

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

戴杰¹, 屈骏², 乔建刚³, 秦凤江¹

1. 长安大学公路学院, 西安 710064
2. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 西安 710075
3. 天津市市政工程设计研究总院, 天津 300051

摘要 针对混合梁斜拉桥的结构特点, 提出基于有效约束集法的混合梁斜拉桥合理成桥状态优化方法。以混合梁斜拉桥主梁、桥塔的弯曲及拉压能量之和为目标函数, 以钢箱梁段竖向位移、桥塔水平位移、主梁上下缘及桥塔两侧应力、斜拉索索力及其均匀性为约束条件, 建立混合梁斜拉桥合理成桥状态的二次规划数学模型, 采用有效约束集算法进行合理成桥状态的优化。实例优化及比较结果显示, 优化所得成桥状态, 主梁竖向位移 $-22\sim 8$ mm, 桥塔塔顶水平位移为向主跨侧偏 20 mm, 结构整体线形平顺; 钢箱梁上下缘及钢桥塔两侧应力为 $-84.43\sim 16.38$ MPa, 混凝土主梁上下缘及混凝土桥塔两侧应力为 $-16.31\sim -0.003$ MPa, 结构内力及应力均与无约束最小弯曲能量法计算结果相近; 斜拉索索力为 2061~2457 kN, 其分布比无约束最小弯曲能量法的计算结果更均匀, 且边墩具有更大的压力储备, 表明该方法的有效性和优越性。

关键词 混合梁斜拉桥; 合理成桥状态; 二次规划; 有效约束集法

中图分类号 U448.27

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.34.010

Optimization Analysis of Reasonable Completion State for Cable-stayed Bridge with Hybrid Girder Based on Active Set Method

DAI Jie¹, QU Jun², QIAO Jiangan³, QIN Fengjiang¹

1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China
2. CCCC First Highway Consultants Company Limited, Xi'an 710075, China
3. Tianjin Municipal Engineering Design & Research Institute, Tianjin 300051, China

Abstract According to the structural characteristics of the cable-stayed bridge with hybrid girder, an active set method is proposed to determine the reasonable completion state for the cable-stayed bridge with hybrid girder. A quadratic programming model is built, with the total bending and axial energy of the girder and the pylon as the objective function, and the vertical displacement of the steel box girder, the horizontal displacement of the pylon, the normal stress in the concrete girder and pylon, the cable force and their distributional uniformity as the constraint conditions. The active set method is employed to optimize the completion state of the cable-stayed bridge with hybrid girder. The optimization and comparison results show that under the condition of the completion state obtained through the method proposed in this paper, a smooth shape of the whole structure is obtained, with the vertical displacement of the main girder in the range of $-22\sim 8$ mm, with the top of the pylon having a horizontal pre-deviation of 20 mm to the main span, and with the internal force and the normal stress in the whole structure all similar with what obtained from the unconstraint minimum bending energy method. The normal stresses in the steel girder and the steel pylon are in the range of $-84.43\sim 16.38$ MPa, and the

收稿日期: 2014-06-19; 修回日期: 2014-09-11

基金项目: 中国博士后科学基金项目(2014M552399)

作者简介: 戴杰, 博士研究生, 研究方向为大跨径钢结构与钢-混凝土组合结构桥梁基本理论与应用, 电子信箱: counter_dj@163.com

引用格式: 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.

normal stresses in the concrete girder and the concrete pylon are in the range of $-16.31-0.003$ MPa, and the cable force is in the range of 2061–2457 kN, which are in a more uniform distribution than that obtained from the unconstraint minimum bending energy method, with the side piers having a more pressure reservation. Thus, the results show the great effectiveness and superiority of the method.

Keywords cable-stayed bridge with hybrid girder; reasonable completion state; quadratic program; active set method

混合梁斜拉桥作为一种组合结构桥梁,一般中跨主梁采用钢结构,边跨(某些包括伸入主跨部分)主梁采用混凝土结构,这种结构体系可充分发挥混凝土材料的锚固和压重作用以及钢材跨越能力大的特点,使得结构的整体刚度大、造价省、跨径布置也很灵活,因此其适用范围越来越广泛。据统计,目前国内外主跨 800 m 以上的斜拉桥,主梁大部分采用混合梁的形式,例如,1995 年,法国建成主跨 856 m 的 Normandy 大桥;1999 年,日本建成主跨 890 m 的 Tatara 大桥;2009 年,中国建成主跨 1018 m 的昂船洲大桥、主跨 926 m 的鄂东长江公路大桥以及主跨 816 m 的荆岳长江公路大桥;2012 年,俄罗斯建成主跨 1104 m 的 Russky Island 桥等。随着混合梁斜拉桥的应用越来越广泛、跨径越来越大、结构体系形式越来越多样化,其合理成桥状态的确定问题也越来越成为斜拉桥设计和计算分析的关键问题,而通过调整、优化成桥索力,以获得合理的成桥内力及线形,往往成为确定斜拉桥合理成桥状态的主要手段^[1,2]。

目前,国内外针对斜拉桥的合理成桥状态进行了大量卓有成效的研究,提出了多种确定斜拉桥合理成桥状态的优化方法。常用的方法可分为:指定受力状态或位移状态的索力优化方法,如刚性支连续梁法^[3]、零位移法、刚性索法、内力(应力)平衡法^[4,5]、零初索力法及零支反力法等;无约束的索力优化方法,如最小弯曲能量法^[6]、弯矩最小法等;有约束的索力优化方法^[7,8],如用索量最小法^[9]、分步算法^[10]、最大偏差最小法及影响矩阵法^[11,12]等。上述方法各有其特点及适用范围,但单一采用某种方法均有其局限性,指定受力状态或位移状态的优化方法无法兼顾斜拉桥梁、塔、索等各个构件的变形和受力^[13],无约束的最小弯曲能量法和弯矩最小法无法考虑活载和预应力的影响,有约束的优化方法对于约束条件的选取要求严格^[14,15],而单一采用影响矩阵法往往难以确定考虑恒载、活载综合作用下结构各个构件受力要求的索力调整量。本文针对混合梁斜拉桥的结构特点,将混合梁斜拉桥的合理成桥状态确定问题归结为一个有约束的二次规划数学模型,并采用有效约束集优化算法求解,确定其合理成桥状态。

