

基于和声搜索遗传算法的桁架结构形状优化方法

谢军^{1,2} 张华帅¹ 林书钦¹ 庞博蕾¹ 阎杰¹

(1. 河北建筑工程学院 土木工程学院, 张家口 075132)

(2. 河北省土木工程诊断、改造与抗灾重点实验室, 张家口 075132)

摘要: 为改善传统设计理念和遗传算法优化不足,促进桁架结构形状优化的发展与创新,依据和声搜索算法和遗传算法的基本原理,提出一种新型混合遗传算法-和声搜索遗传算法(遗传算法与和声搜索算法的混合是通过在遗传算法操作后嵌入和声搜索算子),同时对遗传算法中交叉变异分三种情况进行自适应改进,引入精英主义等改进措施,并对和声搜索算法进行离散变量和连续变量混合变量处理,建立了基于和声搜索混合遗传算法的桁架结构形状优化方法。在优化过程中,对节点坐标和截面面积两个不同类型的设计变量进行统一考虑,解决了两类变量耦合困难的问题。通过两个典型算例分析,结果表明,和声搜索遗传算法(Harmony Search Hybrid Genetic Algorithm, HS-GA)具有高效的收敛速度,全局能力强;与遗传算法(Genetic Algorithm, GA)、启发式粒子群优化(Heuristic Particle Swarm Optimization, HPSO)算法,以及其他优化算法相比,优化效果明显,是一种适用于桁架结构形状优化的方法。

关键词: 形状优化; 和声搜索算法; 混合遗传算法; 自适应遗传算法

中图分类号: TU375.4 **DOI:** 10.16579/j.issn.1001.9669.2025.03.019

0 引言

结构的几何形状不仅影响结构所占空间的大小,还直接影响其受力特性。形状优化设计的目的是找到最小的结构外形和各杆件尺寸。桁架结构形状优化是指在满足结构功能和安全性的前提下,通过调整桁架结构的节点坐标(连续型变量)和截面面积(离散型变量)来尽可能减少结构材料的使用量并降低成本。由于两类设计变量的性质不同,其取值类型(连续型和离散型)的混合使用,不仅增加了优化难度,还常常使寻优过程出现收敛困难等问题。

为了解决上述困难,一般采用数值法和智能优化算法来实现。隋允康等^[1]采用分层优化方法对桁架结构进行形状优化,虽然在一定程度上减少了设计变量的数量,但是分开优化会出现少解现象,易陷入局部最优;高峰等^[2]采用遗传算法(Genetic Algorithm, GA)对桁架结构进行形状优化,发挥了全局搜索能力,但GA具有局部搜索能力差等缺点,很难寻找最优解;LI等^[3]通过改变群体更新公式,形成启发式粒子群优化(Heuristic Particle Swarm Optimization, HPSO)算法,并对桁架结构进行形状优化,优化效果较好。

上述这些方法对形状优化具有良好的适用性,但单一算法存在收敛速度较差,寻优能力不明显等缺

点,许多学者采用混合策略,即将局部搜能力强的算法与全局搜索能力强的算法相结合,优势互补,构成混合算法^[4-5]。

和声搜索(Harmony Search, HS)算法是GEEM等^[6]提出的一种新的启发式随机搜索智能优化算法。该算法的原理是模拟音乐演奏的过程,即乐师们通过记忆和调整乐队中各乐器的音调,以创造出优美和谐的音乐。由于HS算法理论简单,可调参数少,局部搜索能力强等优点,所以广泛应用于结构优化^[7-8]。

为改善GA局部搜索能力差和收敛速度慢等缺点。本文首先对遗传算法分三种情况进行自适应改进,并对HS算法的和声库的生成进行二进制编码处理并引入最大执行这一步骤防止陷入局部最优。在此基础上,将局部搜索能力强的改进和声搜索算法和全局搜索能力强的改进遗传算法进行混合,形成混合遗传算法-和声搜索遗传算法(Harmony Search Hybrid Genetic Algorithm, HS-GA),并与桁架结构形状优化相结合。形成基于HS-GA的桁架结构形状优化方法。此外在优化过程对节点坐标和截面面积不同类型设计变量统一考虑,编码表示在同一染色体中,解决了两类变量耦合困难的问题。通过两个经典算例分析对比,是一种适用于桁架结构形状优化的高效方法。

收稿日期: 2023-07-29 修回日期: 2023-09-03

作者简介: 谢军,男,1979年生,辽宁营口人,博士,副教授,硕士研究生导师;主要研究方向为结构优化与计算智能;E-mail: xiejun79@hebiace.edu.cn。

阎杰(通信作者),女,1980年生,辽宁锦州人,博士,教授,硕士研究生导师;主要研究方向为结构优化与计算智能;E-mail: yanjie@hebiace.edu.cn。

引用格式: 谢军,张华帅,林书钦,等. 基于和声搜索遗传算法的桁架结构形状优化方法[J]. 机械强度, 2025, 47(3): 151-158.

XIE Jun, ZHANG Huashuai, LIN Shuqin, et al. Optimization method of truss structure size and shape based on harmonic search genetic algorithm[J]. Journal of Mechanical Strength, 2025, 47(3): 151-158.

