

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2018.03.007

结构损伤识别中的生物地理学优化算法

张家超,杨海霞

(河海大学力学与材料学院,江苏 南京 210098)

摘要: 为将生物地理学优化(BBO)算法有效应用于结构损伤识别中,结合余弦迁移模型、自适应迁入函数和精英机制对算法进行改进。以简支梁结构为例,进行不同损伤情况下的损伤位置和损伤程度的识别。算例计算结果表明,改进后的算法在结构损伤识别中具有计算简便、收敛速度快、识别精度高、稳定性好的特点,相比于 BBO 性能明显提升,能够在结构损伤识别问题中加以有效地应用。
关键词: 生物地理学优化算法;结构损伤识别;简支梁;自适应迁入函数
中图分类号: TU311;O329 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2018)03-0234-06

Biogeography-based optimization algorithm for structural damage detection

ZHANG Jiachao, YANG Haixia

(College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to apply the biogeography-based optimization (BBO) algorithm to the structural damage detection, the algorithm is improved with the cosine migration model, the adaptive immigration function and the elitist mechanism. With the example of a simply supported beam under different damage situations, BBO algorithm is applied to detect not only the damage position but also the damage degree. The result indicates that compared with previous BBO algorithm, the improved one has the advantage of easier calculation, faster convergence speed, higher identification precision, and better stability, thus it can be effectively applied to the structural damage detection.
Key words: biogeography-based optimization algorithm; structural damage detection; simply supported beam; adaptive immigration function

随着现代工程技术的不断进步,结构体系的无损检测已成为国际学术和工程领域的热点问题。如何及早准确地检测出损伤,对损伤的位置及程度进行判定,对于保证结构的安全、延长结构的使用期限等具有重要的意义^[1-2]。

2008 年,美国学者 Simon 正式提出生物地理学优化(biogeography-based optimization, BBO)算法,其基础理论和数学模型来源于生物地理科学领域^[3]。在复杂经济问题、模糊系统、无功潮流优化、齿轮传动离散优化等方面已经验证该算法的有效性和优越性^[4-7],但是在工程结构领域,BBO 的相关应用研究甚少。针对生物地理学优化算法(BBO)易陷入局部最优、探索能力弱的缺点,结合余弦迁移模型、自适应迁入函数^[8]和精英机制,本文提出改进的生物地理学优化算法(improved biogeography-based optimization, IBBO),将其应用在结构损伤识别问题中来验证其对损伤识别的可行性和优越性。

作者简介: 张家超(1990—),男,硕士研究生,主要从事桥梁结构损伤识别研究。E-mail: bb99dh@qq.com
通信作者: 杨海霞,教授。E-mail: haixiayang@hhu.edu.cn
引用本文: 张家超,杨海霞. 结构损伤识别中的生物地理学优化算法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(3):234-239.
ZHANG Jiachao, YANG Haixia. Biogeography-based optimization algorithm for structural damage detection [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018, 46(3): 234-239.

1 BBO 算法

BBO 算法源于生物地理学理论的研究成果。美国学者 Simon 提出的 BBO 算法借鉴了生物地理学物种迁移模型,针对适应值进行最优化求解,经过测试函数的数值试验^[9],结果表明 BBO 算法具有明显的优越性。BBO 算法中设计以迁移算子、突变算子和去重算子模拟生物地理学中物种的迁徙、变异和灭绝,整合后的算法能够求解最优化问题。

生物地理学理论中,自然界物种受到自身内部和外部环境的影响,其种群分布于不同的地域,这种地域即为栖息地。由于受到诸如气候、水源和食物等多种因素的影响,物种种群会在不同栖息地之间产生迁徙现象。

每个栖息地适宜物种生存的程度由适宜度指数(habitat suitability index, HSI)来评价。适宜度指数的决定因素如:降雨量、温湿度等被统称为适宜度指数变量(suitability index variable, SIV)。HSI 能够表征该栖息地能够容纳物种种群的大小和数量,具有越高 HIS 的栖息地,其越适合物种生存,即可容纳越多数量的种群;反之则越不适合生存,其所容纳的种群数量也越少。

