

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2023.02.019

## 独塔混合梁斜拉桥成桥阶段索力优化研究\*

肖勇刚, 张巍

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

**摘要:** 针对混合梁斜拉桥成桥阶段索力优化问题, 提出一种最小弯曲能量法和遗传算法相结合的索力优化方法。先通过最小弯曲能量法得出合理成桥阶段的索力初值, 再通过遗传算法优化斜拉桥索力, 最后求解得到最终成桥索力。结果表明, 相比使用单一优化方法, 采用该方法可更快地优化混合梁斜拉桥索力, 得出的结果也更理想。

**关键词:** 桥梁; 混合梁斜拉桥; 索力优化; 最小弯曲能量法; 遗传算法; 成桥阶段

中图分类号: U441.5

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2023)02-0087-04

混合梁斜拉桥可充分发挥钢和混凝土各自的优点, 提高结构的力学性能, 同时降低造价。目前对混合梁斜拉桥较优索力组合的研究存在局限性<sup>[1]</sup>。Wang P. H. 等采用构型迭代法确定了斜拉桥的索力及恒载构型<sup>[2]</sup>。刘陈韬等提出了独塔双索面斜拉桥索力修正公式<sup>[3]</sup>。颜东煌等基于影响矩阵法、可行域法、应力平衡法与最小弯曲能量法等研发了混凝土斜拉桥成桥状态索力分配方法<sup>[4-5]</sup>。戴杰等以某独斜塔单索面钢结构体系混合梁斜拉桥为工程背景, 基于有效约束集法对斜拉桥成桥索力进行了研究<sup>[6]</sup>。张玉平等将多目标粒子群优化算法应用于某不对称独塔双索面混合梁斜拉桥索力调整, 取得了良好效果<sup>[7]</sup>。严松等结合最小弯曲能量法和应力判别法, 使用 MATLAB 遗传算法对钢斜拉桥成桥索力进行了优化<sup>[8]</sup>。孙平宽等研究了大跨独塔斜拉桥合理成桥索力的确定方法<sup>[9]</sup>。李晓林等将塔梁内力作为函数变量, 采用改进粒子群算法对斜拉桥索力进行了优化<sup>[10]</sup>。目前主要使用应力平衡法和影响矩阵法进行混合梁斜拉桥索力优化, 然而在不同的结构体系中, 斜拉索的调节过程非常复杂, 需采用正装迭代法进行计算, 计算量庞大。本文以某混合梁斜拉桥为工程背景, 结合最小弯曲能量法和遗传算法构建数学模型来优化成桥索力。

## 1 索力优化方法

### 1.1 最小弯曲能量法

最小弯曲能量法的原理是在有限元软件计算中

以弯曲应变能最小为控制目标, 使塔梁弯曲应变能达到最小, 从而得到优化成桥索力。结构简化计算模型见图 1。

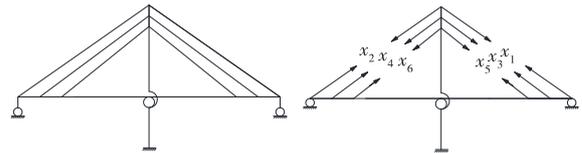


图 1 结构简化计算模型

采用最小弯曲能量法进行计算时, 将原结构斜拉索切断, 用体外荷载代替斜拉索的作用。设体外荷载在第  $i$  对索上的索力为  $x_i$ , 则对于任意截面, 内力  $M$  可表示为<sup>[11]</sup>:

$$M = \sum_{i=1}^n x_i M_i + M_P \quad (1)$$

式中:  $n$  为吊杆数量;  $M_i$  为各截面弯矩;  $M_P$  为恒载在基本结构体系上产生的弯矩。

主梁的弯曲应变能为:

$$U = \int_s \frac{M^2}{2EI} dS = \frac{1}{2} \int_s \frac{1}{EI} (M_P + \sum_{i=1}^n x_i M_i)^2 dS \quad (2)$$

