

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20230715001

# 基于随机响应面法的非侵入式随机有限元方法 实现与应用\*

管性钰, 欧尔峰, 张旭旭, 刘益坤

(兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:** 随着可靠度理论的进一步发展, 如何求解隐式功能函数下的结构可靠度成为难题, 非侵入式随机有限元法是目前解决此难题的重要手段。为此发展了基于随机响应面法的非侵入式随机有限元方法。利用MATLAB和ANSYS联合仿真, 编制了该方法的计算程序。程序通过ANSYS软件进行确定性力学分析, 能够使用MATLAB自动调用ANSYS在不同参数配点下连续求解输出响应结果, 并读取结果计算随机多项式待定系数。此方法通过有限元软件得到结构输出结果, 无须分析功能函数, 这为复杂结构下的可靠度计算提供了有效的手段。通过3个算例验证了该方法在结构可靠度分析中的有效性。结果表明: 随机响应面法(SRSM)与基于随机响应面法的非侵入式随机有限元方法在计算结构失效概率时误差较小, 计算效率远高于蒙特卡洛法(MCS), 在求解无显示功能函数下的失效概率时具有明显优势。

**关键词:** 随机响应面法(SRSM); 非侵入式随机有限元法; 失效概率; 可靠度

**中图分类号:** TU391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)01-0233-07

## Implementation and Application of Non-Intrusive Stochastic Finite Element Method Based on Stochastic Response Surface Method

GUAN Xingyu, OU Erfeng, ZHANG Xuxu, LIU Yikun

(School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** With the continued development of reliability theory, solving the structural reliability under implicit performance functions has become a challenge. Currently, the non-intrusive stochastic finite element method is an important approach to address this issue. This paper develops a non-intrusive stochastic finite element method based on the stochastic response surface method. Using MATLAB and ANSYS for coupled simulation, a computational program for this method was developed. The program performed deterministic mechanical analysis through ANSYS, and it could automatically invoke ANSYS in MATLAB to continuously solve output response results under different parameter configurations. It could read the results to calculate the unknown coefficients of the random polynomials. This method obtained structural output results through finite element software without the need to analyze the performance functions, providing an effective approach for reliability calculation in complex struc-

\* 收稿日期: 2023-07-15; 修回日期: 2024-01-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(52168058)资助

作者简介: 管性钰(1999—), 男, 硕士研究生。主要从事结构可靠度方面的研究。E-mail: 1826982979@qq.com

通信作者: 欧尔峰(1979—), 男, 副教授, 博士。主要从事隧道抗震方面的研究。E-mail: ouerf@163.com

tures. The effectiveness of this method in structural reliability analysis was verified through three examples. The results showed that both the stochastic response surface method and the non-intrusive stochastic finite element method based on the stochastic response surface method exhibited small errors when calculating structural failure probability and had significantly higher computational efficiency compared to the Monte Carlo method. It demonstrates clear advantages in solving failure probability without explicit performance functions.

**Keywords:** stochastic response surface method; non-intrusive stochastic finite element method; failure probability; reliability

## 0 引言

结构可靠度是重大结构安全评估中不可或缺的分析手段<sup>[1]</sup>。结构可靠度指结构在规定时间内及一定条件下,完成预定功能的概率<sup>[2]</sup>。随着可靠度理论在不同领域的深入发展,结构的随机输入量与输出量之间经常不存在明确的解析关系式,结构的功能函数为随机变量的隐式函数<sup>[3]</sup>。传统的可靠度分析方法,例如JC法、映射变换法、蒙特卡洛法(Monte Carlo method)<sup>[4]</sup>等难以求解隐式功能函数下的结构可靠度。近年来提出的响应面法(Response Surface method)和随机响应面法(Stochastic Response Surface method)被认为是解决此类问题的重要手段。

