

文章编号: 1000-4750(2013)04-0068-05

考虑交叉项的自适应响应面法

范文亮^{1,2}, 张春涛¹, 李正良^{1,2}, 韩 枫¹

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 2. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室(重庆大学), 重庆 400045)

摘 要:“精度”和“效率”是近似方法的重要评价指标。传统的二次多项式响应面法, 无论是不含交叉项的二次多项式还是完全二次多项式均不能兼顾“效率”和“精度”。为此, 该文中提出了一类可在两者之间达到较好平衡的自适应响应面法。一方面, 为确保响应面形式更具合理性, 通过严格的数学推导给出了极限状态曲面中交叉项是否存在的判断准则, 将该准则与完全二次多项式相结合即可确定合理的、自适应的响应面形式; 另一方面, 针对该判断准则, 构造了与之对应的实现算法, 并结合可靠度问题的特点, 将算法进一步完善; 为克服此算法选点中心位于均值点的特性, 引入了样本点选取的迭代方案对其改进。最后, 该文中通过一个数学算例和一个工程算例分别对建议方法及算法进行验证, 结果表明: 1) 交叉项存在的判断准则准确、有效; 2) 对于较为简单的二次极限状态曲面, 建议方法可以真实还原; 3) 对于涉及一般极限状态曲面的可靠度问题, 建议方法具有颇为理想的精度和较高的效率。

关键词: 结构可靠度; 自适应响应面法; 二次多项式; 交叉项; 选点方案

中图分类号: TB114.3; O302 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2011.10.0697

AN ADAPTIVE RESPONSE SURFACE METHOD WITH CROSS TERMS

FAN Wen-liang^{1,2}, ZHANG Chun-tao¹, LI Zheng-liang^{1,2}, HAN Feng¹

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

2. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area (Chongqing University), Ministry of Education, Chongqing 400045, China)

Abstract: Accuracy and efficiency are important evaluation indexes of the approximate method. However, both accuracy and efficiency could not be considered at the same time using the traditional quadratic response surface method with cross terms or not. In order to overcome this problem, an adaptive response surface method is proposed as an equilibrium point between the accuracy and efficiency. On the one hand, in order to ensure the reasonability of the format of response surface, a criterion for judging the existence of cross terms is derived mathematically in the present work. By combing this criterion with quadratic polynomial of all possible terms via an indicative function, an adaptive response surface is proposed, which is more rational than traditional response surface. On the other hand, an implementation algorithm for judging criterion is induced and then improved by increasing experimental points according to the characters of reliability case. Then, an iterative scheme for selecting points is introduced to improve the precision. Finally, the proposed method is verified by a mathematical example and an engineering example. It is can be found from the results that: 1) The criterion is accurate and effective; 2) The proposed response surface can reproduce the limit state surface if it is a quadratic polynomial; 3) The proposed method is of fair accuracy and high efficiency for reliability analysis.

收稿日期: 2011-10-20; 修改日期: 2012-03-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(50908243); 重庆市自然科学基金项目(CSTC, 2009BB4191); “十一五”国家重大专项水体污染控制与治理课题项目(2008zx71315-001)

通讯作者: 范文亮(1979—), 男, 江西人, 讲师, 博士, 从事结构工程、随机系统分析和可靠度分析方面的研究(E-mail: davidfwl@126.com).

作者简介: 张春涛(1983—), 男, 四川人, 博士生, 从事结构工程、疲劳损伤和可靠度分析方面的研究(E-mail: zhangchuntao1@126.com);

李正良(1963—), 男, 江苏人, 教授, 博士, 博导, 从事结构工程和工程力学方面的研究(E-mail: lizhengli@hotmail.com);

韩 枫(1977—), 男, 重庆人, 博士生, 从事结构工程和可靠度分析方面的研究(E-mail: fenghan102@qq.com).

