文章编号：0253-374X(2025)11-1648-08

DOI：10.11908/j.issn.0253-374x.24266

人工蜂蚁算法结合BP神经网络的PC刚构桥优化

王田虎，徐　栋

（同济大学 土木工程学院，上海 200092）

摘要：为了解决现有预应力混凝土(PC)连续刚构桥优化易陷入局部最优且难以系统地实现结构尺寸和钢束优化的问题，提出了一种人工蜂蚁(ABC)算法结合BP神经网络的方法，启发式算法避免了局部最优，目标函数兼顾结构造价和受力性能，以满足规范和构造要求为约束条件，系统地实现PC连续刚构桥结构尺寸和钢束的优化。依托一座跨径布置为(95+173+95)m的连续刚构桥，通过比较九种算法与神经网络结合的优化效果和效率，突显了ABC算法的优势。最优方案不仅满足规范要求，且相较于原桥，目标值降低了35.8%，钢束用量减少了46.3%，应力安全度方差降低了60.4%，目标预测值与实际值仅相差2.1%，优化和预测效果显著。此外，对参数进行了重要性和敏感性分析，探索了不同参数对于目标值的影响。

关键词：结构优化；预应力混凝土；连续刚构桥；人工蜂蚁算法；BP神经网络

中图分类号：U443；U442　　**文献标志码**：A

Optimization of PC Continuous Rigid Frame Bridges Using Artificial Bee Colony Algorithm and BP Neural Network

WANG Tianhu, *XU Dong*

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: To address the challenges of optimization for prestressed concrete (PC) continuous rigid frame bridges, particularly the issues of local optima and the difficulty in simultaneously optimizing structural dimensions and prestressing tendons, this study proposes a method combining the artificial bee colony (ABC) algorithm with the back propagation (BP) neural network. The heuristic algorithm helps to avoid local optima. The objective function considers both structural cost and performance, with constraints to meet specifications and construction requirements, achieving systematic optimization of structural dimensions and tendons for PC continuous rigid frame bridges. Based on a continuous rigid frame bridge with a span arrangement of (95+173+95) m, a comparative analysis was conducted using nine different algorithms combined with neural networks. This comparison highlighted the superiority of the ABC algorithm in terms of optimization effect and efficiency. The optimal scheme not only meets the specifications but also reduces the objective value by 35.8%, tendon usage by 46.3%, and stress safety variance by 60.4% compared to the original bridge, showing significant optimization effects. The predicted value of the objective for the optimal scheme differed from the actual value by only 2.1%, demonstrating the effectiveness of the prediction. Furthermore, importance and sensitivity analyses were conducted to explore the impact of different parameters on the objective value.

Keywords: structural optimization; prestressed concrete; continuous rigid frame bridge; artificial bee colony algorithm; back propagation (BP) neural network

PC连续刚构桥具有结构刚度大、行车平顺、抗震性能好等优点，近年来在国内外得到广泛应用[1]。PC连续刚构桥体系源于连续梁桥，传统设计过程是先根据设计经验拟定结构尺寸，结合规范估算钢束配置，再借助分析软件验算，若不满足规范，则调整尺寸或钢束配置，如此反复，直至符合规范。该方法繁琐、效率低下，也不能保证设计方案经济或受力性能优于其他方案。

优化理论在桥梁工程的应用为解决以上问题提供了全新的视角，研究者们逐渐将优化理论引入到PC梁桥的设计中。在早期研究中，一些学者以线性规划方法实现PC梁桥最小成本的优化[2-4]。随研究的深入，优化对象、目标和方法等都在不断地变化。姜新佩以PC连续梁最低造价为目标，采用

收稿日期：2024-08-17
基金项目：国家自然科学基金(52078363)
第一作者：王田虎，博士生，主要研究方向为混凝土桥梁结构优化与设计。E-mail：2011159@tongji.edu.cn
通信作者：徐栋，教授，博士生导师，工学博士，主要研究方向为混凝土和钢－砼组合结构桥梁的结构理论和精细化设计技术。E-mail：xu_dong@tongji.edu.cn

论文拓展介绍

“SUMT”内点罚函数法实现了钢束张拉力和梁高的优化[5]。唐海红以最低造价为目标，改进了遗传算法，并应用于小跨径连续梁的构造参数优化[6]。Martí等关注经济成本和不同阶段的能源使用，采用模拟退火算法（SA）实现了小跨径后张现浇连续梁桥的优化[7]。V Penadés-Plà基于克里格模型的启发式算法，实现了中小跨径连续梁的最低成本优化[8]。Nadim采用遗传算法进行了全预应力和部分预应力T型梁的优化[9]。Dahman以最小成本或重量为目标，实现了给定荷载下简支梁的梁高和预应力优化[10]。Erhan通过修正的和声搜索算法，完成了预制I型梁的最小成本优化[11]。Narques使用实数编码的遗传算法优化了I型梁，并讨论了算法效率[12]。何建梅基于最小弯曲能量法及MATLAB优化工具，提出了PC连续刚构桥钢束优化方法[13]。李明燕以连续刚构桥的边中跨比、梁底曲线幂次、支点高跨比、墩间距为设计参数，分析对比不同参数的受力影响得到最优参数[14]。赵海清基于正交设计方法，选部分主梁设计参数，得出不同目标下的参数值[15]。

