

凤凰路大桥的合理成桥状态研究及施工阶段分析

陈强,高立宝,杜洪亮

(中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司,四川 成都 610000)

摘要:为研究凤凰路大桥的合理成桥状态以及对施工阶段进行分析,首先通过Midas/Civil建立有限元模型,提取相关矩阵,以凤凰路大桥的最小应变能为目标函数,通过Matlab建立数学优化模型,确定大桥的合理成桥状态及施工顺序。以合理成桥状态的索力为目标,通过正装迭代法求解施工索力,求得施工索力与成桥索力规律基本一致,且模型通过设计验算,满足规范要求。

关键词:斜拉桥;合理成桥状态;施工阶段;索力;二次规划法;正装迭代法

中图分类号:U448.27

文献标志码:A

0 引言

独塔斜拉桥造型优美,施工简单,便于打造成城市景观地标,在城市桥梁中应用广泛,其比重占世界斜拉桥桥梁 $1/4 \sim 1/6$ ^[1]。斜拉桥力学状态与斜拉索索力直接相关^[2]。确定斜拉桥合理成桥状态最主要的内容就是确定其成桥索力,中国已经形成了成熟的斜拉桥索力优化理论,主要分为单目标约束和多目标约束两大类,前者一般通过有限元软件实现,后者则需建立数学优化模型实现^[3]。通过有限元直接计算索力有约束目标单一或不收敛等缺点。建立数

学优化模型,设置约束条件,选择迭代路径则可以很快求出索力。本文通过二次规划算法,以凤凰路大桥为背景,以结构应变能最小为目标函数,考虑多条件约束,通过Matlab编程求解成桥索力,并通过正装迭代法求解施工索力。

1 工程概况

新建凤凰路大桥为不对称独塔斜拉连续梁组合体系,跨径组成为:70 m(边跨)+112 m(中跨)+48 m(引桥)(图1),全桥长230.0 m。索塔采用拱形索塔,上塔柱采用钢结构,下塔柱及下横梁采用混凝

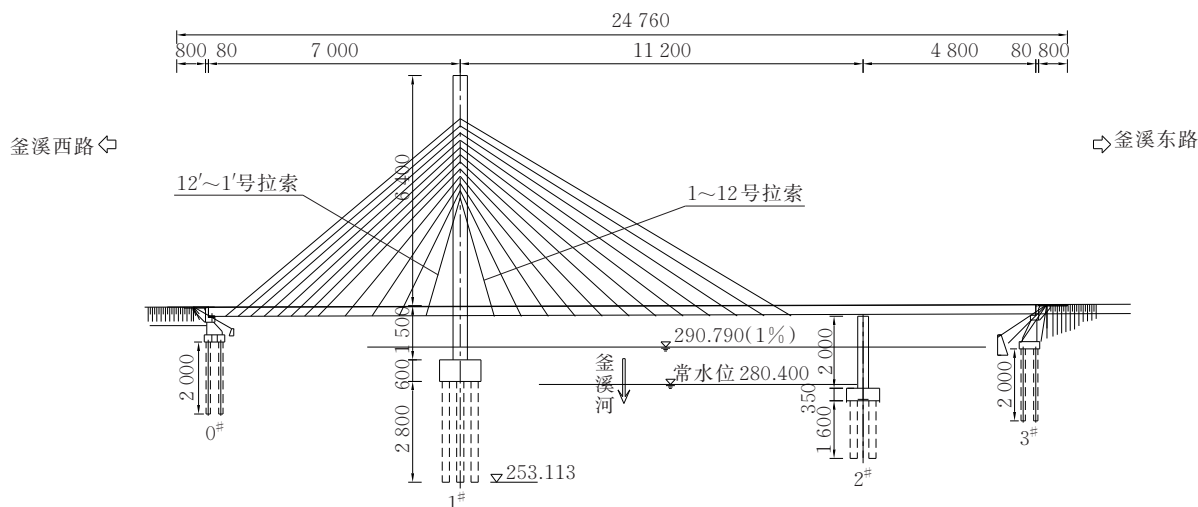


图1 凤凰路大桥桥型布置图(单位:cm)