式中:  $E$  为弹性模量;  $I$  为抗弯惯性矩。

主梁的弯曲应变能对于索力的偏导为零, 即  $\partial U / \partial x_i = 0$ 。可将  $n$  个式(2)联立求出  $x_i$ , 根据  $x_i$  即可求出恒载时最小应变能对应的索力。

弯曲能量法将多截面计算转化成有限个截面进行计算。设在主梁上共有  $m$  个计算截面,  $x_i$  作用于截面  $j$  的弯矩为  $M_{ji}$ , 静荷载作用下截面  $j$  的弯

\* 基金项目: 湖南省自然科学基金项目(2019JJ40301); 湖南省教育厅自然科学研究重点项目(21A0196)

矩为  $M'_j$ , 则截面  $j$  的弯矩可表示为:

$$M_j = \sum_{i=1}^n x_i M_{ji} + M'_j \quad (3)$$

应变能为:

$$U = \sum_{j=1}^m \frac{M_j^2}{2EI} = \sum_{j=1}^m \frac{1}{2EI} \left( \sum_{i=1}^n x_i m_{ji} + M'_j \right)^2 \quad (4)$$

$m$  个截面的弯矩矩阵可表示为:

$$[M]_{m \times 1} = [M']_{m \times 1} + [m]_{m \times n} [X]_{n \times 1} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial U}{\partial x_1} = \frac{1}{2EI} \left( \frac{\partial M_1^2}{\partial x_1} + \frac{\partial M_2^2}{\partial x_1} + \dots + \frac{\partial M_m^2}{\partial x_1} \right) = 0 \\ \frac{\partial U}{\partial x_i} = \frac{1}{2EI} \left( \frac{\partial M_1^2}{\partial x_i} + \frac{\partial M_2^2}{\partial x_i} + \dots + \frac{\partial M_m^2}{\partial x_i} \right) = 0 \\ \frac{\partial U}{\partial x_n} = \frac{1}{2EI} \left( \frac{\partial M_1^2}{\partial x_n} + \frac{\partial M_2^2}{\partial x_n} + \dots + \frac{\partial M_m^2}{\partial x_n} \right) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

当  $i=1$  时, 由  $\partial U / \partial x_i = 0$  可得:

$$[m']_{m \times n} \cdot [M]_{m \times 1} = 0 \quad (7)$$

索力之间的关系如下:

$$[X]_{n \times 1} = - \{ [m']_{m \times n} [m]_{m \times n} \}^{-1} \cdot [m']_{m \times n} [M']_{m \times 1} \quad (8)$$

将式(3)~(8)所得索力代入式(1), 即可计算出桥梁任意截面的内力值。但最小弯曲能量法计算出的索力分布不均匀, 需使用遗传算法进行进一步优化。

## 1.2 遗传算法

使用最小弯曲能量法得出合理成桥阶段索力的初值, 再结合遗传算法运用数学模型快速计算合理成桥阶段的优化索力。采用遗传算法优化索力的主要步骤<sup>[12]</sup>:

(1) 以索力为变量, 通过计算得出初始迭代种群, 在 MATLAB 中输入参数。

(2) 控制目标为弯曲应变能最小。将相关约束条件输入 MATLAB 中, 并使用神经网络系统进一步进行整体优化, 以沿索长方向拉索变化量最小为评价条件, 如果符合要求, 则开展后续迭代过程, 否则再次进行计算, 使之符合要求。

(3) 再次对不满足要求的种群中的初始种群进行优化, 以增加种群中满足要求的个体百分比, 若不满足要求的种群占比仍较高, 则重复以上步骤。

(4) 优化完成, 提取优化结果。

## 2 计算实例

### 2.1 工程概况

某拱形独塔双索面钢-混混合梁斜拉桥, 桥跨布

置为 33 m+102 m+183 m, 全桥采用半漂浮体系, 主塔底部高程为 55.774 m, 塔顶高程为 165.274 m。钢-混结合点设置在跨径为 102 m 的边跨中, 距离主塔中心 83.6 m。桥梁立面布置见图 2。

