

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2015.04.008

# 工程结构优化中的改进生物地理学优化算法

吴志锋, 杨海霞, 储迅易

(河海大学力学与材料学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 为改进生物地理学优化(BBO)算法在工程结构优化设计中的性能,引入非线性物种迁移模型和“精英引导”等思想对BBO算法进行改进,并将算法应用于结构工程优化领域。以2个连续变量的经典桁架结构为例,进行结构在满足各项约束条件下质量最小的优化设计。数值算例表明,改进算法应用于工程结构优化设计时具有收敛速度快、稳定性好的特点,性能比BBO算法有较大提升,可以有效地应用于工程结构优化设计。

**关键词:** BBO 算法;改进优化算法;工程结构优化;桁架;非线性物种迁移模型

**中图分类号:** O224; TU318      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-1980(2015)04-0324-05

## Improved biogeography-based optimization algorithm for optimization design of engineering structure

WU Zhifeng, YANG Haixia, CHU Xunyi

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

**Abstract:** In order to improve the performance of the biogeography-based optimization (BBO) algorithm applied to optimization design of engineering structures, an improved BBO algorithm was proposed through introduction of a nonlinear model for migrating species and an idea of “elite guidance”. The improved algorithm was then applied to optimization design for structural engineering. Taking classical truss structures with two continuous variables as examples, optimization design of structures with a minimum mass under the constraints was performed. Numerical experiments show that the improved algorithm has faster convergence speed, better stability, and better performance as compared with the BBO algorithm, and can be effectively applied to optimization design of engineering structures.

**Key words:** BBO algorithm; improved optimization method; engineering structural optimization; truss; nonlinear model for migrating species

近几十年来,诸如遗传算法(GA)、粒子群优化算法(PSO)、蚁群算法(ACO)等智能进化算法得到了长足的研究和发展,并在工程优化领域得到了广泛研究<sup>[1-4]</sup>。2008年,美国学者 Simon<sup>[5]</sup>借鉴生物地理学的规律和方法提出一种基于生物地理学的优化(BBO)算法,并应用于求解优化问题。由于该算法具有参数少、易实现、稳定性好等特点而被广泛关注。经过近几年的研究,该算法已被成功应用于模糊系统<sup>[6]</sup>、复杂经济问题<sup>[7]</sup>、齿轮传动离散优化<sup>[8]</sup>、无功潮流优化问题<sup>[9]</sup>等方面,但将该算法应用于工程结构优化的研究甚少。为克服BBO算法易陷入局部最优、探索能力弱的缺点,笔者引入非线性物种迁移模型及“精英引导”思想,提出一种改进的生物地理学优化(IBBO)算法,并将其应用于结构优化中。

## 1 BBO 算法及其改进

### 1.1 BBO 算法

借鉴生物地理学中的物种迁移模型,并以适应值最优化为目标,Simon<sup>[5]</sup>提出了BBO算法,测试函数的

收稿日期: 2014-12-12

作者简介: 吴志锋(1989—),男,广东梅州人,硕士研究生,主要从事优化算法及结构优化设计研究。E-mail: Zhifeng\_Wu@126.com

通信作者: 杨海霞,教授。E-mail: haixiayang@hhu.edu.cn

数值试验<sup>[10]</sup>表明,该算法具有很好的性能。

BBO 中每个个体均被设为一个栖息地,通过栖息地间个体的迁移与突变寻找最优解。算法中设定存在  $n$  个栖息地,每个栖息地由  $D$  维的适宜值指数变量 ( $V$ ) 构成,代表优化问题的潜在解;栖息地  $H_i$  的适宜值可表示为  $f(x_i)$ ;全局变量还有系统迁移率  $P_{\text{mod}}$  和最大突变率  $m_{\text{max}}$ 。

