

文章编号:1674-2974(2011)11-0013-06

## 桁架尺寸优化微分演化算法\*

唐和生<sup>1†</sup>, 范德伟<sup>1</sup>, 王兆亮<sup>1</sup>, 薛松涛<sup>1, 2</sup>

(1. 同济大学 结构工程与防灾研究所, 上海 200092;

2. 东北工业大学 理工学部建筑学科, 日本, 仙台 982-8577)

**摘要:**为了解决带有应力约束和位移约束桁架结构的尺寸优化问题, 将微分演化(Differential Evolution, DE)算法应用于桁架结构的尺寸优化设计. 介绍了DE算法的基本原理及其进化策略, 给出了桁架结构优化的数学模型. 对几个经典问题进行了求解, 并与其他优化算法进行了比较. 数值结果表明了DE算法收敛特性好、稳定性高, 可以有效地用于桁架结构的尺寸优化设计.

**关键词:**结构; 微分演化; 桁架结构; 尺寸优化

**中图分类号:**TU323.4; TU311

**文献标识码:**A

## Differential Evolution Algorithm to Size the Optimization of Truss Structures

TANG He-sheng<sup>1†</sup>, FAN De-wei<sup>1</sup>, WANG Zhao-liang<sup>1</sup>, XUE Song-tao<sup>1, 2</sup>

(1. Research Institute of Structural Engineering and Disaster Reduction, Tongji Univ, Shanghai 200092, China;

2. Dept of Architecture, Tohoku Institute of Technology, Sendai 982-8577, Japan)

**Abstract:** This paper applied a DE strategy to solve the size optimization problems of truss structures with stress and displacement constraints. We presented the basic principle of the original DE algorithm in detail, and then introduced the mathematical model for truss optimization. Several classical problems were solved by using DE algorithm, and the results were compared with those using other optimization methods. Numerical examples have shown that the DE algorithm has good convergence and stability and can be applied to effectively size the optimization of truss structures.

**Key words:** structure; differential evolution; truss structures; size optimization

任何一个结构的设计方案, 都可以用若干给定参数和一些设计变量  $x_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) 来体现, 而设计变量随方案的改变而变<sup>[1]</sup>. 所谓结构优化设计就是用力学和数学的方法, 在可用域搜索目标函数最小(或最大)的所谓最优点, 也就是最优设计方

案. 桁架结构优化设计根据设计变量的类型可分为3个层次: 尺寸优化、形状优化和拓扑优化. 桁架结构尺寸优化即为在给定结构形式、材料和布局拓扑的情况下, 优化各个杆件的截面尺寸, 使结构总体质量最轻.

\* 收稿日期: 2010-12-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50708076); 光华同济土木学院基金资助项目

作者简介: 唐和生(1975-), 男, 安徽安庆人, 同济大学副教授, 博士

† 通讯联系人, E-mail: thstj@tongji.edu.cn

传统的结构优化方法主要有力学准则法(OC)、数学规划法(MP)等<sup>[2]</sup>。由于结构优化设计问题是一非凸的和多峰的问题,传统的一些优化算法解决此类问题具有很大的局限性。而最近 30 多年发展的一些现代仿生智能优化算法,如遗传算法、模拟退火、蚁群算法、PSO 算法等在结构优化领域也得到了广泛应用<sup>[3-6]</sup>,并成为人们研究的热点。

微分演化(Differential Evolution, DE)作为一种新颖的算法,自从 1997 年被 Storn 和 Price 引入以来<sup>[7]</sup>,在解决复杂优化问题上得到了很多关注。作为一种混合算法,DE 的主要优点是算法简单,它结合了遗传算法的更大种群概念和进化算法的自适应变异以及采用了贪婪选择策略。同时,DE 算法用浮点语言取代了在许多传统进化算法中的二进制语言,控制变量少,执行起来更简单。这些特征使 DE 算法相比进化算法和遗传算法鲁棒性更好、收敛更快。研究表明,针对复杂的优化问题,DE 算法相对于 PSO 算法和遗传等其他算法具有更加精确、更快的收敛速度和较强的鲁棒性的特点<sup>[8]</sup>。该算法已被应用于工程设计<sup>[9]</sup>、可靠度分析<sup>[10]</sup>、主动控制<sup>[11]</sup>问题,例如:三维车辆结构的优化<sup>[12]</sup>、涡轮的形状优化<sup>[13]</sup>。