算法中每个个体均代表一个栖息地,通过物种之间的迁移与变异寻找最优解。设定算法中栖息地数量 N ,每个栖息地包含 D 个适应度指数变量(SIV),对应 D 维变量;栖息地 X_i 的适宜度通过 $f(X_i)$ 进行评价;栖息地 X_i 对应的当前物种数量 S_i 可根据 $f(X_i)$ 计算并设定种群最大数量 $S_{\max}$;设定系统迁移率 P_{mod} 和最大变异率 $m_{\max}$ 。

1.1 迁移

迁出率和迁入率作为 2 个重要指标,决定了栖息地间的物种迁出、迁入现象。栖息地 X_i 存在物种数量 S_i ,其相应的迁入率 λ_i 和迁出率 μ_i 可通过式(1)计算得到:

$$\lambda_i = I \left(1 - \frac{S_i}{S_{\max}} \right) \quad \mu_i = E \frac{S_i}{S_{\max}} \tag{1}$$

式中: I ——种群的最大迁入率; E ——种群的最大迁出率。

1.2 变异

栖息地 X_i 存在物种数量 S_i 的概率定义为 P_i ,由式(2)计算:

$$P_i = \begin{cases} -(\lambda_i + \mu_i)P_i + \mu_{i+1}P_{i+1} & S_i = 0 \\ -(\lambda_i + \mu_i)P_i + \lambda_{i-1}P_{i-1} + \mu_{i+1}P_{i+1} & 1 \leq S_i \leq S_{\max} - 1 \\ -(\lambda_i + \mu_i)P_i + \lambda_{i-1}P_{i-1} & S_i = S_{\max} \end{cases} \tag{2}$$

栖息地 X_i 的变异率 m_i 与其物种数概率 P_i 成反比,变异率 m_i 按式(3)计算:

$$m_i = m_{\max} \left(1 - \frac{P_i}{P_{\max}} \right) \tag{3}$$

式中: $P_{\max}$ ——物种数概率 P_i 的最大值。

2 改进的 BBO 算法

BBO 算法中,迁移机制对适宜度指数变量进行直接替换,容易降低算法的搜索能力,陷入局部最优;变异机制可能破坏高适应度的个体,导致种群中最优解在求解过程中丢失。为了优化算法性能,笔者对 BBO 算法进行如下改进。

- a. 为了对物种迁移过程进行更准确的模拟,引入更为符合自然规律的余弦迁移模型^[10]计算 λ_i 和 μ_i :
$$\lambda_i = \frac{I}{2} \left(\cos \frac{S_i \pi}{S_{\max}} + 1 \right) \quad \mu_i = \frac{E}{2} \left(-\cos \frac{S_i \pi}{S_{\max}} + 1 \right) \tag{4}$$
- b. 结合精英机制^[11]和自适应迁入函数^[12-13]对算法进行改进,既能增加搜索范围,避免算法陷入局部最优,也可使优秀的个体不断优化,避免较差的个体影响搜索结果:
 X_i 表示选中的待迁入地, X_{b1} 和 X_{b2} 为第一个和第二个精英个体,随机选择 X_{r1} 、 X_{r2} 、 X_{r3} 和 X_{r4} 4 个栖息地,则迁入地 X_i 第 j 维 SIV 因子 x_{ij} 求解函数可表示为

$$\begin{cases} x_{ij} = \frac{x_{b1j} + x_{b2j}}{2} + \alpha(x_{r1j} - x_{r2j}) + \beta(x_{r3j} - x_{r4j}) \\ \alpha = \mu_{r1} - \mu_{r2} \quad \beta = \mu_{r3} - \mu_{r4} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\mu_{r1}, \mu_{r2}, \mu_{r3}, \mu_{r4}$ ——与 $x_{r1}, x_{r2}, x_{r3}, x_{r4}$ 对应的迁出率; $x_{b1j}, x_{b2j}, x_{r1j}, x_{r2j}, x_{r3j}, x_{r4j}$ ——相应各栖息地在 SIV 因子上 j 维的值。