1 桁架形状优化数学模型

桁架结构形状优化设计问题的复杂性要求将优化目标转化为抽象的数学模型,其中数学模型表达式为

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{find } A = (A_1, A_2, \dots, A_N)^T \\ L_i(x, y) = \sqrt{(x_{d,i} - x_{b,i})^2 + (y_{d,i} - y_{b,i})^2} \\ \min W = \sum_{i=1}^M \rho_i A_i L_i(x, y) \\ \text{s. t. } g_{gj}(A, x) \leq 0, j = 1, 2, \dots, J \\ A_n \in S, n = 1, \dots, N \\ S = \{S_1, S_2, \dots, S_N\} \\ x_{\min} \leq x_k \leq x_{\max}, k = 1, 2, \dots, K \\ y_{\min} \leq y_k \leq y_{\max}, k = 1, 2, \dots, K \end{array} \right. \quad (1)$$

式中, A_i 、 ρ_i 和 L_i 分别为第 i 个桁架的截面面积、材料密度和长度; $x_{b,i}$ 和 $y_{b,i}$ 为第 i 个桁架的始点; $x_{d,i}$ 和 $y_{d,i}$ 为第 i 个桁架的末点; W 为形状优化后桁架结构的总质量; g_{gj} 为第 j 约束条件; S 为杆件截面面积离散集合; x_{\min} 、 x_{\max} 为节点横坐标的下限和上限; y_{\min} 、 y_{\max} 为节点纵坐标的下限和上限。

2 改进遗传算法

2.1 两类变量统一的二进制编解码

由于桁架结构形状优化同时涉及连续和离散变量。将形状优化变量分开考虑会降低求解质量,因此本文采用二进制编码统一截面变量和节点坐标变量。

2.1.1 编码

由于二进制编码适用于离散型变量,而节点坐标变量属于连续型变量,所以须对节点坐标变量整数部分和小数部分分开进行编码。设对于整数部分则直接给予一个固定位串长度 n_1 进行表示,而对于小数部分则是对每个数位给予固定位串长度 n_2 。其单个节点坐标变量编码示意如图 1 所示。

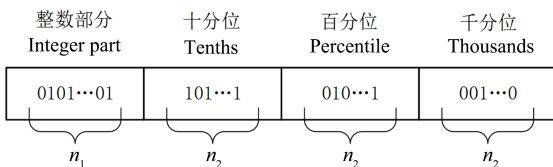


图 1 单个节点坐标变量编码示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the encoding of a single node coordinate variable

2.1.2 解码

解码时,将表示单个个体的二进制染色体串按照节点坐标变量和截面面积变量的位串总长度分成两个部分,按照单个个体的节点坐标变量的个数分成 m_1 段,每一段表示单个个体每个节点坐标变量;将表示截面面积变量的位串分成 m_2 段,每一段表示单个个体每个截面面积变量。然后,根据二进制位串与十进制

数的对应关系可得出十进制数,值得注意的是对于连续节点坐标变量的解码,须对不同数位串分别解码。如对节点坐标横坐标的变量整数部分解码为 d_1 ,对十分位解码为 d_2 ,对百分位解码为 d_3 ,依此类推。其最终第 i 个连续节点横坐标变量 x_i 为

$$x_i = d_1 + d_2/10 + d_3/100 \dots + d_n/10^{n-1} \quad (2)$$

2.2 自适应交叉和变异的改进

由 SRINVAS 等^[9]提出在种群平均适应度值和最大适应度值之间进行线性调整种群个体交叉变异概率,此方法虽能在一定程度上提高算法寻优能力,但是当个体达到种群最优适应度时,变异和交叉概率为 0,在算法迭代后期很容易陷入局部最优。为解决此问题,对自适应遗传算法交叉和变异公式作如下改进:

引入非线性的自适应调整公式,并分三种情况对其自适应调整。

当 $f_{ave} < f_{max}/3$ 时,表明大多数个体离局部最优值较远,且物种相对较为分散,种群丰富,多样性好,在这种情况下应增加交叉概率,而降低变异概率,其表达式为

$$\left\{ \begin{array}{l} P_c = \begin{cases} 1 - (P_{cmax} - P_{cmin}) \left(1 - \frac{f' - f_{ave}}{f_{max} - f_{ave}}\right)^3, f' \geq f_{ave} \\ P_{cmax}, f' < f_{ave} \end{cases} \\ P_m = \begin{cases} P_{mmin} + (P_{mmax} - P_{mmin}) \left(\frac{f - f_{ave}}{f_{max} - f_{ave}}\right)^3, f \geq f_{ave} \\ P_{mmin}, f < f_{ave} \end{cases} \end{array} \right. \quad (3)$$

当 $f_{max}/3 \leq f_{ave} \leq 2f_{max}/3$ 时,表明大多数个体距离局部最优值适中,其交叉和变异概率也应适中,采用余弦自适应遗传公式^[10],其计算式为

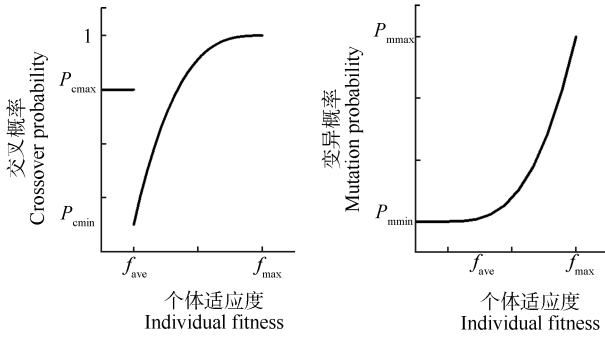
$$\left\{ \begin{array}{l} P_c = \begin{cases} \frac{P_{cmax} + P_{cmin}}{2} + \frac{P_{cmax} - P_{cmin}}{2} \cos\left(\frac{f' - f_{ave}}{f_{max} - f_{ave}} \pi\right), f' \geq f_{ave} \\ P_{cmax}, f' < f_{ave} \end{cases} \\ P_m = \begin{cases} \frac{P_{mmax} + P_{mmin}}{2} + \frac{P_{mmax} - P_{mmin}}{2} \cos\left(\frac{f - f_{ave}}{f_{max} - f_{ave}} \pi\right), f \geq f_{ave} \\ P_{mmax}, f < f_{ave} \end{cases} \end{array} \right. \quad (4)$$

