

# 斜拉桥由成桥状态求解施工初始索力方法研究

徐郁峰,陈斯,谢云飞,朱梦阳

(华南理工大学 土木与交通学院,广东 广州 510641)

**摘要:**该文针对斜拉桥由成桥状态求解施工初始索力的问题,提出一种结合无应力索长与正装迭代的方法。该方法首先由成桥状态计算斜拉索无应力长度,然后基于无应力索长进行施工正装计算,求得拉索原始初始索力,再通过差值迭代调整施工初始索力,最后根据主塔变形微调施工初始索力,来获取满足偏差要求的成桥状态。以一座斜拉桥为研究背景,该桥已知成桥目标状态,采用该方法确定施工过程的张拉索力。通过算例说明该方法不需要进行复杂计算,能取得满足工程精度的结果。

**关键词:**斜拉桥;成桥状态;无应力索长;施工初始索力

**中图分类号:**U448.27

**文献标志码:**A

## Method of Solving Initial Construction Cable Force of Completed Cable-Stayed Bridge

XU Yufeng, CHEN Si, XIE Yunfei, ZHU Mengyang

(School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510641, China)

**Abstract:** To solve the initial construction cable forces of a completed cable-stayed bridge, a method that combines unstressed cable length and forward-iteration is proposed. Firstly, the unstressed length of each cable is calculated according to the completed bridge state. Then, the initial cable forces are obtained by using the unstressed cable length for the forward analysis. The initial construction cable forces are adjusted by difference iteration. Finally, the initial construction cable forces are fine-tuned according to the deformation of the pylon deformation to obtain the bridge completion state that satisfies the deviation requirements. The proposed method is employed in a cable-stayed bridge with a known completion state to calculate the initial construction cable forces. The example shows that the calculation workload can be reduced by this method. The deviation of this completed state from target meets engineering accuracy requirements.

**Keywords:** cable-stayed bridge; completed bridge state; unstressed cable length; initial construction cable force

## 0 引言

斜拉桥按照特定的施工流程进行建造,在施工过程中体系逐步转化,荷载频繁变化,桥梁在各工况产生的线形、内力变化、累积到成桥。施工阶段的索力应该根据成桥目标、施工方法及顺序确定,保证成桥后的线形、内力尽可能接近目标。目前斜拉桥施工阶段索力的计算方法有倒拆法<sup>[1-2]</sup>、倒拆-正装

法<sup>[3-4]</sup>、无应力状态法<sup>[5-11]</sup>、正装迭代法等<sup>[12-14]</sup>。倒拆法需要满足单元及支座无应力拆除,不考虑非线性计算的条件只能得到闭合的计算结果,需要结合正装法才能得到合理的结果<sup>[15]</sup>;无应力状态法需要满足构件无应力长度、无应力曲率与目标状态相同的条件才能获得闭合的计算结果<sup>[5]</sup>。这些条件通常受到施工流程、施工方法限制。正装法能较好地模拟斜拉桥的实际施工,考虑混凝土收缩、徐变效应,差

收稿日期:2024-01-06(修改稿)

基金项目:2020产学研类项目(产学研项目)(编号:x2tjB8200430);2019年中央高校基本科研业务费成果转化项目(自然科学类)(编号:x2tjD2192960)

作者简介:徐郁峰,男,博士,副教授.E-mail:xuyf@scut.edu.cn

值法<sup>[16-17]</sup>是正装迭代法的简化,但收敛效果较差。

针对现有技术不足,本文研究一种求解施工过程中初始索力的简便计算方法。

## 1 斜拉桥由目标成桥状态求解施工初始索力计算方法

### 1.1 计算目的

根据斜拉桥目标成桥状态(包括索力状态、主梁内力/应力状态、塔偏),结合其施工流程,求解斜拉索施工阶段的初始索力。

### 1.2 总体原理

(1) 无应力状态法的原理是结构构件无应力长度、无应力曲率、除调索外的外荷载、结构体系、边界条件一定,最终成桥状态与结构施工方法、形成方式无关。通过上述原理,拉索的无应力索长只与成桥状态有关,与施工过程无关,由此可以通过成桥目标状态确定拉索的无应力索长。

(2) 建立正装施工过程模型,拉索以无应力索长作为安装(即激活)条件,计算得到拉索施工阶段原始初始索力,该施工初始索力可作为后续迭代法的一组合理迭代起点。

(3) 为了使最终成桥状态进一步接近目标状态,把无应力索长正装计算得到的拉索原始初始索力作为起点,进而通过差值迭代调整施工初始索力,经过若干次迭代,使迭代后的成桥状态索力与目标成桥状态索力偏差较小,此时成桥应力状态能满足要求。

(4) 最后根据主塔变形等其他目标的要求,微调施工初始索力,使成桥索力、应力、塔偏等各种成桥状态接近目标状态。

### 1.3 实现流程

根据上述原理,本文提供一种由目标成桥状态求解施工过程拉索初始索力计算方法,该方法根据目标成桥状态,用无应力索长确定一组索力,作为施工初始索力迭代计算的起点,再根据成桥状态与目标状态的差异改正施工初始索力<sup>[16]</sup>,最后按比例微调施工初始索力,使成桥状态接近目标,具体步骤为:

(1) 根据目标成桥状态计算无应力索长 $\{L_u\}$ 。

(2) 按照施工顺序进行正装分析,各斜拉索按照 $\{L_u\}$ 张拉到位,第 $i$ 号索到位张拉工况的索力为 $T_i$ , $n$ 为索的总数。

斜拉索施工阶段原始初始索力:

$$\{T\}^0 = \{T_1, T_2, \dots, T_n\}^T \quad (1)$$

(3) 按照施工索力 $\{T\}^0$ 进行施工过程正装分析,得到成桥索力 $\{F\}^0$ 和目标索力的差值为 $\{\Delta F\}^0$ :

$$\{\Delta F\}^0 = \{F\} - \{F\}^0 \quad (2)$$

式中: $\{F\}$ 为目标成桥索力,判断 $\{F\}^0$ 是否满足误差要求;如果不满足误差要求,用差值法进行迭代计算,第 $j+1$ 次正装差值迭代分析斜拉索的施工初始索力:

$$\{T\}^{j+1} = \{T\}^j + \{\Delta F\}^j \quad (3)$$

第 $j+1$ 次正装分析得到的成桥索力为 $\{F\}^{j+1}$ ,与目标索力差值:

$$\{\Delta F\}^{j+1} = \{F\} - \{F\}^{j+1} \quad (4)$$

判断 $\{\Delta F\}^{j+1}$ 是否满足误差要求,平均误差指标:

$$\rho = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{|\Delta F_i|}{T_i} \right) < [\rho] \quad (5)$$

