



## 异形塔混合结构斜拉桥初始张力优化

王朋路, 冯 畅

(西安市市政建设(集团)有限公司, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 为探究异形塔混合结构斜拉桥合理斜拉索初始张力, 进一步优化成桥状态下斜拉索内力分布, 以某跨径布置为  $(2 \times 30) + (2 \times 60) + (2 \times 30)$  m 的异形塔混合结构斜拉桥为研究对象, 基于影响矩阵原理, 对斜拉索初始张力进行优化分析, 计算斜拉索合理初始张力, 并以设计成桥索力和优化后初始张力作为斜拉索初始张力的两种不同工况, 对不同初始张力下桥梁结构响应进行对比分析。结果表明: 影响矩阵法对异形塔混合结构斜拉桥初始张力优化效果良好, 优化后的斜拉索内力趋近于设计成桥索力, 且初始张力优化后, 异形塔混合结构斜拉桥主梁弯矩整体分布更为均匀, 主梁整体竖向位移相比优化前降低 38.2%, 在改善结构受力的同时亦对桥梁线形起到了管控作用。本文成果可为同类型桥梁斜拉索初始张力优化提供一定的借鉴与参考。

**关键词:** 桥梁工程; 异形塔混合结构斜拉桥; 初始张力; 斜拉索内力; 结构响应

中图分类号: U448.27

文献标识码: A

文章编号: 1673-8993(2024)05-0022-04

doi: 10.13402/j.gcjs.2024.05.058

## Optimization of initial tension of cable-stayed bridge with mixed structure of special-shaped tower

WANG Penglu, FENG Chang

(Xi'an Municipal Construction (Group) Co., Ltd., Xi'an 710054, Shanxi, China)

**Abstract:** In order to explore the reasonable initial tension of the cable-stayed cable of the mixed-structure cable-stayed bridge with special-shaped tower, and further optimize the distribution of the internal force of the cable-stayed cable in the state of the bridge, a span of special-shaped tower mixed structure cable-stayed bridge is arranged as  $(2 \times 30) + (2 \times 60) + (2 \times 30)$  based on the principle of influence matrix, the initial tension of the cable-stayed cable is optimized and analyzed, the reasonable initial tension of the cable-stayed cable is calculated; while taking the designed bridge cable force and the optimized initial tension as the initial tension of the cable-stayed cable, the response of the bridge structure under different initial tension is compared and analyzed. The results show that the influence matrix method has a good effect on the optimization of the initial tension of the cable-stayed bridge of the mixed structure of the special-shaped tower. The internal force of the optimized cable-stayed cable tends to be designed as the bridge cable force, and after the initial tensile force is optimized, the overall distribution of the bending moment of the main girder of the cable-stayed bridge with mixed structure of special-shaped tower is more uniform, and the overall vertical displacement of the main girder is reduced by 38.2% compared with that before optimization, which not only improves the structural force, but also plays a controlling role in the bridge alignment. The results can provide a certain reference for optimization of the initial tension of cable-stayed cables for the same type of bridges.

**Key words:** bridge engineering; cable-stayed bridge with mixed structure of special-shaped tower; initial tension; cable-stayed internal force; structural response

收稿日期: 2023-08-28

基金项目: 陕西省建设科技计划资助项目(2022-K54)

作者简介: 王朋路(1981—), 男, 高级工程师, 从事桥梁结构设计工作。

斜拉桥因具备整体刚度较大、抗风性能优异、跨越能力强大以及结构布置形式多样性等特点, 现已成为世界范围内发展速度最快、应用最为广泛的桥型之一<sup>[1-3]</sup>。其中异形塔混合结构斜拉桥作为一种新型斜拉桥结构体系, 其整体刚度由主梁与斜拉索共同组成<sup>[4-5]</sup>; 同时, 斜拉桥自身具备较强几何非线性<sup>[6]</sup>, 导致斜拉索在无应力状态下难以成形<sup>[7-8]</sup>, 因而斜拉索初始张拉力的确定直接影响到斜拉索内力能否达到斜拉索设计成桥索力的要求。

