

文章编号:1674-599X(2022)04-0095-08

基于CSO-ABC算法的系杆拱桥吊杆内力优化

鲁力¹,李敏²

(1.永顺县公路建设养护中心,湖南 湘西土家族苗族自治州 416799;
2.张家界市桑植县交通建设投资有限公司,湖南 张家界市 427100)

摘 要:为改善传统系杆拱桥吊杆内力优化方法耗时长、精度低、计算烦琐的缺点,本研究提出改进的CSO-ABC混合算法优化钢箱拱肋系杆拱桥吊杆内力。先建立CSO-ABC混合算法,改进侦察蜂阶段算法;再对3个测试函数进行数值试验,验证算法的精度和有效性。以某钢箱拱肋系杆拱桥为工程背景,通过ABAQUS-Python脚本进行CSO-ABC算法的吊杆内力自动优化计算。研究结果表明:改进的CSO-ABC算法与CSO算法和ABC算法相比,具有收敛速度快、精度高的优点;基于脚本的自动迭代,提高了吊杆内力优化的效率,该算法的吊杆内力最大优化幅度为2.17%,在钢拱肋及混凝土主梁的应力峰值分别增大4.9、0.8 MPa的情况下,拱肋、主梁峰值位移分别减小12.7、12.1 mm,优化后的成桥状态与原始设计非常接近。该算法可为相关施工、监控、设计提供参考和借鉴。

关键词:桥梁工程;系杆拱桥;CSO-ABC算法;优化

中图分类号:U441⁺.5

文献标志码:A

Internal force optimization of the suspender of a tied-arch bridge based on CSO-ABC hybrid algorithm

LU Li¹, LI Min²

(1.Yongshun County Highway Construction and Maintenance Center, Xiangxi Tujia and Miao Autonomous Prefecture 416799, China; 2.Sangzhi County Traffic Construction Investment Co., Ltd., Zhangjiajie 427100, China)

Abstract: In order to overcome the shortcomings of the traditional optimization method of the internal force of the suspender of the tied arch bridge, such as time-consuming, low accuracy, and complicated calculation, an improved CSO-ABC algorithm is proposed to optimize the internal force of the suspender of the tied-arch bridge with steel box arch-ribs. First, a hybrid CSO-ABC algorithm was established and the detection bee phase was improved, and three test functions were numerically tested to verify the accuracy and effectiveness of the algorithms. Then, taking the steel box tied-arch bridge as the engineering background, the finite element calculation of the CSO-ABC algorithm is carried out through the ABAQUS-Python script, and the automatic optimization of the internal force of the suspender based on the CSO-ABC algorithm is realized. The research results show that the improved CSO-ABC hybrid algorithm has the advantages of fast convergence and high precision compared with the independent CSO algorithm and ABC algorithm. The automatic iteration based on script greatly improves the efficiency of internal force optimization of the suspender. The maximum optimization range of the internal force is 2.17%. When the peak stress of the steel arch rib and the concrete girder increases by 4.9 MPa and 0.8 MPa, respectively, the peak displacement of the arch rib and the girder decreases by 12.7 mm and 12.1 mm, respectively. The optimized bridge state is very close to the original design. The algorithm can provide a reference for related construction, monitoring, and design work.

Key words: bridge engineering; tied-arch bridge; CSO-ABC algorithm; optimization

钢箱拱肋系杆拱桥属于拱梁组合体系,与混凝土拱肋相比,钢箱拱肋自重轻、刚度大。在荷载作用下,拱肋主要承担轴向压力,主梁主要承担弯矩,系杆主要承担轴向拉力^[1]。优化成桥状态下的结构内力分布,一直是设计和施工监控的热点问题。钢箱拱桥吊杆内力作为一种高次超静定的复杂结构,对结构的整体内力分布及线形具有重要影响。通过吊杆力的优化,可提高桥面的平顺度与构件应力的储备。

关于系杆拱桥成桥状态吊杆内力的优化问题,与斜拉桥成桥索力优化及悬索桥成桥吊杆内力优化类似,许多学者对其进行了许多理论研究和试验研究。李杰等人^[2]采用杠杆法对系杆拱桥吊杆内力进行解析计算,并给出了常用吊杆力调整方法。刘钊^[3]以拱肋及系梁应变能最小化为目标,给出了刚性吊杆法、无限轴向刚度法、二次规划法 3 种确定吊杆内力的方法,并结合工程实例讨论了这三种方法的应用效果。孙传智等人^[4]采用响应面法对系杆拱桥内力进行优化,给出了成桥状态下吊杆的最优初内力。这些研究需要进行较复杂的解析或有限元迭代计算,过程烦琐,计算量大,且不同方法下得到的吊杆内力优化结果相差较大。

吊杆内力优化属于全局优化中的高维优化问题。近年来,鸡群优化算法^[5](chicken swarm optimization, 简称为 CSO)和人工蜂群算法^[6](artificial bee colony, 简称为 ABC)等元启发式算法在求解高维优化问题上取得了较大进展,但 CSO 算法易陷入局部收敛^[7],ABC 算法收敛速度慢、计算效率低^[8]。本研究提出改进的 CSO-ABC 算法,某钢箱系钢拱桥为工程背景,进行吊杆内力优化求解,利用 ABAQUS-Python 脚本进行数据交互,实现吊杆内力的快速优化设计,为类似工程设计、施工监控提供参考。