若不满足要求,重复上述步骤,步骤(3)当中最后一次计算的施工初始索力为 $\{T\}^a$ 。

(4) 如果步骤(3)正装计算得到的成桥状态与目标的偏差不在误差要求范围内,在步骤(3)的基础上,第 $a+b$ 次正装分析斜拉索的施工初始索力:

$$\{T\}^{a+b} = [\rho] \{T\}^a \quad (6)$$

式中: $[\rho]$ 为对角矩阵,根据累积到成桥工况的主塔变形、主梁控制截面应力确定施工索力微调系数。

其计算流程如图1所示。

## 2 工程实例

### 2.1 工程背景

#### 2.1.1 工程概况

某斜拉桥(62+104+580+104+62)m中跨为钢箱梁结构,梁中心线处内轮廓高3.5m,桥面宽35.5m,全宽40.5m,划分18个标准节段、钢混结合段、合龙段,标准节段长度15.5m。边跨为混凝土箱梁结构,混凝土箱梁采用单箱三室箱形断面,标准截面宽35.5m,中心处截面高度3.52m,全桥共布置36对144根斜拉索。主桥立面布置如图2所示,主梁横断面如图3所示。

采用Midas Civil有限元分析软件建立全桥模型,做一次成桥模型及施工阶段模拟计算模型,全桥离散成899个阶段、732个单元,用单主梁模型模拟桥面系,索与主梁用刚性连接进行连接,塔梁连接用弹性

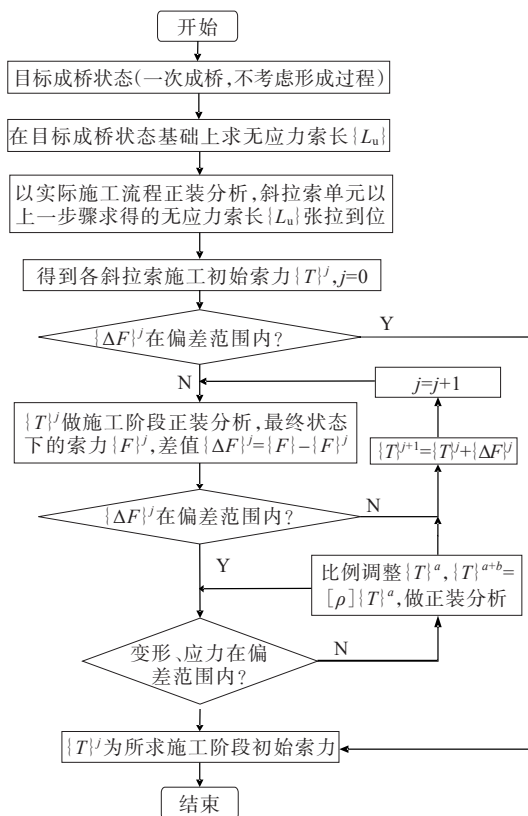


图1 由目标成桥状态求施工过程初始索力循环计算流程图  
Figure 1 Flow chart of initial cable force cycle calculation for construction process according to target bridge state

连接中的刚性连接,空间梁单元模拟塔、梁,只受拉单元当中的索单元模拟拉索。全桥模型如图4所示。

### 2.1.2 施工流程

先施工主塔、边墩、辅助墩,主塔施工至中塔柱

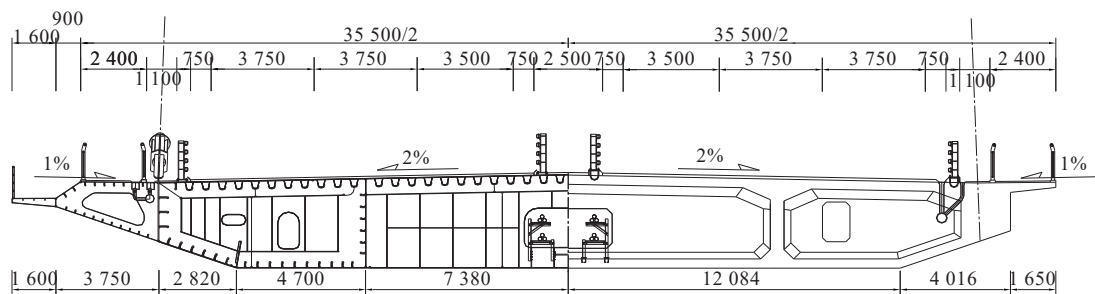


图3 主梁标准横断面图(单位:mm)

Figure 3 Standard cross-sectional view of girder(unit:mm)

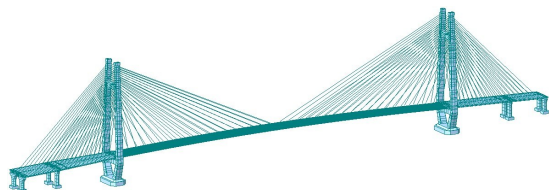


图4 桥梁有限元模型

Figure 4 Finite element model of bridge

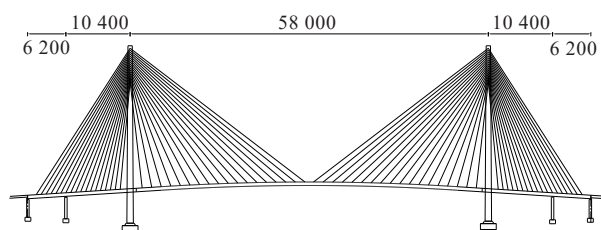


图2 主桥立面图(单位:cm)

Figure 2 Bridge elevation(unit:cm)

高度后,支架施工第一段边跨混凝土梁(边墩到辅墩段);继续施工主塔,支架第二段混凝土梁(辅墩到中跨结合段位置);支架定位中跨钢混结合段、1#主梁,安装塔梁临时固结;安装吊机后悬臂拼装中跨主梁;吊机就位抬吊合龙段,配切合龙,合龙后拆除塔梁临时固结、吊机,最后做铺装。该桥梁的施工流程工况划分如表1所示。

### 2.2 目标成桥状态

设计单位根据该桥梁最终核实的实际主梁自重以及二期恒载重量,计算出该桥梁的目标成桥状态,包括索力状态(表2)、主梁内力(应力)状态(图5)、塔偏状态(图6)。本桥为双塔对称结构,文中均仅显示一个塔的结果。

