

# 叠合梁斜拉桥合理施工状态确定的正装差值迭代法

李介立<sup>1</sup>,夏永豪<sup>1</sup>,张啸文<sup>2</sup>,赵长春<sup>1</sup>

(1.中电建路桥集团有限公司,北京市 100070;2.长沙理工大学,湖南 长沙 410114)

**摘要:**为解决叠合梁斜拉桥合理施工状态索力确定的难题,基于斜拉桥合理施工状态索力确定正装迭代法和差值迭代法的计算原理,该文提出斜拉桥合理设计状态确定的正装差值迭代法,编写合理施工阶段索力计算程序,开发实现合理施工阶段索力自动优化功能。将此法应用于一座双塔叠合梁斜拉桥,当迭代到第10次时,大部分索力偏差已在5%以内;当迭代到第15次时,大部分索力偏差在3%以内;当迭代到第20次时,各斜拉索索力偏差均在0.5%以内。相较于基于影响矩阵法确定施工阶段索力的正装迭代法,正装差值迭代法无需多次提取复杂的影响矩阵,仅需将每次迭代计算得到的成桥索力与目标成桥索力取差值,然后根据差值对下一次迭代的施工阶段索力进行更新,方便易操作,且能满足工程精度要求。

**关键词:**斜拉桥;合理施工状态;正装迭代法;差值迭代法;有限元

**中图分类号:**U448.27

**文献标志码:**A

## 0 引言

斜拉桥是一种复杂的高次超静定结构。在斜拉桥的设计和施工阶段,通常需要确定其合理成桥状态与合理施工状态<sup>[1-4]</sup>,也统称为合理设计状态。从狭义的角度来说,可将斜拉桥合理成桥状态的确定看成是这样一个过程:首先确定一组成桥索力,按这组索力进行一次落架计算,在计算得到的成桥状态下,斜拉桥结构的受力状态和变形处于合理的状态,该组索力即合理成桥索力,该状态即合理成桥状态。同样,斜拉桥合理施工状态的确定可以看成是:根据确定的合理成桥状态确定一组施工索力,使得结构在按这组施工索力进行施工得到的成桥状态下,与确定的合理成桥状态一致,并且在施工过程中结构处于安全状态,那么这组施工索力即合理施工索力,对应的施工状态即合理施工状态<sup>[5-7]</sup>。

目前确定合理施工阶段索力的方法主要有:倒拆法、正装-倒拆迭代法、正装迭代法以及无应力状态法等<sup>[8-14]</sup>。应用倒拆法、正装-倒拆迭代法及无应

力状态法确定施工索力时,由于拆除合龙段或支座时存在不平衡杆端力或反力以及混凝土收缩、徐变和垂度效应等材料几何非线性的影响,这3种方法都一定程度存在按确定的施工索力计算得到的成桥状态与合理成桥状态不闭合的问题。并且,在进行结构倒拆分析时,往往需要进行倒拆计算数据准备,其过程过于烦琐。正装迭代法的思想是:先确定一组初始施工索力,按这组索力进行计算得到的成桥状态与目标成桥状态对比,利用最小二乘法等方法对初始索力进行调整,再回到模型中进行迭代计算,最终得到与合理成桥状态对应的合理施工状态<sup>[8]</sup>。张玉平等<sup>[15]</sup>基于MOPSO优化算法,考虑多优化目标函数,确定了斜拉桥合理设计状态,计算过程稍显复杂;戴杰等<sup>[16]</sup>对斜拉桥索力确定的各种方法进行了系统总结和综述,其中也有不少基于数学算法的索力优化方法;张录斌<sup>[17]</sup>、刘耀东等<sup>[18]</sup>提出了合理施工状态确定的差值迭代法,这两篇文献的工程实际应用案例均为小跨度的独塔斜拉桥,且其主梁均非叠合梁,对于大跨叠合梁斜拉桥而言,应用计算原理和过程均较简单的差值迭代法能否快速收敛,精度能否满足工程需要存疑。本文综合正装迭代法

收稿日期:2023-08-22(修改稿)

基金项目:中电建中开高速科技项目(编号:LQKY2016-02)

作者简介:李介立,男,正高级工程师.E-mail:897632625@qq.com

和差值迭代法的基本原理,利用计算机编程语言设计编写斜拉桥合理施工阶段索力计算程序,实现施工索力自动确定,无需人为进行复杂的数据处理工作,同时也避免了人工调索复杂繁琐的工作过程,证明正装差值迭代法在双塔大跨叠合梁斜拉桥合理施工状态确定中的可行性和易实施性。

