

基于智能算法的斜拉桥成桥索力优化研究

李文*, 王涛#

西南科技大学土木工程与建筑学院, 四川 绵阳

收稿日期: 2025年8月22日; 录用日期: 2025年10月28日; 发布日期: 2025年11月5日

摘要

以实际公铁两用斜拉桥为研究对象, 建立全桥有限元模型。基于影响矩阵法, 计算各斜拉索索力调整对桥梁关键单元节点位移的定量影响程度。建立2种控制结构变形的目标函数, 选取遗传算法、粒子群优化算法和模拟退火算法3种智能优化算法作为寻优工具, 对比不同组合的索力优化结果。结果表明: 主梁线形优化中, 粒子群算法对最优解的逼近程度以及迭代收敛时间优于遗传算法和模拟退火算法; 仅以主梁平顺为目标函数时, 虽然主梁线形得到改善, 但会导致桥塔产生较为显著的变形; 采用“塔直梁平”作为目标函数, 兼顾了主梁线形优化, 同时桥塔变形得到大幅改善, 索力优化结果更符合实际工程对斜拉桥成桥线的要求。

关键词

斜拉桥, 斜拉索, 影响矩阵法, 索力优化, 智能算法

Research on Cable Force Optimization of Cable-Stayed Bridge at Completion Based on Intelligent Algorithms

Wen Li*, Tao Wang#

School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang Sichuan

Received: August 22, 2025; accepted: October 28, 2025; published: November 5, 2025

Abstract

Taking an actual road-rail cable-stayed bridge as the research object, a finite element model was

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 李文, 王涛. 基于智能算法的斜拉桥成桥索力优化研究[J]. 交通技术, 2025, 14(6): 694-702.

DOI: 10.12677/ojtt.2025.146069

established. Based on the influence matrix method, the quantitative impact of the adjustment of each cable force on the displacement of key unit nodes of the bridge was calculated. Two types of objective functions for controlling structural deformation were established, and three intelligent optimization algorithms, namely genetic algorithm, particle swarm optimization algorithm, and simulated annealing algorithm, were selected as optimization tools to compare the optimization results of different combinations of cable forces. The results show that in the optimization of the main beam profile, the particle swarm optimization algorithm has better approximation to the optimal solution and faster iterative convergence time than the genetic algorithm and simulated annealing algorithm. When only the smoothness of the main beam is used as the objective function, although the profile of the main beam is improved, it will cause significant deformation of the bridge tower. Using "straight tower and flat beam" as the objective function not only optimizes the profile of the main beam but also significantly improves the deformation of the bridge tower, and the cable force optimization results are more in line with the requirements of the actual engineering for the final profile of the cable-stayed bridge.

Keywords

Cable-Stayed Bridge, Cables, Influence Matrix Method, Cable Force Optimization, Intelligent Algorithm

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

传统斜拉桥索力优化方法通常依赖于工程师经验,需通过反复调整索力进行迭代计算,存在效率低、主观性强等问题,因此,基于影响矩阵的智能优化算法在斜拉桥索力优化中的应用取得了显著进展[1]。粒子群优化算法,因计算速度快、易于实现的特点,在索力优化中应用广泛[2]-[4],而遗传算法以强大的全局搜索能力和鲁棒性,在解决复杂的索力优化的多目标优化问题上展现出了独特的优势[5][6]。

针对斜拉桥索力优化问题,本文提出以实际工程需求中斜拉桥“塔直梁平”为目标函数进行分析。塔直梁平这一指标要求塔柱和主梁的受力状态均匀合理,是实现桥梁结构整体稳定性的关键。基于该目标函数,讨论了粒子群算法、遗传算法、模拟退火算法的索力优化效果,为斜拉桥设计与施工提供了技术支持。

2. 影响矩阵理论

影响矩阵理论是斜拉桥成桥索力优化中的核心计算工具,本质是通过线性代数方法,建立索力调整量与结构响应(位移、内力)之间的定量关系。设结构共有 n 根可调索,需关注 m 个目标响应,则数学表达式为:

$$\Delta D = A \cdot \Delta X \quad (1)$$

式中: $\Delta D \in R^m$ 为受调向量,表示结构响应变化量; $\Delta X \in R^n$ 为施调向量,索力调整量向量; $A \in R^{m \times n}$ 为影响矩阵,即第 m 根拉索单索力变化对第 n 个响应的贡献。

