

文章编号 1000 5013(2005) 01 0058 04

桁架结构施工路径优化设计

林 琳 张云波 章凌云

(华侨大学土木工程系, 福建 泉州 362021)

摘要 以假设杆件全部除去时的支撑点数和支撑反力的累计总和为目标函数, 利用改进遗传算法求解桁架结构的最优施工路径优化, 编制相应的程序, 完成层状桁架结构的施工路径优化问题设计. 算例表明, 利用改进遗传算法有可能得出更优的解.

关键词 桁架结构, 施工路径, 优化设计, 改进遗传算法

中图分类号 TU 712⁺. 1 **文献标识码** A

建筑物的施工顺序, 对结构的内力、成本和安全性等产生很大的影响. 进行建筑结构物的施工作业计划时, 不仅应注意竣工时的结构特性, 还应注意施工过程的结构特性. 施工过程的力学分析结果不但和竣工对象本身有关, 而且和施工作业路线(流程) 有关. 选择适当的施工流程, 不仅会减少结构的内力与变形, 提高安全度, 而且会降低对周围环境的影响. 这里面存在一个施工流程与方式的优化问题. 施工力学优化理论与方法和常规(竣工) 结构或工程优化有很多不同, 区别主要在于前者的最终设计形状和参数是固定的, 而过程是变化的. 本文在改进遗传算法的基础上^[1], 研究桁架结构的最佳施工路径.

1 施工路径的分析

本文以桁架结构为研究对象, 探索桁架结构的最佳施工路线. 从桁架结构的完整状态开始, 一根根地除去杆件, 检查桁架结构物的构造是否稳定. 桁架结构物除去一根杆件后, 如果其刚度矩阵行列式为 0 时, 则是一种不稳定状态; 而为 0 以外的其它值时, 则为稳定状态. 当构造不稳定时, 用刚度矩阵的一般逆行列式解析法求出刚体位移设置, 从而假定能使桁架结构物稳定的支撑节点与支撑方向. 在从完整状态到除去全部杆件的过程中, 都进行前述计算, 并假设杆件全部除去时的支撑点数或支撑反力的累计总和为目标函数. 计算出目标函数, 分析桁架结构物的最佳施工路线.

2 改进遗传算子的设计

2.1 编码问题

按照构成桁架结构的全部杆件一一除去的顺序对杆件进行编号, 再将其像染色体一样进行编码, 即采用自然数编码方法. 全部杆件数量为 n 根时, 各染色体可表示为 $/ 1, 2, \dots, n \}$ 一数列. 对如图 1 所示的平面桁架杆件按去除顺序进行编号, 就形成如表 1 所示的染色体编码. 染色体的表示是, 最初去除杆件编号为 12 的杆件, 然后去除

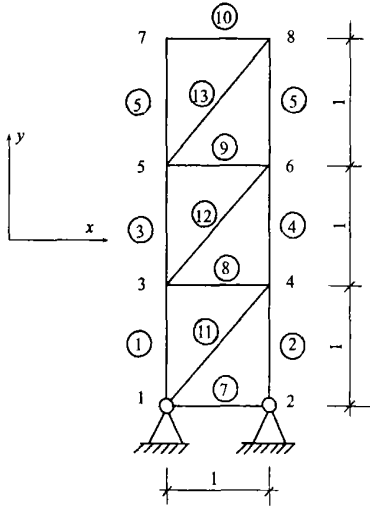


图 1 平面 13 杆桁架结构

3 号杆件, 接下来顺序为 9, 5, 6, ..., 2. n 根杆件, 需要除去 n 次, 所有的染色体包含全部 $\{1, 2, \dots, n\}$, 不会重复各基因.