## 1 正装差值迭代法基本原理

正装差值迭代法的主要计算思路是:将确定好的合理成桥状态作为目标状态,该状态下对应的合理成桥索力作为目标索力 $F$ ,然后确定一组施工阶段索力作为初始索力 $T_0$ ,通常可选择目标索力作为这组初始施工阶段索力,如果需要减少迭代次数,也可以采用恒载平衡法确定初始索力;将这组索力 $T_0$ 代入到施工全过程有限元计算模型中,按施工全过程计算得到对应的成桥索力 $F_0$ 。此时,按初始索力 $T_0$ 计算得到的成桥索力 $F_0$ 与目标索力 $F$ 的差值为:

$$\Delta F_0 = F_0 - F \quad (1)$$

将该差值 $\Delta F_0$ 计入下一次迭代的施工阶段索力中,得到下一次计算的施工阶段索力 $T_1$ 为:

$$T_1 = T_0 - \Delta F_0 \quad (2)$$

将这组索力 $T_1$ 代入到计算模型中,按施工全过程计算得到对应的成桥索力 $F_1$ 。此时,按初始索力 $T_1$ 计算得到的成桥索力 $F_1$ 与目标索力 $F$ 的差值为:

$$\Delta F_1 = F_1 - F \quad (3)$$

重复上述过程进行迭代计算,得到每次迭代后与目标索力 $F$ 的差值 $\Delta F_i$ 和下一次迭代计算的施工阶段索力 $T_{i+1}$ :

$$\Delta F_i = F_i - F \quad (4)$$

$$T_{i+1} = T_i - \Delta F_i \quad (5)$$

直至迭代计算得到的成桥索力 $F_i$ 满足精度要求且成桥和施工过程中的结构应力符合规范和设计要求为止。

$$\sum_{j=1}^n \frac{|\Delta F_{ij}|}{nF_{ij}} \leq [p_1] \quad (6)$$

$$\max \frac{|\Delta F_{ij}|}{F_{ij}} < [p_2] \quad (7)$$

式中: $i$ 为迭代次数; $n$ 为斜拉索数量; $j$ 为斜拉索序号;

$p_1$ 为平均偏差,通常可取 $[0.005 \sim 0.02]$ ;  $p_2$ 为最大偏差,通常可取 $[0.01 \sim 0.05]$ <sup>[8]</sup>,实际计算时可按精度要求取值。

利用正装差值迭代法计算合理施工阶段索力的流程如图1所示。由于叠合梁斜拉桥索力一般都需要多次调整,可首先以主梁节段施工过程中的最后一次索力调整时的索力为变量进行正装差值迭代,而后再根据倒拆或正装迭代计算分析确定其他索力调整时的索力张力<sup>[19-21]</sup>。

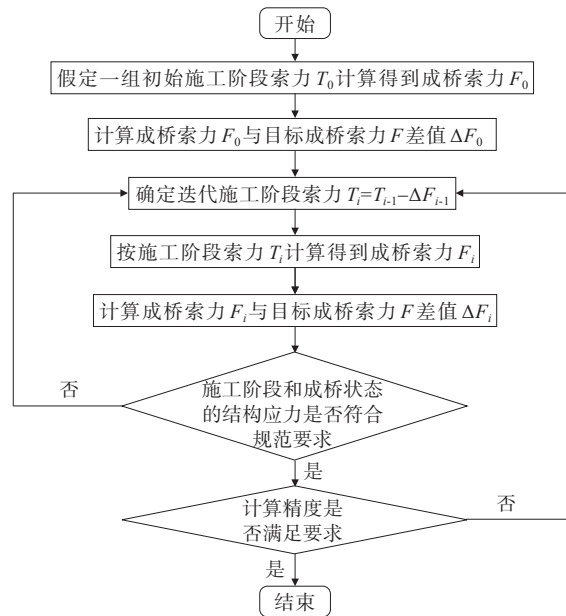


图1 正装差值迭代法计算流程图

## 2 基于正装差值迭代法索力计算程序设计

相对于其他方法,虽然正装差值迭代法实现简单,能够大大减少工作量,但在人工使用正装差值迭代法计算合理施工阶段索力时,仍需要反复提取成桥索力,对计算得到的数据进行处理,并且需要等待有限元软件计算完成,耗费时力。一旦中途出现人为引起的错误,则需要检查并重新计算。因此,笔者利用计算机编程语言,基于正装差值迭代法的施工阶段索力确定思想,编写斜拉桥合理施工阶段索力计算程序,实现合理施工阶段索力确定过程的自动化,提高了效率。

