

基于均匀设计响应面法的钢框架结构抗震可靠度分析

吕大刚, 贾明明, 李刚

(哈尔滨工业大学 土木工程学院, 150090 哈尔滨, jiamingming@hit.edu.cn)

摘要: 针对地震作用及结构性能的随机性, 通过分析抗震可靠度研究结构的抗震性能, 将均匀设计与响应面法相结合, 提出了结构可靠度的数值模拟新方法, 包括基于均匀设计的响应面法、均匀设计响应面与蒙特卡罗抽样相结合的混合模拟法。结合钢框架结构的抗震可靠度问题, 基于 ANSYS 实现了上述新方法, 并与经典的可靠度数值模拟方法进行对比分析。分析结果表明: 均匀设计的偏差大约为正交设计的 10% ~ 20%; 基于两者的混合模拟法的计算偏差, 前者为后者的 42% ~ 85%; 同时混合模拟法较蒙特卡罗法计算效率提高了 480 倍以上。均匀设计选取的试验点更加均匀和具有代表性, 均匀设计响应面法构造的结构极限状态函数精度更高, 偏差更小, 同时基于均匀设计响应面的混合模拟法不仅精度高, 还可以大大提高计算效率。

关键词: 抗震可靠度; 均匀设计; 响应面法; 混合模拟法; 钢框架

中图分类号: TU311.4; TU391 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2011)04-0001-05

Seismic reliability analysis of steel frame structures based on uniform design response surface method

LÜ Da-gang, JIA Ming-ming, LI Gang

(School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China, jiamingming@hit.edu.cn)

Abstract: There exist randomness both in earthquake actions and in structural performance; therefore, the seismic reliability analysis of structures should be done to assess seismic performance of structures. Two new numerical simulation methods for structural reliability analysis are proposed, which include uniform design response surface method (UDRSM), and hybrid simulation method (HSM) combing Monte Carlo Simulation (MCS) and UDRSM. These methods are all implemented in ANSYS by using deterministic finite element method. The new two methods are then applied to seismic reliability analysis of steel frame structures. The accuracy and efficiency of the new methods are demonstrated by contrasting the new methods with the classical numerical simulation methods including Monte Carlo simulation (MCS) and orthogonal design response surface method (ODRSM). The results indicate that difference of UD is 10% - 20% of that of OD; The calculation difference of hybrid simulation method based on UD is 42% - 85% of the method based on OD; Computing efficiency of hybrid simulation method is more than 480 times of Monte Carlo Simulation. It is found through the numerical example that the experiment points chosen by uniform design are more uniform and representative than the conventional methods, and that the limit state function of UDRSM is more accurate, and the HSM is more efficient.

Key words: seismic reliability; uniform design; response surface method; hybrid simulation method; steel frame

收稿日期: 2009-10-26.

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划(90715021); 国家自然科学基金资助项目(51008090, 50978080, 50678057, 50108005); 地震行业科研专项基金(200808073); 中国博士后科学基金资助项目(20080440891); 哈尔滨工业大学科研创新基金资助(HIT.NSRIF.2009).

作者简介: 吕大刚(1970—)男, 教授, 博士生导师.

地震作用在时间、强度和空间的强随机性, 以及结构材料强度、设计及施工过程和人为因素的影响, 使得结构的性能在地震作用下会有很大的不确定性, 因此需要把可靠度理论应用到结构抗震设计中, 从而合理地处理这些不确定因素^[1-2].

响应面法是大型复杂结构体系可靠度分析时常用的一种隐式功能函数重构技术,其思想是通过尽可能少的一系列确定性试验及有限元数值计算,拟合一个响应面来替代未知的真实状态曲面,从而可以很容易地基于此进行可靠度分析,并可大大提高计算效率^[3-7]. 响应面法的核心内容之一就是随机输入变量试验点的选取方法,传统的响应面法多应用正交设计,本文将我国数学家王元和方开泰提出的均匀设计(Uniform design, UD)^[8-10]应用于响应面法,提出了均匀设计响应面法,利用均匀设计法选取试验点生成响应面^[11]. 将均匀设计响应面法应用于钢框架结构的抗震可靠度分析,较正交设计法,所得响应面更为接近结构的真实极限状态曲面,基于此的可靠度计算结果更为精确;在满足相同精度的条件下,均匀设计只需要选取少数的试验点,均匀性更好,计算效率也更高.