现有研究特点：①国内外研究集中在PC简支梁和中小跨径连续梁的优化。对于大跨度连续梁或刚构桥的优化研究较少，多依赖试验方法，通过判定不同参数组合下桥梁性能，在有限方案中选择性能最优的参数作为最佳方案，这种方法易陷入局部最优，无法实现全局优化，且只能进行结构参数的优化，但钢束对结构的影响是不容忽视的，现有研究尚无法系统地完成结构和钢束的优化。②优化目标大多是经济性最好，考虑受力性能为目标的研究较少。③早期优化算法多是确定性算法，随着研究深入，启发式算法（如遗传算法、模拟退火算法、粒子群等）因其强大的全局优化能力和对不可微、搜索空间不连续等问题的适应性，逐渐成为主流。

针对已有研究的不足和特点，提出ABC算法结合BP神经网络的方法，目标中协同考虑结构造价和受力性能，以满足规范和构造要求为约束，系统性实现PC连续刚构桥的结构尺寸和钢束优化。本文首先介绍此优化方法的基本原理和实现步骤；然后依托一座实际桥梁，对比九种优化算法与神经网络模型结合的优化效果和效率；接着将优化方案和其他方案对比以验证优化效果；最后，对参数进行了重要性和敏感性分析，探讨了各参数对目标的影响。

1　优化方法

1.1　确定参数下的钢束优化方法

本部分提出采用悬臂施工方法的PC连续刚构桥的钢束优化方法，在结构尺寸确定条件下，综合考虑结构应力和造价，以满足规范的应力和几何构造为约束[16-17]，利用内点混合遗传算法实现钢束优化，优化模型包含设计变量、目标函数和约束条件。

1.1.1　设计变量

对于采用悬臂施工方法的连续刚构桥，悬臂下弯束+底板直线束的形式没有明显缺点，成为主流布束形式[18]，是本优化方法的前提。结合该布束形式与设计经验，可为确定结构尺寸的桥梁布置钢束立面，以每种钢束的数量作为设计变量$X(x_1,x_2,\cdots,x_n)$。

1.1.2　约束条件

约束条件包括应力约束和几何构造约束。其中，应力约束包括规范中的施工过程中正应力、成桥状态正应力和主应力约束，几何构造约束指关键截面处钢束数量符合对应的尺寸要求。

（1）施工过程中正应力约束

以施工过程中的第s个阶段为例，上下缘正应力都应满足规范要求如下：

$$\{E_{ct}\}_s \leqslant \{\sigma_g\}_{sL,R}^{T,B} + [C_1]_{sL,R}^{T,B}\{X\} \leqslant \{E_{cc}\}_s \quad (1)$$

其中，$\{E_{ct}\}_s$，$\{E_{cc}\}_s$为第s个阶段容许应力；$\{\sigma_g\}_{sL,R}^{T,B}$为桥梁在第$s$个阶段对应荷载作用下的正应力向量。$[C_1]_{sL,R}^{T,B}$为第$s$个阶段的正应力影响矩阵。$\{X\}$为每种钢束数量构成的列向量。

（2）成桥状态正应力约束

成桥状态正应力约束，包括荷载作用频遇组合下，上下缘最不利拉应力和标准组合最不利压应力都满足规范要求，如式(2)～(3)，对于A类预应力混凝土构件，准永久组合最不利拉应力也要满足规范要求，如式(4)。

$$\{\sigma_{FL,R}^{T,B}\}_{\min} = \{\sigma_{F0L,R}^{T,B}\}_{\min} + \gamma[C]_{L,R}^{T,B}\{X\} \geqslant \{E_{pt1}\} \quad (2)$$

$$\{\sigma_{EL,R}^{T,B}\}_{\max} = \{\sigma_{E0L,R}^{T,B}\}_{\max} + [C]_{L,R}^{T,B}\{X\} \leqslant \{E_{pc}\} \quad (3)$$

$$\{\sigma_{QL,R}^{T,B}\}_{\min} = \{\sigma_{Q0L,R}^{T,B}\}_{\min} + [C]_{L,R}^{T,B}\{X\} \geqslant \{E_{pt2}\} \quad (4)$$

其中，$\{\sigma_{FL,R}^{T,B}\}_{\min}$，$\{\sigma_{EL,R}^{T,B}\}_{\max}$，$\{\sigma_{QL,R}^{T,B}\}_{\min}$分别为成桥结构在荷载作用（含预应力）频遇组合、标准组合和准永久组合下最不利正（拉/压）应力向量；$\{\sigma_{F0L,R}^{T,B}\}_{\min}$，$\{\sigma_{E0L,R}^{T,B}\}_{\max}$，$\{\sigma_{Q0L,R}^{T,B}\}_{\min}$分别为荷载作用（不含预应力）频遇组合、标准组合和准永久组合下最不利正（拉/压）应力向量；$[C]_{L,R}^{T,B}$为成桥阶段正应力影

响矩阵;γ为预应力效应的正应力折减系数,由构件类型确定;$\{E_{pt1}\}$,$\{E_{pc}\}$,$\{E_{pt2}\}$为规范中容许应力。

(3)成桥状态主应力约束

成桥状态主应力约束,包括荷载作用的频遇组合下最不利主拉应力和标准组合最不利主压应力都满足规范要求,如式(5)~(6)。

$$\{\sigma^k_{tpiL,R}\}_j=\frac{\{\sigma^k_{FiL,R}\}_j+\{\sigma_{iYL,R}\}}{2}-\sqrt{\left(\frac{\{\sigma^k_{FiL,R}\}_j-\{\sigma_{iYL,R}\}}{2}\right)^2+\{\tau^k_{FiL,R}\}_j^2}\geqslant\{E_{iptp}\} \tag{5}$$

$$\{\sigma^k_{cpiL,R}\}_j=\frac{\{\sigma^k_{EiL,R}\}_j+\{\sigma_{iYL,R}\}}{2}+\sqrt{\left(\frac{\{\sigma^k_{EiL,R}\}_j-\{\sigma_{iYL,R}\}}{2}\right)^2+\{\tau^k_{EiL,R}\}_j^2}\leqslant\{E_{ipcp}\} \tag{6}$$

