

基于遗传算法的矮塔斜拉桥成桥索力优化

张文彬

(广东冠粤路桥有限公司, 广东 广州 511400)

摘要: 合理成桥状态下的索力对于斜拉桥尤为重要。为高效得到矮塔斜拉桥合理成桥状态, 对矮塔斜拉桥成桥索力进行优化, 提出了一种基于遗传算法和影响矩阵的索力优化方法。将成桥十年恒载作用下主梁和索塔总的弯曲应变能最小设为优化目标, 以某矮塔斜拉桥为工程背景, 通过 Midas 建立有限元模型进行计算分析。研究结果表明, 相较于传统优化方法, 遗传算法优化效果较好, 成桥十年恒载作用下, 主梁内力分布均匀, 主梁在中墩和跨中位置, 负弯矩显著减小, 索塔塔底弯矩明显降低, 在短期荷载组合作用下, 主梁顶底板压应力储备充足, 其应力值接近, 全桥满足合理成桥状态要求。

关键词: 矮塔斜拉桥; 遗传算法; 成桥索力; 合理成桥状态; 优化

中图分类号: U448.27

文献标识码: A

Cable Force Optimization of Low-tower Cable-stayed Bridges Based on Genetic Algorithm

ZHANG Wenbin

(Guangdong Guanyue Highway and Bridge Co., Ltd., Guangzhou 511400, Guangdong, China)

Abstract: A reasonable cable force configuration in the completed state is crucial for cable-stayed bridges. To efficiently achieve an optimized completion state for low-tower cable-stayed bridges, a cable force optimization method based on a genetic algorithm (GA) and influence matrix is proposed. The optimization objective is to minimize the total bending strain energy of the main girder and pylon under the ten-year permanent load after bridge completion. A finite element model of a representative low-tower cable-stayed bridge is developed using Midas for numerical analysis. The results show that, compared with traditional optimization methods, the GA-based approach provides improved outcomes. Under ten-year permanent loading, the internal force distribution of the girder is more uniform, negative bending moments at the central pier and mid-span are significantly reduced, and the base moment of the pylon is greatly decreased. Under short-term load combinations, the compressive stress reserves in the upper and lower decks of the main girder are sufficient and closely matched. The overall bridge structure meets the requirements of a reasonable completed state.

Key words: low-tower cable-stayed bridge; genetic algorithm; completion-stage cable force; reasonable completed state; optimization

矮塔斜拉桥是介于连续梁或连续刚构与常规斜拉桥之间的一种结构体系, 斜拉索水平分力主要起着对主梁体外加劲的作用, 拉索竖向分力为主梁提供弹性支撑^[1-2]。矮塔斜拉桥中, 索力控制很关键, 索力变化直接影响桥梁的刚度和内力

分布, 且对主梁和索塔应力也有影响, 因此有必要对矮塔斜拉桥成桥索力进行优化, 以达到更加合理的成桥状态。Hassan M M^[3]开发了集成有限元法、*b*样条曲线和遗传算法, 以实现斜拉索的最小横截面积。Feng Y^[4]等提出了一种将影响矩

收稿日期: 2025-01-12

作者简介: 张文彬, 路桥工程师, 本科, 研究方向为道路与桥梁工程建设工作

阵和遗传算法结合的设计程序，并将程序用于意大利某桥的双塔斜拉桥初步设计，结果表明所提出的程序在应力和位移等约束下，优化斜拉索横截面积取得了很好的效果。孙全胜等^[5] 对非对称斜拉桥结构进行索力优化，以主梁和索塔的弯曲拉压应变能最小为目标，采用影响矩阵法，结果表明影响矩阵法在非对称独塔斜拉桥中效果良好。王占飞等^[6] 提出索力二次优化方法，先以结构最小弯曲应变能为目标，再以结构理想成桥索力为目标，优化后主梁内力和挠度减小，索力更加均匀。金俊杰等^[7] 基于能量法，使用 Matlab 软件遗传算法工具箱，对某斜拉桥索力进行优化，优化效果明显。占玉林等^[8] 在异形斜拉桥索力优化过程中，提出响应面法和粒子群算法相结合进行索力优化，研究结果表明全桥成桥索力，主梁弯矩均匀性提升，主梁受力、线形更加合理。