本文采用 DE 算法对平面桁架及空间桁架在单工况及多工况作用及多约束情况下进行尺寸优化设计。通过对典型桁架结构的优化并与相关文献的结果进行对照,来评价该算法用于桁架优化的效果。

## 1 微分演化(DE)算法

一个包括  $n$  个参数的优化问题可以用一个  $n$  维的向量来描述,该向量可以表示为:  $\mathbf{x}_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})T \in S, i = 1, 2, 3, \dots, NP$ 。其中  $S \in R^n$  为优化问题的搜索空间;DE 算法利用  $NP$  作为向量  $x_{i1}$  每一代的个体数。类似于遗传算法,DE 算法通过变异、交叉和选择过程实现种群的更新进化。具体过程如下。

### 1.1 变异过程

变异的目的是为了保证种群的多样性,同时用合适的参数变化来指导已有的目标向量在合适的时间内达到一个更好的结果,从而保证搜索的鲁棒性。

变异操作过程中,上一代的个体  $x_i(G), i = 1, \dots, NP$ (其中  $G$  表示代数),根据不同的变异方式进行更新

则得到第  $G+1$  子代向量  $v_i(G+1) = (v_{i1}(G+1), v_{i2}(G+1), \dots, v_{in}(G+1))T$ 。本文采用 Storn 和 Price<sup>[7]</sup> 推荐的 DE/current-to-best/1/bin 变异方式进行结构优化,该变异方式为:

$$\mathbf{v}_i^{(G+1)} = \mathbf{x}_i^{(G)} + F_1(\mathbf{x}_{\text{best}}^{(G)} - \mathbf{x}_i^{(G)}) + F(\mathbf{x}_{r_1}^{(G)} - \mathbf{x}_{r_2}^{(G)}) \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{x}_{\text{best}}^{(G)}$  为算法第  $G$  代群体中适应值最小的个体;  $F$  和  $F_1$  为变异常数,均为非负实数。它们的大小控制了变量间的差异,保证进化的进行。  $r_1, r_2$  分别为互不相同的整数,分别为从集合  $\{1, 2, \dots, i-1, i+1, \dots, NP\}$  中随机选出的向量编号。

### 1.2 交叉过程

与 GA 算法相似,DE 算法中的个体经过变异后也进行交叉操作。对于群体中第  $G+1$  代经过变异过程后的向量个体  $v_i(G+1)$  按照公式(2)进行交叉,产生新的个体:  $u_{ij}(G+1) = (u_{i1}(G+1), u_{i2}(G+1), \dots, u_{in}(G+1))T$ 。

$$u_{ij}^{(G+1)} = \begin{cases} v_{ij}^{(G+1)}, & \text{if } (\text{rand}(j) \leq CR) \text{ or } (j = \text{randn}(i)); \\ x_{ij}^{(G+1)}, & \text{if } (\text{rand}(j) > CR) \text{ or } (j \neq \text{randn}(i)). \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $j = 1, 2, \dots, n$ ;  $\text{rand}(j) \in [0, 1]$ , 是  $n$  个  $0 \sim 1$  之间相互独立的随机数中的第  $j$  个;  $\text{rand}(i)$  是随机从集合  $\{1, 2, \dots, n\}$  中取得个体向量维度的序号;  $CR$  为交叉因子,将决定个体之间交叉的概率。

### 1.3 选择过程

DE 算法采用与 GA 算法不同的贪婪准则:通过比较由变异和交叉产生的子代个体和父代个体,选择适应值好的变量,即如果父代个体适应值更优将继续保留在群体中;否则,保留子代个体。选择过程由式(3)表示:

$$\mathbf{x}_i^{(G+1)} = \begin{cases} \mathbf{u}_i^{(G+1)}, & \text{if } (f(\mathbf{u}_i^{(G+1)}) < f(\mathbf{x}_i^{(G)})); \\ \mathbf{x}_i^{(G)}, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (3)$$

