

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2024.02.015

基于 Midas 有限元下的大跨斜拉桥成桥索力优化

杨 辉

(中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710075)

摘 要: 为了深化对大跨斜拉桥成桥索力优化问题的认识,根据斜拉桥合理成桥状态的确定原则,阐述各类方法的求解思路与优化过程。大跨斜拉桥成桥索力优化,仅靠一种方法完成索力优化是不够精确的。通过论述斜拉桥合理成桥状态的基本原则,介绍了常用的几种成桥索力优化方法。首先选择最小弯曲能法获得初始索力,并使用影响矩阵法进行二次优化,对成桥索力状态进行叙述。基于大型有限元软件 Midas Civil 建立斜拉桥模型,以合理成桥状态为控制目标,对背景桥梁成桥索力进行优化。

关键词: 索力优化;影响矩阵;二次优化;控制目标

中图分类号: U448.27

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)02-0062-05

1 工程概况

本文以浙江某斜拉桥的结构参数进行研究,该桥为一座双塔双索面的半飘浮体系斜拉桥,主桥全长 908 m,跨径布置为 70 m+160 m+448 m+160 m+70 m 的五跨连续结构,边中跨比 0.51,两端分别设有一个辅助墩和一个过渡墩。主梁为高 3.5 m 的扁平钢箱梁,桥面宽 37.1 m。索塔为高 178.8 m 的钢筋混凝土结构,索塔横梁以上为三角形,而横梁以下的塔柱内收,整个索塔呈“钻石”形状,具有较好的整体刚度和抗风稳定性。斜拉索与钢箱梁通过耳板连接,与索塔通过整体钢锚箱连接,全桥共布置 56 对平行钢丝斜拉索。桥型布置如图 1 所示。

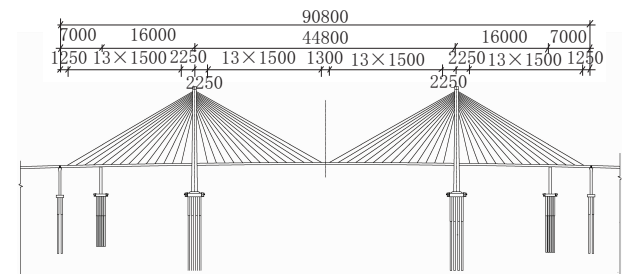


图 1 桥型布置(单位:cm)

2 有限元模型建立

使用有限元软件 Midas Civil 对背景桥梁进行建模分析,如图 2 所示,全桥共建立 485 个节点、112 个桁架单元和 348 个梁单元。

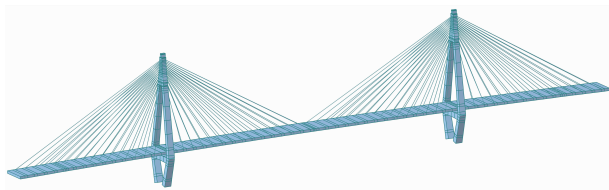


图 2 全桥有限元模型

3 成桥索力优化过程

3.1 最小弯曲能法确定初始索力

最小弯曲能法能够反映抗弯刚度对弯矩的权效应,且其计算所得主梁和索塔弯矩均较小、索力分布较为均匀,其只能考虑恒载作用下索力优化的特性十分符合背景斜拉桥在恒载作用下索力的初步优化。根据文献^[1-4]研究表明,实际运用该方法的主要步骤是:(1)建立斜拉桥全桥模型,斜拉索不施加初始索力,将模型中主梁和索塔的抗弯刚度缩小至原来的 1/10⁵,使得桥梁在恒载作用下静力计算,获得一组索力。(2)将主梁和索塔的抗弯刚度恢复为正常值,并将上一步获得的索力作为初拉力施加在各个桁架单元上,并将模型在恒载作用下进行计算,计算所得结果即采用最小弯曲能法计算的初始索力。采用最小弯曲能法计算所得索力如图 3 所示。下文中的索力结果中仅展示半桥单侧索力。

通过图 3 可以发现,使用最小弯曲能法确定的初始成桥索力值基本符合“短索小,长索大”的分布,但仍有部分出现突变,比较明显的是边跨的 B13 索和索塔两侧的 B1 索和 Z1 索。最大索力为 B13 索,达到了 4 978.63 kN,远大于最外侧 B14 索。这是由于辅助墩和端部配重的影响,使 B13 索发生了突变。B1 索