王成洋等<sup>[5]</sup>考虑土体参数以及支护力的随机性,建立了挡土墙的多失效模式可靠度模型,并用响应面法求解了可靠度。曹净等<sup>[6]</sup>针对土层参数大、小样本信息采用响应面法对基坑支护结构进行了可靠度优化分析。李典庆等<sup>[7]</sup>系统地总结了多种响应面法在不同类型边坡可靠度问题中的应用情况,通过文献分析总结出4类典型土坡可靠度问题。尹平保等<sup>[8]</sup>基于随机响应面法,建立斜坡基桩水平承载可靠性分析的极限状态函数,并利用一次二阶矩法求解可靠度指标和失效概率。K. Kasama等<sup>[9]</sup>采用常规蒙特卡罗模拟和随机响应面法,考察了空间变异性对一个真实三维边坡在 seismic 作用下稳定性的影响。综上所述,响应面法一定程度上能够分析结构在隐式函数下的可靠度,却仍存在实验次数过多,迭代过程中可能发生不收敛等现象;随机响应面法采用 Hermite 随机多项式作为功能函数,不存在收敛性问题,但对于复杂结构计算困难,计算精度无法得到保证。

因此,本文提出了一种基于随机响应面法的非侵入式随机有限元方法,通过有限元软件拟合一个随机

响应面来代替未知的功能函数,两者结合使结构分析的精确度提高,并且克服了响应面不收敛的问题。

## 1 基于随机响应面法的非侵入式随机有限元方法

### 1.1 随机响应面法

随机响应面法起源于 Wiener 对布朗运动的研究<sup>[10]</sup>,由 Isukapalli 在 1998 年研究生物、环境系统问题的不确定性中提出。随机响应面实质上是一种代理模型,它使用 Hermite 正交多项式拟合真实的输出结果,对于服从标准正态分布的随机变量  $\xi$ ,与服从标准正态分布的输出响应量  $u$ ,通常可以表示为以下随机多项式展开式<sup>[11]</sup>:

$$u(\xi) = \alpha_0 + \sum_{i_1=1}^n \alpha_{i_1} \Gamma_1(\xi_{i_1}) + \sum_{i_1=1}^n \sum_{i_2=1}^{i_1} \alpha_{i_1, i_2} \Gamma_2(\xi_{i_1}, \xi_{i_2}) + \sum_{i_1=1}^n \sum_{i_2=1}^{i_1} \sum_{i_3=1}^{i_2} \alpha_{i_1, i_2, i_3} \Gamma_3(\xi_{i_1}, \xi_{i_2}, \xi_{i_3}) + \dots \quad (1)$$

式中,  $\xi = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)$  为标准正态变量的随机向量;  $n$  为标准正态随机变量的个数;  $\alpha_0, \alpha_{i_1}, \alpha_{i_1, i_2}$  等为待定系数;  $\Gamma_n(\xi_{i_1}, \xi_{i_2}, \dots, \xi_{i_n})$  为  $n$  阶 Hermite 多项式,计算公式为<sup>[12]</sup>:

$$\Gamma_n(\xi_{i_1}, \xi_{i_2}, \dots, \xi_{i_n}) = (-1)^n e^{\frac{1}{2}\xi^T \xi} \frac{\partial^n}{\partial \xi_{i_1} \partial \xi_{i_2} \dots \partial \xi_{i_n}} e^{-\frac{1}{2}\xi^T \xi} \quad (2)$$

根据公式(1)可得,输出响应量  $u$  在随机空间自由度为  $M$  时,  $p$  阶 Hermite 随机多项式展开式项数  $N_a$  的计算公式为<sup>[12]</sup>:

$$N_a = \frac{(M+p)!}{M!p!} \quad (3)$$

在式(1)基础上, S. S. Isukapalli 等<sup>[11]</sup>给出了 2 和 3 阶 Hermite 随机多项式展开表达式,本文推导了式(1)在二阶五维下的解析表达式,结果如下:

$$\begin{aligned}
Y(\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4, \xi_5) = & \alpha_0 + \alpha_1 \xi_1 + \alpha_2 \xi_2 + \alpha_3 \xi_3 + \alpha_4 \xi_4 + \\
& \alpha_5 \xi_5 + \alpha_6 (\xi_1^2 - 1) + \alpha_7 (\xi_2^2 - 1) + \alpha_8 (\xi_3^2 - 1) + \\
& \alpha_9 (\xi_4^2 - 1) + \alpha_{10} (\xi_5^2 - 1) + \alpha_{11} \xi_1 \xi_2 + \alpha_{12} \xi_1 \xi_3 + \\
& \alpha_{13} \xi_1 \xi_4 + \alpha_{14} \xi_1 \xi_5 + \alpha_{15} \xi_2 \xi_3 + \alpha_{16} \xi_2 \xi_4 + \alpha_{17} \xi_2 \xi_5 + \\
& \alpha_{18} \xi_3 \xi_4 + \alpha_{19} \xi_3 \xi_5 + \alpha_{20} \xi_4 \xi_5
\end{aligned} \quad (4)$$

求解上述随机多项式,最关键的步骤是通过抽样配点计算待定系数 $\alpha_i$ 。抽样配点的方法主要有概率配点法和拉丁超立方抽样配点法。

概率配点法抽样具有严格的误差证明,能够从低阶拓展到高阶以提高计算精度,极大简化了求解过程<sup>[13]</sup>,但该方法取到变量概率分布的尾部样本点较少,可能因此产生计算误差;拉丁超立方抽样方法具有较好的均匀分布特性,能够保证变量概率分布的尾部具有一定的样本点,但拉丁超立方抽样配点需要进行大量的结构分析,计算效率较低。本文算例将采用计算效率更高的概率配点法选取配点。

### 1.2 概率配点法

$p$ 阶 Hermite 多项式的配点通常由  $p+1$  阶 Hermite 多项式的根组成。例如二阶的配点由三阶 Hermite 多项式  $H_3 = \xi^3 - 3\xi$  的根  $0, \pm 1.732(\sqrt{3})$  组成;三阶的配点由四阶 Hermite 多项式  $H_4 = \xi^4 - 6\xi^2 + 3$  的根  $\pm 0.742, \pm 2.334(\pm\sqrt{3 \pm \sqrt{6}})$  组成。 $p$ 阶情况下可供选取的配点数目为:

$$N_c = (p + 1)^M \quad (5)$$

式中, $M$ 为随机变量的维度。

通常情况下可供选取的配点数远大于待定系数个数。因此选取的配点仅是可供选择的配点  $N_c$  中的一部分。选取配点的原则是:优先选择高概率区域内的配点,而且在选择配点时尽量关于原点对称<sup>[14]</sup>。S. S. Isukapalli 等<sup>[11]</sup>建议配点的数目取为待定系数的2倍才能保证计算结果的精度。所选取的配点均在标准正态空间内,需要映射回原始随机空间后再使用,若随机变量符合正态分布,则可以通过式(6)进行映射。

$$X_{i,j} = \mu_i + \sigma_i \xi_{i,j} \quad (6)$$

其中, $\mu_i, \sigma_i$ 为输入随机变量的均值和标准差; $\xi_{i,j}$ 为配点。将转换后的配点向量带入功能函数,计算得到对应的输出响应量  $u(\xi)$ ,随后通过最小二乘回归方法,便可得到待定系数  $\alpha_i$ 。最终将随机多项式显示表达作为拟合的功能函数,通过蒙特卡洛法求解失效概率  $P_f$ 。

### 1.3 基于随机响应面法的非侵入式随机有限元方法实现

非侵入式随机有限元方法的基本原理是将工程结构分析的有限元法与可靠度的求解方法以“非侵入”的形式相结合<sup>[15]</sup>。

#### 1.3.1 主要思路

通过 MATLAB 编制随机响应面代码,使用 ANSYS 有限元对结构数值模拟。将配点向量作为结构数值模拟的参数值,通过对不同参数配点下的结构连续求解,得到对应的输出响应量  $u(\xi)$ ,最终代入式(1)计算 Hermite 随机多项式待定系数。

#### 1.3.2 运行流程

ANSYS 软件:建立结构模型并提取命令流→根据随机变量参数、配点等信息编写循环代码→编写 \*VREAD、\*VWRITE 语句,读取输入参数并存储输出结果→保存命令流文件为 Command.txt,待 MATLAB 调用。