通过对以上 3 个过程不断重复迭代对种群进行进化,直到满足算法停止条件,找到优化问题的最适解。

## 2 空间桁架结构优化

### 2.1 桁架结构尺寸优化的数学描述

#### 2.1.1 设计变量

桁架结构的尺寸优化设计变量一般为杆件截面面积或截面特性参数。

本文定义设计变量为杆件的截面积

$$\mathbf{A} = [A_1, A_2, \dots, A_n]^T. \quad (4)$$

### 2.1.2 目标函数

目标函数又称为评价函数,用来评价一种设计方案的好坏,桁架优化设计多以桁架的质量最轻作为优化目标.本文选择的目标函数包含桁架的总质量和处理约束的惩罚项:

$$\min F = \sum_{i=1}^n \rho_i A_i L_i + \lambda M. \quad (5)$$

式中:  $F$  为目标函数值;  $L_i$  为第  $i$  组杆件的长度;  $A_i$  和  $\rho_i$  分别为第  $i$  组杆件的截面积及密度;  $n$  为截面设计变量进行变量连接后杆件的组数;  $M$  为预先定义的一个大数 ( $10E+30$ );  $\lambda$  为罚函数因子,用来处理约束问题.当结构设计变量满足约束条件时  $\lambda = 0$ , 否则  $\lambda = 1$ .

### 2.1.3 约束条件

1) 应力约束条件:

$$g_k^{\sigma}(A) = [\sigma_k] - \sigma_k \geq 0, k = 1, 2, \dots, K. \quad (6)$$

式中:  $g_k^{\sigma}(A)$  为应力约束;  $[\sigma_k], \sigma_k$  分别为第  $k$  组杆件的允许应力值和各种工况下的最不利应力值;  $K$  为杆件的总组数.

2) 节点的位移约束条件:

$$g_{jl}^u(A) = [u_{jl}] - u_{jl} \geq 0, \\ j = 1, 2, \dots, m; l = 1, 2, \dots, ND. \quad (7)$$

式中:  $[u_{jl}], u_{jl}$  分别为特定节点  $j$  在给定方向  $l$  上的位移允许值和各种工况下最不利位移值;  $m$  为节点总数;  $ND$  为节点位移约束维数.

3) 设计变量的上下限约束:

$$A_{\min} \leq A \leq A_{\max}. \quad (8)$$

式中:  $A_{\max}, A_{\min}$  分别为杆件截面尺寸的上限与下限.

## 2.2 基于 DE 算法的桁架结构尺寸优化程序

Step 1 输入 DE 所需参数,如变异和交叉因子;初始化 DE 的种群,使第一代个体变量随机在搜索空间中产生;  $i_t = 1$ .

Step 2 进行结构分析,计算出每个个体所代表的设计变量对应的结构形态变量,如各杆件应力和节点位移.

Step 3 计算每个个体的评价函数值,对于违反约束的个体在其评价函数值加上一个非常大的常数罚值  $M$ ,选出最优个体  $x_{\text{best}}$ .

Step 4 对每个个体根据式(1)进行变异操作,并且按照式(2)对每个个体(父代)以及变异个体进行交叉操作,得到新的个体(子代).

Step 5 计算各子代个体以及父代个体的适应

值;按照式(3)选择适应值好的作为下一代种群中的个体.

Step 6 计算每一个下一代的个体适应值,并找到最优的个体;如果新的最优个体的适应值比上一代  $x_{\text{best}}$  的适应值好,则更新  $x_{\text{best}}$  值,称为当前最优个体.

Step 7 满足算法终止条件,输出最优个体  $x_{\text{best}}$ ,以及最优个体的适应值,否则返回 Step 2.

## 2.3 数值模拟与结果分析

用 DE 算法对几个常用的桁架优化算例进行优化设计,以便与其他文献进行比较,采用 MATLAB 编程.

例 1 10-杆平面桁架.求解该结构在应力和位移约束下的优化设计问题.优化目标为桁架结构质量最轻,选各杆的截面积为设计变量.各杆使用相同的材料,密度为  $2\ 768\text{ kg/m}^3$ ,弹性模量为  $68\ 950\text{ MPa}$ ,许用应力  $\sigma = \pm 172.375\text{ MPa}$ ,载荷  $P = 444.822\text{ kN}$ ,  $L = 9.144\text{ m}$ .设计变量下限为  $64.516\text{ mm}^2$ ,上限为  $22\ 581\text{ mm}^2$ ,位移约束为各节点  $x, y$  方向的位移均不超过  $50.8\text{ mm}$ .结构如图 1 所示.