大量研究结果表明，目前针对索力的优化方法十分丰富，索力优化有不同优化目标，但都是为得到更加合理的成桥状态。本文以某矮塔斜拉桥为研究对象，以主梁和索塔弯曲应变能为目标，结合遗传算法和影响矩阵对索力进行优化，研究成果可为同类型桥梁提供参考。

1 工程概况

某大桥采用（146 + 292 + 146）m 单索面预应力混凝土矮塔斜拉桥，中墩处塔墩梁固结，边墩设置活动支座。单箱单室箱型主梁截面，主梁中支点高度为 14 m，跨中及边跨标准截面高度为 8 m，以二次抛物线过渡。本桥采用双支墩，墩高 36 m；主塔设计塔高 55 m。每个桥塔设置斜拉索 11 对，主梁斜拉索间距 8 m，主塔斜拉索理论间距 1.2 m，桥梁立面布置如图 1 所示。桥梁上部结构为预应力变截面箱梁，纵向间隔布置 W 形斜拉杆，主梁顶板宽 15.8 m，底板宽 11.7 m，外腹板为竖直腹板。梁高由中支点 14 m 过渡到跨中 8 m，箱梁下缘在中支点两侧各 71 m 采用二次抛物线变化，其他位置截面梁高保持 8 m 不变。标准截面梁高 8 m，顶底板均厚为 0.4 m，腹板厚度为 0.5 m；中墩处梁高为 14 m，顶板厚度 1.2 m，底板厚度 2.4 m；边墩处梁高 8 m，截面尺寸如图 2 所示。斜拉索采用极限强度 $f_{pk}=2\,000\text{ MPa}$ 高强低松弛钢绞线拉索体系成品索，三种规格分别为 55-7 $\varnothing$ 5，61-7 $\varnothing$ 5，73-7 $\varnothing$ 5。张拉端设于主梁内，采用分丝管索鞍方式从桥塔中通过。

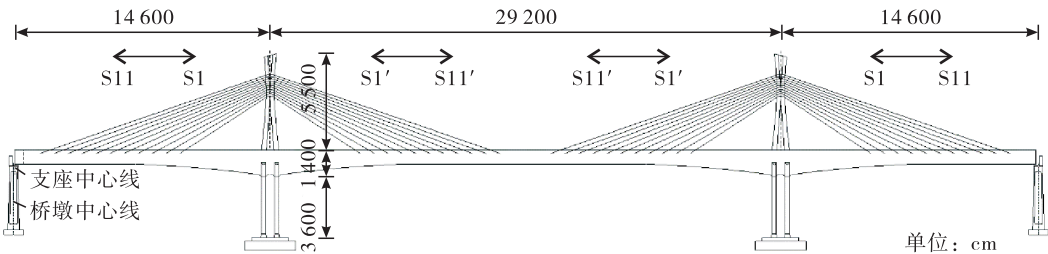


图1 某矮塔斜拉桥立面布置

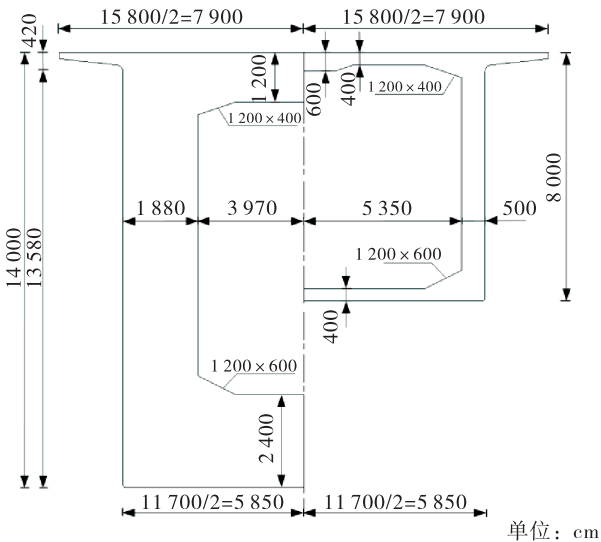


图2 主梁截面尺寸

2 有限元模型建立

基于桥梁结构建造的实际尺寸参数,结合 Midas Civil 有限元软件对全桥进行建模分析。主梁、索塔以及桥墩均采用梁单元进行模拟,斜拉索采用桁架单元进行模拟,全桥共计 332 个单元,其中梁单元及桁架单元分别为 244 个和 88