Key words: structural reliability; adaptive response surface method; quadratic polynomial; cross terms; scheme for selecting points

可靠度是结构设计的基础^[1], 它描述了结构在规定时间内和规定条件下完成预定功能的概率^[2], 可表达为数学上的高维概率积分。高维数值积分理论上并不困难, 但其计算点数量随着维数增加而急剧增长。由于每一个计算点对应着一次功能函数的计算, 若功能函数可显式表达, 数值积分法简便可行; 若功能函数为隐式函数, 直接积分显然不方便。遗憾的是, 实际结构的可靠度绝大多数属于后者。为此, 研究者提出了许多近似方法, 主要包括近似概率法(包括一次二阶矩法等)^[2]、Monte Carlo 法及其方差缩减技术^[3]、随机有限元法^[4]和响应面法^[5]等。其中, 响应面法由于原理简单、易于实现, 获得了广泛的关注。

响应面法的基本思想是采用显式的简单函数 $\bar{g}(\mathbf{X})$ (一般取为多项式) 代替隐式的结构功能函数 $g(\mathbf{X})$ 进行可靠度分析, 换言之, 利用少数样本点拟合出一个简单响应面近似真实的极限状态曲面^[5-9]。显然, 响应面的形式以及样本点的选取是响应面法的关键。二次多项式是目前最为常用的响应面形式, 虽然早在 1951 年 Box 和 Wilson 提出响应面法的时候采用了含有交叉项的二次多项式^[10], 但因含交叉项的二次多项式系数多, 需要的抽样点多, 相应的计算效率低, 致使目前应用最为广泛的还是不包括交叉项的二次多项式, 即:

$$\bar{g}(\mathbf{X}) = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^n a_{ii} x_i^2 \quad (1)$$

式中: $x_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为随机变量; a_0 、 a_i 和 a_{ii} ($i=1, 2, \dots, n$) 为待定参数, 共 $2n+1$ 个。许多学者以式(1)为基础对响应面法展开了研究, 而这些研究的主要区别在于样本点的选取方案不同。试验设计方法自然地用于响应面中的样本点选取^[4], 不难发现, 试验设计法通常将选点中心取为均值点, 因此响应面在均值点附近的精度明显高于远离均值点区域的精度, 然而结构的失效域恰好位于此精度不高的区域。为减小此类选点引起的误差, Bucher 和 Bourgund 提出了迭代改进的思想, 即首先由前述方法确定初始响应面并给出验算点, 然后以验算点构造设计中心重新选点, 由于验算点较均值点更接近极限状态曲面, 精度得到明显改善^[5], 因此, 此方法得到了广泛的关注和应用。Guan 和 Melchers 探

讨了 Bucher 和 Bourgund 方法中选点参数对结果的影响^[11]。Liu 和 Moses 对 Bucher 和 Bourgund 方法做了进一步改进, 将二次迭代发展为多次迭代^[12]。

不含交叉项的响应面法由于待定系数较少, 只需较少的结构分析即可, 应用较为方便。然而, 不含交叉项的计算结果精度低, 同时不含交叉项亦意味着各轴之间并未被充分覆盖^[5], 这对于随机变量存在相互影响的情形(比如强非线性情形、荷载和结构参数均为随机变量的情形等)显然是不合理的。Wong 构造了仅含线性项和二次交叉项的响应面并将其用于边坡稳定的可靠度分析^[13], 但应用最为广泛的含交叉项的响应面是形如式(2)所示的完全二次多项式, 即:

$$\bar{g}(\mathbf{X}) = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j \geq i}^n a_{ij} x_i x_j \quad (2)$$