MATLAB 软件:通过概率配点法选取配点→将配点映射到原始概率空间→写入 shuru.txt 文件→MATLAB 调用 Command.txt 在 ANSYS 中执行→读取 shuchu.txt 文件中的数值→最小二乘回归法计算待定系数→蒙特卡洛法计算可靠度。

MATLAB 语言对 ANSYS 命令流文件 Command.txt 调用语句如下:

```
! "D:\ANSYS\ANSYS Inc\v221\ANSYS\bin\winx64\ansys180.exe" -b -i "C:\Users\www18\Command.txt" -o "C:\Users\www18\process.out";
```

计算程序流程如图 1 所示。

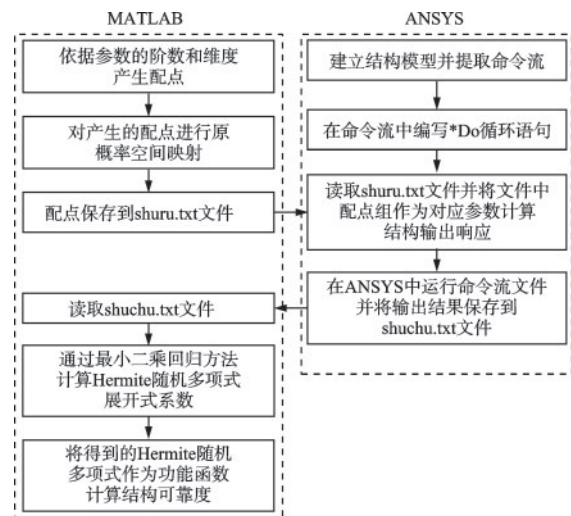


图1 程序运行流程图

Fig.1 Program operation flowchart

## 2 算例应用

### 2.1 轴压短柱承载能力可靠度分析

取截面边长为  $b = 300$  mm 的轴压短柱, 轴压荷载  $P = 1\ 000$  kN, 材料强度  $f_c$  与  $b$  均服从独立标准正态分布, 材料强度均值  $\mu_{f_c} = 22$  N/mm<sup>2</sup>, 标准差  $\sigma_{f_c} = 5$  N/mm<sup>2</sup>, 截面边长均值  $\mu_b = 300$  mm, 标准差  $\sigma_b = 6$  mm。验算短柱承载能力可靠度<sup>[4]</sup>。

轴力形式的功能函数为:

$$Z = b^2 f_c - p \quad (7)$$

二阶随机多项式(9个配点)计算展开式如下:

$$Z = 9.8079 \times 10^5 + 7.95 \times 10^4 \xi_1 + 4.5036 \times 10^5 \xi_2 + 792(\xi_1^2 - 1)^2 - 16611 \times 10^{-10}(\xi_2^2 - 1)^2 + 1.8 \times 10^4 \xi_1 \xi_2 \quad (8)$$

文献[4]采用一次二阶矩法得到的失效概率为 0.016 2; 50 万次蒙特卡洛法得到的失效概率为 0.015 1; 采用二阶随机响应面法得到的失效概率为 0.015 0。由此证明随机响应面法在计算失效概率时可以满足精度要求。

### 2.2 悬臂梁最大位移可靠度分析

图 2 所示为端部受到集中力作用的悬臂梁。该梁允许最大位移设计值为 3.7 mm。梁的长度  $L$ 、端部受集中荷载  $F$ 、截面宽度  $B$ 、截面高度  $H$ 、材料弹性模量  $E$ , 均为服从正态分布的随机变量, 各个参数的均值、标准差见表 1。分析悬臂梁最大位移可靠度。

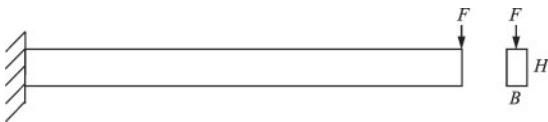


图 2 悬臂梁示意图

Fig.2 Cantilever beam diagram

表 1 变量的统计参数

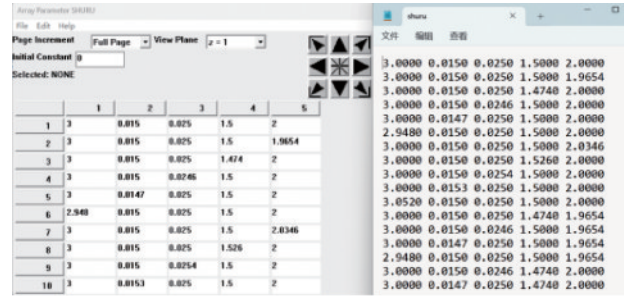
Table 1 Statistical parameters of variables