1 成桥状态优化模型的建立

1.1 设计变量的选取

斜拉索索力是优化分析中的未知量,设斜拉桥共有 n 对斜拉索,以各斜拉索索力 $T_i (i=1,2,\dots,n)$ 为设计变量,表示成向量的形式,即

$$\mathbf{T} = (T_1, T_2, \dots, T_n)^T \quad (1)$$

1.2 目标函数的选取

以主梁和桥塔的弯曲及拉压能量之和为优化目标函数^[7],该目标函数能全面表征结构的整体状态,可表达为

$$U = \int \frac{M^2}{2EI} ds + \int \frac{N^2}{2EA} ds \quad (2)$$

对于离散的杆系结构,假设各单元的材料弹性模量 E_i 、截面惯性矩 I_i 和截面面积 A_i 在单元长度内不变,则可将主梁和桥塔的弯曲及拉压应变能之和表示为

$$U = \sum_{i=1}^m \frac{L_i}{4E_i I_i} (M_{Li}^2 + M_{Ri}^2) + \sum_{i=1}^m \frac{L_i}{4E_i A_i} (N_{Li}^2 + N_{Ri}^2) \quad (3)$$

式中, m 为梁、塔单元总数; L_i 为 i 单元的杆件长度; M_{Li} 和 M_{Ri} 分别为 i 单元左右端的弯矩; N_{Li} 和 N_{Ri} 分别为 i 单元左右端的轴力。将式(3)写成矩阵形式,即

$$U = \mathbf{M}_L^T \mathbf{A} \mathbf{M}_L + \mathbf{M}_R^T \mathbf{A} \mathbf{M}_R + \mathbf{N}_L^T \mathbf{B} \mathbf{N}_L + \mathbf{N}_R^T \mathbf{B} \mathbf{N}_R \quad (4)$$

式中, $\mathbf{A} = \text{diag}(L_i/4E_i I_i) (i=1,2,\dots,m)$; $\mathbf{B} = \text{diag}(L_i/4E_i A_i) (i=1,2,\dots,m)$; \mathbf{M}_L 和 \mathbf{M}_R 分别为结构在自重、二期恒载及索力共同作用下单元两端的弯矩向量; \mathbf{N}_L 和 \mathbf{N}_R 分别为结构在自重、二期恒载及索力共同作用下单元两端的轴力向量,利用影响矩阵^[12]的概念,可得

$$\begin{cases} \mathbf{M}_L^T = \mathbf{M}_{LD}^T + \mathbf{C}_{ML} \mathbf{T} \\ \mathbf{M}_R^T = \mathbf{M}_{RD}^T + \mathbf{C}_{MR} \mathbf{T} \\ \mathbf{N}_L^T = \mathbf{N}_{LD}^T + \mathbf{C}_{NL} \mathbf{T} \\ \mathbf{N}_R^T = \mathbf{N}_{RD}^T + \mathbf{C}_{NR} \mathbf{T} \end{cases} \quad (5)$$

式中, \mathbf{M}_{LD} 、 \mathbf{M}_{RD} 、 \mathbf{N}_{LD} 、 \mathbf{N}_{RD} 分别为结构在自重、二期恒载作用下单元两端的弯矩向量及轴力向量; \mathbf{C}_{ML} 、 \mathbf{C}_{MR} 、 \mathbf{C}_{NL} 、 \mathbf{C}_{NR} 分别为单元两端弯矩和轴力在单位索力作用下的影响矩阵; \mathbf{T} 为斜拉索索力向量。

将式(5)代入式(4),可得

$$U = \mathbf{T}^T \mathbf{H} \mathbf{T} + 2\mathbf{c}^T \mathbf{T} + \mathbf{F} \quad (6)$$

其中

$$\begin{aligned} \mathbf{H} &= \mathbf{C}_{ML}^T \mathbf{A} \mathbf{C}_{ML} + \mathbf{C}_{MR}^T \mathbf{A} \mathbf{C}_{MR} + \mathbf{C}_{NL}^T \mathbf{B} \mathbf{C}_{NL} + \mathbf{C}_{NR}^T \mathbf{B} \mathbf{C}_{NR} \\ \mathbf{c}^T &= \mathbf{M}_{LD}^T \mathbf{A} \mathbf{C}_{ML} + \mathbf{M}_{RD}^T \mathbf{A} \mathbf{C}_{MR} + \mathbf{N}_{LD}^T \mathbf{B} \mathbf{C}_{NL} + \mathbf{N}_{RD}^T \mathbf{B} \mathbf{C}_{NR} \\ \mathbf{F} &= \mathbf{M}_{LD}^T \mathbf{A} \mathbf{M}_{LD} + \mathbf{M}_{RD}^T \mathbf{A} \mathbf{M}_{RD} + \mathbf{N}_{LD}^T \mathbf{B} \mathbf{N}_{LD} + \mathbf{N}_{RD}^T \mathbf{B} \mathbf{N}_{RD} \end{aligned}$$

1.3 约束条件的选取

1.3.1 索力约束条件

斜拉索索力在成桥状态及运营过程中,考虑到强度、疲劳及斜拉索的有效性等问题,应约束索力的上下限值。因此,索力约束条件可表示为

$$\mathbf{T}_L \leq \mathbf{T}_D + \mathbf{C}_T \mathbf{T} \leq \mathbf{T}_U \quad (7)$$

式中, T_L 和 T_U 为指定的索力上下限值; T_b 为斜拉索在结构自重和二期恒载作用下产生的拉力; C_r 为各斜拉索索力在单位索力作用下的影响矩阵。

1.3.2 索力均匀性约束条件

若仅以式(7)为索力约束条件, 优化过程容易收敛到一个不均匀的索力分布结果。因此, 有必要引入索力均匀性约束条件, 通过引入相邻斜拉索的不均匀索力, 并对其进行约束来满足索力分布的均匀性要求。设相邻的连续三根斜拉索的索力分别为 T_{i-1} 、 T_i 、 T_{i+1} , 则定义其不均匀索力为

$$Z_i = \frac{T_{i-1} + T_{i+1}}{2} - T_i \quad i=2,3,\dots,n-1 \quad (8)$$

写成矩阵形式, 为

$$Z = DT \quad (9)$$

式中, D 为 $(n-2) \times n$ 阶矩阵, 且

$$D = \begin{bmatrix} 0.5 & -1 & 0.5 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0.5 & -1 & 0.5 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0.5 & -1 & 0.5 \end{bmatrix}$$

