

基于改进自适应混沌控制的 逆可靠度分析方法*

李彬¹, 郝鹏¹, 孟增², 李刚¹

- (1. 工业装备结构分析国家重点实验室(大连理工大学);
大连理工大学 工程力学系, 辽宁 大连 116024;
2. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 合肥 230009)

摘要: 自适应混沌控制方法是一种高效、稳健的逆可靠度分析方法,但在求解强非线性凹功能函数时,计算效率仍然有待提高,且可能会陷入局部最优.通过对混沌控制因子更新策略进行改进,提出了基于改进自适应混沌控制的逆可靠度分析方法.数值算例分析表明:该方法能够有效地改善混沌控制因子自适应选取时的合理性,具有更好的收敛性和更高的计算效率,为结构可靠度分析和可靠度优化问题提供了更加高效、稳健的求解途径.

关键词: 逆可靠度分析; 混沌控制; 强非线性; 局部最优; 高效稳健

中图分类号: TB114.3; O213.2 **文献标志码:** A doi: 10.21656/1000-0887.380001

引 言

近年来,基于可靠度的结构优化设计受到广泛关注^[1-5].如何求解概率约束是可靠度优化的核心问题,可靠度分析^[6-7]和逆可靠度分析^[1, 8-9]是两种主要的求解策略,分别将概率约束转化为可靠度约束和功能函数值约束,二者互为逆问题.逆可靠度分析是在给定可靠度或失效概率下确定设计参数,可表示为标准正态空间内的一个优化问题^[1]:

$$\begin{cases} \text{find } \mathbf{u}^*, \\ \text{min } g(\mathbf{u}), \\ \text{s.t. } \|\mathbf{u}\| = \beta^1, \end{cases}$$

式中, \mathbf{u} 是在标准正态空间下的随机变量, $g(\mathbf{u})$ 表示功能函数, β^1 为目标可靠度指标,该优化模型的最优解 \mathbf{u}^* 是最小功能目标点(minimum performance target point, MPTP),所对应的功能函数值为概率功能度量 $G^p = g(\mathbf{u}^*)$.

相关研究表明,与可靠度分析相比,逆可靠度分析具有更好的数值稳定性和更高的计算效率^[10-11].目前逆可靠度分析方法种类很多,最早由 der Kiureghian 等^[12]基于一次二阶矩法给出了逆可靠度分析的迭代公式.Li 和 Foschi^[13]将改进均值(advanced mean value, AMV)法应用于

* 收稿日期: 2017-01-03; 修订日期: 2017-03-08

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)(2014CB046506;2014CB046803); 国家自然科学基金(11372061;11402049;11602076)

作者简介: 李彬(1988—),男,博士生(E-mail: libindlut2007@126.com);

李刚(1966—),男,教授,博士,博士生导师(通讯作者. E-mail: ligang@dlut.edu.cn).

地震与海岸工程的逆可靠度分析中,因其形式简单、效率高,在逆可靠度分析中被广泛应用^[14-15]。对于非线性程度较高或非凸的功能函数,AMV法会出现混沌、周期解等不稳定结果。Youn等提出了共轭均值法^[16]、混合均值法^[11]和增强混合均值法^[10,17],可以有效改善最小功能目标点(MPTP)搜索过程的数值稳定性。然而对于强非线性功能函数,这些方法依然无法得到收敛解。

为了解决迭代过程中的振荡、分叉和混沌等现象,Yang和Yi提出了混沌控制(chaos control, CC)法^[15];Meng等^[18]进一步提出了修正混沌控制(modified chaos control, MCC)法,大大提高了计算效率,并通过引入功能函数凹凸性判定准则,提出了混合混沌控制(hybrid chaos control, HCC)法。Li等^[19]在HCC法的基础上提出了自适应混沌控制(adaptive chaos control, ACC)方法,给出了混沌控制因子自适应更新策略,进一步提高了算法的效率和鲁棒性。Keshtegar等^[20]提出了放松均值(relaxed mean value, RMV)法,Yi等^[21]提出了步长调整(step length adjustment algorithm, SLA)法,对计算性能有所改进。