考虑施工全过程的斜拉桥结构计算采用有限元计算软件完成,有限元计算模块的主要功能是在施

工索力计算程序中调用有限元软件进行模型计算, 输出成桥索力值, 并将正装差值迭代法迭代计算得到的索力重新写入模型的数据文件中进行迭代计算。同时, 若有限元程序在计算过程中出现不收敛错误时, 终止程序。基于正装差值迭代法的合理施工阶段索力计算程序的流程如图 2 所示, 其包含的功能函数如表 1 所示。调用有限元计算模块后, 以成桥和施工过程的结构(包含主梁、桥塔、斜拉索等)应力符合规范要求和设计期望为约束条件, 如果不符合要求, 也需重新进行迭代计算<sup>[22]</sup>。

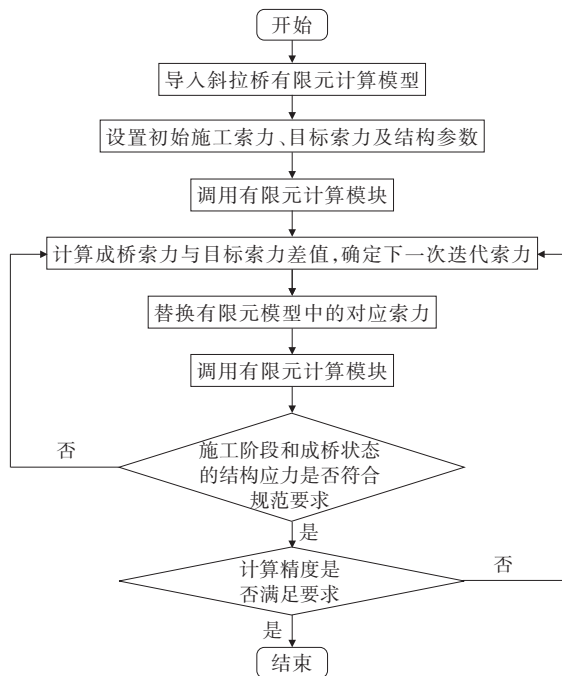


图 2 基于正装差值迭代法施工索力计算程序流程图

表 1 功能函数模块

函数名称	功能
fbr_boot	调用有限元计算软件
file_modify	将迭代后的索力值重新写入模型数据文件
iterative_computations	差值法迭代计算部分
cable_force_look_up	查询成桥时刻索力值
check	检查有限元软件计算是否出现错误
shut_down	终止程序

其中, 函数 file\_modify() 的主要功能是将正装差值迭代法每次迭代后所得到的新的施工阶段索力值写入到模型数据文件的对应位置。file\_modify() 函数会根据预设的参数及数据文件格式实现对有限元计算模型的更新, 供有限元计算模块调用计算。其

流程图如图 3 所示。

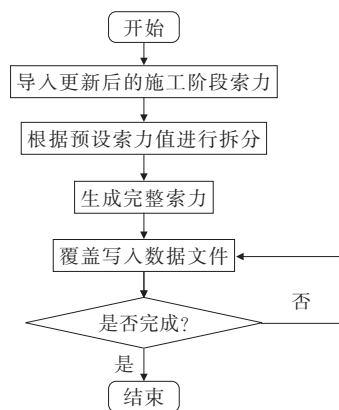


图 3 数据文件索力部分更新流程图

### 3 计算示例

中开高速银洲湖特大桥主航道桥斜拉桥跨径布置为  $(56.8+131.2+530+131.2+56.8)$  m=906 m, 边中跨比约为 0.355。中跨采用叠合梁, 边跨采用混凝土梁, 钢混结合部位位于中跨过主塔 8.75 m 处。主梁采用半封闭箱梁断面形式, 中心梁高 3.5 m。A 形索塔斜拉桥结构, 斜拉索共  $4 \times 24$  对, 中跨索距 10.5 m, 边跨索距 7.2/7.0 m, 采用锌铝合金镀层高强钢丝斜拉索。主桥纵向采用半漂浮体系。主桥横向索塔及过渡墩处设置横向抗风支座, 索塔、辅助墩、过渡墩顶均设置双向滑动球钢支座。全桥总体立面布置见图 4。每个标准梁段的施工流程如图 5 所示。桥面湿接缝每个梁段完成即浇筑。