1 均匀设计响应面法及 ANSYS 实现

对于结构可靠度响应面法分析来说,响应面法就是通过选取一定数量和规律的试验点,进行结构分析,根据分析的结果拟合一个响应面来替代未知的很难得到的结构真实状态曲面,从而可以很容易地基于此进行可靠度分析,不仅降低了求解的难度,也减少了运算时间. 对含有多个随机变量的大型结构进行可靠度分析时,响应面形式的简化(如减少待定系数)将有利于降低结构分析的工作量,而且不会影响分析结果.

为了使响应面函数获得好的逼近效果,样本点的选取是非常重要的. 传统的方法是根据正交设计、中心复合设计或 Box-Behnken 矩阵设计方法选取样本点. 然而,正交试验设计只适用于水平数不多的试验,当水平数增加时,正交设计的试验数按照水平数的平方比增加. 因此,对于大型复杂结构的可靠度分析来说,正交设计、中心复合设计或 Box-Behnken 矩阵设计方法所需的试验(有限元分析)次数非常巨大,从而增大分析的费用. 均匀设计^[8-10]与正交设计相比,具有试验点分布均匀、各试验点有代表性的特点,并且随着水平数的增加,均匀设计的试验次数只需水平数的增加数. 水平数相同时,正交设计与均匀设计的偏差不是很大,但是前者较后者的试验次数大几倍;当偏差相近时,正交设计较均匀设计的试验次数大很多,所以在因素较多,水平数较多的情况下,采用均匀设计可以有效地减少试验次数,节省计算时间.

响应面法是通过拟合一个响应面来替代未知

的真实状态曲面,从而可以很容易与可靠度分析方法蒙特卡罗法相结合,进行结构可靠度分析. 由于均匀设计响应面函数是通过均匀设计选取试验点进行结构分析得到的近似极限状态方程,所以基于此计算出的响应面函数值(即结构的反应)能反映结构的基本特征,且较正交设计响应面更为接近结构真实极限状态曲面,基于均匀设计响应面进行蒙特卡罗抽样的混合模拟法也可以较为精确地计算得到结构可靠度,往往较单纯蒙特卡罗法更加精确.

均匀设计响应面法主要步骤包括(以多项式形式的响应面为例)^[7]: 1) 选取形式较为简单,能反映原极限状态方程主要特点的响应面函数形式; 2) 根据均匀设计的准则利用均匀设计表和所选响应面的形式,选取一定数量的试验点(结构设计方案),假定迭代点 $X^{(1)} = (x_1^{(1)}, \dots, x_i^{(1)}, \dots, x_n^{(1)})$, 初次计算一般取平均值点; 3) 利用试验(复杂结构的可靠度分析一般采用数值模拟试验,通常采用确定性有限元分析方法),基于这些试验点(结构设计方案)进行结构分析,计算功能函数 $y' = g(x_1^{(1)}, \dots, x_i^{(1)}, \dots, x_n^{(1)})$ 以及 $y' = g(x_1^{(1)}, \dots, x_i^{(1)} \pm f\sigma_i, \dots, x_n^{(1)})$ 得到 $2n+1$ 个点的估计值,其中系数 f 在第 1 轮估计中取 2 或 3,在以后的迭代过程计算中取 1,其中 σ_i 为 x_i 的均方差; 4) 根据试验点的分析结果,采用适当的方法(如最小二乘法或解方程法等)确定出均匀设计响应面函数的待定系数 a_0, b_i, ρ_i ; 5) 利用得到的形式简单地均匀设计响应面方程,进行结构的可靠度分析. 可以利用 JC 法或蒙特卡罗法求解验算点 $x^{*(k)}$ 和可靠指标 $\beta^{(k)}$,上标 k 表示第 k 部迭代; 6) 判断收敛条件: $|\beta_{k+1} - \beta_k| < \varepsilon$ (ε 为收敛精度) 是否满足. 如果不满足,则利用插值法得到新的展开点: $X_m^{(k)} = \mu^{(k)} + (X^{*(k)} - \mu^{(k)}) g'(\mu^{(k)}) / (g'(\mu^{(k)}) - g'(x^{*(k)}))$,此插值可使 $X_m^{(k)}$ 较接近极限状态曲面,然后返回步骤 3),以迭代点 $X_m^{(k)}$ 进行下一步迭代,直至收敛条件满足.