针对斜拉桥索力优化问题, 国内外众多学者已开展大量研究。WANG 等<sup>[9]</sup>基于影响矩阵法, 提出了一种可有效改善主梁位移的合理成桥索力求解方法, 经验证, 优化后的斜拉桥主梁峰值垂直位移减少了 45%, 主梁受力更为均匀; 孙全胜等<sup>[10]</sup>借助影响矩阵法, 通过建立考虑施工过程中结构内力的目标函数开展成桥索力优化研究; 郑一峰等<sup>[11]</sup>基于索力影响矩阵, 提出采用主梁力平衡法与刚性支承连续梁法相结合的方法来确定合理成桥索力, 并通过实际工程验证发现, 基于该方法计算所得索力值与设计索力值基本一致, 且内力分布更为均匀合理; 吴霄等<sup>[12]</sup>以主梁和主塔弯曲应变能最小为优化目标, 基于改进遗传算法, 通过建立有限元模型, 对九江二桥开展索力优化研究, 结果表明该方法可有效优化斜拉桥成桥索力, 且避免了后期二次调索; ZHANG 等<sup>[13]</sup>以结构竖向位移、斜拉索索力为约束条件, 基于 ANSYS 平台优化模块中零阶、一阶算法, 对某座主跨为 120 m 的独塔双索面混合梁斜拉桥进行成桥索力优化研究, 结果表明, 优化后的主梁应力和主塔位移都显著降低, 桥梁整体结构性能达到了最优状态。

目前, 关于斜拉桥索力优化问题, 大多研究集中于索力二次优化, 而对于斜拉桥初始张拉力的合理优化分析研究略显薄弱。因此, 本文结合异形塔混合结构斜拉桥结构特点, 采用影响矩阵法对异形塔混合结构斜拉桥初始张拉力进行优化分析, 探讨优化前后斜拉索内力与设计成桥索力关系, 并对初始张拉力优化前后异形塔混合结构斜拉桥结构响应进行对比分析, 以期异形塔混

合结构斜拉桥的初始张拉力优化提供一定的借鉴。

## 1 初始张拉力优化原理

影响矩阵是指被调向量因影响向量产生单位变化所引起自身变化依次排列形成的矩阵<sup>[14]</sup>。针对斜拉桥而言, 影响矩阵即为在满足线性叠加原理前提下, 斜拉桥主梁位移、弯矩、内力等结构响应因斜拉索张拉力发生单位变化时所产生相应变化组成的矩阵<sup>[15]</sup>。采用影响矩阵法进行斜拉桥初始张拉力优化计算时, 先假定斜拉桥中斜拉索初始张拉力  $F_0$  与设计成桥索力  $T$  相一致, 然后根据成桥状态下斜拉索内力与设计成桥索力之差建立影响矩阵, 再通过优化调整  $F_0$ , 使斜拉索内力无限接近于  $T$ , 此时的  $F_0$  即为优化后斜拉桥初始张拉力。具体计算过程如下。

(1) 基于全桥有限元模型, 以斜拉桥设计成桥索力  $T$  作为初始张拉力。

(2) 基于斜拉桥自重、二期恒载和预应力作用, 综合考虑结构变形和应力刚化效应, 计算斜拉桥成桥状态下斜拉索内力  $T_0$ 。

(3) 根据上述计算得到  $T_0$  与  $T$ , 由二者差值得斜拉索受调向量  $M$ 。

(4) 当斜拉桥拉索中第  $i$  根拉索初始张拉力发生单位变化时, 各斜拉索发生相应内力变化  $D_i$ , 即为影响向量。

$$D_i = (d_{i1}, d_{i2}, d_{i3}, \dots, d_{in})^T \quad (1)$$

式中:  $d_{in}$  为当第  $i$  根拉索初始张拉力发生单位变化时, 第  $n$  根拉索产生的相应内力变化;  $n$  为拉索数量。

此时, 斜拉桥初始张拉力影响矩阵  $D$  即为  $n$  个影响向量  $D_i$  所组成, 即:

$$D = D_1, D_2, D_3, \dots, D_n = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & \dots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & \dots & d_{2n} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & \dots & d_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ d_{n1} & d_{n2} & d_{n3} & \dots & d_{nn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

(5) 根据斜拉桥初始张拉力影响矩阵  $D$ , 结合受调向量  $M$ , 可得斜拉索初始张拉力施调向量  $P$ 。 $P$  是指  $n$  根斜拉索的初始张拉力调整值。

$$P = M \cdot D^{-1} \quad (3)$$

(6) 根据斜拉索初始张拉力调整值  $P$ , 结合假定初始张拉力  $F_0$ , 求出优化后斜拉桥初始张拉力  $F$ 。

$$F = F_0 + P \quad (4)$$

(7) 通过计算  $T_0$  与  $T$  之间相对误差  $\Delta$ , 得出斜拉索相对误差最大值  $\Delta_{\max}$ 。

$$\Delta = |T_n - T| / |T_n| \times 100\% \quad (5)$$

(8) 设立斜拉桥合理初始张拉力判定准则, 即  $\Delta_{\max} \leq 0.01\%$ 。若计算所得斜拉桥初始张拉力符合要求, 即为优化过程结束, 此时的斜拉桥初始张拉力即所求结果; 反之, 则重复以上计算步骤(2)~(7), 直至斜拉桥初始张拉力输出结果满足判定要求为止。