式中, a_0 、 a_i 和 a_{ij} 为待定参数, 共 $0.5n^2+1.5n+1$ 个。Faravelli^[14]、Rajashekher 和 Ellingwood^[15]均基于上式展开了响应面法的研究, 只不过前者采用了两水准因子设计确定样本点, 并引入了误差修正项; 而后者是对 Bucher 和 Bourgund 方法的改进, 主要体现在两方面: 引入交叉项和迭代选点, 其中迭代思想与 Liu 和 Moses 的思路基本一致。直接采用完全多项式虽然计算精度高, 可以更好地逼近真实的极限状态曲面, 但计算量和计算难度也相应增加。为此, 考虑部分交叉项的二次响应面应运而生。Zheng 和 Das 提出了逐步修改响应面的思想, 即在线性响应面的基础上根据效果逐步添加纯二次项和交叉项^[16]。Yu 等认为 Zheng 和 Das 的算法中把所有变量的二次项或交叉项整体引入不太合理, 于是对其进行了改进, 提出了有选择地逐步引入不同变量的二次项和交叉项的逐步响应面法^[17], 虽然提高了计算精度, 更具有合理性, 但亦提高了计算难度, 降低了计算效率, 实现起来更为复杂。

为此, 本文综合考虑精度和效率给出了响应面中交叉项是否存在的判断准则, 并构造了相应的算法, 从而可以确定较为合理的含交叉项的二次响应面形式。将其与已有的选点方法(文中采用 Bucher 和 Bourgund 提出的迭代选点方案)相结合, 即可得到确定的、合理的响应面, 可在含有交叉项的二次多项式和不含交叉项的二次多项式之间寻找到一

个较好的平衡点, 并方便地用于可靠度分析。

1 交叉项的判断准则

显然, 式(2)可以以 x_i 为基本变量改写为:

$$\bar{g}(\mathbf{X}) = \left(a_0 + \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq i}}^n a_l x_l + \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq i}}^n \sum_{\substack{m \geq l \\ m \neq i}}^n a_{lm} x_l x_m \right) + \left(a_i + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n a_{ik} x_k \right) x_i + a_{ii} x_i^2 \quad (3)$$

为简便, 若记:

$$f_0(x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n) = a_0 + \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq i}}^n a_l x_l + \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq i}}^n \sum_{\substack{m \geq l \\ m \neq i}}^n a_{lm} x_l x_m \quad (4a)$$

$$f_1(x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n) = a_i + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n a_{ik} x_k \quad (4b)$$

显然, $f_0(x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n)$ 为包含 $n-1$ 个变量的二次多项式(简记为 f_0), $f_1(x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n)$ 为包含 $n-1$ 个变量的一次多项式(简记为 f_1)。于是, 式(3)可简写为:

$$\bar{g}(\mathbf{X}) = f_0 + f_1 x_i + a_{ii} x_i^2 \quad (5)$$

类似地, f_0 和 f_1 又可以 $x_j (j \neq i)$ 为基本变量进行改写, 并分别记为 $\varphi_0(x_j)$ 和 $\varphi_1(x_j)$, 显然两者均为多项式且系数仅包含 $n-2$ 个变量, 若这 $n-2$ 个变量均取为常数, 则 $\varphi_0(x_j)$ 和 $\varphi_1(x_j)$ 仅为 x_j 的一元多项式。据此, 式(5)可进一步改写为:

$$g(\mathbf{X}) = \varphi_0(x_j) + \varphi_1(x_j) x_i + a_{ii} x_i^2 \quad (6)$$

为判别响应面中是否存在 x_i 和 x_j 的交叉项, 首先令 $x_l (l \neq i, j)$ 为已知量, 然后对 x_j 取两个不同的值 $x_j^{(1)}$ 和 $x_j^{(2)}$, 将其代入式(6)并计算响应面函数的差值, 可得:

$$\Delta \bar{g} = [\varphi_0(x_j^{(2)}) - \varphi_0(x_j^{(1)})] + [\varphi_1(x_j^{(2)}) - \varphi_1(x_j^{(1)})] \cdot x_i \quad (7)$$

若式(7)中再取 x_i 分别为 $x_i^{(1)}$ 和 $x_i^{(2)}$, 并再对式(7)取差值, 可有:

$$\Delta(\Delta \bar{g}) = [\varphi_1(x_j^{(2)}) - \varphi_1(x_j^{(1)})] \cdot (x_i^{(2)} - x_i^{(1)}) \quad (8)$$