c. 按改进后的变异函数式(6),对栖息地 X_i 进行变异操作:

$$X_i = X_i + F(X_r - X_i) \quad (6)$$

式中: F ——服从 $[0,1]$ 上相互独立均匀分布的随机数; X_r ——随机选择的栖息地。

3 数值模拟算例

对一简支梁的损伤识别过程进行数值模拟^[14],并和 BBO 算法做相同条件下的性能对比,以验证 IBBO 算法在结构损伤识别中的性能和优越性。全长 $L=72\text{ m}$,横截面为矩形,宽 1 m ,高 1.8 m ,材料属性参数:弹性模量 $E_0=35.5\text{ GPa}$,泊松比 $\nu=0.1667$,密度 $\rho=2600\text{ kg/m}^3$,利用有限元软件 ANSYS 建模,共分为 36 个单元,如图 1 所示。

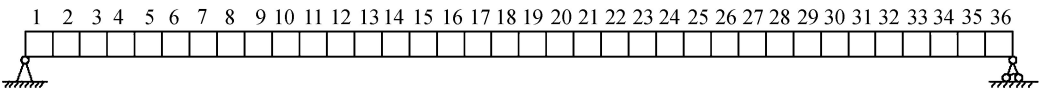


图 1 简支梁有限元模型
Fig.1 Finite element model of the simply supported beam

a. 损伤折减系数。结构损伤可表征为结构刚度的损失,通过构件弹性模量 E 的折减进行模拟^[15-16]。本文算例中设定单元损伤程度不超过 30%,既能验证算法的识别精度,也比较符合工程实际损伤情况。

b. 损伤预判。目前对于损伤个数的研究较为成熟,可利用柔度曲率方法对损伤个数进行初步判断,预判损伤大致位置和损伤个数^[17-18],同时可以有效规避对称性引起的错误结果。因此本文算例的结构损伤个数直接给出。

模态分析可获得待识别的损伤结构模型的自然频率 $\omega_i^r(i=1,2,\cdots,n)$,个体变量为 $(A_1\ B_1\ A_2\ B_2\ \cdots\ A_k\ B_k)$,其中 k 为损伤单元数, A_k 为损伤单元号, B_k 为对应损伤折减系数。采用前 10 阶频率设定目标函数 $F(x)$:

$$F(x) = \sum_{i=1}^{10} \left(\frac{|\left(\omega_i^r\right)^2 - \left(\omega_i^t\right)^2|}{\left(\omega_i^r\right)^2} \right) \quad (7)$$

式中: ω_i^r ——待识别结构的第 i 阶自然频率; ω_i^t ——结构试算的第 i 阶自然频率。

3.1 损伤识别程序步骤

步骤 1:算法中种群数量为 36,总迭代次数为 100,随机产生一组初代个体变量。

步骤 2:分析初代种群,以结构分析软件按式(7)计算个体变量的目标函数值,对种群排序并选出最优个体,判断迭代次数达到设定值则结束并输出结果,否则进行步骤 3。

步骤 3:按式(4)、式(5)进行迁移操作,产生一组新个体变量,若满足变异条件则按式(6)操作,返回步骤 2。

3.2 单损伤结构

分别选取 $1/4\text{ L}$ 、 $1/2\text{ L}$ 、 $3/4\text{ L}$ 处的单元并随机生成损伤折减系数。工况 1:损伤单元 9,损伤折减系数 0.79。工况 2:损伤单元 18,损伤折减系数 0.87。工况 3:损伤单元 27,损伤折减系数 0.93。单损伤结构各工况识别结果汇总统计见表 1。

表 1 单损伤识别输出结果
Table 1 Identification result of one-damage situation

工况	IBBO 识别单元号	BBO 识别单元号	IBBO 识别折减系数		BBO 识别折减系数	
			数值	相对误差/%	数值	相对误差/%
1	9	9	0.790058499	0.00741	0.771717742	-2.31422
2	18	8	0.870024041	0.00276	0.453300894	-47.89645
3	27	27	0.930069168	0.00744	0.845590493	-9.07629