本文在总结ACC方法的基础上,提出了一种更加高效和稳健的改进自适应混沌控制算法,给出了新的振荡判断准则,通过循环得到每个迭代步合适的混沌控制因子。数值算例结果表明,与ACC及其他算法相比,本文提出的算法有效地改善了混沌控制因子自适应选取时的合理性,具有更好的收敛性和更高的计算效率。

1 自适应混沌控制方法

由于CC和MCC方法的混沌控制因子都是固定的,对每个迭代步的混沌控制不一定有效,Li等^[19]提出的ACC方法,可以自适应地调整每个迭代步的混沌控制因子,该方法的迭代公式为

$$\mathbf{u}_{AMV}^{k+1} = \beta^1 \mathbf{n}^k, \quad \mathbf{n}^k = - \frac{\nabla_{\mathbf{u}} g(\mathbf{u}^k)}{\|\nabla_{\mathbf{u}} g(\mathbf{u}^k)\|}, \quad (1)$$

$$\begin{cases} \mathbf{u}^{k+1} = \mathbf{u}_{AMV}^{k+1} & (\zeta^{k+1} > 0), \\ \mathbf{u}^{k+1} = \beta^1 \frac{\mathbf{u}^k + \lambda_{k+1}(\mathbf{u}_{AMV}^{k+1} - \mathbf{u}^k)}{\|\mathbf{u}^k + \lambda_{k+1}(\mathbf{u}_{AMV}^{k+1} - \mathbf{u}^k)\|} & (\zeta^{k+1} \leq 0), \end{cases} \quad (2)$$

式(1)中 \mathbf{u}_{AMV}^{k+1} 是基于AMV方法所得的下一个迭代点,计算过程采用最速下降方向 \mathbf{n}^k ;式(2)中 ζ^{k+1} 表示最速下降方向的夹角关系,其表达式为 $\zeta^{k+1} = (\mathbf{n}^{k+1} - \mathbf{n}^k) \cdot (\mathbf{n}^k - \mathbf{n}^{k-1})$ 。ACC方法中将 $\zeta^{k+1} > 0$ 和 $\zeta^{k+1} \leq 0$ 分别作为不振荡(功能函数为凸)和振荡(功能函数为凹)的判据,结合混沌控制因子 λ_k 更新下一个迭代点。在判断为振荡时混沌控制因子 λ_k 的更新策略为

$$\lambda_{k+1} = \begin{cases} 0.2\lambda_k, & 0.2\theta^{k+1} > \theta^k, \\ \lambda_k \theta^k / \theta^{k+1}, & \theta^{k+1} > \theta^k \geq 0.2\theta^{k+1}, \\ \lambda_k, & \theta^{k+1} \leq \theta^k, \end{cases} \quad (3)$$

式中, θ^k 和 θ^{k+1} 均表示迭代点间构成的一种夹角关系,如图1所示,且二者满足下列关系:

$$\cos \theta^k = \frac{\mathbf{u}^k \cdot \mathbf{u}^{k-1}}{\|\mathbf{u}^k\| \cdot \|\mathbf{u}^{k-1}\|}; \quad \cos \theta^{k+1} = \frac{\mathbf{u}^{k+1} \cdot \mathbf{u}^k}{\|\mathbf{u}^{k+1}\| \cdot \|\mathbf{u}^k\|}. \quad (4)$$

ACC方法中基于角度的更新策略虽然可以自适应地调整混沌控制因子大小,但同时也存在以下问题:1)基于最速下降方向建立的夹角关系不一定能直接反映迭代振荡行为;2)ACC方法更新策略中控制因子在一次缩减后对于某些情况依然会振荡;3)ACC方法需要选

取初始控制因子,且对不同问题的适用性不同.

2 改进自适应混沌控制方法

本文提出了改进自适应混沌控制(improved adaptive chaos control, IACC)方法,主要改进之处在于振荡判断准则和无附加计算量的混沌控制因子循环更新策略.