## 2 模型建立

### 2.1 工程背景

某异形塔混合结构斜拉桥采用独塔斜拉桥结构形式。大桥全长 240 m, 桥跨布置为  $(2 \times 30) + (2 \times 60) + (2 \times 30)$  m, 桥梁宽度为 28 m, 桥梁梁高为 2.5 m。桥塔采用变截面环形钢塔形式, 桥塔外径为 17 m, 内径为 14 m, 内环圆心较外环圆心竖向偏移 0.5 m, 构成内外环不同心式构造。桥塔宽度为 3 m, 截面形式为单箱双室截面, 桥塔截面高度由塔顶的 2.5 m 渐变至塔底的 3.5 m, 切角斜度为 4:1。斜拉索采用单索面扇形对称布置, 全桥共 24 根拉索, 梁上锚固点纵向间距为 6 m, 横向间距为 2 m, 塔上竖向间距为 3 m, 横向间距为 1 m。桥墩采用圆端型花瓶墩, 圆端直径为 1.8 m。

### 2.2 有限元模型

采用有限元软件 Midas Civil 建立异形塔混合结构斜拉桥模型, 其中主梁、主塔和桥墩均采用梁单元, 斜拉索采用桁架单元。全桥共划分为 560 个节点和 526 个单元, 其中梁单元 502 个, 桁架单元 24 个, 斜拉索编号为自左向右, 最左侧为 C12, 最右侧为 C1。有限元模型如图 1 所示。

## 3 结果与讨论

### 3.1 初始张拉力优化

斜拉索在张拉过程中会使拉索两端产生相对

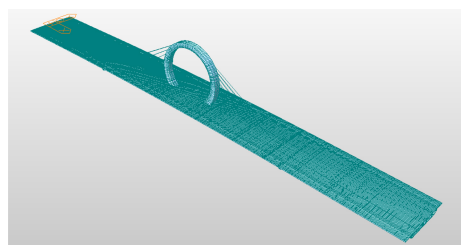
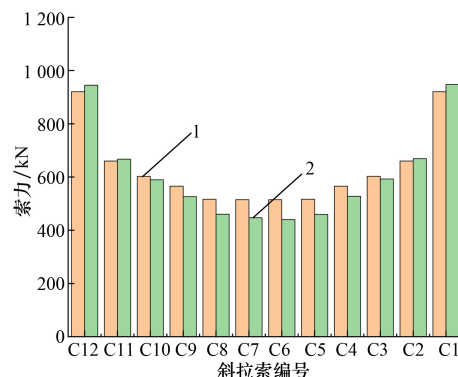


图 1 异形塔混合结构斜拉桥有限元模型

变形, 进而导致斜拉索内力与初始张拉力之间产生一定偏差, 难以满足成桥索力设计要求。因此, 需要通过优化调整斜拉索初始张拉力, 使斜拉索内力满足成桥索力设计目标值。本文基于某异形塔混合结构斜拉桥有限元模型, 结合影响矩阵方法, 对斜拉索初始张拉力进行优化分析, 结果如图 2 所示。



1—优化前; 2—优化后。

图 2 初始张拉力优化前后斜拉索内力对比

由图 2 可知: 各斜拉索成桥状态下斜拉索内力与设计成桥索力相对差值均小于 0.1%, 满足设计成桥索力要求。同时, 斜拉索索力满足两边大、中间小的分布特征, 且经初始张拉力优化后, 斜拉索索力分布更为均匀, 在斜拉索总内力与总设计成桥索力相差较小的情况下, 可显著改善桥梁受力性能。这充分说明: 影响矩阵法对于异形塔混合结构斜拉桥初始张拉力具有较优的优化作用。

### 3.2 主梁弯矩

异形塔混合结构斜拉桥初始张拉力优化前后主梁弯矩图和弯矩值分别如图 3、4 所示。由图 3 可知: 异形塔混合结构斜拉桥主梁最大正弯矩位于跨中附近, 最大负弯矩位于主梁跨中和 1/4 跨处。由图 4 可知: 初始张拉力优化后异形塔混合结构斜拉桥主梁弯矩最大值为 23 717 kN·m, 相比优化前提升 16.8%; 主梁弯矩最小值为 -30 739 kN·m, 相比优

