathbf{x}_K)\mathbf{B}(\mathbf{x}_K)\mathbf{d} \quad (20)$$

式中: $\mathbf{A}(\mathbf{x}_K) = \mathbf{P}^T \mathbf{W} \mathbf{P}$, $\mathbf{B}(\mathbf{x}_K) = \mathbf{P}^T \mathbf{W}$.

将式(20)代入式(10)便得到各分项函数近似表达式为

$$\tilde{g}'(\mathbf{x}_K) = \mathbf{p}^T(\mathbf{x}_K)\mathbf{A}^{-1}(\mathbf{x}_K)\mathbf{B}(\mathbf{x}_K)\mathbf{d} \quad (21)$$

再将所得的各分项函数表达式代入式(9)进行组合便可确定 HDMR 响应面函数 $\tilde{g}(\mathbf{x})$.

1.3 试验设计

常用的试验设计方法有 D 优化设计、Box-Behnken 设计、中心复合设计以及全因子试验设计等.其中,全因子试验设计是全部因子水平的完全组合,相较于其他试验设计,通常可获得更高的拟合精度^[18].本文采用全因子试验设计进行结构参数样本点的确定。

全因子试验设计其计算效率及精度与因子水平数 n 相关, n 过小可能导致精度不足, n 过大则会增加大量样本点和抽样分析次数.依据文献[14],对于 HDMR 响应面法, n 取 3~7 较为合理,本文主要对因子水平数 $n=3, 5$ 和 7 进行探讨.假设结构参数 x_i 的取值范围为 $[x_{il}, x_{iu}]$,取 $\mu_i = \frac{x_{il} + x_{iu}}{2}$ 为 x_i 的基本

水平, $\sigma_i = \frac{x_{iu} - x_{il}}{n-1}$ 为样本点步长,则有:

(1) 对于分项函数 $g^i(x_i)$,由于只包含单因子 x_i 的 n 个水平,样本点则为 x_i 坐标轴上的 n 个点, $\mu_i \pm f\sigma_i$ ($f=0, 1, \dots, \frac{n-1}{2}$),如图 1a,为 $n=7$ 时的样本点布置。

(2) 对于分项函数 $g^{i_1 i_2}(x_{i_1}, x_{i_2})$,由于包含了两个因子的 n 个水平,因此在变量空间内将两个因子的 n 水平进行完全组合,便得到 n^2 个样本点,如图 1b,为 $n=7$ 时的样本点布置,样本中心点 μ 的坐标为 (μ_{i_1}, μ_{i_2}) .

根据式(9)可知,对于 HDMR 响应面法,采用全因子试验设计生成的样本点个数 t 为

$$t = \begin{cases} n^N & (N \leq 2) \\ C_N^2 n^2 + Nn + 1 & (N > 2) \end{cases} \quad (22)$$

传统 RSM 法采用全因子试验设计生成的样本点数为: $t = n^N$.

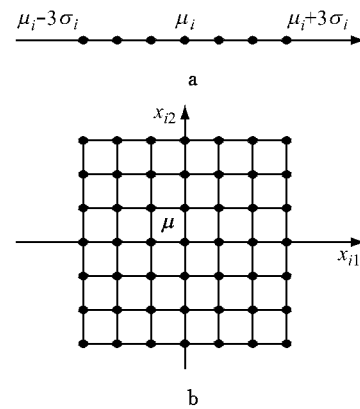


图 1 全因子试验设计的样本点布置 ($n=7$)

Fig.1 Sample points of the full factorial design ($n=7$)

1.4 结构响应面的精度检验

对于结构响应面的拟合精度,可采用复相关系数 R^2 进行检验

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (\bar{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2} \quad (23)$$

式中: m 为用于精度检验的样本数量; y_i 为样本的真实响应值; \bar{y} 为 y_i 的平均值; \bar{y}_i 为样本的响应面函数值. R^2 值越接近于 1,说明响应面的拟合精度越高,因此 R^2 值可作为评价标准以比较各不同响应面的拟合精度。