迭代过程中是否振荡直接表现为3个连续迭代点间的位置关系,如图1所示,不振荡时3个迭代点 \mathbf{u}^{k-1} , \mathbf{u}^k 和 \mathbf{u}^{k+1} 在 β 环上依次排列,而振荡时 \mathbf{u}^{k+1} 位于 \mathbf{u}^{k-1} 和 \mathbf{u}^k 之间或者 \mathbf{u}^{k-1} 位于 \mathbf{u}^k 和 \mathbf{u}^{k+1} 之间.由于 \mathbf{u}^k 和 \mathbf{n}^k 通常不在同一方向上,因此 ACC 法中基于 \mathbf{n}^k 的振荡判断准则不能直接反映振荡行为.

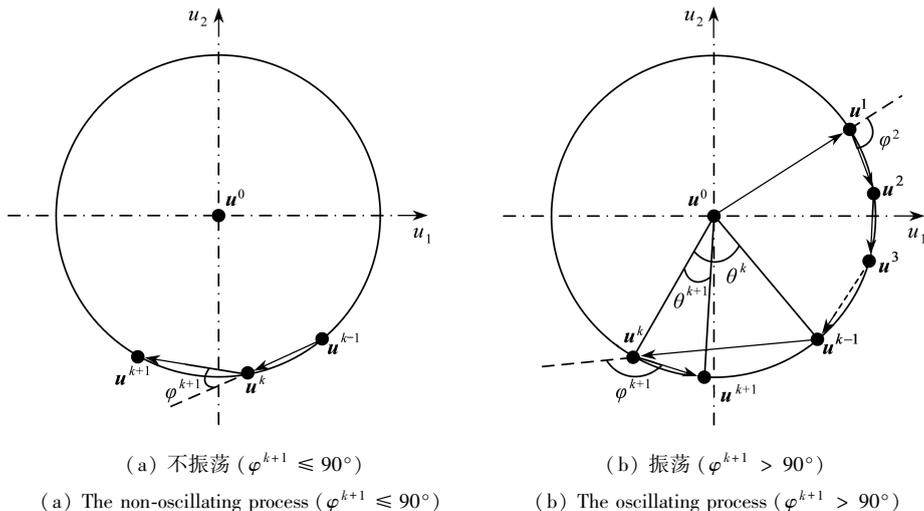


图1 改进自适应混沌控制方法的MPTP搜索过程

Fig. 1 The MPTP search process of the improved adaptive chaos control method

由于迭代点的位置关系可通过两个连续迭代步向量 $\mathbf{u}^{k+1} - \mathbf{u}^k$, $\mathbf{u}^k - \mathbf{u}^{k-1}$ 的夹角确定,当夹角为锐角时,说明3个迭代点依次排列;而夹角为钝角时,说明3个迭代点发生错序.本文提出的振荡判断准则中判定指标可表示为

$$\xi^{k+1} = \cos \varphi^{k+1} = \frac{(\mathbf{u}^{k+1} - \mathbf{u}^k) \cdot (\mathbf{u}^k - \mathbf{u}^{k-1})}{\|\mathbf{u}^{k+1} - \mathbf{u}^k\| \cdot \|\mathbf{u}^k - \mathbf{u}^{k-1}\|}, \quad (5)$$

式中, φ^{k+1} 为第 $k, k + 1$ 两个迭代步向量间的夹角, \mathbf{u}^{k+1} 的更新公式为

$$\mathbf{u}^{k+1} = \beta^1 \frac{\mathbf{u}^k + \lambda_{k+1}(\mathbf{u}_{AMV}^{k+1} - \mathbf{u}^k)}{\|\mathbf{u}^k + \lambda_{k+1}(\mathbf{u}_{AMV}^{k+1} - \mathbf{u}^k)\|}. \quad (6)$$

因此,本文采用如下振荡判断准则:如果 $\xi^{k+1} \geq 0$,说明两个连续迭代步向量的夹角为锐角或直角,迭代不振荡;否则夹角为钝角,迭代振荡.

逆可靠度分析的计算成本主要在于功能函数的计算次数,而式(5)的表达式中不含有功能函数,只涉及迭代点向量的计算;式(6)是对下一个迭代点的预测与更新,也不涉及功能函数计算.因此,本文提出的振荡判断准则在使用过程中不会增加计算成本,这样就可以通过不断更新式(6)的混沌控制因子 λ_{k+1} ,并循环使用该判断准则,在不增加计算量的情况下得到合适的混沌控制因子.