显然,

$$\begin{aligned} \Delta(\Delta \bar{g}) = 0 &\Leftrightarrow [\varphi_1(x_j^{(2)}) - \varphi_1(x_j^{(1)})] = 0 \\ &\Leftrightarrow \left(a_i + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i, j}}^n a_{ik} x_k + a_{ij} x_j^{(2)} \right) - \end{aligned}$$

$$\left(a_i + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i, j}}^n a_{ik} x_k + a_{ij} x_j^{(1)} \right) = 0$$

$$\Leftrightarrow a_{ij} (x_j^{(2)} - x_j^{(1)}) = 0 \Leftrightarrow a_{ij} = 0 \quad (9)$$

不难证明, 对于更高次的 $\bar{g}(\mathbf{X})$, 式(9)的结论仍然成立。考虑到一般函数均可由 Taylor 公式展开为多项式的形式, 因此, 式(9)的结论对于一般的极限状态曲面亦是有效的。于是, 式(9)即为判断极限状态曲面中是否存在交叉项的准则。

2 自适应响应面法及其实现

在式(2)的基础上引入交叉项的判断准则, 可以获得自适应响应面的表达式如下:

$$\bar{g}(\mathbf{X}) = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^n a_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j>i}^n a_{ij} I[x_i x_j] x_i x_j \quad (10)$$

式中, $I[x_i x_j]$ 为 $x_i x_j$ 的示性函数, 即:

$$I[x_i x_j] = \begin{cases} 1, & x_i x_j \text{ 存在} \\ 0, & x_i x_j \text{ 不存在} \end{cases} \quad (11)$$

根据交叉项的判断准则, 可给出自适应响应面法的实现步骤如下:

1) 若 $X_i \sim N(\mu_i, \sigma_i)$, 分别取 $x_i = \mu_i$ 和 $x_i = \mu_i + k\sigma_i$ (k 为给定常数), 其余变量均取均值; 若 X_i 为非正态变量, 则 x_i 可取与上述取值具有相同超越概率的值。对 $i=1, \dots, n$ 重复上述步骤可给出 $n+1$ 个样本点。

2) 取 $x_i = \mu_i + k\sigma_i (i=1, \dots, n)$ 和 $x_j = \mu_j + k\sigma_j (j>i)$, 其余 $n-2$ 个变量取均值, 共确定 $(n^2-n)/2$ 个样本点。

3) 根据上述样本点计算每组随机变量的对应函数值, 对任意两随机变量可得到 $\Delta g = g(x_1, \dots, x_i + k\sigma_i, \dots, x_n) - g(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n)$ 和 $\Delta g = g(x_1, \dots, x_i + k\sigma_i, \dots, x_j + k\sigma_j, \dots, x_n) - g(x_1, \dots, x_i, \dots, x_j + k\sigma_j, \dots, x_n)$ 。根据交叉项的判断准则, 若两差值不等, 则变量 x_i 和 x_j 之间存在相互影响, 多项式中含有交叉项 $x_i x_j$, 即式(11)中 $I[x_i x_j] = 1$; 若两差值相等, 则多项式中不存在交叉项 $x_i x_j$, 式(11)中 $I[x_i x_j] = 0$ 。

4) 理论上步骤 1)~步骤 2) 选取的样本点即可确定包含交叉项的响应面的合理形式, 但是由于预先并不能确定极限状态曲面位于均值点的哪一侧, 为此可再增加 n 个样本点, 即 $x_i = \mu_i - k\sigma_i$, 其余变量取均值。只要 k 选择合理, 可保证极限状态曲面穿过样本点区域, 从而具有较高的精度, 参考文献[5]的研究, 可取 $k=3$ 。

