

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.06.037

# 基于BP神经网络-GA的顶推PC箱梁临时墩拉索索力优化研究

邹德玉

(中铁十九局集团第二工程有限公司,辽宁 辽阳 111000)

**摘要:**为研究PC箱梁顶推施工过程中临时墩间拉索索力优化问题,该文以湖南省内某跨铁路顶推施工连续箱梁为研究背景,建立结构仿真分析有限元模型。基于BP神经网络-遗传算法,提出一种主梁顶推施工过程中临时墩间临时拉索索力优化的方法,并利用Matlab编制程序结合有限元软件,对顶推PC箱梁临时墩拉索索力优化进行研究。结果表明:优化后各临时墩墩顶最大水平位移有明显减小,最大降幅达到35.0%;各墩底最大应力也有显著降低且分布更为均匀,最大应力降幅达到37%;优化后结构受力安全得到了有效提高,也验证了BP神经网络-遗传算法在临时墩间拉索索力优化问题中的有效应用。

**关键词:**桥梁工程;PC顶推箱梁;BP神经网络-遗传算法;临时拉索索力优化

**中图分类号:**U445

**文献标志码:**A

## 0 引言

随着中国公路建设的高速推进,桥梁作为公路建设中的咽喉迎来了施工多元化和多样性。其中顶推施工因其工期快、工艺成熟<sup>[1]</sup>、适合于各类上跨桥梁施工等特点,得到了飞速发展,但也迎来了一系列的挑战。因顶推施工中主梁上下缘正负弯矩的交替变换,为保障主梁安全施工,临时墩的合理应用不可或缺<sup>[2]</sup>。对施工过程中主梁及临时墩的受力分析显得尤为重要,目前已取得诸多研究成果。陈双庆等<sup>[3]</sup>以湖南省湘府路某跨线顶推PC箱梁桥为工程背景,采用影响矩阵法及最小二乘法原理结合仿真计算分析对临时墩间水平钢绞线对拉优化进行了研究;巫建晖等<sup>[4]</sup>以某6×90 m连续顶推钢梁桥为研究背景,建立了结构仿真计算分析模型,探讨了滑道荷载形式对顶推施工过程中临时墩受力的影响规律;郝晋新<sup>[5]</sup>依托淮南孔李淮河大桥,对顶推施工过程中临时墩和墩旁托架的受力特性进行了分析,并对该背景桥梁临时墩的布置进行了优化设计,取得了良好的结果;黄绍结等<sup>[6]</sup>对比分析了不同形式的滑道压力荷

载对临时墩的受力影响规律,并对临时墩的受力提出了有效的改善措施;张宏武等<sup>[7]</sup>提出利用钢梁抗弯刚度小,自适应变形能力强等优点而不调整临时墩标高的顶推方案,实桥应用结果表明安全可行。

针对索力优化的相关算法研究方面,国内外学者展开了大量研究,但是对于临时墩拉索索力优化的研究较少。陈骁<sup>[8]</sup>通过建立斜拉桥的数值计算模型,将BP神经网络和遗传算法结合应用于斜拉桥的索力优化问题,获得了较好的结果;此外,陈志军等<sup>[9]</sup>、朱敏等<sup>[10]</sup>、张玉平等<sup>[11]</sup>分别采用粒子群算法、多种群遗传算法、MOPSO算法对索力优化问题进行了研究,取得了良好的效果。

顶推施工现有研究成果多偏向于主梁或临时结构的受力规律及对应的改善措施的研究,尚未有针对顶推施工过程中临时墩顶间临时拉索索力优化方面的研究。本文以湖南省内某跨线PC箱梁顶推施工过程中临时墩间拉索索力优化问题为研究对象,基于BP神经网络-遗传算法提出了一种临时墩间拉索索力优化的方法,并结合编程工具Matlab及有限元软件,对背景桥梁临时墩间拉索索力优化进行研究。

收稿日期:2023-09-10(修改稿)

作者简介:邹德玉,男,大学本科,高级工程师.E-mail:253482685@qq.com

## 1 工程概况

湖南省内某跨京广铁路大桥上部结构为预应力混凝土连续箱梁,其跨径布置为(40+50+40)m,总体布置如图1所示。施工期间,为了不影响所在位置铁路运输系统正常运营,铁路上方的70m梁段的预应力混凝土箱梁采用顶推法进行施工,其余梁段采用满堂支架法进行施工。梁段划分节段如图2所示。主梁具体横断面如图3所示。