### 2.3 由目标成桥状态计算斜拉索无应力索长

根据拉索成桥目标状态的锚点间索长,通过成桥目标索力,计算拉索弹性伸长,并考虑拉索垂度效应,得到拉索总伸长量,叠加至锚点间索长即可得到拉索的无应力索长 $\{L_u\}$ ,结果如表3所示。

### 2.4 由斜拉索无应力索长计算斜拉索原始初始索力

根据实际施工流程新建模型,分阶段激活、钝化单元、边界、荷载,上一步计算无应力索长 $\{L_u\}$ 输入到斜拉索的单元表格中,进行施工阶段正装计算,提取各斜拉索张拉工况的索力 $\{T\}^j, j=0$ 。

### 2.5 正装迭代计算确定拉索施工初始索力

在含有施工过程的模型添加初拉力荷载 $\{T\}^j$ ,后

表 1 施工流程划分

Table 1 Construction process division

| 阶段   | 工况   |
|------|--|
| 1    | 塔完成施工、第一段边跨混凝土梁(74 m, 边墩到辅墩段)支架施工          |
| 2    | 第二段边跨混凝土梁(100 m, 辅墩到中跨结合段位置) 支架施工、安装塔梁临时固结 |
| 3    | 支架施工中跨钢混结合段、1 <sup>#</sup> 主梁              |
| 4    | 安装吊机                                       |
| 5    | 边、中跨 1 <sup>#</sup> 索张拉                    |
| 4n-2 | 吊机前移至(n-1) <sup>#</sup> 梁前端                |
| 4n-1 | 中跨 n <sup>#</sup> 梁起吊                      |
| 4n   | 吊机松钩                                       |
| 4n+1 | n <sup>#</sup> 索张拉                         |
| 74   | 两侧吊机前移就位                                   |
| 75   | 抬吊合龙段                                      |
| 76   | 中跨合龙段焊接、栓接                                 |
| 77   | 安装塔梁永久支座、拆除塔梁临时固结                          |
| 78   | 拆除边跨支架、吊机                                  |
| 79   | 中跨浇筑 UHPC, 形成刚度                            |
| 80   | 二期铺装                                       |

表 2 目标成桥索力状态

Table 2 Target cable forces of completed state

| 边跨  | 成桥    | 边跨 | 成桥    | 中跨 | 成桥    | 中跨  | 成桥    |
|-----|-------|----|-------|----|-------|-----|-------|
| 索号  | 索力/kN | 索号 | 索力/kN | 索号 | 索力/kN | 索号  | 索力/kN |
| S18 | 6 308 | S9 | 5 334 | M1 | 4 803 | M10 | 3 885 |
| S17 | 6 300 | S8 | 5 153 | M2 | 3 947 | M11 | 4 056 |
| S16 | 6 250 | S7 | 4 962 | M3 | 2 489 | M12 | 4 243 |
| S15 | 6 177 | S6 | 4 732 | M4 | 2 658 | M13 | 4 409 |
| S14 | 6 085 | S5 | 4 531 | M5 | 2 858 | M14 | 4 583 |
| S13 | 5 939 | S4 | 4 276 | M6 | 3 060 | M15 | 4 752 |
| S12 | 5 804 | S3 | 3 993 | M7 | 3 282 | M16 | 4 904 |
| S11 | 5 644 | S2 | 6 073 | M8 | 3 485 | M17 | 5 036 |
| S10 | 5 509 | S1 | 6 256 | M9 | 3 686 | M18 | 5 173 |

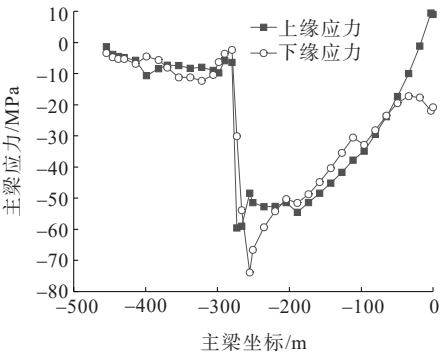


图 5 成桥目标主梁应力状态

Figure 5 Target stress state of girder of completed bridge

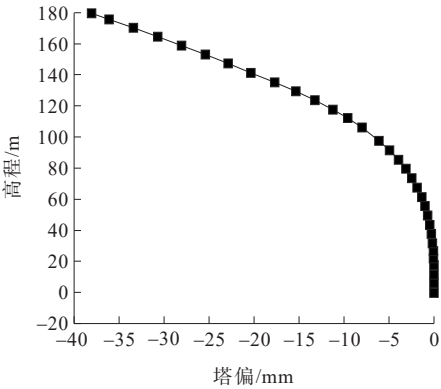


图 6 成桥目标塔偏状态

Figure 6 Target pylon deflection state of completed bridge

表 3 无应力索长计算结果

Table 3 Calculation results of unstressed cable length

| 索号  | 拉索型号        | 索锚点间<br>索长/m | 弹性伸长<br>量/mm | 拉索垂度<br>修正/mm | 无应力索<br>长 $L_u$ /m |
|-----|-------------|--------------|--------------|---------------|--------------------|
| S18 | PES(C)7-313 | 210.920      | 562.3        | 4.9           | 210.363            |
| S17 | PES(C)7-301 | 203.033      | 561.0        | 3.9           | 202.476            |
| S16 | PES(C)7-301 | 195.204      | 533.9        | 3.4           | 194.673            |
| S15 | PES(C)7-301 | 187.442      | 505.5        | 3.0           | 186.940            |
| S14 | PES(C)7-301 | 179.758      | 476.3        | 2.6           | 179.284            |
| S13 | PES(C)7-283 | 172.085      | 472.6        | 2.0           | 171.615            |
| S12 | PES(C)7-283 | 164.508      | 440.3        | 1.8           | 164.070            |
| S11 | PES(C)7-283 | 157.022      | 407.3        | 1.5           | 156.616            |
| S10 | PES(C)7-265 | 149.667      | 404.1        | 1.1           | 149.264            |
| S9  | PES(C)7-253 | 142.461      | 389.5        | 0.9           | 142.072            |
| S8  | PES(C)7-241 | 135.343      | 375.0        | 0.6           | 134.969            |
| S7  | PES(C)7-223 | 128.420      | 370.2        | 0.4           | 128.051            |
| S6  | PES(C)7-211 | 121.723      | 353.6        | 0.3           | 121.370            |
| S5  | PES(C)7-199 | 114.822      | 338.9        | 0.2           | 114.483            |
| S4  | PES(C)7-187 | 109.015      | 323.8        | 0.1           | 108.691            |
| S3  | PES(C)7-187 | 103.307      | 287.2        | 0.1           | 103.020            |
| S2  | PES(C)7-265 | 97.260       | 292.3        | 0.0           | 96.967             |
| S1  | PES(C)7-265 | 92.058       | 286.8        | 0.0           | 91.771             |
| M1  | PES(C)7-211 | 87.483       | 256.8        | 0.0           | 87.226             |
| M2  | PES(C)7-187 | 94.314       | 256.0        | 0.1           | 94.058             |
| M3  | PES(C)7-127 | 103.532      | 260.5        | 0.3           | 103.272            |
| M4  | PES(C)7-127 | 113.451      | 304.4        | 0.5           | 113.148            |
| M5  | PES(C)7-139 | 124.465      | 327.8        | 0.8           | 124.138            |
| M6  | PES(C)7-151 | 137.091      | 357.1        | 1.3           | 136.736            |
| M7  | PES(C)7-163 | 149.865      | 391.4        | 2.0           | 149.475            |
| M8  | PES(C)7-187 | 163.162      | 399.6        | 3.1           | 162.766            |
| M9  | PES(C)7-187 | 176.874      | 463.2        | 3.8           | 176.414            |
| M10 | PES(C)7-187 | 190.850      | 530.2        | 4.4           | 190.324            |
| M11 | PES(C)7-199 | 205.094      | 561.0        | 5.9           | 204.539            |
| M12 | PES(C)7-211 | 219.553      | 591.7        | 7.8           | 218.969            |
| M13 | PES(C)7-211 | 234.189      | 652.0        | 9.1           | 233.546            |

