

DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2024.03.021

引用格式:潘顺兴.基于 MOPSO 算法的大跨度钢管混凝土拱桥索力优化[J].公路与汽运,2024,40(3):100-103.

Citation: PAN Shunxing. Optimization of cable force of long-span concrete-filled steel tube arch bridge based on MOPSO[J]. Highways & Automotive Applications, 2024, 40(3): 100-103.

基于 MOPSO 算法的大跨度钢管混凝土拱桥索力优化

潘顺兴

(贵州黔程弘景工程咨询有限责任公司, 贵州 贵阳 550000)

摘要:以某大跨度钢管混凝土拱桥为研究对象,基于非线性动态惯性权重的多目标粒子群优化算法(Multi-objective Particle Swarm Optimization, MOPSO),提出考虑主拱圈截面刚度及线形控制的钢管混凝土拱桥施工阶段扣索索力优化方法,并与多目标遗传算法优化结果进行对比,分析该方法的可行性。结果表明,基于非线性动态惯性权重的多目标粒子群算法对两种目标函数控制下索力优化具有更好的收敛性;优化后目标方案的索力在满足安全系数的前提下得到一定增加,优化后线形偏差绝对值仅为 5.36 mm,优化后结构在线弹性阶段的稳定性得到小幅度提升,文中索力优化方法可行。

关键词:桥梁;钢管混凝土拱桥;索力优化;多目标粒子群算法

中图分类号:U441.5

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2024)03-0100-04

大跨度钢管混凝土拱桥以其出色的跨越能力和优美的外观造型被广泛应用于高山峡谷等复杂地形的桥梁建设中。下承式多节段混凝土拱桥大多采用斜拉扣挂法施工,施工过程中扣索张拉力的控制会显著影响桥梁整体内力分布和主拱圈线形偏差^[1]。为使拱桥主拱圈线形逼近设计线形,强化结构刚度,学者们针对大跨度拱桥施工过程中索力优化展开了研究。段君邦等以某大跨度钢管混凝土拱桥为背景,基于改进灰狼算法和支持向量机提出拱桥索力组合优化模型,以钢管混凝土拱桥各节段线形偏差为目标函数对扣索张拉力进行寻优求解,得到了期望线形下最优索力组合^[2]。付慧建等基于 Kriging 模型和改进海鸥优化算法研究大跨度钢筋混凝土拱桥索力求解方法,采用该方法求解的索力有效降低了主拱圈截面弯矩和轴力,改善了成桥线形^[3]。于孟生等针对某钢管混凝土吊杆拱桥的吊杆索力优化,提出基于改进影响矩阵的合理成桥索力计算方法,调整后索力组合更适应吊杆钢管混凝土拱桥的实际施工过程^[4]。廖宇芳等建立基于改进蝗虫优化算法(IGOA)和极限学习机(ELM)的线形预测方法,实现了大跨度钢管混凝土拱桥斜拉扣挂索力优化^[5]。曹检云等采用多目标粒子群算法对大跨度悬浇钢筋混凝土拱桥施工阶段的扣索索力优化展开寻优分析,得到的优化索力显著降低了拱圈顶底板应力,实现了对主拱

圈的挠度控制^[6]。周倩等提出基于扣索一次张拉和 ANSYS 零阶优化的索力优化改进算法,并将其应用于大跨度钢管混凝土拱桥索力优化,大幅度降低了有限元的迭代次数,提高了优化效率,满足松索后成拱线形设计要求^[7]。李华等基于线性规划理论建立某悬臂浇筑拱桥 ANSYS 有限元模型,联合 MATLAB 对扣索索力进行了修正^[8]。目前对钢管混凝土拱桥索力优化的分析多集中于单目标函数下优化效率提升,为考虑多种目标函数控制,本文以某大跨度钢管混凝土拱桥为工程背景,基于多目标粒子群优化算法(Multi-objective Particle Swarm Optimization, MOPSO)研究考虑主拱圈截面刚度和线形控制的索力优化,为钢管混凝土拱桥多目标控制下索力优化提供参考。

1 工程概况及有限元模型

某大跨度上承式钢管混凝土拱桥的计算跨径为 410 m,拱轴系数为 1.54,矢高为 88 m,矢跨比为 1/4.659。桥面系采用跨径 15×29 m 的钢-混叠合梁,主拱圈采用等宽变高度空间桁架结构。钢管拱肋对接接头采用内法兰盘栓接、管外焊接的形式,管内灌注 C60 自密实微膨胀混凝土。两岸扣索呈对称布置,单侧共 14 根扣索,其中临时扣索 9 根、永久扣索 5 根,均采用高强度钢绞线(见图 1)。

$$\begin{aligned}
 &\text{Find } \mathbf{X} \\
 &\min\{U, -F'\} \\
 &\text{s.t.} \begin{cases} \gamma N_t \leq \varphi_l \varphi_c K_p K_d f_{sc} A_{sc} \\ x \leq \frac{m N_p}{k} \\ u \leq u_i - \bar{u}_i \leq \bar{u} \end{cases} \quad (8)
 \end{aligned}$$