则索力均匀性约束条件可表示为

$$Z_L \leq Z \leq Z_U \quad (10)$$

式中, Z_U 和 Z_L 分别为不均匀索力的上下限值, 其合理值可由试算确定。

1.3.3 主梁及桥塔位移约束条件

混合梁斜拉桥在成桥状态及运营过程中, 要保证结构有足够的刚度。因此, 主梁的竖向挠度和桥塔的水平向偏位均不可过大, 则位移约束条件可表示为

$$\delta_L \leq \delta_b + C_\delta T \leq \delta_U \quad (11)$$

式中, δ_L 和 δ_U 为指定的位移上下限值; δ_b 为结构在自重和二期恒载作用下产生的位移; C_δ 为各节点位移在单位索力作用下的影响矩阵。

1.3.4 主梁及桥塔应力约束条件

混合梁斜拉桥中的钢结构及混凝土结构的上下缘应力分布均匀且不可超过规范规定的允许值, 则整个结构的应力约束条件可表示为

$$\sigma_L \leq \sigma_b + C_\sigma T \leq \sigma_U \quad (12)$$

式中, σ_L 和 σ_U 为指定的应力上下限值; σ_b 为结构在自重和二期恒载作用下产生的应力; C_σ 为结构应力在单位索力作用下的影响矩阵。

1.4 优化模型的建立

根据上述分析, 将式(6)中的常数项 F 略去, 并进行适当的变换, 则可建立确定混合梁斜拉桥合理成桥状态的优化模型

$$\begin{cases} \min U(T) = \frac{1}{2} T^T H T + c^T T \\ \text{st } C_r T \geq T_L - T_b \\ -C_r T \geq -T_U + T_b \\ C_\delta T \geq \delta_L - \delta_b \\ -C_\delta T \geq -\delta_U + \delta_b \\ C_\sigma T \geq \sigma_L - \sigma_b \\ -C_\sigma T \geq -\sigma_U + \sigma_b \end{cases}$$

经过简化, 可得

$$\min U(T) = \frac{1}{2} T^T H T + c^T T \quad \text{st } AT \geq b \quad (13)$$

式中

$$\begin{aligned} A &= [C_r^T \quad -C_r^T \quad C_\delta^T \quad -C_\delta^T \quad C_\sigma^T \quad C_\sigma^T]^T \\ b &= [(T_L - T_b)^T \quad (-T_U + T_b)^T \quad (\delta_L - \delta_b)^T \quad (-\delta_U + \delta_b)^T \quad (\sigma_L - \sigma_b)^T \quad (-\sigma_U + \sigma_b)^T]^T \end{aligned}$$

至此, 将混合梁斜拉桥的合理成桥状态确定问题转化为一个标准的有约束二次规划数学模型。

2 合理成桥状态的优化

2.1 有效约束集优化算法的求解

有效约束集优化方法的基本思想^[6]是, 将不等式约束化为等式约束, 然后采用 Lagrange 法求解。在每次迭代中, 以已知的可行点为起点, 把在该点的有效约束作为等式约束, 在此约束下极小化目标函数 $f(T)$, 而其余的约束暂且不管。求得新的比较好的可行点后, 再重复以上做法, 直至求得最优解 T^* 。对于式(13)的二次规划问题, 已知第 k 次迭代的可行点 $T^{(k)}$, 在该点的有效约束指标集用 $I^{(k)}$ 表示。这时需要求解等式约束问题, 即

$$\begin{cases} \min f(T) \\ \text{st } a^i T = b_i \quad i \in I^{(k)} \end{cases} \quad (14)$$

式中, a^i 为矩阵 A 的第 i 行。令 $\delta = T - T^{(k)}$, 则问题转化为求 δ , 即

$$\begin{cases} \min f(\delta) = \frac{1}{2} \delta^T H \delta + \nabla f(T^{(k)})^T \delta \\ \text{st } a^i \delta = 0 \quad i \in I^{(k)} \end{cases} \quad (15)$$

解式(15), 求出最优解 $\delta^{(k)}$ 。若 $T^{(k)} + \delta^{(k)}$ 是可行点, 且 $\delta^{(k)} \neq 0$, 则在第 $k+1$ 次迭代中, 已知点取作 $T^{(k+1)} = T^{(k)} + \delta^{(k)}$; 若 $T^{(k)} + \delta^{(k)}$ 不是可行点, 则令方向 $d^{(k)} = \delta^{(k)}$, 并沿 $d^{(k)}$ 搜索, 即 $T^{(k+1)} = T^{(k)} + \alpha_k d^{(k)}$ 。由于 $\delta^{(k)}$ 是式(15)的最优解, 为了在第 $k+1$ 次迭代中得到较好的可行点, 可取

$$\alpha_k = \min \left[1, \min \left(\frac{b_i - a^i T^{(k)}}{a^i d^{(k)}} \mid i \notin I^{(k)}, a^i d^{(k)} < 0 \right) \right] \quad (16)$$

并令 $T^{(k+1)} = T^{(k)} + \alpha_k d^{(k)}$, 若

$$\alpha_k = \frac{b_p - a^p T^{(k)}}{a^p d^{(k)}} < 1$$

则

$$a^p T^{(k+1)} = a^p (T^{(k)} + \alpha_k d^{(k)}) = b_p$$

因此, 在 $x^{(k+1)}$ 处, $a^p x^{(k+1)} \geq b_p$ 为起作用约束。这时, 把指标 p 加入 $I^{(k)}$, 得到在 $T^{(k+1)}$ 处的有效约束指标集 $I^{(k+1)}$ 。若 $\delta^{(k)} = 0$, 则 $T^{(k)}$ 是式(14)的最优解。这时应判断 $T^{(k)}$ 是否为式(13)的最优解。需计算有效约束乘子 $\lambda_i (i \in I^{(k)})$, 即

$$\lambda_i^{(k)} = R g_k \quad (17)$$

式中, $R = (a^i H^{-1} (a^i)^T)^{-1} a^i H^{-1}$; $g^{(k)} = H \delta^{(k)} + \nabla f(T^{(k)})$ 。

若 $\lambda_i^{(k)} \geq 0$, 则点 $T^{(k)}$ 是式(13)的最优解。若存在 $q \in I^{(k)}$, 使得 $\lambda_q^{(k)} < 0$, 则 $T^{(k)}$ 不是式(13)的最优解, 此时把下标 q 从 $I^{(k)}$ 中删除。如果有几个乘子同时为负数, 令 $\lambda_q^{(k)} = \min\{\lambda_i^{(k)} | i \in I^{(k)}\}$, 将对应 $\lambda_q^{(k)}$ 的约束从有效约束集中去掉, 再解式(15), 如此反复, 直至求得最优解 T^* 。

综上所述, 有效约束集优化算法的求解步骤为^[17]: 1) 给定初始可行点 $T^{(0)}$, 相应的起作用约束指标集为 $I^{(0)}$, 令 $k=1$;