式中:$\{\sigma^k_{tpiL,R}\}_j$,$\{\sigma^k_{cpiL,R}\}_j$分别为第j个频遇和标准组合的主拉和主压应力,$\{\sigma_{iYL,R}\}$为竖向正应力;$\{\sigma^k_{FiL,R}\}_j$,$\{\tau^k_{FiL,R}\}_j$分别为第j个频遇组合正应力和剪应力,按(7)~(8)式计算。

$$\{\sigma^k_{FiL,R}\}_j=\{\sigma^k_{Fi0L,R}\}_j+\{e_i\}^T[C_2]^k_{L,R}\{X\} \tag{7}$$

$$\{\tau^k_{FiL,R}\}_j=\{\tau^k_{Fi0L,R}\}_j+\{e_i\}^T[D]^k_{L,R}\{X\} \tag{8}$$

其中,$\{\sigma^k_{Fi0L,R}\}_j$,$\{\tau^k_{Fi0L,R}\}_j$分别为成桥结构荷载作用(不含预应力)第j个频遇组合的正应力和剪应力;$[C_2]^k_{L,R}$,$[D]^k_{L,R}$分别为成桥状态第k个主应力计算点处的正应力和剪应力影响矩阵;$\{\sigma^k_{EiL,R}\}_j$,$\{\tau^k_{EiL,R}\}_j$的含义及计算方式与之类似,可类比至标准组合。

(4)几何构造约束

几何构造约束是指各截面处的钢束数量能满足对应尺寸和构造要求,以第i个截面为例,几何构造约束条件如式(9)。

$$C_i(x_1,x_2,\cdots x_n)\leqslant 0 \tag{9}$$

1.1.3 目标函数

目标函数兼顾结构应力和造价,由三部分优化前后的造价和应力指标比值构成,如下:

$$\min F=\frac{\sum C_{ci}V'_{ci}}{\sum C_{ci}V^0_{ci}}+\frac{\sum C_{si}V'_{si}}{\sum C_{si}V^0_{si}}+\frac{(\sigma^2)'}{(\sigma^2)^0} \tag{10}$$

式中:C_{ci}和C_{si}分别为单位体积各种混凝土和钢材造价;V^0_{ci}和V^0_{si}分别为原设计混凝土和钢材体积;V'_{ci}和V'_{si}分别为优化后混凝土和钢材体积,$(\sigma^2)^0$和$(\sigma^2)'$分别为优化前后荷载作用标准组合下压应力和主压应力安全度方差。此处安全度以效应值、容许值之差与容许值之比表示,如式(11),标准组合压应力和主压应力安全度的均值和方差如式(12)~(13)。

$$K^{T,B}_{L,Rci}=\frac{[\sigma_{pc}]-\{\sigma^{T,B}_{EL,Ri}\}_{\max}}{[\sigma_{pc}]}\quad K^k_{L,Rcpi}=\frac{[\sigma_{pcp}]-\{\sigma^k_{cpiL,R}\}_{\max}}{[\sigma_{pcp}]} \tag{11}$$

$$\bar{K}=\frac{1}{(2l+4)n}\sum_{i=1}^{n}(K^{T,B}_{L,Rci}+\sum_{k=1}^{l}K^k_{L,Rcpi}) \tag{12}$$

$$(\sigma^2)'=\frac{1}{(2l+4)n-1}\sum_{i=1}^{n}[(K^{T,B}_{L,Rci}-\bar{K})^2+\sum_{k=1}^{l}(K^k_{L,Rcpi}-\bar{K})^2)] \tag{13}$$

其中,$K^{T,B}_{L,Rci}$,$K^k_{L,Rcpi}$分别为标准组合压、主压应力安全度;$[\sigma_{pc}]$$[\sigma_{pcp}]$为压、主压应力容许值。

目标函数协同考虑造价和应力以实现钢束优化,在应力层面,安全度将量级不一的压应力和主应力统一,同时安全度方差最小既反映了对正应力和主应力各自均匀的需求,也反映了对不同类型应力一致安全余量的追求。此处应力与图1完整应力指标系统[19]中的纵向应力指标σ_{ToL},σ_{BoL},σ_{WP}相对应,若结合精细化分析模型,可增加其他应力指标,本研究关注纵向指标。考虑单目标、约束和目标非线性的特点,采用一种混合算法—内点混合遗传算法完成钢束优化[20]。

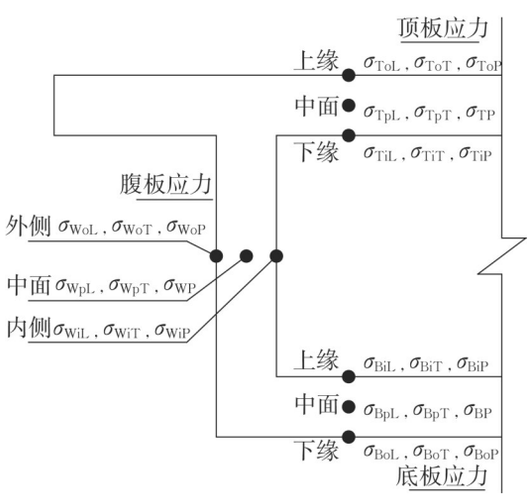


图1 箱梁桥的应力指标系统

Fig.1 Stress indicator system for box girder bridges

1.2 正交试验设计

正交试验设计是一种高效的试验设计方法,通过合理安排试验,可最大限度的减少试验次数,能系统、全面地分析各因素对结果的影响[21]。采用该方法实现PC连续刚构桥参数优化的方案设计,根据需求,可选多个优化参数,如梁高、腹板厚度、钢束锚固位置等,每种参数有多个水平,但参数组合后方案过