2 基于结构响应面的参数识别

在获取结构的响应面函数后,即可在此基础上进行参数识别.假设 N 个待识别参数为 $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_N)$,有 M 个实测响应值为 $\mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_M)$,相应的响应面函数为 $\tilde{\mathbf{g}}(\mathbf{x}) = \{\tilde{g}_1(\mathbf{x}), \tilde{g}_2(\mathbf{x}), \dots, \tilde{g}_M(\mathbf{x})\}$,基于误差平方和最小原则,可构造问题的优化目标函数

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{j=1}^M [\tilde{g}_j(\mathbf{x}) - y_j]^2 \quad (24)$$

已知 $x_i \in [x_{il}, x_{iu}]$, 参数识别问题即转化为有约束的最小二乘优化问题。

3 算例分析

3.1 算例 1

某三跨混凝土连续梁, 跨径布置为 30 m+32 m+32 m, 见图 2。主梁材料为 C50 混凝土, 记弹性模量设计值为 E_0 。假定各跨主梁实际弹性模量为待识别参数, 分别为: $E_1 = x_1 E_0$, $E_2 = x_2 E_0$ 及 $E_3 = x_3 E_0$ 。在中跨跨中位置作用一竖直向下集中力 $F = 5\,000$ kN, 得到三跨跨中挠度分别为 $z_1 = 5.6$ mm, $z_2 = -13.5$ mm 及 $z_3 = 5.6$ mm, 依据该挠度值对结构参

数 E_1, E_2 及 E_3 进行识别。

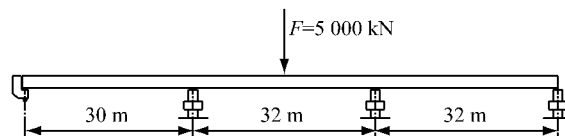


图 2 连续梁结构计算简图

Fig.2 Analysis model of continuous beam structure

(1) 响应面拟合。给定 x_1, x_2 及 x_3 的两组取值范围分别为 $[0.7, 1.3]$ 及 $[0.85, 1.15]$, 并分别采用本文方法及传统 RSM 法构造响应面函数, 得到了各跨中点挠度基于不同参数取值范围及不同因子水平数下关于参数 E_1, E_2 及 E_3 的响应面函数。在参数取值范围内采用全因子试验设计并取因子水平数 $n=6$ 生成 216 组样本数据, 依此计算响应面的复相关系数 R^2 , 结果见表 1。

表 1 复相关系数 R^2 结果比较

Tab.1 Comparison of multiple correlation coefficients (R^2)

| 方法 | 水平数 | 抽样次数 | R^2 | | | | | |
|--------|-----|------|--------------------|---------|---------|----------------------|---------|---------|
| | | | 取值范围: $[0.7, 1.3]$ | | | 取值范围: $[0.85, 1.15]$ | | |
| | | | x_1 | x_2 | x_3 | x_1 | x_2 | x_3 |
| 传统 RSM | 3 | 27 | 1.016 3 | 1.033 2 | 1.016 6 | 1.003 8 | 1.008 1 | 1.003 8 |
| | 5 | 125 | 0.986 0 | 1.003 8 | 0.986 0 | 0.996 6 | 1.000 9 | 0.996 6 |
| | 7 | 343 | 0.975 3 | 0.990 9 | 0.975 1 | 0.994 1 | 0.997 9 | 0.994 0 |
| 本文方法 | 3 | 37 | 1.011 1 | 1.024 8 | 1.011 1 | 1.002 6 | 1.006 1 | 1.002 6 |
| | 5 | 91 | 1.000 4 | 1.001 6 | 1.000 4 | 1.000 2 | 1.000 4 | 1.000 2 |
| | 7 | 169 | 0.999 4 | 0.999 4 | 0.999 4 | 1.000 0 | 0.999 9 | 1.000 0 |