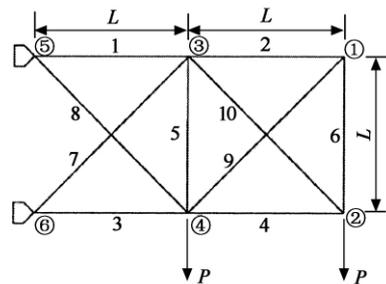


图 1 10-杆平面桁架  
Fig. 1 10-bar plane truss

将该问题写成优化问题的标准形式为:

$$\begin{cases} \mathbf{A} = [A_1, A_2, A_3, \dots, A_{10}]^T, \\ \min W = \sum_{i=1}^{10} \rho_i A_i L_i + \lambda M, \\ \text{s. t. } \begin{cases} |\sigma_k| \leq 172.3\text{ MPa}, k = 1, 2, \dots, 10, \\ d_{\max} \leq 50.8\text{ mm} \\ 64.5\text{ mm}^2 \leq A \leq 25\ 800\text{ mm}^2, \\ \lambda = 0\text{ or }1. \end{cases} \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $d_{\max}$  为所有节点的最大位移值;  $M = 10E + 30$ .

DE 参数取为:  $N = 50, F_1 = F = 0.6, CR = 0.85, \max\_It = 200$ .

为了分析算法的有效性,随机运行 5 次优化程序,评价函数收敛曲线见图 2. 取最好与最差结果,与其他文献结果进行对比(见表 1).

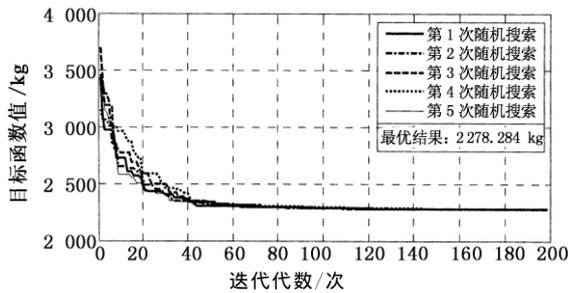


图 2 随机 5 次搜索评价函数收敛曲线  
Fig. 2 5 random search convergence curve of evaluation function

表 1 DE 优化结果与其他文献对比

Tab. 1 DE optimization results compare with other method

| 杆号   | 本文方法       |            | 文献[14]     | 文献[15]     | 文献[16]     |
|------|------------|------------|------------|------------|------------|
|      | DE best    | DE worst   | GA         | PSO        | BB-BC      |
| 1    | 20 000.486 | 20 226.829 | 18 658.027 | 19 354.155 | 19 873.509 |
| 2    | 64.958     | 64.922     | 64.516     | 64.516     | 64.516     |
| 3    | 14 585.83  | 14 203.457 | 15 529.001 | 15 011.583 | 14 415.455 |
| 4    | 9 845.379  | 9 768.692  | 9 006.434  | 9 760.626  | 9 959.335  |
| 5    | 64.614     | 64.672     | 64.516     | 64.516     | 64.516     |
| 6    | 582.604    | 628.886    | 361.290    | 357.419    | 623.870    |
| 7    | 14 074.071 | 14 062.154 | 14 161.262 | 13 698.037 | 14 122.552 |
| 8    | 3 739.908  | 3 767.588  | 4 961.280  | 4 809.023  | 3 742.573  |
| 9    | 64.622     | 64.959     | 64.516     | 64.516     | 64.516     |
| 10   | 13 845.745 | 13 979.045 | 14 251.584 | 13 980.617 | 13 891.585 |
| 质量   | 2 278.284  | 2 278.802  | 2 304.137  | 2 296.666  | 2 279.781  |
| 标准方差 | 0.209      | —          | 17.509     | 2.746      | —          |

注:质量栏的单位为 kg,其余项单位为 mm<sup>2</sup>.

