

文章编号:1673-9469(2009)03-0019-03

## 改进遗传算法在桁架拓扑优化中的应用

李京涛,何丽丽,高瑞贞,张京军  
(河北工程大学 土木工程学院,河北 邯郸 056038)

**摘要:**基于桁架拓扑优化,对遗传算法提出了一些改进措施,形成了一种高效综合的遗传算法。在桁架的截面尺寸和拓扑结构混合设计中,对尺寸变量和拓扑变量分别进行二进制编码、交叉和变异,得到桁架拓扑结构和杆件截面尺寸的初解,适当降低尺寸变量编码精度,以加快算法的收敛速度。然后对截面尺寸重新编码,以较高的尺寸精度进行搜索,为了防止陷入局部最优解,取部分初解加入新的父代。算例表明,该算法对离散变量的桁架拓扑优化是快速有效的。

**关键词:**拓扑优化;遗传算法;桁架结构

**中图分类号:** TU311.4

**文献标识码:** A

### Application of improved genetic algorithm in truss topology optimization

LI Jing-tao, HE Li-li, GAO Rui-zhen, ZHANG Jing-jun

(College of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Hebei Handan 056038, China)

**Abstract:** Based on the topology optimization of truss, the genetic algorithm (GA) was improved more efficient. In the design of size and topological structure of the truss, binary encoding, crossover and mutation for size and topology variables were adopted separately and the initial solution was gained, with the accuracy of the size variable coding properly reduced to speed up the convergence of the GA. In order to prevent trapping in local optimal solution, a portion of initial solution was added to the new parents, and then the size of section was recoded and the final solution was searched in a better precision. Examples show that the method is effective to the topology optimization design of truss structures with discrete variables.

**Key words:** topology optimization; genetic algorithm; truss structure

结构优化设计根据设计变量类型的不同划分3个层次:优化结构元件的参数;优化结构的形状;优化结构的拓扑结构。现代较新的优化设计还有智能优化,优化致动器的位置和尺寸,使结构具有感知、逻辑判断和响应内外环境的智能判断能力<sup>[1]</sup>。其中,拓扑优化难度最大,结构拓扑优化通过改变结构的拓扑模型来优化结构的材料分布,改善结构的受力状况,因而能够获得更大的经济效益,同时也较尺寸或形状优化具有更大的难度。

目前,大多桁架的优化都是以结构重量最轻为目标,通过节点位置、拓扑连接和杆件截面交替优化来实现。王跃方等提出一个多工况下受应力、位移约束的离散变量桁架结构的拓扑优化方法<sup>[2]</sup>;罗海林等采用遗传禁忌搜索算法求解位移、应力约束下离散变量桁架拓扑优化<sup>[3]</sup>;Kirsch针对

离散结构的拓扑优化问题,提出了一种两阶段算法<sup>[4]</sup>。蔡文学和程耿东使用模拟退火算法求解桁架结构拓扑优化的全局最优解,构造了一个双重控制 Metropolis 准则处理应力约束,提出了一个基于力平衡的启发式准则,以实现优化过程中单元的自动增删<sup>[5]</sup>。

本文以桁架为例,采用人为干涉遗传算法,先对结构进行拓扑优化,删除结构中的0杆,得到桁架拓扑分布最优解和杆件截面初解,再对截面杆件重新编码从而得到终解,以提高计算效率和计算精度。

### 1 离散变量桁架的结构拓扑优化模型

离散变量桁架拓扑优化的数学模型可以表示

收稿日期:2009-5-21

基金项目:河北省自然科学基金项目(E2008000731) 特约专稿

作者简介:李京涛(1981-),男,河北晋州人,硕士研究生,从事遗传算法和拓扑优化方面的研究。

为  $A = \{A_1, A_2, \dots, A_N\}$  和  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_N\}$ , 即

$$\min W = \sum_{i=1}^{i=N} t_i \rho_i l_i A_i \quad (1)$$

$$\text{s.t. } g_i(x) = \begin{cases} \sigma_i - \sigma_m \leq 0 \\ d_i - d_m \leq 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$A_i = \begin{cases} \in S = \{S_1, S_2, \dots, S_N\} & t_i = 1 \\ \epsilon & t_i = 0, t_i \in \{0, 1\} \end{cases} \quad (3)$$