个。中墩位置塔梁墩固结,边界模拟时采用弹性连接中的刚性连接主墩和主梁单元,边墩为活动支座,边墩不参与分析,设置为一般支撑。斜拉索与主塔和主梁单元之间通过弹性连接建立相互关系,模拟其支撑和锚固作用。所建立的有限元模型如图 3 所示。

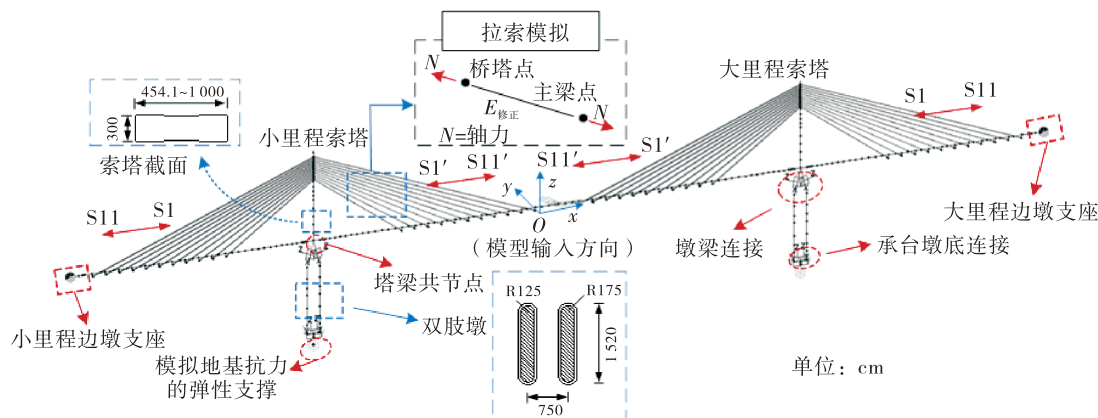


图3 有限元模型图

为有效计入斜拉索在重力作用下的垂度效应,采用 Ernst 公式对斜拉索弹性模量进行修正,换算弹性模量计算如式(1)所示。计算发现,考虑拉索垂度效应影响的弹性模量与修正前的弹性模量相差很小,故在有限元模型计算过程中,忽略垂度效应对弹性模量的影响。

$$E_{eq} = \frac{E_0}{1 + (\gamma S \cos \alpha)^2 E_0 / 12 \sigma^3} \quad (1)$$

式中: E_{eq} 表示考虑垂度影响的斜拉索换算弹性模量; E_0 为初始弹性模量; γ 表示容重; S 为斜拉索的长度; α 为斜拉索与水平方向夹角; σ 表示斜拉索的应力。

3 基于遗传算法的成桥索力优化

3.1 原设计方案

原设计方案中,在全桥合龙和二次铺装后,将斜拉桥索力调整至终张索力,此桥为预应力混凝土桥梁,假定成桥十年阶段的混凝土的收缩徐变已经基本完成,此时在恒载作用下结构的部分内力如图 4 所示。由图 4 分析可知,在原设计成桥索力作用下,成桥十年阶段主梁弯矩分布相对均匀,中墩固结位置负弯矩较大,在跨中和边跨出现较小的负弯矩;主塔应向边跨侧预偏,以抵消活载的影响,但主塔根部位置弯矩较大。

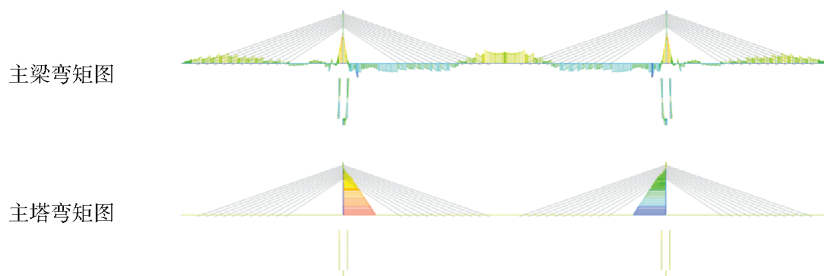


图4 原设计成桥十年恒载作用部分内力图

经过计算,原设计频遇组合状态下,主梁顶底板的正应力如图 5 所示。由图 5 分析可以发现,正常使用极限状态下,由于斜拉索和预应力钢束的作用,主梁的全截面均处于受压状态,正应力均表现为压应力且储备较为充足,满足全预应力