当 $f_{ave} > 2f_{max}/3$ 时,表明大多数个体离局部最优值较近,此时物种相对较为集中,在这种情况下尽可能让交叉概率小,让变异概率大,其计算式为

$$\left\{ \begin{array}{l} P_c = \begin{cases} P_{cmin} + (P_{cmax} - P_{cmin}) \left(1 - \frac{f' - f_{ave}}{f_{max} - f_{ave}}\right)^3, f' \geq f_{ave} \\ P_{cmax}, f' < f_{ave} \end{cases} \\ P_m = \begin{cases} P_{mmin} + (P_{mmax} - P_{mmin}) \left(\frac{f - f_{ave}}{f_{max} - f_{ave}}\right)^3, f \geq f_{ave} \\ P_{mmax}, f < f_{ave} \end{cases} \end{array} \right. \quad (5)$$

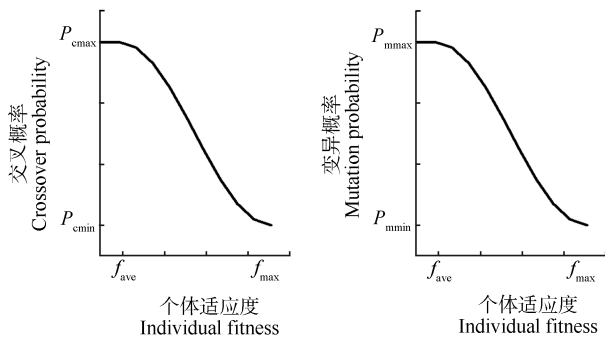
式(3)~式(5)中, P_c 为自适应交叉概率; P_m 为自适应变异概率; P_{cmax} 、 P_{cmin} 为最大、最小交叉概率; P_{mmax} 、

P_{\min} 为最大、最小变异概率; f 为个体适应值; f' 为交叉两个个体中较优适应值; f_{\max} 为最大适应值; f_{ave} 为平均适应值。算法的交叉率和变异率自适应调整曲线可表示为如图 2 所示的图像形式, 相对标准遗传算法, 在不同阶段, 交叉和变异概率按照个体的适应度与最大适应度之间进行动态调整, 可以有效防止遗传算法陷入局部最优, 增强算法的鲁棒性。



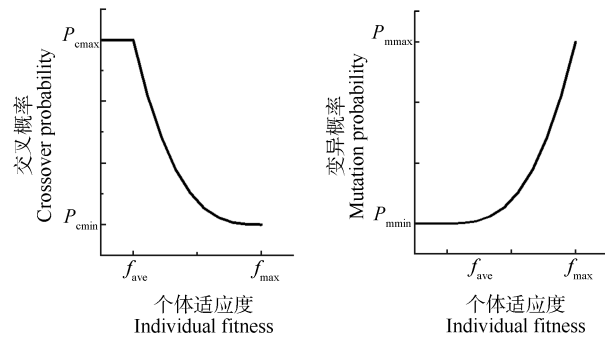
(a) 第 1 阶段自适应交叉、变异曲线

(a) Adaptive crossover and variation curve at the first stage



(b) 第 2 阶段自适应交叉、变异曲线

(b) Adaptive crossover and variation curve at the second stage



(c) 第 3 阶段自适应交叉、变异曲线

(c) Adaptive crossover and variation curve at the third stage

图 2 各阶段交叉、变异率自适应曲线

Fig. 2 Adaptive adjustment curve for crossover and rate of variation at each stage

2.3 适应度函数改进

传统 GA 通常只对不满足约束条件的变量应用罚函数, 而对于过于保守的解决方案则没有进行处理。此外, 传统罚函数使用可能导致种群多样性显著降低的问题。为了解决这些问题, 对适应度函数进行改进, 改进计算式为

$$\begin{cases} F(x) = g(x)f(x), & g_g > 0 \\ F(x) = h(x)f(x), & g_g \leq 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$g(x) = \arctan(g_g) + \frac{\pi}{2} \quad (7)$$

$$h(x) = \text{larcetan}(g_g) + 1 \quad (8)$$

式中, $F(x)$ 为适应度函数; $f(x)$ 为目标函数; g_g 为约束条件; $g(x)$ 、 $h(x)$ 分别为不满足约束条件的方案、满足约束条件的方案的调整函数, 其图像如图 3 所示。

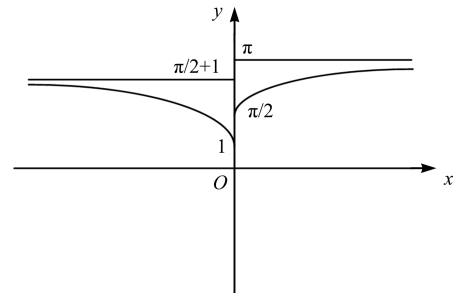


图 3 调整函数图像

Fig. 3 Adjustment function image

由图 3 可知, 当方案不满足约束条件时, 调整函数值最小为 $\pi/2$, 最大为 π , 而当方案满足约束条件时, 约束条件绝对值越大, 即越保守则调整函数值越大, 最大为 $\pi/2 + 1$, 当单元内力接近或达到承载力极限时, 调整函数值接近或等于 1。本文提出的调整函数随着约束条件的变化, 调整函数值变化适中, 可以在淘汰较劣的方案同时保证种群的多样性。

3 改进的和声搜索算法

3.1 HS 算法的基本原理

在作曲过程中, 乐手根据记忆中最动听的音符进行演奏, 通过不断调整和重复, 最终达到和谐的和声。和声搜索算法模拟了乐队的排练过程, 通过多次迭代找到问题的最优解。