2) 利用 Lagrange 方法求解式(15), 得到最优解 $\delta^{(k)}$, 若 $\delta^{(k)} = 0$, 则进行步骤5, 否则进行步骤3; 3) 令 $d^{(k)} = \delta^{(k)}$, 由式(16)确定 α^k , 令 $T^{(k+1)} = T^{(k)} + \alpha_k d^{(k)}$, 计算 $\nabla f(T^{(k+1)})$; 4) 若 $\alpha_k < 1$, 则 $I^{(k+1)} = I^{(k)} \cup \{p\}$, $k=k+1$, 返回步骤2, 若 $\alpha_k = 1$, $I^{(k+1)} = I^{(k)}$, 令 $k=k+1$, 进行步骤5; 5) 计算对应有效约束的 Lagrange 乘子 $\lambda_q^{(k)}$, 若 $\lambda_q^{(k)} \geq 0$, 则得到最优解 $T^{(k)}$, 否则 $I^{(k+1)} = I^{(k)} \setminus \{q\}$, $k=k+1$, 返回步骤2。算法流程如图1所示。

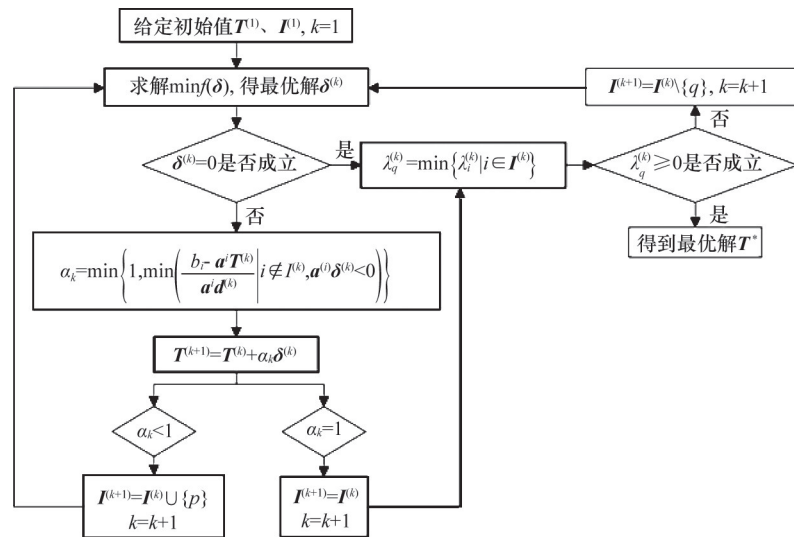


图1 有效约束集优化算法的迭代流程

Fig. 1 Iteration process of the active set method

2.2 混合梁斜拉桥合理成桥状态的确定

根据以上理论分析, 利用有效约束集优化确定混合梁斜拉桥合理成桥状态的实现过程为: 1) 建立混合梁斜拉桥有限元模型, 计算结构位移、内力、应力和索力的影响矩阵以及结构在自重和二期恒载作用下的位移、内力、应力和索力; 2) 根据所选择的目标函数和约束条件建立用于确定其合理成桥状态的二次规划数学模型; 3) 利用基于有效约束集优化算法编制的 Matlab 程序^[18]优化出满足约束条件的最优解; 4) 将所得最优解导入有限元模型验证其合理性。具体优化流程如图2所示。

根据混合梁斜拉桥的结构特点, 在确定其合理成桥状态时, 应遵循的原则^[19]为: 1) 索力应大于斜拉索垂度要求的最小索力, 而小于材料允许的最大索力, 且索力要分布均匀, 按照斜拉索长度的增长呈递增趋势, 但局部区域应允许索力有适当突变; 2) 主梁上下缘应力及竖向位移应较小且分布均匀, 从而保证主梁在最不利荷载组合作用下截面上下缘应力都不超过规范规定的允许值; 3) 为保证结构的整体内力及应力分布均匀, 钢-混凝土结合段的内力及应力应较小, 且不应有较大的突变; 4) 桥塔偏心距较小, 考虑活载和混凝土后

期收缩徐变的影响, 在成桥恒载状态下, 塔宜向边跨有一定的预偏; 5) 边墩及辅助墩的支承反力在恒载下要有足够的压力储备, 尽量避免出现负反力, 如果不可避免, 则通常由配重或设置拉力支座来满足。

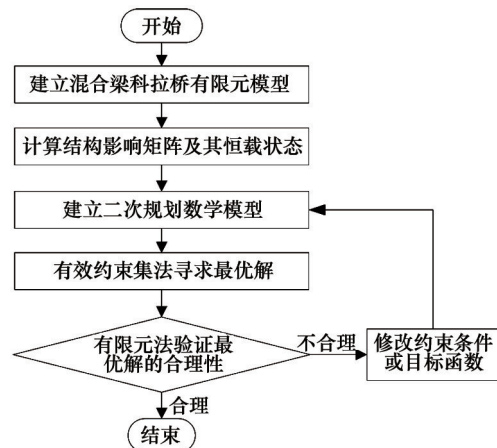


图2 合理成桥状态的优化流程

Fig. 2 Implementation of reasonable completion state for cable-stayed bridge with hybrid girder

3 算例分析

3.1 工程概况

国内某座独斜塔单索面刚构体系混合梁斜拉桥的跨径布置为90 m+50 m,如图3所示。桥塔采用独柱形钢-混凝土组合结构,斜拉索锚固区范围采用钢结构,其他部分为混凝土

结构,桥面以上塔高43 m,桥塔向边跨侧倾斜10°。主跨主梁72 m为钢箱梁,如图4所示;近塔侧18 m及全部边跨为预应力混凝土箱梁,如图5所示,梁高均为2.5 m。斜拉索采用高强度平行钢丝组成,主跨梁上索距为9 m,边跨梁上索距为4.5 m,全桥共设16对斜拉索,呈单索面双排索的扇形索面布置。