随机优化 5 次,迭代 80 次已经收敛,最优解为 2 278.284,最差解为 2 278.802,均值为 2 278.632,标准方差为 0.209.可以看出,DE 算法得到的最好解与最差解均要优于所列文献中的结果,证明了 DE 算法具有很强的寻优能力,同时 5 次优化结果的标准方差明显小于其他方法,说明 DE 算法更加稳健.

例 2 25-杆空间桁架(多工况). 25-杆空间桁架结构如图 3 所示. 该结构在多种研究结构优化算法时被提及讨论,本文使用该结构作为算例便于与其他文献进行比较分析. 结构受 2 种荷载工况作用(见表 2),应力约束随杆件组别而不同(见表 3),位移约束为各节点在  $x, y, z$  方向位移均不超过  $\pm 88.9$  mm. 材料特性为  $E = 68\ 950$  MPa,  $\rho = 2\ 768$  kg/m<sup>3</sup>,  $L = 635$  mm. 截面积范围设为  $A_{\min} = 6.451\ 6$  mm<sup>2</sup>,  $A_{\max} = 2\ 193.5$  mm<sup>2</sup>.

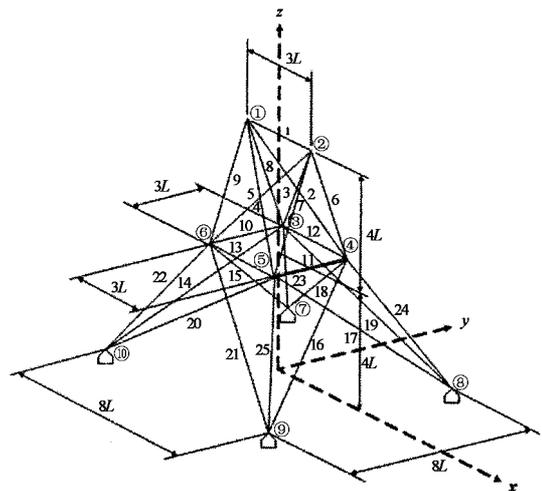


图 3 25-杆空间桁架  
Fig. 3 25-bar space truss

表 2 25-杆桁架多工况荷载表

Tab. 2 Load cases of 25-bar truss

| 工况 | 节点号 | $F_x$ /kN | $F_y$ /kN | $F_z$ /kN |
|----|-----|-----------|-----------|-----------|
| 1  | 1   | 4.448     | 44.482    | -22.241   |
|    | 2   | 0         | 44.482    | -22.241   |
|    | 3   | 2.224     | 0         | 0         |
| 2  | 1   | 0         | 88.964    | -22.241   |
|    | 2   | 0         | -88.964   | -22.241   |

表 3 25-杆桁架杆件分组及允许应力表

Tab. 3 25-truss group and the stress allow

| 组别 | 杆件号         | $\sigma^+$ /MPa | $\sigma^-$ /MPa |
|----|-------------|-----------------|-----------------|
| 1  | 1           | 241.325         | 241.959         |
| 2  | 2,3,4,5     | 241.325         | 79.913          |
| 3  | 6,7,8,9     | 241.325         | 119.318         |
| 4  | 10,11       | 241.325         | 241.959         |
| 5  | 12,13       | 241.325         | 241.959         |
| 6  | 14,15,16,17 | 241.325         | 46.603          |
| 7  | 18,19,20,21 | 241.325         | 47.982 3        |
| 8  | 22,23,24,25 | 241.325         | 76.401          |

DE 参数取为:  $NP = 40, F_1 = F = 0.75, CR = 0.85, \max\_It = 200$ . 随机优化运行 5 次,评价函数曲线如图 4 所示,优化结果对比见表 4.