多，且随着参数数量增加呈指数级增长，正交试验设计可解决这一问题，应用步骤为：选定优化参数；为参数设定范围并确定多个水平；选择正交表；安排方案并利用钢束优化方法得到每种方案的目标值。

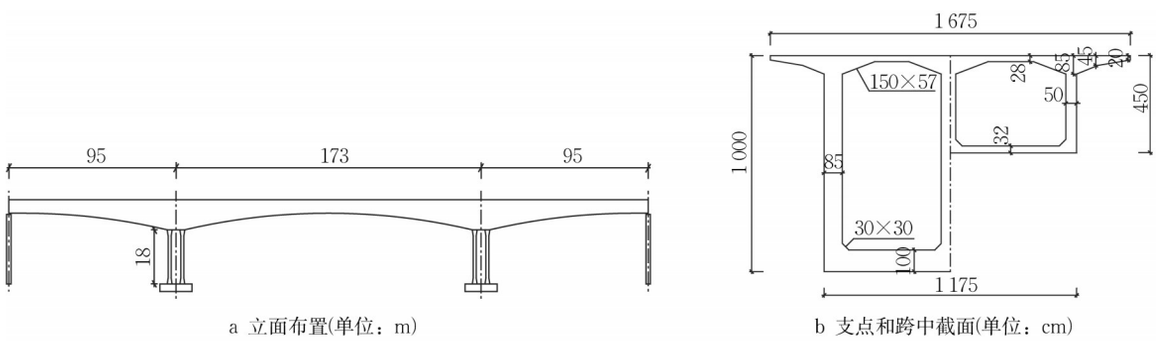
1.3　ABC算法结合BP神经网络

BP神经网络是一种多层前馈神经网络，由输入层、隐藏层和输出层组成，利用误差反向传播算法进行训练，不断调整网络结构，使模型预测值逼近真实值，但存在易陷入局部最优、训练时间长等问题[22]。ABC算法是一种模拟蜜蜂觅食行为的智能优化算法，由雇佣蜂、观察蜂和侦查蜂协同工作，寻全局最优解[23]。将BP神经网络与ABC算法相结合，可利用ABC算法的全局优化能力优化超参数，提升网络性能。

以正交试验设计得到的各方案作为数据集，将数据预处理，包括归一化和数据集划分，然后利用ABC算法优化BP神经网络超参数，并进行训练，训练中采用K折交叉验证以提高模型的训练效果和泛化能力。模型训练完毕后，利用测试集验证模型。最后，将训练好的神经网络模型结合优化算法，以模型输出值（目标函数）最小为目标寻优，得到最优参数，并结合钢束优化方法即可确定系统的优化方案。

2　依托背景

依托背景桥梁是一座跨径布置为（95＋173＋95）m的PC连续刚构桥（如图2），箱梁采用C55混凝土。采用单箱双室截面，顶板宽16.75m，底板宽11.75m，跨中梁高4.5m，支点梁高10.0m，悬浇部分梁高按2.0次抛物线规律变化。顶板厚度28cm，跨中腹板厚度50cm，支点腹板厚度85cm，腹板厚度分两次渐变，跨中底板厚度32cm，支点底板厚度100cm，该桥采用三向预应力体系，主墩为双薄壁墩，墩高18m。主梁为A类预应力混凝土构件，考虑荷载包括自重、汽车荷载、收缩徐变、温度作用和支座不均匀沉降等。



a 立面布置（单位：m）　　b 支点和跨中截面（单位：cm）

图2　背景桥梁布置图

Fig. 2　Layout of the actual bridge

该桥选择的结构优化参数包括：支点梁高、跨中梁高、梁底曲线幂次、支点腹板厚度、跨中腹板厚度、顶板厚度、支点底板厚度、跨中底板厚度，原桥跨径保持不变。优化的预应力钢束采用悬臂下弯束＋底板直线束的形式，以原桥尺寸为例，钢束立面布置如图3，包含6类钢束（W、T、MT、MB、ST、SB）。全桥共137种钢束，以腹板束锚固位置、弯起半径和角度为钢束优化参数。根据常见设计范围，结合经验与该桥构造，为各优化参数确定了范围和多个水平并设计正交表，如表1，因篇幅限制，不额外附表。