理论上每个迭代步都会存在一个最优的混沌控制因子可保证快速收敛,ACC法的控制因

子单次缩减方法不能保证逼近最优因子,而本文在单个迭代步内采用循环迭代的方式对混沌控制因子进行更新,不断逼近最优因子.首先假定混沌控制因子的变化范围 $[\lambda_{k+1}^L, \lambda_{k+1}^U]$, 然后取上界 λ_{k+1}^U 、下界 λ_{k+1}^L 的平均值作为当前混沌控制因子 λ_{k+1} , 代入式(6)更新迭代点, 并根据式(5)判断是否振荡. 如果不振荡, 说明当前混沌控制因子相对最优因子偏小, 需要增大, 则 $\lambda_{k+1}^L = \lambda_{k+1}$, 然后重新取平均值循环迭代; 如果振荡, 说明当前混沌控制因子相对最优因子偏大, 需要减小, 则 $\lambda_{k+1}^U = \lambda_{k+1}$, 然后重新取平均值循环迭代. 最后当上、下界的差别充分小时, 则循环结束.

通过上述循环更新策略, 当前混沌控制因子会出现两种情况: 充分小(本文取 $\lambda_{k+1} < 10^{-4}$) 和 $10^{-4} \leq \lambda_{k+1} \leq 1$, 其中第一种情况的产生是由于上一迭代步步长过大, 使得在判断准则和循环策略下控制因子已充分小, 但仍然振荡; 而第二种情况对应振荡可消除.

为了保证收敛, 混沌控制因子应该逐渐减小, 因此针对第二种情况(振荡可消除), 采用式(7)对当前控制因子进一步确定

$$\lambda_{k+1} = \min(\lambda_{k+1}, \lambda_k), \tag{7}$$

式中, λ_k 为第 k 个迭代步已确定的混沌控制因子.

振荡不代表不能收敛, 如图 1(b) 所示, 迭代点 \mathbf{u}^{k+1} 位于 \mathbf{u}^{k-1} 和 \mathbf{u}^k 之间表示当前振荡有收敛趋势. 因此针对第一种情况(振荡无法避免), 首先需要适当增大当前充分小的混沌控制因子. 为了使增大后的因子 λ_{k+1}^* 确保振荡小且快速收敛, θ_k 和 θ_{k+1} 需要满足如下关系:

$$0.2 \leq \theta_{k+1}/\theta_k < 0.25, \tag{8}$$

θ_k 和 θ_{k+1} 的表达式如式(4)所示.

然后采用式(9)进一步确定第一种情况下的混沌控制因子

$$\lambda_{k+1} = \min(\lambda_{k+1}^*, \lambda_k). \tag{9}$$

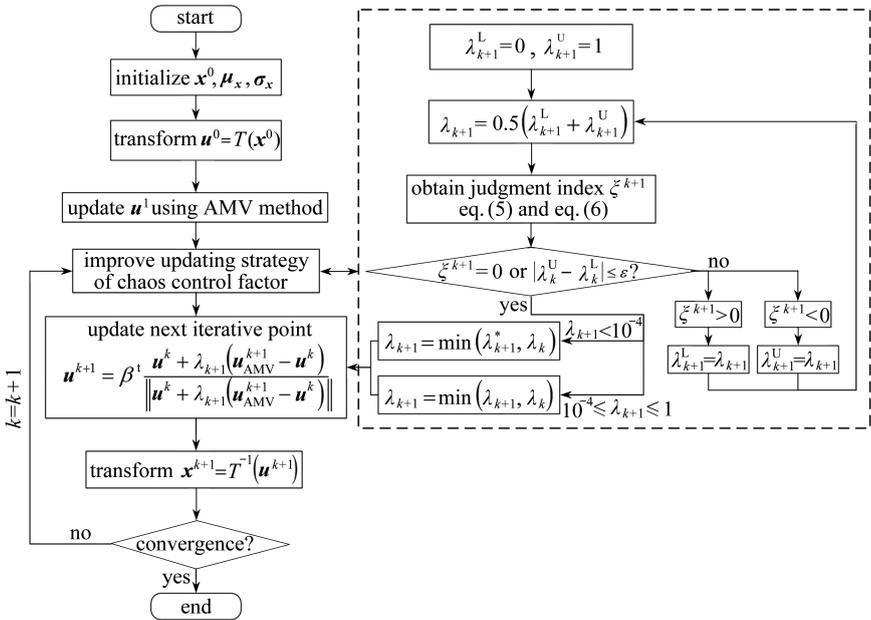


图 2 基于改进自适应混沌控制的逆可靠度分析方法流程图

Fig. 2 The flowchart of the improved adaptive chaos control method for inverse reliability analysis