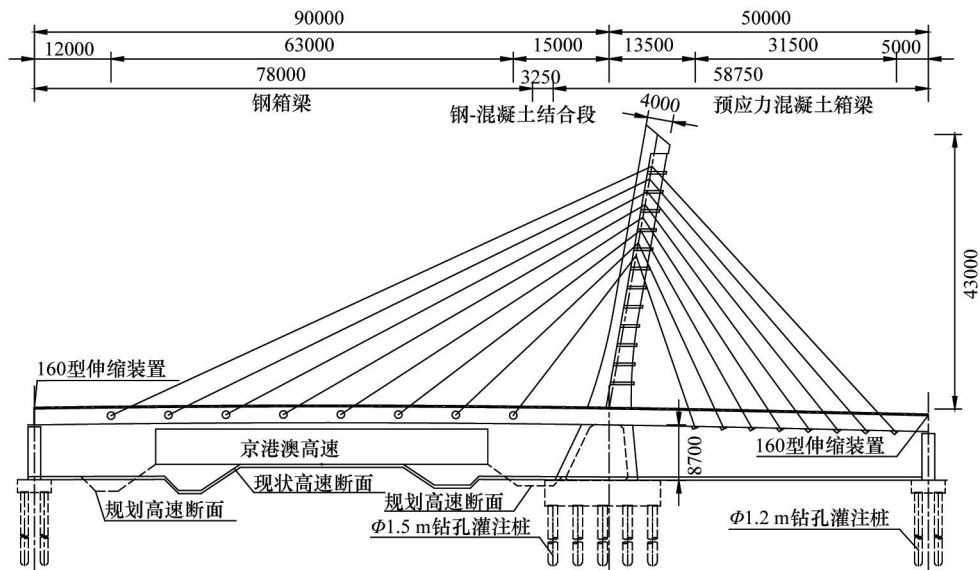


图3 混合梁斜拉桥总体布置(单位:mm)

Fig. 3 Layout of cable-stayed bridge with hybrid girder (unit: mm)

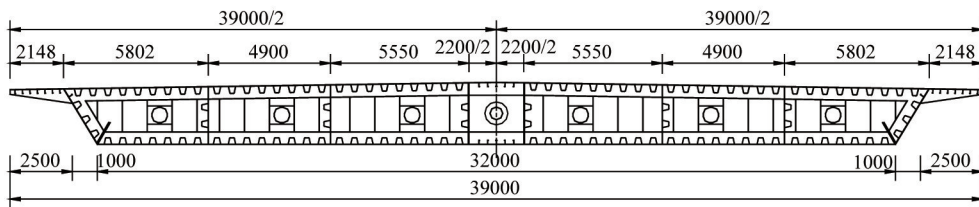


图4 钢箱梁横断面布置(单位:mm)

Fig. 4 Cross-section of steel box girder (unit: mm)

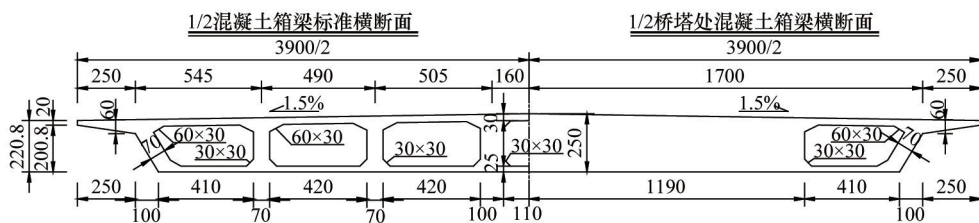


图5 预应力混凝土箱梁横断面布置(单位:cm)

Fig. 5 Cross-section of prestressed concrete box girder (unit: cm)

3.2 有限元模型

采用有限元程序 MIDAS Civil 2010 建立全桥有限元模型,其中主梁和桥塔采用空间梁单元模拟,斜拉索采用桁架

单元模拟,拉索与主梁及主塔间的连接采用刚臂模拟,主梁与桥塔固结,塔墩下方固结,在主梁梁端施加竖向及横向约束,全桥空间有限元模型呈“鱼骨形”,如图6所示。模型计算

采用一次落架的方式,即将结构自重、二期恒载、斜拉索张力及所有约束全部一次性施加,不考虑施工过程的影响。

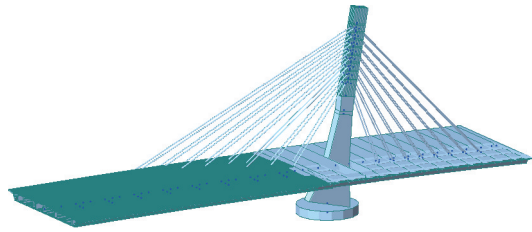


图6 有限元模型

Fig. 6 Finite element model

优化分析时,将优化模型的约束条件设定为:斜拉索索力 $1000 \text{ kN} < T_i \leq 0.4T_{pli}$ (T_{pli} 为斜拉索的破断索力);斜拉索不均匀索力 $0 \leq Z_i \leq 500 \text{ kN}$;钢箱梁段节点的竖向位移 $-25 \text{ mm} \leq \delta_z \leq 30 \text{ mm}$;桥塔节点的水平位移 $-20 \text{ mm} \leq \delta_x \leq 20 \text{ mm}$;钢箱梁上下缘及钢桥塔两侧应力 $-120 \text{ MPa} \leq \sigma_s \leq 120 \text{ MPa}$;混凝土主梁上下缘及混凝土桥塔两侧应力 $\sigma_c \leq 0$ 。

3.3 优化结果及分析

为验证有效约束集优化算法所得成桥状态的合理性,将有效约束集优化方法与无约束最小弯曲能量法的计算结果进行对比。其中,无约束最小弯曲能量法的计算过程中出现了桥塔附近斜拉索索力为负值的现象,因此人为对其进行了适当的调整。

主梁竖向位移、桥塔水平位移分布如图7和图8所示。由计算结果可知,有效约束集优化算法所得主梁竖向位移处于 $-22 \sim 8 \text{ mm}$ 范围内,桥塔塔顶水平位移为向主跨侧偏 20 mm ;无约束最小弯曲能量法计算所得主梁竖向位移处于 $-7 \sim 10 \text{ mm}$ 范围内,桥塔塔顶水平位移为向主跨侧偏 39 mm 。两种方法计算所得主梁最大位移均出现在主跨 $L/3$ 附近,且结构线形均较为平顺;有效约束集优化算法所得主跨侧主梁竖向位移较大,但边跨侧主梁竖向位移及桥塔塔顶水平偏位较小。

