

文章编号: 1673-9469(2012)01-0005-03

## 基于人工鱼群算法的桁架结构的优化

李彦苍<sup>1</sup> 程芳萌<sup>1</sup> 杨贝贝<sup>1</sup> 张学志<sup>2</sup>

(1. 河北工程大学 土木工程学院, 河北 邯郸 056038; 2. 滨州运通房地产开发有限公司 山东 滨州 256600)

**摘要:** 针对基本人工鱼群算法在解决桁架结构优化问题时存在的后期收敛速度慢、寻优精度不高等缺陷, 在算法初期采用 Logistic 方程初始化解群, 提高求解效率和质量, 在算法运行过程中利用粒子群优化算法惯性权重调整策略对人工鱼的步长进行改进, 以提高寻优的速度和精度。将改进后的算法应用到桁架结构优化中, 以桁架截面尺寸为设计变量, 结构最小重量为目标函数建立优化设计模型, 运用 MATLAB 进行模型优化分析, 并与其它算法优化结果进行对比。结果表明, 改进的算法在收敛速度与寻优精度方面均有所提高, 尤其在迭代计算的初期, 效果非常明显。

**关键词:** 人工鱼群算法; 尺寸优化; 桁架; 自适应; 混沌

中图分类号: TU323

文献标识码: A

## Improved artificial fish swarm algorithm and its application to the structural optimum design of the truss

LI Yan - cang<sup>1</sup>, CHENG Fang - meng<sup>1</sup>, YANG Bei - bei<sup>1</sup>, ZHANG Xue - zhi<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Hebei Handan 056038, China;

2. Binzhou Yuntong Real Estate Development Com. Ltd., Shandong Binzhou 256600, China)

**Abstract:** In view of the slow convergence and low accuracy of the artificial fish - swarm algorithm for the optimal design of truss structures, the Logistic equation was used to initialize the fish group to improve the efficiency and quality of solution on the initial stage of the algorithm, and the inertia weight adjustment strategy of particle swarm optimization was used to adjust the artificial fish's vision and to step to raise the speed and accuracy of optimization in the process of operation. Then the improved artificial fish - swarm algorithm was applied to the truss structural optimization, and the optimal design model was established with the section size of the truss as the design variable, the minimum structural weight of structure as the objective function. The Matlab was used for the optimization analysis of the model, and the result was compared with those of other algorithms. It is showed that the algorithm is improved in the convergence rate and searching precision and the effect is obvious especially on the initial stage.

**Key words:** artificial fish - swarm algorithm; size optimization; truss; adaptive; chaos

桁架结构的优化设计思想从马克斯威尔理论的提出到米歇尔桁架的出现, 已有百年历史。近年来仿生型优化算法在工程结构优化设计领域开始兴起, 为解决结构优化问题提供了新的思路 and 手段。其中, 最具代表性的有遗传算法和粒子群

算法, 目前基于这两种算法及其改进算法的桁架尺寸优化方向的研究已经趋于成熟<sup>[1-4]</sup>。

李晓磊等于 2002 年提出一种新的智能优化算法人工鱼群算法 (AFSA)<sup>[5-6]</sup>, 通过鱼群中各人工鱼个体的觅食、聚群和追尾行为进行局部寻优,

收稿日期: 2011-09-14

基金项目: 河北省建设科技计划项目(2009-128); 河北省教育厅高等学校科学研究计划重点项目(ZD2010222)。

作者简介: 李彦苍(1974-) 男, 河北饶阳人, 博士, 硕士生导师, 副教授, 从事计算智能及其在结构优化中的应用研究。

经过不断迭代找到问题的最优解。本文尝试将人工鱼群算法用于桁架结构优化中,以期提供一种新的优化方法,同时针对其后期收敛速度慢、寻优精度不高的缺陷,利用粒子群优化算法的惯性权重调整策略对步长进行改进。

## 1 人工鱼群算法基本理论

在基本人工鱼群算法中,人工鱼的视野决定了其搜索范围的大小,步长决定了其收敛速度和寻优精度的大小。一般情况下,视野范围  $Visual = 4Step$ ,人工鱼的移动公式如下<sup>[7]</sup>:

$$X_{next} = X_i + rand() \cdot Step \cdot \frac{X_j - X_i}{\|X_j - X_i\|} \quad (1)$$