如图 2 所示, 基于改进自适应混沌控制的逆可靠度分析方法的主要步骤为:

- ① 选择随机变量的均值作为初始迭代点,并用 Rosenblatt 或 Nataf 变换把随机变量变换至标准正态空间。
- ② 用 AMV 方法进行第一步迭代,计算第二个迭代点。
- ③ 根据循环更新策略,得到当前混沌控制因子,并根据大小情况采用式(7)或式(9)进一步确定混沌控制因子大小。
- ④ 将最后确定的混沌控制因子代入式(6)计算下一步的迭代点,并将其变换至物理随机空间。
- ⑤ 如果前后迭代点误差满足精度需求,则停止迭代,否则返回步骤③继续迭代直至收敛。

3 算例分析

算例 1^[22] 四维强非线性功能函数

$$G(\mathbf{x}) = -x_1 - x_2 + \alpha(0.75x_1 - x_2)^2 - 0.5\exp(x_1 - x_2) - x_3 - x_4 + 7, \quad (10)$$

式中, α 越大,功能函数的非线性程度也越高,本文取 $\alpha = 11.4$ 个独立的随机变量均服从标准正态分布,目标可靠度指标 $\beta^1 = 3.0$ 。

表 1 和图 3 为不同算法下的结果比较,其中 T_{NFE} 表示功能函数计算次数(number of function evaluations, NFE)。从图表中可以看出,在允许的最大迭代次数(800 次)下,CC 和 MCC 方法都不能收敛,固定的混沌控制因子 0.1 使迭代过程发生了周期振荡。ACC 方法在不同的初始混沌控制因子下,收敛性和计算效率各有不同,初始混沌控制因子太大可能发生振荡,太小可能导致计算效率太低,且收敛结果较差。本文提出的 IACC 方法通过改善混沌控制因子自适应选取时的合理性,与 ACC 方法最好情况($\lambda_0 = 0.7$) 比较,不仅计算效率提高了 10 倍以上,而且所得的概率功能度量值 G^p 更小,可见 IACC 计算结果更为准确和高效。

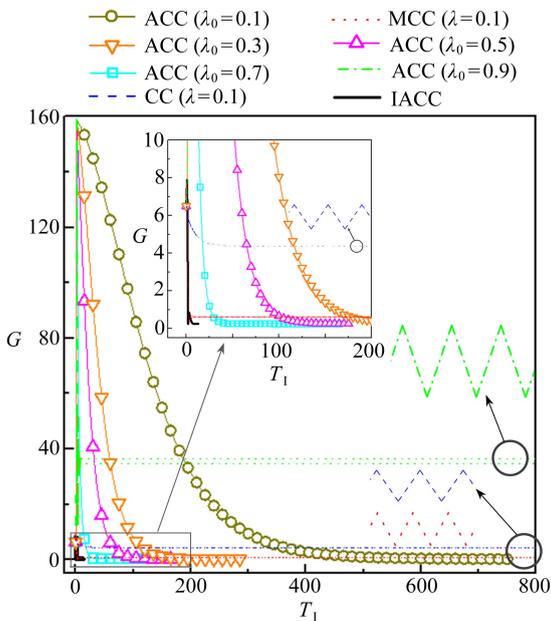


图 3 不同方法下算例 1 的功能函数值迭代历程

Fig. 3 Iteration histories of the performance function value with different methods for example 1