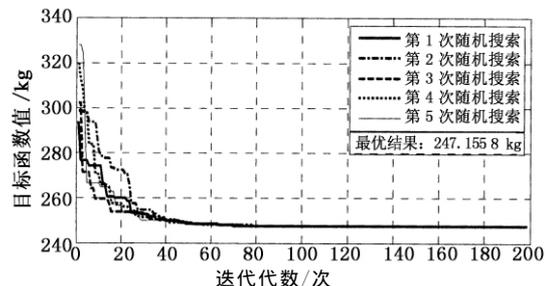


图 4 25-杆桁架随机优化 5 次评价函数收敛曲线  
Fig. 4 5 random search convergence curve of evaluation function about 25-bar space truss

表 4 DE 优化结果与其他文献对比

Tab. 4 DE optimization results compare with other method

| 杆件<br>组号 | 本文方法      |           | 文献 [17]     | 文献 [15]     | 文献 [18]     | 文献 [16]     |
|----------|-----------|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|          | DE best   | DE worst  | GA          | PSO         | ACO         | BB-BC       |
| 1        | 6.646 0   | 6.646     | 6.451 6     | 6.451 6     | 6.451 6     | 6.451 6     |
| 2        | 1 319.0   | 1 317.064 | 1 297.997   | 1 368.384   | 1 290.320   | 1 349.675   |
| 3        | 1 934.148 | 1 936.545 | 1 902.770   | 1 866.448   | 1 913.545   | 1 912.254   |
| 4        | 6.457 8   | 6.483 8   | 19.032 2    | 6.451 6     | 7.741 9     | 6.451 6     |
| 5        | 6.452 6   | 6.453     | 6.451 6     | 7.741 92    | 709.676     | 64.516      |
| 6        | 441.378   | 439.886   | 441.160 4   | 432.902 4   | 444.515     | 444.515     |
| 7        | 1 045.409 | 1 046.041 | 1 083.739 8 | 1 039.352 8 | 1 083.223 6 | 1 032.901 2 |
| 8        | 1 724.944 | 1 726.174 | 1 726.383 6 | 1 752.899 7 | 1 721.286 9 | 1 732.899 8 |
| 质量       | 247.155 8 | 247.160 1 | 247.386     | 247.471     | 247.616     | 247.548     |
| 标准<br>方差 | 0.001 8   | —         | 1.478       | 0.94        | 0.491       | —           |

注:质量栏的单位为 kg,其余项单位为 mm<sup>2</sup>.

由图 3 可见,70 代已经收敛. DE 随机优化 5 次得到的最优解为 247.155 8,最差解为 247.160 1,均值为 247.157,标准方差为 0.001 8.由表 4 可以看出,DE 算法的最好解与最差解均优于所列文献最优结果,标准方差明显小于其他算法.说明 DE 算法具有很好的收敛性能和极好的稳定性.

例 3 72-杆件空间桁架(多工况).图 5 为 4 层 72-杆空间桁架结构及其节点、杆件编号方式.按对称性将杆件分为 16 组(见表 5).结构受两个荷载工况的作用(见表 6).材料特性为  $E = 68\ 950\ \text{MPa}$ ,  $\rho = 2\ 768\ \text{kg/m}^3$ ,  $L = 1\ 524\ \text{mm}$ .约束条件为:顶层节点沿  $x, y$  方向的最大位移不能超过 6.35 mm,各杆最大允许应力  $[-172.375, 172.375]\ \text{MPa}$ .截面范围设为  $A_{\min} = 64.516\ \text{mm}^2$ ,  $A_{\max} = 1\ 935.48\ \text{mm}^2$ .