随机变量	$L/cm$	$B/cm$	$H/cm$	$F/kN$	$E/GPa$
均值 $\mu$	300	1.5	2.5	1.5	200
标准差 $\sigma$	3	0.015	0.025	0.015	2

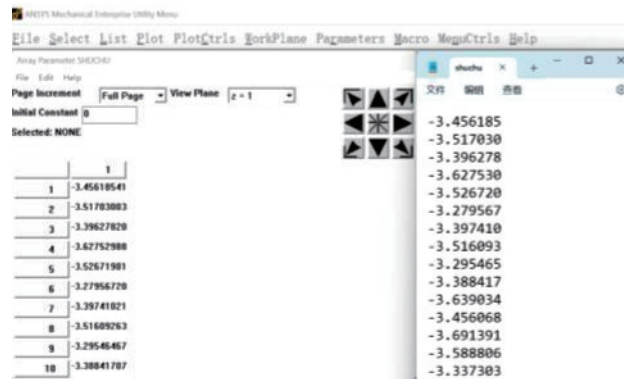
悬臂梁允许最大位移的功能函数为:

$$Z = 3.7 - \frac{4FL^3}{EBH^3} \quad (9)$$

使用二阶(42个配点)的非侵入式随机有限元法计算(简称二阶配点), ANSYS 中的悬臂梁命令流见附录 1, 运行 MATLAB 算法程序生成 42 组对应的参数配点, 随后调用 ANSYS 计算在 42 组不同配点下的悬臂梁最大位移并生成结果文件, 读取结果如图 3 所示。



(a) ANSYS 读取参数配点



(b) ANSYS 存储输出结果

图 3 ANSYS 正确读取参数配点和保存输出结果

Fig.3 Correct parameter configuration reading and output result saving of ANSYS

通过式(4)计算得到拟合的随机响应面为:

$$Z = -3.4598 - 0.1038\xi_1 + 0.0399\xi_2 + 0.0959\xi_3 - 0.0346\xi_4 + 0.0346\xi_5 - 0.0010(\xi_1^2 - 1)^2 - 0.0005(\xi_2^2 - 1)^2 - 0.0017(\xi_3^2 - 1)^2 + 5.1229e^{-6}(\xi_4^2 - 1)^2 - 0.0003(\xi_5^2 - 1)^2 + 0.0012\xi_1\xi_2 + 0.0029\xi_1\xi_3 - 0.0010\xi_1\xi_4 + 0.0010\xi_1\xi_5 - 0.0011\xi_2\xi_3 + 0.0004\xi_2\xi_4 - 0.0004\xi_2\xi_5 + 0.0010\xi_3\xi_4 - 0.0009\xi_3\xi_5 + 0.0003\xi_4\xi_5 \quad (10)$$

三阶配点计算过程同理。二阶、三阶的非侵入式随机有限元方法和蒙特卡洛法的计算结果见表 2。

由表 2 可知, 在二阶、三阶配点情况下与蒙特卡洛法的计算误差分别为 5.87%、6.17%, 满足计算精

表2 悬臂梁最大位移失效概率

Table 2 Failure probability of the maximum displacement of cantilever beam

计算方法	失效概率/%	误差/%
二阶配点	6.41	5.87
三阶配点	7.23	6.17
蒙特卡洛法	6.81	—

注:误差计算公式为  $\frac{|MCS - SRSM|}{MCS} \times 100\%$

度要求。为了更直观表达,图4绘制了相应的概率密度函数曲线。由图4可知,非侵入式随机有限元法与蒙特卡洛法的曲线高度拟合。

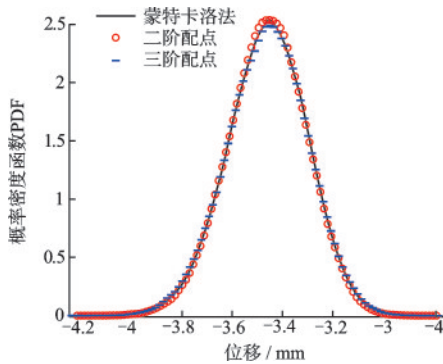


图4 悬臂梁功能函数概率密度函数曲线

Fig.4 Probability density function curves of cantilever beam's performance function