收稿日期:2020-11-18

作者简介:陈强,男,硕士,助理工程师.E-mail:646194840@qq.com

土结构,基础为钻孔灌注桩;上部结构采用预应力混凝土箱梁;拉索采用平行钢丝拉索、冷铸锚体系,采用塔梁固结体系。

2 有限元模型建立

采用Midas/Civil建立凤凰路大桥全桥数值分析模型(图2),全桥401个节点,307个单元。由于本桥跨度较小,非线性作用不明显,采用只受拉桁架单元模拟斜拉索进行施工阶段及成桥阶段分析,采用土弹簧模拟桩土效应。

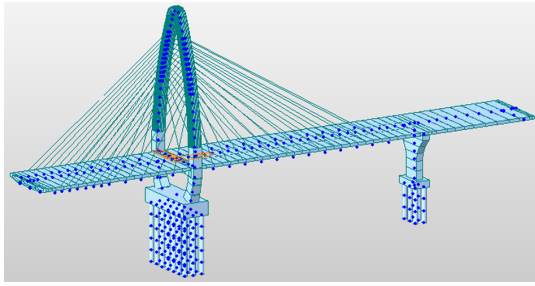


图2 凤凰路大桥有限元模型图

3 合理成桥状态的确定

3.1 二次规划法

一般结构力学优化问题最终都可以转化为一种数学优化问题,通过特定的约束条件进行求解。优化问题大多数是非线性规划问题,一般能统一成数学模型: $\lim_{x \in R^n} f(X)$ 。

约束条件: $g_u(X) \leq 0 \quad (u=1, 2, \dots, m)$

$h_v(X) = 0 \quad (v=1, 2, \dots, n)$

式中: u, v 为约束条件下标变量; m, n 为约束条件种类。

二次规划是非线性规划中的一种,其目标函数为二次函数,约束函数为线性函数的优化问题^[4],数学模型为:

$$\begin{aligned} \min f(t) &= \frac{1}{2} \{t\}^T \{A\} \{t\} + \{K\} \{t\} + D \\ \text{s.t.} \quad &\begin{cases} Ae \cdot t \leq b \\ Af \cdot t \leq be \\ la \leq t \leq lb \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $f(t)$ 为优化目标函数,如结构最小应变能; Ae 、 Af 为影响矩阵; b 、 be 、 la 、 lb 为约束条件的限界; t 为变

量列阵。

二次规划主要通过梯度投影求解,斜拉桥索力优化模型是求极值的严格凸规划模型,可通过Matlab自带优化工具箱来求解此类问题^[5]。斜拉桥合理成桥状态研究表明^[6],以斜拉桥最小应变能为目标函数,主梁及主塔的位移和弯矩、斜拉索的索力为约束条件建立数学优化模型求解最优索力,能够全面体现结构对索力的响应,达到“塔平梁直,索力均匀”的效果,使索力计算更加合理。

3.2 优化模型

3.2.1 目标函数

以凤凰路大桥最小应变能为目标函数,应变能能整体体现结构合理受力,根据结构力学公式:

$$U = \int \left[\frac{M^2(l)}{2E(l)I(l)} + \frac{N^2(l)}{2E(l)A(l)} \right] dl \quad (2)$$

式中: E 为弹性模量; I 为惯性矩; A 为截面面积; M 为弯矩; N 为轴力; l 为单元长度。

根据有限元离散理论,可以将应变能公式转化如下:

$$U = U_b + U_c = \sum_{i=1}^m \frac{L_i}{4E_i I_i} (M_{L_i}^2 + M_{R_i}^2) + \sum_{j=1}^n \frac{L_j}{4E_j A_j} (N_{L_j}^2 + N_{R_j}^2) \quad (3)$$

式中: U_b 为弯曲应变能; U_c 为拉压应变能; M_L 为单元左端弯矩; M_R 为单元右端弯矩; N_L 为单元左端轴力; N_R 为单元右端轴力; E 为弹性模量; I 为惯性矩; A 为截面面积; i, j 为计算弯曲应变能及拉压应变能单元数量。

有限元计算的最终结果都能通过影响矩阵表示如下:

$$\begin{aligned} \{M\} &= [M_d] \{T\} + \{M_0\} \\ \{N\} &= [N_d] \{T\} + \{N_0\} \\ \{\sigma\} &= [\sigma_d] \{T\} + \{\sigma_0\} \\ \{P\} &= [P_d] \{T\} + \{P_0\} \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $\{M\}$ 、 $\{N\}$ 、 $\{\sigma\}$ 、 $\{P\}$ 分别为成桥状态下单元的弯矩、轴力、应力、位移列阵; $[M_d]$ 、 $[N_d]$ 、 $[\sigma_d]$ 、 $[P_d]$ 分别为单位索力下单元的弯矩、轴力、应力、位移影响矩阵; $\{M_0\}$ 、 $\{N_0\}$ 、 $\{\sigma_0\}$ 、 $\{P_0\}$ 分别为恒载作用下单元的弯矩、轴力、应力、位移列阵。

