

林金龙, 石开荣, 姜正荣. 基于模拟植物生长算法的桁架结构截面与形状优化分析[J]. 华南地震, 2023, 43(1): 23–28. [LIN Jinlong, SHI Kairong, JIANG Zhengrong. Optimization Analysis of Section and Shape of Truss Structures Based on Improved Plant Growth Simulation Algorithm[J]. South China journal of seismology, 2023, 43(1): 23–28]

基于模拟植物生长算法的桁架结构截面 与形状优化分析

林金龙¹, 石开荣², 姜正荣²

(1. 广东省建筑设计研究院有限公司, 广州 510010; 2. 华南理工大学土木与交通学院, 广州 510641)

摘要: 针对桁架结构优化问题, 给出基于改进的生长空间限定与并行搜索的模拟植物生长算法(GSL&PS-PGSA)优化模型, 对典型平面桁架、空间桁架结构分别进行截面优化及形状优化分析, 结果表明: 改进GSL&PS-PGSA算法的优化效果显著, 其优化所得结构经济高效; 对于平面桁架截面优化, 相比二级优化法、相对差商法及连续变量法, 改进GSL&PS-PGSA所得结构较其减少了8%~15%的用钢量; 对于空间桁架优化, 截面优化所得结构总质量较序列两级算法轻约8.1%, 较蚁群算法轻约3.6%, 而形状优化所得结构总质量则分别较序列两级算法、蚁群算法轻约31.2%、22.4%。因此, 改进的GSL&PS-PGSA算法对桁架结构优化问题具有良好的适用性。

关键词: 模拟植物生长算法; 桁架; 截面优化; 形状优化

中图分类号: TU393.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2023)01-0023-06

DOI: 10.13512/j.hndz.2023.01.03

Optimization Analysis of Section and Shape of Truss Structures Based on Improved Plant Growth Simulation Algorithm

LIN Jinlong¹, SHI Kairong², JIANG Zhengrong²

(1. Guangdong Architectural Design & Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510010, China; 2. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: Aiming at the optimization of truss structures, the optimal model of improved simulated plant growth algorithm GSL&PS-PGSA is given, and is used to analyze the section optimization problem of typical plan truss and shape optimization problem of typical space truss. The results show that the optimization effect of the improved GSL&PS-PGSA is remarkable, and the optimized structures are economical and efficient; for the section optimization of plan truss, compared with the structures obtained by the two-level optimization method, relative difference quotient method and continuous variable method, the steel consumption of the structure obtained by the

收稿日期: 2022-07-08

基金项目: 广东省现代土木工程技术重点实验室课题(2021B1212040003)

作者简介: 林金龙(1996-), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事结构优化设计工作。

E-mail: 1007116705@qq.com

通信作者: 石开荣(1978-), 男, 博士, 副教授, 主要从事主要从事结构优化、预应力钢结构研究。

E-mail: krshi@scut.edu.cn

improved GSL&PS-PGSA is reduced by 8% to 15%; for the optimization of space truss, the total mass of the optimized structure by section optimization is about 8.1% and 3.6% lighter than that of sequential two-level algorithm and ant colony algorithm respectively, while the total mass of the optimized structure by shape optimization of the same initial structure is about 31.2% and 22.4% lighter than that of sequential two-level algorithm and ant colony algorithm respectively. Thus, the improved GSL&PS-PGSA has good applicability to the optimization problem of truss structure.

Keywords: Plant growth simulation algorithm; Truss; Section optimization; Shape optimization

0 引言

桁架结构具有杆件布置灵活、自重轻等优点,被广泛应用于厂房、体育馆等大跨度建筑中。近年来,为突破传统的结构设计理念,得到经济高效的桁架结构,国内外学者纷纷对桁架结构展开优化研究。

Farajpour^[1]将坐标下降法应用于桁架结构形状优化;张卓群^[2]采用蚁群算法对输电塔结构进行离散变量优化设计;刘森^[3]将遗传算法用于杆系结构形状优化;Ahrari^[4]基于满应力准则法及遗传算法提出了一种能够同时优化桁架结构形状和截面的新方法;Mortazavi^[5]采用综合粒子群算法方法对桁架结构进行优化研究;孙焕纯^[6]基于层次分析法对桁架结构进行形状与截面联合优化。