1 CSO-ABC 混合算法基本原理

1.1 CSO 算法

CSO 是由 MENG 等人^[5]提出一种基于鸡群社会行为和等级制度的群体智能优化算法,将整个鸡群划分为若干子群,每个子群包含 1 只公鸡和若干母鸡与小鸡,鸡群的等级制度、支配关系及母子关系在建立后保持不变,数代繁衍后进行更新,各个子群中的个体围绕子群中的公鸡寻找食物,具有支配

地位的个体具有较强的竞争优势。假定优化问题的解在 D 维空间中,第 i 只鸡的位置为 $x_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD}]$ 。先区分该只鸡所属类型,若其为公鸡,则按式(1)进行迭代;若其为母鸡,则按式(2)进行迭代;若其为小鸡,则按式(3)进行迭代。

$$x_{ij}^{t+1} = x_{ij}^t [1 + r_1] \quad (1)$$

$$x_{ij}^{t+1} = x_{ij}^t + c_1 r_1 (x_{k_1j}^t - x_{ij}^t) + c_2 r_2 (x_{k_2j}^t - x_{ij}^t) \quad (2)$$

$$x_{ij}^{t+1} = x_{ij}^t + c_3 (x_{m_j}^t - x_{ij}^t) \quad (3)$$

式中: x_{ij}^t 为第 t 代第 i 只鸡的第 j 个维度; $r_1 \sim N(0, \sigma^2)$;方差 σ^2 的计算见式(4); $r_1 \sim U(0, 1)$; $r_2 \sim U(0, 1)$; c_1 和 c_2 的计算见式(5); c_3 为 $[0, 2]$ 范围内的小鸡跟随母鸡的跟随系数; $x_{k_1j}^t$ 为第 i 只母鸡所在群体中的第 k_1 只公鸡; $x_{k_2j}^t$ 为第 i 只母鸡所在群体中的第 k_2 只公鸡; $x_{m_j}^t$ 为第 i 只小鸡对应的母鸡位置。

$$\sigma^2 = \begin{cases} 1, f_i < f_k \\ e^{\left(\frac{f_i - f_k}{|f_i| + \varepsilon}\right)}, f_i \geq f_k \end{cases} \quad (4)$$

式中: f_i, f_k 分别为第 i, k 只公鸡的适应度函数值; ε 为正数。

$$\begin{cases} c_1 = e^{\left(\frac{f_i - f_k}{|f_i| + \varepsilon}\right)} \\ c_2 = e^{f_k - f_i} \end{cases} \quad (5)$$

式中: f_i, f_k 分别为 r_1, r_2 的适应度函数。

CSO 算法流程为:①初始化种群,定义终止条件。②求出鸡群适应度函数值,按式(1)~(3)更新鸡群个体极值及全局极值,并对鸡群进行分组,确定等级制度。③当全局最优值满足终止条件或达到最大迭代次数时,程序终止,否则返回步骤②。

1.2 ABC 算法

ABC 算法是由 KARABOGA^[9]提出的一种模拟蜂群采蜜行为的智能优化算法。人工蜂群由工蜂、跟随蜂和侦察蜂组成。其中,工蜂寻找食物,并将信息共享给其他蜂;跟随蜂从工蜂给出的信息中择优,并在食物源附近搜索食物。假定优化问题的解在 D 维空间中,第 i 只蜂的位置表示为 $x_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD}]$, $i \in \{1, 2, \dots, 0.5S\}$, S 为种群个数。

工蜂和跟随蜂的食物位置迭代表达式为:

$$v_i^{t+1} = x_i^t + \varphi (x_i^t - x_k^t) \quad (6)$$

式中: k 为 $\{1, 2, \dots, 0.5S\}$ 中的随机数,且 $k \neq i$, φ 为

$[-1, 1]$ 的随机数。

跟随蜂比较所有工蜂给出的食物位置,选择了较优的食物位置后,采用轮盘赌方法进行选择,概率 P_i 为:

$$P_i = \frac{f'_i}{\sum_{i=1}^{0.55} f'_i} \quad (7)$$

式中: f'_i 为第 i 个工蜂给出的食物位置的适应度函数值。

跟随蜂完成选择后,若无法通过给定参数提高选择工蜂食物位置的效率,工蜂将转变为侦察蜂,采用新食物位置迭代公式:

$$w_i^{t+1} = x_{\max} + r(x_{\max} - x_{\min}) \quad (8)$$

式中: $x_{\max}$ 、 $x_{\min}$ 分别为食物位置的上界和下界; r 为 $[-1, 1]$ 的随机数。

当新食物位置优于旧食物位置时,则将其替代,否则保持旧食物位置不变。

ABC算法流程为:①种群初始化,生成食物源,定义终止条件。②计算个体适应度函数值。若工蜂和跟随蜂的食物位置 v_i 优于 w_i ,则进行替换,否则保持不变。③计算 x_i 的适应度函数值 f_i 及相应概率 P_i 。跟随蜂根据 P_i 选择新的食物,搜索新的位置 v_i 。若食物位置 v_i 优于位置 w_i ,则进行替换,否则保持不变。④当食物位置搜索陷入停滞时,依据式(8)进行食物位置更新。⑤计算全局最优解。当全局最优值满足终止条件或达到最大迭代次数时,程序终止,否则返回步骤②。