式中  $X_i$  - 人工鱼当前位置;  $X_j$  - 目标状态的位置;  $X_{next}$  - 人工鱼移动后的位置;  $rand()$  - 产生 0-1 之间的随机数;  $Step$  - 人工鱼移动步长的最大值。

基本人工鱼群算法采用固定的  $Step$ ,在算法运行后期,不可避免的会出现人工鱼在最优值附近来回振荡,而难以达到最优解的情况。 $Step$  大,则人工鱼移动的范围就大,寻优精度低,不易得到精确解;  $Step$  小,则人工鱼移动的范围小,能得到较精确的解,但收敛速度慢。

## 2 人工鱼群算法的改进

### 2.1 初始解群的获得

利用混沌运动遍历性、随机性等特点,采用 Logistic 方程得到初始解群<sup>[8]</sup>。

$$X_{k+1} = \mu X_k (1 - X_k) \quad (2)$$

式中  $X_k$  - 被映射到 [0, 1] 区间内的  $N$  维优化空间的优化变量;  $\mu$  - 控制参数,当  $\mu = 4$  时,系统处于混沌状态,在此区间内方程运动轨迹呈现混沌特征。

### 2.2 步长的改进

本文采用粒子群优化算法惯性权重调整策略<sup>[9-10]</sup>动态地调整人工鱼的步长。

$$Step = \frac{Step_{ini} - Step_{end}}{T_{max}} \cdot (MaxStep - t) + Step_{end} \quad (3)$$

式中  $Step_{ini}$  - 初始步长;  $Step_{end}$  进化到最大迭代次数时的步长;  $MaxStep$  - 最大迭代次数;  $t$  - 当前迭代次数。

## 3 桁架结构优化中的应用

### 3.1 桁架结构优化模型的建立

#### (1) 优化模型

以截面积为设计变量的桁架优化问题可以描述为

$$\min F = W(x) \quad (4)$$

$$\text{s. t. } g_i(x) \leq 0 \quad i = 1, 2, \dots, m$$

式中  $g_i(x)$  - 约束函数;  $m$  - 约束个数。

#### (2) 目标函数

$$W(A) = \sum_{i=1}^n \rho A_i L_i \quad (5)$$

式中  $W(A)$  - 结构的重量;  $A_i$  - 第  $i$  杆件的截面积;  $L_i$  - 第  $i$  杆件的长度;  $\rho$  - 材料密度;  $n$  - 设计变量个数。

#### (3) 约束条件

各杆必须满足强度、刚度、稳定性及截面尺寸的要求,约束条件如下

$$\begin{cases} \frac{\sigma_i}{[\sigma]} - 1 \leq 0 \\ \frac{u_j}{u_{max}} - 1 \leq 0 \\ A_{min} \leq A_i \leq A_{max} \end{cases} \quad (6)$$

式中  $\sigma$  - 第  $i$  杆的轴向正应力;  $[\sigma]$  - 材料的许用应力;  $u_j$  - 节点  $j$  的位移;  $u_{max}$  - 节点  $j$  的许用位移;  $A_{min}$ 、 $A_{max}$  - 杆件截面积的上、下限。

### 3.2 优化过程

步骤 1: 根据实例设置混沌初始化鱼群规模  $N$ , 鱼群个体数  $N_p$ , 鱼群最小步长  $Step_{min}$ , 最大尝试次数  $Trynumber$ , 最大迭代次数  $MaxStep$ , 拥挤度因子  $\delta$  等。

步骤 2: 鱼群混沌初始化。在问题可行解空间中混沌产生  $N(N > N_p)$  条人工鱼,从中选出  $N_p$  条较优个体作为初始鱼群。

步骤 3: 计算并比较每个人工鱼个体的函数值,把最优值记入公告板。

步骤 4: 达到规定的最大迭代次数则输出结果;否则转向步骤 5。

步骤 5: 根据粒子群优化算法惯性权重调整策略的思想,按式(3)调整步长。

步骤 6: 将新鱼群中最优的函数值与公告板进行比较后更新。

步骤 7: 若达到规定的最大迭代次数,则输出结果;否则转向步骤 5。

### 4 算例分析

建立 25 杆空间桁架结构模型<sup>[11]</sup>(图 1), 荷载工况见表 1, 应力约束  $[-275.8, 275.8]$  材料密度  $\rho = 2678 \text{ kg/m}^3$ , 弹性模量  $E = 68950 \text{ MPa}$ , 1、2 节点的最大竖向位移  $d_{\max} = 8.889 \text{ mm}$ ,  $L = 635 \text{ mm}$ 。杆件分组见表 2, 优化结果见表 3。