### 2.3 门式刚架水平位移可靠度分析

图5所示的门式刚架结构,各单元的弹性模量均为  $E=2.0 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$ ,结构的截面面积  $A_1, A_2$  和水平荷载  $P$  都是随机变量,其统计参数值见表3。结构的截面惯性矩服从  $I_i = aA_i^2$ 。要求结点C的水平位移小于  $[u]=0.01 \text{ m}$ ,分析结构结点C的水平位移可靠度<sup>[4]</sup>。

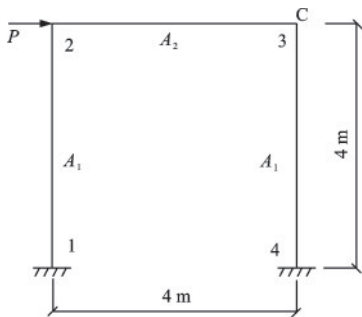


图5 门式刚架

Fig.5 Portal frame

表3 变量的统计参数

Table 3 Statistical parameters of variables

随机变量	均值	标准差	分布	$\alpha$
$A_1/\text{m}^2$	0.36	0.036	对数正态	0.083 33
$A_2/\text{m}^2$	0.18	0.018	对数正态	0.166 70
$P/\text{kN}$	20	5	极值 I 型	—

水平位移  $u_3$  是随机变量  $A_1, A_2, P$  的隐式函数。其极限状态方程可表示为:

$$Z = g(A_1, A_2, P, [u]) = 0.01 - u_3(A_1, A_2, P) \quad (11)$$

采用非侵入式随机有限元法计算得到三阶(40个配点)随机响应面函数为:

$$\begin{aligned} Z_3 = & 0.004 7 - 0.000 6 \xi_1 - 0.000 2 \xi_2 + 0.001 1 \xi_3 + \\ & 2.904 6 (\xi_1^2 - 1)^2 - 1.891 4 \times 10^{-5} (\xi_2^2 - 1)^2 + \\ & 8.583 0 \times 10^{-7} (\xi_3^2 - 1)^2 + 8.384 0 \times 10^{-5} \xi_1 \xi_2 - \\ & 0.000 3 \xi_1 \xi_3 - 0.000 1 \xi_2 \xi_3 - 1.154 2 \times \\ & 10^{-5} (\xi_1^3 - 3 \xi_1) + 3.508 6 \times 10^{-7} (\xi_2^3 - 3 \xi_2) - \\ & 1.036 2 \times 10^{-7} (\xi_3^3 - 3 \xi_3) - 7.303 8 \times \\ & 10^{-6} (\xi_1 \xi_2^2 - \xi_1) - 3.712 1 \times 10^{-6} (\xi_1 \xi_3^2 - \xi_1) + \\ & 9.561 9 \times 10^{-7} (\xi_2 \xi_3^2 - \xi_2) - 9.983 6 \times \\ & 10^{-6} (\xi_2 \xi_1^2 - \xi_2) + 3.693 9 \times 10^{-5} (\xi_3 \xi_1^2 - \xi_3) + \\ & 4.070 3 \times 10^{-6} (\xi_3 \xi_2^2 - \xi_3) \end{aligned} \quad (12)$$

三阶非侵入式随机有限元法和蒙特卡洛法的计算结果和计算时间见表4。

表4 C点的水平位移失效概率

Table 4 Failure probability of horizontal displacement at node C

计算方法	失效概率/%	误差/%	计算时间/s
蒙特卡洛(1e7)	0.002 4	—	125
三阶非侵入	0.002 2	8.33	2.547

注:计算时间为两者在同一环境下 Matlab 得到的计算结果时间

由上表可以看出,三阶非侵入式随机有限元方法与蒙特卡洛方法计算结果相近,但非侵入式随机有限元方法的计算效率提高了48倍,可见非侵入式随机有限元方法在计算效率上具有明显的优势。