均匀设计响应面法可直接使用现已广泛应用的有限元分析软件 ANSYS 而无需任何改动,在其可靠度分析模块(PDS)可定义结构性能参数或结构荷载为随机变量,并给出分布类型及特征值,再通过结构的有限元分析得到结构的响应,基于结构响应的概率分布可以进行结构失效概率计算,得到结构可靠度. 在 ANSYS 中用户也可以自定义响应面法中选取试验点的方式,如利用均匀设计的方法选取试验点. 方法是依据结构性能参数或结构荷载等随机变量的试验因素和水平数,选择

均匀设计表;在 MATLAB 中按照符合试验因素的分布类型和水平数的原则进行抽样,得到试验因素数据文件;再通过 ANSYS 中响应面法中的用户自定义功能(USER DEFINE) 输入试验因素数据文件,这些数据就是符合均匀设计原则的样本,这样也就实现了基于 ANSYS 的均匀设计响应面法。

2 随机地震作用的统计参数

随机地震反应分析表明,确定性烈度下的随机地震作用大致符合极值 I 型分布。我国现行抗震规范采用的也是极值 I 型分布,因此,确定性烈度下随机地震作用的概率分布可表示为^[1]

$$P_F(f \Big|_{I=J}) = \exp\{-\exp[-a(f-b)]\}. \quad (1)$$

式中: $I = J$ 表示所取的第 I 级烈度为确定性的 J 级烈度; a, b 为分布参数,可按式(1)分别求得。

$$a = \frac{\pi}{\sqrt{6}} \cdot \frac{1}{F_J V_{FJ}}, \quad (2)$$

$$b = \bar{F}(1 - 0.45V_{FJ}). \quad (3)$$

其中 \bar{F}_J 和 V_{FJ} 分别为确定性烈度(第 J 级烈度)下随机地震作用的均值和变异系数。

$$\bar{F}_J = \alpha_J G, \quad (4)$$

$$V_{FJ} = \sqrt{V_\beta^2 + V_G^2 + V_D^2}. \quad (5)$$

式中 α_J 为第 J 烈度下随机地震影响系数的均值,可查现行抗震规范的具体表格确定,结构的自振周期 T 应按重力荷载的均值 \bar{G} 计算, V_β, V_G, V_D 分别为动力放大系数 β 、结构重力荷载 G 、考虑地震作用模型化中不确定性的因子 D 的变异系数。

对于确定性烈度下的随机地震作用,其均值与标准值的比可表示为

$$\frac{\bar{F}_J}{F_{JK}} = \frac{\alpha_J}{\alpha_{JK}} \frac{\bar{G}}{G_K} \frac{\bar{D}}{D_K}. \quad (6)$$

式中下标 K 表示取标准值。由于规范中相应于确定性烈度给定的地震影响系数的标准值就是平均值,因此 $\frac{\alpha_J}{\alpha_{JK}} = 1$, 对于附加随机因子 $\frac{\bar{D}}{D_K} = 1$, 因此

此在确定性烈度下 $\frac{\bar{F}_J}{F_{JK}} = \frac{\bar{G}}{G_K} = 0.75$ ^[11]。

利用文献[11]统计得到的 V_β, V_G, V_D 分别为 0.2, 0.10, 0.7, 由式(5)得

$$V_{FJ} = \sqrt{V_\beta^2 + V_G^2 + V_D^2} = 0.73. \quad (7)$$

由式(2)、(3)求得式(1)的统计参数 $a = 2.34 / F_{JK}$, $b = 0.5 F_{JK}$, 式中 F_{JK} 为第 J 烈度下地震作用标准值。

重力均值 $\bar{G} = 0.75 G_K$, 结构总重力荷载标准值 G_K 对于单质点情况应取总重力荷载的全部,多

质点情况可取总重力荷载的 85%。重力荷载应取结构和构配件自重(恒载)与其他重力荷载(活载)在地震发生时可能出现的组合。

3 钢框架结构的抗震极限状态

依据 GB 50011—2001 的规定,钢框架结构弹性层间位移 Δu_e 允许值为结构层高的 1/300, 即 $[\theta_e] = h_i/300$, 弹塑性层间位移 Δu_p 允许值为结构层高的 1/50, 即 $[\theta_p] = h_i/50$ 。针对本文的平面钢框架结构,梁柱通过构造保证不发生局部失稳,并且不考虑几何非线性问题,采用的 Q235 钢的屈服强度为 $f_y = 2.15 \times 10^8 \text{ N/m}^2$, 其本构模型通常取为双线性强化模型,屈服后模量为弹性模量的 10%。设 $y_{\max}(x_e)$ 为结构最大层间弹性位移, $y_{\max}(x_p)$ 为结构最大层间弹塑性位移, σ_m 为各构件中的最大应力,故可得到本文所研究的钢框架结构的极限状态函数。

