

非对称钢混独塔斜拉桥成桥索力优化工程应用

周晨曦

(安徽省综合交通研究院股份有限公司, 安徽 合肥 230093)

摘要 非对称钢混独塔斜拉桥主梁由两种相差较大的材料结合而成, 钢混结合段受力复杂, 运用三种方法求解合理成桥索力。恒载平衡法简单便捷, 可用于计算索力初值; 弯曲能量最小法能较好地控制主梁与桥塔的弯矩, 成桥状态合理; 基于 MATLAB 工具箱的数学优化方法可求解复杂约束的情况, 对于该类桥型索力优化有较好的适用性。

关键词 斜拉桥; 索力优化; 有限元法; MATLAB 工具箱

中图分类号: U441

文献标志码: A

文章编号: 2097-3365(2024)06-0013-03

非对称钢混独塔斜拉桥线形优美, 常与地方自然景观结合的相得益彰, 成为标志性建筑。其结构形式为多次超静定结构, 拉索索力能直接影响主梁和桥塔的内力和变形, 因此, 确保一组合适的斜拉索张力至关重要, 以满足设计要求并实现最佳成桥状态^[1-2]。

国内外学者已研究出多种合理索力计算方法: 如刚性支承连续梁法、内(应)力平衡法、零位移法和零支反力法、最小弯曲能量法以及影响矩阵法和数学优化与智能优化算法等^[3-6]。非对称钢混独塔斜拉桥主梁由两种特性相差较大的材料结合而成, 边跨混凝土主梁刚度较中跨钢主梁大得多, 钢混结合段受力复杂。边跨混凝土重量较大, 主要起锚固主梁作用, 使得中跨钢主梁的内力较小, 提高了主梁的跨越能力。由于非对称独塔斜拉桥的特殊性, 本文探索比较常用的三种索力优化方法的适用性, 为相似工程提供参考。

1 索力优化理论

1.1 索力初值计算

恒载平衡法基于荷载平衡的原则, 忽略拉索对主跨主梁和桥塔抗弯刚度的影响。根据竖向力平衡条件, 每根拉索承担主梁恒载质量可以确定主跨斜拉索竖向分力, 结合拉索角度计算出主跨索力, 边跨斜拉索的索力根据主边跨斜拉索水平分力相等的原则确定, 从而快速计算出初步的成桥索力。

1.2 弯曲能量最小法

将斜拉桥塔梁弯曲应变能最小化作为设计目标函数, 塔梁的拉压应变能和弯曲应变能之和为^[7]:

$$U = \sum_{i=1}^m \left[\frac{L_i}{4E_i I_i} YML_i^2 + YMLR_i^2 + \frac{L_i}{(4E_i A_i YNL_i^2 + YNR_i^2)} \right] \quad (1)$$

式中, ML_i 、 MR_i 、 NL_i 、 NR_i 、 E_i 、 A_i 、 I_i 分别表示 i 单元的弯矩、轴力、弹性模量、截面面积、惯性矩。

将上式写成矩阵形式为

$$U = \{M\}^T [B] \{M\} \quad (2)$$

$\{M\}$ 是弯矩向量; $[B]$ 是系数矩阵

令单元初始弯矩向量为 $\{M_0\}$, 施调向量为 $\{T\}$, 则调整后弯矩向量为:

$$\{M\} = \{M_0\} + \{C\} \{T\} \quad (3)$$

要使索力优化后达到结构弯曲应变能最小需要:

$$\frac{\partial U}{\partial T_i} \{M\} = 0 \quad (4)$$

将式(3)代入式(2)中, 化简可得:

$$\{C\}^T [B] [C] \{T\} + \{C\}^T [B] \{M_0\} = 0 \quad (5)$$

求解可得到使结构弯曲应变能最小的一组索力。

1.3 基于 MATLAB 工具箱的优化算法

上述问题转化为数学模型:

$$\begin{cases} \min f(x) = \sum_{i=1}^n \varphi_i U_i(x) \\ s.t. g_j(x) \geq 0 (j=1, 2, 3, \dots, n) \end{cases}$$