主梁采用单向单点顶推法,顶推纵坡为0.3%,主墩E4墩顶作为顶推启动位置,于E4左侧设置1<sup>#</sup>~8<sup>#</sup>共计8个临时墩,主墩E3与E4之间设置1个临时墩9<sup>#</sup>,主墩E2与E3之间设置10<sup>#</sup>~12<sup>#</sup>共计2个临时墩,临时墩均采用Q345钢材,并利用临时拉索将相邻墩顶进行连接形成整体。具体临时墩布置示意图如图4、5所示。墩顶水平力的控制为顶推施工过程中的重点,该项目背景可转变为各墩顶间拉索索力的控制。

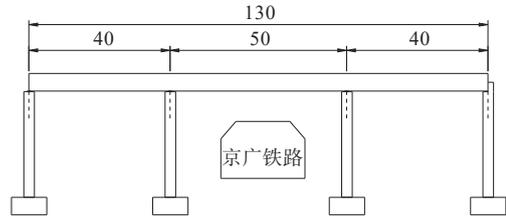


图1 桥梁总体布置图(单位:m)

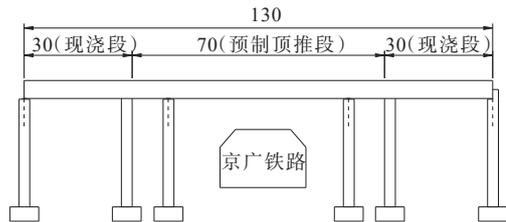


图2 梁段划分图(单位:m)

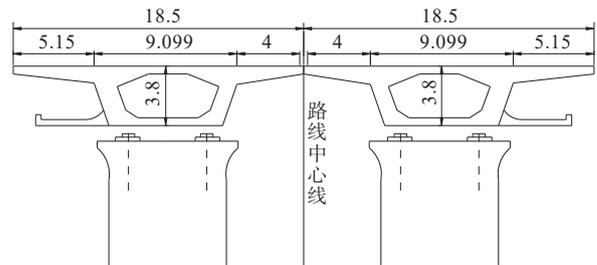


图3 箱梁截面图(单位:m)

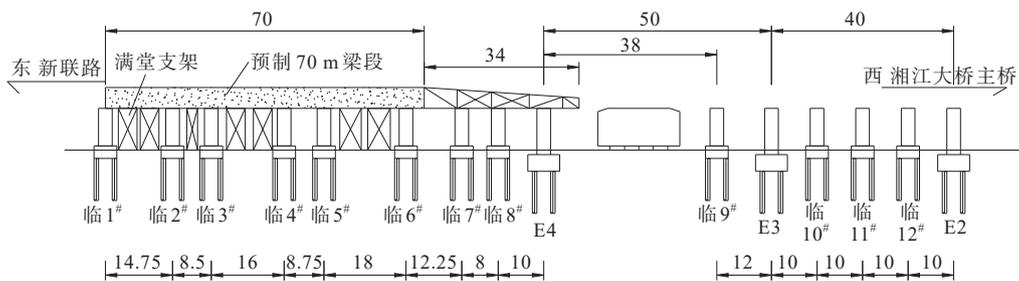


图4 临时墩布置立面示意图(单位:m)

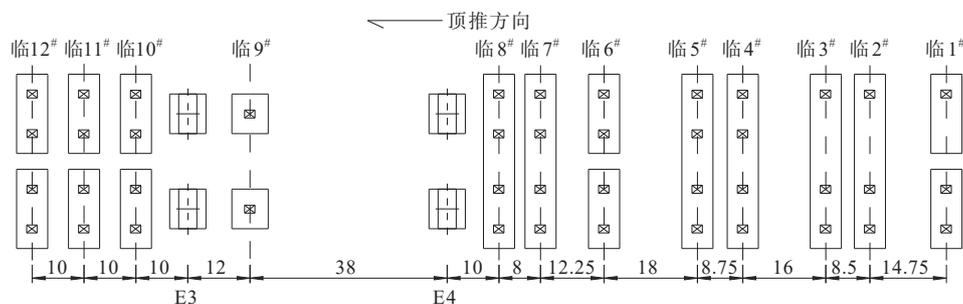


图5 临时墩俯视示意图(单位:m)