混凝土的设计要求。综上所述,在设计成桥索力作用下成桥十年阶段,主梁在中墩位置的内力和主塔在根部位置的内力较大,对整体结构受力不利,成桥索力有待优化。

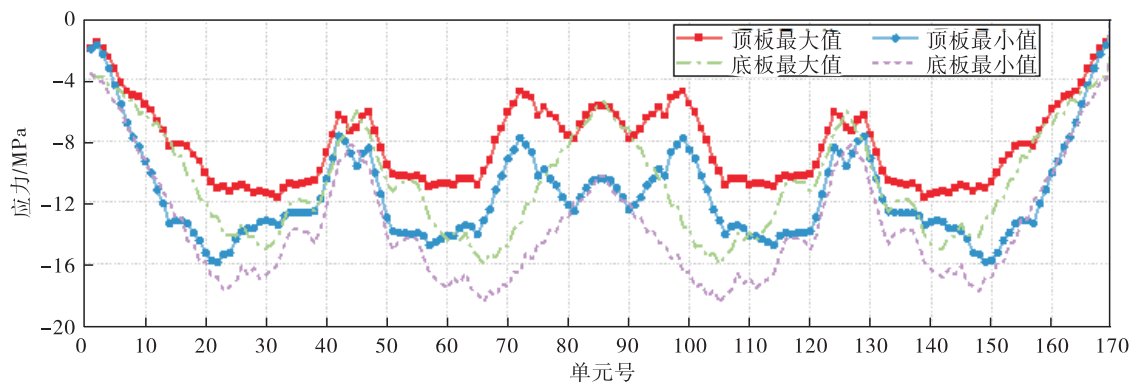


图5 原设计频遇组合主梁正应力分布

3.2 优化方案

斜拉索索力的优化方法较多，比如刚性支撑连续梁法、零位移法、影响矩阵法以及最小弯曲能法等，其共同之处在于均是在针对结构体系与荷载确定的条件下，使某一组索力下斜拉桥的受力性能最优，所选定的指标是由设计人员确定的。其中最小弯曲能法是以矮塔斜拉桥的主梁和索塔总的弯曲能量最小为优化目标，本文设置主梁及索塔的弯曲应变能所占权重一样，对总弯曲应变能目标最小下对应的索力进行寻优。显然，上述问题为一优化问题，针对此类问题，遗传算法根据目标函数通过全局搜索找寻最优解，可以很好地解决。影响矩阵在索力优化过程中，是优化的目标函数与斜拉桥索力之间的桥梁。本文结合影响矩阵和遗传算法，以矮塔斜拉桥的主梁和索塔总的弯曲能量最小为优化目标，利用 Xlrd 库将影响矩阵导入程序，基于 Python 遗传算法，进行索力优化。整体的优化思路如图 6 所示。

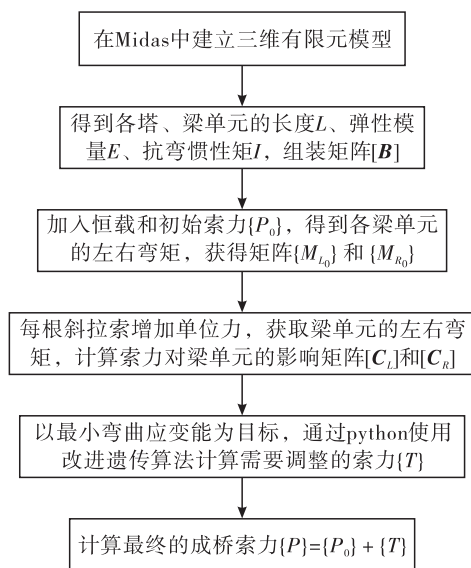


图6 索力优化步骤

目标函数：本文的改进遗传算法索力优化是以主梁和索塔的总弯曲应变能为目标，将主梁和索塔单元离散成杆系结构，其弯曲应变能为：

$$U = \sum_1^m \frac{L_i}{4E_i I_i} (M_{L_i}^2 + M_{R_i}^2) = \{M_L\}^T [B] \{M_L\} + \{M_R\}^T [B] \{M_R\} \quad (2)$$