栖息地现有种群数量  $s$  根据  $f(x_i)$  计算,且  $s \leq S_{\text{max}}$  (栖息地所能容纳的最大种群数);设当前栖息地包含  $s$  种物种,则其对应的迁入率  $\lambda_s$  和迁出率  $\mu_s$  可通过式(1)计算:

$$\lambda_s = I \left( 1 - \frac{s}{S_{\text{max}}} \right) \quad \mu_s = \frac{Es}{S_{\text{max}}} \quad (1)$$

式中: $I$ ——种群的最大迁入率; $E$ ——种群的最大迁出率。

栖息地  $H_i$  容纳  $s$  种生物种群的概率  $P_s$  为

$$P_s = \begin{cases} -(\lambda_s + \mu_s) P_s + \mu_{s+1} P_{s+1} & s = 0 \\ -(\lambda_s + \mu_s) P_s + \mu_{s-1} P_{s-1} + \mu_{s+1} P_{s+1} & 1 < s \leq S_{\text{max}} - 1 \\ -(\lambda_s + \mu_s) P_s + \mu_{s-1} P_{s-1} & s = S_{\text{max}} \end{cases} \quad (2)$$

BBO 算法考虑突变时,物种数量为  $s$  的栖息地突变率  $m_s$  按式(3)计算:

$$m_s = m_{\text{max}} \left( 1 - \frac{P_s}{P_{\text{max}}} \right) \quad (3)$$

其中

$$P_{\text{max}} = \max \{ P_s \}$$

## 1.2 IBBO 算法

BBO 算法中迁移是主要的操作,能较好地利用栖息地间的信息,提高解的质量,使算法开发能力得以提升。但该操作只是用优良解的适宜值指数变量简单代替劣质解的适宜值指数变量,易造成同质现象,致使种群的多样性偏差,导致陷入局部最优解。同时,算法的进化过程中,优良解进化的几率很低,算法的收敛速度受到影响,即算法的探索能力弱。为克服这些缺点,对 BBO 算法进行改进。

a. 为更加符合自然界中物种的迁移行为,采用文献[11]中效果最好的非线性迁移模型:

$$\lambda_s = \frac{I}{2} \left( \cos \frac{s\pi}{S_{\text{max}}} + 1 \right) \quad \mu_s = \frac{E}{2} \left( -\cos \frac{s\pi}{S_{\text{max}}} + 1 \right) \quad (4)$$

b. 在保存算法原有开发能力的前提下,引入“精英领导”及“差分”的思想改进 BBO 的迁移操作:

$$V_{H_i} = \frac{V_{He1} + V_{He2}}{2} + F \cdot (V_{Hr1} - V_{Hr2}) + F \cdot (V_{Hr3} - V_{Hr4}) \quad (5)$$

式中: $V_{H_i}$ ——栖息地  $H_i$  的  $V$ ;  $V_{He1}$ 、 $V_{He2}$ ——第 1 个、第 2 个精英个体的  $V$ ;  $V_{Hr1}$ 、 $V_{Hr2}$ 、 $V_{Hr3}$ 、 $V_{Hr4}$ ——随机选择的 4 个不同  $V$ ;  $F$ ——缩放因子,取 0.5。

c. 保留突变操作,当栖息地满足突变条件时,突变操作按式(6)进行:

$$V_{H_i} = V_{H_i} + r \cdot (V_{Hr} - V_{H_i}) \quad (6)$$

式中: $r$ ——服从  $[0,1]$  上相互独立均匀分布的随机数; $V_{Hr}$ ——随机选择的一组  $V$ 。

## 2 桁架结构截面尺寸优化设计

### 2.1 桁架截面尺寸优化设计问题的数学描述

桁架结构在满足杆件许用应力和节点位移约束条件下的质量最轻优化问题,用数学描述如下:

$$\begin{cases} \min W = \sum_{b=1}^N \rho l_b A_b \\ \text{s.t.} \quad \sigma_b \leq [\sigma_b] & (b = 1, 2, \dots, N) \\ w_j \leq [w_j] & (j = 1, 2, \dots, M) \\ A_{b,\min} \leq A_b \leq A_{b,\max} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $W$ ——结构总质量; $\rho$ ——杆件的密度; $l_b$ ——第  $b$  杆的长度; $A_b$ ——第  $b$  杆的面积; $\sigma_b$ ——第  $b$  杆的应力; $[\sigma_b]$ ——第  $b$  杆的许用应力; $w_j$ ——第  $j$  节点的位移; $[w_j]$ ——第  $j$  节点的允许位移; $N$ ——结构的杆件

