

粒子群优化算法在桁架结构优化中的应用

张雯雯¹, 李丽娟², 滕少华³, 罗玉玲¹

(1. 湘南学院 计算机系, 湖南 郴州 423000;

2. 广东工业大学 土木与交通工程学院, 广东 广州 510006;

3. 广东工业大学 计算机学院, 广东 广州 510006)

摘要:介绍了粒子群优化(PSO)算法的一种改进算法:用于约束优化问题的启发式粒子群优化(HPSO)算法。针对 HPSO 算法在桁架结构优化中速度较慢的问题,将 HPSO 算法的约束处理策略与另一种适用于粒子群算法的约束处理方法结合,并将改进后的算法应用到 1 个桁架结构截面优化设计算例中,同时与 HPSO 算法进行对比分析。对于此算例,改进算法和 HPSO 算法都运行了多次,从多次运行的统计分析中可以看出,改进算法的优化效果和稳定性好于 HPSO 算法,且结构分析的次数减少了一半左右,从而整个程序运行的速度比 HPSO 算法提高了将近一倍。

关键词:粒子群优化算法;启发式粒子群优化算法;约束;结构优化;桁架

中图分类号:TP301;TU318

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2010)05-0223-04

Improved Particle Swarm Optimizer Algorithm for Design Optimization of Structures

ZHANG Wen-fen¹, LI Li-juan², TENG Shao-hua³, LUO Yu-ling¹

(1. Faculty of Computer, Xiangnan University, Chenzhou 423000, China;

2. Faculty of Civil and Transportation Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;

3. Faculty of Computer, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Heuristic Particle Swarm Optimizer(HPSO) algorithm is an improved Particle Swarm Optimizer(PSO) algorithm for solving constrained optimization problems. Combined HPSO algorithm with another constraint handling method, to increase the speed of HPSO algorithm in design optimization. Apply the improved algorithm to a truss structures optimal design examples and compare to HPSO algorithm. Both the improved algorithm and HPSO algorithm run many times for this example. As can be seen from the statistics, the results and stability of the improved algorithm are better than that of HPSO. The novel constraint handling method reduces the number of structural analysis. Therefore, the improved algorithm is nearly two times faster than HPSO.

Key words: PSO; HPSO; constraints; structural optimization; truss

0 引言

桁架结构截面优化设计属于建筑结构优化设计问题,可描述为:在桁架拓扑结构一定的情况下,如何安排桁架中每根杆件的横截面积,以使整个桁架的重量最轻,并且满足结构强度和稳定性要求。目前桁架结

构截面优化效果较好的智能算法有:启发式粒子群优化(Heuristic Particle Swarm Optimizer, HPSO)算法^[1]、CMLPSA(Corrected Multi-Level & Multi-Point Simulated Annealing)算法^[2]、和声搜索(Harmony Search, HS)^[3]算法等。其中,HPSO方法优化时间较长,CMLPSA算法和HS算法的优化结果则不保证完全满足约束条件。

文中对HPSO算法的约束处理策略进行改进,将其约束处理策略与另一种适用于粒子群算法的约束处理方法^[4]结合,并将改进算法应用到1个桁架结构截面优化设计算例中。改进算法的优化结果完全满足约束条件,优化效果和稳定性比HPSO算法稍好,程序运行时间比HPSO算法减少将近一半。文中不仅比较了

收稿日期:2009-09-23;修回日期:2009-12-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10772052);广东省自然科学基金资助项目(06021484, 8151009001000042, 9151009001000059, 9151009001000007)

作者简介:张雯雯(1976-),女,湖南澧县人,讲师,硕士,研究方向为智能算法;李丽娟,教授,博士,研究方向为结构设计理论及方法;滕少华,教授,博士,主要研究方向为数据挖掘、网络安全;罗玉玲,副教授,硕士,主要研究方向为图形图像处理。

改进算法和 HPSO 算法多次运行的最优值,还给出了其平均值和标准差。

1 粒子群优化算法

粒子群优化(Particle Swarm Optimizer, PSO)算法^[5]是 Kennedy 和 Eberhart 于 1995 年提出的,源于对鸟群觅食行为的模拟。算法描述如下:

PSO 算法中的群被称为粒子群,群里的个体被称为粒子。在一个 D 维搜索空间中,共存在 n 个粒子。在第 k 次迭代时,第 i 个粒子的位置为 $X_i^k \in R^D$,其历史最优位置为 P_i^k ,所有 $P_i^k (i=1,2,\dots,n)$ 中的最优值为 P_g^k ,粒子的飞行速度为 $V_i^k \in R^D$ 。

粒子的初始位置和速度都可随机产生。第 $k+1$ 次迭代时,每个粒子的飞行速度及位置按公式(1)和(2)进行计算^[5,6]:

$$V_i^{k+1} = \omega V_i^k + c_1 r_1 (P_i^k - X_i^k) + c_2 r_2 (P_g^k - X_i^k) \quad (1)$$

$$X_i^{k+1} = X_i^k + V_i^k \quad (2)$$

其中, c_1 和 c_2 为正的常数,称为学习因子或加速因子, r_1 和 r_2 为 $[0, 1]$ 间均匀分布的随机数。 ω 为惯性权重系数,是 Shi 与 Eberhart 等人后来加入的,用于控制算法的搜索步长^[6]。在每轮迭代中,飞行速度都限制在区间 $[-V_{\max}, V_{\max}]$ 内。粒子群中的每个粒子从初始位置和速度开始,按照公式(1)和(2)进行迭代计算,直至满足算法终止条件。

众多学者对 PSO 算法进行了改进,如 S. He 等人提出了被动群集粒子群优化算法(PSOPC)^[7]。它在原 PSO 算法基础上增加了一项来描述被动群集现象。即把公式(1)改进为公式(3)^[7]:

$$V_i^{k+1} = \omega V_i^k + c_1 r_1 (P_i^k - X_i^k) + c_2 r_2 (P_g^k - X_i^k) + c_3 r_3 (R_i^k - X_i^k) \quad (3)$$

其中, c_3 称为被动群集系数, r_3 为 $[0, 1]$ 间均匀分布的随机数。 R_i^k 为在粒子群中随机选择出的一个粒子在搜索空间中的位置。

2 启发式粒子群优化算法及其改进

2.1 启发式粒子群优化算法

HPSO 算法在 PSOPC 算法的基础上,加入了约束处理机制,用于解决约束优化问题。在桁架结构截面优化中,除了自变量取值范围约束外,每个桁架结构都带有结构位移约束和应力约束,即各杆件的位移和应力都必须小于指定值。位移和应力都可通过有限元方法(Finite Element Method, FEM)求得。HPSO 算法对变量取值范围约束借鉴 HS 的思想来处理,对应力和变形约束则采用“回飞技术”^[8]。

HS 算法中有一个和声记忆库(Harmony Memory, HM),它储存了目前已搜索到的多个最优解。相似地,在 PSO 算法中也存在着一个被称为 P_{best} 的向量,它是 $P_i^k (i=1,2,\dots,n)$ 的集合,保存了所有粒子的历史最优位置。因此,可以借用“和声搜索”算法在和声记忆库中抽取值以产生新解的思想来重新生成飞出自变量边界的粒子的位置^[1]。

详细描述如下^[1]:

在进行第 $k+1$ 次迭代计算后,如果向量 X_i 中的第 d 个分量 X_i^d 超出其取值范围,则在 P_{best} 中,从所有 $P_i^k (i=1,2,\dots,n)$ 的第 d 维分量中随机选择一个分量来代替,如果有多个分量都超出自变量的许可范围,则均按上述方法处理。

“回飞技术”是 S. He 等人提出的一种简单地处理约束条件的新方法,即粒子在搜索最优解的过程中,一旦飞离可行区域,该粒子将被迫返回可行区域以内。

HPSO 算法的计算流程如下^[1]:

(1)随机初始化粒子群的位置和速度,计算粒子的适应度,初始化 P_{best} 和 P_g ;

(2)检查每个粒子是否处于可行区域,若没有,则重新初始化,直到每个粒子都在可行区域内;

(3)按公式(3)和公式(2)更新粒子群的速度及位置;

(4)检查每个粒子是否飞出了自变量边界,若表示粒子位置的向量的某一维分量超出该分量的取值范围,就在整个粒子群的 P_{best} 向量群中,从所有向量的这维分量中随机选出一个分量来代替(和声搜索思想);

(5)检查每个粒子的位置是否违反了结构约束条件,若是,则采用“回飞技术”使其返回原来的位置;