表 1 个体编码

除去顺序	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	11	12	13
构件编号	12	3	9	5	6	11	8	7	4	10	13	1	2

2.2 免疫算子

对求解的问题(即抗原)进行具体分析, 提取最基本的特征信息(即疫苗). 其次, 对特征信息进行处理, 将其转换成求解问题的一种方案(由此方案得到的所有解的集合称为基于上述疫苗所产生的抗体). 最后, 将此方案以适当的方式转换成免疫算子, 以实施具体操作. 需要说明的是, 待求问题的特征信息往往不止一个, 也就是说针对某一特定抗原所能提取的疫苗可能不止一个. 本例中, 把与支座点相连接的杆件作为最终的去除杆件信息, 作为算法执行过程中进行免疫操作时所注入的疫苗. 每次遗传操作后, 对所有个体进行免疫检测. 若符合这一条件, 则继续; 反之, 说明此解为非符合条件的解. 该个体将被随机产生的可行个体取代.

2.3 选择复制算子

本文将稳态最优保存策略和排序选择方法相结合, 采用稳定比例优选法. 首先进行排序选择机制, 它是基于群体中各个体之间的相对适应度设计的等级选择机制. 依据各个体的适应度大小进行排序, 适应度最大的排在第 1 号, 最小的安排在第 M 号(设群体规模为 M). 然后基于所排序号按照稳态最优保存的规则进行选择, 排在前面的个体有较多的被选择机会. 这样, 对适应度较高的个体进行保护, 使其不受影响直接进入下一代. 替换种群中的一部分适应度差的个体, 能避免好的种群结构和基因模式遭受破坏, 使遗传算法稳定地收敛. 同时, 每代就只算替换适应度差的个体的适应值, 可减少适应值计算的次数. 定义未被替换的个体占 $1/N$ 种群规模(M), 则每代可减少的适应度的计算次数为 M/N (初始代除外).

2.4 交叉算子

文献[2]中, 对 OX 法, 类 OX 法和 PMX 法等多种交叉方法进行模拟试验, 比较分析得出类 OX 法显示出较好的优化能力. 在文献[3]中也指出, 这种方法在两父代个体相同的情况下, 仍能产生一定程度的变异效果. 这对维持群体内一定的多样化特性有一定的作用, 在实验中也显示了较好的结果. 因此, 本文将采用这种方法. 下作简介. 在两个父串中随机选择一个匹配区域, 如两父串及匹配区域选定为

$$A = 123|95611874|101312,$$
$$B = 122|611895131|10347.$$

首先, 将 B 的匹配区域加到 A 前面, A 的匹配区域加到 B 的前面, 可得

$$A' = 611895131|12395611874101312,$$
$$B' = 95611874|12261189513110347.$$

然后, 在 A' 中自匹配区域后一次删除与匹配区域中相同的杆件编码, 得到最终的两个子串为

$$A'' = 61189513112374102,$$
$$B'' = 95611874122131103.$$

2.5 变异算子

采用求解 TSP 问题优化算法中常常采用的对换变异, 随机选出任一基因与同一染色体中随机选出的其它基因进行交换. 在遗传算法中, 对换变异操作对码串绝对位置所呈现的“模式”变化影响较小, 所需的计算也相对简单一些. 例如, $A = 6 \boxed{11} 8951311237 \boxed{4} 102$, 变异后, $A' = 6 \boxed{4} 8951311237 \boxed{11} 102$.

3 假设支撑点数最小的施工路径仿真设计

3.1 适应度

研究除去全部杆件时, 使假设支撑的支撑点数成为最小的问题. 每除去一杆件就应计算桁架的刚度

矩阵的行列式, 判断桁架结构物是否稳定. 如果稳定可除去下一杆件; 如果不稳定, 则要根据刚体位移设置来决定假设支撑点、支撑方向, 计算支撑点数 g_i . 其中, 支撑点数 g_i 表示在 i 号步骤中必要的假设支撑点数. 在所有步骤中计算各支撑点数, 为使完全除去构件时的支撑点数为最小, 可设所有步骤的支撑点数总和 ($g = \sum g_i$) 为目标函数. 那么, 其适应度为 $F = 1/g$.