总数; $M$ ——结构节点总数; $A_{b,max}$ ——杆件面积的取值上限; $A_{b,min}$ ——杆件面积的取值下限。

2.2 基于 IBBO 算法的结构尺寸优化程序步骤

步骤 1:输入 IBBO 参数,如迁移概率、变异概率及精英数目等,初始化 IBBO 种群,使初代个体变量随机在搜索空间中产生。

步骤 2:对初始的种群进行结构分析,计算每个个体的结构形态变量,如各杆的应力和节点位移等,计算每个个体的适应值,对违反约束的个体叠加上一个非常大的常数罚值,并选出最优个体及精英个体。

步骤 3:根据算法原理产生新一代个体,如满足突变,则按式(6)操作,计算每个个体的结构形态变量及适应值,对违反约束的个体叠加一个非常大的常数罚值,选出最优及精英个体替换现有最优及精英个体。

步骤 4:判断是否满足停止条件,若满足则停止优化进程,输出优化结果;否则返回步骤 3。

2.3 桁架截面尺寸优化算例

用 IBBO 算法对几个经典的桁架优化算例进行尺寸优化设计,为避免参数对优化结果产生较大影响,按算法惯例在本文算例中取精英个数为 2, $m_{max}=0.01$ 、 $E=1$ 、 $J=1$ 、 $P_{mod}=1$ ,其他参数参考文献[12-15]选取。

例 1 图 1 所示的 25 杆桁架中  $l=635\text{ mm}$ ,各杆弹性模量为  $68\,950\text{ MPa}$ ,密度为  $2\,768\text{ kg/m}^3$ 。节点荷载见表 1,杆件分组及允许压应力见表 2,杆件允许拉应力  $[\sigma^+]=241.325\text{ MPa}$ ,节点  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的最大位移约束为  $\pm 8.89\text{ mm}$ 。算例截面面积设计变量下限为  $6.4516\text{ mm}^2$ 、上限为  $2\,193.5\text{ mm}^2$ 。

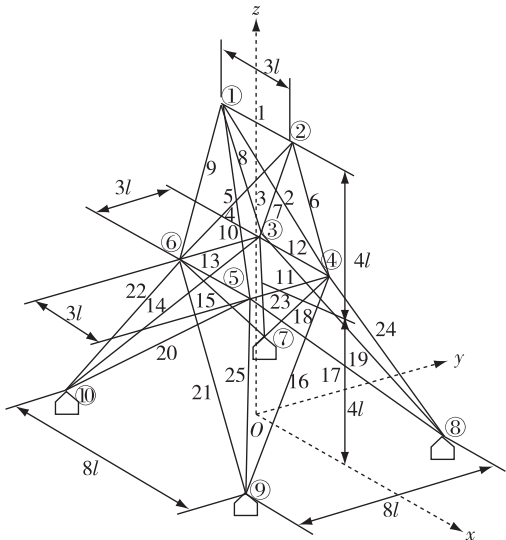


图 1 25 杆桁架  
Fig. 1 Configuration of 25-bar truss

采用 IBBO 算法随机优化 5 次及 BBO 算法随机优化 3 次,每一代的个体数目为 40,总迭代次数为 200,杆件面积优化结果及优化历程曲线见表 3、图 2。IBBO 算法迭代约 70 次已基本收敛,最优解为  $247.327\text{ kg}$ ,最差解为  $247.775\text{ kg}$ ,均值为  $247.464\text{ kg}$ ,标准差为  $0.161$ ;BBO 算法的最优解为  $250.80\text{ kg}$ 。IBBO 算法不仅得到的最优解和平均解优于文献[12-14],而且所得结果的标准差较小,表明 IBBO 算法具有较强的寻优能力且较稳定,性能上有较大提升。