续表 3

| 索号  | 拉索型号        | 索锚点间    | 弹性伸长  | 拉索垂度  | 无应力索       |
|-----|-------------|---------|-------|-------|------------|
|     |             | 索长/m    | 量/mm  | 修正/mm | 长 $L_0$ /m |
| M14 | PES(C)7-223 | 248.973 | 677.6 | 11.7  | 248.307    |
| M15 | PES(C)7-241 | 263.831 | 684.9 | 15.4  | 263.162    |
| M16 | PES(C)7-241 | 278.800 | 742.8 | 17.5  | 278.075    |
| M17 | PES(C)7-253 | 293.864 | 762.9 | 22.0  | 293.123    |
| M18 | PES(C)7-253 | 309.009 | 819.1 | 24.9  | 308.215    |

进行施工阶段正装分析,得到成桥索力 $\{F\}^j$ ,修正 $\{T\}^{j+1}=\{T\}^j+\{\Delta F\}^j$ ,再进行施工阶段正装分析,做3次迭代(迭代到 $j=2$ ),根据 $p=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n\left(\frac{|\Delta F_i|}{T_i}\right)$ 判断结果偏差程度。3轮迭代成桥索力和偏差、塔偏、主梁上缘应力的变化规律如图7~11所示,施工初始索力、成桥索力及偏差如表4所示。

由图7~11及表4可知:

(1) 用无应力索长按照表1的施工流程进行首次正装计算得到的成桥状态,平均误差指标 $p=3.68\%$ ,短索S3、S2、S1、M1、M2、M3的成桥索力与

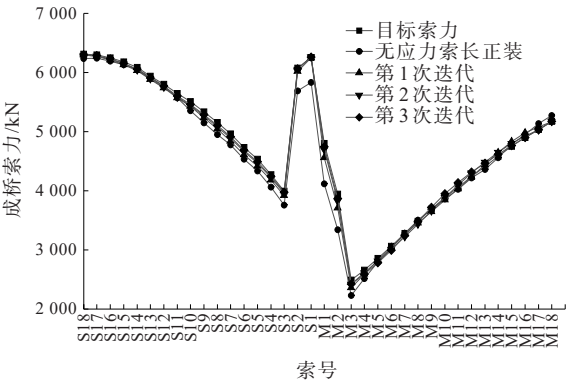


图7 迭代过程成桥索力变化  
Figure 7 Variation of cable force of completed bridge during iteration

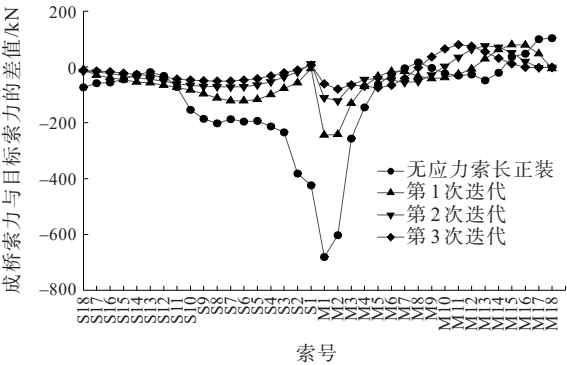


图8 迭代过程成桥索力与目标索力的差值变化  
Figure 8 Difference between cable force of completed bridge and target cable force during iteration

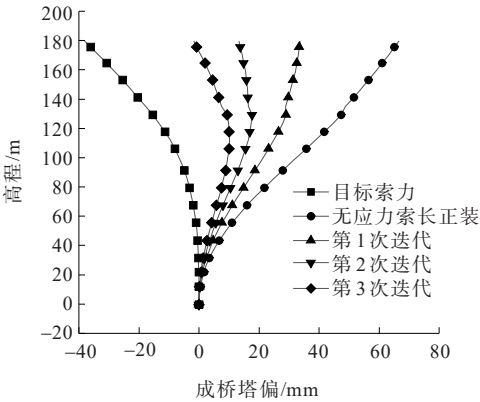


图9 迭代过程成桥塔偏变化(负值表示往边跨侧偏)  
Figure 9 Variation of pylon deflection of completed bridge during iteration (negative values indicate deflection towards side span)

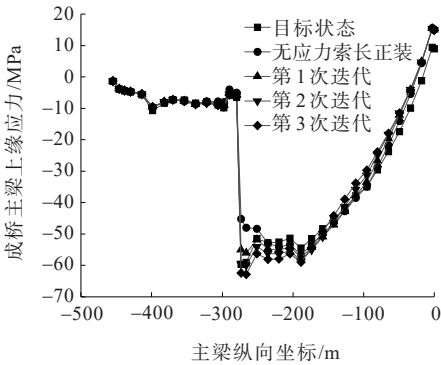


图10 迭代过程成桥主梁上缘应力变化  
Figure 10 Stress variation at upper edge of girder of completed bridge during iteration