收稿日期: 2023-01-03

作者简介: 杨辉(1988—),男,本科,工程师,从事桥梁设计工作。

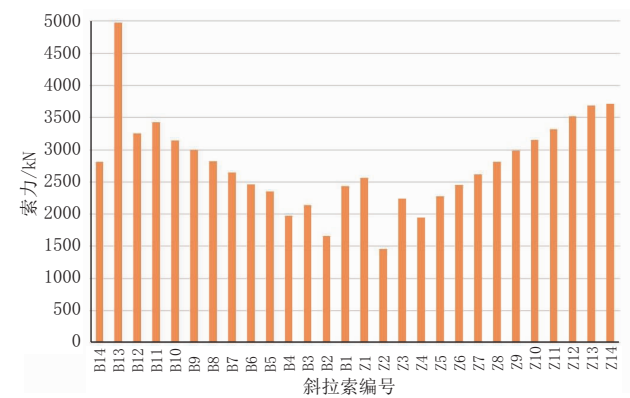


图3 最小弯曲能法确定的初始索力

和Z1索出现突变是由于距离梁塔交接处,该段主梁的自重较大,需要更多索力来平衡。最小索力为Z2索,为1457.71kN,符合该位置的索力分布。从边跨和跨中的索力分布情况来看,跨中侧的索力变化趋势比边跨侧的更加均匀,突变较少。因此,在下一步优化过程中,应重点考虑边跨侧。初始索力确定后,将其代入全桥模型,选取的力学参数有弯矩和位移,探究索力对整体结构的影响,为下一步索力优化提供参考。各力学指标的分析结果如图4~图9所示。

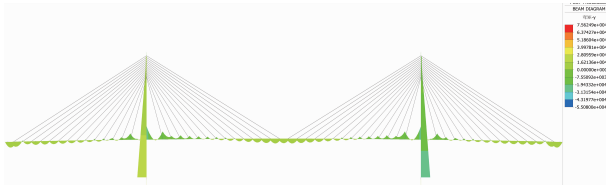


图4 初始索力下的全桥弯矩(单位:kN·m)

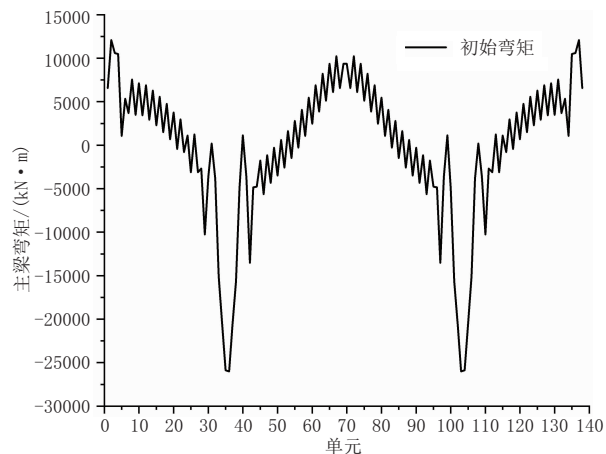


图5 初始索力下的主梁弯矩曲线

(1)对弯矩的影响

根据图4和图5可知,初始索力下的主梁弯矩变化趋势为:弯矩沿跨中对称分布,负弯矩集中在梁塔交接处及两侧,并分别沿边跨和中跨逐渐减小,发展成为正弯矩,最大正弯矩出现在跨中和边跨端部,索塔两侧的弯矩基本对称。变化趋势符合斜拉桥结构的弯矩分布,但仍然存在一些不足。首先是负弯矩较大,最大负弯矩出现在梁塔交接处,为26014.93kN·m,