由式(1)可知,影响矩阵 A 决定了受调向量 ΔD 和施调向量 ΔX 之间的关系,因此取得影响矩阵是求解最优成桥索力的关键。借助 ANSYS 可以建立有限元模型,对其施加静态荷载后可得到位移、内力等多

种结构响应, 即 $A_{i,j}, i=0,1,2,\dots,n$, 表示单根拉索索力的单位变化量; $j=1,2,\dots,m$, 表示对应变化下的结构响应, 例如位移、弯矩等。将关心的目标响应按矩阵方式排列, 便可得到影响矩阵 A 。

3. 目标函数

以实际桥梁工程设计要求, 本文以塔直梁平为目标函数, 实现桥塔在恒载作用下保持垂直, 减少塔顶水平位移以及主梁在荷载作用下保持水平, 减小挠度和局部应力集中。

对于离散的有限元模型, 桥塔和主梁的位移可以表示为

$$S = \alpha \sum_{j=1}^a M_j^2 + \beta \sum_{k=1}^b D_k^2 \quad (2)$$

式中: S 表示桥塔和主梁位移的列向量, a 、 b 分别表示桥塔和主梁的关键点数量; M_j 、 D_k 分别表示桥塔和主梁的关键点位移; α 、 β 为权重系数, 给予桥塔和主梁位移完全同等的重视程度, 由于其量纲相同, 故取 $\alpha/\beta=1$ 。索力对节点位移的影响为:

$$\begin{aligned} M &= B_1 T + M_0 \\ D &= B_2 T + D_0 \end{aligned} \quad (3)$$

其中 B_1 、 B_2 为影响矩阵, M_0 、 D_0 为其他荷载引起的响应, 因此有:

$$S = T^T Q T + C^T T \quad (4)$$

借由影响矩阵, 最优索力的求解可以看作目标函数式(4)的最小值问题。

4. 索力优化方法

本文采用了粒子群算法、遗传算法、模拟退火算法这三种智能算法基于影响矩阵对斜拉桥索力进行调索, 计算原理如下:

步骤 1: 建立斜拉桥有限元分析模型。在前处理模块中初始化设计变量, 以此建立参数化有限元分析模型。

步骤 2: 对模型施加静力荷载并求解, 取得关心节点初始位移向量 d_0 。

步骤 3: 对第 i 根拉索的索力增加 1kN, 其余拉索保持初始索力。进行静力计算并取得调整索力后的关心节点位移向量 d_i 。

步骤 4: 计算第 i 次调整索力时关心节点的位移变化向量 $\Delta d = d_i - d_0$ 。按索力调整顺序将列向量 Δd 组合, 得到关心节点位移影响矩阵。

步骤 5: 以“塔直梁平”为目标构造函数, 使用 MATLAB 智能算法工具箱计算不同算法下的目标极值并取得最优索力向量。

步骤 6: 通过多项式拟合进行索力调匀, 将最优索力带入有限元模型验证优化结果。

5. 算例验证

如图 1 所示, 以某公铁两用斜拉桥为例。该桥主桥为双塔双层斜拉桥, 全长 1188 m, 上层两侧各有四条车道, 下层为双线 I 级铁路。边跨设置辅助墩。主塔采用 H 型混凝土结构, 内设两道横梁, 由下塔柱、下横梁、中塔柱、上塔柱、上横梁等部分组成, 高 222 m。主梁采用代斜副桁的直桁截面, N 形桁式, 主桁上下桁杆均为箱型截面, 高 13.5 m, 宽 35.6 m。

在 ANSYS 中, 使用 LINK8 三维杆单元模拟斜拉索, 桥塔和主梁使用 BEAM4 三维梁单元, 建立全桥模型。桥塔两侧各 17 对拉索沿 X 轴分布, 从左往右 1#~68#拉索。