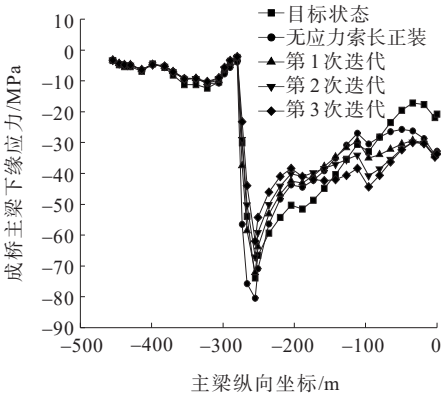


图11 迭代过程成桥主梁下缘应力变化  
Figure 11 Stress variation at lower edge of girder of completed bridge during iteration

目标相差较大。经过首3次差值迭代,成桥索力差值取得较快的收敛效果, $p$ 减小到1.09%。但随迭代次数增大,索力的收敛速率减小。

(2) 首次正装计算,在目标状态主梁控制截面的



表 4 索力迭代过程表

Table 4 Iteration process of cable force

kN

| 索号  | 目标成<br>桥索力 | 无应力索长计算    |           |                  | 第 1 次迭代    |           |                  | 第 2 次迭代    |           |                  | 第 3 次迭代    |           |                  |
|-----|------------|------------|-----------|------------------|------------|-----------|------------------|------------|-----------|------------------|------------|-----------|------------------|
|     |            | $p=3.68\%$ |           |                  | $p=1.80\%$ |           |                  | $p=1.28\%$ |           |                  | $p=1.09\%$ |           |                  |
|     |            | $\{T\}^0$  | $\{F\}^0$ | $\{\Delta F\}^0$ | $\{T\}^1$  | $\{F\}^1$ | $\{\Delta F\}^1$ | $\{T\}^2$  | $\{F\}^2$ | $\{\Delta F\}^2$ | $\{T\}^3$  | $\{F\}^3$ | $\{\Delta F\}^3$ |
| S18 | 6 308      | 4 511      | 6 235     | -73              | 4 584      | 6 299     | -10              | 4 594      | 6 293     | -15              | 4 609      | 6 297     | -12              |
| S17 | 6 300      | 4 565      | 6 242     | -58              | 4 624      | 6 271     | -29              | 4 653      | 6 282     | -18              | 4 671      | 6 286     | -14              |
| S16 | 6 250      | 4 529      | 6 194     | -55              | 4 584      | 6 211     | -38              | 4 622      | 6 226     | -24              | 4 646      | 6 233     | -17              |
| S15 | 6 177      | 4 493      | 6 133     | -44              | 4 537      | 6 131     | -46              | 4 583      | 6 146     | -31              | 4 614      | 6 156     | -22              |
| S14 | 6 085      | 4 457      | 6 058     | -27              | 4 484      | 6 031     | -54              | 4 538      | 6 046     | -39              | 4 576      | 6 058     | -27              |
| S13 | 5 939      | 4 474      | 5 921     | -18              | 4 492      | 5 881     | -57              | 4 549      | 5 895     | -44              | 4 593      | 5 908     | -30              |
| S12 | 5 804      | 4 437      | 5 772     | -32              | 4 468      | 5 738     | -65              | 4 534      | 5 753     | -51              | 4 585      | 5 768     | -36              |
| S11 | 5 644      | 4 329      | 5 573     | -71              | 4 400      | 5 571     | -72              | 4 472      | 5 583     | -61              | 4 533      | 5 601     | -43              |
| S10 | 5 509      | 4 287      | 5 355     | -154             | 4 441      | 5 427     | -82              | 4 523      | 5 443     | -66              | 4 589      | 5 462     | -47              |
| S9  | 5 334      | 4 240      | 5 148     | -186             | 4 426      | 5 238     | -96              | 4 522      | 5 265     | -69              | 4 591      | 5 284     | -50              |
| S8  | 5 153      | 4 213      | 4 951     | -202             | 4 415      | 5 042     | -111             | 4 526      | 5 082     | -71              | 4 597      | 5 103     | -50              |
| S7  | 4 962      | 4 218      | 4 774     | -188             | 4 406      | 4 840     | -122             | 4 528      | 4 890     | -72              | 4 600      | 4 912     | -50              |
| S6  | 4 732      | 4 130      | 4 536     | -196             | 4 326      | 4 611     | -121             | 4 447      | 4 662     | -71              | 4 518      | 4 685     | -47              |
| S5  | 4 531      | 4 039      | 4 338     | -193             | 4 231      | 4 415     | -117             | 4 348      | 4 467     | -65              | 4 413      | 4 490     | -41              |
| S4  | 4 276      | 3 869      | 4 063     | -213             | 4 082      | 4 177     | -99              | 4 180      | 4 222     | -53              | 4 234      | 4 244     | -32              |
| S3  | 3 993      | 3 657      | 3 759     | -234             | 3 891      | 3 917     | -77              | 3 968      | 3 958     | -36              | 4 004      | 3 972     | -21              |
| S2  | 6 073      | 5 685      | 5 691     | -382             | 6 067      | 6 016     | -57              | 6 124      | 6 054     | -19              | 6 143      | 6 062     | -11              |
| S1  | 6 256      | 5 983      | 5 832     | -424             | 6 407      | 6 251     | -5               | 6 413      | 6 268     | 11               | 6 402      | 6 263     | 7                |
| M1  | 4 803      | 4 443      | 4 121     | -681             | 5 125      | 4 558     | -245             | 5 369      | 4 693     | -110             | 5 479      | 4 742     | -60              |
| M2  | 3 947      | 3 135      | 3 345     | -603             | 3 738      | 3 705     | -242             | 3 979      | 3 825     | -122             | 4 101      | 3 868     | -79              |
| M3  | 2 489      | 1 923      | 2 232     | -256             | 2 179      | 2 358     | -130             | 2 310      | 2 423     | -65              | 2 375      | 2 425     | -64              |
| M4  | 2 658      | 2 117      | 2 513     | -145             | 2 262      | 2 589     | -69              | 2 331      | 2 613     | -45              | 2 376      | 2 589     | -69              |
| M5  | 2 858      | 2 306      | 2 794     | -64              | 2 370      | 2 825     | -33              | 2 403      | 2 816     | -42              | 2 444      | 2 783     | -75              |
| M6  | 3 060      | 2 476      | 3 032     | -28              | 2 504      | 3 045     | -16              | 2 520      | 3 013     | -47              | 2 567      | 2 994     | -66              |
| M7  | 3 282      | 2 602      | 3 277     | -4               | 2 607      | 3 266     | -15              | 2 622      | 3 226     | -55              | 2 677      | 3 241     | -41              |
| M8  | 3 485      | 2 696      | 3 502     | 17               | 2 679      | 3 452     | -34              | 2 712      | 3 434     | -51              | 2 764      | 3 484     | -2               |
| M9  | 3 686      | 2 871      | 3 683     | -3               | 2 874      | 3 644     | -42              | 2 916      | 3 658     | -28              | 2 944      | 3 723     | 37               |
| M10 | 3 885      | 3 044      | 3 862     | -24              | 3 067      | 3 847     | -39              | 3 106      | 3 889     | 3                | 3 103      | 3 950     | 65               |
| M11 | 4 056      | 3 162      | 4 025     | -30              | 3 193      | 4 030     | -25              | 3 218      | 4 090     | 34               | 3 184      | 4 135     | 80               |
| M12 | 4 243      | 3 313      | 4 215     | -27              | 3 340      | 4 236     | -7               | 3 347      | 4 307     | 64               | 3 283      | 4 317     | 74               |
| M13 | 4 409      | 3 415      | 4 361     | -49              | 3 464      | 4 439     | 29               | 3 434      | 4 485     | 76               | 3 359      | 4 464     | 55               |
| M14 | 4 583      | 3 506      | 4 561     | -21              | 3 527      | 4 644     | 62               | 3 465      | 4 654     | 71               | 3 394      | 4 614     | 31               |
| M15 | 4 752      | 3 605      | 4 789     | 37               | 3 569      | 4 832     | 80               | 3 489      | 4 803     | 51               | 3 438      | 4 763     | 11               |
| M16 | 4 904      | 3 758      | 4 951     | 47               | 3 711      | 4 982     | 78               | 3 632      | 4 924     | 20               | 3 612      | 4 902     | -1               |
| M17 | 5 036      | 3 878      | 5 135     | 99               | 3 779      | 5 084     | 48               | 3 732      | 5 034     | -2               | 3 734      | 5 034     | -2               |
| M18 | 5 173      | 4 037      | 5 276     | 104              | 3 933      | 5 167     | -6               | 3 939      | 5 172     | -1               | 3 940      | 5 172     | -1               |