单损伤算例中,IBBO 算法迭代过程如图 2(a)所示,3 种工况中 $F(x)$ 最终分别为 $1.857\,09\times10^{-5}$ 、 $9.887\,6\times10^{-6}$ 、 $1.661\,77\times10^{-5}$;BBO 算法迭代过程如图 2(b)所示,3 种工况中 $F(x)$ 最终分别为 $1.387\,604\times10^{-4}$ 、 $2.817\,955\,3\times10^{-3}$ 、 $1.350\,203\times10^{-4}$ 。

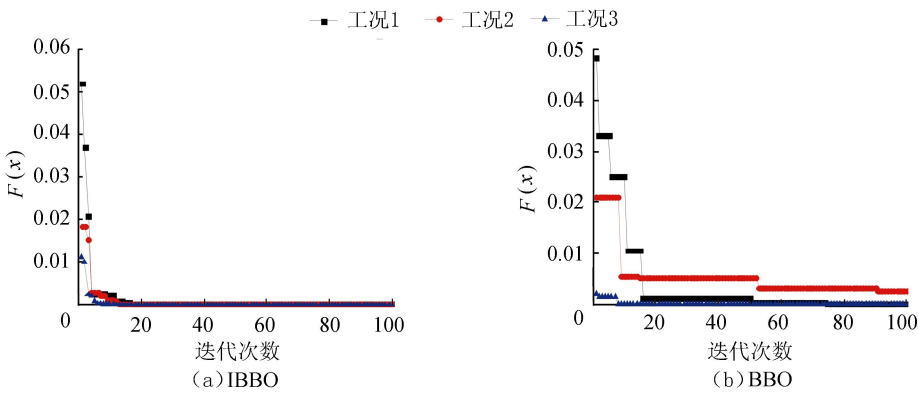


图 2 单损伤目标函数迭代过程

Fig. 2 Iterative process of the objective function in one-damage situation

IBBO 算法迭代约 20 次基本趋于收敛,收敛速度快,目标函数值显示拟合结果精度高,损伤单元识别准确,损伤程度识别误差较小;而 BBO 算法收敛速度较慢,输出结果不收敛,损伤单元和损伤程度的识别效果不佳,在工况 2 中无法识别损伤单元且损伤程度的识别误差近 50%,在工况 3 中损伤程度识别误差近 10%,无法满足要求。综上可见,BBO 算法不可行,IBBO 算法应用于单损伤识别是可行、高效和准确的。

3.3 双损伤结构

设定分别随机选取左右半幅任一、同一幅任意 2 个、1/2 L 处单元加任一单元的 3 种工况并随机生成损伤折减系数。工况 1:损伤单元 12 和 20,对应损伤折减系数为 0.94 和 0.73。工况 2:损伤单元 8 和 15,对应损伤折减系数为 0.81 和 0.96。工况 3:损伤单元 18 和 30,对应损伤折减系数为 0.82 和 0.77。双损伤结构各工况识别结果汇总统计见表 2。

表 2 双损伤识别输出结果

Table 2 Identification result of two-damage situation

工况	IBBO 识别单元号	BBO 识别单元号	IBBO 识别折减系数		BBO 识别折减系数	
			数值	相对误差/%	数值	相对误差/%
1	12	12	0.940284497	0.00303	0.1042885172	-88.90548
	20	11	0.7300137956	0.00189	0.7530526786	3.15790
2	8	30	0.8100572037	0.00706	0.8118703953	3.17966
	15	15	0.9599594559	-0.00422	0.9646546269	0.48486
3	18	6	0.8200331522	0.00404	0.8144818292	-0.67295
	30	30	0.7699920286	-0.00104	0.9346705807	21.38579