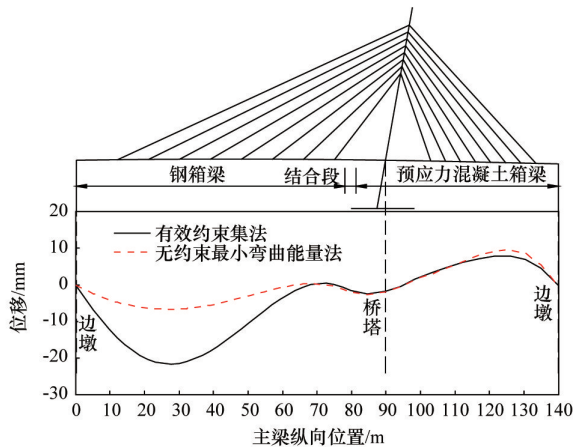


图7 主梁竖向位移分布

Fig. 7 Vertical displacement distribution of main girder

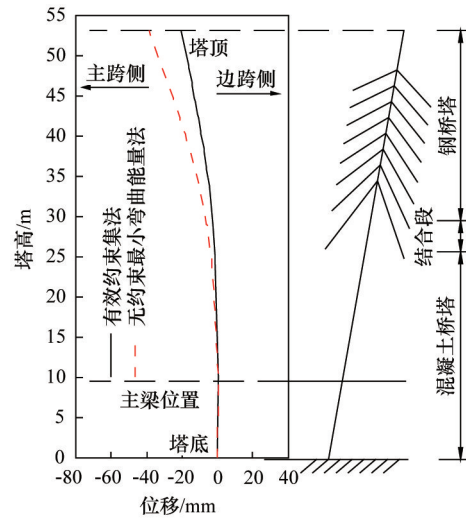


图8 桥塔水平位移分布

Fig. 8 Horizontal displacement distribution of pylon

主梁和桥塔的轴力及弯矩分布如图9~图12所示。由计算结果可知,有效约束集优化算法所得主梁轴力处于 $-205214 \sim 5 \text{ kN}$ 的范围内,桥塔轴力处于 $-93119 \sim 0 \text{ kN}$ 的范围内;无约束最小弯曲能量法计算所得主梁轴力处于 $-207788 \sim 10 \text{ kN}$ 的范围内,桥塔轴力处于 $-96367 \sim 0 \text{ kN}$ 的范围内。主梁最大轴力均出现在桥塔附近梁段,桥塔最大轴力均发生在塔底。有效约束集优化算法所得主梁弯矩处于 $-53186 \sim 87845 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 的范围内,桥塔弯矩处于 $-93531 \sim 142581 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 的范围内;无约束最小弯曲能量法计算所得主梁弯矩处于 $-65278 \sim 78202 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 范围内,桥塔弯矩处于 $-84170 \sim 160434 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 范围内。两种方法计算所得主梁最大正弯矩均出现在桥塔附近梁段,最大负弯矩均出现在边跨 $L/5$ 附近;桥塔最大正弯矩均出现在与主梁固结处,最大负弯矩均出现在塔底。

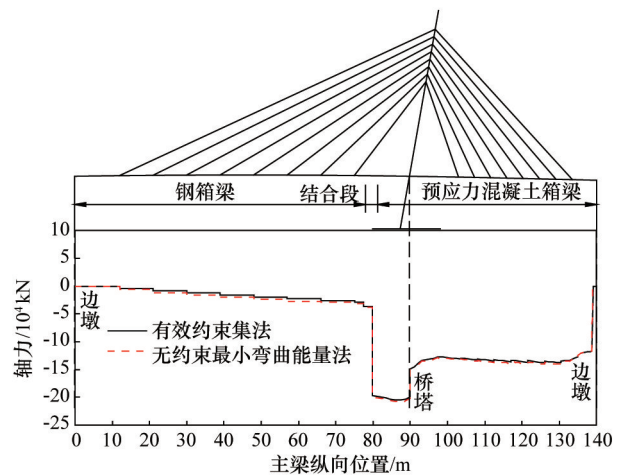


图9 主梁轴力分布

Fig. 9 Axial force distribution in main girder

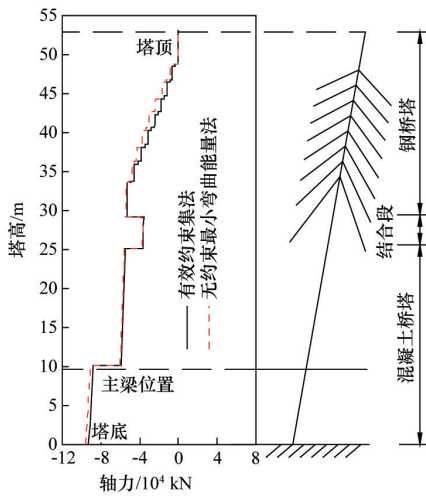


图 10 桥塔轴力分布

Fig. 10 Axial force distribution in pylon

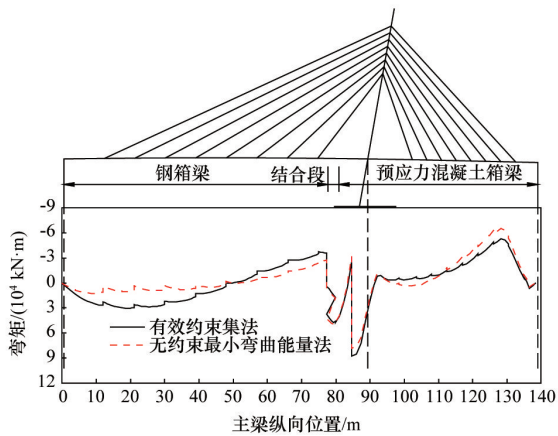


图 11 主梁弯矩分布

Fig. 11 Bending moment distribution in main girder

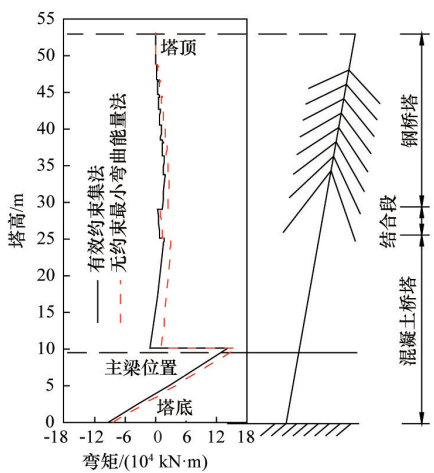


图 12 桥塔弯矩分布

Fig. 12 Bending moment distribution in pylon

主梁上下缘及桥塔两侧应力分布如图 13~图 16 所示。由计算结果可知,有效约束集优化算法所得钢箱梁段的上缘应力处于-23.68~-2.84 MPa 范围内,下缘应力处于-