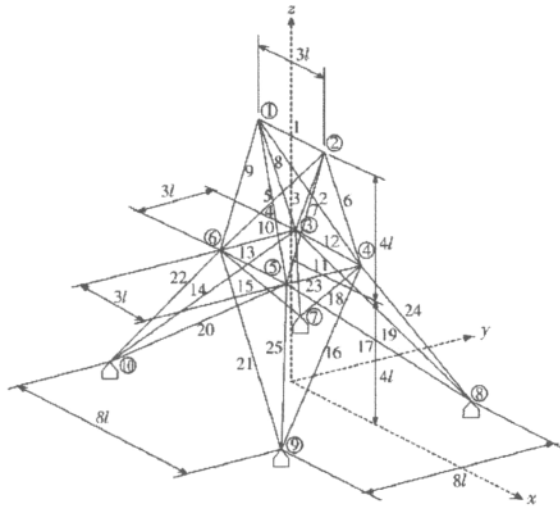


图 1 25 杆空间桁架结构示意图  
Fig.1 The 25-bar spatial truss structure

表 1 25 杆空间桁架荷载工况

**Tab.1 Load cases of the 25 - bar spatial truss structure**

节点号	$F_x$	$F_y$	$F_z$
1	4.448	44.482	-22.241
2	0	44.482	-22.241
3	22.241	0	0
6	22.241	0	0

表 3 25 杆空间桁架优化结果比较

**Tab.3 Comparison of optimal designs for the 25 - bar spatial truss structure**

算法	截面积 / $\text{mm}^2$								重量 / $\text{kg}$
	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	$A_6$	$A_7$	$A_8$	
CGA <sup>[3]</sup>	65.7	242.6	2287.5	65.12	1245.8	505.1	92.1	2523.4	246.436
SA <sup>[12]</sup>	64.516	774.192	2064.443	64.516	709.767	580.446	258.064	2193.545	229.798
HPSO <sup>[4]</sup>	64.516	228.5	2237.6	64.516	1227.9	506.9	83.9	2575.7	226.339
本算法	64.516	234.5	2229.4	64.318	1220.6	500.2	91.2	2567.9	216.118

表 2 25 杆空间桁架分类

**Tab.2 The classification of the 25 - bar spatial truss structure**

组别号	杆件号	组别号	杆件号
$A_1$	1	$A_5$	12, 13
$A_2$	2, 3, 4, 5	$A_6$	14, 15, 16, 17
$A_3$	6, 7, 8, 9	$A_7$	18, 19, 20, 21
$A_4$	10, 11	$A_8$	22, 23, 24, 25

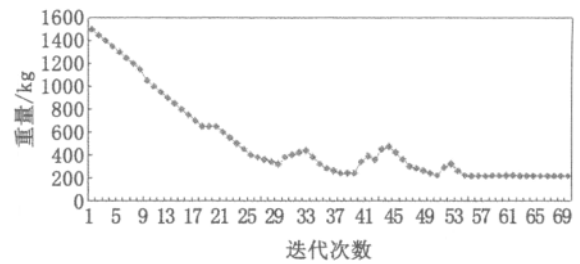


图 2 桁架优化迭代关系曲线图  
Fig.2 Iterative curve diagram of truss optimization

在相同的约束条件下, 采用改进的人工鱼群算法对 25 杆桁架结构进行了优化, 从表 3 可知, 优化后结构总重量为 216.118 kg, 与其他相比, 优化结果得到了较好的改善。

设置如下控制参数:  $Trynumber = 5$ ,  $Step_{\min} = 0.8$ ,  $Step_{\text{end}} = 0.3$ ,  $MaxStep = 400$ ,  $\delta = 0.618$ ,  $N = 50$ ,  $N_p = 10$ , 采用 MATLAB 软件得到桁架优化迭代关系曲线(图 2)。可以看出改进的人工鱼群算法能够搜索到全局最优解, 有较高的收敛速度和收敛精度, 尤其在迭代计算的初期, 效果非常明显, 迭代次数在 38 次左右时可以跳出局部最优解, 55 次左右优化结果基本平稳。