式中: $f(x)$ 为目标函数, $U(x)$ 为结构弯曲应变能, $g(x)$ 为约束函数, n 为约束个数。

随后选择罚函数法, 将有约束优化转换为无约束优化, 运用 MATLAB 一阶优化工具箱求解。具体流程如图 1 所示。

2 优化目标与约束条件

本文选取塔梁弯曲应变能之和与主梁竖向位移平方和作为目标函数。考虑到独塔斜拉桥成桥状态受力复杂, 合理的索力需确保桥梁构件在各工况下的应力

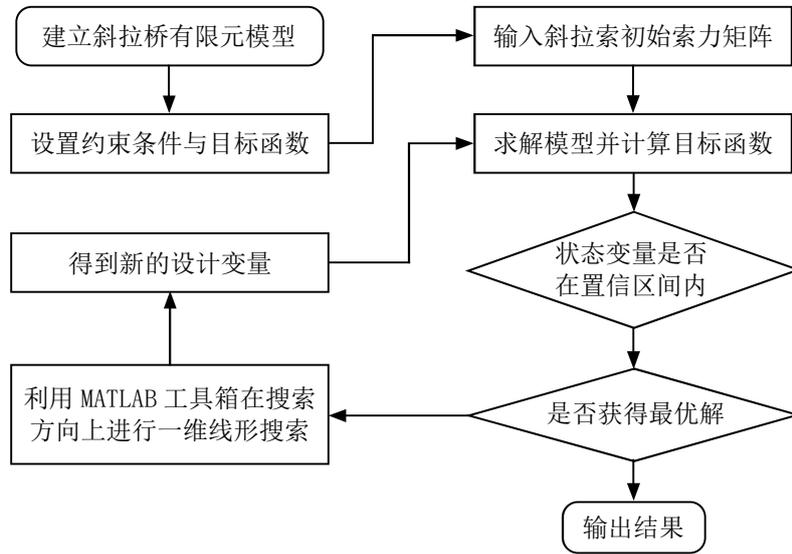


图1 优化算法流程图

满足规范要求，并具备安全富余，且成桥时尽量“梁平塔直”，确保桥梁线形平顺且无大幅波动，索力的分布均匀^[8]。设置约束条件为：

塔梁位移约束： $X_{jmax} \geq X_j \geq X_{jmin}$

截面应力约束： $\delta_{jmax} \geq \delta_j \geq \delta_{jmin}$

拉索索力约束：
$$\begin{cases} T_{jmax} \geq T_j \geq T_{jmin} \\ \left| \frac{T_{j+1} - T_j}{T_{j+1}} \right| \leq \Delta \end{cases}$$

同时针对该桥型的特殊性，主梁钢混结合位置弯矩应控制较小，增加钢混段弯矩控制约束： $X_{max} \geq X_j \geq X_{min}$ 。

3 算例

3.1 工程概述

以安徽某非对称钢混独塔双索面斜拉桥为例，该桥跨径布置为(29+30+36+185)m，边中跨比0.53，边跨及塔墩梁固结位置为混凝土结构，混凝土梁总长107m，中心线处梁高3.56m，钢梁全长173m(含钢混结合段)，主梁均为大悬臂箱梁。桥梁整幅布置，标准断面宽度52.5m，双向八车道。塔柱全高116m，采用矩形塔截面，纵向宽度7.0m，桥面以上横向宽度3.5m。主、边跨各设置14对斜拉索。

3.2 优化模型建立

采用ANSYS软件建立非对称独塔斜拉桥参数化有限元模型，主梁使用Beam188单元模拟，共127个单元，桥塔用Beam4单元模拟，共268个单元，横隔板仅考虑重量荷载施加在主梁节点上；拉索采用link10单元，共48个单元。桥塔底部采用固结约束方式，拉索在锚