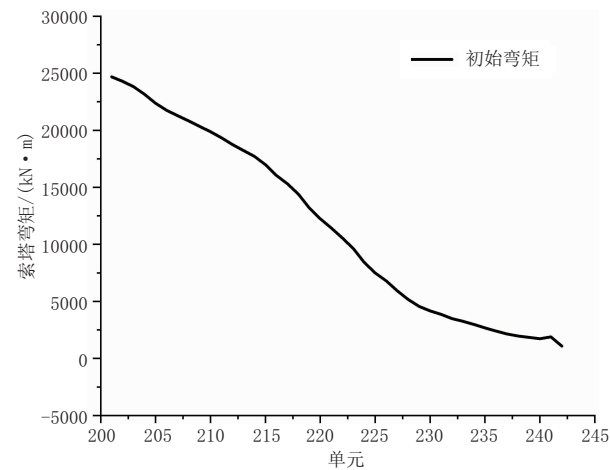


图6 初始索力下的索塔弯矩曲线(单元号按塔根到塔顶依次排序)

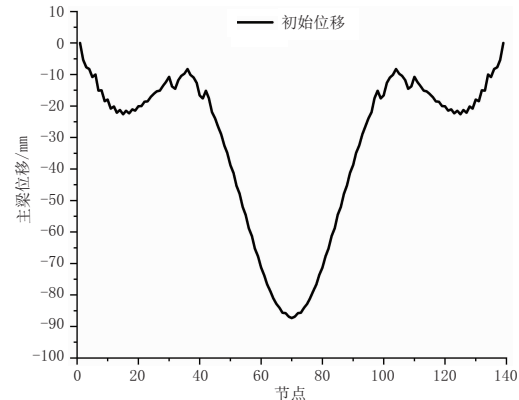


图7 初始索力下主梁竖向位移曲线

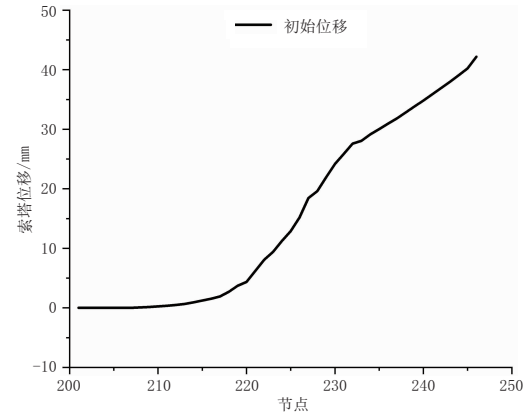


图8 初始索力下索塔顺桥向位移曲线(单元号按塔根到塔顶依次排序)

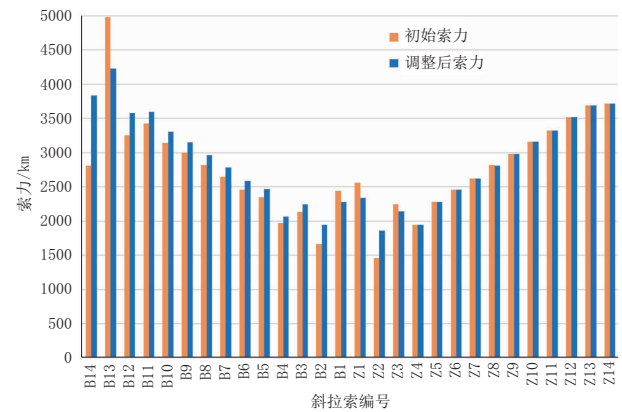


图9 调整前后的索力值对比

这是支座反力和两侧的索力共同影响的。其次是出现负弯矩的梁段较长,中跨的负弯矩约占了一半的梁段,同时跨中弯矩较大,为 10 228.57 kN·m。因此,在优化过程中,要尽量降低主梁负弯矩。

通过图 4 和图 6 可以发现,索塔的弯矩从塔根到塔尖逐渐减小,最大弯矩为 24 678.06 kN·m,最小弯矩为 1 081.34 kN·m,相差 23 596.72 kN·m,差值较大。索塔呈现“向内倒”的趋势,不符合“塔直”的原则,因此需要进一步优化索塔弯矩,使其变化差值减小。

(2)对位移的影响

通过图 7 可知,在最小弯曲能法确定的初始索力影响下,主梁的竖向位移沿跨中对称,其中跨中的竖向位移最大,为 87.33 mm,边跨端部的位移最小。同时,边跨的竖向位移相对中跨较小,边跨最大竖向位移在边跨中部,为 22.60 mm,与中跨最大位移相差 64.73 mm,需要对跨中的位移进行改善。