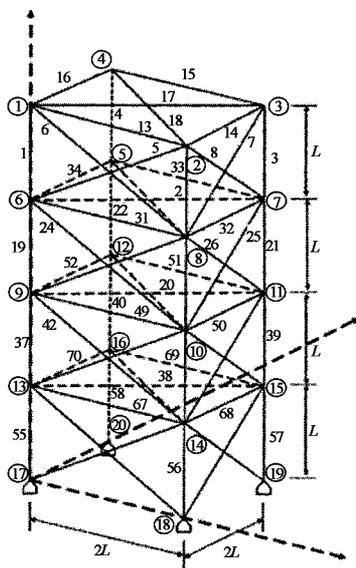


图 5 72-杆空间桁架  
Fig. 5 72-bar space truss

表 5 杆件分组及优化结果对比表

Tab. 5 The optimization results comparison chart

| 杆件<br>分组 | 杆件号   | 本文方法      |           | 文献 [17]   | 文献 [18]   | 文献 [16]   |
|----------|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|          |       | DE best   | DE worst  | GA        | ACO       | BB-BC     |
| 1        | 1-4   | 100.864   | 100.927   | 100.451   | 100.645   | 100.968   |
| 2        | 5-12  | 351.289   | 350.653   | 354.903   | 354.838   | 355.290   |
| 3        | 13-16 | 265.538   | 265.074   | 256.838   | 251.612   | 253.032   |
| 4        | 17-18 | 361.687   | 364.027   | 435.418   | 381.935   | 382.064   |
| 5        | 19-22 | 344.003   | 337.752   | 333.999   | 361.935   | 336.064   |
| 6        | 23-30 | 332.307   | 338.653   | 340.451   | 317.419   | 333.677   |
| 7        | 31-34 | 64.723    | 64.527    | 64.516    | 64.516    | 64.774    |
| 8        | 35-36 | 64.964    | 65.771    | 67.677    | 69.032    | 64.839    |
| 9        | 37-40 | 812.823   | 798.646   | 827.740   | 840.643   | 804.902   |
| 10       | 41-48 | 330.474   | 335.669   | 324.386   | 329.677   | 339.935   |
| 11       | 49-52 | 64.767    | 64.933    | 64.516    | 65.161    | 64.516    |
| 12       | 53-54 | 64.650    | 64.846    | 64.516    | 64.516    | 65.290    |
| 13       | 55-58 | 1 219.340 | 1 227.666 | 1 197.546 | 1 256.772 | 1 198.514 |
| 14       | 59-66 | 332.937   | 324.607   | 318.257   | 327.741   | 326.386   |
| 15       | 67-70 | 64.594    | 64.664    | 64.516    | 65.161    | 64.516    |
| 16       | 71-72 | 64.927    | 65.007    | 64.516    | 65.806    | 64.516    |
| 质量       |       | 172.228   | 172.287   | 172.627   | 172.591   | 172.414   |
| 标准<br>方差 |       | 0.024     | —         | 1.478     | 0.94      | 0.491     |

注:质量栏的单位为 kg,其余项单位为 mm<sup>2</sup>.

表 6 72-杆桁架荷载工况表

Tab. 6 Load cases of 72-bar truss

| 工况 | 节点号 | $F_x / \text{kN}$ | $F_y / \text{kN}$ | $F_z / \text{kN}$ |
|----|-----|-------------------|-------------------|-------------------|
| 1  | 1   | 0                 | 0                 | -22.241           |
|    | 2   | 0                 | 0                 | -22.241           |
|    | 3   | 0                 | 0                 | -22.241           |
|    | 4   | 0                 | 0                 | -22.241           |
| 2  | 1   | 22.241            | 22.241            | -22.241           |

DE 参数取值:  $NP = 80, F_1 = F = 0.75, CR = 0.85, \max_{It} = 300$ .

在相同参数和约束条件下,随机对结构进行 5 次优化,目标函数收敛曲线见图 6,优化结果与其他文献的结果对比见表 5.

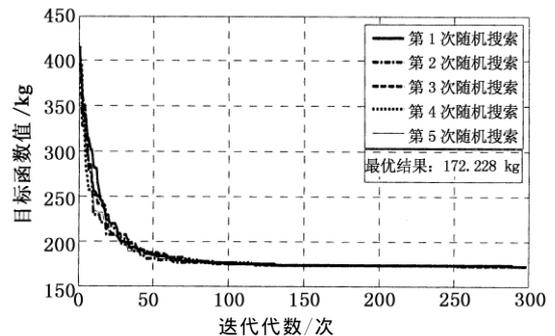


图 6 72-杆桁架随机优化 5 次评价函数收敛曲线  
Fig. 6 5 random search convergence curve of evaluation function about 72-bar space truss

由于设计变量为 16 维,变量维数高,而且为多工况共同作用,利用一般的优化算法对其进行优化时难度较大,利用 DE 则很容易解决该问题.从图 5 可以看出,迭代 100 次时曲线已经收敛.从表 5 可知,DE 算法最优解为 172.228,最差解为 172.287,二者均优于其他文献所列结果,同时标准方差 0.024 说明算法具有很好的稳定性.