上述相关桁架结构优化方法均凸显出良好的适用性,但这些方法存在数学模型复杂,参数多等问题。而模拟植物生长算法(PGSA)具有参数设置简便、精度高、稳定性好等优势^[7]。由此,本文针对桁架结构优化问题,基于PGSA的基本原理,采用改进GSL&PS-PGSA算法对其进行截面、形状优化分析,以期对桁架结构优化设计提供参考。

1 改进GSL&PS-PGSA算法及其桁架结构优化模型

1.1 GSL&PS-PGSA算法

基于生长空间限定与并行搜索的模拟植物生长算法(GSL&PS-PGSA)^[8]依据PGSA的基本原理提出,其在原始PGSA算法的基础上引入了可生长点集合限定机制、混合步长并行搜索机制及新增可生长点剔除机制,较好地改良了PGSA的优化求解能力。

1.2 改进GSL&PS-PGSA算法

基于PGSA的基本原理,作者提出改进GSL&PS-PGSA算法^[9]。相比于GSL&PS-PGSA算法,其基本原理及特征如下:

(1)提出双生长点并行生长机制,从而解决PGSA系列算法搜索路径有限,搜索覆盖面不够全面,易陷入局部最优解等问题;

(2)针对PGSA算法因初始解不满足约束条件导致优化无法稳定运行的问题,引入迭代稳定性判断机制;

(3)在已有生长搜索机制^[17]的基础上,引入具有双重随机性增强型随机多向搜索机制,从而综合考虑了更多难以涉及的设计变量组合,增强了变量间的耦合关系,提高了算法的寻优能力。

1.3 桁架结构优化数学模型

基于改进GSL&PS-PGSA的桁架结构优化数学模型可表示为:

$$\begin{aligned} & \text{寻找 } x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \\ & \min f(x) \\ & \text{s.t. } g_i(x) \leq 0, i = (1, 2, \dots, m) \\ & \quad h_i(x) \leq 0, i = (m+1, m+2, \dots, p) \\ & \quad x_{i,\min} \leq x_i \leq x_{i,\max}, i = (1, 2, \dots, n) \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)中, x 为设计变量集合, x_i 为设计变量, n 为设计变量数目; $f(x)$ 为优化目标函数; $g_i(x)$ 、 $h_i(x)$ 分别为优化的不等式、等式约束条件, m 、 $p-m$ 为其对应条件数目; $x_{i,\min}$ 、 $x_{i,\max}$ 分别为设计变量的下、上限。

2 平面桁架结构截面优化

首先以典型的平面桁架结构为对象,对截面优化这一基本优化问题进行分析。

2.1 基本参数

选取文献[8]中的经典十杆平面桁架, 对其截面进行优化。十杆平面桁架结构如图1所示, 共有6个节点, 10根杆件。杆件材性、荷载工况及杆件的许用截面库均与文献[8]一致。

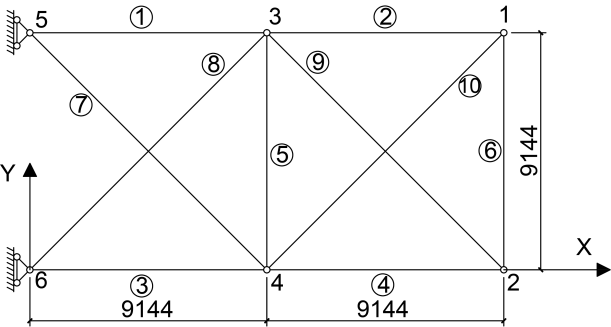


图1 十杆平面桁架
Fig.1 Ten-bar plan truss

采用改进 GSL&PS-PGSA 对上述结构进行截面优化, 优化目标为求结构总质量最小, 设计变量为各杆件的截面编号, 约束条件为节点位移限值、杆件许用应力限值及杆件截面号范围。其余优化初始设置等均与文献[8]一致。

