

测试·分析

基于随机有限元法的可靠性分析方法概述

石春明¹, 赵敏敏^{2*}, 韩璇璇¹, 王 勇²

(1. 西北机电工程研究所, 陕西 咸阳 712099; 2. 广州机械科学研究院有限公司, 广东 广州 510700)

摘要: 基于随机有限元法的可靠性分析方法研究现状, 介绍4种常用的随机有限元法: 直接蒙特卡洛法、Taylor展开随机有限元法、摄动随机有限元法和Neumann展开随机有限元法, 重点介绍了5种基于随机有限元法的可靠性分析方法: 应力-强度积分法、功能函数积分法、可靠度指标计算法、随机抽样法和响应面法, 并对可靠性研究需要开展的下一步工作进行了探讨。

关键词: 随机有限元法; 可靠性; 应力-强度积分法; 功能函数积分法; 可靠度指标计算法; 随机抽样法; 响应面法

中图分类号: O241.82

文献标志码: A

文章编号: 1000-890X(2023)04-0305-06

DOI: 10.12136/j.issn.1000-890X.2023.04.0305



OSID开放科学标识码
(扫码与作者交流)

可靠性是衡量产品质量的一个重要指标, 信誉好的厂家都追求其产品的可靠性。有些产品如飞机、核电站等, 如果其关键零部件不可靠, 不仅会给用户带来不便和经济损失, 甚至可能直接危及用户的生命安全^[1-5]。因此, 对产品关键零部件以及整个系统的可靠性进行研究至关重要。近年来, 随着有限元技术的发展, 基于随机有限元法的可靠性分析方法得到人们的广泛重视^[6-9]。

基于随机有限元法的可靠性分析方法研究现状, 本文介绍4种常用的随机有限元法和5种基于随机有限元法的可靠性分析方法, 并对基于随机有限元法的可靠性分析需要开展的下一步工作进行探讨。

1 基于随机有限元法的可靠性研究现状

对于工程结构, 无论是材料本身、所受载荷还是结构尺寸等都存在不确定性, 用确定性有限元法对工程结构进行研究与实际情况不符, 因此在有限元计算中考虑不确定因素已成为必然趋势,

随机有限元法即应运而生。

多年来, 基于随机有限元法的可靠性研究已应用于不同领域。A. K. ONKAR等^[10]在考虑材料性能随机性的前提下, 对层状板材进行屈曲分析, 研究了层状板材的弯曲应力受预弯曲应力的影响。S. C. LIN^[11]利用随机有限元法对层状复合材料的可靠度进行了研究。G. F. ABDELAL等^[12]利用随机有限元法对三维空间框架结构的可靠度进行了预估。K. SMOLDERS等^[13]利用随机有限元法对风电齿轮机的可靠度进行了分析与预估, 提出了一种用于风电齿轮箱可靠度预估的通用模型。S. NETPU等^[14]利用随机有限元法对某发电厂的斜齿轮进行失效研究, 分别对该失效斜齿轮的显微结构和显微硬度进行了观察与测量。

国内基于随机有限元法的可靠性研究也有不少。姚耀武等^[15]利用随机有限元和可靠度分析理论, 推导出解决材料非线性问题的计算公式, 并编写了随机有限元程序。杨小刚等^[16]利用一次可靠度算法, 推导出随机有限元法的控制方程与相关

基金项目: 国家重点研发计划项目(SQ2021YFB3400095)

作者简介: 石春明(1974—), 男, 陕西咸阳人, 西北机电工程研究所研究员, 学士, 主要从事机械结构设计的研究工作。

***通信联系人**(zhaominmin@gmeri.com): 赵敏敏(1988—), 女, 山西吕梁人, 广州机械科学研究院有限公司工程师, 硕士, 主要从事机械结构设计的研究工作。

引用本文: 石春明, 赵敏敏, 韩璇璇, 等. 基于随机有限元法的可靠性分析方法概述[J]. 橡胶工业, 2023, 70(4): 305-310.

Citation: SHI Chunming, ZHAO Minmin, HAN Xuanxuan, et al. Summary of reliability analysis methods based on stochastic finite element method[J]. China Rubber Industry, 2023, 70(4): 305-310.