注： $p=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n(\Delta F_i/T_i)$ 。

位置,得到的成桥主梁上缘应力状态与目标状态上  
缘应力相差约 14 MPa,经过首 3 次差值迭代,成桥主

梁上缘应力状态与目标状态较为接近。  
(3) 首次正装计算得到的成桥塔偏与目标状态

偏差较大(相差 105 mm),经过首 3 次差值迭代,虽然成桥塔偏偏差有减小趋势,但 3 轮迭代计算后成桥塔偏仍有明显偏差(第 3 次迭代塔偏往边跨偏 2 mm,目标塔偏为往边跨偏 38 mm)。

综合以上信息,经过 3 次差值迭代,索力及应力的偏差均已满足工程要求,但塔偏的偏差仍较明显,继续采用差值迭代的计算效率较低。

2.6 根据塔偏目标状态进一步修正拉索施工初始索力

经过 3 次差值迭代,索力及应力的偏差均已满足要求,但塔偏的偏差仍较明显(第 3 次迭代塔偏往边跨偏 2 mm,目标塔偏为往边跨偏 38 mm),为进一步减小塔偏偏差,对边跨、中跨的施工初始索力按不同的比例进行调整。在第 3 次迭代的基础上,边跨施工索力增大 1.0%,中跨施工索力减小 1.0%,进行第 4 次计算;在第 3 次迭代的基础上,边跨施工索力增大 1.5%,中跨施工索力减小 1.5%,进行第 5 次计算。两次试算的计算过程如表 5 所示,塔偏、主梁上下缘应力变化规律如图 12~14 所示。

表 5 根据塔偏目标状态进一步修正拉索施工初始索力计算过程

| Table 5 Calculation process of initial cable force for modified cable construction according to target pylon deflection state kN |        |                              |           |                  |                              |           |                  |
|--|--------|------------------------------|-----------|------------------|------------------------------|-----------|------------------|
| 索号   | 目标成桥索力 | 第4次计算(施工索力边跨增大1.0%,中跨减小1.0%) |           |                  | 第5次计算(施工索力边跨增大1.5%,中跨减小1.5%) |           |                  |
|  |        | $p=1.17\%$                   |           |                  | $p=1.25\%$                   |           |                  |
|  |        | $\{T\}^4$                    | $\{F\}^4$ | $\{\Delta F\}^4$ | $\{T\}^5$                    | $\{F\}^5$ | $\{\Delta F\}^5$ |
| S18  | 6 308  | 4 656                        | 6 339     | 31               | 4 679                        | 6 360     | 51               |
| S17  | 6 300  | 4 718                        | 6 321     | 21               | 4 741                        | 6 338     | 38               |
| S16  | 6 250  | 4 692                        | 6 261     | 11               | 4 716                        | 6 276     | 26               |
| S15  | 6 177  | 4 661                        | 6 178     | 1                | 4 684                        | 6 189     | 12               |
| S14  | 6 085  | 4 622                        | 6 073     | -12              | 4 645                        | 6 081     | -4               |
| S13  | 5 939  | 4 639                        | 5 920     | -19              | 4 662                        | 5 926     | -13              |
| S12  | 5 804  | 4 630                        | 5 773     | -31              | 4 653                        | 5 776     | -28              |
| S11  | 5 644  | 4 579                        | 5 601     | -43              | 4 601                        | 5 600     | -43              |
| S10  | 5 509  | 4 634                        | 5 459     | -50              | 4 657                        | 5 458     | -51              |
| S9   | 5 334  | 4 637                        | 5 280     | -54              | 4 660                        | 5 278     | -56              |
| S8   | 5 153  | 4 643                        | 5 098     | -55              | 4 666                        | 5 096     | -57              |
| S7   | 4 962  | 4 646                        | 4 908     | -54              | 4 669                        | 4 906     | -56              |
| S6   | 4 732  | 4 563                        | 4 680     | -53              | 4 586                        | 4 677     | -55              |
| S5   | 4 531  | 4 457                        | 4 484     | -47              | 4 479                        | 4 481     | -50              |
| S4   | 4 276  | 4 276                        | 4 239     | -36              | 4 297                        | 4 237     | -39              |
| S3   | 3 993  | 4 044                        | 3 968     | -26              | 4 064                        | 3 965     | -28              |
| S2   | 6 073  | 6 204                        | 6 067     | -6               | 6 235                        | 6 069     | -4               |