1.3 混合算法及改进

考虑到CSO算法及ABC算法存在易陷入局部收敛、收敛速度慢、计算效率低等缺陷,采用CSO-ABC混合算法提高算法收敛性及计算效率。改进后的CSO-ABC混合算法主要分为CSO阶段、跟随蜂阶段及改进的侦察蜂阶段,流程如图1所示。

算法中的CSO阶段与传统CSO算法一致,当该阶段中个体最优解无法继续更新时,则跳出CSO阶段进入ABC算法的跟随蜂阶段,选择最优值较好的一半个体作为工蜂,按式(7)计算,选择概率 P_i ,并更新工蜂,而跟随蜂按式(9)进行更新,并保留其中较优个体^[10]:

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \varphi(x_i^t - p_j^t) \quad (9)$$

式中: p_j^t 为第 t 代第 j 维最优个体。

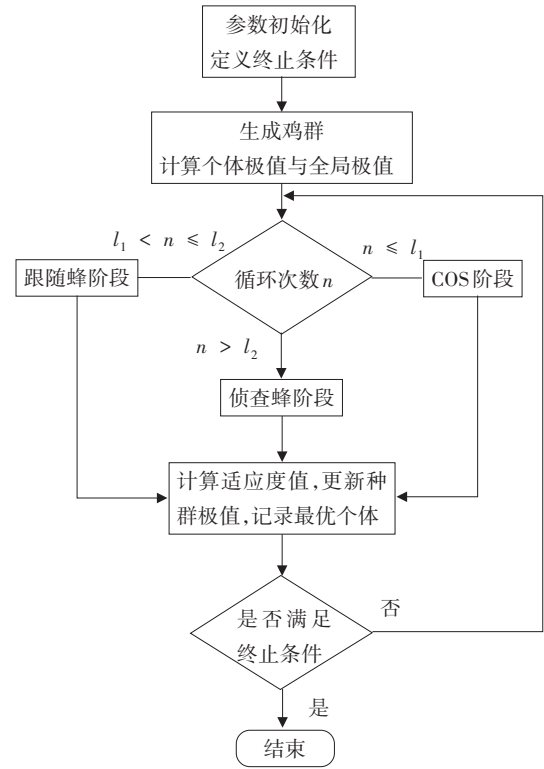


图1 CSO-ABC混合算法流程图

Fig. 1 Flow chart of CSO-ABC hybrid algorithm

在改进的侦察蜂阶段,随机选择两个最优个体 $p_{k_1}^t, p_{k_2}^t$,按式(10)进行更新后保留较优个体:

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \varphi(p_{k_1}^t - p_{k_2}^t) \quad (10)$$

式中: φ 为区间在 $[-1, 1]$ 上的随机数。

2 数值试验验证

为验证改进CSO-ABC混合算法的有效性,3个高维测试函数 $f_{c_1}, f_{c_2}, f_{c_3}$ 分别采用CSO、ABC、CSO-ABC算法进行测试。测试函数表达式为:

$$f_{c_1} = \frac{10}{D^2} \prod_{i=1}^D \left(1 + i \sum_{j=1}^{32} \frac{[2^j x_i - [2^j x_i]]}{2j} \right)^{\frac{10}{D^{1.3}}} - \frac{10}{D^2} \quad (11)$$

$$f_{c_2} = \left| \sum_{i=1}^D x_i^2 - D \right|^{\frac{1}{4}} + \frac{1}{D} \left(0.5 \sum_{i=1}^D x_i^2 + \sum_{i=1}^D x_i \right) + 0.5 \quad (12)$$

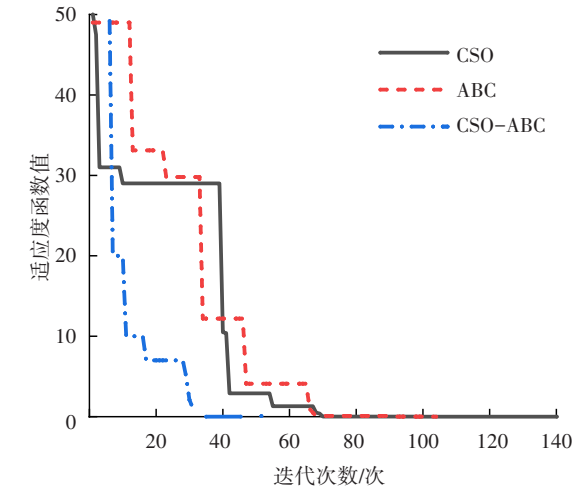
$$f_{c_3} = \left| \left(\sum_{i=1}^D x_i^2 \right)^2 - \left(\sum_{i=1}^D x_i \right)^2 \right|^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{D} \left(0.5 \sum_{i=1}^D x_i^2 + \sum_{i=1}^D x_i \right) + 0.5 \quad (13)$$