3.2 设计结果

如图 1 所示的层状结构物, 由 8 个节点 13 根杆件组成, 各杆材料相同, 弹性模量 $E = 98.1 \text{ MPa}$, 断面积 $A = 1.0 \text{ cm}^2$, 单位体积重量 $\rho = 10 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$, 长度单位为 m . 施工时的荷载只考虑自重荷载, 容许轴向力取与成型结构只受自重作用下的轴向力相同. 在 GA 中最大进化代数(n)为 100, 种群个数为 50, 交叉率为 0.5, 变异率为 0.05, 选择率为 0.02. 图 2 给出各代适应度(F)的最大值、平均值和最小值的变化. 表 2 表示各阶段的支撑点数 g_i 与到各阶段为止的支撑点数总和 g . 探索全施工路线, 其最佳施工路线的支撑点数总和 g 为 6. 如表 3 所示, 根据本方法所得的施工路线 $g = 6$ 是最佳施工路线. 表中的 x 表示在该点加 x 方向的支撑, y 表示在该点加 y 方向的支撑.

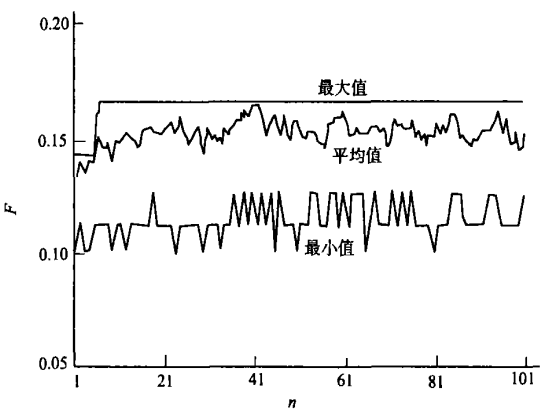


图 2 适应度函数为支撑反力的遗传结果图

表 2 各方案杆件的去除顺序

方案	去除顺序	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	Σg
1	去除杆号	7	10	5	13	6	9	3	12	4	8	1	11	2	6
	支撑数 g	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	
	所加支撑	-	7x	-	8x	-	5x	-	6x	-	3x	-	4x	-	
2	去除杆号	10	5	13	6	9	3	4	12	7	1	8	11	2	6
	支撑数 g	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	
	所加支撑	7x	-	8x	-	5x	-	6y	-	-	3y	-	4x	-	
3	去除杆号	13	12	7	11	10	6	9	5	3	4	8	2	1	6
	支撑数 g	1	1	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	
	所加支撑	8x	6x	-	4x	7x	-	5x	-	-	-	3x	-	-	
4	去除杆号	5	10	13	6	3	9	12	4	1	8	11	2	7	6
	支撑数 g	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	
	所加支撑	7y	-	8x	-	5y	-	6x	-	3y	-	4x	-	-	
5	去除杆号	10	13	6	5	9	12	3	4	8	11	2	1	7	6
	支撑数 g	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	
	所加支撑	7x	8x	-	-	5x	6x	-	-	3x	4x	-	-	-	
6	去除杆号	10	5	13	6	9	3	12	4	8	1	11	2	7	
	支撑数 g	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	
	所加支撑	7x	-	8x	-	5x	-	6x	-	3x	-	4x	-	-	

4 使支撑反力为最小的施工路径仿真设计

4.1 适应度

研究在假设支撑的节点上由自身重量产生的支撑反力为最小的问题. 与上例相同, 如果除去构件后桁架不稳定, 则通过刚体位移方法决定假设支撑点与支撑方向. 计算假设支撑点产生的反力, 设在 i 号步骤中支撑反力的合计为 R_i , 在所有步骤中计算各支撑反力 R_i . 设所有步骤的支撑反力 R_i 的总和 $R = \sum R_i$ 为目标函数. 为了使 R 最小, 利用指数函数给出适应度 $F = 1/e^R$.