续表 5

| 索号  | 目标成桥索力 | 第4次计算(施工索力边跨增大1.0%,中跨减小1.0%) |           |                  | 第5次计算(施工索力边跨增大1.5%,中跨减小1.5%) |           |                  |
|-----|--------|------------------------------|-----------|------------------|------------------------------|-----------|------------------|
|     |        | $p=1.17\%$                   |           |                  | $p=1.25\%$                   |           |                  |
|     |        | $\{T\}^4$                    | $\{F\}^4$ | $\{\Delta F\}^4$ | $\{T\}^5$                    | $\{F\}^5$ | $\{\Delta F\}^5$ |
| S1  | 6 256  | 6 466                        | 6 281     | 25               | 6 498                        | 6 290     | 34               |
| M1  | 4 803  | 5 424                        | 4 732     | -71              | 5 397                        | 4 727     | -76              |
| M2  | 3 947  | 4 060                        | 3 874     | -73              | 4 040                        | 3 877     | -70              |
| M3  | 2 489  | 2 351                        | 2 434     | -55              | 2 339                        | 2 438     | -51              |
| M4  | 2 658  | 2 352                        | 2 595     | -63              | 2 340                        | 2 598     | -60              |
| M5  | 2 858  | 2 420                        | 2 788     | -70              | 2 408                        | 2 791     | -67              |
| M6  | 3 060  | 2 541                        | 2 996     | -64              | 2 528                        | 2 997     | -63              |
| M7  | 3 282  | 2 651                        | 3 244     | -38              | 2 637                        | 3 245     | -37              |
| M8  | 3 485  | 2 736                        | 3 489     | 4                | 2 722                        | 3 492     | 7                |
| M9  | 3 686  | 2 915                        | 3 730     | 44               | 2 900                        | 3 733     | 47               |
| M10 | 3 885  | 3 072                        | 3 957     | 72               | 3 056                        | 3 960     | 75               |
| M11 | 4 056  | 3 152                        | 4 144     | 89               | 3 136                        | 4 149     | 93               |
| M12 | 4 243  | 3 250                        | 4 327     | 85               | 3 234                        | 4 333     | 90               |
| M13 | 4 409  | 3 325                        | 4 472     | 63               | 3 308                        | 4 476     | 67               |
| M14 | 4 583  | 3 360                        | 4 621     | 38               | 3 343                        | 4 624     | 42               |
| M15 | 4 752  | 3 403                        | 4 766     | 14               | 3 386                        | 4 768     | 16               |
| M16 | 4 904  | 3 576                        | 4 897     | -7               | 3 558                        | 4 894     | -10              |
| M17 | 5 036  | 3 697                        | 5 015     | -21              | 3 678                        | 5 005     | -31              |
| M18 | 5 173  | 3 900                        | 5 131     | -42              | 3 881                        | 5 111     | -62              |

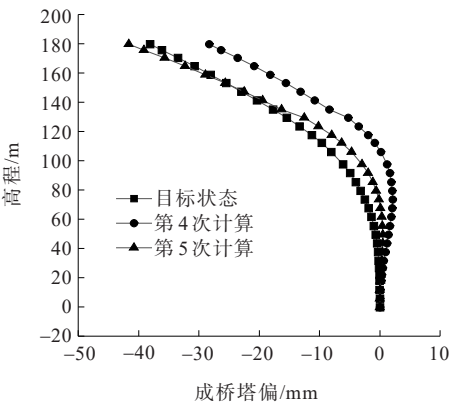


图 12 成桥塔偏状态变化(负值表示往边跨侧偏)  
Figure 12 Variation of pylon deflection state of completed bridge (negative values indicate deflection towards side span)

由表 5 及图 12~14 可知:

- (1) 按比例调整边、中跨的施工初始索力后,索力整体偏差维持在较低水平(第 4 次为 1.17%,第 5 次为 1.25%),满足工程要求。
- (2) 由于边、中跨的施工初始索力调整比例很小,调整后的成桥主梁应力状态与调整前几乎没有变化。
- (3) 按比例调整边、中跨的施工索力后,成桥塔

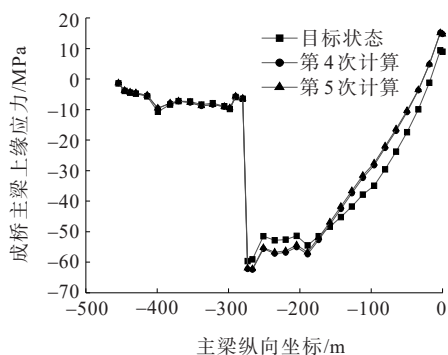


图 13 成桥状态主梁上缘应力变化

Figure 13 Stress variation at upper edge of girder of completed bridge

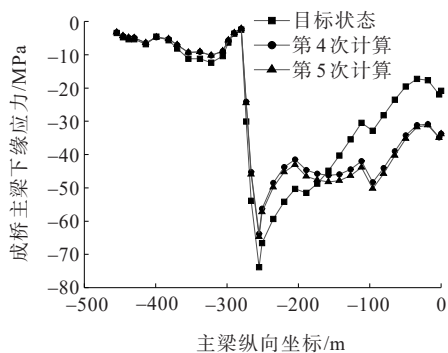


图 14 成桥状态主梁下缘应力变化

Figure 14 Stress variation at lower edge of girder of completed bridge

偏与目标塔偏的偏差可有效减少,在合适的调整量下偏差可控制在较小的水平(第5次计算塔偏往中跨偏 41 mm,目标塔偏为往边跨偏 38 mm)。

第5次计算的成桥索力状态、应力状态、塔偏状态与目标成桥状态均比较接近,因此选择第5次计算的结果作为本工程算例的施工索力。

## 2.7 算例结果

把本文方法应用于上述算例中,能成功计算出满足工程精度要求的成桥状态,该方法在此算例应用中有下列结论:

(1) 拉索的无应力索长只与成桥状态有关,与施工过程无关,由此可以通过成桥目标状态确定拉索的无应力索长。

(2) 建立正装施工过程模型,拉索以无应力索长作为安装(即激活)条件,计算得到拉索原始施工索力,该施工索力计算得到的成桥索力状态与目标状态偏差不大(本算例该偏差为 3.68%),该施工索力可作为后续迭代法的一组合理迭代起点。

(3) 为了使最终成桥状态进一步接近目标状态,可把无应力索长计算得到的拉索原始初始索力作为起点,进而通过差值迭代调整初始索力,经过若干次迭代(本算例显示通过 3 次迭代,索力偏差逐次减小为 1.80%、1.28%、1.09%)。当迭代后的成桥状态索力与目标成桥状态索力偏差较小时,成桥应力状态能同时满足要求。