### 3 结 论

DE 算法是一种新颖的基于种群混合进化算法,它结合了遗传算法的更大种群概念和进化算法的自适应变异以及采用了贪婪选择策略.本文将 DE 算法应用到 3 个典型桁架结构的优化问题,将得到的结果与其他文献对比分析,结果表明 DE 算法收敛速度快,在满足位移和应力约束条件下总能找到相对好的全局最优解,将 DE 算法应用于结构优化设计是可行的.

相对于其他算法而言,DE 算法原理简单,易于实现,特别是其初始参数设置简单,算法鲁棒性强.从对每个算例桁架随机优化 5 次的结果可知,DE 算法得到的最优值比 GA,PSO,BB-BC 等其他算法更加趋于最优解.同时 5 次最优解的标准方差明显小于其他算法,验证了 DE 算法的稳定性,说明了该算法适合于结构尺寸优化设计分析.

### 参考文献

- [1] 王光远. 结构优化设计[M]. 北京:高等教育出版社,1987:13-109.  
WANG Guang-yuan. Structural optimization theory[M]. Beijing: Higher Education Press, 1987:13-109. (In Chinese)
- [2] 钱令希. 工程结构优化设计[M]. 北京:水利电力出版社,1983:150-168.  
QIAN Ling-xi. Structural optimization design[M]. Beijing: China Water Power Press, 1983:150-168. (In Chinese)
- [3] GALANTE M. Genetic algorithms as an approach to optimize real-world trusses [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1996,39(3): 361-382.
- [4] LAMBERTI L. An efficient simulated annealing algorithm for design optimization of truss structures [J]. Computers & Structures,2008, 86: 1936-1953.
- [5] BLAND J A. Optimal structural design by ant colony optimization[J]. Engineering Optimization,2001,33(4):425-443.
- [6] LI L J, HUANG Z B, LIU F, *et al.* A heuristic particle swarm optimizer for optimization of pin connected structures [J]. Computers & Structures, 2007, 85(7/8): 340-349.
- [7] STORN R, PRICE K. Differential evolution—a simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces[J]. Journal of Global Optimization, 1997,11(4):341-359.
- [8] VESTERSTROM J, THOMSEN R. A comparative study of differential evolution, particle swarm optimization, and evolutionary algorithms on numerical benchmark problems[J]. Evolutionary Computation, 2004,2:1980-1987.
- [9] GONG Wen-yin, CAI Zhi-hua, ZHU Li. An efficient multi-objective differential evolution algorithm for engineering design [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2009, 4(2):137-157.
- [10] COELH O, SANTOS L D. Reliability-redundancy optimization by means of a chaotic differential evolution approach[J]. Chaos Solitons Fractals, 2009,41(2):594-602.
- [11] WU Zhi-feng, HUANG Hou-kuan, YANG Bei, *et al.* A modified differential evolution algorithm with self-adaptive control parameters[C]//Proceedings of 3rd International Conference on Intelligent System and Knowledge Engineering. ISKE, 2008:524-527.
- [12] VIAN A, CHEGURY F A. Differential evolution applied to the design of a three-dimensional vehicular structure[C]//Proceedings of the ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference,2008,6(B):1321-1330.
- [13] KARIN Z K. Shape optimization of turbine stage using adaptive range differential evolution and three-dimensional navier-stokes solver[C]//Proceedings of the 2nd IASTED International Conference on Computational Intelligence, 2006:212-217.
- [14] CAMP C, PEZESHK S, CAO G. Optimized design of two-dimensional structures using a genetic algorithm [J]. Struct Eng,1998, 124(5): 551-559.
- [15] SCHUTTE J J, GROENWOLD A A. Sizing design of truss structures using particle swarms[J]. Struct Multidiscip Optim, 2003, 25:261-269.
- [16] CAMP C V. Design of space trusses using big bang-big crunch optimization[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2007,133(7): 999-1008.
- [17] CAO G. Optimized design of framed structures using a genetic algorithm[D]. Reston:University of Memphis,1996.
- [18] CAMP C V, BICHON B J. Design of space trusses using ant colony optimization[J]. Struct Eng, 2004,130(5):741-751.