4.2 设计结果

再次考虑图 1 所示的桁架结构. 在 GA 中最大进化代数为 50, 种群个数为 100, 交叉率为 0.5, 变异率为 0.06, 选择率为 0.1. 图 3 给出各代适应度 (F) 的最大值、最小值、平均值的变化. 在所有步骤中获得只假设支撑 x 方向的施工路线. 支撑反力的总和 R 为 0, F 为 1 是最佳施工路线. 表 3 是对获得的解(与表 2 相对应)的一个比较. 可以发现, 方案 2^[4]和方案 4 虽然支撑数之和为 6, 最小, 但是其支撑总反力不为 0. 方案 1, 3, 5 和 6 获得的支撑数和支撑反力值均为最小. 比较其各步骤总的轴向力比之和, 发现方案 6 的值最小, 因此判定方案 6 为最佳方案. 图 3 表示根据本解析结果获得的最佳施工路线. 比较方案 2 的结果和方案 6, 按改进遗传算法获得的结果, 我们可以发现, 在获得同样的支撑点数的情况下, 方案 6 去除各步骤的支撑反力和与轴向力比之和比方案 2 的值更小. 说明改进遗传算法, 有可能得出更优的解.

表 3 各方案的目标值

方案	Σg	ΣR	Σ_j
1	6	0	23.65
2	6	1.207 1	17.96
3	6	0	28.15
4	6	1.500 0	17.03
5	6	0	17.78
6	6	0	17.67

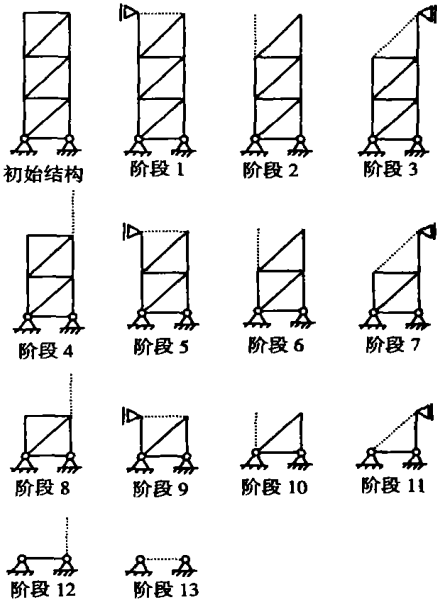


图 3 方案 6 的解析模型(拆除顺序)

5 结束语

(1) 本文借鉴遗传算法在求解类似路径优化问题的成功经验, 将其应用于桁架结构物的最佳施工路径探索问题. 数值解析结果说明, 在此问题中应用遗传算法的实用性. (2) 遗传算法所具有的简单、通用、寻优准确度和效率高, 以及并行搜索的特点, 为解决施工路径优化问题提供了一条新途径.

参 考 文 献

1 王小平, 曹立明. 遗传算法——理论、应用与软件实现[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002. 1~ 344
2 梁艳春, 冯大鹏, 周春光. 遗传算法求解旅行商问题时的基因片段保序[J]. 系统工程理论与实践, 2000, (4): 7~ 18
3 陈国良, 王煦法. 遗传算法及其应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1996. 1~ 433
4 王 凌. 智能优化算法及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 施普林格出版社, 2001. 1~ 230

Optimizing Construction Planning Based on Genetic Algorithm for Truss Structure

Lin Lin Zhang Yunbo Zhang Lingyun

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, 362021, Quanzhou, China)

Abstract Taking cumulative total of supporting points and bearing reaction as objective function in case all members are removed, drawing on the successful experience from solving problem similar to optimizing planning, the authors use the improved genetic algorithm for optimizing construction planning in solving truss structure; and compose corresponding program; and complete optimizing design of construction planning for layered truss structure. Computing examples indicate that it is possible to obtain better solution by using improved genetic algorithm.

Keywords truss structure, construction planning, optimizing design, improved genetic algorithm