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & b_{22} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & b_{ii} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中： m 表示单元的个数， M_{L_i} 、 M_{R_i} 分别表示单元的左端和右端弯矩； $[B]$ 表示单元柔度矩阵，为对角系数矩阵， $b_{ii} = \frac{L_i}{4E_i I_i}$ ， E_i 、 I_i 、 L_i 分别为单元的弹性模量、抗弯惯性矩和单元长度。

$$\{M_L\} = \{M_{L_0}\} + [C_L] \{T\} \quad (4)$$

$$\{M_R\} = \{M_{R_0}\} + [C_R] \{T\} \quad (5)$$

M_{L_0} 和 M_{R_0} 分别表示索力调整前梁单元左右两端的弯矩， $\{T\}$ 为索力调整向量， C_L 和 C_R 分别表示索力对单元左右两端的影响矩阵。

根据前文介绍，已获得调索前初始弯矩 M_{L_0} 和 M_{R_0} ，并已计算索力对弯矩的影响向量 C_L 和 C_R ，现只需根据公式计算出单元柔度矩阵，汇总成 106 行 × 14 列的表格，通过 Xlrd 导入 Python 程序，进行索力优化。

设计变量：须注意的是，首先已根据有限元计算出初始的成桥索力，在遗传算法优化中，将以斜拉索调整的索力值作为设计变量，全桥共计 22 对斜拉索，且全桥为对称结构，为减少计算量取半桥结构，对半桥 11 对索力进行优化分析。

边界条件：根据斜拉索根数和钢绞线应力极限，计算索力约束上限，如 73-7 Ø 5 的斜拉索，采用公称直径 15.2 mm 的钢绞线，7 根钢绞线一

股,斜拉索包含73股钢绞线,换算面积为 $10\,153.4\text{ mm}^2$,计算的斜拉索应力上限为 $0.5f_{pk} = 0.5 \times 2\,000\text{ MPa} = 1\,000\text{ MPa}$,为保证安全预留一定储备,拉索索力上限为 $9\,000\text{ kN}$ 。在遗传算法中添加约束时,要对初始调匀后的索力进行扣除,扣除后的索力值为索力调整的上限,将索力上限设置为 $5\,000\text{ kN}$,程序中调整的下限全部设置为零,并根据方差对调整的索力均匀性进行控制,索力应满足公式:

$$\begin{cases} 0 \leq T_i \leq 5\,000\text{ kN} (i = 1, 2, \dots, 11) \\ \frac{\sum_{i=1}^{11} (T_i - \bar{T})^2}{11} \leq 10\,000 \end{cases} \quad (6)$$

Python 具有高效的编程计算能力,遗传算法库 Geatpy 和数值计算库 Numpy 可以降低编程难度,且易于操作。交叉概率和变异概率可以直接调整,概率数值的改变将直接影响计算结果的收敛速度,不断调整合适的参数直到达到满意的收敛速度,初始种群设为50,交叉概率设为0.7,变异概率设为0.5,最大遗传代数设为1000。

3.3 优化结果分析

通过改进遗传算法计算得到需要调整的索力,并与调匀后的初步成桥索力求和,获得优化后的成桥索力,本研究的优化迭代过程如图7所示,与原设计的成桥索力进行对比如图8所示。可以看到图7中反映本文中优化方法的具体指标总弯曲应变能由 310 kJ 降低为 170 kJ ,后文将根据优化后的索力对其对应的主梁及索塔弯矩进行进一步分析。

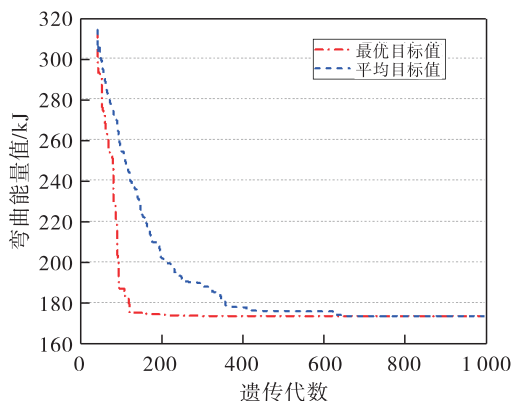


图7 遗传算法优化轨迹曲线

由图8分析可知,优化后的成桥索力从短索到长索,索力先增大后减小,呈过渡自然的曲线分布,且索力优化前后相差不大。通过改进遗传算法计算得到优化后的成桥索力,此时的成桥索力状态下,主梁和索塔的整体弯曲应变能达到最