3.2 改进 HS 算法

桁架形状优化需对杆件面积和节点坐标进行优化, 节点坐标移动是连续的, 而杆件面积需离散化处理。因此, 需对坐标和面积变量的产生采取不同处理方式。

初始化和声库 H_{HM} 时, 和声向量对应节点横坐标变量由式 (9) 和式 (10) 产生 (纵坐标与横坐标产生思路相同), 截面面积变量由式 (11) 产生。

$$X_i = (x_{1,i}, x_{2,i}, \dots, x_{n,i}) \quad (9)$$

$$x_{j,i} = x_{j\min,i} + (x_{j\max,i} - x_{j\min,i}) \times \text{rand} \quad (10)$$

式中, X_i 为第 i 个桁架结构节点横坐标变量组合; $x_{j,i}$ 为第 i 个桁架结构第 j 个节点的横坐标; $x_{j\max,i}$ 、 $x_{j\min,i}$ 为节点横坐标变量取值上限和下限; rand 为 $(0, 1)$ 的随机数。

$$D_i = \{A_{i,1}(1), \dots, A_{i,k}(K), \dots, A_{i,n}(N)\} \quad (11)$$

式中, D_i 为第 i 个桁架结构面积变量组合; $A_{i,k}(K)$ 为第 i 个桁架结构第 k 个杆件面积的实际值, 其中 K 为离散

变量截面的编号。

为了后期更好地与遗传算法混合,将节点坐标与截面编号转化为二进制形式,形成离散0~1空间。

音调调节模仿了每个乐器通过调节音调来调整合奏,可以提高求解质量和避免陷入局部最优,其调节式为

$$x_{i,k} = \begin{cases} x_{i,k} (K \pm M), \text{离散} \\ x_{i,k} \pm b_w \times r_{\text{rand}}, \text{连续} \end{cases} \quad (12)$$

$$r_{\text{rand}} \leq P_{\text{PAR}}$$

式中, M 取值为-1或1; P_{PAR} 为微调概率; b_w 为音调微调带宽。由式(12)可以看出,设计变量只能在邻域内扰动,由于改为二进制和声搜索算法,可以直接对截面编号和节点坐标的二进制编码进行单点变异,不仅可以在邻域内搜索,还可以全域搜索,可以增强算法全局搜索能力,加快收敛速度。

此外,为了避免传统的和声搜索算法在更新和声记忆库时陷入局部最优且缺乏多样性的问题,本文引入最大执行。这个步骤在达到最大执行次数时,无论个体的适应度是否超过本种群最差个体的适应度,直接进行替换。这一方法引入不仅能够有效防止陷入局部最优状态并且还有助于增加物种的多样性。

改进和声搜索算法的优化步骤如下:

步骤1:确定参数,包括设置和声库大小 H_{HMS} 和声库取值概率 H_{HMCR} 、微调概率 P_{PAR} 、创作次数 T_{max} 。最大执行次数 L_{max} 。

步骤2:初始化 H_{HM} ,从问题变量的解空间里随机生成 H_{HMS} 个和声(种群),把生成的和声 $X_1, X_2, X_3, \dots, X_{H_{\text{HMS}}}$ 放入和声记忆库,并计算对应的适应度 $f(X)$ 。和声库形式为

$$H_{\text{HM}} = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_{H_{\text{HMS}}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{21} & \cdots & x_{n1} & | & f(X_1) \\ x_{12} & x_{22} & \cdots & x_{n2} & | & f(X_2) \\ \vdots & \vdots & & \vdots & | & \vdots \\ x_{1H_{\text{HMS}}} & x_{2H_{\text{HMS}}} & \cdots & x_{nH_{\text{HMS}}} & | & f(X_{H_{\text{HMS}}}) \end{bmatrix} \quad (13)$$

步骤3:初始 $T=0$ 和 $L=0$,执行步骤4。

步骤4:产生0~1的随机数 r_1 ,如果 $r_1 < H_{\text{HMCR}}$ 则从 H_{HM} 随机选择一个个体,执行步骤5,否则,随机在变量解范围内产生一个个体,执行步骤6。

步骤5:产生0~1随机数 r_2 ,如果 $r_2 < P_{\text{PAR}}$,则对选中个体进行单点变异,否则,执行步骤6。

步骤6:选中个体适应度与本代种群最差个体适应度进行比较,如果选中个体适应度高,则替换本种群最差适应度个体, $T = T + 1$,执行步骤7;否则,执行步骤8。

步骤7:判断 T 是否达到创作次数 T_{max} ,若是则执行步骤9,否则,重新执行步骤4。

步骤8: $L=L+1$,判断 L 是否达到最大执行步骤 L_{max} ,若是此个体直接替换本代最差个体, $T=T+1$,执行

步骤7,否则,重新执行步骤4。

步骤9:判断是否满足终止迭代条件,若是,则输出最优结果,否则,重新执行步骤3。

4 混合遗传算法

由于本文的改进遗传算法(Improved GA, IGA)采用二进制编码,将改进和声搜索(Improved HS, IHS)算法的种群改为二进制种群,更利于与IGA进行混合。其混合方法是在IGA的自适应交叉、变异操作后将IHS算法作为一个算子进行优化,形成一种新型的混合遗传算法-和声搜索遗传算法(HS-GA)。这种混合方法将IHS算法的优秀基因融入IGA中,有助于提高IGA的局部搜索能力,加快收敛。混合遗传算法流程如图4所示。