最终目标函数可以写为:

$$U = \{T\}^T [A] \{T\} + \{K\}^T \{T\} + [D] \quad (5)$$

式中:

$$\begin{aligned} [A] &= [M_{L_d}]^T [B] [M_{L_d}] + [M_{L_d}]^T [B] [M_{R_d}] + \\ &\quad [M_{R_d}]^T [B] [M_{R_d}] + [N_{L_d}]^T [C] [N_{L_d}] + \\ &\quad [N_{L_d}]^T [C] [N_{R_d}] + [N_{R_d}]^T [C] [N_{R_d}] \\ \{K\} &= 2\{M_{L_0}\}^T [B] [M_{L_d}] + \{M_{L_0}\}^T [B] [M_{R_d}] + \\ &\quad \{M_{R_0}\}^T [B] [M_{L_d}] + 2\{M_{R_0}\}^T [B] [M_{R_d}] + \\ &\quad 2\{N_{L_0}\}^T [C] [N_{L_d}] + \{N_{L_0}\}^T [C] [N_{R_d}] + \\ &\quad \{N_{R_0}\}^T [C] [N_{L_d}] + 2\{N_{R_0}\}^T [C] [N_{R_d}] \\ [D] &= \{M_{L_0}\}^T [B] \{M_{L_0}\} + \{M_{L_0}\}^T [B] \{M_{R_0}\} + \\ &\quad \{M_{R_0}\}^T [B] \{M_{R_0}\} + \{N_{L_0}\}^T [C] \{N_{L_0}\} + \\ &\quad \{N_{L_0}\}^T [C] \{N_{R_0}\} + \{N_{R_0}\}^T [C] \{N_{R_0}\} \end{aligned}$$

式中: $[A]$ 、 $\{K\}$ 、 $[D]$ 分别为目标函数最小弯曲应变能的二次项系数矩阵、一次项系数矩阵及常数项矩阵; $[M_{L_d}]$ 、 $[M_{R_d}]$ 分别为单位索力下单元左端弯矩与右端弯矩矩阵; $[N_{L_d}]$ 、 $[N_{R_d}]$ 分别为单位索力下单元左端轴力与右端轴力矩阵; $\{M_{L_0}\}$ 、 $\{M_{R_0}\}$ 分别为恒载作用下单元左端与右端弯矩列阵; $\{N_{L_0}\}$ 、 $\{N_{R_0}\}$ 分别为恒载作用下单元左端与右端轴力列阵; $[B]$ 、 $[C]$ 为对角矩阵, 其中: $b_{ii} = \frac{L_i}{6E_i I_i}$, $c_{ii} = \frac{L_i}{6E_i A_i}$ 。

3.2.2 约束条件

斜拉桥索力求解一般需设置合理的约束条件, 避免迭代奇异出现无解的情况。斜拉桥的索力求解主要以主梁及主塔线形、塔根弯矩、索力均匀作为约束条件。一般将主塔控制在向岸侧偏移 3 cm, 将主梁位移控制在 3 cm 内为宜; 斜拉索索力除最短索外, 索力从短索向长索呈递增变化; 塔根弯矩一般根据满足前面条件的索力进行手动微调即可。

3.2.3 优化模型

综合前文论述, 可通过数学模型来求解索力优化模型, 索力优化模型可通过数学模型表示如下:

$$\min f(x) = \frac{1}{2} x^T H x + f^T x \quad (6)$$

$$\text{约束为: } \begin{cases} \{x\} \geq 0 \\ \{P_L\} \leq [P_d] \{T\} + \{P_0\} \leq \{P_U\} \\ \{M_L\} \leq [M_d] \{T\} + \{M_0\} \leq \{M_U\} \end{cases}$$

式中: $\{x\}$ 为索力列阵; $\{P_L\}$ 、 $\{P_U\}$ 分别为位移的下限与上限; $\{M_L\}$ 、 $\{M_U\}$ 分别为弯矩的下限与上限, 其余符号与前文相同。