(6)计算在可行区域的粒子的适应度,更新 P_{best} 和 P_g ;

(7)判断是否满足程序终止条件,若是则结束程序,否则返回第(3)步。

2.2 算法改进

HPSO 算法中,所有粒子都被限定在可行区域内,都必须同时满足自变量取值范围约束及结构强度和稳定性约束。而目前很多文献,如文献[9,10]都认为,在群体中保持一定比例的不可行解,对于提高种群多样性、找到全局最优解很有帮助。另外,要将所有粒子都限制在可行区域内,就必须对每一个粒子的新位置进行结构分析,大量的结构分析减慢了 HPSO 算法的运行速度。

改进算法沿用了 HPSO 算法对自变量取值范围约束的处理方式,对结构约束则采用了另一种处理方法,

即: 每个粒子都可搜索整个空间, 但只跟踪可行解^[4]。在改进算法中, 粒子群里的粒子可以在自变量取值范围内任意移动, 但只有完全满足约束条件的粒子, 才能入选 P_{best} 。实现方法如下:

在第 $k+1$ 次迭代中更新 P_{best} 时, 先判断粒子的适应度是否高于其历史最高适应度, 若是则进行结构分析, 如果结构约束条件也满足, 则更新其历史最优位置, 否则不更新。即:

$$P_i^{k+1} = \begin{cases} X_i^{k+1} & (f(X_i^{k+1}) > f(P_i^k) \text{ and analyze}(X_i^{k+1})) \\ P_i^k & (\text{else}) \end{cases} \quad (4)$$

其中, f 函数用于求适应度值; analyze 为结构分析函数, 若符合结构约束条件则返回. T., 否则返回. F.。

这种约束处理方式只有在粒子的适应度比其历史最优位置的适应度高的情况下, 才需要进行结构分析。从而, 结构分析的总数减少了一半左右, 程序运行的速度可提高将近一倍。

改进算法的计算流程与 HPSO 算法基本相同, 只需要去掉第 (5) 步, 并且在原第 (6) 步更新 P_{best} 时, 按公式 (4) 进行计算。

3 在桁架结构截面优化设计的应用

文中选用的桁架结构截面优化设计算例均相关文献中经常使用的经典算例。2 个算法相同参数有: 种群个体数均为 50; 惯性因子 ω 在迭代计算的过程中由 0.9 线性递减至 0.4; 被动群集系数 c_3 取 0.6; 设计变量上限均设为 50 in.²; 最大飞行速度设为设计变量的上、下限之差; 迭代次数均为 5000。HPSO 算法的加速因子 c_1 和 c_2 均取 0.8; 改进算法的 c_1 和 c_2 均取 1.45。2 个算法各自运行了 10 次。

3.1 桁架结构截面优化设计算例

200 杆平面桁架结构如图 1 所示。各根杆件使用相同的材料。材料的密度为 0.283 lb/in.³, 弹性模量为 30000ksi。各根杆件的许可应力均为 ± 10 ksi。各点在两个方向上的许可位移为 ± 2.0 in.。各设计变量(杆件的截面面积)的下限为 0.1 in.²。200 根杆件分为 29 个组别, 见表 1。本结构将考虑三个工况。工况 1: 结点 1、6、15、20、29、34、43、48、57、62 和 71 均作用一个大小为 1.0kips, 指向 X 轴正向的力; 工况 2: 结点 1、2、3、4、

5、6、8、10、12、14、15、16、17、18、19、20、22、24、...、71、72、73、74 和 75 均作用一个大小为 10kips, 指向 Y 轴负向的力; 工况 3: 工况 1 和工况 2 同时存在。

3.2 优化结果及比较

表 2 列出了 HPSO 算法和改进算法多次运行的统计数据, 如表所示, 改进算法多次运行的平均值和标准差均比 HPSO 算法小。说明对于此算例, 改进算法比原算法搜索精度更高、稳定性更好。

表 3 列出了 HPSO 算法和改进算法多次优化的最佳结果和运行时间, 以及其它文献的优化结果。从表 3 可见, 改进算法的运行时间约为原算法的 54%, 优化结果也比原算法好。HPSO 和改进算法的优化结果虽然不如文献[2,3]的结果, 但文献[2,3]都稍稍违反了约束, 而 HPSO 和改进算法则没有。