2.2 多目标粒子群算法的索力求解

对于多个目标函数的优化问题,多目标粒子群算法可以快速搜索至决策域的帕累托前沿,完成考虑多个优化目标的寻优。粒子群算法的基本原理是通过无质量的粒子模拟鸟群觅食过程,每个粒子均具有自己的速度和位置属性。假设 D 维的搜索域中含有 N 个粒子,第 i 个粒子的位置和速度如下:

$$\begin{aligned}
 X_{id} &= (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD}) \\
 V_{id} &= (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD}) \quad (9)
 \end{aligned}$$

式中: X_{id} 为第 i 个粒子在第 d 维的位置; V_{id} 为第 i 个粒子在第 d 维的速度。

粒子群根据自身速度在每轮迭代中不断更新自己在搜索域中的位置。为驱使粒子群朝向适应度值更高的区域移动,定义粒子群个体最优位置为 P_{bestid} 、群体最优位置为 G_{bestid} ,则单个粒子的速度更新公式为:

$$\begin{aligned}
 v_{id}^{t+1} &= \omega v_{id}^t + c_1 r_1 (P_{bestid}^t - x_{id}^t) + \\
 &c_2 r_2 (G_{bestid}^t - x_{id}^t) \quad (10)
 \end{aligned}$$

式中: t 为当前迭代轮次; ω 为粒子的惯性权重,用于调节粒子群的寻优策略, ω 较大时粒子群倾向于全局开发, ω 较小时粒子群倾向于局部搜索; c_1 、 c_2 为学习因子; r_1 、 r_2 为 $(0, 1)$ 上的随机数。

为加快粒子群向帕累托前沿收敛,采用非线性动态惯性权重平衡粒子群的全局开发与局部搜索过程。非线性动态惯性权重为:

$$\omega = \omega_{\max} - (\omega_{\max} - \omega_{\min}) \frac{t}{t_{\max}} \quad (11)$$

式中: ω_{\max} 、 ω_{\min} 分别为惯性权重的最大和最小值; t_{\max} 为种群最大迭代次数。

多目标粒子群算法实施流程(见图 3): 1) 初始化多目标粒子群算法参数,设置种群规模、最大迭代次数等参数值; 2) 计算粒子群适应度并赋值,根据帕累托支配原则计算非劣解和局部最优个体 P_{best} ; 3) 计算非劣解集密度信息,在非劣解中选择全局最优 G_{best} ; 4) 判断粒子群是否满足收敛条件,若满足则输出全局最优 G_{best} ,若不满足则更新粒子速度和位置,重新计算粒子群适应度并更新非劣解集。

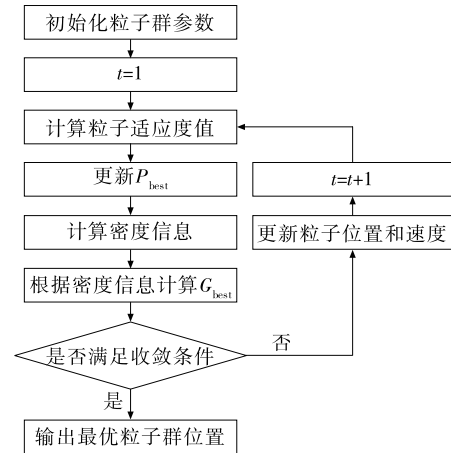


图 3 多目标粒子群算法实施流程

3 优化结果分析

引入标准的多目标遗传算法(NSGA-II)与多目标粒子群算法(MOPSO)分别对上述索力优化模型进行求解。NSGA-II 算法的种群规模为 40 个,变异系数为 0.01,交叉率为 0.3;MOPSO 算法的种群规模为 40 个,最大惯性权重 ω_{\max} 为 0.9,最小惯性权重 ω_{\min} 为 0.4,学习因子 $c_1 = c_2 = 2$,最大迭代次数为 500 次。2 种算法计算所得帕累托最优前沿见图 4。从图 4 可以看出:相较于 NSGA-II 算法,MOPSO 算法在索力优化问题上具有一定优势,其第 1 000 代种群的帕累托前沿的收敛精度比 NSGA-II 算法高,采用 MOPSO 算法得到的索力优化方案对目标函数具有更高的适应性。

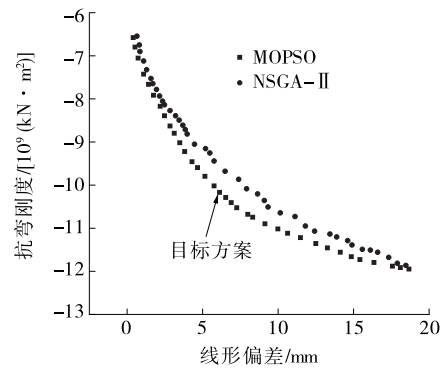


图 4 NSGA-II 和 MOPSO 的 1 000 代帕累托前沿

为兼顾主拱圈抗弯刚度和线形偏差,取图 4 中目标方案进行分析,优化前后扣索力组合见图 5。从图 5 可以看出:相较于原设计方案,优化后索力组合在保证索力安全富余的前提下不同程度地提高了张拉控制力,其中 1# 扣索增幅最大(23%),14# 扣索增幅最小(4%),平均索力增幅约为 11.36%。