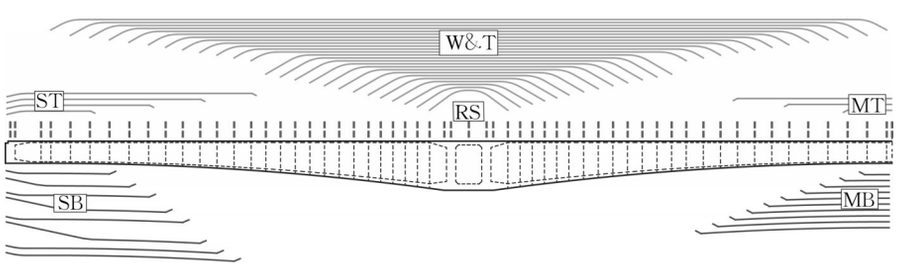


图3　钢束立面布置

Fig. 3　Elevation layout of tendons

表1 各优化参数及水平划分表

Tab. 1 Optimization parameters and levels

优化参数		水平1	水平2	水平3
尺寸参数	支点梁高	10m	9m	11m
	跨中梁高	4.5m	3.5m	5.5m
	梁底曲线幂次	2	1.6	1.8
	支点腹板厚度	85cm	75cm	65cm
	跨中腹板厚度	50cm	45cm	/
	顶板厚度	28cm	25cm	/
	支点底板厚度	100cm	110cm	120cm
	跨中底板厚度	32cm	30cm	28cm
钢束参数	锚固位置	2/3梁高	3/4梁高	4/5梁高
	弯起半径	8m	6m	10m
	弯起角度	30°	25°	40°

3 优化与讨论

3.1 BP神经网络模型

利用编制的程序实现各方案的钢束优化,设计变量为137个,选择了119个截面(图3中RS),包含11 424个非线性不等式和38 222个线性不等式约束,目标函数简化如式(14),以材料用量替代造价。

$$\min F=\frac{V_c'}{V_c^0}+\frac{V_s'}{V_s^0}+\frac{(\sigma^2)'}{(\sigma^2)^0} \tag{14}$$

将各方案参数和目标值对应数据集的输入和输出,对数据集归一化处理,并划分80%的训练集和20%的测试集。采用单隐层构建BP神经网络结构,激活函数采用ReLU,损失函数使用均方误差(MSE)结合L2正则化项,如式(15)。通过调整λ值,可平衡模型的拟合程度和复杂度,减少过拟合风险。将影响模型性能的隐层节点数、L2正则化参数、学习率作为待优化的超参数,结合优化算法和K折交叉验证(K=5)训练BP神经网络模型,以训练集中K个子集的平均决定系数$\overline{R^2}$最大为目标优化超参数,每次训练中决定系数R^2如式(16)。

$$L=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i-\hat{y}_i)^2+\lambda\sum_{j=1}^{p}w_j^2 \tag{15}$$

$$R^2=1-\frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i-\hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2} \tag{16}$$

式中:y_i是实际值;$\hat{y}_i$是预测值;n是样本数量;λ是L2正则化参数,$\sum_{j=1}^{p}w_j^2$为所有权重参数的平方项;w_j是模型的第j个权重参数,初始化为较小随机数;p是权重参数的总数;$\bar{y}$为实际值的平均值。

采用了九种算法对比优化超参数的效果,各算法超参数的优化迭代如图4,优化时间和优化目标值如表2。图4表明,除BO算法和RS算法之外,其余算法收敛速度都较快,不同算法收敛值不同,这与算法特点、参数设置等因素有关。RS和SA算法优化时间短,但优化效果一般。ABC算法优化效果最佳,收敛值最大(0.891),且收敛速度较快,优化时间也较短(69.18s),可认为是BP神经网络超参数优化的最优算法。

表2 不同算法优化时间和效果

Tab. 2 Time and performance of different algorithms

算法	时间/s	优化目标$\overline{R^2}$
网格搜索(GS)	527.18	0.862
随机搜索(RS)	9.36	0.766
贝叶斯优化(BO)	43.30	0.771
差分进化算法(DE)	65.36	0.889
遗传算法(GA)	11.11	0.831
粒子群算法(PSO)	58.79	0.868
模拟退火算法(SA)	7.35	0.837
模拟退火粒子群算法(SA−PSO)	64.08	0.869
人工蜂蚁算法(ABC)	69.18	**0.891**

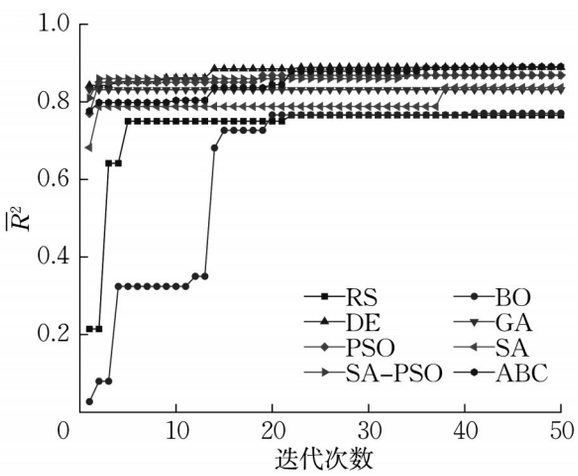


图4 不同优化算法优化超参数迭代过程

Fig. 4 Iteration process of optimizing hyperparameters using different algorithms

3.2 参数与钢束优化

利用训练的神经网络模型,以式(14)输出值最小为目标,11个优化参数为变量,变量上下限为约束,采用8种算法实现参数寻优,各算法优化迭代如图5所示。SA-PSO算法以较快速度收敛,目标值最小(1.884),以其为优选算法,得表3的参数。相比原桥,优化了大部分参数,支点梁高、支点底板厚度增大,跨中梁高、跨中腹板厚度、顶板厚度和跨中底板厚度减小。

利用编制的程序实现最优参数方案的钢束优化,结合有限元软件,对优化后方案建模分析,依据规范验算,各项控制指标均满足规范要求,部分结果如图6所示。由优化方案的钢束、混凝土用量和应力分布,计算目标值为1.925,神经网络模型预测目标值为1.884,相对误差约2.1%,预测精度高。多方案综合对比如表4所示,神经网络模型结合优化算法的寻优方案目标值