由表 1 可知, 取 $n=3$ 时, 传统 RSM 法的计算效率略有优势, 当 $n>3$ 时, 本文方法的计算效率则更高。比较各响应面的复相关系数 R^2 值则不难发现, 在同一取值范围下取相同因子水平数时, 本文方法所得的 R^2 值相较于传统 RSM 法所得的 R^2 值更接近于 1; 在相同因子水平数下, 基于取值范围 $[0.85, 1.15]$ 所得的 R^2 值比基于取值范围 $[0.7, 1.3]$ 所得的 R^2 值更接近于 1; 同一取值范围下, 取更大的因子水平数时, 本文方法所得响应面的精度明显提高。

(2) 参数识别。以各响应面模型为基础进行参数识别, 所得结果见表 2。查看基于取值范围 $[0.7, 1.3]$ 所得结果不难发现: 相同水平数下, 本文方法所得结果的精度比传统 RSM 法所得结果的精度要高; 增加因子水平数后本文方法进一步提高了结果的精度, 传统 RSM 法在增加因子水平数时, 其精度没有明显提升。在基于取值范围 $[0.85, 1.15]$ 所得结果中不难发现, x_1 的识别结果均为 0.85, 这是由于 x_1 的真实值落在参数取值范围之外, 在进行有约束最小二乘优化时, 对最优解的搜索会停止于取值范围的

上限或下限值。这种情况下, 应调整参数取值范围, 重新计算。

表 2 算例 1 分析结果比较

Tab.2 Comparison of analysis results of Example 1

| 取值范围 | 方法 | 水平数 | x_1 | x_2 | x_3 |
|----------------|--------|-----|---------|---------|---------|
| $[0.7, 1.3]$ | 传统 RSM | 3 | 0.838 6 | 0.907 6 | 1.103 7 |
| | | 5 | 0.837 0 | 0.905 7 | 1.106 9 |
| | | 7 | 0.836 4 | 0.905 1 | 1.108 0 |
| | 本文方法 | 3 | 0.841 9 | 0.907 5 | 1.093 3 |
| | | 5 | 0.844 5 | 0.899 2 | 1.100 5 |
| | | 7 | 0.844 0 | 0.900 1 | 1.100 0 |
| $[0.85, 1.15]$ | 传统 RSM | 3 | 0.850 0 | 0.896 7 | 1.109 5 |
| | | 5 | 0.850 0 | 0.896 3 | 1.109 8 |
| | | 7 | 0.850 0 | 0.896 1 | 1.110 0 |
| | 本文方法 | 3 | 0.850 0 | 0.899 4 | 1.097 7 |
| | | 5 | 0.850 0 | 0.900 8 | 1.082 8 |
| | | 7 | 0.850 0 | 0.895 5 | 1.105 5 |
| 参数真实值 | | | 0.844 0 | 0.900 0 | 1.100 0 |

3.2 算例 2

(1) 基本概况。如图 3 所示, 某独塔斜拉桥跨径布置为 142 m+110 m+2×45 m。全桥共 38 对斜拉索(塔根部往两侧依次为 1~19 号索)。主梁、主塔为

C50 混凝土,桥墩为 C30 混凝土,斜拉索为 $\Phi 7\text{ mm}$ 镀锌平行钢丝.在斜拉桥施工中,影响桥梁线形和受力的参数较多,主要包括结构刚度、材料重度、温度以及施工临时荷载等.为减少参数识别工作量,本文仅选取主梁弹性模量 E_b 、主梁重度 γ_b 和斜拉索弹性模量 E_c 作为待识别参数.