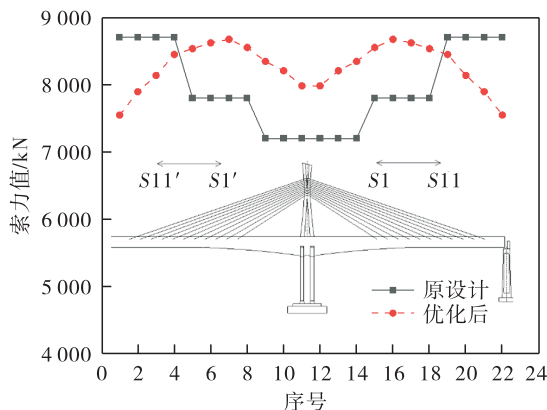


图8 索力优化前后成桥索力对比

小,在恒载作用下主梁的内力分布均匀,但是发现在正常使用极限状态下,主梁在跨中位置顶板压应力增大,底板压应力减小,显然,这对整个结构受力是不利的。

矮塔斜拉桥中的拉索竖向分力为主梁恒载和活载提供部分竖向支撑,但是矮塔斜拉桥的拉索水平方向夹角比常规斜拉桥要小,主要对主梁起体外预应力加劲的作用。在长索对应的主梁跨中和边跨位置,优化后的索力比设计要小,为了保证主梁这些位置的压应力储备充足,要对主梁的预应力筋进行优化。经过对整个桥梁的结构受力分析,在主梁跨中底板增加预应力钢束,得到的主梁和索塔弯矩分别如图9和10所示,索塔弯矩的计算云图如图11所示。

由图9~图11分析可知,索力优化后主梁和索塔结构的整体弯曲应变能显著减小,与原设计对比发现,主梁在中墩和跨中位置负弯矩显著减小,中墩位置由原设计的 $-3.5 \times 10^5\text{ (kN} \cdot \text{m)}$ 减小到 $-2.4 \times 10^5\text{ (kN} \cdot \text{m)}$,跨中位置由原设计的 $-1.9 \times 10^5\text{ (kN} \cdot \text{m)}$ 减小到 $-1.4 \times 10^5\text{ (kN} \cdot \text{m)}$ 。由于该矮塔斜拉桥与连续刚构相似,主梁在中墩位置出现正弯矩,边跨和跨中位置出现负弯矩,对于整个结构受力是有利的。

索力优化以后,索塔根部弯矩显著减小,由原设计的 $-3.8 \times 10^4\text{ (kN} \cdot \text{m)}$ 减小到 $-2.0 \times 10^4\text{ (kN} \cdot \text{m)}$,降低约47.4%。由于计算结果为成桥十年阶段内力,此阶段以后收缩徐变影响较小,索塔只须储备少量弯矩抵抗活载的作用,此时的索塔受力主要为轴向压力,因此索力优化后的索塔弯矩更符合合理成桥状态。经过索力优化和对预应力钢束进行调整,得到的正常使用极限状态频域组合作用下,主梁上缘、下缘应力如图12和图13所示。