2.2 优化结果

两种算法对应的优化过程对比如图2所示, 所得结果均满足优化问题的约束条件。

由图2可知, 从整个优化历程来看, 改进 GSL&PS-PGSA 始终以较快的速度向最优解逼近, 而 GSL&PS-PGSA 在优化中期显得有所乏力。在寻优能力上, 改进 GSL&PS-PGSA 搜索到最优解所需生长次数比 GSL&PS-PGSA 少 43.8%, 且所得结果更优。由此可见, 改进 GSL&PS-PGSA 具更为强劲

的搜索效率及全局搜索能力。
改进 GSL&PS-PGSA 与其他方法所得优化结果对比如表1所示。

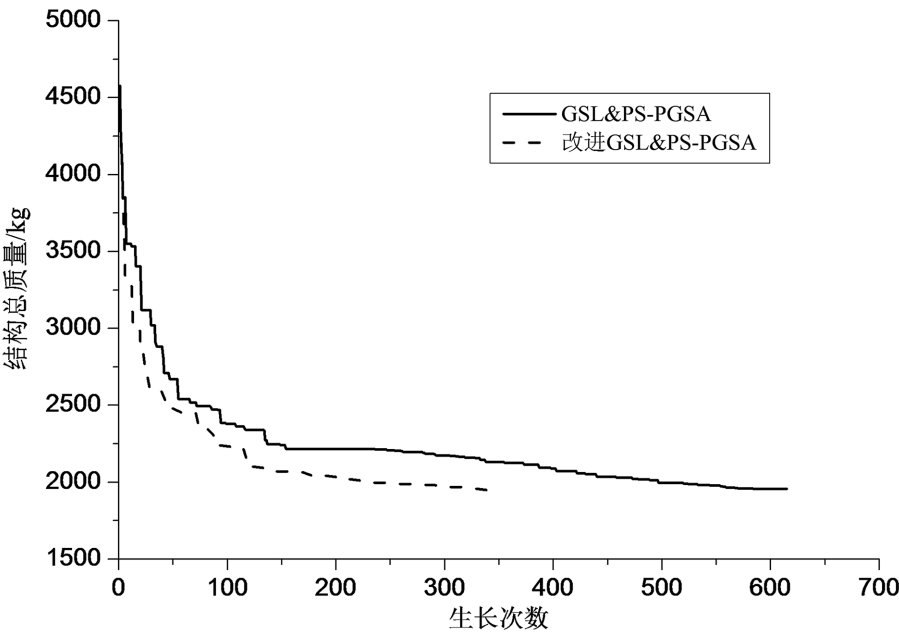


图2 十杆平面桁架截面优化过程
Fig.2 Section optimization process of 10-bar plan truss

表1 截面优化结果对比
Table 1 Comparison of section optimization results

项目	本文方法	其他改进 PGSA		二级优化法 ^[11]	相对差商法 ^[6]	连续变量法 ^[12]
		文献[8]	文献[10]			
最大位移/(mm)	-50.8	-50.7	-50.6	-50.2	-44.3	-50.7
最大应力/(N·mm ⁻²)	169.77	169.77	144.49	161.1	-123.57	-170.25
结构质量/(kg)	1949.6	1956.2	2020.4	2116.7	2244.9	2123.3

由表1可知，相比二级优化法、相对差商法及连续变量法所得优化结果，改进 GSL&PS-PGSA 所得结果较其减少了 8%~15% 的用钢量，而与其他改进 PGSA 所得优化结果相比，本文所得优化结果同样优秀。因此，改进 GSL&PS-PGSA 的优化效果更加显著，其全局搜索能力更为卓越。

3 空间桁架结构优化

进一步地，选取更为复杂的空间桁架结构为对象，对其基本的截面优化和更高层次的形状优化进行分析。

3.1 基本参数

选取文献[2]中的二十五杆空间桁架为对象，对其进行截面优化和形状优化，初始结构模型如图3所示。荷载工况、约束条件、截面库、杆件编号、截面设计变量(表2)、形状优化设计变量(表3)等均与文献[2]一致。