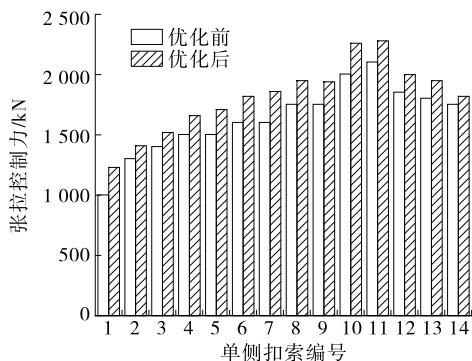


图 5 优化前后扣索张拉控制力对比

图 6 为各扣索连接的标高控制点线形偏差计算结果。从图 6 可以看出:优化后各标高控制点的线形偏差均在 8 mm 以下,且随着与拱顶距离的减小,控制点的线形偏差减小,拱脚处线形偏差最大(7.71 mm),拱顶处线形偏差最小(3.39 mm),各控制点平均线形偏差约为 5.36 mm,远低于优化前线形偏差绝对值。

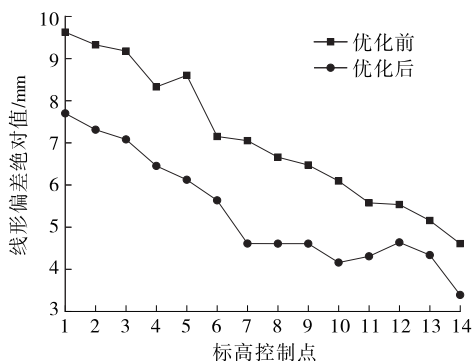


图 6 优化前后线形偏差对比

建立有限元模型分别对桥梁在设计方案及目标方案下线弹性稳定性进行分析,优化前后一阶失稳模态特征值见表 1。从表 1 可以看出:相对于优化前设计方案,优化后目标方案的线弹性特征值小幅度增大,桥梁结构在线弹性阶段的稳定性得到一定提高。

表 1 优化前后一阶失稳模态特征值对比

索力方案	一阶失稳模态特征值
设计方案	5.657
目标方案	6.154

4 结论

以某大跨度钢管混凝土拱桥为研究对象,考虑主拱圈抗弯刚度及线形偏差控制,采用多目标粒子

群算法进行扣索索力优化,结论如下:

(1) 大跨度钢管混凝土拱桥施工阶段的扣索索力影响成桥状态下内力分布,采用进化算法可以对考虑多种因素的扣索索力优化方案进行有效寻优,相较于多目标遗传算法,基于非线性动态惯性权重的多目标粒子群算法对截面刚度及线形偏差控制下索力优化问题的收敛效率更高,得到的索力优化方案更优。

(2) 基于目标方案求解的索力组合提高了不同扣索的张拉控制力,平均索力增幅约为 11.36%,各扣索索力均在约束条件的安全富余度内;优化后目标方案各标高控制点的线形偏差均在 8 mm 以内,越接近拱顶处线形偏差越小,各控制点的平均线形偏差约为 5.36 mm,有利于主拱圈的合龙施工。

(3) 索力优化后一阶失稳模态特征值比优化前小幅度提升,结构整体刚度得到一定增强。

参考文献:

- [1] 周银,王玥,周建庭,等.500 m 级钢管拱桥成拱计算与控制方法[J].中国公路学报,2022,35(5):60-72.
- [2] 段君邦,王华,郝天之,等.基于改进灰狼算法和支持向量机的拱桥索力优化模型[J].计算机工程与设计,2023,44(2):457-465.
- [3] 付慧建,邓超骞,孙傲,等.基于 Kriging-ISOA 的大跨度 RC 拱桥施工阶段扣索索力优化研究[J].公路工程,2023,48(3):18-25.
- [4] 于孟生,姚鑫玉,郑皆连,等.大跨度钢管混凝土拱桥吊杆索力优化实用方法[J].桂林理工大学学报,2023,43(1):78-82.
- [5] 廖宇芳,刘斌,于孟生,等.基于 IGOA-ELM 的拱桥多节段吊装扣挂施工线形预测方法[J].公路交通科技,2022,39(11):95-105.
- [6] 曹检云,刘国坤,孙剑峰.大跨度悬臂浇筑钢筋混凝土拱桥多目标索力优化研究[J].公路工程,2022,47(3):30-34+56.
- [7] 周倩,周建庭,马虎,等.钢管拱肋分段吊装扣索一次张拉索力改进算法[J].交通运输工程学报,2020,20(1):92-101.
- [8] 李华,王祺顺,周关艺.特大跨径钢筋砼拱桥施工临时扣索索力调整研究[J].公路与汽运,2022(2):97-100+104.
- [9] 涂兵,刘来辉,邓年春,等.基于遗传算法的大跨钢管混凝土桁式拱肋多目标优化[J].公路交通科技,2021,38(12):56-63+72.

收稿日期:2023-03-06