$[D]$ 为与变量无关的常数项, 因此未计入优化模型, 以减少计算时间。至此, 斜拉桥成桥索力优化问题已经转变为数学的二次规划问题, 通过 Matlab 建模即可求解。

3.2.4 Matlab 实现

索力求解主要分为两大步骤: ① 通过 Midas/Civil 建立有限元模型, 提出位移、应力、弯矩、轴力的影响矩阵及列阵; ② 利用 Matlab 建立二次规划模型, 通过 Matlab 工具箱求解索力, 具体求解流程见图 3。

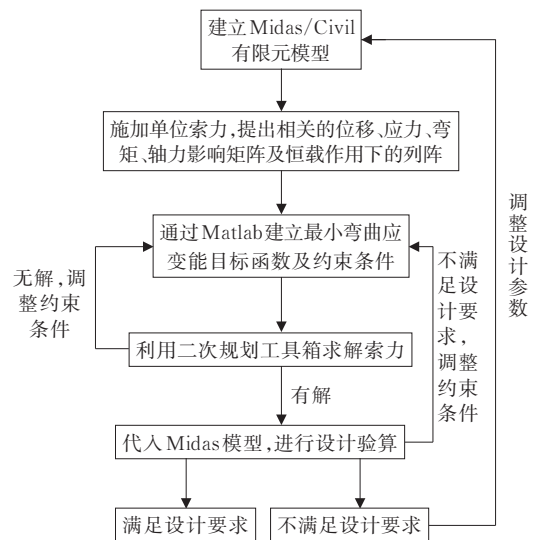


图 3 设计成桥索力求解流程

3.2.5 工程应用

基于有限元模型及 Matlab 索力优化模型计算结果, 在基本组合情况下, 求解出凤凰路大桥的索力 (图 4) 和主梁弯矩 (图 5)。对主梁、主塔及拉索进行设计验算, 主梁强度、刚度、稳定性均能满足要求。运营状态下, 斜拉桥安全系数及疲劳应力幅, 全桥整体稳定性及抗风稳定性均能满足设计要求, 表明此办法求解成桥索力合理可行。

4 施工阶段分析

4.1 施工顺序

合理成桥状态是施工阶段最终结果状态, 需要通过合理施工阶段, 选择经济合理、安全高效的施工

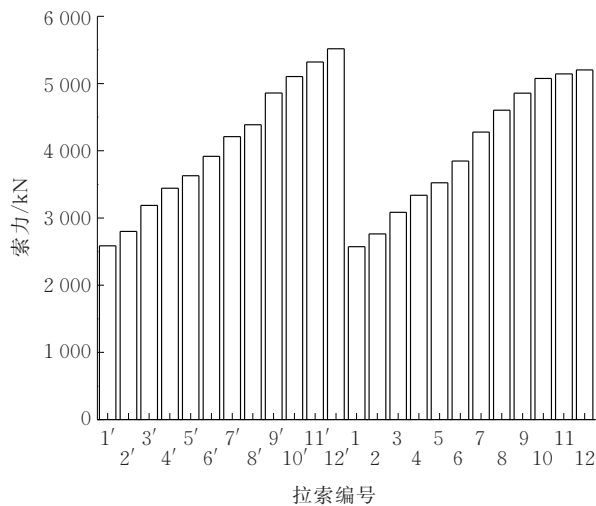


图4 设计成桥索力

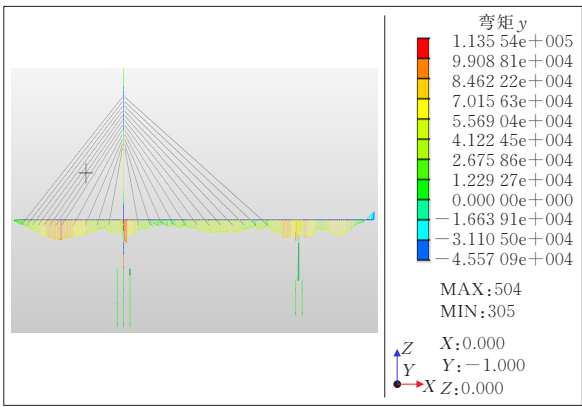


图5 成桥状态弯矩图(基本组合)(单位:kN·m)