矩阵的梯度矩阵,并在该基础上编写了基于随机有限元法的可靠度分析程序。王社锋等^[17]运用随机有限元法,在材料强度、板元厚度以及外载荷均为随机变量的条件下,编制了用于解决二维平面问题的随机有限元程序。王东等^[18]将三参数统一强度理论引入了随机有限元程序,建立了三维非线性随机有限元结构可靠性分析模型。杨周^[19]对具有非正态分布参数的机械构件的可靠性灵敏度与可靠性稳健设计进行了研究。戚毅婷^[20]以随机有限元法为基础,对框架结构的可靠性进行了研究。

虽然国内外基于随机有限元法的可靠性研究有很多,但是其研究对象主要集中在薄板、薄壁箱梁、框架结构和空间板梁等结构,研究范围不够广泛。此外,基于随机有限元法的可靠性研究仅限于对现有结构可靠性的定量评估,未将其应用于产品设计、开发、使用到失效的全寿命周期。

2 基于随机有限元法的可靠性分析方法

2.1 随机有限元法

基于随机有限元法的可靠性分析方法,以随机有限元法为基础。常用的随机有限元法主要有4种^[21]:初始方法是将蒙特卡洛法与有限元法直接结合,称为直接蒙特卡洛法^[22-24];对于复杂结构,直接蒙特卡洛法计算量比较大,人们在该方法的基础上,进一步衍生出其他随机有限元法,主要包括Taylor展开随机有限元法、摄动随机有限元法和Neumann展开随机有限元法。

2.1.1 直接蒙特卡洛法

直接蒙特卡洛法的基本控制方程为确定性有限元控制方程。

直接蒙特卡洛法具有如下优势:对有限元模型有很好的适用性;每次循环都相互独立,适用于并行计算的理论。该方法的不足之处为:以大量确定性有限元程序为基础,对于尺寸较大和结构较复杂的模型,需要消耗较大的计算机资源^[25]。

2.1.2 Taylor展开随机有限元法

Taylor展开随机有限元法^[25-26]是将有限元控制方程中的控制量(如位移和应力等)在随机变量的均值点处进行Taylor展开,再经过适当的数学处理

以得出相应控制量的均值和方差。

Taylor展开随机有限元法控制量的均值和方差的计算公式如下。

(1)假设基本输入随机参数 $(Z) = (Z_1, Z_2, \dots, Z_n)^T$ (T 为转置符号),在静载荷作用下,有限元控制方程为:

$$F = KU \quad (1)$$

式中, F 为载荷矩阵, K 为刚度矩阵, U 为位移矩阵。

(2)将 U 在 $\bar{Z}$ (Z 的均值)点处作Taylor展开,然后作均值计算:

$$E(U) \approx \bar{U} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\partial^2 U}{\partial Z_i \partial Z_j} \Big|_{Z=\bar{Z}} \text{COV}(Z_i, Z_j) \quad (2)$$

式中, $E(U)$ 为Taylor展开后 U 的均值, $\bar{U}$ 为 U 的均值。

(3) U 的方差 $[\text{Var}(U)]$ 为:

$$\text{Var}(U) \approx \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\partial U_i}{\partial Z_i} \Big|_{Z=\bar{Z}} \times \frac{\partial U_j}{\partial Z_j} \Big|_{Z=\bar{Z}} \times \text{COV}(Z_i, Z_j) \quad (3)$$

从上述推导可以看出,Taylor展开随机有限元法具有如下优势:公式推导简单明了,计算效率高,编程较容易。该方法的不足之处为:对输入随机参数的变异性有一定的限制;当随机参数较多时,计算量很大。

2.1.3 摄动随机有限元法

摄动随机有限元法假设随机参数在其均值点有微小的波动,可以表示为确定部分与波动部分之和,从而将非线性的有限元控制方程转化为线性递推方程组,求解该递推方程组即可得到控制量位移的统计规律,进而求得应力的统计规律。

摄动随机有限元法的公式如下。

(1)针对式(1),将 F, K 和 U 都表示为确定性部分与波动部分之和:

$$\begin{cases} K \approx \bar{K} + \Delta K \\ U \approx \bar{U} + \Delta U \\ F \approx \bar{F} + \Delta F \end{cases} \quad (4)$$

式中, $\bar{K}, \bar{U}$ 和 $\bar{F}$ 分别为刚度矩阵、位移矩阵和载荷矩阵的均值, $\Delta K, \Delta U$ 和 ΔF 分别为刚度矩阵波动部分、位移矩阵波动部分和载荷矩阵波动部分。

(2)将式(4)代入式(1),省去二阶无穷小量后得到:

$$\begin{cases} \bar{K} \times \bar{U} = \bar{F} \\ \bar{K} \times \Delta U = \Delta F - \Delta K \times \bar{U} \end{cases} \quad (5)$$