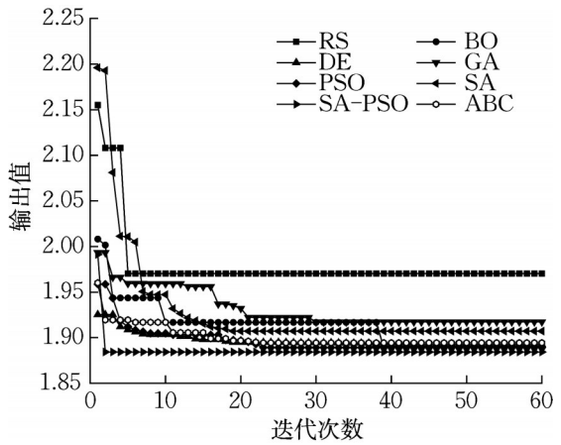


图5　不同算法参数优化迭代过程

Fig. 5　Iteration process of parameter optimization with different algorithms

最小，与原桥相比，目标值降低了35.8%，应力安全度方差降低了60.4%，钢束用量减少了46.3%，混凝土用量降低了0.92%，优化效果主要体现在应力分布和钢束用量，原桥在满足规范条件下布置了偏多的钢束，为结构提供更多的预压应力。

3.3　参数重要性与敏感性分析

选定的参数较多，不同参数的重要性不尽相同，因此对各参数重要性进行分析。基于神经网络模型，采用SHAP方法评估，该方法是一种基于博弈论解释机器学习模型输出的方法，计算各参数对预测结果的贡献来解释模型决策[24]。各参数重要性排序如图7所示，横坐标为每个参数下Shapley绝对值的均值，均值越大，重要性越高。由图可知：支点和跨中梁高是最主要因素，梁底曲线幂次、跨中腹板和底板厚度影响较大，其余因素影响较小。

表3　最优方案参数值

Tab. 3　Parameters of the optimal scheme

参数类型	参数值	参数类型	参数值
支点梁高	11m(10m)	顶板厚度	25cm(28cm)
跨中梁高	3.5m(4.5m)	支点底板厚度	120cm(100cm)
梁底曲线幂次	2	跨中底板厚度	28cm(32cm)
支点腹板厚度	85cm	锚固位置	2/3梁高
跨中腹板厚度	45cm(50cm)	弯起半径、角度	8m，30°

注：括号内数值为原桥参数。

表4　多种方案对比

Tab. 4　Comparison of various schemes

方案	目标值	安全度方差	混凝土用量/m^3	钢束用量/m^3
原桥	3	0.027 8	12 542	78.0
原桥钢束优化	2.106	0.013 5	12 542	48.8
正交表中最优	1.955	0.011 8	12 441	41.7
神经网络模型最优	1.925	0.011 0	12 427	41.9