(4) 最后根据主塔变形等其他目标的要求,微调初始索力,使成桥索力、应力、塔偏等各种成桥状态接近目标状态。

## 3 结语

本文针对斜拉桥由成桥状态求解施工初始索力的问题,提出用一种无应力索长结合正装迭代的计算方法。以一座已知成桥状态的混合梁斜拉桥为研究算例,首先由成桥状态计算斜拉索无应力长度,然后由无应力索长进行施工正装分析得到拉索原始初始索力,进而通过差值迭代调整初始索力,最后根据主塔变形微调的初始索力,求得到的成桥状态接近目标状态。

该方法综合了无应力状态法和正装差值迭代法的优点,能取得满足工程精度的结果,通过无应力索长确定合理的初始索力作为迭代起点,可加快正装差值迭代法的收敛速率,减少计算量,节省计算时间。

## 参考文献:

## References:

- [1] 杜国华,姜林.斜拉桥的合理索力及其施工张拉力[J].桥梁建设,1989,19(3):11-17.  
DU Guohua,JIANG Lin.Reasonable cable force of cable-stayed bridge and its construction tension[J]. Bridge Construction,1989,19(3):11-17.
- [2] 辛克贵,冯仲.大跨度斜拉桥的施工非线性倒拆分析[J].工程力学,2004,21(5):31-35.  
XIN Kegui,FENG Zhong.Nonlinear static reverse analysis of long-span cable-stayed bridges during construction[J]. Engineering Mechanics,2004,21(5):31-35.
- [3] 范立础,杜国华,马健中.斜拉桥索力优化及非线性理想倒退分析[J].重庆交通学院学报,1992,11(1):1-12.  
FAN Lichu, DU Guohua, MA Jianzhong.Optimization of cable force of cable-stayed bridges and nonlinear ideal reverse analysis[J]. Journal of Chongqing Jiaotong



- University,1992,11(1):1-12.
- [4] 坎彬.大跨钢桁梁斜拉桥索力优化方法研究[D].成都:西南交通大学,2020.
- KAN Bin. Study on cable force optimization method of long-span steel truss girder cable-stayed bridge[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University,2020.
- [5] 秦顺全.分阶段施工桥梁的无应力状态控制法[J].桥梁建设,2008,38(1):8-14.
- QIN Shunquan. Unstressed state control method for bridges constructed in stages[J]. Bridge Construction,2008,38(1):8-14.
- [6] 李炎,陈常松,董道福.斜拉桥施工控制张拉力的计算方法研究[J].中外公路,2019,39(2):157-161.
- LI Yan, CHEN Changsong, DONG Daofu. Research on calculation method of cable tension in construction control of cable-stayed bridge[J]. Journal of China & Foreign Highway,2019,39(2):157-161.
- [7] 吴月星,张博恒,周建庭,等.基于无应力正装迭代法的大跨混凝土斜拉桥合理施工状态分析[J].公路工程,2020,45(5):15-20,72.
- WU Yuexing,ZHANG Boheng,ZHOU Jianting,et al. Analysis of reasonable construction state of the long-span concrete cable-stayed bridge based on stress-free forward iteration method[J]. Highway Engineering,2020,45(5):15-20,72.
- [8] 涂光亚,周城勇.大跨度组合梁斜拉桥中跨合龙口相对转角误差分析[J].中外公路,2023,43(6):115-119.
- TU Guanya,ZHOU Chengyong. Error analysis of relative angle at the central-span closure of long-span composite girder cable-stayed bridges[J]. Journal of China & Foreign Highway,2023,43(6):115-119.
- [9] 施洲,胡豪,周文,等.大跨度混合梁斜拉桥施工控制关键技术[J].桥梁建设,2018,48(3):111-115.
- SHI Zhou,HU Hao,ZHOU Wen,et al. Construction control key technique of long-span hybrid girder cable-stayed bridge[J]. Bridge Construction,2018,48(3):111-115.
- [10] 徐林,刘琪.基于无应力状态控制法的斜拉桥安装计算方法研究[J].中外公路,2019,39(1):149-154.
- XU Lin, LIU Qi. Study on calculation method of cable-stayed bridge installation based on unstressed state control method[J]. Journal of China & Foreign Highway,2019,39(1):149-154.
- [11] 岳青,严和仲,阙水杰,等.大跨度钢箱梁斜拉桥施工控制[J].桥梁建设,2013,43(4):54-60.
- YUE Qing,YAN Hezhong,QUE Shuijie,et al. Construction control of long span steel box girder cable-stayed bridge [J]. Bridge Construction,2013,43(4):54-60.
- [12] 颜东煌,刘光栋.确定斜拉桥合理施工状态的正装迭代法[J].中国公路学报,1999,12(2):59-64.
- YAN Donghuang, LIU Guangdong. Forward iteration method for determining reasonable construction state of cable-stayed bridge[J]. China Journal of Highway and Transport,1999,12(2):59-64.
- [13] 李介立,夏永豪,张啸文,等.叠合梁斜拉桥合理施工状态确定的正装差值迭代法[J].中外公路,2023,43(6):218-223.
- LI Jieli, XIA Yonghao, ZHANG Xiaowen, et al. Forward difference iteration method for determining reasonable construction state of cable-stayed bridges with stacked girders[J]. Journal of China & Foreign Highway,2023,43(6):218-223.
- [14] 曾三林.大跨非对称叠合/混合梁斜拉桥合理施工状态及过程参数识别研究[D].成都:西南交通大学,2019.
- ZENG Sanlin. Study on reasonable construction state and process parameter identification of long-span asymmetric composite/mixed beam cable-stayed bridge[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University,2019.
- [15] 李乔,单德山,卜一之,等.大跨度桥梁施工控制倒拆分析法的闭合条件[C]//重庆:第十七届全国桥梁学术会议论文集,2006.
- LI Qiao,SHAN Deshan,BU Yizhi et al. Closure conditions of construction control inversion and demolition analysis method for large span bridges[C]//Chongqing:Proceedings of the 17th National Bridge Academic Conference,2006:42-46.
- [16] 梁志广,李建中,石现峰.斜拉桥施工初始索力的确定[J].工程力学,2000,17(3):121-126.
- LIANG Zhiguang, LI Jianzhong, SHI Xianfeng. The determination of the initial cable forces for cable-stayed bridges[J]. Engineering Mechanics,2000,17(3):121-126.
- [17] 林桢楷.差值法确定矮塔斜拉桥的初张索力[J].科学技术与工程,2010,10(16):4068-4070,4079.
- LIN Zhenkai. Determined the construction cable tension force of the extradosed cable-stayed bridge based on the differential method[J]. Science Technology and Engineering,2010,10(16):4068-4070,4079.