点处与主梁相应节点刚性连接。

本例中MATLAB和ANSYS联合求解设计变量取半桥索数28个，约束条件具体参数设置为索力 $2.5 \times 10^3 \sim 7.5 \times 10^3$ kN，相邻索索力差值小于550 kN，主梁各节点位移-4~4 cm，主塔各节点位移-3~3 cm，混凝土梁关心截面应力-17.0~2.0 MPa，钢梁关心截面应力-80.0~40.0 MPa，主梁钢混段弯矩小于 2×10^4 kN。

3.3 优化结果与分析

利用恒载平恒法计算索力初值，随后用弯曲能量最小法与基于MATLAB工具箱的数学优化算法对拉索索力进行优化，计算结果如图2~图5所示。全桥索力从长索至短索呈递减的趋势，优化后索力介于 $3.0 \times 10^3 \sim 7.3 \times 10^3$ kN之间，最大索力分别减小了15.4%和19.6%。其中数学优化法设置了索力约束条件，相邻索力最大差值为489 kN，较优化前降低了68%，索力结果整体无突变。

主梁弯矩优化结果如图4、图5所示，优化前后边跨混凝土梁的弯矩整体变化不大，主要在改善了塔梁连接位置的受力，最大负弯矩由 1.59×10^5 kN·m减小至 6.56×10^4 kN·m和 4.87×10^4 kN·m，分别减小了58.7%和69.3%，大幅削减了负弯矩峰值。钢主梁部分的弯矩通过弯曲能量最小法与数学优化方法优化后也得到较大改善，其最大弯矩极值由 3.55×10^4 kN·m分别减小至 2.02×10^4 kN·m和 1.24×10^4 kN·m，仅为优化前的56.9%和34.9%。除了塔梁连接位置，两种方法优化前后对钢主梁内力状态的优化明显优于混凝土主梁，钢主梁内力状况对索力的变化较为敏感。