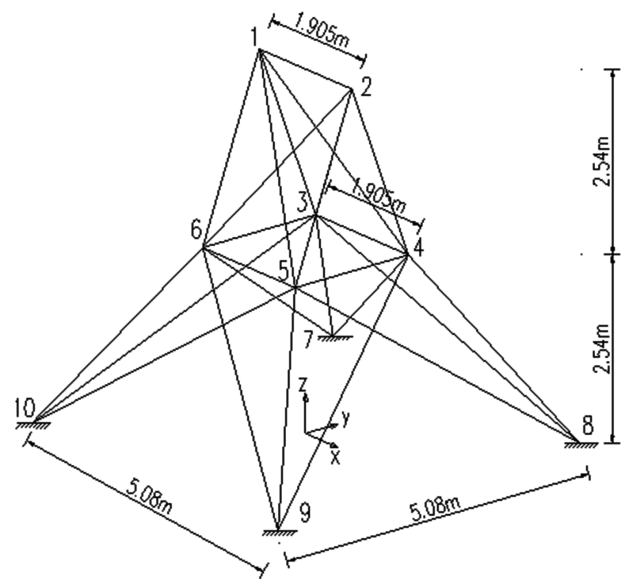


图3 二十五杆空间桁架
Fig.3 25-bar space truss

采用改进 GSL&PS-PGSA 算法进行截面优化及形状优化，优化目标为求结构总质量的最小值。

表2 杆件编号及截面设计变量
Table 2 Numbering and grouping of members

截面设计变量	杆件编号
A_1	1-2
A_2	1-4、2-3、1-5、2-6
A_3	2-5、2-4、1-3、1-6
A_4	3-4、5-6
A_5	3-6、4-5
A_6	3-10、6-7、4-9、5-8
A_7	3-8、4-7、6-9、5-10
A_8	3-7、4-8、5-9、6-10

注：杆件编号 1-2 指代的杆件由节点 1、2 连接而成。

表3 形状设计变量
Table 3 Shape design variables

节点编号	x	y	z	节点编号	x	y	z
1	$-x_2$	y_2	z_2	4	x_4	y_4	z_4
2	x_2	y_2	z_2	5	x_4	$-y_4$	z_4
3	$-x_4$	y_4	z_4	6	$-x_4$	$-y_4$	z_4

3.2 截面优化结果

截面优化过程如图4所示。从整个优化历程来看,改进GSL&PS-PGSA前期跳出局部最优解的速度较快,中期结构总质量迅速下降,表明算法的搜索效率高,寻优能力出色。迭代最终收敛于第160次,对应最优解为259.183 kg。优化后,结构的位移、应力等均满足要求。

改进GSL&PS-PGSA与其他方法的优化结果对比如表4所示。由表4可知,本文方法所得优化结果分别较初始结构、序列两级算法及蚁群算法轻约12.1%、8.1%及3.6%。由此表明,改进GSL&PS-PGSA的优化效果在空间桁架截面优化领域优化效果显著。