式中: D 为维度; x 为自变量。

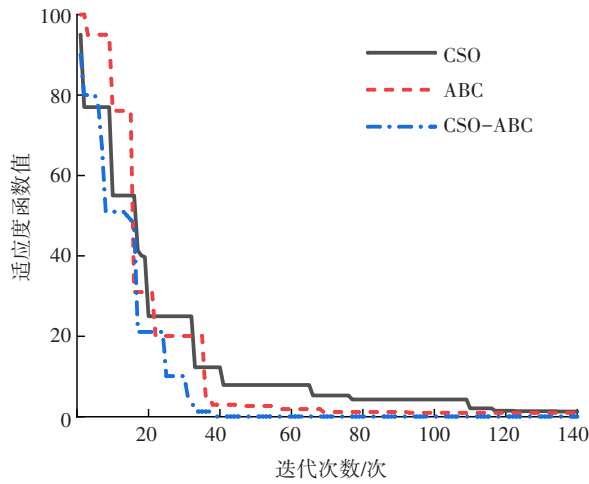
取 $D = 100$, 迭代次数为 150、运行次数为 50, 这三种算法的优化均值见表 1, 收敛曲线如图 2 所示。

表 1 测试函数在不同算法下优化结果对比
Table 1 Comparison of optimization results of test functions under different algorithms

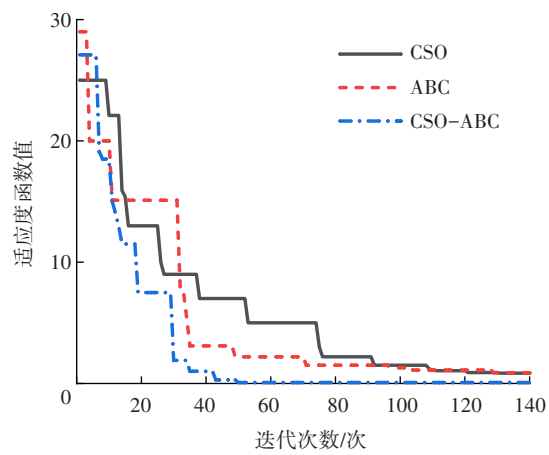
算法	测试函数		
	f_{c_1}	f_{c_2}	f_{c_3}
CSO	0.000 12	1.123 91	0.845 61
ABC	0.000 55	0.998 12	0.883 54
CSO-ABC	0.000 01	0.051 27	0.075 23
理论极值	0	0	0



(a) 测试函数 f_{c_1} 在 3 种不同算法下的值



(b) 测试函数 f_{c_2} 在 3 种不同算法下的值



(c) 测试函数 f_{c_3} 在 3 种不同算法下的值

图 2 3 种算法在不同测试函数下的比较
Fig. 2 Performance comparison of each algorithm under different test functions

从表 1、图 2 中可以看出,CSO 算法和 ABC 算法的优化结果和理论值偏差较大,且迭代速度下降较为缓慢;CSO-ABC 算法的最优解最接近理论极值,迭代速度下降最快。因此,CSO-ABC 算法与 CSO 算法和 ABC 算法相比,具有准确性与效率高的双重优势,可应用于钢箱拱桥吊杆内力优化的求解。

3 基于 CSO-ABC 算法的吊杆内力优化

3.1 工程背景

某中承式系杆拱桥总长为 220.0 m,两片拱肋平行布置,横向间距为 29.7 m,主梁与前、后斜腿刚构形成三角刚架,边中跨主梁采用预应力混凝土结构。部分荷载通过吊杆传递至拱肋,剩余部分荷载通过支座传递给三角刚架,拱肋水平推力由系杆承担。中跨主梁长为 80.7 m,每隔 5.0 m 设置一对双吊杆,与主拱相连,全桥共设 30 对吊杆。全桥主拱圈为钢箱拱,采用 Q345qD 钢板预制拼装施工,承台、拱座均采用 C40 高性能海工混凝土,在三角刚架的前、后斜腿顶部范围 2.0 m 内采用 C50 海工混凝土,其余结构采用 C40 海工混凝土。拱桥结构如图 3 所示,主要材料参数见表 2。

3.2 变量约束与适应度函数

该拱桥结构较为复杂,其中,拱肋为钢箱结构,主梁为混凝土箱梁,需确保钢箱拱肋与主梁线形合理的前提下优化吊杆力,以便整体结构在线形不发生较大变化的情况下进一步优化受力。以该拱桥

的 30 对吊杆力为变量,即 $x = [x_1, x_2, \dots, x_{30}]$ 。以初始吊杆内力的 20% 作为吊杆力阈值。依据设计文件给出合理成桥状态下拱肋、主梁在吊杆锚固处节点及边界处节点的竖向坐标值作为基准值,

提取每次迭代下产生的最优个体,计算出拱肋、主梁线形,以及每个迭代期内最优个体下拱肋、主梁的位移值。假设位移阈值为 30 mm,当节点位移超过阈值时,则不计入该迭代期内的最优个体。