双损伤算例中,IBBO 算法迭代过程如图 3(a)所示,3 种工况中 $F(x)$ 最终分别为 $2.075\,73\times10^{-5}$ 、 $1.241\,12\times10^{-5}$ 、 1.31772×10^{-5} ;BBO 算法迭代过程如图 3(b)所示,3 种工况中 $F(x)$ 最终分别为 $7.399\,1089\times10^{-3}$ 、 $2.221\,420\,3\times10^{-3}$ 、 $1.967\,398\,1\times10^{-3}$ 。

IBBO 算法迭代约 25 次基本趋于收敛,收敛速度快,目标函数值显示拟合结果精度高,损伤单元识别准确,损伤程度识别误差较小;而 BBO 算法收敛速度较慢,输出结果不收敛,在 3 种工况中均无法准确识别损伤单元,工况 1 和 3 中损伤程度的识别误差分别超过 80% 和 20%,无法满足要求。综上可见,BBO 算法不可行,IBBO 算法应用于多损伤识别是可行、高效和准确的。

3.4 三损伤结构

设定分别选取 1/2 L 处单元加左右半幅任一、同一幅 2 个加另一幅任一、同一幅任意 3 个单元的 3 种工况并随机生成损伤折减系数。工况 1:损伤单元 7、18 和 29,对应损伤折减系数为 0.94、0.86 和 0.79。工况 2:损伤单元 4、11 和 30,对应损伤折减系数为 0.82、0.76 和 0.91。工况 3:损伤单元 5、9 和 13,对应损伤折减系数为 0.78、0.93 和 0.87。三损伤结构各工况识别结果汇总统计见表 3。

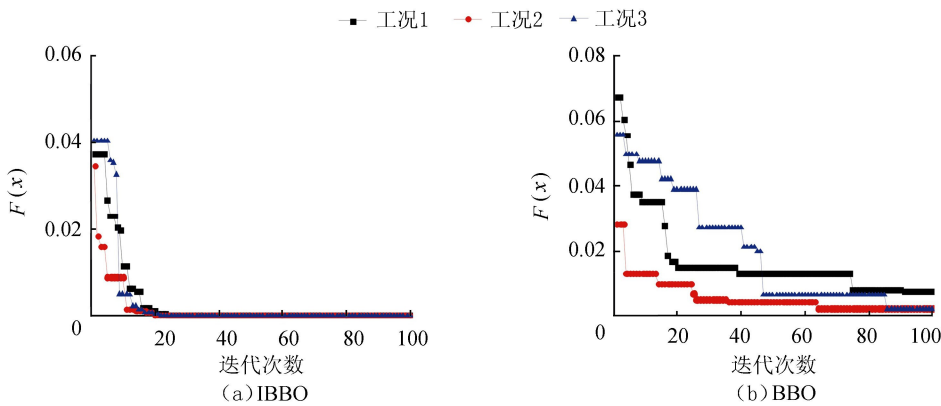


图3 双损伤目标函数迭代过程

Fig.3 Iterative process of the objective function in two-damage situation

表3 三损伤识别输出结果

Table 3 Identification result of three-damage situation

工况	IBBO 识别单元号	BBO 识别单元号	IBBO 识别折减系数		BBO 识别折减系数	
			数值	相对误差/%	数值	相对误差/%
1	7	17	0.940 010 082 3	0.001 07	0.933 197 014 9	-0.723 72
	18	18	0.860 044 425 3	0.005 17	0.891 891 922 2	3.708 36
	29	29	0.789 968 001 6	-0.004 05	0.767 668 513 7	-2.826 77
2	4	4	0.820 093 363 7	0.011 39	0.822 418 576 1	0.294 95
	11	12	0.759 974 530 2	-0.003 35	0.743 420 279 8	-2.181 54
	30	27	0.909 957 341 2	0.004 69	0.929 283 253 9	2.119 04
3	5	5	0.780 016 806 6	0.002 16	0.824 427 900 7	5.695 89
	9	10	0.930 001 647 3	0.000 18	0.911 872 400 9	-1.949 20
	13	4	0.869 973 188 4	-0.003 08	0.850 838 458 8	-2.202 48