例 2 图 3 为 72 杆的空间桁架结构,按对称性将杆件分为 16 组(表 4),节点荷载如下:工况 1,节点编号为 ① ② ③ ④,  $F_x$  和  $F_y$  皆为  $0\text{ kN}$ ,  $F_z$  皆为  $-22.241\text{ kN}$ 。工况 2,节点编号为 ①,  $F_x$  和  $F_y$  皆为  $22.241\text{ kN}$ ,  $F_z$  为  $-22.241\text{ kN}$ 。杆件的弹性模量为

表 1 25 杆桁架荷载

Table 1 Loading conditions for 25-bar truss

| 工况 | 节点编号 | $F_x/\text{kN}$ | $F_y/\text{kN}$ | $F_z/\text{kN}$ |
|----|------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 1  | ①    | 4.448           | 44.482          | -22.241         |
|    | ②    | 0               | 44.482          | -22.241         |
|    | ③    | 22.241          | 0               | 0               |
|    | ⑥    | 22.241          | 0               | 0               |
| 2  | ①    | 0               | 88.964          | -22.241         |
|    | ②    | 0               | -88.964         | -22.241         |

表 2 25 杆空间桁架截面分组

Table 2 Classification of bars of 25-bar truss

| 组别 | 杆件号     | $[\sigma^-]/\text{MPa}$ | 组别 | 杆件号         | $[\sigma^-]/\text{MPa}$ |
|----|---------|-------------------------|----|-------------|-------------------------|
| A1 | 1       | 241.959                 | A5 | 12、13       | 241.969                 |
| A2 | 2、3、4、5 | 79.913                  | A6 | 14、15、16、17 | 46.603                  |
| A3 | 6、7、8、9 | 119.318                 | A7 | 18、19、20、21 | 47.982                  |
| A4 | 10、11   | 241.959                 | A8 | 22、23、24、25 | 76.401                  |

表 3 25 杆桁架杆件截面面积优化结果

Table 3 Optimized cross-sectional areas of bars of 25-bar truss

| 杆件编号 | 杆件截面面积/ $\text{mm}^2$ |                 |                |
|------|-----------------------|-----------------|----------------|
|      | IBBO 算法<br>(最优)       | IBBO 算法<br>(最差) | BBO 算法<br>(最优) |
| 1    | 12.379                | 57.477          | 16.238         |
| 2    | 1297.248              | 1324.919        | 1036.085       |
| 3    | 1909.507              | 1883.758        | 2009.982       |
| 4    | 6.452                 | 6.805           | 15.373         |
| 5    | 6.749                 | 6.484           | 12.175         |
| 6    | 450.922               | 482.944         | 429.357        |
| 7    | 1078.300              | 1064.985        | 1347.461       |
| 8    | 1712.031              | 1685.772        | 1638.902       |

68 950 MPa, 密度为 2 768 kg/m<sup>3</sup>, 长度  $L=1\,524\text{ mm}$ 。要求顶层节点沿  $x,y$  方向的位移不超过 6.35 mm, 杆件最大允许应力 $[\sigma]=\pm 172.375\text{ MPa}$ 。算例截面算法设计变量下限为 64.516 mm<sup>2</sup>、上限为 1 935.48 mm<sup>2</sup>。这是一个多工况且变量维数较高(16 维)的优化问题, 采用传统的优化算法难以求解。

采用 BBO 算法随机优化 3 次及 IBBO 算法随机优化 5 次, 设置种群数为 80, 总迭代次数为 300, 优化收敛历程曲线见图 4, 杆件面积优化结果见表 4。从图 4 可以看出, IBBO 算法平均迭代约 140 次时曲线已经基本收敛, 收敛速度较快。IBBO 算法所得最优解为 170.431 kg, 最差解为 172.325 kg, 均值为 171.88 kg, BBO 算法的最优解为 227.592 kg, 均优于文献[12-15]的计算结果, 表明 IBBO 算法不仅可行, 而且具有较强的寻优能力。同时, 标准方差 0.809 5 说明算法具有较好的稳定性。