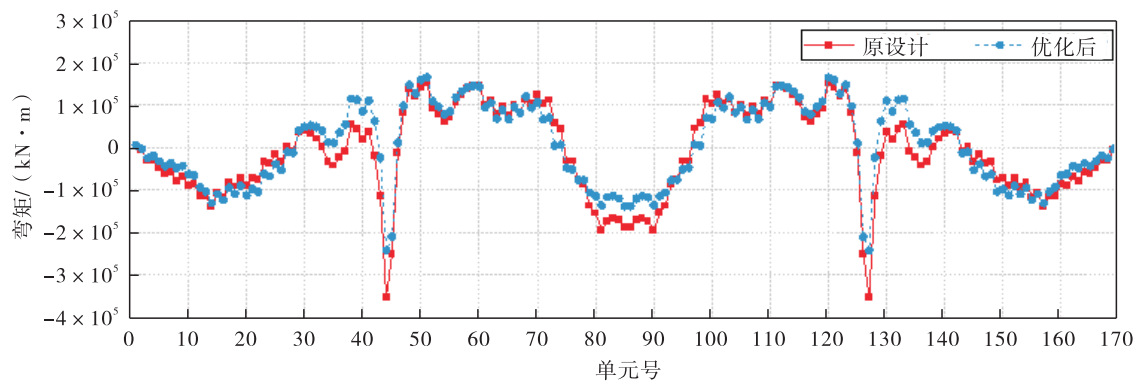


图9 索力优化前后恒载作用下主梁弯矩对比

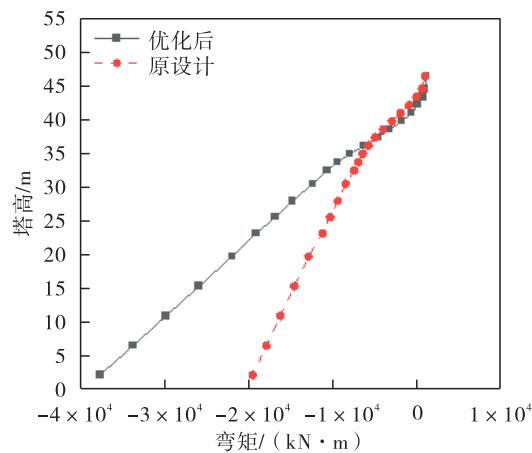


图10 索力优化前后恒载作用下索塔弯矩对比

由图12和图13分析可知，索力优化前后主梁顶、底板正应力无明显变化，均表现为压应力，顶板在跨中位置压应力增大约1MPa，其余位置优化前后几乎无变化。索力优化后，主梁全截面处于受压状态，且压应力储备充足，顶底板压应力接近，认为该状态为合理成桥状态。

4 结论

本文通过对工程背景桥梁的索力设计优化，

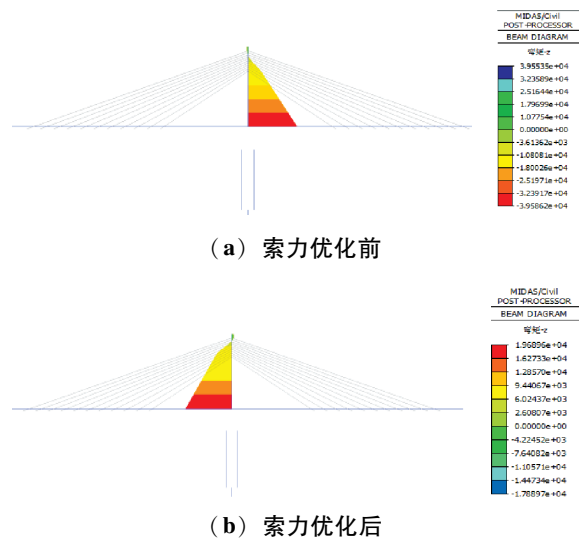


图11 索塔弯矩计算云图

对成桥十年的阶段进行分析，考虑了经过混凝土收缩徐变后的主梁和索塔内力，以及短期荷载组合作用下的应力，得到的成桥索力更加科学合理。基于改进遗传算法进行索力优化，以主梁和索塔总的弯曲应变能为目标，得到的成桥状态内力分布更加均匀，主梁中墩和跨中位置，主塔根部位置的弯矩显著减小。矮塔斜拉桥的斜拉索主