该桥边跨斜拉索自主塔向边跨梁端方向依次编号为 B1~B24, 中跨斜拉索自主塔向中跨梁端方向依次编号为 Z1~Z24。施工过程中各拉索多次张拉调整到位, 主梁合龙前后不调索, 桥面铺装施工完成根据设计要求和施工监控的实际情况决定是否进行全面或部分调索。设计成桥索力如表 2 所示。

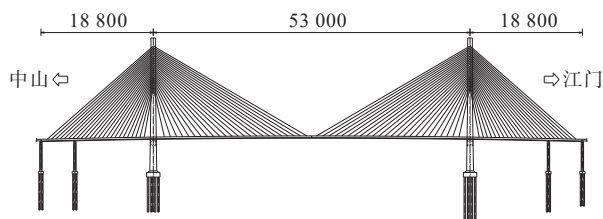


图 4 斜拉桥总体立面布置图(单位:cm)

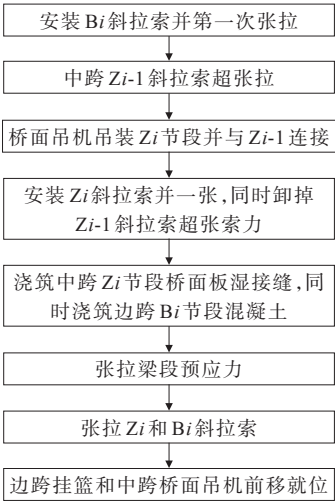


图5 标准梁段施工流程图

表2 设计成桥索力

拉索编号	设计成桥索力/kN	拉索编号	设计成桥索力/kN
B24	6 477	Z1	4 120
B23	6 403	Z2	3 446
B22	6 394	Z3	3 133
B21	6 473	Z4	2 933
B20	6 458	Z5	2 992
B19	6 347	Z6	3 096
B18	6 205	Z7	3 140
B17	5 571	Z8	3 348
B16	5 677	Z9	3 493
B15	5 570	Z10	3 652
B14	5 419	Z11	3 825
B13	5 246	Z12	4 008
B12	5 003	Z13	4 288
B11	4 829	Z14	4 492
B10	4 726	Z15	4 687
B9	4 571	Z16	4 865
B8	4 416	Z17	5 026

续表2

拉索编号	设计成桥索力/kN	拉索编号	设计成桥索力/kN
B7	4 289	Z18	5 431
B6	4 091	Z19	5 525
B5	3 934	Z20	5 591
B4	3 896	Z21	5 621
B3	3 905	Z22	5 688
B2	4 199	Z23	5 780
B1	4 965	Z24	5 871

注:表中斜拉索成桥索力为单根斜拉索索力。

根据设计图纸及施工方案建立该双塔叠合梁斜拉桥且考虑施工全过程的有限元计算模型,以仅受拉单元模拟斜拉索,以仅受压单元模拟边跨现浇支架,计算时考虑结构的 $P-\Delta$ 效应和斜拉索垂度效应,主梁边界条件根据实际情况约束水平向和竖向位移。全桥共划分1 402个节点,1 353个单元。有限元结构离散图如图6所示。

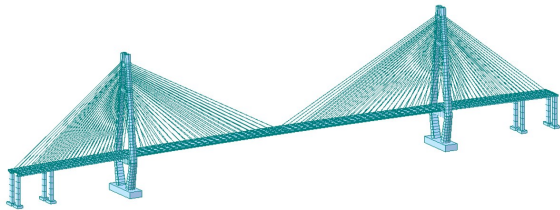


图6 斜拉桥有限元计算模型

按本文方法计算得到的施工阶段索力迭代计算结果与设计成桥恒载索力对比如表3所示。从表3可以看出:当迭代到第10次时,除个别索偏差在20%左右,绝大部分索力偏差已在5%以内,当迭代到第15次时,除个别索偏差在3%,其余各拉索均已达到较高精度,当迭代到第20次时,各斜拉索索力偏差均在0.5%以内,达到了较高的计算精度。