求解式(5)中确定性有限元线性方程组和波动

部分有限元线性方程组,可以得到控制量位移的统计特性,进而求得应力的统计规律。

从上述推导可以看出,摄动随机有限元法具有如下优势:在概念上更明确,更容易考虑问题的非线性;计算效率较高。该方法的缺点为:对随机参数的摄动量有一定的要求;计算精度要求较高,在随机参数摄动量较大的情况下,该方法同样不适用;其波动部分的求解需要自编程序来实现,使用范围受到一定的限制^[25-26]。

2.1.4 Neumann展开随机有限元法

将Neumann展开式引入到蒙特卡洛随机有限元法即得到Neumann展开随机有限元法。假设 K 在随机变量波动值的影响下表示为:

$$K \approx K_0 + \Delta K_0 \quad (6)$$

式中, K_0 为随机参数在均值点处的刚度矩阵, ΔK_0 为随机参数在均值点处的刚度矩阵波动量。

在引入Neumann展开式后,有:

$$K^{-1} = (K_0 + \Delta K_0)^{-1} = (I - P + P^2 - P^3 + \dots) K_0^{-1} \quad (7)$$

式中, K^{-1} 和 K_0^{-1} 分别为 K 和 K_0 的逆矩阵, I 为单位矩阵, $P = K_0^{-1} \Delta K_0$ 。

又因为

$$U = K^{-1} F \quad (8)$$

$$U_0 = K_0^{-1} F \quad (9)$$

式中, U_0 为随机参数在均值点处的位移矩阵。

可得

$$\begin{aligned} U &= U_0 - P U_0 + P^2 U_0 - P^3 U_0 + \dots \\ &= U_0 - U_1 + U_2 - U_3 + \dots \end{aligned} \quad (10)$$

由于

$$P U_{i-1} = U_i \quad (11)$$

将 $P = K_0^{-1} \Delta K_0$ 代入上式,两边同时乘以 K_0 ,可以得到

$$\Delta K_0 U_{i-1} = K_0 U_i \quad (12)$$

由式(9)得到 U_0 后,即可由式(12)计算出 U_i ,进而得到位移的统计规律。

Neumann展开随机有限元法有如下优势:不受随机参数波动值的影响;计算精度高;在计算中考虑二次以上的高阶项成为可能;可以方便地利用现有的有限元程序,适用性较广^[26]。

2.2 基于随机有限元法的可靠性分析方法

可靠度指产品在规定条件下和规定时间内

完成所规定功能的概率,常用于表征产品的可靠性。从1950年至今,许多学者利用统计方法和概率概念对可靠性进行了大量研究。根据研究成果可以得出,基于随机有限元法的单个零部件的可靠性分析方法主要有应力-强度积分法、功能函数积分法、可靠度指标算法、随机抽样法和响应面法等。

2.2.1 应力-强度积分法

应力-强度积分法的基础为应力-强度干涉理论。该理论认为,零部件的强度及其受载后的应力呈现一定的随机性。这是因为影响零部件强度的因素(如材料性能参数和尺寸参数等)均为随机变量,而影响零部件工作应力的因素(如载荷参数、应力集中参数和工作时的温度等)也均为随机变量的缘故。

在设计中,由于零部件的应力和强度具有相同的量纲,可以将其概率密度曲线绘制于同一坐标系中(见图1)。图中, σ 和 s 分别为零部件的应力和强度, $f(\sigma)$ 和 $g(s)$ 分别为零部件的应力概率密度函数和强度概率密度函数, a 和 b 分别为零部件初始设计的应力均值和强度均值, μ_σ 和 μ_s 分别为零部件衰减后的应力均值和强度均值, t 为时间。

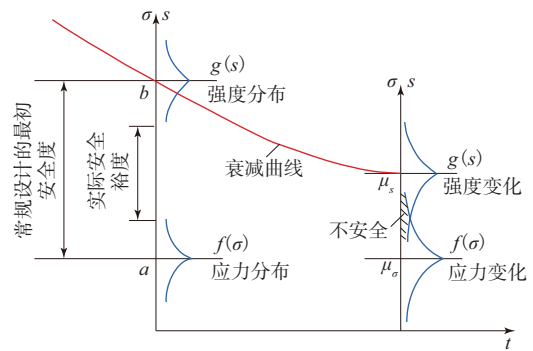


图1 零部件应力和强度概率密度曲线的相互关系
Fig.1 Relationships between stress and strength probability density curves of parts