## 2 有限元模型的建立

采用有限元软件 Ansys 建立 PC 连续梁桥顶推施

工全过程三维仿真分析模型。其中混凝土箱梁部分采用 Solid 65 实体单元进行模拟;钢导梁中钢管连接部分采用 Beam 3 单元进行模拟,其余钢导梁部分均采用 Shell 63 单元进行模拟;预埋钢筋及预应力钢绞

线均采用 Link 10 单元进行模拟,并与实体单元共节点保证两者共同受力;采用六面体扫掠进行网格划分,钢导梁与顶推主梁连接处采用约束方程将主梁实体单元与钢导梁壳单元共同节点进行自由度耦合处理。利用单元生死法来模拟顶推施工全过程,并在有支撑位置施加竖向和横向约束,最后一个墩施加水平约束,保证结构保持不变体系。具体有限元模型示意图如图 6 所示,边界模拟示意图如图 7 所示。

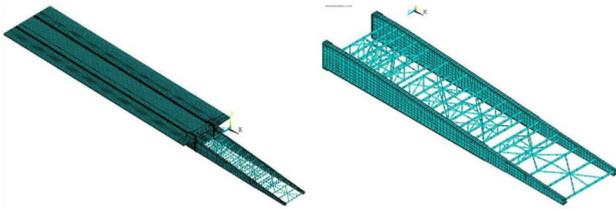


图 6 有限元模型示意图

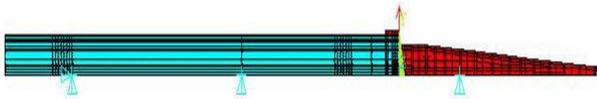


图 7 边界约束示意图

根据上述顶推施工过程中有限元计算分析结果,提取各工况下墩顶支反力,并根据设计所给摩擦系数及坡度求得顶推过程中各工况下水平摩阻力。建立下部结构 1#~9#临时墩、E4 主墩及墩间拉索的仿真计算分析模型进行下部结构受力计算分析,临时墩及主墩采用梁单元进行模拟,墩间拉索采用仅受拉桁架单元进行模拟,并施加各工况下墩顶反力。

### 3 BP神经网络-GA 算法研究

#### 3.1 BP神经网络算法

传统 BP 神经网络由多个具有信息处理能力的神经元组成,该系统具有一定非线性映射关系且具备良好的预测功能<sup>[12]</sup>,可对未经学习的输入向量或数据进行正确的处理,通过学习形成优越的神经网络。利用背景桥梁的一些数值分析结果进行学习,从而获取拉索索力与临时墩墩底应力、墩顶位移的对应关系,网络映射关系健全后便可以将索力向量作为输入向量,将临时墩墩底应力、墩顶位移等作为输出向量,通过神经网络的训练,网络得到从输入向量到输出向量的一个非线性映射,从而求出反问题

的解。BP 神经网络学习算法建立在梯度下降法的思路之上,BP 神经网络映射关系见图 8。

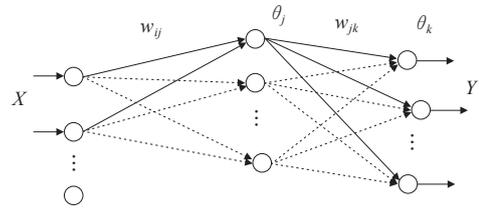


图 8 BP神经网络映射关系示意图

BP 网络中一神经元  $i$  具有  $n$  个输入信号,表示为  $x_j (j = 1, 2, \dots, n)$ ,输入信号与神经元  $i$  之间利用各对应权重  $w_{ji}$  进行联系,神经元  $i$  的综合输入量  $I_i$  可表示如式(1)所示:

$$I_i = \sum_{j=1}^n W_{ji} x_j - \theta_i \quad (1)$$

式中: $\theta_i$ 为神经元  $i$  的阈值,可令  $\theta_i = \tau_{0i}, x_0 = -1$ ,则式(1)可简化为式(2)所示:

$$I_i = \sum_{j=0}^n W_{ji} x_j \quad (2)$$

神经元  $i$  的输出表示为: $y_i = f_i(I_i)$ ,其中  $f_i$  表示传递函数,通常采用 Sigmoid 型函数,其表达式为  $f(I_i) = \frac{1}{1 + e^{-I_i}}$ 。