5) 利用上述样本点可方便的拟合出自适应响

应面。为改善以均值点为中心选点的不足，文中亦借鉴 Bucher 和 Bourgund 的迭代改进思想，即先由上述响应面确定验算点 X^* ，再由下式确定新的选点中心 X_M ：

$$X_M = \mu + (X^* - \mu) \frac{G(\mu)}{G(\mu) - G(X^*)} \quad (12)$$

式中， μ 代表均值点。然后，以 X_M 为中心，类似于步骤 1) 和步骤 4) 可确定新的 $2n$ 个样本点。

6) 根据上述样本点可给出最终的响应面，最后可对此响应面利用 Monte Carlo 法等计算可靠度。

将上述方案与文献[5]比较可知，文中建议方法仅多了判别交叉项是否存在的 $(n^2-n)/2$ 个样本点，即每个交叉项仅需增加一个样本点即可。若由问题的定性分析可预先判断某些变量的交叉项的存在性，那么增加的样本点可有所减少。

3 算例分析

算例 1. 假设功能函数具有如下形式：

$$g(x) = 10 + x_2 - x_1^2 + x_1x_3 - x_2x_3 \quad (13)$$

式中， x_1 、 x_2 和 x_3 为相互独立的标准正态随机变量，计算 $g(x) \geq 0$ 的可靠度。

根据建议算法，首先步骤 1)~步骤 2) 可选取 7 个样本点，由此可判断各交叉项的存在性，从而确定自适应响应面的形式，详细过程示于表 1。取样本点 $P_2(3,0,0)$ ，相对初始迭代点 $P_1(0,0,0)$ ， x_1 增值为 3，函数相应差值为 9；再取样本点 $P_4(3,3,0)$ ，相对于样本点 $P_3(0,3,0)$ ， x_2 和 x_3 均固定不变， x_1 增值为 3，但函数差值仍为 9。可见两次计算函数差值均未发生变化，由步骤 3) 可知 $I[x_i, x_j]=0$ ，多项式中不存在交叉项 x_1x_2 。同理，根据步骤 3) 可判断多项式中含有交叉项 x_1x_3 和 x_2x_3 ，与式(13)吻合，验证了判别准则的正确性。

再结合步骤 4) 选取的 3 个样本点 $(-3,0,0)$ 、 $(0,-3,0)$ 和 $(0,0,-3)$ ，利用回归分析可确定初始响应面，同时由 JC 法给出其验算点 X^* 的坐标为 $(2.279, -0.881, -1.242)$ 。然后，根据步骤 5) 可确定新的选点中心和其它 6 个新的样本点。综合利用上述样本点进行回归分析，可确定最终的自适应响应面为 $\bar{g}(x) = 10 + x_2 - x_1^2 + x_1x_3 - x_2x_3$ ，与式(13)完全相同，表明建议算法对于二次的极限状态曲面是精确的，即使极限状态曲面包含交叉项亦如此。最后，利用 Monte Carlo 法(抽样数为 1×10^5 ，下同)可计算出失效概率为 0.50%。

表 1 自适应响应面形式的确定过程

Table 1 The format of adaptive response surface

样本点		函数值	差值
x_1	$P_1(0,0,0), P_2(3,0,0)$	$g_1=10, g_2=1$	$g_2-g_1=-9$
x_2	$P_3(0,3,0), P_4(3,3,0)$	$g_3=13, g_4=4$	$g_4-g_3=-9$
x_1	$P_1(0,0,0), P_2(3,0,0)$	$g_1=10, g_2=1$	$g_2-g_1=-9$
x_3	$P_5(0,0,3), P_6(3,0,3)$	$g_5=10, g_6=10$	$g_6-g_5=0$
x_2	$P_1(0,0,0), P_3(0,3,0)$	$g_1=10, g_3=13$	$g_3-g_1=3$
x_3	$P_5(0,0,3), P_7(0,3,3)$	$g_5=10, g_7=4$	$g_7-g_5=-6$
结论 仅含有交叉项 x_1x_3 和 x_2x_3 ，响应面形式为： $a_0+a_1x_1+a_2x_2+a_3x_3+a_{11}x_1^2+a_{22}x_2^2+a_{33}x_3^2+a_{13}x_1x_3+a_{23}x_2x_3$			