其中  $A = \{A_1, A_2, \dots, A_N\}$  为单元截面设计变量;  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_N\}$  为结构单元的拓扑设计变量, 以 0 表示单元不存在, 以 1 表示单元存在;  $W$  为结构的重量,  $\rho_i$  和  $l_i$  分别为单元的密度和长度;  $N$  为杆件的组数;  $M$  为工况数;  $\sigma_i$  是单元  $i$  的应力;  $\sigma_m$  是许用应力;  $d_i$  是节点  $i$  的位移;  $d_m$  是许用位移;  $S$  为截面离散集;  $N$  是其中元素的个数, 且  $S_1 < S_2 < \dots < S_N$ ;  $\epsilon$  是一个很小的数, 表示杆件被删除时的截面的面积下限。

### 2 遗传算法的人为干涉

遗传算法进行二进制编码时, 求解精度越高二进制编码越长, 求解时间也就加长了。本文采用人工控制遗传算法进行粗糙求解, 采用遗传算法对桁架同时进行截面优化和拓扑优化, 杆件的截面精度适当的降低。在遗传算法中, 随机产生拓扑变量, 而且经过复制、交叉和变异后, 所产生的拓扑结构仍然具有一定的随机性, 而且相当比例为不合理结构。在桁架拓扑设计中, 某些节点是至关重要、不能删除的, 如受载荷点和支撑点, 若结构支撑不够, 结构就会不稳定。由此可见受载荷点和支撑点必须完整的存在。所以在优化中加入拓扑检验可以节省求解时间。

由于遗传算法适用于无约束优化问题, 约束的优化问题必须转化为无约束优化问题。在结构优化遗传算法中, 通常采用惩罚函数法处理约束。但是在全局搜索时, 惩罚函数过大目标函数容易陷入局部最优解, 惩罚函数过小, 会加大算法的求解时间。本文采用凝聚法采用凝聚函数将约束优化问题转化为无约束优化问题。用最大熵作为一个辅助推理准则, 导出一个可微函数  $W_{p(x)}$  借以直接逼近原来的约束。则问题的约束等价

$$W_{p(x)} = \ln \left\{ 1 + \sum_{i=1}^n \exp [pg_i(x)] \right\} / p \quad (4)$$

式中  $P$  是一个控制参数, 所以可以转换为

$$\varphi(x) = W + \alpha W_{p(x)} \quad (5)$$

$\alpha$  是惩罚因子。产生初解后, 拓扑结构已经确定, 对截面尺寸解进行解码, 再以较高的精度进行第二次编码, 进行第二步精细求解。

### 3 遗传算法的改进和实现

遗传算法流程如图 1 所示。

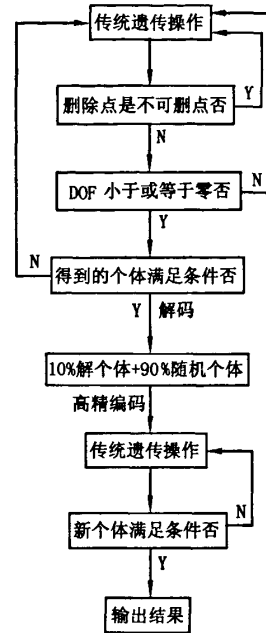


图1 遗传算法流程图

Fig.1 The flow chart of the genetic algorithm

产生初解的过程:

(1) 编码, 采用二进制编码, 选择适当的低编码精度。

(2) 选择与复制, 采用凝聚约束<sup>[6]</sup>。

(3) 交叉与变异, 为了能产生新个体交叉率设为 0.1; 变异率设为 0.01。

在拓扑优化过程中, 支撑点和受力点是必须保留的, 若父代不含有这些点则进行交叉变异, 直至产生满足条件的点。同时在拓扑优化中桁架必须是静定或超静定的, 对于产生一些不稳定的结构是必须删除的, 即它的自由度满足

$$DOF = 2N_p - N_L \leq 0 \quad (6)$$

式中,  $N_p$  - 固定节点外的外在节点;  $N_L$  - 桁架单元数。

产生终解的过程: 产生初解的过程中, 由于杆件截面面积精度较低, 有较小的概率产生局部最优解。从产生初解的这一代的种群中选取 10% 的

表1 十二桁架优化结果  
Tab.1 Calculation results of 12-bar truss

方法	截面积(cm <sup>2</sup> )												重量(N)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
文献[7]	180.64	141.94	19.35	32.26	96.77	0	0	0	109.68	0	0	0	20113
文献[8]	167.74	109.68	0	32.26	109.68	19.35	32.26	19.35	109.68	77.42	0	0	20122
本案	167.74	141.94	32.26	0	77.42	0	0	0	141.94	77.42	0	0	19175