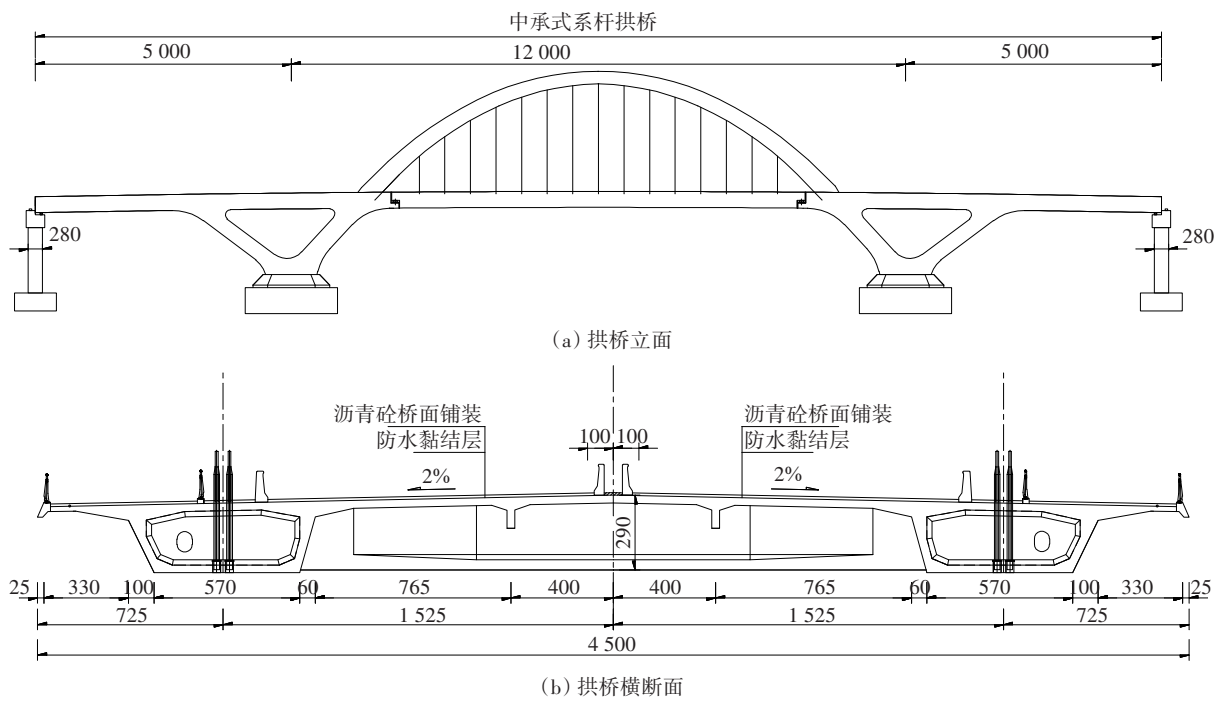


图3 拱桥结构(单位:cm)

Fig. 3 Elevation and standard cross-section (unit: cm)

表2 主要材料参数

Table 2 Main material parameters

材料	容重/(kN·m ⁻³)	弹模/MPa	泊松比	线膨胀系数
Q345qD	76.98	206 000	0.3	12×10 ⁻⁵
C40 高性能海工混凝土	24.79	32 500	0.2	12×10 ⁻⁵
C50 海工混凝土	25.00	34 500	0.2	12×10 ⁻⁵
吊杆钢绞线	77.05	190 000	0.3	12×10 ⁻⁵
系杆	83.03	20 500	0.3	12×10 ⁻⁵

该拱桥吊杆的有效横截面积为 3 892.6 mm²,为合理控制吊杆内力极差,同时兼顾拱肋、主梁线形及应力水平,定义适应度函数 f 为:

$$f = \omega_1(x_{\max} - x_{\min}) + \omega_2 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{34} \mu_i^2}{34}} + \omega_3 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{34} \sigma_i^2}{34}} + \omega_4 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{222} \delta_i^2}{222}} + \omega_5 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{222} \xi_i^2}{222}} \quad (14)$$

式中: ω_1 、 ω_2 、 ω_3 、 ω_4 、 ω_5 分别为吊杆内力极差、拱肋位移增量、拱肋应力增量、主梁位移增量、主梁应力增量的权重系数,分别取为 0.05、0.10、0.20、0.50、0.15; $x_{\max}$ 、 $x_{\min}$ 分别为当前迭代期内吊杆内力最大值和最小值; μ_i 、 σ_i 、 δ_i 、 ξ_i 分别为拱肋位移增量、拱肋应力增量、主梁位移增量、主梁应力增量(拱肋包含 30 对吊杆锚固点与 4 个拱脚节点,故式中拱肋 $i \in \{1, 2, \dots, 34\}$,主梁按构造考虑节点间距加密, $i \in \{1, 2, \dots, 222\}$)。

3.3 有限元模型与自动化脚本编制

利用 ABAQUS 有限元软件建立该拱桥的数值模型,如图 4 所示。考虑到剪切变形的影响,钢箱拱肋采用 S8R 壳单元,兼顾计算效率与应力集中现象,混凝土主梁采用 C3D20R 体单元,钢筋、预应力束、系杆和吊杆均采用 T3D2 桁架单元模拟^[11-12]。采用中性轴算法,考虑最小化网格过渡划分壳单元与体单元,并对不同尺寸大小的构件采用不同的种子密度。采用线性弹簧模拟主梁支座,其中,顺桥向刚度为 60 kN/mm,横桥向刚度为 2 000 kN/mm。该桥在设计荷载作用下竖向压缩变形不超过支座总高