表 1 不同方法下算例 1 的计算结果

Table 1 Results from different methods in example 1

method	G^p	MPTP u^*	number of iterations T_1	T_{NFE}
CC ($\lambda = 0.1$)	periodic-2	periodic-2	800	4 001
MCC ($\lambda = 0.1$)	periodic-2	periodic-2	800	4 001
ACC ($\lambda_0 = 0.9$)	periodic-2	periodic-2	800	4 001
ACC ($\lambda_0 = 0.7$)	0.250 46	(1.847 80, 1.351 99, 1.370 72, 1.370 72)	167	836
ACC ($\lambda_0 = 0.5$)	0.253 88	(1.864 25, 1.370 07, 1.350 46, 1.350 46)	179	896
ACC ($\lambda_0 = 0.3$)	0.255 09	(1.862 34, 1.374 29, 1.349 63, 1.349 63)	288	1 441
ACC ($\lambda_0 = 0.1$)	0.272 27	(1.849 92, 1.394 68, 1.347 72, 1.347 72)	754	3 771
IACC	0.247 10	(1.788 51, 1.308 23, 1.429 99, 1.429 99)	13	66

算例 2^[21] 二维非线性凹功能函数

$$G(\mathbf{x}) = x_1^3 + x_1^2 x_2 + x_2^3 - 18, \tag{31}$$

式中,两个独立的随机变量均服从正态分布, $x_1 \sim N(10, 5^2), x_2 \sim N(9.9, 5^2)$, 目标可靠度指标 $\beta^1 = 3.0$.

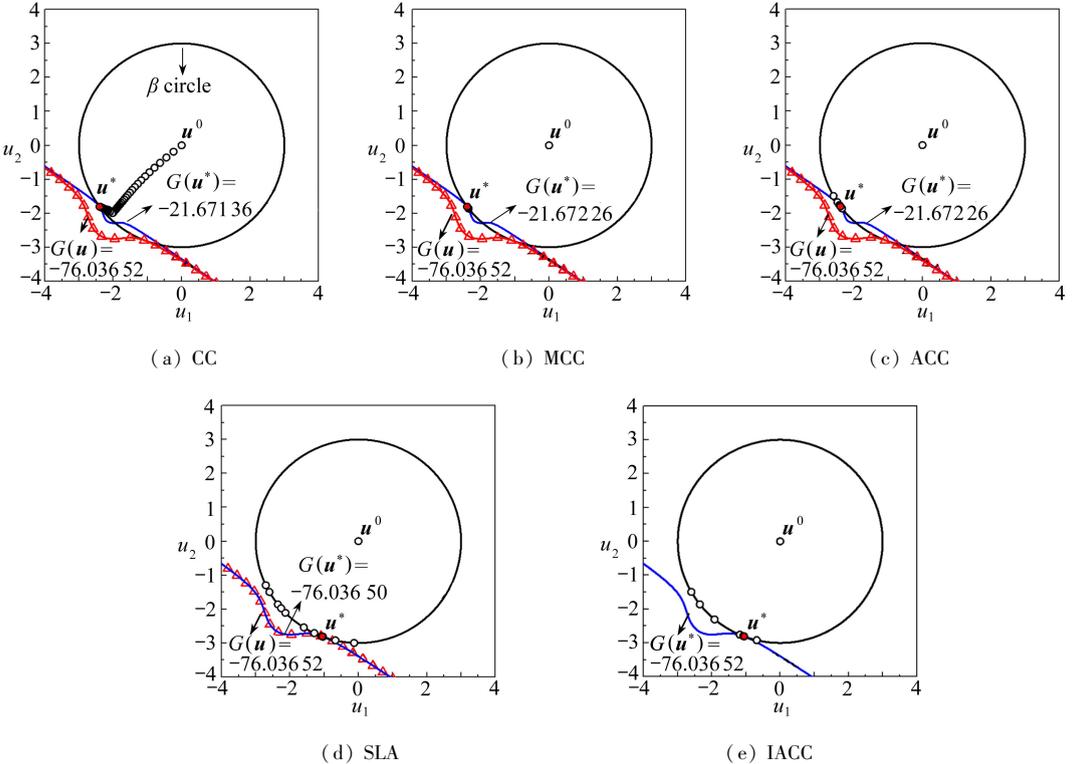


图 4 不同方法下算例 2 的 MPTP 搜索历程

Fig. 4 MPTP search histories of different methods for example 2

图 4 为该算例在不同方法下 MPTP 的搜索历程,其中蓝色实线代表各方法求得的功能函数曲线,而红色三角实线代表 IACC 的结果.从表 2 和图 4 中可以看出,CC、MCC、ACC、SLA 方法^[21]以及 IACC 5 种方法均可以得到收敛解,但前三种方法所得的概率功能度量值并非最小,概率功能度量值下的功能函数曲线除了局部非凸部分与 β 环相切外,其他部分还会与 β 环发生相交,而所得的 MPTP 是 β 环与功能函数曲线局部非凸部分的切点,可