根据图 8 可以发现,索塔的顺桥向位移沿塔根到塔顶逐渐增大,最大值为 42.19 mm,呈现向跨中侧偏移的趋势。因此需要进一步优化,减小塔顶的偏移量。

3.2 基于影响矩阵法的索力优化

为使模型达到更加合理的成桥状态,在最小弯曲能法确定的初始索力的基础上,使用影响矩阵法进行二次索力优化,使其满足“塔直梁平”“索力均匀变化”的规律和规范的要求^[5-9]。影响矩阵法不是一种独立的方法,而是一个建立斜拉索索力与优化目标间函数关系的工具。根据矩阵位移法的原理^[10],在结构满足线性叠加原理的基础上,受调向量 $\{D\}$ 、施调向量 $\{X\}$ 和影响矩阵 $[C]$ 可通过以下关系来构建数学模型。

$$[C]\{X\}=\{D\} \quad (1)$$

3.2.1 受调向量的确定

受调向量即为想要控制的约束目标,包括结构在索力影响下的弯矩、位移、应力等力学指标组成的列向量^[11]。本文通过对最不利荷载组合效应的计算,使用应力平衡法和规范来推导出成桥状态时应当满足的约束目标要求。具体思路为:主梁在恒载下的应力受其轴力和弯矩的变化影响较大,同时索力的水平分力影响着轴力,竖向分力影响弯矩,因此主梁应力是斜拉桥优化过程中需要重点优化的对象。恒载和可变作用是影响桥梁结构内力的主要因素,最不利荷载组合效应可通过模拟实际运营中不同的荷载

工况(见表 1)来计算,然后结合规范和应力平衡法来确定各力学指标的可行性域,取其中值作为合理成桥状态的约束目标。

表 1 成桥运营中的荷载工况

工况序号	工况内容
1	恒载 + 车辆荷载 + 人群荷载
2	恒载 + 车辆荷载 + 人群荷载 + 系统升温 30℃
3	恒载 + 车辆荷载 + 人群荷载 + 系统降温 30℃
4	恒载 + 车辆荷载 + 人群荷载 + 系统升温 30℃ + 索梁温差 10℃
5	恒载 + 车辆荷载 + 人群荷载 + 系统降温 30℃ + 索梁温差 10℃

注:索梁温差按照拉索比主梁和索塔升温 10℃计算,日照温差按照主梁顶板升温 5℃计算。

(1)主梁截面上下缘应力控制条件^[5-9]

a. 主梁拉应力控制条件

在恒载和活载作用下,主梁截面上下缘产生的最大应力 σ_{sl} 、 σ_{xl} 应满足:

$$\sigma_{sl} = -\frac{N_d + N_y}{A} - \frac{M_d}{W_s} + \sigma_{sm} \leq [\sigma_l] \quad (2)$$

$$\sigma_{xl} = -\frac{N_d + N_y}{A} + \frac{M_d}{W_x} + \sigma_{xm} \leq [\sigma_l] \quad (3)$$

b. 主梁压应力控制条件

同理,在恒载以及活载作用下,主梁截面上下缘产生的最小应力 σ_{sa} 、 σ_{xa} 应满足:

$$\sigma_{xa} = -\frac{N_d + N_y}{A} + \frac{M_d}{W_x} + \sigma_{xn} \leq [\sigma_a] \quad (4)$$

$$\sigma_{sa} = -\frac{N_d + N_y}{A} - \frac{M_d}{W_s} + \sigma_{sn} \leq [\sigma_a] \quad (5)$$

式中: N_d 为除预加力作用外恒载对主梁作用产生的轴力(以压为正); M_d 为恒载(包括自重和预应力)产生的弯矩(以引起下缘受拉为正); N_y 为全部预加力对主梁作用产生的轴力(以压为正); σ_{sm} 、 σ_{xm} 为活载作用下截面上、下缘产生的最大应力(以拉为正); σ_{sn} 、 σ_{xn} 为活载作用下截面上、下缘产生的最小应力(以拉为正); W_s 、 W_x 分别为截面上、下缘抗弯截面模量; A 为主梁面积; $[\sigma_l]$ 为材料的允许拉应力; $[\sigma_a]$ 为材料容许压应力。