度的 1%,故采用刚性支撑。对于墩底约束节点所有平动自由度与转动自由度,采用内置区域的形式将钢筋、预应力束与主梁体单元进行耦合;采用 MPC 铰接的形式将系杆、吊杆与拱肋、主梁进行耦合,释放其端部约束。不同混凝土节段之间采用 Tie 绑定,强制耦合节段界面。定义重力加速度,实现结构自重的自动计算,按式(15)采用降温法对预应力束及吊杆施加内力^[13-16]:

$$\Delta T = \frac{\sigma}{E\alpha} \tag{15}$$

式中: ΔT 为温度增量; σ 为应力增量; E 为弹性模量; α 为线膨胀系数。

先将内力换算为应力后,再通过式(15)计算温度增量,最后对模型施加温度荷载,即可对相应结构施加等效内力。

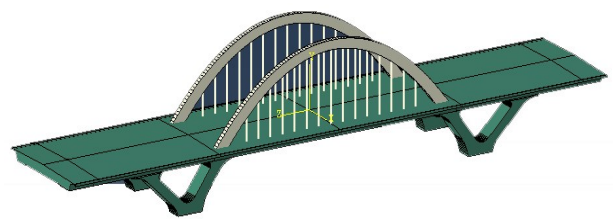


图 4 有限元模型

Fig. 4 Finite element model

设定改进 CSO-ABC 算法的种群规模 $N=40$,迭代次数 $M=100$,维度 $D=30$, $l_1=50$, $l_2=50$ 。

传统非交互优化算法常采用手动提取有限元计算结果,再输入优化算法程序,其过程烦琐,计算效率低,容易出错。本研究基于 ABAQUS 平台编制了自动化计算 Python 脚本,在进行参数化建模后自动进行计算分析,提取后的处理结果导入 CSO-ABC 算法,实现了 ABAQUS-Python 的数据交互,提高了计算效率。

3.4 优化结果分析

3.4.1 吊杆内力

采用普通桌面计算平台,运行 ABAQUS-Python 脚本,经 100 次迭代循环后,得到吊杆内力优化结果,其与设计初始值的对比见表 3。其中,上游侧吊杆编号为 L1~L15,下游侧吊杆编号为 R1~R15。由表 3 可知,上下游侧吊杆最大优化幅度为 2.17%,最小优化幅度为 -0.07%。优化前,最小吊杆力为 2 636 kN,最大吊杆力为 2 810 kN,二者相差约 6.6%。优化后,所有吊杆内力较为均匀,最小吊杆

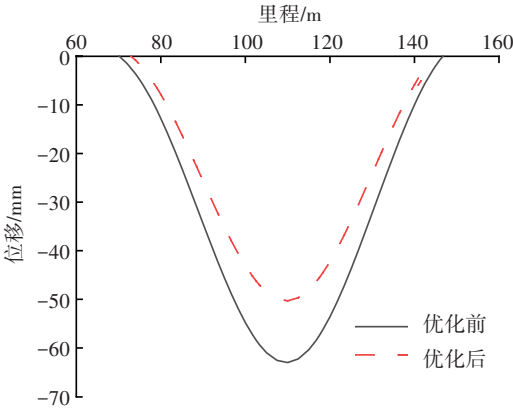
力为 2 640 kN,最大吊杆力为 2 865 kN,二者相差约 8.5%,吊杆内力极差增大 1% 左右。

表 3 吊杆内力优化结果对比

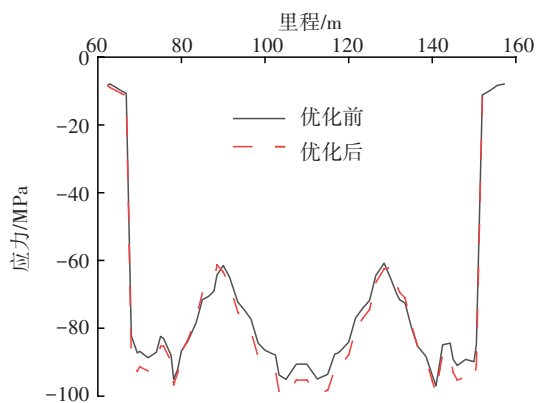
Table 3 Comparison of internal force optimization results of the suspender							kN		
编号	初始值	优化值	优化幅度	编号	初始值	优化值	优化幅度		
L1	2 780	2 833	1.91%	R1	2 804	2 865	2.17%		
L2	2 676	2 657	-0.71%	R2	2 696	2 693	-0.11%		
L3	2 720	2 696	-0.88%	R3	2 746	2 730	-0.58%		
L4	2 646	2 644	-0.08%	R4	2 668	2 675	0.26%		
L5	2 653	2 664	0.41%	R5	2 693	2 703	0.37%		
L6	2 644	2 668	0.91%	R6	2 672	2 695	0.86%		
L7	2 701	2 717	0.59%	R7	2 722	2 756	1.25%		
L8	2 707	2 726	0.70%	R8	2 724	2 753	1.06%		
L9	2 702	2 725	0.85%	R9	2 719	2 757	1.40%		
L10	2 641	2 669	1.06%	R10	2 671	2 695	0.90%		
L11	2 657	2 669	0.45%	R11	2 695	2 709	0.52%		
L12	2 636	2 640	0.15%	R12	2 672	2 677	0.19%		
L13	2 722	2 699	-0.84%	R13	2 746	2 730	-0.58%		
L14	2 677	2 656	-0.78%	R14	2 695	2 689	-0.22%		
L15	2 786	2 832	1.65%	R15	2 810	2 860	1.78%		