为了可视化计算结果,图6绘制了两者的概率分布函数曲线与概率密度函数曲线。由图6亦可知,三阶配点下的非侵入式随机有限元法与蒙特卡洛法曲线基本重合,可见其收敛速度较快,计算精度较高。

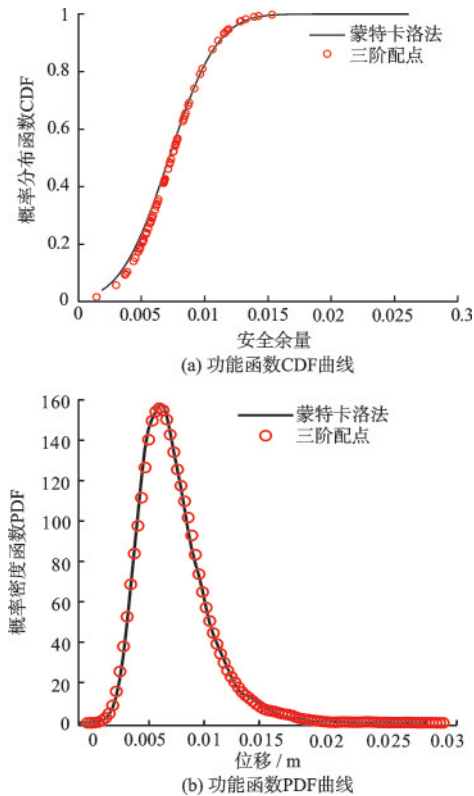


图6 C点水平位移的概率分布曲线和概率密度函数曲线  
Fig.6 Probability distribution and probability density function curves of horizontal displacement at node C

### 3 结 论

通过引入随机响应面法,提出了一种应用于隐式功能函数下分析结构可靠度的方法,该方法以“非侵入”的形式与有限元软件联合,减少了模型的迭代次数,解决了迭代过程中发生不收敛的现象。所得结论如下:

(1) 采用随机响应面法和基于随机响应面法的非侵入式随机有限元方法分析结构可靠度是可行性的。

(2) 编制的非侵入式随机有限元算法,在计算结构可靠度时具有较高的计算精度和计算效率,且程序简单、易于使用。

(3) 本文提出的方法在分析隐式功能函数可靠度时具有明显优势,为复杂结构的可靠度计算提供了高效的方法。

#### 参考文献:

[1] 黄连娣,冯新,周晶.一种基于BP网络和粒子群算法的拱坝可靠度分析方法[J].防灾减灾工程学报,2012,32(3):326-331.

Huang L D, Feng X, Zhou J. Structure reliability analysis of arch dam based on neural network and particle swarm optimization [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2012, 32 (3) : 326-331. (in Chinese)

[2] 建筑结构可靠度设计统一标准:GB 50068—2018 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2018.

[3] 李远瑛,张德生.基于响应面和蒙特卡罗法结构位移可靠度[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2011,30(3):392-395.

Li Y Y, Zhang D S. Reliability of structural displacement based on response surface and Monte Carlo method[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2011, 30(3) : 392-395. (in Chinese)

[4] 张明.结构可靠度分析:方法与程序[M].北京:科学出版社,2009:19-33.

Zhang M. Structural reliability analysis: methods and programs [M]. Beijing: Science Press, 2009: 19-33. (in Chinese)

[5] 王成洋,张佳华,肖超,等.基于响应面法的挡土墙多失效模式可靠度分析[J].铁道科学与工程学报,2020,17(4):882-890.

Wang C Y, Zhang J H, Xiao C, et al. Reliability analysis of multi-failure mode for retaining wall based on response surface method [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(4) : 882-890. (in Chinese)

[6] 曹净,刘甜,桂跃.基于响应面法的基坑支护可靠度优化[J].控制工程,2017,24(9):1811-1817.