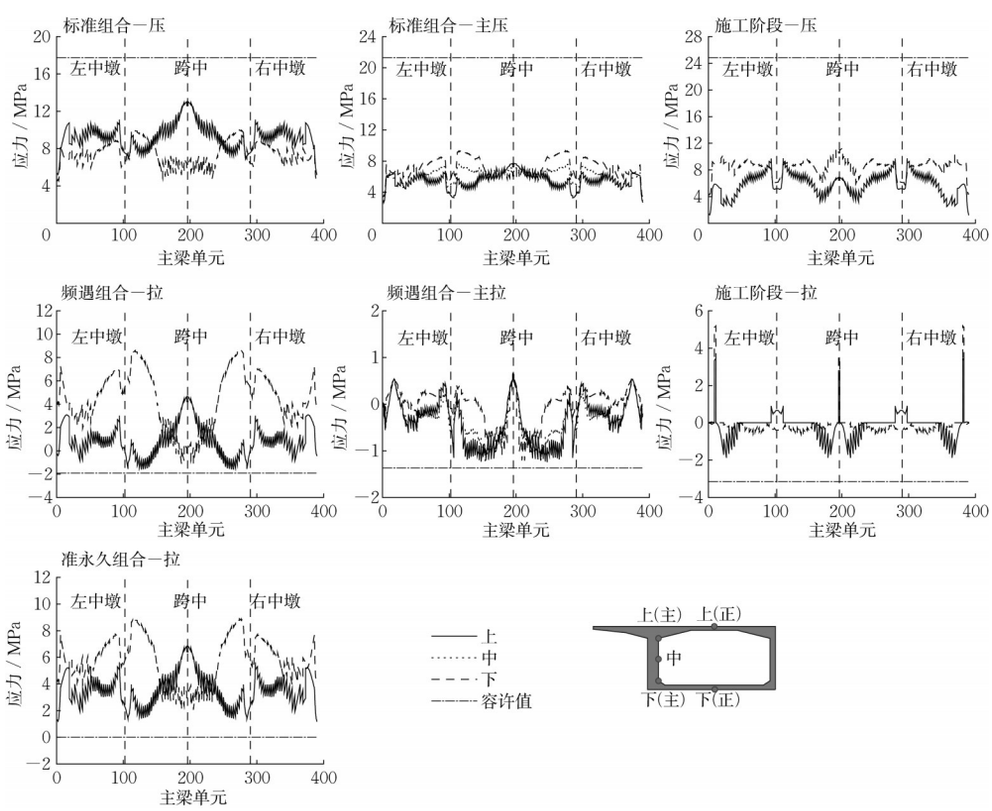


图6　主梁应力验算

Fig. 6　Stress verification of the main girder

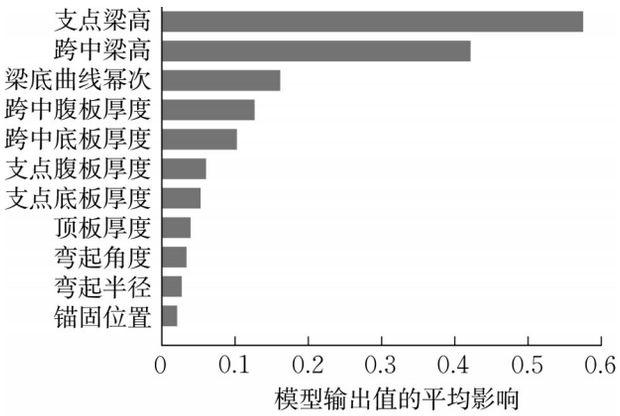


图7 参数重要性排序

Fig. 7 Ranking of parameter importance

针对重要性较高的参数,探究其敏感性。随机选训练集中三个样本,在参数上下限范围内,单独改变每个参数的值,其他参数不变,得到输出值,如图8所示。

输出值与各因素基本呈线性关系。从影响方向看,随参数值增加,支点梁高、曲线次数对应输出值降低,而跨中梁高、顶板厚度、跨中底板和腹板厚度对应输出值提高,趋势与优化方案对应参数取值一致,验证了优化方案的合理性。从影响大小看,由曲线斜率判断支点和跨中梁高的影响最大,其他因素影响偏小,与重要性分析结果一致。不同样本输出值与因素的线性关系不尽相同,例如,样本1和2的支点梁高对输出值的影响曲线斜率不等,表明输出值对各参数的偏导数并非常数,输出、输入间映射关系较复杂。

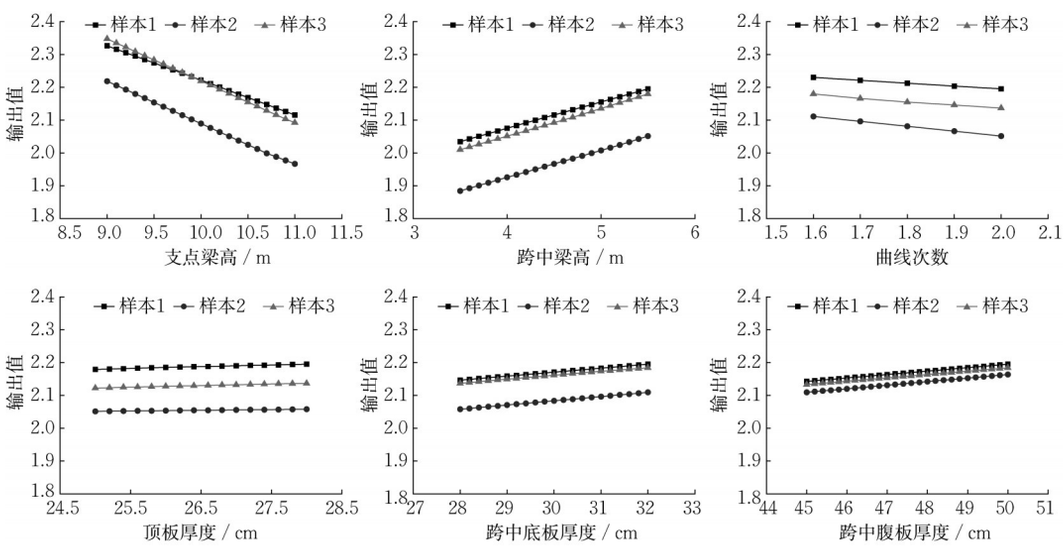


图8 参数敏感性分析

Fig. 8 Sensitivity analysis of parameters

4 结论

(1)提出了一种结合BP神经网络和ABC算法的方法,用于大跨度PC连续刚构桥尺寸和钢束的系统优化,并应用于实际桥梁。结果表明:与原桥相比,目标值改善35.8%,应力安全度方差降低60.4%,钢束用量减少46.3%,优化效果明显,验证了该方法的可行性和有效性。

(2)对于BP神经网络超参数的优化,结合K折交叉验证,以K个子集平均决定系数$\overline{R^2}$最大为目标,对比了9种算法。结果表明:ABC算法优化效果最好且耗时较短,收敛速度快。

(3)基于神经网络模型,以输出值最小为目标,对比了八种算法的寻优效果。结果表明:SA-PSO算法具有最快的收敛速度和最低的目标值。

(4)基于神经网络模型,利用SHAP方法分析了参数重要性。结果表明:支点和跨中梁高是影响目标值的最主要因素,梁底曲线幂次、跨中腹板和底板厚度有较大影响,其余因素影响较小。

(5)基于神经网络模型,对重要性较高参数进行了敏感性分析。结果表明:随参数值增加,支点梁高、曲线次数对应输出值降低,跨中梁高、顶板厚度、跨中底板和腹板厚度对应输出值提高。其中,支点和跨中梁高影响最为明显,敏感性高,其他参数敏感性较差。

(6)提出的结合BP神经网络和ABC算法的方法,在一座三跨PC刚构桥的优化中效果显著,未来可将该方法进行更多应用和实践,基本原理和流程可拓展应用于其他结构,比如中小跨径连续梁桥,乃至非桥

梁结构。

作者贡献声明：

王田虎：文章构思、起草与撰写；

徐　栋：文章审阅与修改、基金支持。

参考文献：

[1] 范立础. 桥梁工程 [M]. 北京：人民交通出版社，2001.
FAN Lichu. Bridge engineering [M]. Beijing: China Communications Press, 2001.