方案来确定施工过程。经过综合比选,凤凰路大桥最终采用支架现浇施工。主要施工顺序如下:①主塔桩基泥浆护壁施工;②主塔承台施工、辅助墩桩基施工;③栈桥钢管桩基施工、辅助墩施工、桥台桩基施工;④主塔塔吊安装、混凝土下塔柱及主塔横梁施工、栈桥贝雷梁及满堂支架施工;⑤主塔钢结构吊装、主梁施工;⑥张拉预应力、张拉拉索及配重;⑦二期恒载;⑧拆除栈桥及塔吊;⑨荷载试验,竣工验收。

4.2 正装迭代分析

为确保斜拉桥的施工安全及施工可行性,还需计算施工中斜拉索的张拉力。此次设计经过方案比选,最终确定为支架现浇的方式进行施工。在进行数值分析时,由于现浇支架的弹性支撑作用,主梁内力基本只受拉索、预应力、二期恒载及体系转换的影响。通过正装迭代法^[7-8]进行施工索力求解,正装迭

代法可以将收缩徐变的影响降至最低,但是却存在不闭合状态,使考虑施工阶段的成桥索力与一次成桥索力存在差异,但此差异在安全范围内,仍能满足设计要求。若主跨位移过大,则可以通过在边跨设置配重进行调节,此处不再赘述。施工索力计算流程见图6。

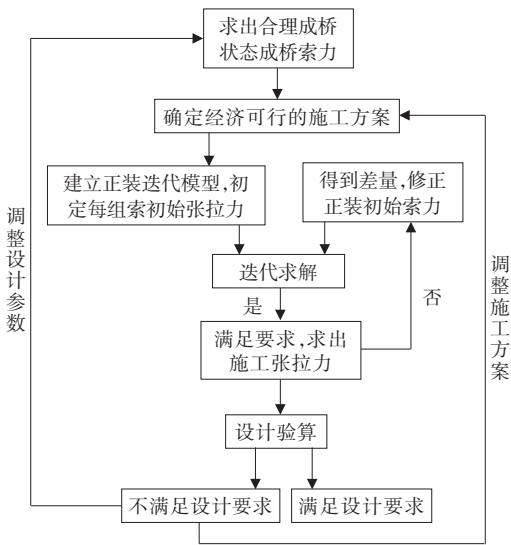


图6 施工索力计算流程

凤凰路大桥通过正装迭代法求出施工张拉索力,各拉索索力见图7,并且能满足一次张拉要求,不需要进行二次调索。主塔位移向边跨2.8 cm,主梁最大位移3.1 cm。部分张拉过程中有限元结果见图8。