钢框架构件在小震作用下的承载能力极限状态为

$$g_1(\bar{x}) = f_y - \sigma_m(\bar{x}) = 0; \quad (8)$$

钢框架结构在小震作用下的正常使用极限状态为

$$g_2(\bar{x}) = [\theta_e]h - \Delta u_e(\bar{x}) = h/300 - \Delta u_e(\bar{x}) = 0; \quad (9)$$

钢框架在大震作用下的连续倒塌极限状态为

$$g_3(\bar{x}) = [\theta_p]h - \Delta u_p(\bar{x}) = h/50 - \Delta u_p(\bar{x}) = 0. \quad (10)$$

4 算例分析

4.1 结构及荷载基本信息

3 层 2 跨钢框架结构承受的均布荷载和梁柱截面如图 1 所示,钢框架梁柱节点刚接,梁截面面积为 $1.19 \times 10^{-2} \text{ m}^2$, 转动惯量为 $4.467 \times 10^{-4} \text{ m}^4$; 柱截面面积为 $1.35 \times 10^{-2} \text{ m}^2$, 转动惯量为 $6.559 \times 10^{-4} \text{ m}^4$ 。材料的弹性模量 E 的均值为 $2 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$, 变异系数为 0.05, 符合正态分布;泊松比 μ 的均值为 0.3, 变异系数为 0.05, 符合正态分布。地震荷载 F_{X_i} ($i = 1, 2$) 均服从极值 I 型分布,模型参数 $a = 2.34 / F_{JK}$, $b = 0.5 F_{JK}$ 。地震荷载服从的极值 I 型分布,由于 ANSYS 中没有提供这种概率分布类型,利用用户自定义接口,把由 MATLAB 产生的服从极值 I 型分布的地震荷载样本提供给 ANSYS,然后 ANSYS 对这些样本进行抽样分析。本算例只针对结构大震时的连续倒塌极限状态,对各种抗震可靠度数值模拟分析方法的精度和效率进行讨论。

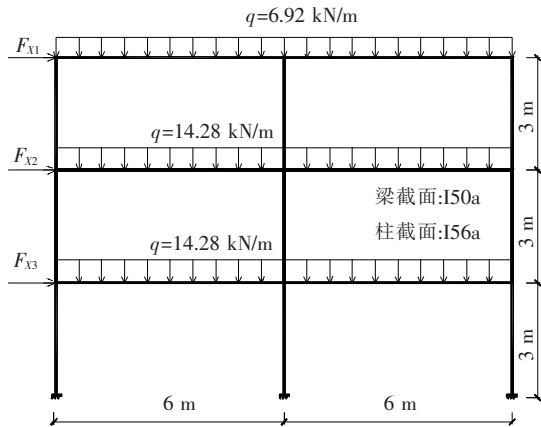


图1 结构形式及荷载分布(3层2跨)

4.2 响应面法模拟分析

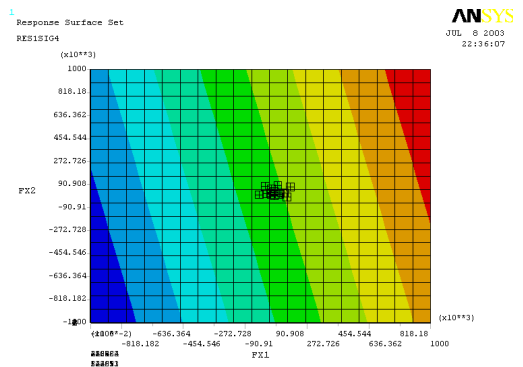
利用均匀设计的方法来构造响应面,并与利用 ANSYS 本身提供的正交设计响应面法得到的结果进行比较. 响应面法的偏差指取一组随机输入变量分别代入由正交设计或均匀设计生成的响应面函数中,计算得到响应面函数的值(即近似的结构反应值),与利用这组随机输入变量基于 ANSYS 计算得到的结构反应值的差值.

当取 $E = 2 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$, $F_{X1} = 334.680 \text{ kN}$, $F_{X2} = 168.180 \text{ kN}$ 时,基于均匀设计响应面函数和正交设计响应面函数计算得到的结构顶点水平位移值分别为 27.296 mm 和 27.342 mm ,与基于 ANSYS 分析得到的结构反应值(27.29 mm) 分别相差 0.022% 和 0.191% .