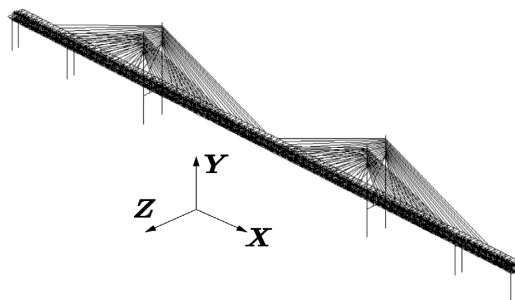


Figure 1. Three-dimensional finite element model of cable-stayed bridge
图 1. 斜拉桥三维有限元模型

斜拉桥全桥有限元模型建模位置为斜拉桥索力优化理想状态。基于初始索力, 可得自重作用下斜拉桥主梁关心节点的 Y 方向位移向量以及桥塔关心节点的 X 方向位移向量:

$$Y = [y_1, y_2, \dots, y_{68}] \quad (5)$$

$$X = [x_1, x_2, \dots, x_{36}] \quad (6)$$

为方便计算, 将式(7)和(8)合并为同一向量即:

$$Y_0 = [Y \ X] \quad (7)$$

由式(9)可建立以斜拉索索力为变量的目标函数即:

$$Y_T = Y_0 + C^T T \quad (8)$$

式中: C^T 为各个斜拉索索力变化对主梁关心节点竖向位移以及桥塔关心节点横向位移的影响矩阵, T 为调索量。

建立目标函数通过寻找一组调索向量 T 使向量 Y_T 的范数 $\|Y_T\|$ 取得最小值, 可得到各个关心节点的最小位移, 达到理想的优化结果。

粒子群算法是一种基于群体智能的全局优化算法, 灵感来源于鸟群或鱼群的群体行为[2]-[4] [7]。粒子群算法执行过程如图 2 所示。

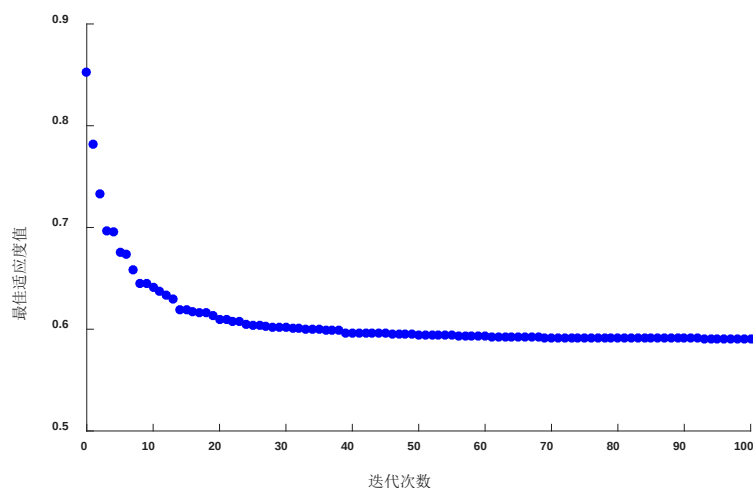


Figure 2. Particle swarm optimization foraging iteration
图 2. 粒子群算法觅食迭代

由图 2 可知, 粒子群大小为 200 时, 迭代约 100 次后得到目标函数最优值, 耗时约 3 s。在迭代初期 (0 到 20 次左右), 粒子在解空间中广泛探索, 快速找到更优的解区域, 最佳适应度值下降较快, 在迭代次数达到 60 次左右后, 最佳适应度值趋于稳定, 收敛过程基本完成。