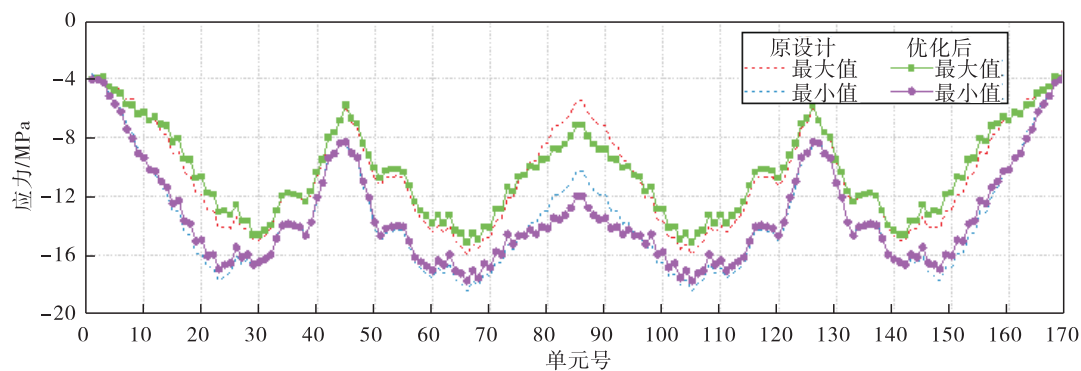


图12 正常使用极限状态下主梁上缘正应力对比

- [3] 滕毅, 马焯文. 基于 Uniapp 的校园拼车多端小程序设计与实现[J]. 电子制作, 2022, 30(16): 43-46.
- [4] 李志鸿, 李金忠, 肖延龙, 等. 校园疫情防控平台的设计与实现[J]. 井冈山大学学报: 自然科学版, 2021, 42(5): 70-77.
- [5] IKCAMP. Koa 与 Node.js 开发实战[M]. 北京: 电子工业出版社, 2019.
- [6] LID, MEI H, SHEN Y, et al. ECharts: a declarative framework for rapid construction of web-based visualization[J]. Visual informatics, 2018, 2(2): 136-146.
- [7] 白洁, 武佳丽, 余啟旺, 等. 基于 MongoDB 的非关系型数据库的设计与应用[J]. 湖北师范大学学报(自然科学版), 2022, 42(2): 79-82.
- [8] 顾少伟, 井波. Redis 在软件项目中的应用[J]. 电脑编程技巧与维护, 2023(11): 16-19, 32.
- [9] 李睿智. 基于用户相关性的协同过滤推荐算法研究[D]. 烟台: 烟台大学, 2024.
- [10] 董添. 科大讯飞星火认知大模型 V3.5 发布[N]. 中国证券报, 2024-01-31(A06).
- [11] 杜俊, 李金忠, 何新武, 等. 基于 Spring Cloud 微服务架构的非物质文化遗产展示与学习系统的设计与实现[J]. 广东轻工职业技术学院学报, 2024, 23(1): 14-21.
- [12] 郭晓宇. 基于用户兴趣的个性化推荐算法研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2023.

(上接第 37 页)

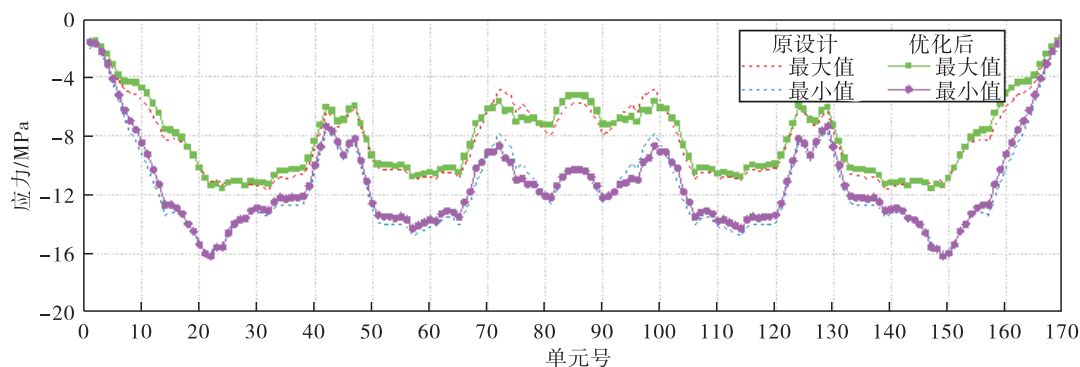


图 13 正常使用极限状态下主梁下缘正应力对比

要起体外预应力作用, 索力调整之后要对预应力钢束进行优化, 以正常使用极限状态下, 主梁顶底板正应力均表现为压应力且储备充足, 顶底板应力值相接近为目标调整预应力钢束, 得到的成桥状态更加合理。

参考文献:

- [1] 缪长青, 王义春, 黎少华. 矮塔混凝土斜拉桥成桥索力优化[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2012, 42(3): 526-530.
- [2] 陈从春. 基于费用最小原则的矮塔斜拉桥索力优化研究[J]. 工程力学, 2012, 29(5): 141-146.
- [3] HASSAN M M. Optimization of stay cables in cable-stayed bridges using finite element, genetic algorithm, and B-spline combined technique[J]. Engineering structures, 2013, 49: 643-654.
- [4] FENG Y, LAN C, BRISEGHIELLA B, et al. Cable optimization of a cable-stayed bridge based on genetic algorithms and the influence matrix method[J]. Engineering optimization, 2022, 54(1): 20-39.
- [5] 孙全胜, 孟安鑫. 基于影响矩阵法的非对称独塔斜拉桥索力优化[J]. 中外公路, 2016, 36(3): 85-88.
- [6] 王占飞, 黄昊, 全伟, 等. 基于影响矩阵的矮塔斜拉桥索力二次优化方法的研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2021, 37(3): 478-485.
- [7] 金俊杰, 沈勇. 基于能量法的独塔斜拉桥施工索力优化研究[J]. 湖南交通科技, 2021, 47(2): 122-124.
- [8] 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.