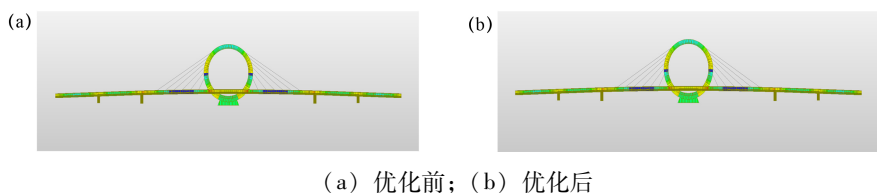


图 3 异形塔混合结构斜拉桥初始张力优化前后弯矩数值

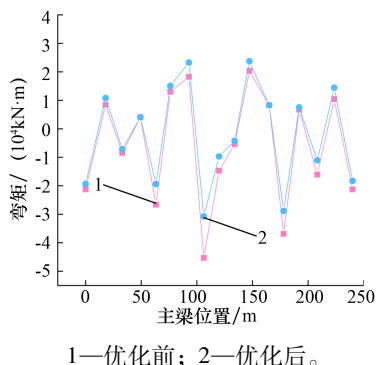


图 4 异形塔混合结构斜拉桥初始张力优化前后主梁弯矩

化前提升 32.1%。初始张力优化后主梁弯矩图较优化前分布更为均匀, 更利于结构受力。

### 3.3 主梁竖向位移

为探究初始张力优化对异形塔混合结构斜拉桥成桥线形的影响, 对优化前后异形塔混合结构斜拉桥主梁位移进行对比分析, 结果如图 5 所示。由图 5 可知: 成桥状态下异形塔混合结构斜拉桥主梁最大竖向位移处位于跨中两侧距桥墩 25 m 处; 优化后主梁最大竖向位移为  $-14.86 \text{ mm}$ , 与优化前主梁最大竖向位移 ( $-16.55 \text{ mm}$ ) 相比, 降低 10.2%。针对主梁整体来说, 初始张力优化后主梁整体竖向位移平均降低 38.2%。综上, 初始张力优化对异形塔混合结构斜拉桥主梁线形变化有显著改善作用, 使主梁线形趋于理想成桥状态。

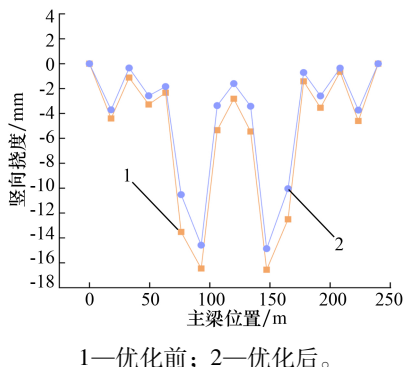


图 5 异形塔混合结构斜拉桥初始张力优化前后主梁竖向位移

## 4 结 论

(1) 影响矩阵法适用于异形塔混合结构斜拉桥初始张拉力的优化研究。初始张力优化后, 斜拉索内力趋近于设计成桥索力, 且桥梁受力得到显著改善。

(2) 初始张力优化后异形塔混合结构斜拉桥主梁最大弯矩相比优化前提升 16.8%, 主梁最小弯矩相比优化前提升 32.1%, 且主梁弯矩分布更利于结构受力。

(3) 初始张力优化可有效控制异形塔混合结构斜拉桥主梁线形变化, 使主梁整体竖向位移在初始张力优化后相比优化前平均降低 38.2%, 且主梁线形趋于理想成桥状态。

## 参考文献:

- [1] 《中国公路学报》编辑部. 中国桥梁工程学术研究综述·2021[J]. 中国公路学报, 2021, 34(2): 1-97.
- [2] 詹建辉, 彭晓彬. 大跨度组合梁斜拉桥结构设计方案研究[J]. 桥梁建设, 2016, 46(4): 85-91.
- [3] 张志田, 吴涛, 方志. 基于高性能材料的大跨径斜拉桥抗风性能分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, 45(5): 11-18.
- [4] 文强, 卢皓, 康炜, 等. 高速铁路大跨钢桁加劲 PC 箱梁斜拉桥设计关键技术研究[J]. 桥梁建设, 2022, 52(5): 107-113.
- [5] 王达, 黎峥, 向胜涛, 等. 混合式叠合梁斜拉桥成桥索力分步优化与控制[J]. 浙江工业大学学报, 2022, 50(5): 524-533.
- [6] 赵雷, 孙才志, 陈文元. 大跨度结合梁斜拉桥的参数敏感性分析[J]. 世界桥梁, 2011(6): 38-41.
- [7] 李鹏飞, 王石磊, 魏思聪, 等. 大型空间异形钢塔斜拉桥拉索张拉控制[J]. 公路交通科技, 2022, 39(10): 49-58.
- [8] 陈代海, 李银鑫, 周帅, 等. 基于影响矩阵法的斜拉桥