见 CC、MCC 和 ACC 这 3 种方法陷入了局部最优,而图 4(d)和(e)显示,根据 SLA 和 IACC 两种方法,二者的概率功能度量值下的功能函数曲线几乎重合,均与 β 环全局相切,可求得概率功能度量的全局最小值.但在计算效率方面,IACC 方法的迭代次数和函数计算次数均比 SLA 方法少.可见 IACC 方法在求解高非线性凹功能函数时,不仅保证了结果的准确性,而且保证了计算的高效性.

表 2 不同方法下算例 2 的计算结果

Table 2 Results of different methods in example 2

method	G^p	MPTP \mathbf{u}^*	number of iterations T_1	T_{NFE}
CC ($\lambda = 0.1$)	-21.671 36	(-2.397 05, -1.803 89)	117	352
MCC ($\lambda = 0.1$)	-21.672 26	(-2.397 09, -1.803 88)	12	37
ACC ($\lambda_0 = 0.5$)	-21.672 26	(-2.397 09, -1.803 88)	12	37
SLA	-76.036 50	(-1.056 80, -2.807 70)	27	82
IACC	-76.036 52	(-1.056 54, -2.807 80)	12	37

4 结 论

本文提出了基于改进自适应混沌控制的逆可靠度分析方法,根据两个连续迭代步向量间的夹角关系给出了新的振荡判断准则,在更新控制因子时采用循环迭代的方式,每个迭代步所确定的迭代点会再次反馈给振荡判断准则以判定控制因子是否合适,并且还增加了一些公式以确保振荡小且快速收敛,算法自适应性得到进一步提高.算例结果表明,本文提出的方法计算效率高,计算结果准确,可有效避免陷入局部最优,为复杂工程问题的可靠度分析及可靠度优化提供了更加高效、稳健的求解途径.

参考文献(References):

- [1] Tu J, Choi K K, Park Y H. A new study on reliability-based design optimization[J]. *Journal of Mechanical Design*, 1999, **121**(4): 557-564.
- [2] Yang R J, Gu L. Experience with approximate reliability-based optimization methods[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2004, **26**(1): 152-159.
- [3] Chiralaksanakul A, Mahadevan S. First-order approximation methods in reliability-based design optimization[J]. *Journal of Mechanical Design*, 2005, **127**(5): 851-857.
- [4] Zou T, Mahadevan S. A direct decoupling approach for efficient reliability-based design optimization[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2006, **31**(3): 190-200.
- [5] 李刚, 孟增. 基于 RBF 神经网络模型的结构可靠度优化方法[J]. *应用数学和力学*, 2014, **35**(11): 1271-1279. (LI Gang, MENG Zeng. Reliability-based design optimization with the RBF neural network model[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2014, **35**(11): 1271-1279. (in Chinese))
- [6] Nikolaidis E, Burdisso R. Reliability based optimization: a safety index approach[J]. *Computers & Structures*, 1988, **28**(6): 781-788.
- [7] 杜秀云, 薛齐文, 刘旭东. 基于 Bregman 距离函数的可靠性分析[J]. *应用数学和力学*, 2016, **37**(6): 609-616. (DU Xiu-yun, XUE Qi-wen, LIU Xu-dong. Reliability analysis based on Bregman distances[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2016, **37**(6): 609-616. (in Chinese))
- [8] 吉猛, 姜潮, 韩硕. 一种基于同伦分析的结构可靠性功能度量法[J]. *计算力学学报*, 2015, **32**