3.4.2 拱肋线形、应力

优化前、后的拱肋竖向位移和截面最大应力对比如图 5 所示。从图 5 可以看出,优化后拱肋中部截面的最大应力峰值相较于优化前的增加约 4.9 MPa,但拱肋其余部分变化较小;在应力基本不发生较大变化的同时,优化后的拱肋竖向位移峰值由优化前的 -63.0 mm 减小至 -50.3 mm(负值表示位移向下)。这表明:通过优化吊杆内力使得拱肋线形进一步接近设计成桥状态,结构内力分配更接近设计目标,更有利于提高结构安全性。



(a) 优化前后拱肋竖向位移对比



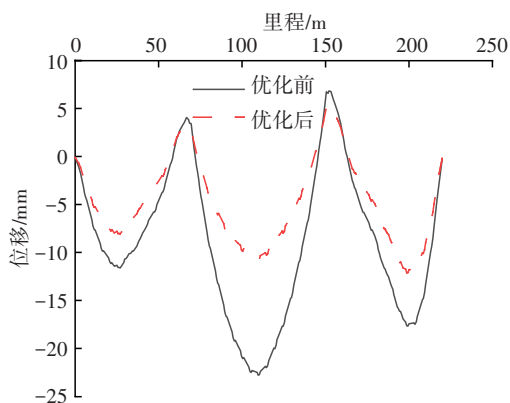
(b) 优化前后截面最大应力对比

图5 拱肋优化前后计算结果对比

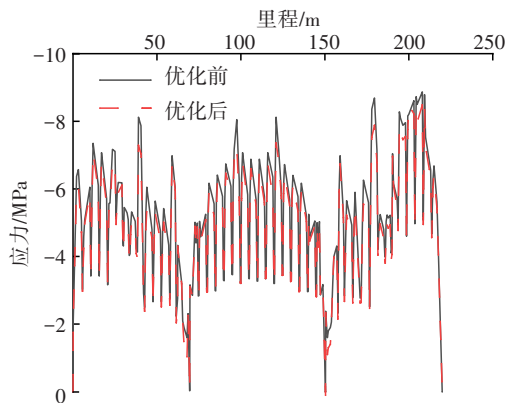
Fig. 5 Comparison of calculation results before and after arch rib optimization

3.4.3 主梁线形及应力

优化前、后主梁竖向位移及截面最大应力对比如图6所示。从图6可以看出,优化后主梁各截面最大应力峰值相较于优化前增加约0.8 MPa;中跨跨中竖向位移峰值由优化前的-22.5 mm减小至-10.4 mm(负值表示位移向下)。这表明:优化吊杆内力使主梁线形进一步逼近设计成桥状态,比优化前的线形更合理、更平顺。



(a) 竖向位移



(b) 截面最大应力

图6 主梁优化前后计算结果对比

Fig. 6 Comparison of calculation results before and after main girder optimization

4 结论

为实现钢箱拱桥吊杆内力的优化,本研究提出改进的CSO-ABC混合算法,通过数值验证证明其有效性,并将其应用至某钢箱系杆拱桥内力优化,得到结论为:

1) 改进的CSO-ABC混合算法能有效结合CSO算法、ABC算法的优点,改善原有算法收敛性较差、计算效率低等缺陷。

2) 基于CSO-ABC混合算法,采用ABAQUS-Python交互,实现了某钢箱系杆拱桥吊杆内力优化自动迭代,避免了手动输入数据的烦琐性与人为因素引起的错误,提高了效率。

3) 钢箱系杆拱桥吊杆内力经CSO-ABC混合算法优化后,保证各吊杆内力均匀,且在拱肋、主梁应力基本不变的前提下,大幅度减小了拱肋与主梁的位移,提高了结构安全性与线形平顺度。这表明改进CSO-ABC混合算法对吊杆内力优化计算具有良好的适用性,可为类似工程设计、施工、监控提供参考。

参考文献(References):