32.99~16.38 MPa 范围内,混凝土梁段上缘应力处于-9.78~-0.38 MPa 范围内,下缘应力处于-7.75~-1.17 MPa 范围内;无约束最小弯曲能量法计算所得钢箱梁上缘应力处于-24.33~-0.01 MPa 范围内,下缘应力处于-27.93~7.38 MPa 范围内,混凝土梁段上缘应力处于-9.97~-0.003 MPa 范围内,下缘应力处于-8.56~-0.76 MPa 范围内。有效约束集优化算法所得桥塔钢结构主跨侧应力处于-73.96~0 MPa 范围内,边跨侧应力处于-40.17~0.85 MPa 范围内,桥塔混凝土结构主跨侧应力处于-15.03~-2.36 MPa 范围内,边跨侧应力处于-5.46~-1.28 MPa 范围内;无约束最小弯曲能量法计算所得桥塔钢结构主跨侧应力处于-84.43~0 MPa 范围内,边跨侧应力处于-29.67~1.76 MPa 范围内,桥塔混凝土结构主跨侧应力处于-16.31~-2.66 MPa 范围内,边跨侧应力处于-5.44~-2.05 MPa 范围内。两种方法计算所得钢箱梁上缘最大压应力均出现在钢-混凝土结合段附近,最大拉应力均出现在主跨侧 $L/8$ 附近,钢箱梁下缘最大压应力均出现在主跨 $L/8$ 附近,最大拉应力均出现在主跨 $7L/8$ 附近;混凝土梁段上缘最大压应力均出现在桥塔附近梁段,最小压应力均出现在边墩附近;混凝土梁段下缘最大压应力均出现在边跨 $L/5$ 附近,最小压应力均出现在桥塔附近。两种方法计算所得混凝土主梁及混凝土桥塔均处于全截面受压状态。

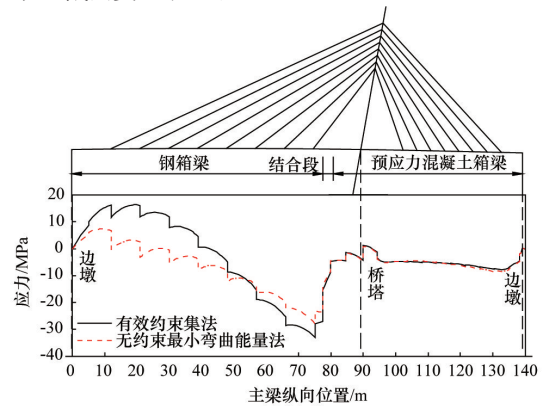


图 13 主梁上缘应力分布

Fig. 13 Normal stress distribution in top fiber of main girder

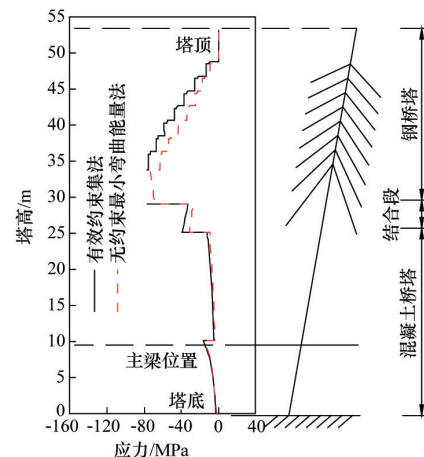


图 14 桥塔主跨侧应力分布

Fig. 14 Normal stress distribution in main span side of pylon

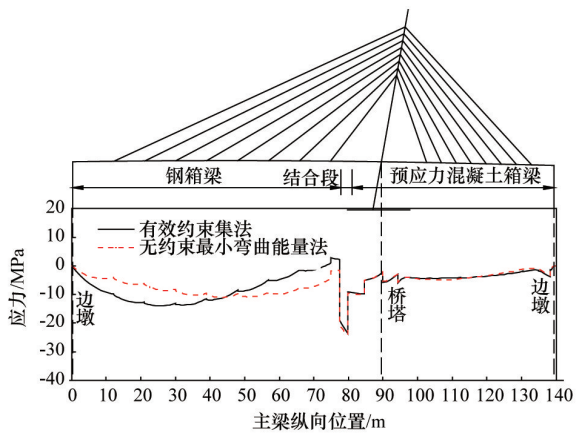


图 15 主梁下缘应力分布

Fig. 15 Normal stress distribution of bottom fiber in main girder

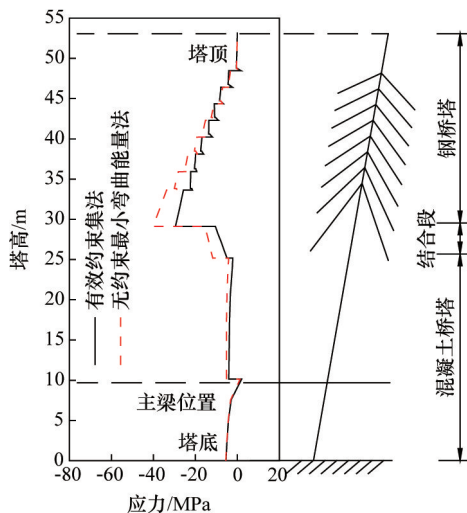


图 16 桥塔边跨侧应力分布

Fig. 16 Normal stress distribution of side span side in main girder

斜拉索索力分布如图 17 所示。

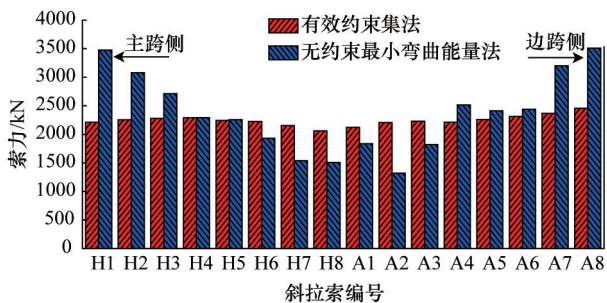


图 17 斜拉索索力分布

Fig. 17 Distribution of cable force

由计算结果可知,有效约束集优化算法所得单根斜拉索最大索力为 2457 kN,最小索力为 2061 kN;无约束最小弯曲能量法计算所得单根斜拉索最大索力为 3510 kN,最小索力为 1319 kN。分析比较可知,有效约束集优化算法所得索力分布更均匀。

桥塔塔底及边墩支承反力如表 1 所示。由计算结果可知,有效约束集优化算法所得最大支承反力为 111413 kN,最小支承反力为 4106 kN;无约束最小弯曲能量法计算所得最大支承反力为 114761 kN,最小支承反力为 2786 kN。因此,有效约束集优化算法的结果使得所得边墩支承具有更大的压力储备。

表 1 竖向支承反力

Table 1 Vertical reactions of supports

优化方法	主跨侧边墩 支承反力/kN	桥塔 支承反力/kN	边跨侧边墩 支承反力/kN
有效约束集法	4106	111413	9246
无约束最小弯曲能量法	2786	114761	7218