(下转第 30 页)

卸料过程中的稳定性进行分析,得到以下结论。

(1) 初始几何缺陷的存在进一步降低了筒仓的抵抗能力,径向位移量增加了 0.039 m。因此,开展钢筒仓设计时,应该选择屈服强度高的材料,以减少缺陷的出现。

(2) 钢筒仓的变形位置多位于中部及下部,应考虑加强其中下位置的强度,在条件许可的情况下,在钢筒仓底部或中部设置加肋钢筋进行加固。考虑几何和材料双非线性分析下的缺陷钢筒仓对实际工程的建设有重要参考意义。

(3) 钢筒仓稳定性设计中的不利因素主要为材料非线性与初始缺陷敏感性,前者对高径比小的钢筒仓影响大,后者对高径比大的钢筒仓影响大。因此,在壳体结构设计中,经济条件允许的情况下,优先选择高强度钢材。随着高径比的增加,钢筒仓的容耗率增大,说明随着高径比的增加,钢筒仓的经济性逐渐增加。因此,在设计钢筒仓时,应该采用高径比较大的结构。

## 参考文献:

- [1] 张翀,舒赣平. 轴压和均匀内压下钢筒仓圆柱壳屈曲承载力研究[J]. 特种结构,2015(4):7.
- [2] 陈新杰,赖海斌,王习国. 钢板筒仓结构稳定承载力研究现状[J]. 江苏建筑,2011(05):37-40.
- [3] TENG J G, SONG C Y, ROTTER J M, Imperfection-sensitivity analysis of shells subject to partial axial compression International Journal of Solids and Structures, 2004,41(24-25):7155-7180.
- [4] ROTTER J M, TENG J G. Elastic stability of cylindrical shells with weld depressions[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1989, 115(5):1244-1263.
- [5] 舒赣平,张翀. 轴压和均匀内压共同作用下钢筒仓圆柱壳弹性临界屈曲应力的分析与研究[C]//中国钢协结构稳定与疲劳分会第12届(ASSF-2010)学术交流会暨教学研讨会论文集. 宁波:中国钢结构协会,2010.
- [6] 粮食钢板筒仓设计规范:GB50322—2011[S]. 北京:中国计划出版,2011.
- [7] Eurocode 3: Design of steel structures; DD ENV 1993-1-1:1992[S]. CEN: European Committee for Standardization, 1992.
- [8] Eurocode 1: Actions on structures; BS EN 1991-4:2006[S]. UK: Standards Policy and Strategy Committee, 2006.
- [9] 陈桂香,刘超赛,蒋敏敏,等. 储料竖向压力对粮仓中小麦粮堆湿热传递的影响[J]. 农业工程学报,2020,36(8):246-253;325.
- [10] 程绪铎,安蓉蓉,曹阳,等. 小麦、稻谷及玉米内摩擦角的测定与比较研究[J]. 食品科学,2009,30(15):86-89.
- [11] Eurocode 3: Design of steel structures; BSEN1993-1-6-2007[S]. UK: Standards Policy and Strategy Committee, 2007.
- [12] 吴霄,肖汝诚. 基于遗传算法的大跨度混合梁斜拉桥索力优化[J]. 江苏大学学报(自然科学版),2014,35(6):722-726.
- [13] ZHANG T, BAI H F. Analysis of cable stayed bridge for APDL-based optimization[J]. Advanced Materials Research, 2011(243):1567-1572.
- [14] 余洋. 双环独塔斜拉桥施工控制与索力研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2012.
- [15] 胡媛媛. 斜拉桥线形与索力非线性算法研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2019.

(上接第 25 页)

斜拉索合理初始张拉力分析[J]. 世界桥梁,2021,49(2):78-83.

- [9] WANG L, XIAO Z, LI M. Cable force optimization of cable-stayed bridge based on multiobjective particle swarm optimization algorithm with mutation operation and the influence matrix[J]. Applied Sciences, 2023, 13(4):2611.
- [10] 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.
- [11] 郑一峰,毛健,尹笑,等. 基于影响矩阵的双塔斜拉桥合理成桥状态研究[J]. 公路,2017,62(2):82-85.