表3 正装差值迭代法迭代过程

拉索编号	第5次迭代		第10次迭代		第15次迭代		第20次迭代	
	成桥索力/kN	偏差/%	成桥索力/kN	偏差/%	成桥索力/kN	偏差/%	成桥索力/kN	偏差/%
B24	11 866	8.4	12 912	0.3	12 947	0.1	12 948	0.0
B23	11 985	6.4	12 773	0.3	12 800	0.1	12 800	0.1
B22	12 144	5.0	12 772	0.1	12 775	0.1	12 778	0.1
B21	12 277	5.2	12 898	0.4	12 943	0.0	12 942	0.0
B20	12 522	3.0	12 897	0.1	12 898	0.1	12 901	0.1
B19	12 171	4.1	12 673	0.2	12 675	0.1	12 678	0.1

续表 3

拉索 编号	第 5 次迭代		第 10 次迭代		第 15 次迭代		第 20 次迭代	
	成桥索力/kN	偏差/%	成桥索力/kN	偏差/%	成桥索力/kN	偏差/%	成桥索力/kN	偏差/%
B18	11 963	3.6	12 389	0.2	12 393	0.1	12 394	0.1
B17	10 794	3.1	11 087	0.5	11 132	0.1	11 133	0.1
B16	11 111	2.1	11 287	0.6	11 337	0.1	11 338	0.1
B15	10 984	1.4	11 059	0.7	11 130	0.1	11 129	0.1
B14	10 628	1.9	10 737	0.9	10 834	0.0	10 833	0.0
B13	10 080	3.9	10 368	1.2	10 486	0.1	10 487	0.1
B12	9 530	4.8	9 858	1.5	9 989	0.2	9 990	0.2
B11	9 110	5.7	9 507	1.6	9 656	0.0	9 657	0.0
B10	8 999	4.8	9 287	1.8	9 443	0.1	9 444	0.1
B9	8 654	5.3	8 845	3.3	9 112	0.3	9 132	0.1
B8	8 308	5.9	8 676	1.8	8 805	0.3	8 828	0.0
B7	8 326	2.9	8 573	0.1	8 564	0.2	8 578	0.0
B6	8 013	2.1	8 110	0.9	8 174	0.1	8 179	0.0
B5	7 771	1.2	7 743	1.6	7 836	0.4	7 864	0.0
B4	7 376	5.3	7 471	4.1	7 554	3.0	7 783	0.1
B3	5 434	30.4	6 410	17.9	7 645	2.1	7 786	0.3
B2	5 682	32.4	6 675	20.5	8 256	1.7	8 373	0.3
B1	6 568	33.9	8 158	17.8	9 821	1.1	9 925	0.0
Z1	6 764	17.9	7 281	11.7	8 194	0.6	8 234	0.1
Z2	6 038	12.4	6 610	4.1	6 889	0.0	6 884	0.1
Z3	5 678	9.4	6 224	0.7	6 265	0.0	6 262	0.1
Z4	5 735	2.2	5 729	2.3	5 854	0.2	5 853	0.2
Z5	5 569	6.9	5 874	1.8	5 979	0.1	5 980	0.1
Z6	5 563	10.2	6 092	1.6	6 190	0.0	6 190	0.1
Z7	5 404	14.0	6 090	3.0	6 279	0.0	6 280	0.0
Z8	5 558	17.0	6 422	4.1	6 695	0.0	6 695	0.0
Z9	5 646	19.2	6 839	2.1	6 973	0.2	6 973	0.2
Z10	7 005	4.1	7 217	1.2	7 298	0.1	7 298	0.1
Z11	7 216	5.7	7 417	3.0	7 641	0.1	7 639	0.1
Z12	7 292	9.0	7 855	2.0	8 014	0.0	8 013	0.1
Z13	7 894	7.9	8 401	2.0	8 569	0.1	8 568	0.1
Z14	8 381	6.7	8 886	1.1	8 974	0.1	8 974	0.1
Z15	9 013	3.9	9 265	1.2	9 360	0.2	9 361	0.1
Z16	9 139	6.1	9 609	1.3	9 711	0.2	9 712	0.2
Z17	9 700	3.5	9 932	1.2	10 034	0.2	10 046	0.1
Z18	10 538	3.0	10 840	0.2	10 842	0.2	10 854	0.1
Z19	10 406	5.8	11 025	0.2	11 027	0.2	11 046	0.0
Z20	10 567	5.5	11 155	0.2	11 159	0.2	11 179	0.0
Z21	10 913	2.9	11 213	0.3	11 217	0.2	11 234	0.1
Z22	10 809	5.0	11 344	0.3	11 348	0.2	11 372	0.0
Z23	11 091	4.1	11 525	0.3	11 530	0.2	11 546	0.1
Z24	11 319	3.6	11 705	0.3	11 710	0.3	11 726	0.1