- (2): 149-153. (JI Meng, JIANG Chao, HAN Shuo. An performance measure approach of structural reliability based on homotopy analysis[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2015, **32** (2): 149-153. (in Chinese))
- [9] 钱云鹏, 涂宏茂, 刘勤, 等. 结构逆可靠度最可能失效点的改进搜索算法[J]. 工程力学, 2013, **30**(1): 394-399. (QIAN Yun-peng, TU Hong-mao, LIU Qin, et al. Improved search algorithm for most probable point of structural inverse reliability[J]. *Engineering Mechanics*, 2013, **30** (1): 394-399. (in Chinese))
- [10] Youn B D, Choi K K, DU Liu. Enriched performance measure approach for reliability-based design optimization[J]. *AIAA Journal*, 2005, **43**(4): 874-884.
- [11] Youn B D, Choi K K. An investigation of nonlinearity of reliability-based design optimization approaches[J]. *Journal of Mechanical Design*, 2004, **126**(3): 403-411.
- [12] der Kiureghian A, ZHANG Yan, LI Chun-ching. Inverse reliability problem[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1994, **120**(5): 1154-1159.
- [13] LI Hong, Foschi R O. An inverse reliability method and its application[J]. *Structural Safety*, 1998, **20**(3): 257-270.
- [14] CHENG Geng-dong, XU Lin, JIANG Lei. A sequential approximate programming strategy for reliability-based structural optimization[J]. *Computers & Structures*, 2006, **84**(21): 1353-1367.
- [15] YANG Di-xiong, YI Ping. Chaos control of performance measure approach for evaluation of probabilistic constraints[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2009, **38**(1): 83-92.
- [16] Youn B D, Choi K K, Park Y H. Hybrid analysis method for reliability-based design optimization[J]. *Journal of Mechanical Design*, 2003, **125**(2): 221-232.
- [17] Youn B D, Choi K K, DU Liu. Adaptive probability analysis using an enhanced hybrid mean value method[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2005, **29**(2): 134-148.
- [18] MENG Zeng, LI Gang, WANG Bo-ping, et al. A hybrid chaos control approach of the performance measure functions for reliability-based design optimization[J]. *Computers & Structures*, 2015, **146**: 32-43.
- [19] LI Gang, MENG Zeng, HU Hao. An adaptive hybrid approach for reliability-based design optimization[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2015, **51**(5): 1051-1065.
- [20] Keshtegar B, Lee I. Relaxed performance measure approach for reliability-based design optimization[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2016, **54**(6): 1439-1454.
- [21] YI Ping, ZHU Zuo. Step length adjustment iterative algorithm for inverse reliability analysis [J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2016, **54**(4): 999-1009.
- [22] JIANG Chao, HAN Shuo, JI Meng, et al. A new method to solve the structural reliability index based on homotopy analysis[J]. *Acta Mechanica*, 2015, **226**(4): 1067-1083.

An Improved Adaptive Chaos Control Method for Inverse Reliability Analysis

LI Bin¹, HAO Peng¹, MENG Zeng², LI Gang¹

(1. *State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment (Dalian University of Technology)*; *Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, P.R.China*;

2. *School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, P.R.China*)

Abstract: The adaptive chaos control (ACC) method was an efficient and robust method for inverse reliability analysis. However, for strongly nonlinear concave performance functions, the computational efficiency of ACC still needs to be enhanced. Moreover, it might be trapped in the local optimum. Through revision of the update strategy for the chaos control factors, an improved adaptive chaos control method was presented for the inverse reliability analysis. Numerical results show that the proposed method effectively improves the rationality of adaptive selection of chaos control factors, so as to get better convergence and higher efficiency in computation. Furthermore, it makes a more efficient and robust approach for the reliability analysis and reliability-based design optimization.

Key words: inverse reliability analysis; chaos control; strong nonlinearity; local optimum; efficient and robust

Foundation item: The National Basic Research Program of China (973 Program) (2014CB046506;2014CB046803); The National Natural Science Foundation of China(11372061;11402049;11602076)

引用本文/Cite this paper:

李彬, 郝鹏, 孟增, 李刚. 基于改进自适应混沌控制的逆可靠度分析方法[J]. 应用数学和力学, 2017, 38(9): 979-987.

LI Bin, HAO Peng, MENG Zeng, LI Gang. An improved adaptive chaos control method for inverse reliability analysis[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2017, 38(9): 979-987.