个体,同时再随机的选取 90%新个体,从而保持了种群的多样性,在加大编码精度时,避免了产生局部终解。

4 算例

图2所示十杆桁架,各杆的弹模  $E = 68.97$  GPa,密度  $\rho = 2768\text{kg/m}^3$ ,许用应力  $\sigma_m$  为172.435 MPa,两种荷载工况,工况 1:  $P_{6Y} = -445\text{kN}$ ,工况 2:  $P_{4Y} = -445\text{kN}$ 。位移约束是两工况下结点6 结点4在  $y$  方向的变位  $d_m$  不允许超过  $\pm 5.08\text{cm}$ 。截面离散集为  $S = \{6.54, 19.35, 32.26, 51.61, 67.74, 77.42, 96.77, 109.68, 141.94, 154.84, 167.74, 180.64, 187.10, 200, 225.81\}$ 。

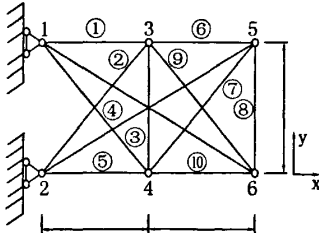


图2 十二杆桁架  
Fig.2 Truss with 12 bars

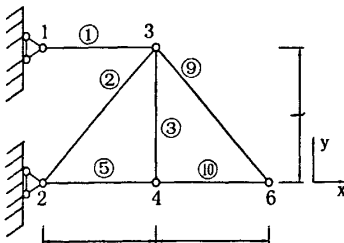


图3 十二杆桁架最优拓扑  
Fig.3 Optimal topology of 12 bars truss

参数设置:图1 两步遗传参数相同,种群数为 50,惩罚因子为 100.0,变异概率为 0.01,违反约束误差为 0.001,该算法仅在第 31 代就得到最后结果。其最后优化结果如表 1 所示,并和文献[7,8]

和文献[9]进行了对比。图 3 所示为最后拓扑优化结构。

由图 3 可知,加入拓扑优化后,优化后的结构上悬杆成抛物线的折线结构,这同 Michell 桁架最优理论是一致的,这也符合杆件沿力的传递路径分布原则。

5 结论

算例表明,本文提出的方法是有效的,能以较高的效率得到较好的结果。加入了拓扑优化,得到结构的较好解;采用检验不可删点和结构是否合理的自由度检验,降低第一次截面的求解精度,提高了求解效率;进行第二次截面优化,提高求解精度和检验了第一次求解是否陷入局部最优解。

参考文献:

- [1] 袁伟泽,高瑞贞. 智能结构中致动器的位置和尺寸的优化研究 [J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2008, 25(3): 38-41.
- [2] 王跃方,孙焕纯. 多工况多约束下离散变量桁架结构的拓扑优化设计 [J]. 力学学报, 1995, 27(3): 365-369.
- [3] 罗海林,霍达. 离散变量桁架结构拓扑优化的遗传禁忌搜索算法 [J]. 河南科学, 2005, 23(6): 909-911.
- [4] 许素强,夏人伟. 桁架结构拓扑优化与遗传算法 [J]. 计算结构力学及应用, 1994, 11(4): 436-446.
- [5] 蔡文学,程耿东. 桁架结构拓扑优化设计的模拟退火算法 [J]. 华南理工大学学报, 1998, 26(9): 78-83.
- [6] 朱朝艳,张晓东. 离散变量桁架结构拓扑优化的改进混合遗传算法 [J]. 兰州大学学报, 2005, 41(5): 102-106.
- [7] 朱朝艳,刘斌. 复合遗传算法在离散变量桁架结构拓扑优化设计中的应用 [J]. 四川大学学报, 2004, 36(5): 6-10.
- [8] 解丹蕊,薛惠锋,韩建新. 基于遗传算法的西安邮政配送路线优化研究 [J]. 河北科技大学学报, 2008, 29(3): 214-218.
- [9] 柴山,石连栓. 包含两类变量的离散变量桁架结构拓扑优化设计 [J]. 力学学报, 1999, 31(5): 574-584.