表 4 72 杆桁架杆件截面面积优化结果

Table 4 Optimized cross-sectional areas of bars of 72-bar truss

| 杆件编号  | 杆件截面面积/mm <sup>2</sup> |           |         |
|-------|------------------------|-----------|---------|
|       | IBBO(最好)               | IBBO(最差)  | BBO(最好) |
| 1-4   | 101.167                | 100.961   | 85.291  |
| 5-12  | 359.381                | 352.157   | 626.196 |
| 13-16 | 232.786                | 264.742   | 188.000 |
| 17-18 | 360.953                | 367.356   | 267.825 |
| 19-22 | 323.468                | 334.281   | 451.423 |
| 23-30 | 339.026                | 336.091   | 336.800 |
| 31-34 | 65.113                 | 64.601    | 100.352 |
| 35-36 | 64.517                 | 64.860    | 372.623 |
| 37-40 | 864.261                | 817.840   | 676.071 |
| 41-48 | 327.939                | 327.191   | 755.666 |
| 49-52 | 64.864                 | 68.906    | 213.478 |
| 53-54 | 64.596                 | 64.516    | 230.299 |
| 55-58 | 1 192.605              | 1 218.774 | 737.022 |
| 59-66 | 310.771                | 330.986   | 285.755 |
| 67-70 | 64.526                 | 64.516    | 66.220  |
| 71-72 | 64.713                 | 64.667    | 146.183 |

以上 2 个连续变量的桁架结构尺寸优化算例表明, IBBO 算法较 BBO 算法在结构工程优化应用中的性能有很大提升, 能够较好地求解连续变量的结构尺寸优化问题。

3 结 语

a. BBO 算法是一个新型的基于生物地理学的启发式算法, 具有参数少、稳定性好的特点。本文提出的改进 BBO 算法不但没有增加太多编程工作量, 而且相对于其他算法, 该算法原理简单、便易实现。与 BBO 算法相比, IBBO 算法收敛速度快、稳定性好, 在性能上有较大提升。

b. 由连续变量的桁架结构尺寸优化结果表明, IBBO 算法得到的最优值和标准方差比 GA、PSO 等算法要优, 收敛速度更快, 稳定性更好。数值结果表明, IBBO 算法应用于工程结构的优化设计是可行、有效的。