通过不断调整一系列已知的输入和输出样本对应权重  $w_{ji}$  来实现 BP 神经网络的自主学习,要求样本  $p (p = 1, 2, 3, \dots, P)$  的期望输出  $\{d_p\}$  和神经网络输出  $\{o_p\}$  的差值平方和达到极小,具体表示如式(3)所示:

$$E_p = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (o_{pi} - d_{pi})^2 \rightarrow \min \quad (3)$$

基本三层 BP 神经元中,采用序号 1、序号 2、序号 3 分布表示输入、隐含、输出层<sup>[13]</sup>;并将序号右上标作为层间区分依据,对于样本  $p, i_{pi}^l$  和  $o_{pi}^l$  分别表示第  $l$  层神经元  $i$  所对应的输入和输出,  $n_l$  则表示第  $l$  层神经元总个数。则 BP 神经网络的正向运算如式(4)所示:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{输入层表达式: } o_{pi}^1 = i_{pi}^1 \\ \text{隐层或者输出层: } \begin{cases} i_{pi}^l = \sum_{k=0}^{n_{l-1}} W_{ki}^l o_{pk}^{l-1} \\ o_{pi}^l = f(i_{pi}^l) \end{cases} \quad (l = 2, 3) \end{array} \right. \quad (4)$$

通过对样本  $p$  网络权系数  $w_{ji}$  的不断修正,使得所有样本的误差均满足  $E_p < \epsilon$  (收敛精度)时,训练结

束。权系数修正方式如式(5)所示:

$$\Delta W_{ki}^l(t+1) = \eta \delta_{pi}^l o_{pi}^{l-1} + \alpha \Delta W_{ki}^l(t) \quad (5)$$

式中: $\eta$ 为修正因子,一般取小于1的常数; $\delta_{pi}^l$ 为第 $l$ 层神经元 $i$ 的网络输出与样本期望的差值; $\alpha$ 为惯性系数或动量因子,为小于1的常数。

### 3.2 遗传算法

遗传算法是一种通过模拟生物间传递遗传信息的算法模型,其主要分为3个流程:①杂交。杂交为两个不同染色体间相互交换部分遗传因子的操作,杂交后子代染色体基因不完全与亲代一致,而适者生存、优胜劣汰则会保留那些优于亲代的染色体,保证持续前进寻优;②突变。遗传算法的本质为二进制数串,突变即为二进制数串中有基因发生了0、1的反转;③选择。选择的原理为适者生存、优胜劣汰原则<sup>[8]</sup>,因此遗传算法引入了适应度的概念,适应度越高生存能力越强,而适应度的确定则通过目标优化函数来体现,本文以临时墩最小墩顶水平推力作为目标函数,具体计算方式如式(6)所示:

$$\begin{cases} \min f(x) \\ \text{s.t. } G_i(X) \leq 0, i = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (6)$$

式中: $X$ 表示设计变量组。

则第 $i$ 个染色体的适应度 $F_i$ 可表示为式(7)所示:

$$F_i = \frac{1}{f(X_i) + \sum_{i=1}^n W_i G_i(X_i)} \quad (7)$$

式中: $X_i$ 为第 $i$ 个染色体所对应的设计变量值; $W_i$ 为违反约束条件时对应的大值罚函数。

遗传算法可以将临时墩墩间拉索索力优化问题转化为求解目标函数的极小值问题。其具体步骤为:

(1) 基因编码:利用实数或者二进制将索力优化变量编码形成染色体链。

(2) 生成初始群体:生成由随机产生的 $N$ 个染色体组成的初始群体 $P(0)$ ,则 $P(0)$ 可表示临时拉索索力优化问题中某些可能解的集合。一般初始群体 $P(0)$ 素质很差,难以满足最优解条件。而遗传算法就是利用优胜劣汰的自然规则自 $P(0)$ 出发,挑选出具体优良素质、满足优化解要求的群体和个体。