一般情况下,零部件设计时要求其强度大于工作应力,但是由于零部件应力和强度的离散性,在一定条件下其应力和强度的概率密度曲线可能会相交(如图1中的阴影部分),该相交部分称为干涉区^[27],为零部件可能产生失效的区域。应力-强度积分法即基于上述理论而得出的计算零部件可靠度的一种方法。

采用应力-强度积分法计算零部件可靠度的过程为:首先根据零部件材料、几何尺寸以及载荷参数的分布规律确定其应力和强度的分布规律,然后根据下式计算零部件可靠度。

$$R = \int_{-\infty}^{\infty} f(\sigma) d\sigma \int_{\sigma}^{\infty} g(s) ds \quad (13)$$

式中, R 为零部件可靠度。

2.2.2 功能函数积分法

功能函数积分法与应力-强度积分法类似,其在求得零部件应力和强度的分布规律后,进一步求得零部件功能函数的分布规律和零部件可靠度:

$$R = \int_0^{\infty} f(G) dG \quad (14)$$

式中: G 为零部件功能函数,一般为强度与应力的差($G=s-\sigma$),也可以是强度与应力的商($G=s/\sigma$); $f(G)$ 为功能函数概率密度函数,可以表征功能函数的分布规律, $f(G)$ 大于0的概率即为零部件可靠度。

2.2.3 可靠度指标计算法

(1)根据公式计算零部件可靠度。可靠度指标是人为定义的参数,其标准正态函数为零部件可靠度,只要求得可靠度指标,再查取标准正态函数表即可计算零部件可靠度。

可靠度指标的定义式为:

$$\beta = \frac{\mu_G}{\varepsilon_G} \quad (15)$$

式中, β 为可靠度指标, μ_G 为功能函数均值, ε_G 为功能函数标准差,其计算式为:

$$\mu_G = \mu_s - \mu_\sigma \quad (16)$$

$$\varepsilon_G = \sqrt{\varepsilon_s^2 + \varepsilon_\sigma^2} \quad (17)$$

式中, ε_s 为强度标准差; ε_σ 为应力标准差。

求得可靠度指标后,零部件可靠度为:

$$R = \Phi(\beta) \quad (18)$$

式中, $\Phi(\beta)$ 为可靠度指标的标准正态函数。

(2)根据可靠度指标的几何意义计算零部件可靠度。可靠度指标的几何意义为正态坐标系中原点到极限状态方程所确定的空间曲面的最短距离。可用优化算法求得1个验算点,该验算点满足既在极限状态函数所确定的空间曲面上,又到原点的距离最短。确定该验算点后,即可求得该最短距离,从而进一步求得零部件可靠度。

2.2.4 随机抽样法

随机抽样法计算零部件可靠度的一般过程为:首先根据模型得到各随机参数的分布规律,在计算机上产生一组随机数,然后选择合适的抽样方法(如蒙特卡洛直接抽样法),对各随机参数进行随机抽样,再将随机抽样所获得的随机数一组一组地代入功能函数,求得功能函数各随机解,最后统计分析各随机解,根据功能函数积分法给出零部件可靠度^[28-29]。

2.2.5 响应面法

在求解零部件可靠度的过程中,由于功能函数(或极限状态函数)大多比较复杂且为隐性,其具体表达式很难确定,出现了基于以简代繁原理的响应面法^[30]。响应面法即通过一系列的确定性试验,用多项式响应面函数(近似极限状态函数)代替复杂的极限状态函数,然后通过待定系数法求得响应面函数的表达式,再根据功能函数积分法确定零部件的可靠度。

3 基于随机有限元法的可靠性研究前景展望

目前,针对基于随机有限元法的可靠性问题虽然已经开展了许多工作并取得相关成果,但其研究范围仍然较窄,考虑因素比较单一。因此,对基于随机有限元法的可靠性问题有待进一步研究,可以开展以下各项工作。

(1)综合考虑材料、结构以及工况条件(如载荷条件)对产品可靠性的影响。目前,基于随机有限元法的可靠性分析考虑因素较为单一,不能准确地预估产品的可靠性。因此,如何准确统计各影响因素的分布规律并将其应用于产品可靠性分析有待进行深入研究。

(2)研究基于随机有限元法的可靠性分析方法。目前使用较为广泛的基于随机有限元法的可靠性分析方法存在多项不足,如随机抽样法,若抽样过少不能准确反映总体特征,但对于某些结构尺寸过大的零部件,抽样过多又需要大量的计算资源。因此,有必要将各种随机有限元法与可靠性分析方法有效结合,自编程序建立新的基于随机有限元法的可靠性分析方法,以弥补现有研