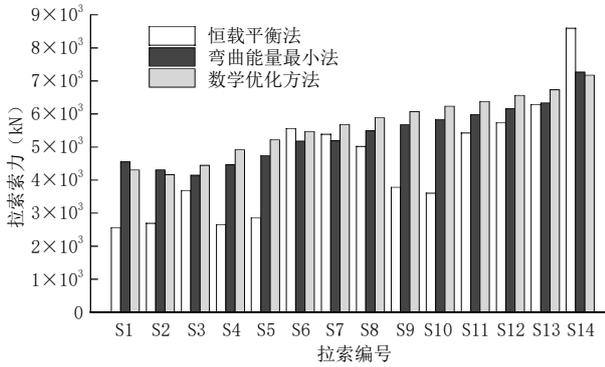


图 2 边跨侧拉索力优化结果对比

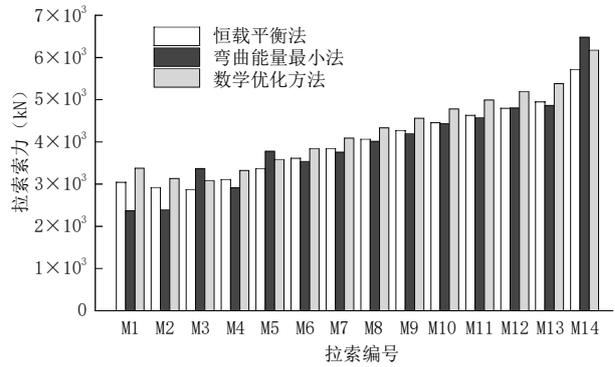


图 3 中跨侧拉索力优化结果对比图

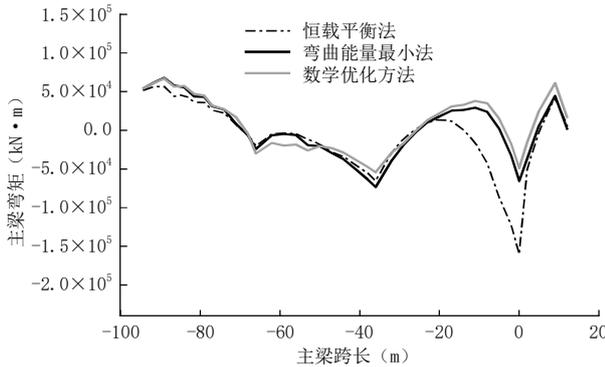


图 4 混凝土梁弯矩优化结果对比图

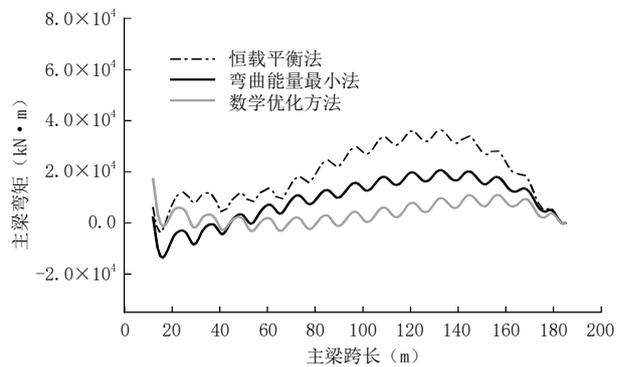


图 5 钢箱梁弯矩优化结果对比图

优化后桥塔弯矩极值由 2.59×10^4 kN·m 分别减小至 1.86×10^4 kN·m 和 1.54×10^4 kN·m, 减小了 28.2% 和 40.5%, 主塔弯矩极值明显降低, 受力更为合理。

优化前主梁最大挠度为 62.3 mm, 通过弯曲能量最小法与数学优化方法优化后最大挠度减小至 30.4 mm 和 14.5 mm, 分别减小了 48.7% 和 74.5%, 挠度优化效果明显, 优化后主梁线形更为平顺。

4 结论

针对非对称钢混独塔斜拉桥应用不同方法求解合理成桥索力, 得到如下结论:

1. 恒载平衡法计算便捷, 由于未兼顾桥塔的内力和变形, 所得结果仍有优化空间, 可用于拉索初张力的确定。最小弯曲能量法应用于非对称独塔斜拉桥结构上, 以弯曲应变能为优化目标函数, 主梁与桥塔的弯矩控制得较好, 成桥状态合理, 且计算速度较快。

2. 基于 MATLAB 工具箱的数学优化方法, 可以求解复杂约束的斜拉桥索力优化问题, 并根据实际工程需要灵活选取工具箱中相应的优化算法, 对于非对称钢混独塔斜拉桥索力优化有较好的适用性。

3. 非对称钢混独塔斜拉桥由于混凝土主梁截面刚度明显大于钢主梁, 优化前后除塔梁连接位置外, 混

凝土主梁受力状态的改善逊色于钢主梁, 钢主梁受力状况对拉索力变化的敏感性较强。

参考文献:

[1] SONG C L, XIAO R C, SUN B. Optimization of cable pre-tension forces in long-span cable-stayed bridges considering the counterweight[J]. Engineering Structures, 2018(172):919-928.
 [2] 肖勇刚, 张巍. 独塔混合梁斜拉桥成桥阶段索力优化研究[J]. 公路与汽运, 2023(02):87-90.
 [3] 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(02):107-114.
 [4] 戴杰, 秦凤江, 狄谨, 等. 斜拉桥成桥索力优化方法研究综述[J]. 中国公路学报, 2019, 32(05):17-37.
 [5] 韩若愚, 苑仁安. 斜拉桥非线性索力优化的影响矩阵构建方法研究[J]. 桥梁建设, 2023, 53(S2):97-103.
 [6] 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(03):16-23.
 [7] 周银, 张雪松. 基于最小弯曲能的结合梁斜拉桥恒载索力优化计算方法[J]. 中外公路, 2018, 38(04):177-180.
 [8] 苑仁安, 秦顺全, 肖海珠. 一种斜拉桥目标状态索力快速精准确定的方法[J]. 桥梁建设, 2020, 50(02):25-30.