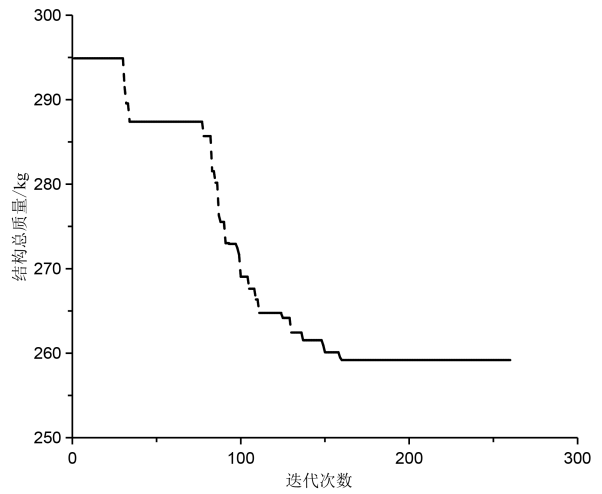


图4 二十五杆空间桁架截面优化过程

Fig.4 Section optimization process of 25-bar space truss

表4 二十五杆空间桁架截面优化结果对比

Table 4 Comparison of section optimization results of 25-bar space truss

名称	A_1/cm^2	A_2/cm^2	A_3/cm^2	A_4/cm^2	A_5/cm^2	A_6/cm^2	A_7/cm^2	A_8/cm^2	结构质量/kg
初始结构	12.671	12.671	12.671	12.671	12.671	12.671	12.671	12.671	294.893
文献[6]	1.355	12.671	21.483	1.355	1.355	6.542	14.581	14.581	282.143
文献[2]	1.355	10.839	21.483	0.774	0.774	3.348	12.671	21.483	268.969
本文方法	0.774	10.839	21.483	0.774	0.774	6.542	12.671	14.581	259.183

3.3 形状优化结果

对二十五杆空间桁架进一步进行形状优化(形状与截面组合优化),其优化过程如图5所示,所得结果均满足优化问题的约束条件。

如图5所示,优化前期,结构总质量下降较快,迭代生长达到400次左右,基本锁定了最优解的范围,优化中后期结构总质量下降较缓。迭代生长至900次左右,优化基本收敛,最终优化结果对应结构总质量为59.999 kg。

优化后的结构如图6所示,与文献[2]相似,为一形效结构,传力路径明确。最终结构的节点最大位移为6.96 mm,个别杆件应力接近限值,其余杆件应力还有富余,总体均在限值范围内,满足约束条件,优化结果合理可行。

本文方法与其他方法所得优化结果对比如表5所示。由表5可以看出,本文所得优化结果比初始结构轻约79.7%,相比序列两级算法,本文结果较其减轻了约31.2%,相比蚁群算法,本文所得优化结果同样优秀,结构质量较其减轻了约22.4%。另外,相比于单一截面优化,形状优化(截面与形状