究方法的不足。

(3) 扩大基于随机有限元法的可靠性分析方法的使用范围。目前,基于随机有限元法的可靠性分析方法主要应用于重要机械零部件,对基础机械零部件以及其他领域产品(如电子产品)的应用较少。此外,目前,基于随机有限元法的可靠性分析方法仅限于对现有结构可靠性的定量评估,未将其应用于产品设计、开发、使用到失效的全寿命周期。因此,基于随机有限元法的可靠性分析方法在产品全寿命周期的使用有待进一步推广。

4 结语

本文综述了基于随机有限元法的可靠性分析方法研究现状,介绍了4种常用的随机有限元法,包括直接蒙特卡洛法、Taylor展开随机有限元法、摄动随机有限元法和Neumann展开随机有限元法;重点介绍了5种基于随机有限元法的可靠性分析方法,包括应力-强度积分法、功能函数积分法、可靠度指标算法、随机抽样法和响应面法。并在此基础上对可靠性研究需要开展的下一步工作进行了探讨,为产品可靠性研究提供了方向和指导。

参考文献:

- [1] 钱华明. 工业机器人关键部件的时变可靠性分析及优化方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
QIAN H M. Research on time-varying reliability analysis and optimization method of key components of industrial robot[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021.
- [2] 吴国奥. 机床再制造可靠性分配方法研究[D]. 重庆: 重庆工商大学, 2021.
WU G A. Research on reliability distribution method of machine tool remanufacturing[D]. Chongqing: Chongqing Technology and Business University, 2021.
- [3] 冯可盈. 地铁列车转向架系统可靠性研究分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
FENG K Y. Reliability analysis of subway train bogie system[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
- [4] 王晚香, 张佳垚, 郭瑞军. 多种失效模式下高速公路复杂网络可靠性研究[J]. 大连交通大学学报, 2021, 42(6): 1-7.
WANG W X, ZHANG J Y, GUO R J. Research on reliability of freeway complex network under multiple failure modes[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2021, 42(6): 1-7.
- [5] 胡荣汉. 基于现场跟踪与实验室台架试验的电主轴可靠性评估研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
HU R H. Reliability evaluation of motorized spindle based on field tracking and laboratory bench test[D]. Changchun: Jilin University, 2021.
- [6] 朱江行. 地区配电网运行可靠性评估方法研究及实现[D]. 贵阳: 贵州大学, 2021.
ZHU J X. Research and implementation of operation reliability evaluation method for regional distribution network[D]. Guiyang: Guizhou University, 2021.
- [7] 易鲲鹏. 基于通用生成函数的复杂多态系统可靠性建模评估研究[D]. 成都: 西南财经大学, 2021.
YI K X. Research on reliability modeling and evaluation of complex multi state system based on general generating function[D]. Chengdu: Southwestern University of Finance and Economics, 2021.
- [8] 周樱中. C公司航空部件可靠性提升研究[D]. 上海: 上海财经大学, 2021.
ZHOU Y Z. Research on reliability improvement of aviation components of company C[D]. Shanghai: Shanghai University of Finance and Economics, 2021.
- [9] 孙博. 基于多源信息融合的数控机床关键功能部件可靠性评估[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
SUN B. Reliability evaluation of key functional components of numerical control machine tools based on multi-source information fusion[D]. Changchun: Jilin University, 2021.
- [10] ONKAR A K, UPADHYAY C S, YADAV D. Generalized buckling analysis of laminated plates with random material properties using stochastic finite elements[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2006, 48: 780-798.
- [11] LIN S C. Reliability predictions of laminated composite plates with random system parameters[J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2000, 15(4): 327-338.
- [12] ABDELAL G F, COOPER J E, ROBOTHAM A J. Reliability assessment of 3D space frame structures applying stochastic finite element analysis[J]. International Journal of Mechanics and Materials in Design, 2013, 9(1): 1-9.
- [13] SMOLDERS K, LONG H, FENG Y H, et al. Reliability analysis and prediction of wind turbine gearboxes[C]. Proceedings of European Wind Energy Conference. Warsaw, Poland: Power Engineer, 2010: 2660-2670.
- [14] NETPU S, SRICHANDR P. Failure of a helical gear in a power plant[J]. Engineering Failure Analysis, 2013, 32: 81-90.
- [15] 姚耀武, 申超. 非线性随机有限元法及其在可靠度分析中的应用[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(2): 37-46.
YAO Y W, SHEN C. Nonlinear stochastic finite element method and its application in reliability analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(2): 37-46.
- [16] 杨小刚, 沈兆普. 基于随机有限元的大跨度桥梁可靠度分析[C]. 第二十届全国桥梁学术会议. 北京: 中国土木工程学会, 2012: 323-329.
- [17] 王社锋, 赵洪伦. 基于随机有限元的薄板结构可靠度研究[J]. 机械设计与研究, 2008, 24(5): 19-21.
WANG S F, ZHAO H L. The study of shells structure reliability with stochastic finite element method[J]. Machine Design & Research, 2008, 24(5): 19-21.
- [18] 王东, 陈建康, 王启智, 等. Monte-Carlo随机有限元结构可靠度分