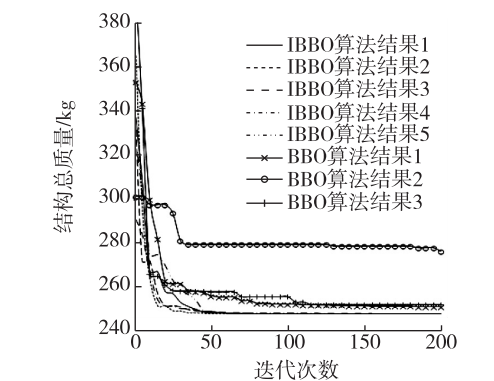


图 2 25 杆桁架优化收敛历程曲线

Fig. 2 Convergence history for 25-bar truss design

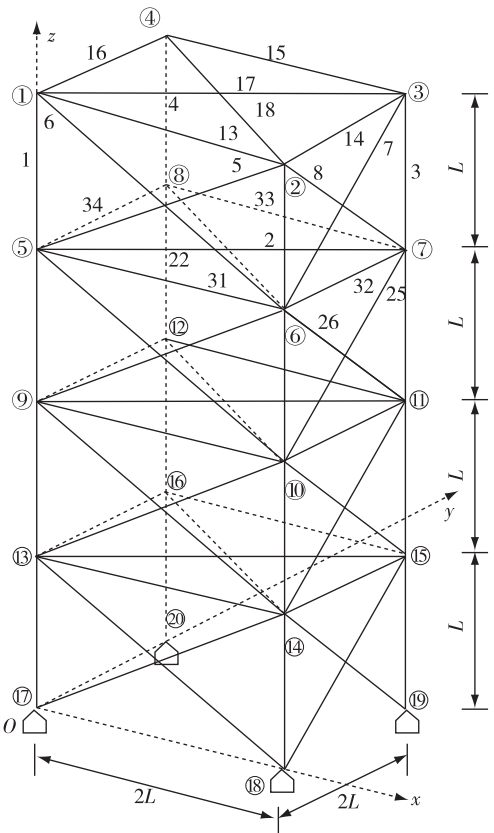


图 3 72 杆桁架

Fig. 3 Configuration of 72-bar truss

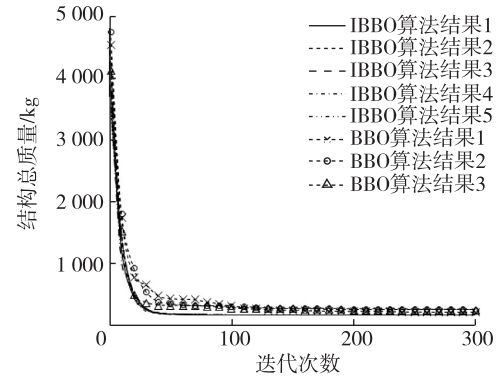


图 4 72 杆桁架优化收敛历程曲线

Fig. 4 Convergence history for 72-bar truss design

## 参考文献:

- [1] 杨海霞, 谢轶鹏. 一种改进的遗传算法及其在结构优化设计中的应用[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2007, 35(6): 660-663. (YANG Haixia, XIE Yipeng. An improved genetic algorithm and its application to structural design optimization[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2007, 35(6): 660-663. (in Chinese))
- [2] 朱杰, 蔡新, 潘盼, 等. 风力机叶片结构参数敏感性分析及优化设计[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2015, 43(2): 156-162. (ZHU Jie, CAI Xin, PAN Pan, et al. Parameter sensitivity analysis and optimization for structure of wind turbine blades [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2015, 43(2): 156-162. (in Chinese))
- [3] SHI Yuhui, EBERHART R C. Empirical study of particle swarm optimization[J]. Proc of Congress on Evolutionary Computation, 1999, 3: 1945-1950.
- [4] SURESH S, SUJIT P B, RAO A K. Particle swarm optimization approach for multi objective composite box-beam design[J]. Composite Structures, 2007, 81: 589-605.
- [5] SIMON D. Biogeography based optimization[J]. IEEE Trans Evolutionary Computation, 2008, 12(6): 702-713.
- [6] KUMAR S, BHALLA P, SINGH A P. Fuzzy rule base generation from numerical data using biogeography-based optimization [J]. IE (I) Journal of ET, 2009, 90(7): 1-12.
- [7] BHATTACHARYA A, CHATTOPADHYAY P K. Solving complex economic load dispatch problems using biogeography-based optimization[J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37(5): 3605-3615.
- [8] SAVSANI V J, RAO R V, VAKHARIA D P. Discrete optimization of a gear train using biogeography based optimization technique[J]. International Journal of Design Engineering, 2009, 2(2): 205-223.
- [9] PANCHAL V K, SINGH P, KAUR N, et al. Biogeography based satellite image classification [J]. International Journal of Computer Science and Information Security, 2009, 6(2): 269-274.
- [10] 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))
- [11] 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, 39(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, 39 (Sup1): 17-21. (in Chinese))
- [12] CAMP C V, BICHIN B J. Design of space trusses using ant colony optimization[J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(5): 741-751.
- [13] GHHUTTE J J, GROENWOLD A A. Sizing design of truss structures using particle swarms[J]. Struct Multidiscip Optim, 2003, 5: 261-269.
- [14] CAMP C V. Design of space trusses using big bang-big crunch optimization[J]. Journal of Structural Engineering, 2007, 133(7): 999-1008.
- [15] CAO Guozhong. Optimized design of framed structures using a genetic algorithm[D]. Reston: University of Memphis, 1996.