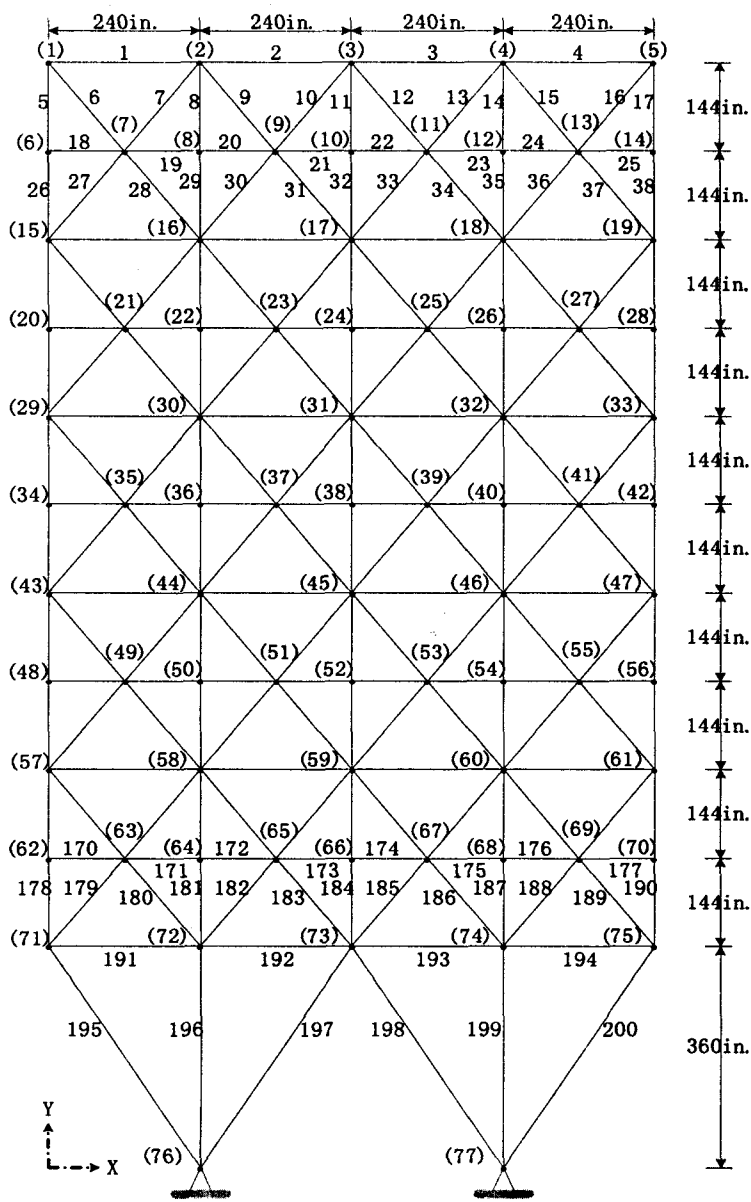


图 1 200 杆平面桁架结构

表 1 200 杆桁架结构的杆件分组

组别	杆件编号	组别	杆件编号
1	1,2,3,4	16	82,83,85,86,88,89,91,92,103, 104,106,107,109,110,112,113
2	5,8,11,14,17	17	115,116,117,118
3	19,20,21,22,23,24	18	119,122,125,128,131
4	18,25,56,63,94,101,132, 139,170,177	19	133,134,135,136,137,138
5	26,29,32,35,38	20	140,143,146,149,152 120,121,123,124,126,127,129,
6	6,7,9,10,12,13,15,16, 27,28,30,31,33,34,36,37	21	130,141,142,144,145,147,148, 150,151
7	39,40,41,42	22	153,154,155,156
8	43,46,49,52,55	23	157,160,163,166,169
9	57,58,59,60,61,62	24	171,172,173,174,175,176
10	64,67,70,73,76 44,45,47,48,50,51,53,	25	178,181,184,187,190 158,159,161,162,164,165,167,
11	54,65,66,68,69,71,72, 74,75	26	168,179,180,182,183,185,186, 188,189
12	77,78,79,80	27	191,192,193,194
13	81,84,87,90,93	28	195,197,198,200
14	95,96,97,98,99,100	29	196,199
15	102,105,108,111,114		