Cao J, Liu T, Gui Y. Foundation pit supporting reliability optimization based on the response surface method [J]. Control Engineering of China, 2017, 24 (9) : 1811-1817. (in Chinese)

[7] 李典庆,郑栋,曹子君,等.边坡可靠度分析的响应面方法比较研究[J].武汉大学学报(工学版),2017,50(1):1-17.

Li D Q, Zheng D, Cao Z J, et al. Comparison among response surface methods for slope reliability analysis [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2017, 50 (1) : 1-17. (in Chinese)

[8] 尹平保,王杰,张建仁,等.基于随机响应面法的斜坡基桩水平承载可靠性分析[J].湖南大学学报(自然科学版),2022,49(7):75-82.

Yi P B, Wang J, Zhang J R, et al. Reliability analysis on horizontal bearing of pile foundation in sloping ground based on random response surface method [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2022, 49(7) : 75-82. (in Chinese)

[9] Kasama K, Furukawa Z, Hu L H. Practical reliability analysis for earthquake-induced 3D landslide using stochastic response surface method [J]. Computers and

- Geotechnics, 2021, 137: 104303.
- [10] Wiener N. The homogeneous chaos [J]. American Journal of Mathematics, 1938, 60(4): 897-936.
- [11] Isukapalli S S, Roy A, Georgopoulos P G. Stochastic response surface methods for uncertainty propagation: application to environmental and biological systems[J]. Risk Analysis, 1998, 18(3): 351-363.
- [12] Ghanem R, Spanos P D. Stochastic finite element: a spectral approach[M]. New York: Springer-Verlag, 1991.
- [13] 申林方, 王志良, 常海滨, 等. 基于概率配点法的岩土材料参数随机场及其响应分析[J]. 计算力学学报, 2015, 32(1): 64-69.  
Shen L F, Wang Z L, Chang H B, et al. Probabilistic collocation method for geotechnical stochastic field and response analysis[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2015, 32(1): 64-69. (in Chinese)
- [14] 蒋水华, 李典庆, 周创兵. 随机响应面法最优概率配点数目分析[J]. 计算力学学报, 2012, 29(3): 345-351.  
Jiang S H, Li D Q, Zhou C B. Optimal probabilistic collocation points for stochastic response surface method [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2012, 29(3): 345-351. (in Chinese)
- [15] 李典庆, 蒋水华, 周创兵. 基于非侵入式随机有限元法的地下洞室可靠度分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(1): 123-129.  
Li D Q, Jiang S H, Zhou C B. Reliability analysis of underground rock caverns using non-intrusive stochastic finite element method [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(1): 123-129. (in Chinese)
- (本文编辑: 赵霞)

## 附录 1

!(1)生成临时宏文件、读取配点

```
finish
/clear
/prep7
*Create, dataread, mac
*DIM, shuru, array, 42, 5
*VREAD, shuru(1, 1), shuru, TXT, , JIK, 5, 42
(5F7.4)
*End
Dataread
```

!(2)创建循环语句

```
*DIM, shuchu, array, 42, 1
*do, i, 1, 42
```

!(3)定义单元类型、赋予材料属性

```
et, 1, beam189
mp, ex, 1, shuru(i, 5)*1e11
mp, prxy, 1, 0.3
sectype, 1, beam, rect
secdata, shuru(i, 2), shuru(i, 3)
```

!(4)创建梁单元关键点

```
k, 1, 0, 0, 0
k, 2, 3, 0, 0
k, 3, 1.5, 1.5, 0
l, 1, 2
```

!(5)网格划分

```
latt, 1, , 1, , , 3, 1
lesize, 1, , , 10
lmesh, all
```

!(6)求解器设置

```
/solu
dk, 1, all, 0
fk, 2, fy, -beam(i, 4)*1e3
allsel, all
solve
fdele, all
```

!(7)后处理: 导出位移响应

```
/post1
shuchu(i) = uy(2)
*enddo
*create, datawrite, mac
*cfopen, shuchu, txt
*do, j, 1, 42
*vwrite, shuchu(j, 1)
(f9.6)
*enddo
*cfclose
*end
```