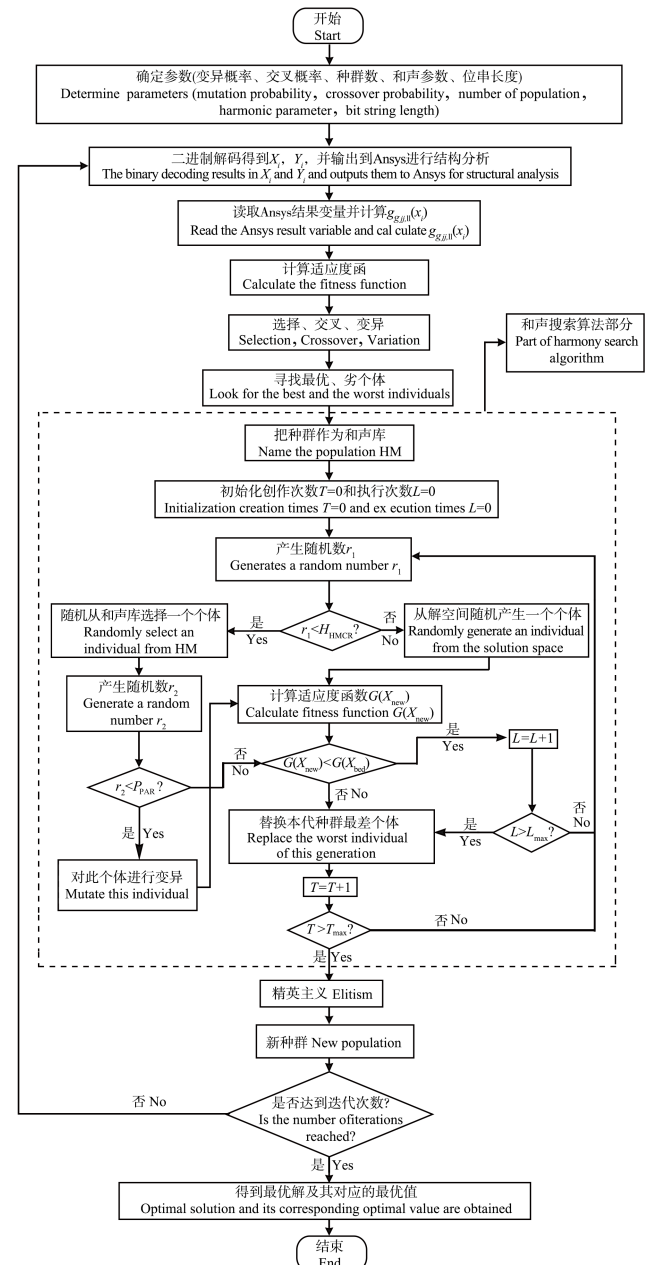


图4 混合遗传算法流程图

Fig. 4 Flow chart of the hybrid genetic algorithm

5 桁架结构形状优化

5.1 桁架结构形状优化方法

基于 HS-GA 的桁架结构形状优化方法是将结构优化问题以数学函数形式进行表达,一方面是通过计算机编程软件编写 HS-GA 并输出优化设计变量,另一方面是通过有限元软件进行结构分析求得结构优化约束条件的状态变量。通过数据之间的传递来实现优化过程。

本文中采用编程灵活且可视化能力强的 C++ Builder 软件和具有强大结构分析能力的 Ansys 软件进行联合优化。

5.2 桁架形状优化流程

在优化过程中,通过对杆件截面面积进行编号,对编号和节点坐标进行二进制编码,通过 HS-GA 不断产生截面编号和节点坐标,并把编号对应的杆件截面面积和节点坐标分别输入文本文件,Ansys 通过读取截面面积组合和节点坐标组合进行建模分析,在杆件建模时选用 link180 单元,一个杆件代表一个单元。然后输出结果(杆件长度、杆件应力等)到文本文件,C++ Builder 通过读取结果进行约束判断,不断循环,最终输出最优桁架形式。其流程如图 5 所示。

6 案例分析

6.1 算例一(40 杆平面桁架结构)

40 杆的平面桁架原始结构、节点编号如图 6 所示。杆件分组情况如表 1 所示,其中第 19 组为 5-12、4-13。各杆件 $E=196.13 \times 10^3 \text{ MPa}$, $\rho=7.80 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,所有杆件许用应力为 $\pm 156.91 \text{ MPa}$ 。节点 4、5 在竖直方向的位移限制为 $\pm 0.035 \text{ m}$,在节点 2、3、4、5、6、7 施加竖直方向 10 t 的力。节点 9~16 可沿 y 方向移动,其中设计变量包括每个杆件的截面面积和节点 9~16 的 y 方向坐标。截面离散值取自集合 $A=[0.001, 0.05] \text{ m}^2$,间隔是 0.001 m^2 。在对称情况下给出节点坐标(单位为 m),取值范围是 $1 \leq y_9=y_{16} \leq 5, 1 \leq y_{10}=y_{15} \leq 5, 1 \leq y_{11}=y_{14} \leq 5, 1 \leq y_{12}=y_{13} \leq 5$ 。

分别采用 GA(算法 1)、IGA(算法 2)、IHS(算法 3)、HS-GA(算法 4)求解 40 杆平面桁架结构进行形状优化。其中 T_{\max} 为 150 次, L_{\max} 为 50 次, H_{HMCR} 为 0.5,其余各算法参数如表 2 所示,为验证算法的寻优能力,与 HPSO、群搜索优化^[11](Group Search Optimization, GSO)算法和教与学的优化^[12](Teaching and Learning Based Optimization, TLBO)算法进行对比,其结果对比如表 3 所示,其算法迭代如图 7 所示。