综上所述,采用有效约束集优化算法确定混合梁斜拉桥的合理成桥状态,在选取合适的目标函数和约束条件下,可利用计算机程序优化出合理的索力序列,避免了人为调索的随意性。与无约束最小弯曲能量法相比,有效约束集优化算法所得结构线形平顺,索力分布更均匀,且边墩支承具有更大的压力储备;钢箱梁段竖向位移计算结果较大,而混凝土梁段竖向位移及桥塔塔顶水平偏位较小;计算所得结构内力及应力均与无约束最小弯曲能量法计算结果相近,且两种方法计算所得结构内力和应力的极值点均出现在同一位置。

4 结论

针对混合梁斜拉桥的特点,将混合梁斜拉桥的合理成桥状态确定问题转化为二次规划数学模型,并采用有效约束集优化算法进行求解,通过优化计算及与无约束最小弯曲能量法进行对比分析,得出如下结论:

1) 结合有效约束集优化算法与有限元方法所得成桥状态下,结构线形平顺,钢箱梁段竖向位移大于无约束最小弯曲能量法计算结果,而混凝土梁段竖向位移及桥塔塔顶水平偏位较小;结构内力及应力均与无约束最小弯曲能量法计算结果相近,而斜拉索索力分布更均匀,且边墩具有更大的压力储备。

2) 以混合梁斜拉桥主梁、桥塔的拉压及弯曲能量为目标函数,以钢箱梁段的竖向位移、桥塔水平位移、主梁上下缘及桥塔两侧应力、斜拉索索力及其均匀性为约束条件,采用有效约束集优化算法确定其合理成桥状态,可满足结构位移、内力及索力等条件的约束,能全面考虑结构各个构件的受力和变形特征,且能避免人为调索的随意性,可快速、便捷地获得合理的优化结果。

参考文献 (References)

- [1] Gimsing N J, Georgakis C T. Cable supported bridges: Concept and design [M]. New York: John Wiley & Sons, 2011.
- [2] Walther R. Cable stayed bridges[M]. London: Thomas Telford House, 1999.
- [3] Wang P H, Tseng T C, Yang C G. Initial shape of cable-stayed bridges[J]. Computers & Structures, 1993, 47(1): 111-123.
- [4] Chen D W, Au F T K, Tham L G, et al. Determination of initial cable forces in prestressed concrete cable-stayed bridges for given design deck profiles using the force equilibrium method[J]. Computers & Structures, 2000, 74(1): 1-9.
- [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): 49-52.
Yan Donghuang, Li Xuewen, Liu Guangdong, et al. Deciding the reasonable finished dead state of the main beam of cable-stayed bridges using stress balanced method[J]. China Journal of Highway and Transport, 2000, 13(3): 49-52.
- [6] 梁鹏, 肖汝诚, 张雪松. 斜拉桥索力优化实用方法[J]. 同济大学学报, 2003, 31(11): 1270-1274.
Liang Peng, Xiao Rucheng, Zhang Xuesong. Practical method of optimization of cable tensions for cable-stayed bridges[J]. Journal of Tongji University, 2003, 31(11): 1270-1274.
- [7] Lute V, Upadhyay A, Singh K K. Genetic algorithms-based optimization of cable stayed bridges[J]. Journal of Software Engineering & Applications, 2011, 4(10): 571-578.
- [8] Hassan M M. Optimum design of cable-stayed bridges[D]. Canada Ontario: University of Western Ontario, 2010
- [9] 陆楸, 徐有光. 斜拉桥最优索力的探讨[J]. 中国公路学报, 1990, 3(1): 38-48.
Lu Qiu, Xu Youguang. Optimum tensioning of cable-stays[J]. China Journal of Highway and Transport, 1990, 3(1): 38-48.
- [10] 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.
Yan Donghuang, Li Xuewen, Liu Guangdong, et al. Step-by-step arithmetic for the reasonable finished dead state of the concrete cable-stayed bridges[J]. China Journal of Highway and Transport, 2003, 16(1): 43-46.
- [11] Kasuga A, Arai H, Breen J E, et al. Optimum cable-force adjustments in concrete cable-stayed bridges[J]. Journal of Structural Engineering, 1995, 121(4): 685-694.
- [12] 肖汝诚, 项海帆. 斜拉桥索力优化的影响矩阵法[J]. 同济大学学报, 1998, 26(3): 235-239.
Xiao Rucheng, Xiang Haifan. Influence matrix method of cable tension optimization for cable-stayed bridges[J]. Journal of Tongji University, 1998, 26(3): 235-239.
- [13] Janjic D, Pircher M, Pircher H. Optimization of cable tensioning in cable-stayed bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2003, 8(3): 131-137.
- [14] 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(4): 643-654.
- [15] Sung Y C, Chang D W, Teo E H. Optimum post-tensioning cable forces of Mau-Lo Hsi cable-stayed bridge[J]. Engineering Structures, 2006, 28(10): 1407-1417.
- [16] More J J, Wright S J, Pardalos P M. Optimization software guide[M]. Philadelphia, Pennsylvania: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1993.
- [17] 陈宝林. 最优化理论与算法[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2005.
Chen Baolin. Optimization theory and algorithm[M]. 2th ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.
- [18] 马昌凤. 最优化方法及其 Matlab 程序设计[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
Ma Changfeng. Optimization method and its Matlab program design [M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [19] 黄侨, 吴红林, 杨大伟. 确定斜拉桥成桥索力多约束条件下最小能量法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(2): 288-291.
Huang Qiao, Wu Honglin, Yang Dawei. Minimum energy method with multi-restrictions to decide the rational completed stage force[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007, 39(2): 288-291.

(责任编辑 韩星明)

·学术动态·



第七届海洋强国战略论坛在南京召开

2014年10月31日至11月1日,第七届海洋强国战略论坛暨2013年海洋科学技术奖颁奖仪式在南京举行,中国科协党组成员、书记处书记沈爱民出席并讲话,700余名科研人员参加会议。

本届论坛上,中国工程院院士潘德炉、中国科学院院士王颖、南京大学教授葛晨东、北京航空航天大学教授张文木等分别作题为“近海水体环境的卫星遥感关键技术研究及应用”、“论南海海疆国界线”、“海权拓展的节点与国运兴衰”、“海洋强国与海洋安全”、“关于江苏海洋强省战略的思考”大会主旨报告。

详见中国科协网<http://www.cast.org.cn/n35081/n35473/n35518/16069882.html>。