(3) 评价个体优劣性:按式(6)、(7)计算适应度,并根据评价标准搜寻优秀个体。

(4) 选择:在第 $t$ 代群体 $P(t)$ 中,根据适者生存、优胜劣汰的自然法则,选取 $m$ 个素质优秀的个体作为繁衍后代的亲代,使其继承优秀的基因。

(5) 交叉、突变操作:利用上一步中所保留下来的染色体进行杂交,可能得到更优秀的子代个体,而突变是为突破亲代基因的限制,即为了避免局部最小解并全局寻找最优解。

(6) 生成子代:利用遗传算法中杂交、突变及选择从而生成适应度更大且有别于亲代的优秀子代群体。

(7) 世代繁衍:循环步骤(3)~(6)进行世代繁衍直至获得所需要的最优解。寻优运算终止须同时满足如下两个条件:①群体中不同染色体的个数小于某给定值;②不再产生更优染色体的连续世代数量达到预定值。

### 3.3 BP神经网络-GA算法

BP神经网络虽可通过好的网络学习,对未经学习的向量进行预测,但其仅能形成一定的非线性映射关系并不能自主进行反馈,且易陷入局部最小解或多个局部最小解<sup>[14]</sup>。而遗传算法相较于传统优化算法可更良好地非盲目地搜寻非线性全局最优解<sup>[15]</sup>。本文结合两大算法各自的优点,利用Matlab编制优化程序,联合有限元仿真模型,以 $1^\# \sim 9^\#$ 各临时墩顶间的拉索索力张拉值为优化变量, $1^\# \sim 9^\#$ 各临时墩顶最小水平推力为目标函数,对临时墩拉索索力进行优化分析,流程图见图9,具体步骤如下:

(1) 建立结构计算有限元分析模型,通过正交试验法,生成初始拉索索力向量集<sup>[8]</sup>,利用有限元模型根据初始拉索索力向量集进行计算,得出临时墩最小墩顶水平推力,形成输入样本集与输出样本集。

(2) 利用BP神经网络训练上一步中形成的样本集,建立输入向量索力与输出向量墩顶最小水平推力之间的非线性映射关系。

(3) 利用遗传算法求解目标函数墩顶最小水平推力,根据BP神经网络所建立非线性映射关系计算目标函数近似值,取代有限元分析结果。

(4) 采用遗传算法世代繁衍,优胜劣汰的自然法则进行全局寻优搜索,直至满足运算终止条件。

(5) 将上一步中所得到的目标优化解带入有限元分析模型中进行检验,判断优化结果是否合理。

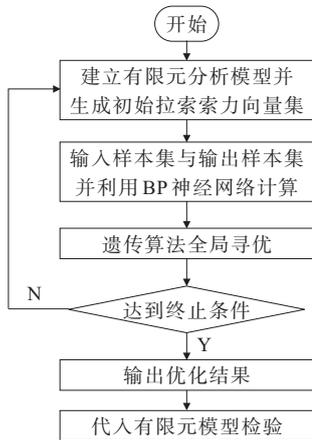


图9 BP神经网络-GA算法的索力优化流程图

#### 4 优化结果对比分析

利用3.3节中优化算法,以 $1^{\#}\sim 9^{\#}$ 各临时墩顶间的拉索索力张拉值为优化变量, $1^{\#}\sim 9^{\#}$ 各临时墩顶最小水平推力为目标函数,对临时墩拉索索力进行优化分析。为便于分析,将各墩间拉索自 $1^{\#}\sim 9^{\#}$ 墩分别编号为 $L_1\sim L_9$ (其中 $8^{\#}\sim 9^{\#}$ 临时墩中间有个E4永久墩)。各临时墩顶间临时拉索索力优化结果如表1所示。

表1 各临时墩顶间临时拉索索力优化结果

拉索 编号	拉索索力/kN		拉索 编号	拉索索力/kN	
	优化前	优化后		优化前	优化后
$L_1$	782.5	814.8	$L_6$	320.1	319.7
$L_2$	595.3	522.8	$L_7$	250.3	273.7
$L_3$	454.2	431.4	$L_8$	177.6	192.2
$L_4$	428.7	469.1	$L_9$	161.4	190.5
$L_5$	398.2	388.1			

为验算BP神经网络-遗传算法优化临时墩间拉索索力的合理性,现将索力优化结果代入结构有限元计算分析模型中进行计算,并对 $1^{\#}\sim 9^{\#}$ 各临时墩及E4永久墩墩底最大应力及各墩墩顶最大水平位移进行优化前后数据的对比分析。