(2)主梁恒载弯矩可行域

如果主梁是混凝土梁,预应力已知,则 N_y 已知。如果主梁是钢箱梁截面,则 $N_y=0$,则上式可以得到;

$$M_d \geq \left[-\frac{N_d + N_y}{A} - [\sigma_l] + \sigma_{sm} \right] W_s = M_{dl2} \quad (6)$$

$$M_d \leq \left[\frac{N_d + N_y}{A} + [\sigma_l] - \sigma_{xm} \right] W_x = M_{dl1} \quad (7)$$

$$M_d \geq \left[\frac{N_d + N_y}{A} + [\sigma_a] - \sigma_{xn} \right] W_x = M_{da2} \quad (8)$$

$$M_d \leq \left[-\frac{N_d + N_y}{A} - [\sigma_a] + \sigma_{sn} \right] W_s = M_{da1} \quad (9)$$

主梁的弯矩可行域控制正弯矩可以为 $M_{d1} = \min(M_{d11}, M_{da1})$, 控制负弯矩为 $M_{d2} = \max(M_{d12}, M_{da2})$, 主梁的恒载弯矩可行域即为:

$$M_{d2} \leq M_d \leq M_{d1} \quad (10)$$

通过上式获得了恒载弯矩可行域 $[M_{d1}, M_{d2}]$, 取其各关键截面的中值即可得到目标弯矩向量 $\{M\}$, 而最小弯曲能法成桥状态下的弯矩向量作为初始弯矩向量 $\{M_0\}$, 将两者作差即为优化过程中的调整量 $\{\Delta M\}$ 。

$$\{\Delta M\} = \{M\} - \{M_0\} \quad (11)$$

3.2.2 施调向量的确定

施调向量是结构中能够通过调整数值进而改变结构中目标受调向量的由若干个独立元素组成的列向量, 即为斜拉索索力组成的向量 $\{F\}$, 而最小弯曲能法确定的初始索力记为 $\{F_0\}$, 索力调整向量即为:

$$\{\Delta F\} = \{F\} - \{F_0\} \quad (12)$$

3.2.3 影响矩阵的确定

对斜拉桥进行索力调整时的影响矩阵即为桥梁结构内力、应力、位移等目标参数变化而组成的矩阵。可以看出, 该法并不是一个单独的计算方法, 而是基于其他方法来优化, 通过影响矩阵来形成设计变量和理想状态目标之间的数学关系, 从而实现对斜拉桥索力的二次优化。

记影响矩阵为 $[C]$

$$[C] = [\{C_1\} \{C_2\} \cdots \{C_k\}] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & \cdots & C_{1k} \\ C_{21} & C_{22} & \cdots & C_{2k} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ C_{m1} & C_{m2} & \cdots & C_{mk} \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中: C_{mk} 表示第 k 根斜拉索发生单位索力变化而引起的第 m 个控制截面力学指标的变化量。

3.3 索力优化结果验证

按照上一节影响矩阵法的优化思路, 进行了多次迭代计算, 最终获得了一组新的索力。调整后, 索力与初始索力的对比结果如图 9 所示。

从图 9 可以发现, 优化调整后的索力变化更加均匀。除了少量突变外, 均符合“短索索力小, 长索索力大”的趋势, 但突变值比初始索力小。最大索力仍为边跨侧的 B13 索, 为 4 289.99 kN, 比初始索力 4 978.63 kN 减少了 13.8%。最小索力仍为中跨的 Z2 索, 索力值为 1 857.91 kN, 比初始索力 1 457.72 kN

增加了 27.5%。B1 索、Z1 索和 Z3 索有所减小, 但减幅较小。中跨的 Z4~Z14 几乎没有变化, 证明最小弯曲能法对中跨索的优化质量高于边跨索。

为进一步验证优化调整后的索力对整体结构的影响, 将其代入 Midas Civil 全桥模型, 仍然选取弯矩和位移两个力学指标, 并与初始索力下的成桥状态进行对比, 验证其优化索力的合理性。结果如图 10~图 14 所示。

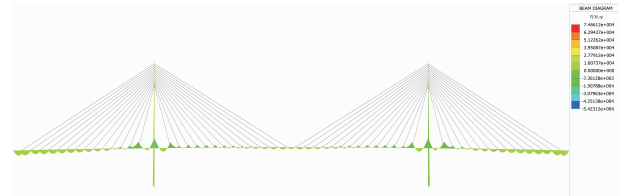


图 10 调整索力后的全桥弯矩 (单位: kN·m)