遗传算法是模拟达尔文生物进化论自然选择和遗传学机理的生物进化过程计算模型[5][6]。遗传算法执行过程如图 3 所示。

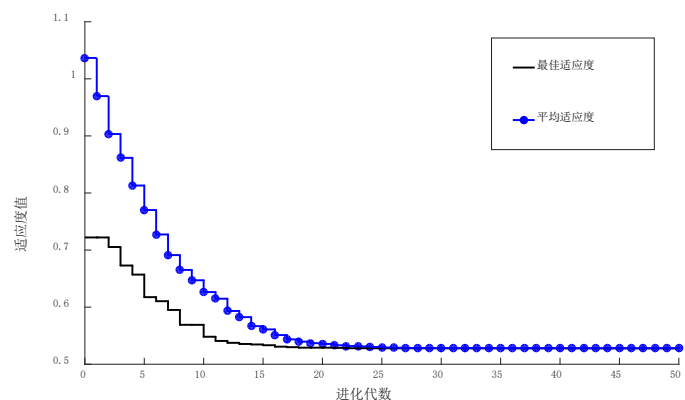


Figure 3. Evolutionary iteration of genetic algorithm
图 3. 遗传算法进化迭代

由图 3 可知, 种群数设置为 100 时, 0~10 代左右, 最佳适应度和平均适应度都处于较高水平且下降较快, 10~30 代左右, 两条曲线的下降速度逐渐减缓, 种群的适应度提升速度变慢, 30 代以后, 适应度变化趋于平稳, 最终收敛到目标函数最优值, 耗时约 5 s。

模拟退火算法是一种模拟物理退火的过程而设计的随机优化算法[8]。模拟退火算法执行过程如图 4 所示。

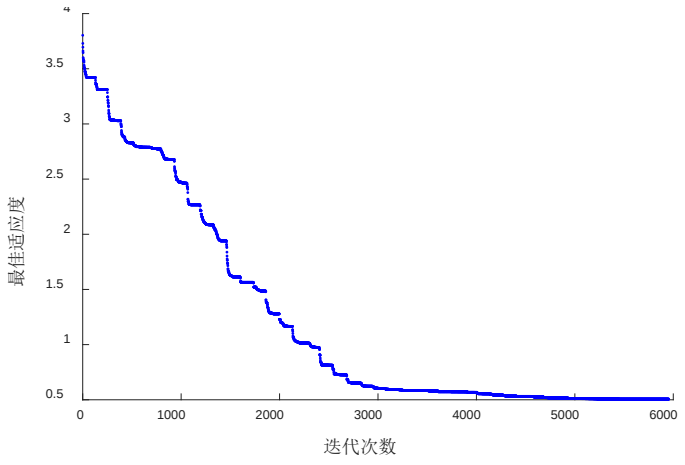


Figure 4. Iterative process of simulated annealing algorithm
图 4. 模拟退火算法迭代过程

由图 4 可知, 0 到 5000 次左右最佳适应度下降得比较快, 之后下降速度逐渐变缓, 趋于稳定。耗时约 120 s, 基本达到收敛。

在模拟退火高温阶段, 算法接受较差解的概率较高, 需要较多的迭代来探索解空间, 随着温度的降低, 接受较差解的概率逐渐减小, 需要少量迭代来精细搜索局部区域。这个逐步降温的过程通常包含多个温度阶段, 每个阶段都需要一定的时间, 使得整个算法的运行时间较长。

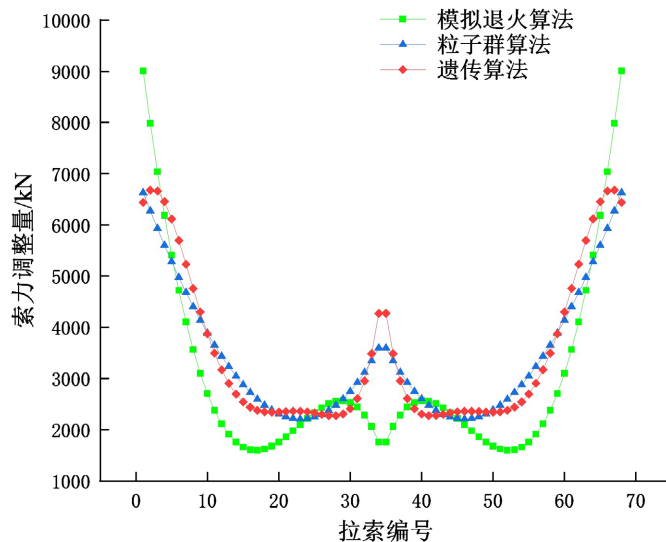


Figure 5. Cable adjustment of stay cables under different algorithms
图 5. 不同算法下的斜拉索调索量