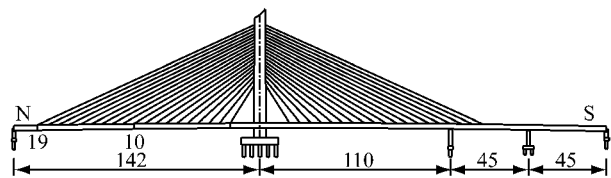


图 3 总体布置图(单位:m)
Fig.3 Elevation view of the bridge (Unit:m)

(2) 待识别参数取值范围及响应变量.因参数选点范围不同会得到不同的响应面,从而得到不同的参数识别结果.所以本文选取了两组不同的参数

取值范围,以讨论其对计算结果的影响.
令 E_{b0} , γ_{b0} 和 E_{c0} 为主梁弹性模量、主梁重度和斜拉索弹性模量设计值, ΔE_b , $\Delta \gamma_b$ 及 ΔE_c 则分别为相应的结构参数误差, $\Delta E_b = x_1 E_{b0}$, $\Delta \gamma_b = x_2 \gamma_{b0}$ 及 $\Delta E_c = x_3 E_{c0}$. 假定两组参数误差取值范围如表 3 所示^[19].

| 表 3 参数取值范围 | | | |
|---------------------------------|---------------|----------------|-------------------|
| Tab.3 Value range of parameters | | | |
| 取值范围 | x_1 | x_2 | x_3 |
| 1 | $[-0.2, 0.4]$ | $[-0.1, 0.2]$ | $[-0.35, 0.25]$ |
| 2 | $[-0.1, 0.2]$ | $[-0.05, 0.1]$ | $[-0.175, 0.125]$ |

考虑该桥北岸主跨(142 m)在合拢施工阶段,根据斜拉桥线形与索力双控原则,选取北岸主跨第 N1,N10 及 N19 斜拉索下的主梁标高误差 y_1, y_{10}, y_{19} 及索力误差 t_1, t_{10}, t_{19} 为响应变量.本文取 3 组基于有限元计算的响应变量值为样本数据来模拟结构参数的识别,见表 4.

表 4 算例 2 响应变量样本数据

| Tab.4 Sample data of structural responses of Example 2 | | | | | | | | | |
|--------------------------------------------------------|---------------|---------------------|----------------|-----------------|--------------------|--------------------|-----------------|--------------------|--------------------|
| 样本 | ΔE_b | $\Delta \gamma_b$ | ΔE_c | y_1/mm | y_{10}/mm | y_{19}/mm | t_1/kN | t_{10}/kN | t_{19}/kN |
| 1 | $0.05E_{b0}$ | $0.08\gamma_{b0}$ | $-0.07E_{c0}$ | -3.2 | -27.9 | -13.2 | 73.394 | 246.146 | 6.106 |
| 2 | $0.041E_{b0}$ | $0.053\gamma_{b0}$ | $-0.015E_{c0}$ | -2.6 | -22.0 | -10.1 | 41.365 | 158.352 | -3.200 |
| 3 | $0.046E_{b0}$ | $-0.062\gamma_{b0}$ | $0.013E_{c0}$ | 2.9 | 23.7 | 10.4 | -44.918 | -156.555 | 24.678 |

(3) 参数识别.采用 ANSYS 程序建立有限元模型进行抽样分析,如图 4 所示,再分别采用本文方法

及传统 RSM 进行参数识别,得到了基于两组参数取值范围及不同因子水平数的参数识别结果,见表 5.