### 3.3 支撑布置数量不同时动力响应分析

为了对比支撑布置数量不同时结构的减震效果,在方案 4 基础上增设 28 根腹杆,布置形式仍以替换两边横向边跨的腹杆为主,并对其进行地震响应分析。表 3 给出了 2 种方案(即替换 20 根腹杆、替换 48 根腹杆)的最大位移减震率及轴力减震率。可以看出 EL-Centro 波作用下,2 种替换方案均可以起到减震控制的作用,而替换 48 根腹杆比替换 20 根腹杆的减震效果更好一些。

## 4 结论

1) 防屈曲支撑在双层柱面网壳中替换部分杆件对结构的减震有较好的控制效果。

2) 不同的布置位置对双层柱面网壳结构有不同的减震效果,在腹杆受力较大处布置防屈曲支撑的减震效果优于横向上、下弦杆处,但并非所有的布置形式都会对双层柱面网壳有减震效果。

3) 防屈曲支撑的数量对双层柱面网壳的减震效果有影响,替换不同数量的支撑对双层柱面网壳结构减震效果也不相同。

### 参考文献:

[1] 张毅刚,薛素铎,杨庆山,等. 大跨空间结构[M].

(上接第 7 页)

## 5 结论

1) 运用粒子群优化算法惯性权重调整策略动态的调整人工鱼的步长,很好的克服了基本人工鱼群算法后期收敛速度慢、寻优精度不高的缺陷。

2) 在承载力优化前后相差不大且符合设计要求的前提下,改进后的人工鱼群算法经过更少的迭代次数求得目标函数值,达到结构重量最轻的目的。

### 参考文献:

- [1] 唐文艳. 结构优化中的遗传算法研究和应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2001.
- [2] 李丽娟,黄志斌,刘锋. 启发式粒子群优化算法及其在空间结构优化中的应用[J]. 空间结构, 2008, 14(3): 47-55.
- [3] 李红芳. 混沌遗传算法与结构优化设计[D]. 天津: 天津大学, 2004.
- [4] 张忠伟. 结构优化中粒子群算法的研究与应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.

北京: 机械工业出版社, 2005.

- [2] 冯雷鸣,魏建国,白永兵. 双层柱面网壳在粘滞阻尼器作用下的减震研究[J]. 四川建筑, 2008, 28(6): 101-104.
- [3] 曹资,薛素铎. 空间结构抗震理论与设计[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [4] 王秀丽. 大跨度空间钢结构分析与概念设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [5] 薛素铎,曹资,王健宁. 双层柱面网壳弹塑性抗震性能[J]. 工业建筑, 2003, 32(2): 59-61, 82.
- [6] 王秀丽,高森,陈祥勇. 约束屈曲支撑在单层网壳减震控制中的应用研究[J]. 空间结构, 2009, 15(4): 65-69.
- [7] 史三元,刘春生,马裕超,等. 隅撑支撑钢框架结构抗震性能分析[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2009, 26(3): 8-11.
- [8] 张春玉,赵延林,陈勇. 混合变量遗传算法在预应力网架结构中的应用[J]. 黑龙江科技学院学报, 2009, 19(4): 306-309.
- [9] 彭俊生,罗永坤,彭地. 结构动力学、抗震计算与 SAP2000 应用[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2007.
- [10] 周云. 防屈曲耗能支撑结构设计与应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.

(责任编辑 马立)

- [5] 李晓磊,邵之江,钱积新. 一种基于动物自治体的寻优模式: 鱼群算法[J]. 系统工程理论与实践, 2002, 22(11): 32-38.
- [6] BONABEAU E, THERAULAZ G. Swarm smarts [J]. Scientific American, 2000, 282(3): 72-79.
- [7] 刘彦君,江铭炎. 自适应视野和步长的改进人工鱼群算法[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(25): 35-37.
- [8] 王晓敏,刘宏伟,李石妍. 改进型混沌粒子群算法求解函数均值问题[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2011, 28(3): 100-104.
- [9] 周书敬,薄涛,史三元. 混合算法在轻钢结构优化设计中的应用[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2011, 28(2): 71-74.
- [10] 许小丽. 一种新的交叉粒子群算法[J]. 四川理工学院学报: 自然科学版, 2010, 23(1): 19-22.
- [11] 李峰,唐和生,薛松涛,等. 粒子群优化算法在桁架优化设计中的应用[J]. 土木建筑与环境工程, 2009, 31(1): 7-12.
- [12] 项宝卫. 结构优化中的模拟退火算法研究和应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2004.

(责任编辑 马立)