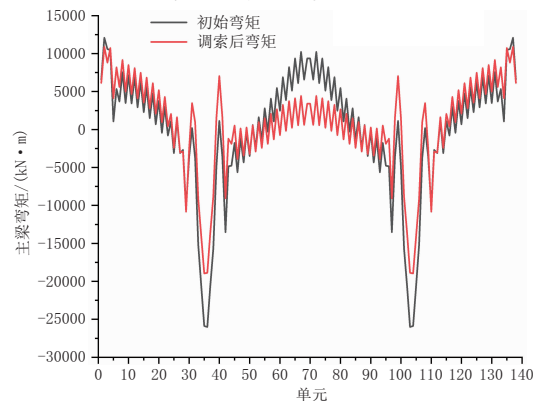


图 11 调索前后的主梁弯矩对比

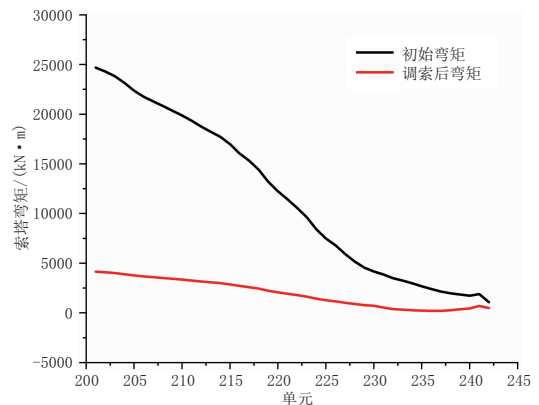


图 12 调索前后的索塔弯矩对比 (单元号按塔根到塔顶依次排序)

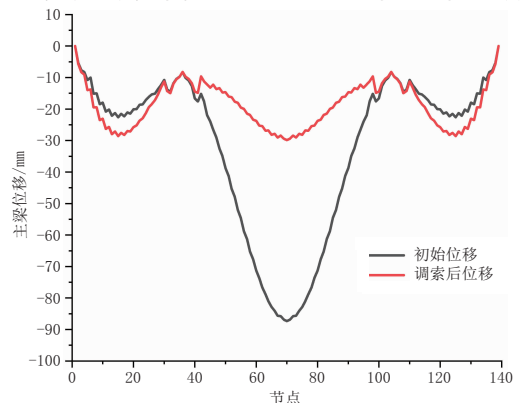


图 13 调索前后主梁竖向位移对比

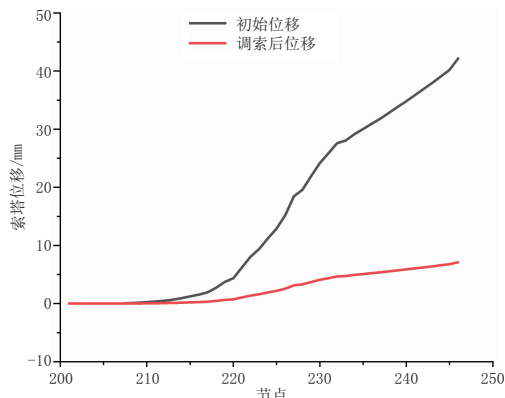


图 14 调索前后索塔顺桥向位移对比(单元号按塔根到塔顶依次排序)

(1) 弯矩的对比

根据图 10 和图 11 可知,优化索力后的主梁弯矩与初始弯矩变化趋势相同,但更加均匀,有效降低了跨中正弯矩和梁塔交接处的负弯矩。调整前后的正弯矩最大减小量为 $5\,975.21\text{ kN}\cdot\text{m}$,负弯矩的最大减小量为 $7\,126.23\text{ kN}\cdot\text{m}$ 。全桥的最大正弯矩为 $10\,900.58\text{ kN}\cdot\text{m}$,在边跨端部处,主要来源于端部压重的影响;最大负弯矩为 $-18\,959.43\text{ kN}\cdot\text{m}$,仍然在梁塔交接处。