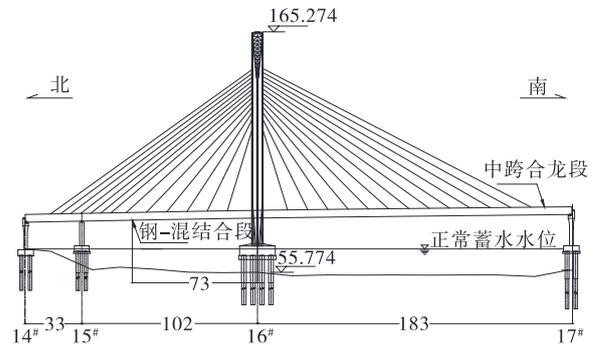


图2 混合梁斜拉桥立面布置示意图(单位:m)

主跨采用钢箱梁, 箱梁宽度为 44.5 m, 边跨有 50.3 m 采用混凝土梁, 钢箱梁与混凝土梁均采用单箱五室截面, 梁高 4 m (沿中心线处)。主桥为独塔扇形双索面斜拉桥, 主塔北侧混凝土梁上有 7 对斜拉索, 钢箱梁上有 6 对斜拉索; 南侧钢箱梁上有 13 对斜拉索。主塔南侧的斜拉索由南向北编号为 J13、J12、...、J1, 北侧的斜拉索由南向北编号为 A1、A2、...、A13。

### 2.2 有限元建模

通过 MIDAS/Civil 2020 构建桥梁结构模型, 全桥共划分为 508 个节点、480 个单元。斜拉索采用只受拉桁架单元模拟, 塔和梁均采用普通梁单元模拟, 斜拉索锚固端分别与塔柱、主梁节点刚性连接。有限元模型见图 3。

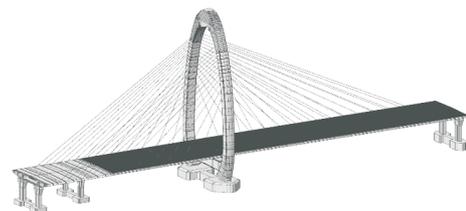


图3 桥梁有限元模型

## 3 索力优化结果

优化前后斜拉索索力见图 4。由图 4 可知: 索力优化前最大、最小索力差值为 5 719 kN, 优化后为 5 195 kN, 减少 9.2%; 优化前边跨侧混凝土梁段 A11~A13 斜拉索的索力较大, 优化后索力明显减小, 降幅均在 4% 以上; 优化后主跨侧钢箱梁段 J3、J4 斜拉索索力分别增加 5.3%、5.9%。通过索力优

化,相邻斜拉索之间索力差值减小,减少了相邻索力的突变,成桥状态下索力分布更均匀。

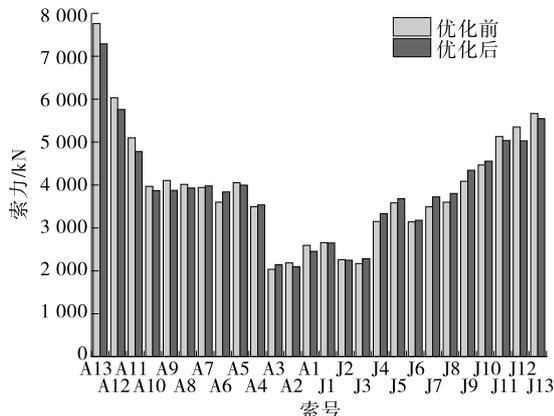


图 4 优化前后斜拉索索力对比

索力优化后,塔梁结构的内力及线形均会发生变化。为验证索力优化对内力及线形的影响,对主梁应力、弯矩、线形和索塔偏位进行对比分析。优化前后主梁上下缘最大应力见图 5、图 6,主梁弯矩见图 7,主梁成桥状态竖向累积位移见图 8,索塔偏位见图 9。