算例 2. 桁架结构可靠度分析：分析图 1 所示桁架结构跨中位移不超过 10cm 的可靠度。其中，仅考虑荷载和弹性模量共 4 个相互独立的正态随机变量，即 $E \sim N(2.1 \times 10^4, 2.1 \times 10^3) \text{ kN/cm}^2$ ， $p_1 \sim N(50, 7.5) \text{ kN}$ ， p_2 和 p_3 与 p_1 同。另外，杆件横截面视为确定性变量，取值为 20 cm^2 。

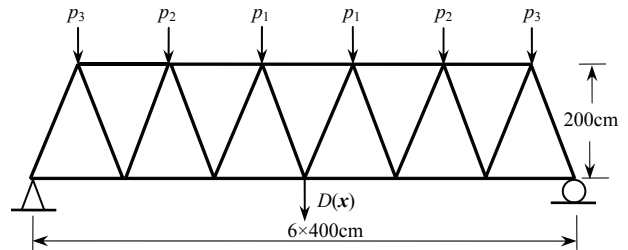


图 1 桁架结构示意图

Fig.1 Truss-type girder

易知，该可靠度问题的功能函数可表示为：

$$g(x) = 10 - D(x) \quad (14)$$

式中， $D(x)$ 表示跨中位移， $x=(E, p_1, p_2, p_3)$ 表示基本随机变量。显然， $D(x)$ 为隐式函数，从而 $g(x)$ 亦为隐式函数，可用自适应响应面法求解其可靠度。

除由样本点计算功能函数值时需采用结构分析外，此算例的计算过程与算例 1 基本相同，因此，文中不再详细论述其过程，只给出部分结果如下：

1) 由交叉项判断准则可知，此响应面中仅包含 Ep_1 、 Ep_2 和 Ep_3 共 3 个交叉项。

2) 初始响应面为：

$$\begin{aligned} \bar{g}(x) = & -0.2567 + 8.64 \times 10^{-4} E - 0.13 p_1 - \\ & 9.14 \times 10^{-2} p_2 - 3.27 \times 10^{-2} p_3 - \\ & 1.79 \times 10^{-8} E^2 - 4.94 \times 10^{-8} p_1^2 - \\ & 9.88 \times 10^{-8} p_2^2 - 4.94 \times 10^{-8} p_3^2 + \\ & 2.69 \times 10^{-6} Ep_1 + 1.89 \times 10^{-6} Ep_2 + \\ & 6.78 \times 10^{-7} Ep_3 \end{aligned} \quad (15)$$

利用 Monte Carlo 法可计算出失效概率为 1.09%。

3) 最终响应面为：

$$\begin{aligned} \bar{g}(\mathbf{x}) = & -1.988 + 1.14 \times 10^{-4} E - 0.146 p_1 - 0.106 p_2 - \\ & 4.38 \times 10^{-2} p_3 - 2.90 \times 10^{-8} E^2 - 1.24 \times 10^{-4} p_1^2 - \\ & 1.26 \times 10^{-4} p_2^2 - 1.30 \times 10^{-4} p_3^2 + 4.10 \times 10^{-6} E p_1 + \\ & 3.25 \times 10^{-6} E p_2 + 1.87 \times 10^{-6} E p_3 \end{aligned} \quad (16)$$

与之对应的失效概率为 1.13%。

同时,利用 ANSYS 软件的 Monte Carlo 法计算出失效概率为 1.16%,与最终响应面的失效概率仅相差 2.59%。但是采用传统的不含交叉项的响应面法,根据 Bucher 选点方案,通过两次迭代得到的响应面为:

$$\begin{aligned} \bar{g}(\mathbf{x}) = & -5.7783 + 1.127 \times 10^{-3} E - 0.0734 p_1 - \\ & 0.0517 p_2 - 0.0185 p_3 - 1.789 \times 10^{-8} E^2 - \\ & 9.877 \times 10^{-8} p_2^2 \end{aligned} \quad (17)$$