由图 5 可知, 在大多数拉索上, 模拟退火算法的索力调整量相对较低, 表现出较好的优化效果。在部分拉索上, 粒子群算法的索力调整量较低, 表现出良好的优化能力, 但在其他拉索上, 索力调整量较高, 表明某些情况下可能陷入局部最优解。在多个拉索上, 遗传算法的索力调整量处于中等水平, 表现出一定的优化能力, 但在某些拉索上索力调整量较高。

通过 3 种智能算法调索, 斜拉桥主梁位移情况如图 6。

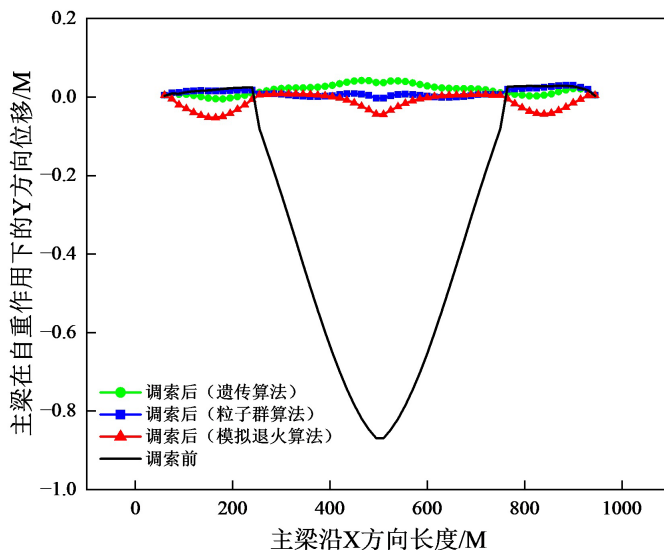


Figure 6. Main girder displacement
图 6. 主梁位移

由图 6 可知, 调索前在 X 方向 0 到 200 m 左右, 位移变化相对较小, 从 200 m 到 800 m 左右, 位移逐渐向下增加, 在 400 m 到 600 m 之间达到最大下挠位移, 约-0.8 m 左右。通过遗传算法调索后整体位移变化相对平稳, 位移绝对值较调索前明显减小。在中间区域(400 m~600 m)的下挠位移约为-0.04 m 左右, 相比调索前的-0.8 m 有较大改善, 且曲线波动幅度较小, 趋于平缓。粒子群算法调索与遗传算法类似, 但整体线形更加稳定。通过模拟退火算法调索后的位移曲线在中间区域下垂位移约为-0.05 m 左右, 波动幅度比遗传算法稍大。