由图 5~6 可知:索力优化前后混凝土梁段上下缘应力相较于钢箱梁段变化较小,这是由于混凝土

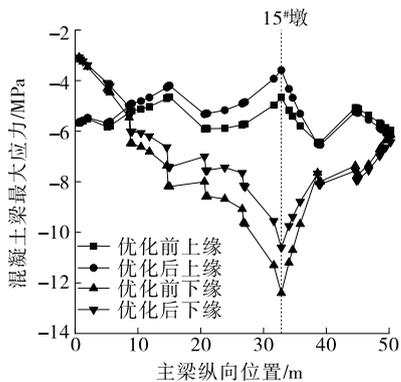


图 5 索力优化前后混凝土梁上下缘应力

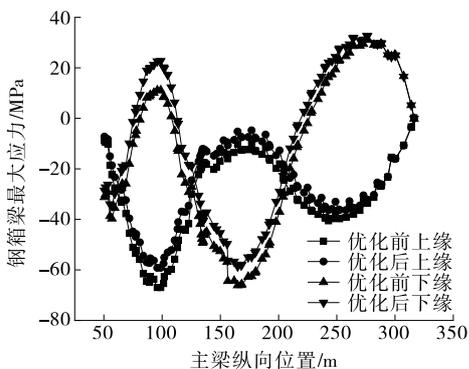


图 6 索力优化前后钢箱梁上下缘应力

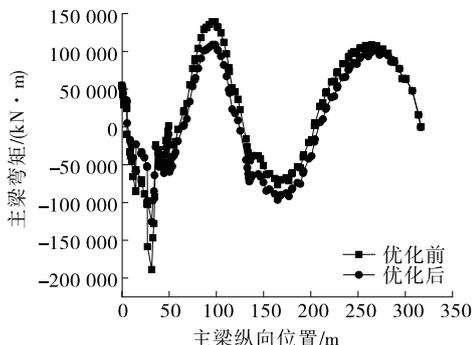


图 7 索力优化前后主梁弯矩

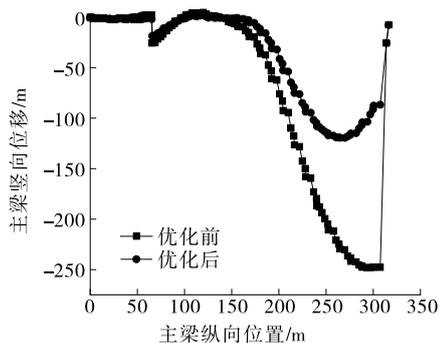


图 8 索力优化前后主梁竖向累积位移

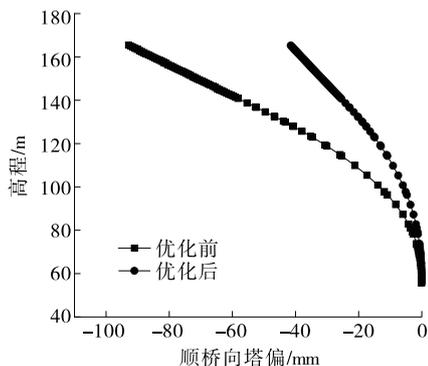


图 9 索力优化前后索塔偏位

梁的预应力作用与自重作用占比较大,索力变化产生的影响较小;在 15# 桥墩位置,混凝土梁上下缘应力差值较大,优化前上下缘应力差值为 7.73 MPa,优化后上下缘应力差值为 7.01 MPa,减少 9.3%;优化后钢箱梁各节段上下缘应力大都不不同程度下降,但在 102 m 边跨跨中位置上缘应力峰值较大,优化前上缘应力峰值为 -67.0 MPa,优化后上缘应力峰值为 -59.2 MPa,减少 11.6%。索力优化改变了应力在截面上的分布,降低了结构的内力。

由图 7 可知:在钢-混结合段,主梁弯矩变化较大,优化前钢-混结合段主梁弯矩产生突变,峰值达 -188 826 kN·m,优化后峰值为 -125 655 kN·m,