三损伤算例中,IBBO 算法迭代过程如图 4(a) 所示,3 种工况中 $F(x)$ 最终分别为 $1.484\,03\times10^{-5}$ 、 $1.404\,61\times10^{-5}$ 、 $1.269\,13\times10^{-5}$;BBO 算法迭代过程如图 4(b) 所示,3 种工况中 $F(x)$ 最终分别为 $9.241\,390\,9\times10^{-3}$ 、 $2.556\,724\,12\times10^{-2}$ 、 $2.230\,381\,26\times10^{-2}$ 。

IBBO 算法迭代约 35 次基本趋于收敛,收敛速度快,目标函数值显示拟合结果精度高,损伤单元识别准确,损伤程度识别误差较小;而 BBO 算法收敛速度较慢,输出结果不收敛,在 3 种工况中均无法准确识别损伤单元,损伤程度的识别精度也远不如 IBBO 算法。综上可见,BBO 算法不可行,IBBO 算法应用于多损伤识别是可行、高效和准确的。

4 结 论

- a. 生物地理学优化(BBO)算法是基于生物种群之间的迁移规律的新型智能优化算法。结合余弦迁移模型、自适应迁入函数和精英机制,笔者提出改进的生物地理学优化算法 (IBBO) 在结构损伤识别问题中更为合理简便,性能明显提升。
- b. 应用 IBBO 算法解决不同情况的损伤识别问题并与 BBO 算法作对比,结果显示 BBO 算法在损伤识别中收敛速度较慢,出现了无法识别的情况,且识别精度无法满足要求,表明简单地利用 BBO 算法进行损伤识别是不可行的;而 IBBO 算法收敛速度快,识别精度高,表明基于 BBO 算法进行改进后,改进的算法在结构损伤识别中是可行高效且较准确的。

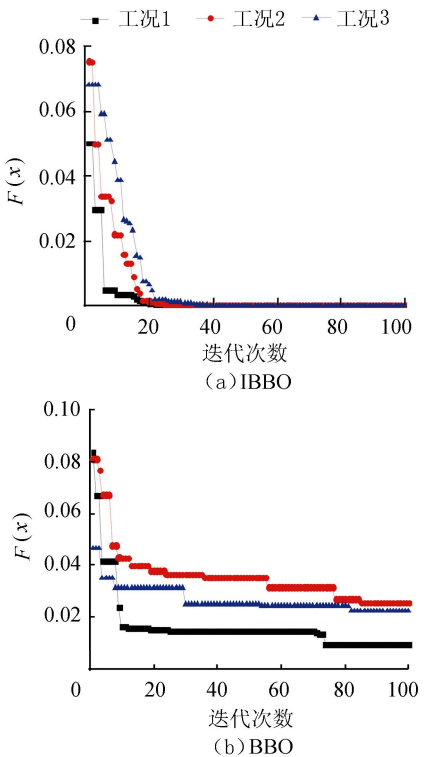


图4 三损伤目标函数迭代过程

Fig.4 Iterative process of the objective function in three-damage situation

c. BBO 算法作为新型智能算法在结构损伤识别中的研究较少, 仍有许多待改进和开发之处, 本文旨在验证其在结构损伤识别中的可行性与高效性, 下一步将在实际工程问题中检验其损伤识别的性能并针对算法的抗噪声能力进行验证和改进。

参考文献:

- [1] 王步宇. 结构损伤的遗传神经网络检测方法[J]. 噪声与振动控制, 2005(4):11-13. (WANG Buyu. A neural network based on genetic algorithm for structural damage detection[J]. Noise and Vibration Control, 2005(4):11-13. (in Chinese))
- [2] 陈海胜. 基于小波变换的桥梁损伤识别研究[J]. 四川建筑科学研究, 2010, 36(5):72-74. (CHEN Haisheng. Study on methods of damage identification of bridge based on wavelet transform[J]. Sichuan Building Science, 2010, 36(5):72-74. (in Chinese))
- [3] MA Haiping. An analysis of the equilibrium of migration models for biogeography-based optimization[J]. Information Sciences, 2010, 180(18):3444-3464.
- [4] ANIRUDDHA B. Solving complex economic load dispatch problems using biogeography-based optimization[J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37(5):3605-3615.
- [5] KUMAR S, BHALLA P, SINGH A. P. Fuzzy rule base generation from numerical data using biogeography-based optimization[J]. IE (I) Journal-ET, 2009, 90(7):1-6.
- [6] PANCHAL VK, SINGH P, KAUR N. Biogeography based satellite image classification[J]. International Journal of Computer Science and Information Security, 2009, 6(2):269-274.
- [7] SAVSANIVJ. Discrete optimisation of a gear train using biogeography based optimisation technique[J]. International Journal of Design Engineering, 2009, 2(2):205-223.
- [8] 范会联, 曾广朴. 带自适应迁入的生物地理学优化算法[J]. 计算机应用研究, 2015, 32(12):3642-3645. (FAN Huilian, ZENG Guangpu. Biogeography-based optimization with self-adaptive immigrate[J]. Application Research of Computers, 2015, 32(12):3642-3645. (in Chinese))
- [9] 王存睿, 王楠楠, 段晓东, 等. 生物地理学优化算法综述[J]. 计算机科学, 2010, 37(7):34-38. (WANG Cunrui, WANG Nannan, DUAN Xiaodong, et al. Survey of biogeography based optimization[J]. Computer Science, 2010, 37(7):34-38. (in Chinese))
- [10] 马海平, 李雪, 林升东. 生物地理学优化算法的迁移率模型分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2009(增刊1):17-21. (MA Haiping, LI Xue, LIN Shengdong. Analysis of migration rate models for biogeography-based optimization[J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2009(Sup1):17-21. (in Chinese))
- [11] 吴志峰, 杨海霞, 储迅易. 工程结构优化中的改进生物地理学优化算法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2015, 43(4):324-307, 328. (WU Zhifeng, YANG Haixia, CHU Xunyi. Improved biogeography-based optimization algorithm for optimization design of engineering structure[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2015, 43(4):324-307, 328. (in Chinese))
- [12] CHEN Z P, YU L. A novel PSO-based algorithm for structural damage detection using Bayesian multi-sample objective function[J]. Structural Engineering and Mechanics, 2017, 63(6):825-835.
- [13] PAN C D, YU L, CHEN Z P. A hybrid self-adaptive Firefly-Nelder-Mead algorithm for structural damage detection[J]. Smart Structures and Systems, 2016, 17(6):957-980.
- [14] 李建波, 王琪. 基于用户可编程特征的 ANSYS 结构静动力损伤破坏分析与建模[J]. 计算机应用, 2015, 35(增刊2):305-307, 318. (LI Jianbo, WANG Qi. Analysis and modeling of structural static-dynamic damage based on ANSYS with user programmable feature[J]. Journal of Computer Applications, 2015, 35(Sup2):305-307, 318. (in Chinese))
- [15] 王云, 郝际平. 弹性损伤理论的几何-拓扑描述[J]. 工程力学, 2008, 25(5):60-66. (WANG Yun, HAO Jiping. Geometrical topology of elastic damage theory[J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(5):60-66. (in Chinese))
- [16] 唐雪松, 蒋持平, 郑健龙. 弹性损伤的一般理论[J]. 北京航空航天大学学报, 2001, 27(1):69-72. (TANG Xuesong, JIANG Chiping, ZHENG Jianlong. A general theory for elastic damage[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2001, 27(1):69-72. (in Chinese))
- [17] FRITZEN C P, BOHLE K. Identification of damage in large scale structures by means of measured FRFs: procedure and application to the I-40-highway-bridge[J]. Key Engineering Materials, 1999, 167/168:310-319.
- [18] 赵媛, 陆秋海. 简支梁桥多位置损伤的检测方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2002, 42(4):434-438. (ZHAO Yuan, LU Qiuhai. Multiple damage detection of simply supported beam bridges[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2002, 42(4):434-438. (in Chinese))