顶推过程中墩顶水平偏位是施工控制重点,偏差过大可能造成滑道出现较大高程偏差,导致顶推过程中主梁拉应力过大而开裂。优化前后 $1^{\#}\sim 9^{\#}$ 临时墩及E4永久墩各墩顶最大水平位移结果如表2所示。根据对比结果分析可知:经优化后各墩顶最大水平位移由4.48 cm减少至3.18 cm,最大降幅达到了35.0%;普遍降幅处于14%~30%之间,证明采用BP神经网络-遗传算法对临时墩间拉索索力优化可明

显减少顶推施工过程中各墩墩顶最大水平位移,有利于结构变形的改善。优化前后各墩顶最大水平位移对比如图10所示。

表2 优化前后各墩顶最大水平位移结果

编号	水平位移/cm		差幅/%
	优化前	优化后	
临 $1^{\#}$	-2.06	-1.76	-14.6
临 $2^{\#}$	-2.32	-1.94	-16.6
临 $3^{\#}$	-3.55	-2.70	-24.0
临 $4^{\#}$	-4.48	-3.18	-29.0
临 $5^{\#}$	-3.79	-2.71	-28.6
临 $6^{\#}$	-4.05	-2.63	-35.0
临 $7^{\#}$	-3.24	-2.20	-32.1
临 $8^{\#}$	-2.45	-1.79	-27.1
E4 $^{\#}$	-2.10	-1.57	-25.1
临 $9^{\#}$	0.38	0.41	8.6

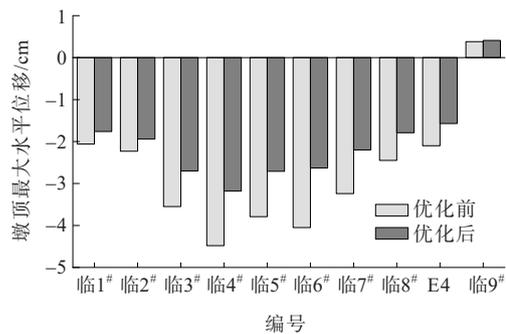


图10 优化前后各墩顶最大水平位移对比

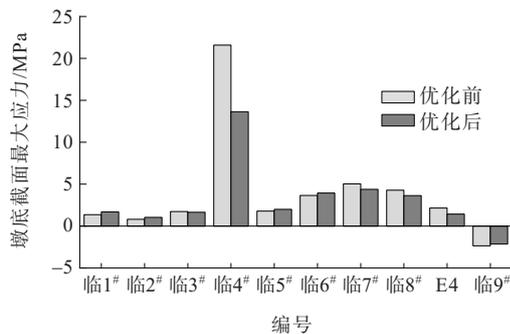
由于顶推施工过程中墩顶临时拉索对各临时墩的串联约束作用,各墩间发生了应力重分布,一定程度上降低了各墩受力不均匀的现象。优化前后 $1^{\#}\sim 9^{\#}$ 临时墩及E4永久墩各墩底最大应力结果如表3及图11所示。由表3及图11可知:优化前后各墩底最大应力均出现在 $4^{\#}$ 临时墩墩底位置,优化后 $4^{\#}$ 临时墩墩底两侧最大应力明显降低,由 $-27.74$  MPa和 $21.58$  MPa减少至 $-19.97$  MPa和 $13.64$  MPa;优化后最大应力降幅达到37%,且各墩间应力分布较优化前更为均匀合理;优化前E4永久墩墩底最大拉应力达到了 $2.15$  MPa,存在极大开裂风险,优化后E4永久墩墩底最大拉应力减小至 $1.43$  MPa,大幅度提高了结构的受力安全性。