对应的失效概率为 0.86%,与利用 ANSYS 计算出的失效概率却相差 25.86%。可见建议算法具有很高的精度,验证了建议方法的有效性。

此外,将建议算法得到的初始响应面和最终响应面计算出的失效概率与 Monte Carlo 模拟结果比较可知,迭代改进效果比较显著。

4 结论

针对传统响应面法确定响应面形式的经验性,在综合考虑精度和效率的情况下,本文通过严格的数学推演,给出了判断极限状态曲面中交叉项是否存在的准则,并将之与响应面法相结合,获得了可自动选取交叉项的自适应响应面法。由于充分考虑了各随机变量之间的物理联系,更具有合理性。在此基础上,构造了相应的实现算法。为改进计算精度,文中亦引入了迭代改进的思想,从而在精度和效率之间寻找到了一个较好的平衡点。最后,利用建议的响应面法分别对两个算例进行了分析,结果表明:对于二次多项式的极限状态曲面,建议方法可以真实重构,由此而获得精确解;对于一般的工程问题,建议方法在增加少量样本点的基础上获得理想的精度,验证了建议方法的适用性和有效性。

参考文献:

[1] GB 50068-2001, 建筑结构可靠度设计统一标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
GB 50068-2001, Unified standard for reliability design of building structures [S]. Beijing: Chinese Building Industry Press, 2001. (in Chinese)

[2] 赵国藩. 工程结构可靠度[M]. 北京: 水利出版社, 1984: 42—68.
Zhao Guofan. Reliability for engineering structures [M]. Beijing: Hydraulic Press, 1984: 42—68. (in Chinese)

[3] Rubinstein R Y, Kroese D P. Simulation and the monte carlo method [M]. New York: John Wiley & Sons, 2008: 167—199.

[4] Haldar A, Mahadevan S. Reliability assessment using stochastic finite element analysis [M]. New York: John Wiley & Sons, 2000: 197—262.

[5] Bucher C G, Bourgund U. A fast and efficient response surface approach for structural reliability problems [J]. Structural Safety, 1990, 7: 57—66.

[6] Kim S H, Na S W. Response surface method using vector projected sampling points [J]. Structural Safety, 1997, 19(1): 3—19.

[7] Myers R H, Montgomery D C. Response surface methodology [M]. New York: John Wiley and Sons, 1995: 12—29.

[8] Rackwitz R. Reliability analysis - a review and some perspectives [J]. Structural Safety, 2001, 23: 365—395.

[9] Bucher C G, Most T. A comparison of approximate response function in structural reliability analysis [J]. Structural Safety, 2008, 23: 154—163.

[10] Box G E P, Wilson K B. On the experimental attainment of optimum conditions [J]. Journal of the Royal Statistical Society, Series B (Methodological), 1951, 13(1): 1—45.

[11] Guan X L, Melchers R E. Effect of response surface parameter variation on structural reliability estimates [J]. Structural Safety, 2001, 23: 429—444.

[12] Liu Y W, Moses F. A sequential response surface method and its application in the reliability analysis of aircraft structural systems [J]. Structural Safety, 1994, 16: 39—46.

[13] Wong F S. Uncertainties in dynamic soil-structure interaction [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1984, 110(2): 308—324.

[14] Faravelli A. Response surface approach for reliability analysis [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1989, 115(12): 2763—2781.

[15] Rajashekher M R, Ellingwood B R. A new look at the response surface approach for reliability analysis [J]. Structural Safety, 1993, 12: 205—220.

[16] Zheng Y, Das P K. Improved response surface method and its application to stiffened plate reliability analysis [J]. Engineering Structures, 2000, 22: 544—551.

[17] Yu L, Das P K, Zheng Y. Stepwise response surface method and its application in reliability analysis of ship hull structure [J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2002, 124(4): 266—270.