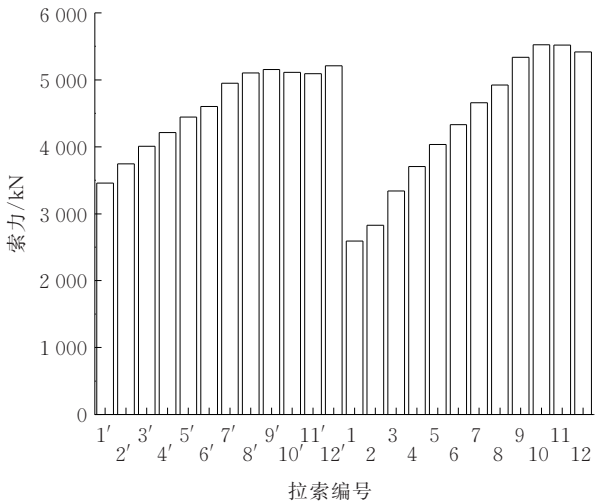


图7 设计施工索力

考虑施工阶段的正装迭代模型进行设计验算,其各项设计指标均能满足规范要求,证明此法合理,能满足工程需求。

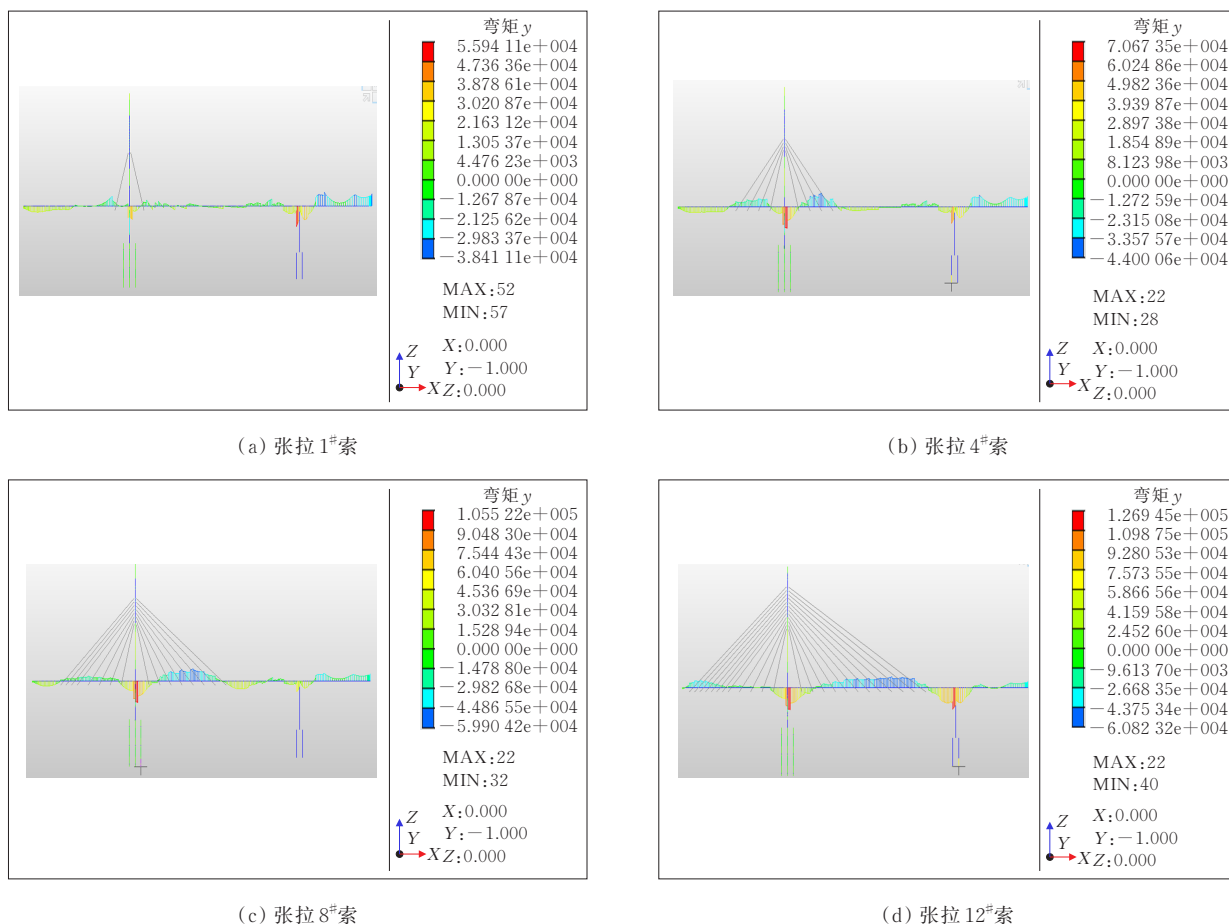


图 8 张拉索力主梁弯矩图(单位:kN·m)

5 结论

(1) 以主塔、主梁的最小应变能之和为目标函数;以塔根弯矩、塔顶位移、主梁位移及索力均匀性为约束条件;通过 Midas/Civil 及 Matlab 进行索力求解,得到合理成桥状态,塔平梁直,索力均匀,避免了二次调索工作。

(2) 通过正装迭代法,以合理成桥状态为目标,求解施工索力,得出的成桥状态能通过设计验算,表明此法工程应用的合理性。

参考文献:

- [1] 陈开利.独塔斜拉桥的建设与展望[J].桥梁建设,1998,28(3):33-37.
- [2] 陈志军,刘洋,杨立飞,等.基于粒子群优化算法的独塔斜拉桥成桥索力优化[J].桥梁建设,2016,46(3):40-44.
- [3] 徐向东,阮有力,刘雪松,等.基于 MOPSO 算法的高墩三塔斜拉桥索力优化[J].公路,2019,64(9):40-44.
- [4] 马昌凤.最优化方法及其 Matlab 程序设计[M].北京:科学出版社,2010.
- [5] 代金鹏.1×128 m 系杆拱桥成桥及施工阶段索力优化研究[D].兰州:兰州交通大学,2014.
- [6] 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.
- [7] 吴朴,邹黎琼.无应力长度参数正装迭代法工程应用[J].中外公路,2018,38(2):144-147.
- [8] 王晟,颜东煌,宁平华,等.确定钢桁梁斜拉桥合理施工阶段索力的索长迭代法[J].中外公路,2019,39(3):59-63.