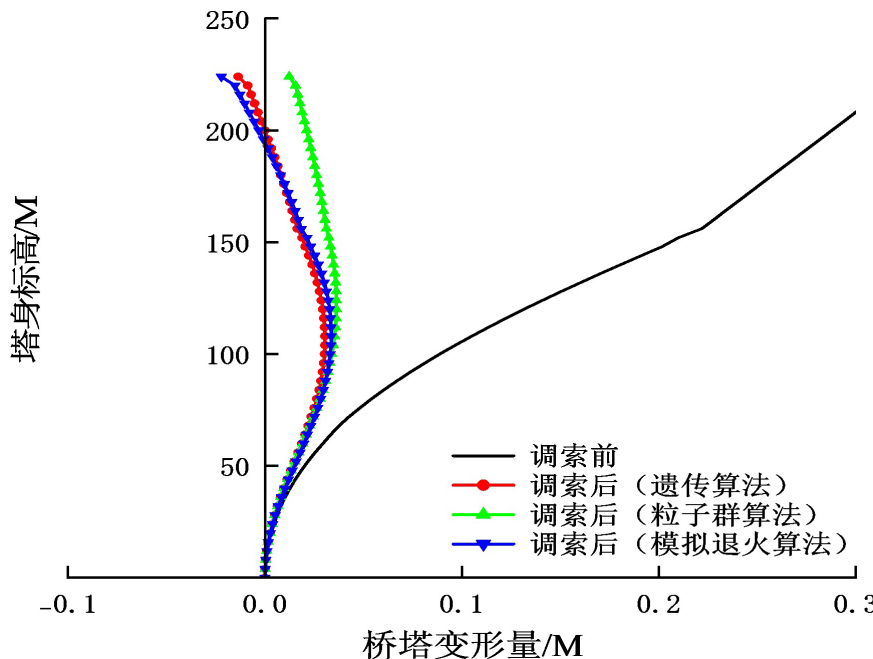


Figure 7. Bridge tower displacement
图 7. 桥塔位移

斜拉桥桥塔位移情况如图 7 所示。通过索力调匀处理, 左右桥塔位移呈对称情况, 图 7 以左桥塔为例。

调索前桥塔出现大幅侧向变形, 越靠近塔顶变形程度越大。通过遗传算法调索后, 桥塔的位移曲线与调索前相比, 整体位移幅度明显减小, 说明该算法对桥塔位移的控制效果显著, 有效减小了侧向变形。模拟退火算法调索结果与遗传算法相似, 位移基本在 0 附近小幅波动, 优化效果较好。通过粒子群算法调索后的位移曲线同样呈现出位移减小的趋势, 在桥塔中下部位移接近 0 且波动极小, 该算法使桥塔的侧向变形得到有效抑制。

5.1. 主梁平顺与塔直梁平

桥塔变形会导致根部的混凝土或钢结构产生附加应力, 加速材料疲劳。因此“塔直”约束可以减少桥塔的弯矩分布, 降低关键截面的应力幅值, 从而提高桥塔的耐久性和抗疲劳性能。

图 8 以遗传算法为代表展示了主梁线形在两种目标函数优化下变形情况。
该图显示, 相对于调索前, 两种优化方法都对主梁线形产生大幅改善, 且主梁位移都在 0 m 附近波动, 优化结果较为接近。