由图 10 和图 12 可知,优化索力后有效降低了索塔的弯矩,从塔根到塔顶的弯矩曲线更加平缓。最大弯矩为 $4\,155.13\text{ kN}\cdot\text{m}$,在塔根位置,比初始最大弯矩减小了 $20\,522.93\text{ kN}\cdot\text{m}$,最小弯矩为 $202.32\text{ kN}\cdot\text{m}$,靠近塔顶位置处。通过索力优化让索塔弯矩更加平顺,改善了优化前“向内倒”的趋势。

(2) 位移对比

根据图 13 可以发现,索力优化有效减小了主梁的跨中竖向位移,最大竖向位移为 -29.86 mm ,比优化前减小了 65.5% ,避免了较大的跨中挠度。同时,中跨和边跨的跨中竖向位移值较为接近,挠度均小于 30 mm ,证明优化索力能有效控制斜拉桥的主梁线型。

从图 14 可以发现,索力优化调整后的索塔顺桥向位移曲线比较平顺,接近于直线,最大位移出现在塔顶,为 7.11 mm ,比调索前减小了 83.1% ,证明优化索力能有效改善斜拉桥的索塔线型,能防止出现较大的偏位。

通过上文对比索力优化前后的索力分布情况,以及弯矩、位移两个力学指标,可以说明:在使用最小弯曲能法得到一组初始索力的前提下,再使用影响矩阵法的思想进行二次优化得到的该桥索力更加满足合理成桥状态。不仅索力分布更加均匀合理,而

且对整体结构的弯矩和位移都有明显的改善效果,让背景桥梁的成桥状态极大地接近“塔平梁直”的理想状态。因此,将此次优化得到的索力作为该桥的合理成桥索力。

4 结 语

(1)本文介绍了使用背景桥梁的工程概况。该桥为浙江的一座双塔双索面钢箱梁斜拉桥,并介绍了该桥的主梁、索塔及斜拉索布置情况。

(2)本文介绍了桥梁有限元建模的基本概念。本文使用有限元软件 Midas Civil 对背景桥梁进行建模分析,并叙述了建模情况。

(3)对成桥索力的优化过程进行叙述,使用最小弯曲能法确定的初始索力部分索突变较大,不够均匀,其成桥状态下的主梁负弯矩较大,索塔塔根弯矩较大,塔顶较小。线形方面,主梁跨中位移较大,索塔的塔顶位移较大。因此,该组索力不够理想。

(4)在使用影响矩阵法进行二次索力优化后,使索力突变值较大的索有明显减小,整体变化更加均匀,并对主梁的内力和线形均有所改善。因此,以二次优化的索力作为该桥的合理成桥索力。

参考文献:

- [1] 张劲文.斜拉桥施工控制中的参数识别[J].广东公路交通,2002(S1): 55-57.
- [2] 戈士寅.斜拉桥成桥和施工阶段索力优化应用研究[D].重庆:重庆交通大学,2009.
- [3] REN W X, BLANDFORD G E, HARIK I K. Roebling suspension bridge. I: finite element model and free vibration response[J]. Journal of Bridge Engineering, ASCE, 2004, 9(2): 110-118.
- [4] 游渊.单塔双索面斜拉桥索梁锚固区应力分析[D].重庆:重庆交通大学,2013.
- [5] ATMACA B, DEDE T, GRZYWINSKI M. Optimization of cables size and prestressing force for a single pylon cable-stayed bridge with Jaya algorithm[J]. Steel and Composite Structures, 2020, 34(6): 853-862.
- [6] 程宇鹏.新型索辅梁桥关键设计参数敏感性分析[D].重庆:重庆交通大学,2011.
- [7] 高恩全.单索面宽体混凝土斜拉桥设计关键问题研究[D].杭州:浙江大学,2013.
- [8] 王子健.大跨钢梁斜拉桥索梁锚固结构空间受力行为及设计优化研究[D].成都:西南交通大学,2015.
- [9] JAN B, JAROSLAV O, JOSEF V. Extradosed bridge-theoretical and experimental verification[C]. Procedia Engineering, 2013(65): 327-334.
- [10] 蒋彧.大跨径钢桁斜拉桥力学行为分析[D].重庆:重庆交通大学,2012.
- [11] 张文献,刘旭光,李东炜,等.斜拉桥成桥及施工阶段的索力优化[J].东北大学学报(自然科学版),2009,30(8):1201-1204.