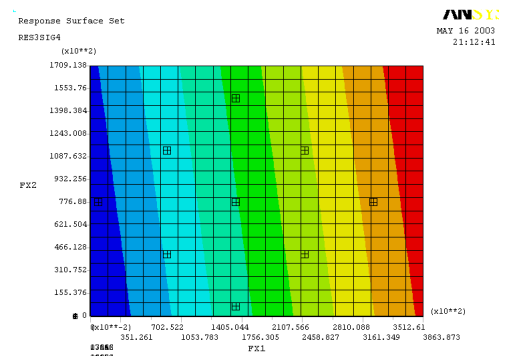
均匀设计与正交设计所得的响应面函数的表达式较为接近,并且基于响应面函数得到的结构近似反应值也很接近,表明均匀设计适合与 ANSYS 结合进行可靠度分析和计算. 通过偏差分析可知,均匀设计较正交设计在试验数相近的时候,均匀设计的偏差大约为正交设计的 $10\% \sim 20\%$,偏差为均匀性的度量一种指标,通过上述对比可以看出均匀设计明显优于正交设计,并且均匀设计较正交设计计算结果收敛速度更快.

图2 为正交设计及均匀设计试验点的分布,可以看出 ANSYS 所提供的正交设计方法选取试验点范围较大,离散性高;均匀设计在保持试验数据“均匀分散”的前提下,去掉了对试验数据“整齐可比”性的要求,在试验次数相近时,均匀设计所采用的样本在均匀性上较正交设计有较大改进,进而大大提高试验效率,能获得更加满意的结果. 从图3、4 样本分布散点图(图中 SIG4 为层间位移 m) 也可以看出采用均匀设计的可靠度分析的输出变量与输入变量之间的关系也表现得更加均匀分散. 因此,基于均匀设计的构造的响应面更

为接近于结构的真实极限状态函数曲面.

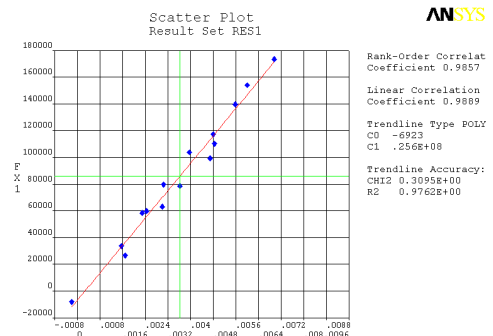


(a)均匀设计

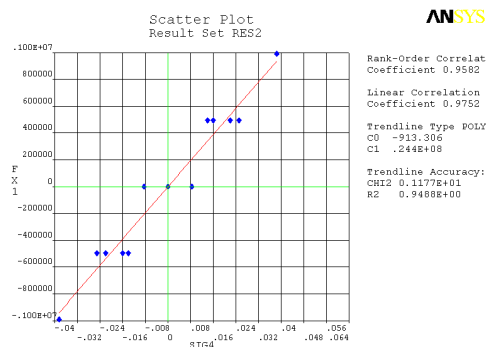


(b)正交设计

图2 正交设计及均匀设计试验点的分布



(a)均匀设计



(b)正交设计

图3 层间变形与地震作用(F_{X1}) 样本分布散点图

4.3 钢框架结构可靠度的混合法模拟分析

计算结构大震时连续倒塌极限状态下的失效概率,应用正交响应面与蒙特卡罗抽样法相结合的混合模拟法的计算结果为 0.0426 ,用均匀设计

响应面与蒙特卡罗抽样法及蒙特卡罗拉丁抽样法相结合的混合模拟法的计算结果分别为 0.042 1 和 0.042 2, 而用蒙特卡罗拉丁抽样法得到的结果为 0.042 33, 其中蒙特卡罗抽样次数均为 1 000 次. 与蒙特卡罗拉丁抽样的结果相比, 基于均匀设计响应面的混合模拟法的计算偏差为基于正交设计响应面的混合模拟法的计算偏差的 42% ~ 85%. 在奔腾 IV 1.8 GHz 256 M 内存的计算机上完成上述运算过程, 蒙特卡罗拉丁抽样法的耗时约为 4 h, 而混合模拟法的耗时约为 30 s, 计算效率提高 480 倍以上.