- 析新方法[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2008, 40(3): 20–26.
WANG D, CHEN J K, WANG Q Z, et al. The new method of structural reliability analysis by Monte–Carlo stochastic finite element[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2008, 40(3): 20–26.
- [19] 杨周. 非正态分布参数的机械构件的可靠性灵敏度与可靠性稳健设计[D]. 沈阳: 东北大学, 2010.
YANG Z. Reliability sensitivity and reliability robust design of mechanical components with non normal distribution parameters[D]. Shenyang: Northeast University, 2010.
- [20] 戚毅婷. 基于随机有限元的框架结构可靠性分析[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2012.
QI Y T. Reliability analysis of frame structures based on stochastic finite element method[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2012.
- [21] KAMINSKI M, ŚWITA P. Structural stability and reliability of the underground steel tanks with the stochastic finite element method[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2015, 15(2): 593–602.
- [22] 周成宁. 随机和认知不确定性下基于代理模型的结构可靠性方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
ZHOU C N. Research on structural reliability method based on agent model under stochastic and cognitive uncertainty[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021.
- [23] 易家祥. 改进的序贯Kriging–蒙特卡洛可靠性分析方法及在船舶结构设计中的应用[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.
YI J X. An improved sequential Kriging–Monte–Carlo reliability analysis method and its application in ship structure design[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021.
- [24] 刘军. 基于递推随机有限元法结构可靠度研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2006.
LIU J. Research on structural reliability based on recursive stochastic finite element method[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2006.
- [25] MELLAH R, AUVINET G, MASROURI F. Stochastic finite element method applied to non–linear analysis of embankments[J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2000, 15(3): 251–259.
- [26] 刘宁, 吕泰仁. 随机有限元及其工程应用[J]. 力学进展, 1995, 25(1): 114–126.
LIU N, LYU T R. Stochastic finite element method and its application in engineering[J]. Advances in Mechanics, 1995, 25(1): 114–126.
- [27] 郝静如, 米洁, 李启光. 机械可靠性工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 34–45.
- [28] EAMON C D, THOMPSON M, LIU Z Y. Evaluation of accuracy and efficiency of some simulation and sampling methods in structural reliability analysis[J]. Structural Safety, 2005, 27(4): 356–392.
- [29] DIAZ–GARCIA J A, RAMOS–QUIROGA R. Optimum allocation in multivariate stratified random sampling: Stochastic matrix mathematical programming[J]. Statistica Neerlandica, 2012, 66(4): 492–511.
- [30] 侯振兴. 基于响应面法结构可靠度计算方法研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2019.
HOU Z X. Research on structural reliability calculation method based on response surface method[D]. Qinghuangdao: Yanshan University, 2019.

收稿日期: 2022–11–12

Summary of Reliability Analysis Methods Based on Stochastic Finite Element Method

SHI Chunming¹, ZHAO Minmin², HAN Xuanxuan¹, WANG Yong²

(1. Northwest Institute of Mechanical & Electrical Engineering, Xianyang 712099, China; 2. Guangzhou Mechanical Engineering Research Institute Co., Ltd. Guangzhou 510700, China)

Abstract: In this paper, the research status of reliability analysis methods based on stochastic finite element method was presented, and four commonly used stochastic finite element methods were introduced: direct Monte–Carlo method, Taylor expansion stochastic finite element method, perturbation stochastic finite element method and Neumann expansion stochastic finite element method. Then, five reliability analysis methods based on the stochastic finite element method were mainly discussed: stress–strength integration method, functional function integration method, reliability index calculation method, random sampling method and response surface method. Furthermore, the next step of reliability research was discussed.

Key words: stochastic finite element method; reliability; stress–strength integration method; functional function integration method; reliability index calculation method; random sampling method; response surface method