#### 5 结论

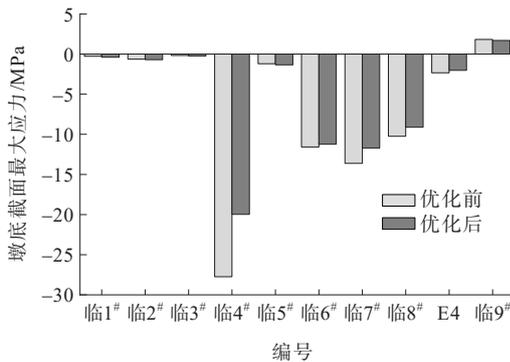
依托湖南省内某跨铁路顶推施工连续箱梁,建立

表3 临时拉索优化前后墩底截面最大应力对比结果

编号	优化前/MPa		优化后/MPa	
	右侧	左侧	右侧	左侧
临1 <sup>#</sup>	-0.28	1.36	-0.39	1.69
临2 <sup>#</sup>	-0.63	0.81	-0.70	1.04
临3 <sup>#</sup>	-0.18	1.74	-0.24	1.65
临4 <sup>#</sup>	-27.74	21.58	-19.97	13.64
临5 <sup>#</sup>	-1.21	1.79	-1.34	2.00
临6 <sup>#</sup>	-11.58	3.65	-11.23	3.94
临7 <sup>#</sup>	-13.62	5.04	-11.71	4.38
临8 <sup>#</sup>	-10.24	4.28	-9.11	3.64
E4	-2.33	2.15	-2.03	1.43
临9 <sup>#</sup>	1.82	-2.35	1.69	-2.14



(a) 左侧



(b) 右侧

图11 优化前后各墩底截面最大应力对比

了结构仿真分析有限元模型,采用BP神经网络-遗传算法对背景桥梁顶推施工过程中临时墩顶临时拉索索力优化进行了研究,具体结论如下:

(1) 基于BP神经网络-遗传算法,结合有限元及Matlab方法对临时拉索索力进行了合理优化,优化对比结果验证了BP神经网络-遗传算法在临时墩墩顶拉索索力优化中的有效性及可行性,可在同类型

优化问题中推广使用。

(2) 拉索索力优化后,各墩顶最大水平位移由4.48 cm减少至3.18 cm,最大降幅达到35.0%,普遍降幅为14%~30%;各墩底最大应力降幅达到37%,且各墩应力分布较优化前更为均匀。证明了索力优化后结构变形更为合理,施工安全保障显著提高。

#### 参考文献:

- [1] 左雁,彭云涌,万小龙.场地受限条件简支钢箱梁不等跨顶推对策及受力分析[J].中外公路,2021,41(6):137-140.
- [2] 孙波,蒋鑫.PC箱梁顶推施工体外预应力加固优化研究[J].公路工程,2020,45(4):152-157.
- [3] 陈双庆,谭光耀.单点顶推施工支撑墩受力分析及优化研究[J].湖南交通科技,2015,41(3):92-95.
- [4] 巫建晖,涂永生,杜嘉骅.连续钢梁顶推过程中临时墩受力分析[J].公路与汽运,2012(4):205-208.
- [5] 郝晋新.大跨度连续钢系杆拱桥顶推施工临时结构优化设计[J].水利与建筑工程学报,2020,18(1):163-168,204.
- [6] 黄绍结,李莘哲,陈耀章.连续钢梁桥顶推过程临时墩受力研究及改善措施[J].公路与汽运,2016(4):198-201.
- [7] 张宏武,柯红军,陈卓异,等.不调整临时墩顶标高的双向纵坡竖曲线梁顶推方案研究及实施[J].中外公路,2023,43(4):118-123.
- [8] 陈骁.基于神经网络和遗传算法结合的斜拉桥索力优化研究和施工控制[D].武汉:武汉理工大学,2013.
- [9] 陈志军,刘洋,杨立飞,等.基于粒子群优化算法的独塔斜拉桥成桥索力优化[J].桥梁建设,2016,46(3):40-44.
- [10] 朱敏,刘荣桂,谢桂华,等.基于多种群遗传算法的大跨度斜拉桥索力优化[J].世界桥梁,2016,44(3):38-42.
- [11] 张玉平,刘雪松,李传习.基于MOPSO算法的斜拉桥索力优化分析[J].土木与环境工程学报(中英文),2020,42(2):107-114.
- [12] 邓红雷,唐崇旺,刘刚,等.基于GA-BP神经网络技术的雷击跳闸实时预警[J].电瓷避雷器,2021(1):38-44,50.
- [13] 郭沛,李玉顺,许达,等.基于遗传算法的钢-竹组合工字形梁截面优化设计[J].建筑结构学报,2020,41(1):149-155.
- [14] 王彪龙,孟凡利,曾超,等.基于自然选择策略的PSO-BP神经网络的滑坡可靠性评价方法[J].中外公路,2019,39(3):1-9.
- [15] 冯阳飞.基于遗传算法的道路平面线形组合设计参数优化[J].中外公路,2020,40(6):1-6.