表 5 参数识别结果比较

| Tab.5 Comparison of parameter identification results | | | | | | | | | |
|------------------------------------------------------|--------|-----|------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 样本 | 方法 | 水平数 | 抽样次数 | 取值范围 1 | | | 取值范围 2 | | |
| | | | | x_1 | x_2 | x_3 | x_1 | x_2 | x_3 |
| 1 | 传统 RSM | 3 | 27 | 0.052 6 | 0.080 0 | -0.071 0 | 0.054 8 | 0.079 6 | -0.065 3 |
| | | 5 | 125 | 0.052 3 | 0.080 1 | -0.070 2 | 0.055 2 | 0.079 5 | -0.065 0 |
| | | 7 | 343 | 0.052 5 | 0.080 2 | -0.070 0 | 0.055 4 | 0.079 5 | -0.064 9 |
| | 本文方法 | 3 | 37 | 0.054 4 | 0.079 6 | -0.069 1 | 0.050 7 | 0.079 9 | -0.069 5 |
| | | 5 | 91 | 0.050 8 | 0.079 9 | -0.069 7 | 0.050 1 | 0.080 0 | -0.070 0 |
| | | 7 | 169 | 0.050 3 | 0.080 0 | -0.069 9 | 0.050 2 | 0.080 0 | -0.070 0 |
| 2 | 传统 RSM | 3 | 27 | 0.042 6 | 0.053 0 | -0.016 6 | 0.039 4 | 0.053 2 | -0.016 7 |
| | | 5 | 125 | 0.041 0 | 0.053 2 | -0.016 8 | 0.039 6 | 0.053 2 | -0.016 5 |
| | | 7 | 343 | 0.408 0 | 0.053 2 | -0.016 6 | 0.039 7 | 0.053 1 | -0.016 4 |
| | 本文方法 | 3 | 37 | 0.042 2 | 0.052 8 | -0.017 5 | 0.041 0 | 0.053 0 | -0.015 2 |
| | | 5 | 91 | 0.040 6 | 0.053 1 | -0.015 5 | 0.040 9 | 0.053 0 | -0.015 1 |
| | | 7 | 169 | 0.040 7 | 0.053 0 | -0.015 2 | 0.040 9 | 0.053 0 | -0.015 1 |
| 3 | 传统 RSM | 3 | 27 | 0.083 4 | -0.066 0 | 0.043 4 | -0.044 9 | -0.050 0 | -0.005 3 |
| | | 5 | 125 | 0.076 3 | -0.065 5 | 0.039 7 | -0.045 6 | -0.050 0 | -0.005 8 |
| | | 7 | 343 | 0.074 4 | -0.065 4 | 0.038 7 | -0.045 9 | -0.050 0 | -0.006 0 |
| | 本文方法 | 3 | 37 | 0.046 3 | -0.062 1 | 0.009 8 | -0.035 2 | -0.050 0 | -0.005 4 |
| | | 5 | 91 | 0.046 2 | -0.062 0 | 0.013 3 | -0.035 2 | -0.050 0 | -0.005 2 |
| | | 7 | 169 | 0.046 0 | -0.061 9 | 0.013 0 | -0.035 3 | -0.050 0 | -0.005 1 |

对比本文方法及传统 RSM 法基于参数取值范围 1 所得的结果, $n=3$ 时,传统 RSM 法与本文方法所得结果较接近,但与真实值相比其精度均较低; n

>3 时,两种方法所得结果的精度均有提升,而本文方法的结果则精度更高; $n=5$ 时,本文方法的结果已十分接近真实值,取 $n=7$ 时,计算精度有略微提升.

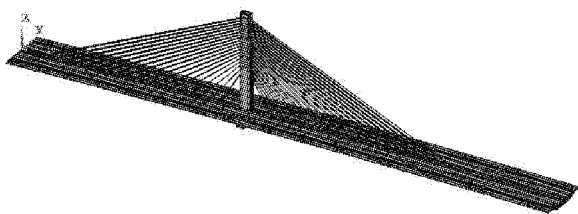


图4 有限元模型

Fig.4 Finite element model of the bridge

查看基于参数取值范围2所得的结果则发现,对于样本1及样本2,本文方法所得结果的精度相比基于参数取值范围1所得结果的精度有较大提升,而传统RSM法所得结果的精度没有明显提升。对于样本3,由于 x_2 的真实值落于参数取值范围之外,当 $x_2 = -0.05$ 时便结束了对最优解的搜索。很明显,此时所得结果为不合理结果,应适当调整相应参数取值范围并重新计算。

4 结论

基于结构响应面的参数识别方法的核心在于如何获得形式简单且精度更高的响应面模型,因此,本文研究了基于HDMR响应面的结构参数识别方法。以一个三跨连续梁及一座独塔斜拉桥为算例进行分析,比较了该方法与传统RSM法的计算效率及计算精度,并讨论了用于构造响应面函数的不同参数取值范围对参数识别结果的影响,得到以下结论:

(1) 采用全因子试验设计并当 $n > 3$ 时,本文方法的计算效率较传统RSM法更高。

(2) 取相同参数取值范围及相同因子水平数时,本文方法的计算精度相较传统RSM法更高。

(3) 采用本文方法计算时,在同一取值范围内若增加因子水平数可提高计算精度,但同时也降低了计算效率。

(4) 不同的参数取值范围会得到不同的参数识别结果,选取较大的参数取值范围可避免获得不合理结果,若适当缩小参数取值范围并采用本文方法计算通常可获更精确的结果。

参考文献:

[1] 向中富. 桥梁施工控制技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
XIANG Zhongfu. Construction control techniques of bridge [M]. Beijing: China Communications Press, 2001.

[2] Guo Q T, Zhang L M. Finite element model updating based on response surface methodology [C]//Proceedings of the 22th International Modal Analysis Conference. Dearborn: Transportation Technology Publications, 2004: 536-543.

[3] Box G E P, Wilson K B. On the experimental attainment optimum conditions [J]. Journal of the Royal Statistical

Society, Series B, 1951(13): 1.

[4] Wong F S. Slope reliability and response surface method [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111(1): 32.

[5] Faravelli L. Response-surface approach for reliability analysis [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1989, 115(12): 2763.

[6] Bucher C G, Bourgund U. A fast and efficient response surface approach for structural reliability problems [J]. Structural Safety, 1990, 7(1): 57.

[7] 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.
DENG Miaoyi, REN Weixin, WANG Fuming. Structure finite element model (FEM) updating based on static load response surface methodology [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2008, 23(2): 103.

[8] 周林仁, 欧进萍. 大跨桥梁参数识别响应面法中的近似函数及样本选取[J]. 计算力学学报, 2012, 29(3): 306.
ZHOU Linren, OU Jinping. Study on approximate functions and sample selection of response surface method for parameters identification of long-span bridges [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2012, 29(3): 306.

[9] 邓苗毅, 任伟新. 基于响应面法的结构有限元模型修正研究进展[J]. 铁道科学与工程学报, 2008, 5(3): 42.
DENG Miaoyi, REN Weixin. Study on structure finite element model updating based on response surface methodology [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2008, 5(3): 42.

[10] Gavin H P, Yau S C. High order limit state functions in the response surface method for structural reliability analysis [J]. Structural Safety, 2008, 30: 162.

[11] Rabitz H, Alis O F. General foundations of high dimensional model representations [J]. Journal of Mathematical Chemistry, 1999, 25: 197.

[12] Zhao Z L, Chen Z, Chen S Y. Correlations for the ignition delay of hydrogen/air mixtures [J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(2): 215.

[13] Xu H, Rahman S. Decomposition methods for structural reliability analysis [J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2005, 20: 239.

[14] Chowdhury R, Rao B N, Meher P A. High dimensional model representation for reliability analysis [J]. Communication in Numerical Method in Engineering, 2009, 25: 301.

[15] Li Gengyuan, Wang Shengwei, Rosenthal C, et al. High dimensional model representations generated from low dimensional data samples. I. mp-Cut-HDMR [J]. Journal of Mathematical Chemistry, 2001, 30(1): 1.

[16] Lancaster P, Salkauskas K. Surfaces generated by moving least squares methods [J]. Mathematics of Computation, 1981, 37(155): 141.

[17] Belytschko T, Krongauz Y, Organ D. Meshless methods: an overview and recent developments [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1996, 139: 3.

[18] Cheng J, Li Q S. Application of the response surface methods to solve inverse reliability problems with implicit response functions [J]. Computer Mechanics, 2009, 43: 451.

[19] GUAN Hua, CHEN Dewei. Stochastic analysis of prestressed concrete cable-stayed bridges considering construction errors [C]//Proceedings of the 2011 International Conference on Civil Engineering and Building Materials. Kunming: Transportation Technology Publications, 2011: 1023-1028.