(责任编辑 马立)

作者: 李京涛, 何丽丽, 高瑞贞, 张京军, LI Jing-tao, HE Li-li, GAO Rui-zhen, ZHANG Jing-jun  
作者单位: 河北工程大学土木工程学院, 河北, 邯郸, 056038  
刊名: 河北工程大学学报(自然科学版)   
英文刊名: JOURNAL OF HEBEI UNIVERSITY OF ENGINEERING (NATURAL SCIENCE EDITION)  
年, 卷(期): 2009, 26(3)  
被引用次数: 5次

## 参考文献(9条)

1. 袁伟泽;高瑞贞 智能结构中致动器的位置和尺寸的优化研究[期刊论文]-河北工程大学学报(自然科学版) 2008(03)
2. 王跃方;孙焕纯 多工况多约束下离散变量桁架结构的拓扑优化设计 1995(03)
3. 罗海林;霍达 离散变量桁架结构拓扑优化的遗传禁忌搜索算法[期刊论文]-河南科学 2005(06)
4. 许素强;夏人伟 桁架结构拓扑优化与遗传算法[期刊论文]-计算结构力学及其应用 1994(04)
5. 蔡文学;程耿东 桁架结构拓扑优化设计的模拟退火算法[期刊论文]-华南理工大学学报(自然科学版) 1998(09)
6. 朱朝艳;张晓东 离散变量桁架结构拓扑优化的改进混合遗传算法[期刊论文]-兰州大学学报(自然科学版) 2005(05)
7. 朱朝艳;刘斌 复合形遗传算法在离散变量桁架结构拓扑优化设计中的应用[期刊论文]-四川大学学报(自然科学版) 2004(05)
8. 解丹蕊;薛惠锋;韩建新 基于遗传算法的西安邮政配送路线优化研究[期刊论文]-河北科技大学学报 2008(03)
9. 柴山;石连栓 包含两类变量的离散变量桁架结构拓扑优化设计 1999(05)

## 本文读者也读过(10条)

1. 王本德 应用遗传算法进行机械优化设计计算[期刊论文]-长江大学学报(自然科学版) 2005, 2(1)
2. 唐文艳. 袁清珂. TANG Wen-yan. YUAN Qing-ke 改进的遗传算法求解桁架的拓扑优化[期刊论文]-计算力学学报 2008, 25(1)
3. 张莉. 周克民. Zhang Li. Zhou Kemín 基于类桁架连续体的结构拓扑优化方法与应用[期刊论文]-应用力学学报 2007, 24(3)
4. 周克民. ZHOU Ke-min 形成不同拉压允许应力Michell桁架的有限元方法[期刊论文]-计算力学学报 2008, 25(3)
5. 田承昊. 董城. 刘明. 王铁成. TIAN Cheng-hao. DONG Cheng. LIU Ming. WANG Tie-cheng 基于自适应遗传算法的3D钢桁架优化设计研究[期刊论文]-铁道工程学报 2009, 26(6)
6. 陈科. 赵韩. 柯尊忠 神经网络及演化算法在机械优化中的应用[会议论文]-2000
7. 孙林松. 张伟华. SUN Linsong. ZHANG Weihua 加速微种群遗传算法及其在结构优化设计中的应用[期刊论文]-应用基础与工程科学学报 2008, 16(5)
8. 唐文艳. 顾元宪. 郭旭 求解具有奇异性的桁架拓扑优化的遗传算法[期刊论文]-计算力学学报 2004, 21(2)
9. 闫凯. 周克民. YAN Kai. ZHOU Ke-min 用三角形单元建立拓扑优化类桁架连续体[期刊论文]-华侨大学学报(自然科学版) 2009, 30(2)
10. 段敬民. 陈少杰. 赵洪波 改进蚁群算法在空间桁架中的应用研究[会议论文]-2009

## 引证文献(5条)

1. 张京军. 刘文娟. 刘光远 基于改进免疫遗传算法的网络任务调度[期刊论文]-河北工程大学学报(自然科学版) 2013(2)

2. 王红霞, 高瑞贞, 张京军 基于不动点理论的改进遗传算法[期刊论文]-河北工程大学学报(自然科学版) 2010(3)
3. 张世君, 张京军, 何丽丽, 高瑞贞 智能桁架作动器数目与位置的多目标优化[期刊论文]-河北工程大学学报(自然科学版) 2011(4)
4. 刘立民, 马丽涛, 庞彦军, 李法朝 基于多保留策略的复合型遗传算法及其收敛性分析[期刊论文]-河北工程大学学报(自然科学版) 2010(1)
5. 李彦苍, 赵丽娜 离散变量结构优化方法研究现状及趋势[期刊论文]-河北工程大学学报(自然科学版) 2011(4)

本文链接: [http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_hbjkjxyxb200903006.aspx](http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_hbjkjxyxb200903006.aspx)