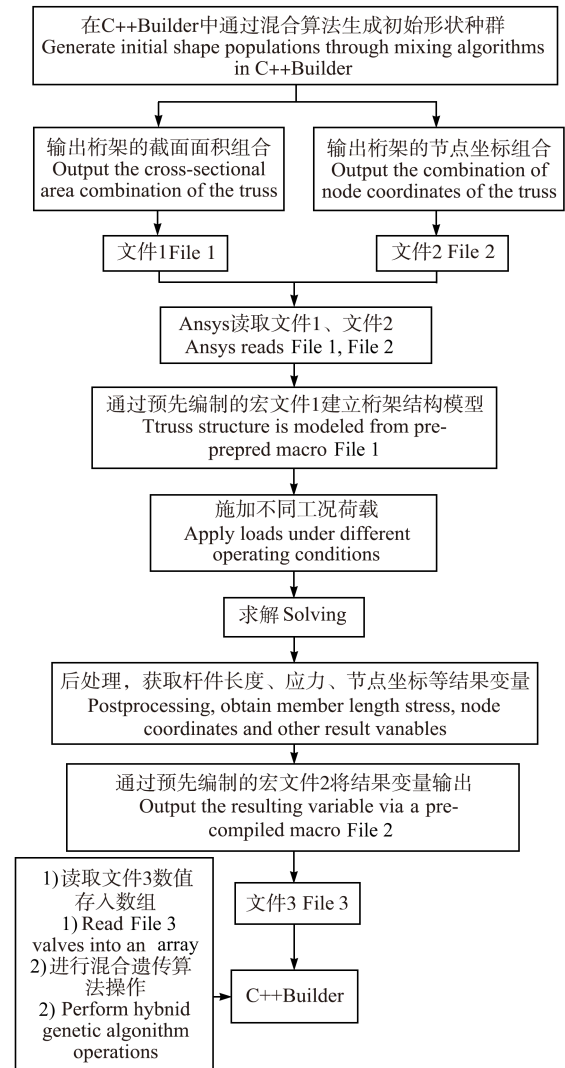


图 5 桁架结构形状优化流程图

Fig. 5 Shape optimization flow chart of the truss structure

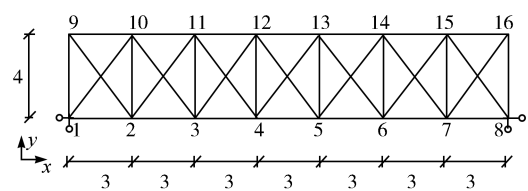


图 6 40 杆平面桁架原始图

Fig. 6 Original diagram of a 40-pole planar truss

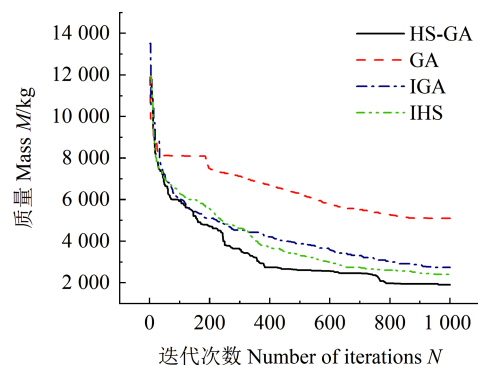


图 7 算例一各算法优化迭代图

Fig. 7 Optimization iteration diagram of each algorithm in example 1

表 1 40 杆平面桁架杆件分组情况

Tab. 1 Grouping of 40-member planar truss members

组号 Group number	杆件 Members	组号 Group number	杆件 Members
A_1	1-2,7-8	A_{10}	2-10,7-15
A_2	2-3,6-7	A_{11}	3-11,6-14
A_3	3-4,5-6	A_{12}	4-12,5-13
A_4	4-5	A_{13}	1-10,8-15
A_5	9-10,15-16	A_{14}	2-11,7-14
A_6	10-11,14-15	A_{15}	3-12,6-13
A_7	11-12,13-14	A_{16}	2-9,7-16
A_8	12-13	A_{17}	3-10,6-15
A_9	1-9,8-16	A_{18}	4-11,5-14

由图 7 可知,GA 在前期迭代时质量下降慢,且在迭代 200 次左右时停滞不前,易陷入局部最优;而 IGA

在前期优化效果明显,结构质量下降快,但随着迭代次数增加,质量下降较为缓慢,最优解停滞不前;IHS 在前期寻优能力优化效果较差,比较依赖初始种群,但后期寻优能力较强,质量一直呈下降趋势;而 HS-GA 通过引入 IHS 算法,寻优效率明显提高,且收敛速度较快。

表 2 算例一各算法参数

Tab. 2 Parameters of each algorithm in example 1

算法 Algorithm	P_c	P_m	P_{cmax}	P_{cmin}	P_{mmin}	P_{mmin}	P_{PAR}
1	0.8	0.1	—	—	—	—	—
2	—	—	0.85	0.65	0.1	0.05	—
3	—	—	—	—	—	—	0.1
4	—	—	0.85	0.65	0.1	0.05	0.1

表 3 算例一优化结果对比

Tab. 3 Comparison of optimization results in example 1

设计变量 Design variable	HS-GA	IHS	IGA	GA	HPSO	GSO	TLBO	设计变量 Design variable	HS-GA	IHS	IGA	GA	HPSO	GSO	TLBO
A_1	0.001	0.001	0.001	0.002	0.005 5	0.001 5	0.001	A_{13}	0.005	0.005	0.008	0.005	0.001	0.001	0.001
A_2	0.002	0.002	0.011	0.008	0.001	0.001	0.001	A_{14}	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001
A_3	0.001	0.002	0.003	0.005	0.010 5	0.001	0.001	A_{15}	0.001	0.001	0.001	0.008	0.001 5	0.001	0.001
A_4	0.001	0.003	0.006	0.001	0.001	0.001	0.001	A_{16}	0.002	0.003	0.002	0.008	0.005	0.001	0.001
A_5	0.001	0.002	0.001	0.002	0.001	0.001	0.004	A_{17}	0.001	0.001	0.001	0.008	0.004	0.002 5	0.002 5
A_6	0.006	0.006	0.006	0.007	0.002 5	0.003	0.003	A_{18}	0.002	0.003	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001
A_7	0.006	0.007	0.005	0.006	0.003	0.003 5	0.003 5	A_{19}	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001
A_8	0.005	0.009	0.004	0.020	0.024 5	0.003 5	0.003 5	y_9	1.110	1.120	1.650	3.510	1.006	1.069	1.004
A_9	0.001	0.006	0.001	0.007	0.002 5	0.001	0.001	y_{10}	1.180	1.220	1.110	1.510	2.791	2.307	2.412
A_{10}	0.002	0.003	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	y_{11}	1.520	1.610	1.930	3.480	3.541	2.851	2.737
A_{11}	0.001	0.001	0.005	0.011	0.001	0.001	0.001	y_{12}	2.210	2.220	3.230	2.210	3.396	3.287	3.314
A_{12}	0.006	0.006	0.004	0.001	0.001	0.001	0.001	质量 Mass M/kg	1 905.030	2 402.646	2 785.230	5 094.020	3 653.010	2 080.673	2 058.806