## 4 结论

为了确保斜拉桥在施工及成桥状态下的结构受力安全,并且变形保持在合理范围内,需要对合理成桥和施工状态索力进行确定。本文基于正装差值迭代法计算合理施工阶段索力,具体结论如下:

(1) 综合斜拉桥合理施工阶段索力确定正装迭代法和差值迭代法的原理和思路,编写了合理施工阶段索力计算程序,开发实现了合理施工阶段索力自动优化功能,实现了合理施工阶段索力确定过程的自动化,一座双塔叠合梁斜拉桥的施工算例结果表明了该方法及程序的正确性与实用性。

(2) 在算例的背景工程叠合梁斜拉桥中,应用正装差值迭代法,当迭代到第10次时,绝大部分索力偏差已在5%以内;当迭代到第15次时,绝大部分索力偏差在3%以内;当迭代到第20次时,各斜拉索索力偏差均在0.5%以内,达到了较高的计算精度。

(3) 与确定施工阶段索力基于影响矩阵法的正装迭代法相比,正装差值迭代法无需多次提取复杂的影响矩阵,仅需将每次迭代计算得到的成桥索力与目标成桥索力取差值,然后根据差值对下一次迭代的施工阶段索力进行修正更新,方便易操作,并且也能满足实际工程精度要求。

## 参考文献:

- [1] 顾安邦,向中富.桥梁工程-下册[M].3版.北京:人民交通出版社股份有限公司,2017.
- [2] 涂光亚,石洋,邹磊.大跨度钢混组合梁斜拉桥钢主梁截面参数对成桥状态主梁受力敏感性分析[J].中外公路,2022,42(1):108-115.
- [3] 熊先勇,傅亚军,黄蓁.钢-混组合梁斜拉桥钢主梁安装方法分析与误差控制[J].中外公路,2023,43(3):126-133.
- [4] 傅亚军,刘浩,陈常松,等.钢梁线形误差在组合梁斜拉桥中的传递研究[J].中外公路,2022,42(6):72-76.
- [5] 李传习.桥梁工程[M].北京:中国建筑工业出版社,2020.
- [6] LONETTI P, PASCUIZZO A. Optimum design analysis of hybrid cable-stayed suspension bridges[J]. Advances in Engineering Software, 2014, 73: 53-66.
- [7] 黄春亮,骆俊杰,李蓉等.收缩徐变效应对三塔单索面矮塔斜拉桥的影响分析[J].中外公路,2021,41(4):192-197.
- [8] 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.
- [9] 秦顺全.桥梁施工控制:无应力状态法理论与实践[M].北京:人民交通出版社,2007.
- [10] 钟万勰,刘元芳,纪峥.斜拉桥施工中的张拉控制和索力调整[J].土木工程学报,1992,25(3):9-15.
- [11] 肖汝诚,项海帆.斜拉桥索力优化及其工程应用[J].计算力学学报,1998,15(1):118-126.
- [12] 戴杰.钢箱梁斜拉桥合理成桥状态与合理施工状态优化方法研究[D].西安:长安大学,2016.
- [13] 覃荷瑛,王彦峰,姜涌,等.光纤光栅智慧钢绞线在斜拉桥拉索预应力等值张拉施工中的应用[J].中外公路,2022,42(2):107-111.
- [14] 陈强,高立宝,杜洪亮.凤凰路大桥的合理成桥状态研究及施工阶段分析[J].中外公路,2023,43(1):144-148.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 张录斌.基于差值迭代法的斜拉桥施工索力计算分析[J].兰州工业学院学报,2019,26(3):14-17.
- [18] 刘耀东,聂闯,唐齐.基于差值迭代法的斜拉桥初张索力计算方法[J].湖北工业大学学报,2018,33(1):98-100.
- [19] 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):68-72.
- [20] 冯阅,罗立胜,韩建刚.基于智能优化方法的斜拉桥索力优化[J].中外公路,2021,41(6):174-177.
- [21] 秦伟亮,孙宗光,曲翔雨等.基于索力损伤向量的斜拉桥结构损伤识别[J].中外公路,2021,41(2):77-82.
- [22] 张玉平.多塔空间索斜拉桥施工控制关键技术研究[D].长沙:长沙理工大学,2014.