组合优化)能够大幅度减轻结构质量,设计者可根据需要选取合适的优化类型。

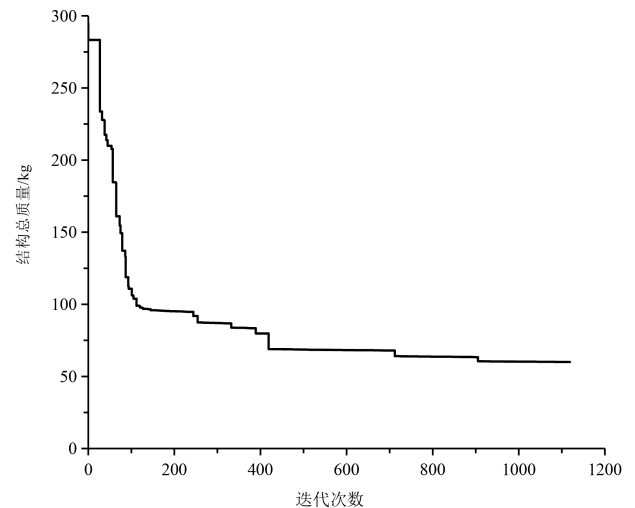


图5 二十五杆空间桁架形状优化过程

Fig.5 Shape optimization process of 25-bar space truss

综上所述,本文优化方法能够有效地考虑了设计变量间的耦合关系,其对桁架结构截面优化及形状优化问题具有良好的适用性。

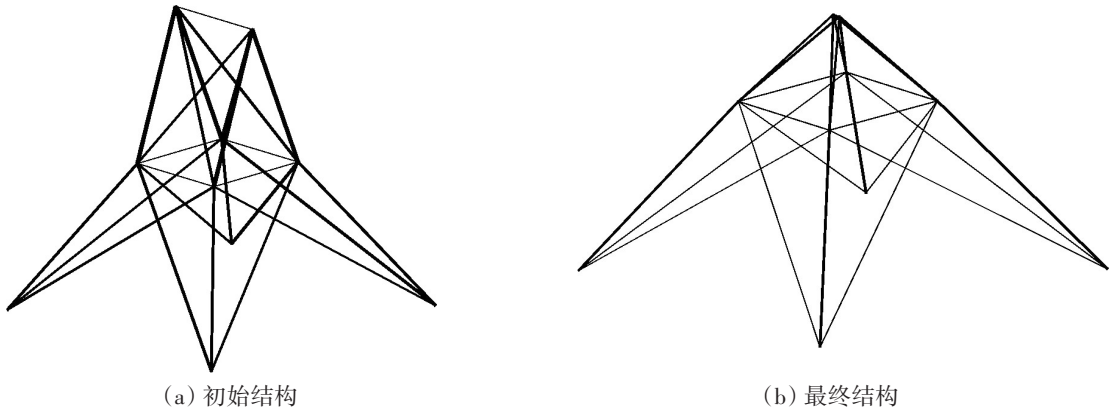


图6 形状优化前后的结构
Fig.6 Structures before and after shape optimization

表5 二十五杆空间桁架优化结果对比
Table 5 Comparison of optimization results of 25-bar space truss

名称	x_2	y_2	z_2	x_4	y_4	z_4	结构质量
初始结构	0.9525	0.0000	5.0800	0.9525	0.9525	2.5400	294.893
文献[6]	0.1851	0.0400	4.2837	1.3319	1.3010	2.1782	87.245
文献[2]	0.0673	-0.0001	3.4200	1.2000	1.3900	1.7100	77.860
本文	0.0650	0.0200	3.5875	0.9575	0.9525	2.3825	59.999

备注:节点坐标单位为m,结构质量单位为kg。

4 结论

(1)对于十杆平面桁架截面优化,相比二级优化法、相对差商法及连续变量法,改进GSL&PS-PGSA所得结构较其减少了8%~15%的用钢量,且优于其他改进PGSA算法所得优化结构;

(2)对于二十五杆空间桁架截面优化,优化所得结构总质量较序列两级算法轻约8.1%,较蚁群算法轻约3.6%;

(3)对于二十五杆空间桁架形状优化,优化所得结构总质量较序列两级算法轻约31.23%,较蚁群算法轻约22.37%。

因此,改进GSL&PS-PGSA算法对桁架结构截面、形状优化问题具有良好的适用性及高效性,可为桁架结构这类空间结构优化提供新思路。

参考文献

[1] Farajpour I. A coordinate descent based method for geometry optimization of trusses[J]. Advances in Engineering Software, 2011, 42(3): 64-75.

[2] 张卓群. 基于蚁群算法的输电塔结构离散变量优化设计[D]. 大连:大连理工大学,2014.

[3] 刘森. 基于遗传算法的单层杆系空间结构优化设计[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.

[4] Ahrari A, Atai A A. Fully stressed design evolution strategy for shape and size optimization of truss structures[J]. Computers and Structures, 2013(123): 58-67 .

[5] Mortazavi A, Toğan V. Simultaneous size, shape, and topology optimization of truss structures using integrated particle swarm optimizer[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2016, 54(4): 715-736.

[6] 孙焕纯,柴山,王跃方. 离散变量结构优化设计[M]. 大连:大连理工大学出版社,2002.

[7] 李彤,王春峰,王文波,等. 求解整数规划的一种仿生类全局优化算法——模拟植物生长算法[J]. 系统工程理论与实践, 2005, 25(1): 77-86.

[8] 潘文智. 基于模拟植物生长算法的空间结构拓扑优化方法研究[D]. 广州:华南理工大学,2019.

[9] 林金龙. 基于模拟植物生长算法的空间网格结构形状优化方法研究[D]. 广州:华南理工大学,2021.

[10] Shi K R, Ruan Z J, Jiang Z R, et al. Improved plant growth simulation & genetic hybrid algorithm (PGSA-GA) and its structural optimization[J]. Engineering Computations, 2018, 35(1): 268-286.

[11] 李永梅,张毅刚. 离散变量结构优化的2级算法[J]. 北京工业大学学报, 2006, 32(10): 883-889.

[12] Schmit L A, Miura H. An advanced structural analysis/synthesis capability-ACCESS 2[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1978, 12(2): 353-377.