由表 3 可以看出,IGA 在一定程度上提高了 GA 寻优效率且比 HPSO 优化效果明显;IHS 相对寻优能力强于 IGA;而 HS-GA 相比 GA、IGA、IHS、HPSO、GSO、TLBO,在质量上分别优化了 54.51%、31.60%、26.12%、46.61%、8.43%、7.46%,优化效果明显,充分发挥了 IGA 的全局搜索能力和 IHS 局部搜索能力的优点。优化后的形状如图 8 所示。

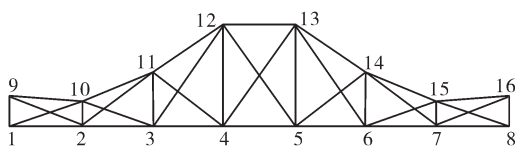


图 8 40 杆优化后形状图

Fig. 8 Optimized shape diagram of a 40-rod truss

6.2 18 杆平面桁架结构

18 杆的平面桁架原始结构、节点编号、杆件编号如图 9 所示。各杆件弹性模量 $E=68.9 \times 10^3$ MPa,密度 $\rho=2.768 \times 10^3$ kg/m³,容许拉应力为 137.89 MPa,杆件 i 的欧拉屈曲应力为 $-4EA_i/l_i^{2[13]452-461}$ 。杆件分组情况如表 4 所示,节点 2~5 的 x, y (cm) 坐标可动。其杆件截面 (cm²) 取值范围可见文献 [13]⁴⁵²⁻⁴⁶¹。

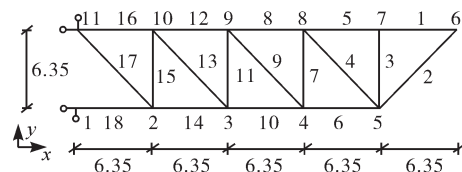


图 9 18 杆平面桁架原始图

Fig. 9 Original diagram of a 18-rod planar truss

采用 HS-GA 对 18 杆平面桁架结构进行形状优化,并与遗传规划^{[13]452-461}(Genetic Programming, GP)算法进行对比,算法参数信息如表 2 所示,其优化结果如表 5 所示。

表 4 18 杆平面桁架杆件分组情况

Tab. 4 Grouping of a 18-rod planar truss

组号 Group number	杆件 Rod
1	1、5、8、12、16
2	2、6、10、14、18
3	3、7、11、15
4	4、9、13、17

表 5 算例二优化结果对比

Tab. 5 Comparison of optimization results in example 2

设计变量 Design variable	HS-GA	GP
$A_1=A_5=A_8=A_{12}=A_{16}$	77.10	77.68
$A_2=A_6=A_{10}=A_{14}=A_{18}$	111.25	115.14
$A_3=A_7=A_{11}=A_{15}$	53.65	51.14
$A_4=A_9=A_{13}=A_{17}$	30.30	30.49
x_2	5.02	4.89
y_2	0.48	0.44
x_3	10.46	10.54
y_3	1.72	1.97
x_4	16.44	16.89
y_4	3.19	3.11
x_5	23.79	24.00
y_5	4.12	3.81
质量 Mass M/kg	2 146.20	2 180.53

由表 5 可以看出,HS-GA 优化后的质量为 2 146.20 kg,相比 GP 算法在质量上优化了 1.57%,优化效果较好。

图 10 为优化后的结构图。由图 10 可以看出,布置合理,传力路径明确。

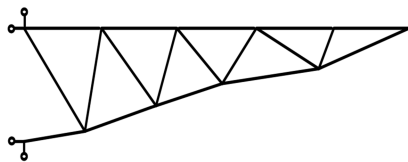


图 10 18 杆优化后形状图

Fig. 10 Optimized shape diagram of a 18-rod truss

表 6 所示为各杆件应力值及允许应力。由表 6 可以看出,各杆件均满足允许应力,此优化结果可靠,其中杆号 6、10、14、15、16、17、18 接近满应力,充分发挥杆件的利用率,最优结构的最大应比达到 99.92%。

表 6 杆件应力以及对应的允许应力

Tab. 6 Rod stresses and corresponding allowable stresses

杆件 Rod	应力 Stress R/MPa	容许应力 Allowable stress	
		R_u/MPa	R_l/MPa
1	41.15	137.89	52.69
2	-29.63	137.89	44.87
3	-20.46	137.89	195.45
4	79.13	137.89	30.43
5	49.48	137.89	52.69
6	-54.25	137.89	55.86
7	-46.21	137.89	88.02
8	98.08	137.89	52.70
9	32.00	137.89	34.83
10	-76.89	137.89	80.85
11	-31.40	137.89	55.89
12	117.20	137.89	52.69
13	54.92	137.89	21.78
14	-93.54	137.89	98.48
15	-40.81	137.89	40.82
16	137.79	137.89	52.69
17	137.66	137.89	13.99
18	-120.47	137.89	120.56

7 结论

通过利用 HS-GA、IHS、IGA、GA 对 40 杆和 18 杆桁架结构进行形状优化并与其他文献进行对比,得到以下结论:

1) 本文对 GA 改进形成 IGA 在一定程度上可以提高 GA 的求解质量,增加 GA 的全局搜索能力。

2) 本文提出的 IGA 与 IHS 算法进行混合,形成 HS-GA,充分发挥了 IGA 全局寻优能力,并且发挥 IHS 算法的局部搜索能力。

3) 对于桁架结构形状优化,与 GA、IGA、IHS、HPSO、GSO、TLBO、GP 等算法相比,HS-GA 优化后的质量最小。由此表明,HS-GA 优化效果明显,寻优能力强。

参考文献 (References)

- [1] 隋允康,由衷. 具有两类变量的空间桁架分层优化方法[J]. 计算力学学报,1990,7(4):82-92.
SUI Yunkang, YOU Zhong. A multi-level optimization method for space trusses with combing sectional area and coordinate variables [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 1990, 7(4): 82-92. (In Chinese)
- [2] 高峰,王德俊,胡俏,等. 离散结构的遗传形状优化设计[J]. 计算力学学报,1998,15(4):109-113.
GAO Feng, WANG Dejun, HU Qiao, et al. Discrete structural geometrical optimal design using genetic algorithms [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 1998, 15(4): 109-113. (In

- Chinese)
- [3] LI L J, XU T X, LIU F, et al. The group search optimizer and its application to truss structure design [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2010, 13(1):43-51.
- [4] 郭丽华, 汤文成, 袁满. 基于并行混沌和复合形法的桁架结构形状优化[J]. *工程力学*, 2011, 28(4):151-157.
- GUO Lihua, TANG Wencheng, YUAN Man. Shape optimization for truss structures based on parallel chaos optimization algorithm and complex method [J]. *Engineering Mechanics*, 2011, 28(4):151-157. (In Chinese)
- [5] 朱朝艳, 刘敬宇, 董锦坤, 等. 离散变量结构形状优化设计的拟满应力遗传算法[J]. *昆明理工大学学报(理工版)*, 2010, 35(6):24-28.
- ZHU Chaoyan, LIU Jingyu, DONG Jinkun, et al. An imitative full-stress genetic algorithm for structure shape optimization design with discrete variables [J]. *Journal of Kunming University of Science and Technology(Natural Science)*, 2010, 35(6):24-28. (In Chinese)
- [6] GEEM Z W, KIM J H, LOGANATHAN G V. A new heuristic optimization algorithm: harmony search [J]. *Simulation*, 2001, 76(2):60-68.
- [7] 范鹏飞, 祝福源. 基于HS算法优化的EEMD-RNN混凝土坝位移预测模型[J]. *中国农村水利水电*, 2021(8):180-185.
- FAN Pengfei, ZHU Fuyuan. Displacement prediction model of EEMD-RNN concrete dam based on HS algorithm optimization[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2021(8):180-185. (In Chinese)
- [8] 彭军龙, 邓嘉莉. 引入环境水平的公路建设项目评价方法[J]. *土木工程与管理学报*, 2021, 38(2):68-76.
- PENG Junlong, DENG Jiali. Evaluation method of highway construction project with environmental level [J]. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2021, 38(2):68-76. (In Chinese)
- [9] SRINIVAS M, PATNAIK L M. Adaptive probabilities of crossover and mutation in genetic algorithms [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 1994, 24(4):656-667.
- [10] 徐明明, 宋宇博. LO型曲线的自适应遗传算法研究[J]. *电子技术应用*, 2015, 41(12):129-132.
- XU Mingming, SONG Yubo. The research of the LO type curve of adaptive genetic algorithm [J]. *Computer Technology and Its Application*, 2015, 41(12):129-132. (In Chinese)
- [11] LI L J, LIU F. Group search optimization for applications in structural design [M]. Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011:69-96.
- [12] CHENG W, LIU F, LI L J. Size and geometry optimization of trusses using teaching-learning-based optimization [J]. *International Journal of Optimization in Civil Engineering*, 2013, 3(3):431-444.
- [13] ZHENG Q Z, QUERIN O M, BARTON D C. Geometry and sizing optimization of discrete structure using the genetic programming method [J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2006, 31(6):452-461.

Optimization method of truss structure size and shape based on harmonic search genetic algorithm

XIE Jun^{1,2} ZHANG Huashuai¹ LIN Shuqin¹ PANG Bolei¹ YAN Jie¹

(1. School of Civil Engineering, Hebei University of Architecture, Zhangjiakou 075132, China)

(2. Hebei Key Laboratory of Diagnosis, Reconstruction and Anti-Disaster of Civil Engineering, Zhangjiakou 075132, China)

Abstract: In order to improve the traditional design concept and the lack of optimization of genetic algorithm, and promote the development and innovation of the shape optimization of truss structure, according to the basic principles of harmony search algorithm and genetic algorithm, a new hybrid genetic algorithm-harmony search genetic algorithm was proposed (the mixing of genetic algorithm and harmony search algorithm is to embed the harmony search operator after the operation of the genetic algorithm), and at the same time the cross-variation in the genetic algorithm was adaptively improved in three situations, and elitism and other improvement measures were introduced. In addition, the harmonious search algorithm is processed with mixed variables of discrete variables and continuous variables, and a truss structure shape optimization method based on the harmonic search hybrid genetic algorithm was established. In the optimization process, the two different types of design variables of node coordinates and cross-section area were considered uniformly, which solves the problem of difficulty in coupling of the two types of variables. Through the analysis of two typical examples, the results show that the harmonic search genetic algorithm (HS-GA) has efficient convergence speed and strong global ability. Compared with genetic algorithm (GA), heuristic particle swarm optimization (HPSO) and other optimization algorithms, the optimization effect is obvious, and it is a method suitable for the shape optimization of truss structure.

Key words: Shape optimization; Harmonic search algorithm; Hybrid genetic algorithm; Adaptive genetic algorithm

Corresponding author: YAN Jie, E-mail: yanjie@hebiace.edu.cn

Received: 2023-07-29 Revised: 2023-09-03