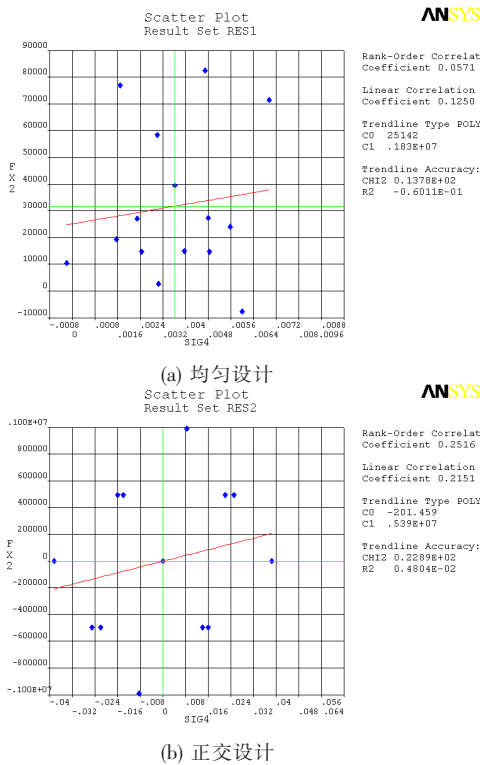


图4 层间变形与地震作用(F_{X2})样本分布散点图

蒙特卡罗法和响应面法是求解可靠度问题的两种有效的方法, 二者的结合又为求解可靠度提供一种更为有效的方法, 并且可节省大量的求解时间. 基于均匀设计响应面的两种混合模拟法得到的结果更为接近蒙特卡罗抽样得到的结果, 表明基于均匀设计生成的响应面更为接近于真实的极限状态函数曲面, 基于均匀设计响应面的混合模拟法可以更为准确地求解结构可靠度, 这些都说明了均匀设计的优越性.

5 结论

1) 针对地震发生时其强度、频谱以及持时、场地特性等都具有强烈的不确定性以及结构性能本身具有的随机性, 从概率意义上研究结构的抗震性能和本质, 分析其抗震可靠度. 基于均匀设计

响应面法对钢框架结构的抗震可靠度进行分析, 将均匀设计与响应面法相结合, 提出了结构可靠度的数值模拟新方法——均匀设计响应面法和均匀设计响应面与蒙特卡罗抽样相结合的混合模拟法, 并基于 ANSYS 予以实现.

2) 采用混合模拟法对钢框架结构的抗震可靠度进行了分析, 并与经典的可靠度数值模拟方法进行了对比. 说明均匀设计选取的试验点更加均匀和具有代表性, 较正交设计在试验次数相同的情况下, 试验偏差减少 88%.

3) 均匀设计较正交设计选取的试验点的均匀性大大提高, 基于均匀设计的可靠度分析的输出变量与输入变量之间的关系也表现得更加均匀分散, 因此基于均匀设计生成的响应面更接近于真实的极限状态函数曲面, 基于均匀设计响应面的混合模拟法能更加精确地求解钢框架结构的抗震可靠度, 而且大大提高了计算效率.

参考文献:

- [1] 欧进萍, 段宇博, 刘会仪. 结构随机地震作用及其统计参数[J]. 哈尔滨建筑工程学院学报, 1994, 27(5): 1-10.
- [2] 侯纲领, 欧进萍. 基于结构可靠度的 PBSD 抗震设防标准研究[J]. 自然灾害学报, 2008, 17(1): 202-210.
- [3] ANDRZEJ S N, KEVIN R C. Reliability of structures [M]. New York: The McGraw-Hill Companies Inc, 2000.
- [4] ROBERT E M. Structural reliability analysis and prediction [M]. 2nd ed. Hoboken: John Wiley & Sons Ltd, 1999.
- [5] 金伟良. 结构可靠度数值模拟新方法[J]. 建筑结构学报, 1996, 17(3): 63-72.
- [6] 赵国藩, 金伟良. 结构可靠度理论[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- [7] 赵国藩. 结构可靠性理论与应用[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1996.
- [8] 方开泰, 马长兴. 正交与均匀试验设计[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [9] 方开泰. 均匀设计与均匀设计表[M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- [10] 王元. 均匀设计: 一种试验设计方法[J]. 科学导报, 1994, 5: 20-22.
- [11] 贾明明. 钢框架结构基于变形可靠度的抗震性能设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2003.

(编辑 魏希柱)