- [1] 苏威风,孙杰,刘涛涛,等.多线铁路系杆拱桥吊杆优化及静力特性分析[J].铁道建筑,2017,57(12):5-8. (SU Weifeng, SUN Jie, LIU Taotao, et al. Analysis of suspender optimization and static characteristics of multiple-track railway tied arch bridge [J]. Railway Engineering, 2017, 57(12): 5-8. (in Chinese))
- [2] 李杰,陈淮,江莹莹,等.钢管混凝土系杆拱桥吊杆力计算及调索方法研究[J].铁道建筑,2014,54(1):7-10. (LI Jie, CHEN Huai, JIANG Yingying, et al. Study on calculation of suspender force and cable adjustment method of concrete-filled steel tube tied arch bridge [J]. Railway Engineering, 2014, 54(1): 7-10. (in Chinese))
- [3] 刘钊.基于能量法的系杆拱桥最优吊杆内力的确定[J].工程力学,2009,26(8):168-173. (LIU Zhao. Determination of the optimal hanger forces for tied-arch bridges based on energy methods [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(8): 168-173. (in Chinese))
- [4] 孙传智,李爱群,缪长青,等.基于响应面法的系杆拱桥吊杆初内力优化[J].中国公路学报,2012,25(3):94-99. (SUN Chuazhi, LI Aiqun, MIAO Changqing, et al. Optimization of initial internal forces of hangers for tied-

- arch bridge based on response surface method[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(3): 94-99. (in Chinese))
- [5] MENG X B, LIU Y, GAO X Z, et al. A new bio-inspired algorithm: chicken swarm optimization [M]//Lecture notes in computer science. Cham: Springer International Publishing, 2014: 86-94.
- [6] NOZOHOUR-LEILABADY B, FAZELABDOLABADI B. On the application of artificial bee colony (ABC) algorithm for optimization of well placements in fractured reservoirs; efficiency comparison with the particle swarm optimization (PSO) methodology [J]. Petroleum, 2016, 2(1): 79-89.
- [7] 吴定会, 孔飞, 纪志成. 鸡群算法的收敛性分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(8): 2105-2112. (WU Dinghui, KONG Fei, JI Zhicheng. Convergence analysis of chicken swarm optimization algorithm [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, 48(8): 2105-2112. (in Chinese))
- [8] 何尧, 刘建华, 杨荣华. 人工蜂群算法研究综述[J]. 计算机应用研究, 2018, 35(5): 1281-1286. (HE Yao, LIU Jianhua, YANG Ronghua. Survey on artificial bee colony algorithm [J]. Application Research of Computers, 2018, 35(5): 1281-1286. (in Chinese))
- [9] KARABOGA D, BASTURK B. A Comparative study of artificial bee colony algorithm [J]. Applied Mathematics and Computation, 2009, 214(1): 108-132.
- [10] 史旭栋, 高岳林. 基于鸡群优化和人工蜂群优化的混合算法[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2018, 41(5): 589-594. (SHI Xudong, GAO Yuelin. Hybrid algorithm based on chicken swarm optimization and artificial bee colony [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2018, 41(5): 589-594. (in Chinese))
- [11] 石亦平, 周玉蓉. ABAQUS有限元分析实例详解[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006. (SHI Yiping, ZHOU Yurong. Detailed explanation of ABAQUS finite element analysis example [M]. Beijing: China Machine Press, 2006. (in Chinese))
- [12] 董冰, 苏庆田, 黎丁实, 等. 宽箱梁钢拱桥受力分析方法研究[J]. 桥梁建设, 2013, 43(2): 70-75. (DONG Bing, SU Qingtian, LI Dingshi, et al. Study of analysis methods for mechanical behavior of steel arch bridge with wide box girder [J]. Bridge Construction, 2013, 43(2): 70-75. (in Chinese))
- [13] 覃荷瑛, 赵艳林, 金凌志. 体外预应力混凝土简支梁的 ABAQUS 非线性有限元分析[J]. 中外公路, 2010, 30(5): 158-161. (QIN Heying, ZHAO Yanlin, JIN Lingzhi. ABAQUS nonlinear finite element analysis of externally prestressed concrete simply supported beam [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2010, 30(5): 158-161. (in Chinese))
- [14] 潘鹏, 张微敬, 钱稼茹. 基于 ABAQUS 的预应力拉索施工过程模拟方法及应用研究[C]//第九届全国现代结构工程学术研讨会论文集. 北京: 工业建筑, 2009: 392-396. (PAN Peng, ZHANG Weijing, QIAN Jiaru. Simulation method and application research of prestressed cable construction process based on ABAQUS [C]//Proceedings of the 9th National Symposium on Modern Structural Engineering. Beijing: Industrial Construction, 2009: 392-396. (in Chinese))
- [15] 肖亚鑫, 鲁乃唯, 陈方怀. 钢-超高性能混凝土组合板连接件的抗剪性能[J]. 交通科学与工程, 2020, 36(1): 44-49. (XIAO Yaxin, LU Naiwei, CHEN Fanghuai. The shear capacity of steel-ultra-high performance concrete composite board connectors [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36(1): 44-49. (in Chinese))
- [16] 孟少平, 吴畅, 熊俊, 等. 预应力混凝土复杂结构非线性有限元分析相关问题的探讨[J]. 工业建筑, 2009, 39(12): 1-4. (MENG Shaoping, WU Chang, XIONG Jun, et al. Discussion on the nonlinear finite element analysis of prestressed concrete complex structures [J]. Industrial Construction, 2009, 39(12): 1-4. (in Chinese))
- (责任编辑: 罗容; 校对: 欧兆虎; 英文编辑: 栗淼)