表 2 算法多次运行结果统计

算法	最小值(lb)	最大值(lb)	平均值(lb)	标准差(lb)
HPSO ^[1]	25734.21	28207.4	27016.34	911.99
文中算法	25657.38	26294.92	25814.41	201.70

表 3 最佳优化结果及其运行时间比较

设计变量	优化后的截面面积(in.2)			
	文献[2]	文献[3]	HPSO[1]	文中算法
1	0.1468	0.1253	0.1386	0.1367
2	0.9400	1.0157	0.9408	0.9419
3	0.1000	0.1069	0.1001	0.1204
4	0.1000	0.1096	0.1029	0.1000
5	1.9400	1.9369	1.9926	1.9411
6	0.2962	0.2686	0.2912	0.3023
7	0.1000	0.1042	0.1055	0.1123
8	3.1042	2.9731	3.0966	3.1126
9	0.1000	0.1309	0.1022	0.1192
10	4.1042	4.1831	4.1177	4.1127
11	0.4034	0.3967	0.4175	0.4247
12	0.1912	0.4416	0.1376	0.1475
13	5.4284	5.1873	5.2975	5.4556
14	0.1000	0.1912	0.3102	0.1708
15	6.4284	6.2410	6.2973	6.4556
16	0.5734	0.6994	0.6186	0.6075
17	0.1327	0.1158	0.5977	0.1680
18	7.9717	7.7643	8.0981	8.0459
19	0.1000	0.1000	0.1658	0.3380
20	8.9717	8.8279	8.9683	9.0459
21	0.7049	0.6986	0.9984	0.9156
22	0.4196	1.5563	0.1864	0.4665
23	10.8636	10.9806	11.2672	11.4085
24	0.1000	0.1317	0.1153	0.2982
25	11.8606	12.1492	12.2748	12.4084
26	1.0339	1.6373	1.0299	1.3644
27	6.6818	5.0032	6.1980	5.1226

(续表 3)

28	10.8113	9.3545	10.3831	9.8703
29	13.8404	15.0919	14.2273	14.7920
重量(lb)	25445.63	25447.1	25734.21	25657.38
运行时间			4.98 小时	2.85 小时
违反约束	0.0709%	3.69%	0%	0%

4 结束语

文中对 HPSO 算法的约束处理策略进行了改进,在 HPSO 算法的约束处理策略中引入了另一种适用于粒子群算法的约束处理方法。改进算法的运行速度比原算法快,总体优化效果和稳定性也较好。改进算法还可以应用到其他约束优化问题中,为约束优化问题的解决提供了一个新选择。

参考文献:

- [1] LI L J, Huang Z B, LIU F. A heuristic particle swarm optimization method for truss structures with discrete variables [J]. Computers and Structures, 2009, 87(7-8):435-443.
- [2] Lamberti L. An efficient simulated annealing algorithm for design optimization of truss structures[J]. Computers and Structures, 2008,86:1936-1953.
- [3] KANG SEOK LEE, ZONG WOO GEEM. A new structural optimization method based on the harmony search algorithm [J]. Computers and Structures,2004,82:781-798.
- [4] Hu Xiaohui, EBERHART R. Solving constrained nonlinear optimization problems with particle swarm optimization[C]//6th World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics. Orlando, Florida, USA:[s. n.], 2002:203-206.
- [5] KENDY J, EBERHART R C. Particle Swarm Optimization [C]//Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Neural Networks. Piscataway, NJ, USA:[s. n.],1995:1942-1948.
- [6] Shi Y, EBERHART R C. A modified Particle Swarm Optimizer [C]//IEEE International Conference on Evolutionary Computation Proceedings. Anchorage, AK, USA:[s. n.], 1998:69-73.
- [7] HE S, WU Q H, WEN J Y, et al. A particle swarm optimizer with passive congregation[J]. Biosystems, 2004, 78(1-3):135-147.
- [8] HE S, PREMPAIN, WU Q H. An improved particle swarm optimizer for mechanical design optimization problems[J]. Engineering Optimization,2004,36(6):585-605.
- [9] MEZURA-MONTES E, COELLO C A C. A simple multi-membered evolution strategy to solve constrained optimization problems[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation,2005,9(1):1-17.
- [10] 林丹,李敏强,寇纪淞.基于遗传算法求解约束优化问题的一种算法[J].软件学报,2001,12(4):628-632.