减小 33.5%；优化后主梁弯矩图相对于优化前更平顺，结构受力更合理。

由图 8 可知：混凝土梁因为刚度较大，索力变化对其竖向累积位移几乎没有影响；主塔北侧钢箱梁因里程较短且受到混凝土梁段的支撑作用，其竖向累积位移较小；优化后主塔南侧合龙段钢箱梁竖向累积位移最大值由 248.2 mm 减小至 120.0 mm，减小 51.7%。

由图 9 可知：优化前塔顶偏位为 92.8 mm，优化后塔顶偏位为 41.5 mm，减少 55.3%。

### 4 结语

混合梁斜拉桥属于高阶超静定结构，采用正装迭代法计算，计算过程复杂、烦琐，而采用最小弯曲能量法和遗传算法建立模型进行索力优化，可在很大程度上避免求解繁杂的影响矩阵，在结构较复杂时其计算效率比普通优化方法高。本文以某混合梁斜拉桥为研究对象，利用最小弯曲能量法，结合遗传算法求解得到索力最优解。相较于优化前，索力优化后斜拉桥主梁应力、弯矩、线形和索塔偏位的峰值都得到不同程度改善，且变化更平顺，符合斜拉桥成桥阶段的要求。

### 参考文献：

[1] 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(5):17-37.

[2] WANG P H, TSENG T C, YANG C G. Initial shape of

cable-stayed bridges [J]. Computers & Structures, 1993,46(6):1095-1106.

[3] 刘陈韬,李新生,贾春鑫,等.独塔不对称斜拉桥拉索索力施工监控研究[J].公路与汽运,2022(2):105-109.

[4] 颜东煌,李学文,刘光栋,等.混凝土斜拉桥合理成桥状态确定的分步算法[J].中国公路学报,2003,16(1):43-46.

[5] 颜东煌,李学文,刘光栋,等.用应力平衡法确定斜拉桥主梁的合理成桥状态[J].中国公路学报,2000,13(3):51-54.

[6] 戴杰,屈骏,乔建刚,等.基于有效约束集法的混合梁斜拉桥合理成桥状态确定方法[J].科技导报,2014,32(34):69-77.

[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] 严松,颜鹏飞.基于遗传算法的钢斜拉桥成桥索力优化[J].中外公路,2021,41(2):198-202.

[9] 孙平宽,方艳辉.大跨独塔斜拉桥合理成桥索力确定方法研究[J].公路交通科技(应用技术版),2014,10(9):221-222.

[10] 李晓林,邓洁.基于改进粒子群算法的斜拉桥索力优化方法[J].公路与汽运,2021(5):106-110.

[11] 徐冰霜.基于最小弯曲能量法的斜拉桥索力优化[J].山西建筑,2017,43(16):190-191.

[12] 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.

收稿日期:2022-03-07

\*\*\*\*\*  
(上接第 61 页)

[14] LIAKOPOULOS A C. Transient flow through unsaturated porous media [D]. Berkeley: University of California, 1965.

[15] GAWIN D, BAGGIO P, SCHREFLER B A. Coupled heat, water and gas flow in deformable porous media[J]. International Journal for Numerical Methods

in Fluids, 1995,20(8/9):969-987.

[16] SCHREFLER B A, SCOTTA R. A fully coupled dynamic model for two-phase fluid flow in deformable porous media[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2001,190(24/25):3223-3246.

收稿日期:2022-04-10

\*\*\*\*\*  
(上接第 77 页)

[4] 吴国雄,叶新雨,余苗,等.基于黏弹性的橡胶改性沥青路面抗滑性能研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2020,39(2):81-86.

[5] 何俊辉,陈海涛,赵艳娜,等.基于灰关联法的沥青路面抗滑性能影响因素研究[J].中外公路,2020,40(6):47-52.

[6] 王慧,王彝乾,李俊,等.石灰岩排水沥青路面路用性能及其抗滑持久性研究[J].中外公路,2021,41(6):73-76.

[7] 文斌,曹东伟.高速公路路面抗滑力与交通事故的统计分析[J].公路交通科技,2006,23(8):72-75.

收稿日期:2022-03-06