[2] FEREIG S M. Preliminary design of standard CPCI prestressed bridge girders by linear programming [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1985, 12(1): 213.

[3] KIRSCH U. A bounding procedure for synthesis of prestressed systems [J]. Computers and Structures, 1985, 20(5): 885.

[4] ERBATUR F, ZAID R A, DAHMAN N A. Optimization and sensitivity of prestressed concrete beams [J]. Computers and Structures, 1992, 45(5): 881.

[5] 姜新佩，胡浩云，郭凤台. 预应力混凝土构件的优化设计 [J]. 华北水利水电学院学报，1998 (2)：33.
JIANG Xinpei, HU Haoyun, GUO Fengtai. Optimization design of prestressed concrete components [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power, 1998 (2): 33.

[6] 唐海红. 基于遗传算法的连续梁桥优化设计方法与应用研究 [D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2009.
TANG Haihong. Research on optimization method and application of continuous bridges based on genetic algorithm [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.

[7] ALCALá J, GONZáLEZ V F, YEPES V, *et al*. Embodied energy optimization of prestressed concrete slab bridge decks [J]. Technologies, 2018, 6(2): 43.

[8] PENADéS P V, GARCíA ST, YEPES V. Robust design optimization for low-cost concrete box-girder bridge [J]. Mathematics, 2020, 8(3):398.

[9] ABDEL N N, VIé D, CHATEAUNEUF A, *et al*. Dimensioning of partially prestressed concrete beams, optimization of T-shaped section with heels [J]. Engineering Structures, 2021, 235: 112054.

[10] DAHMAN N A, IRHOUMA A H, MOUSA A I, *et al*. Design optimization and sensitivity analysis of simply supported prestressed concrete girders: A two dimensional non-linear paradigm [J]. Journal of King Saud University Sciences, 2023, 35(1): 1.

[11] JAHJOUH M, ERHAN S. Optimization of prestressed concrete bridge girder section using a modified harmony search algorithm [J]. Structures, 2022, 46: 625.

[12] NARQUES T V N, CARVALHO R C, CHRISTOFORO A L, *et al*. Use of real coded genetic algorithm as a pre-dimensioning tool for prestressed concrete beams [J]. Buildings, 2023, 13 (3): 819.

[13] 何建梅. 大跨预应力混凝土连续刚构桥的预应力优化设计 [D]. 长沙：湖南大学，2007.
HE Jianmei. optimal design of prestressing tendons in long-span PC continuous rigid frame bridge [D]. Changsha: Hunan University, 2007.

[14] 李明燕. 预应力混凝土连续刚构桥的参数优化 [D]. 长沙：湖南大学，2007.
LI Mingyan. Parameter optimization of PC continuous rigid frame bridge [D]. Changsha: Hunan University, 2007.

[15] 赵海清. 基于正交试验的连续刚构桥主梁设计参数优化研究 [D]. 昆明：昆明理工大学，2010.
ZHAO Haiqing. Research on continuous rigid frame bridge girder design parameter optimization based on orthogonal experiment method [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2010.

[16] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥涵设计通用规范 JTG D60－2015 [S]. 北京：人民交通出版社，2015. (Ministry of Transport. General specifications for design of highway bridges and culverts (JTG D60 - 2015) [S]. Beijing: China Communications Press, 2015.

[17] 中华人民共和国交通运输部. 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范 (JTG 3362－2018) [S]. 北京：人民交通出版社，2018.
Ministry of Transport. Specifications for design of highway reinforced concrete and prestressed concrete bridges and culverts [S]. Beijing: China Communications Press, 2018.

[18] 石雪飞，李国平，李建中. 现代桥梁工程 [M]. 北京：人民交通出版社，2021.
SHI Xuefei, LI Guoping, LI Jianzhong. Modern bridge engineering [M]. Beijing: China Communications Press, 2021.

[19] 徐栋，赵瑜，刘超. 混凝土桥梁结构实用精细化分析与配筋设计 [M]. 北京：人民交通出版社，2013.
XU Dong, ZHAO Yu, LIU Chao. Practical precise modelling and reinforcement design for concrete bridge structures [M]. Beijing: China Communications Press, 2013.

[20] 刘方，颜伟，YU C D. 基于遗传算法和内点法的无功优化混合策略 [J]. 中国电机工程学报，2005 (15)：67.
LIU Fang, YAN Wei, YU C D.A hybrid strategy based on GA and IMP for optimal reactive power flow [J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2005 (15): 67.

[21] 庞超明，黄弘. 试验方案优化设计与数据分析 [M]. 南京：东南大学出版社，2018.
PANG Chaoming, HUANG Hong. Optimal design of testing and data analysis [M]. Nanjing: Southeast University Press, 2018.

[22] 韩力群. 人工神经网络理论，设计及应用 [M]. 北京：化学工业出版社，2007.
HAN Liqun. Theory, design, and application of artificial neural networks [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007.

[23] KARABOGA D. An idea based on honey bee swarm for numerical optimization [R]. Kayseri: Erciyes University, 2005.

[24] MANGALATHU S, HWANG S H , JEON J S . Failure mode and effects analysis of RC members based on machine-learning-based Shapley Additive exPlanations (SHAP) approach [J]. Engineering Structures, 2020, 219: 110927.