图 9 同图 8 采用相同调索方式展示了桥塔线形的变形情况。

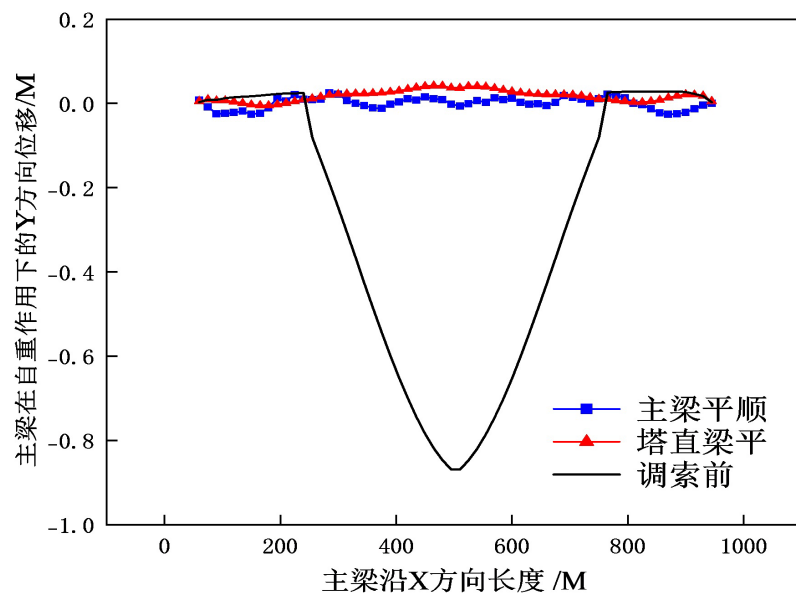


Figure 8. Alignment comparison of main girder

图 8. 主梁线形对比

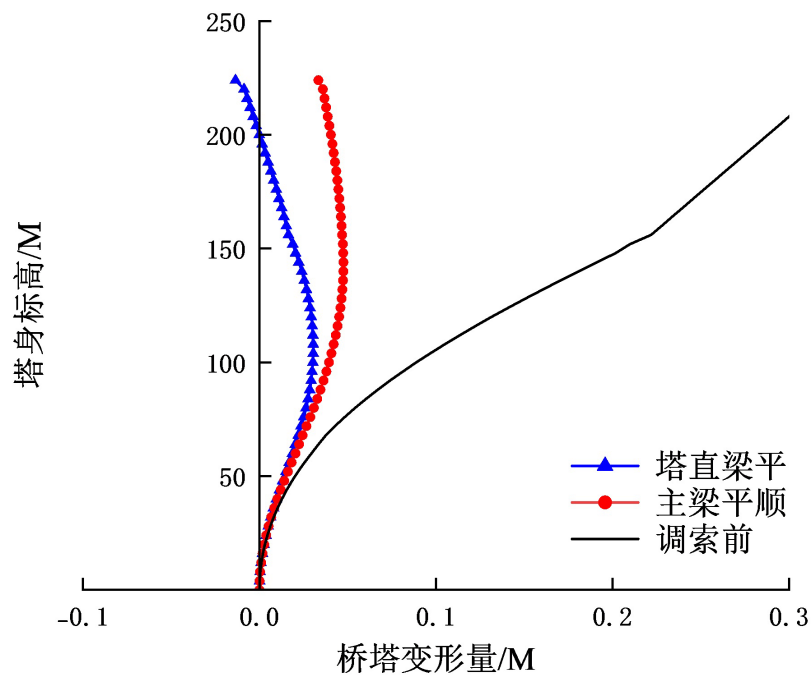


Figure 9. Comparison of bridge tower alignment

图 9. 桥塔线形对比

由图 9 可知, 以“塔直梁平”为目标函数进行调索后, 桥塔线形弯曲幅度最小, 位移波动更为接近 0 m。

综上, 两种目标函数都在不同程度上满足索力优化的需求。在优化主梁部分的表现上, 两者无明显差距; 关于自重作用下的线形问题, 相对于单一控制平顺性, 同时兼顾减小桥塔的变形, 可以保证塔、梁、索的受力均衡, 避免局部优化导致其他结构部分受力恶化。

6. 结论

(1) 相对传统人工调索方法, 智能算法的应用大幅简化了反复迭代工作, 使索力优化过程更加精确、简单和高效。

(2) 智能算法间存在各自的工作原理, 故在不同的搜索环境中往往呈现出不同的效果。遗传算法全局搜索能力强, 可以高效处理大规模变量空间, 但在接近最优解时局部精细搜索能力不足; 大跨度斜拉桥拉索索力的高维且连续性天然适用粒子群算法的速度-位置更新机制, 并且局部搜索和全局探索中相对平衡; 模拟退火算法通过缓慢降温逐步收敛, 高温大量接受劣解, 适用于复杂的非线性问题。

(3) 相对以主梁平顺性为目标函数, “塔直梁平”更加符合实际工程需要, 更全面地平衡斜拉桥各关键部件的受力状态。

参考文献

- [1] 刘益铭, 刘大洋, 刘山洪. 基于 MATLAB 联合 ANSYS 的斜拉桥恒载索力优化[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2013, 32(6): 1111-1114+1194.
- [2] 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.
- [3] 占玉林, 侯之瑶, 邵俊虎, 等. 基于响应面法及粒子群算法的异形斜拉桥索力优化[J]. 桥梁建设, 2022, 52(3): 16-23.
- [4] 尹训强, 王桂萱, 薛志强. 基于新型强次可行 SQP 法的斜拉桥合理成桥索力优化研究[J]. 世界桥梁, 2016, 44(5): 33-37.
- [5] 马广. 基于混合遗传算法的四线钢桁斜拉桥索力优化研究[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(S1): 85-89.
- [6] 王涛, 胡宇鹏, 张兴标, 等. 基于遗传算法的斜拉桥成桥索力优化应用研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2023, 42(6): 9-17+23.
- [7] 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.
- [8] 郁磊, 史峰, 王辉, 等. MATLAB 智能算法 30 个案例分析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2019.