

基于多目标模糊优化理论的桥梁支架施工方案优选

张元春¹, 梁雪冰¹, 董永欢¹, 张攀¹, 高元杓²

(1. 中铁七局集团第二工程有限公司, 辽宁 沈阳 110000; 2. 大连理工大学 桥梁与隧道技术国家地方联合工程实验室, 辽宁 大连 116000)

摘要: 为提升桥梁复杂环境下施工方案的科学性与适应性,以调军台桥为工程背景,开展支架施工方案优选研究。基于多目标模糊决策理论,综合考虑结构强度、刚度、稳定性、抗洪能力、造价、工期与技术先进性等因素,构建桥梁支架方案多目标模糊优化模型,并结合有限元分析方法,对三种支架布设方案进行了系统对比。结果表明,对于调军台桥,少支架方案在结构性能、安全性可控的前提下,具备更高的经济性与防洪适应性,具有良好的工程推广前景,为复杂地形与洪水频发区域桥梁施工提供了理论支撑与实践参考。

关键词: 桥梁;模糊理论;支架施工;方案比选

中图分类号: U445;TU997

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)04-0130-05

Optimization of Bridge Support Construction Scheme Based on Multi-objective Fuzzy Optimization Theory

ZHANG Yuanchun¹, LIANG Xuebing¹, DONG Yonghuan¹, ZHANG Pan¹, GAO Yuanbiao²

(1. China Railway No.7 Engineering Group Second Engineering Co., Ltd., Shenyang 110000, China; 2. Dalian University of Technology National-Local Joint Engineering Laboratory for Bridge and Tunnel Technology, Dalian 116000, China)

Abstract: To enhance the scientificity and adaptability of bridge construction schemes in complex environments, taking the Tiaojuntai Bridge as the engineering background, an optimization study on the support construction schemes is conducted. Based on the multi-objective fuzzy decision-making theory, a multi-objective fuzzy optimization model for bridge support schemes is established by comprehensively considering the factors such as structural strength, stiffness, stability, flood resistance, cost, construction period and technological advancement. Combined with the finite element analysis, three support layout schemes are systematically compared. The results show that for the Tiaojuntai Bridge, the minimal support scheme has higher economic efficiency and better flood adaptability under the premise of controllable structural performance and safety, and has a good prospect for engineering promotion, which provides both theoretical support and practical reference for the bridge construction in complex terrain and flood-prone areas.

Keywords: bridge; fuzzy theory; support construction; scheme comparison

0 引言

在现代桥梁工程中,支架施工作为施工阶段的重要组成部分^[1-3],广泛应用于现浇梁体和装配结构的搭设与支撑^[4-5]。随着城市化建设的不断推进,大跨度、多跨、复杂地形条件下的桥梁项目日益增多,对施工效率、结构安全和环境影响的要求也在不断

提高,传统的满堂支架施工方式在场地受限、工期紧张、环保压力大的背景下逐渐暴露出其局限性。Alqattan 等人通过实验和建模研究了钢支架^[6], Michał Pieńko 等人对环形支架进行了相应的研究^[7], Peng 等人对于模块化支架系统的结构建模和分析进行了研究^[8]。

在复杂的工程建设过程中,施工方案的选择往往涉及结构安全、施工效率、经济成本、环境影响等多个互相制约的因素。因此,传统的单一目标优化方法已难以满足当下的需求。多目标决策方法因其能够同时考虑多个评价目标,已广泛应用于结构设计优化、施工组织安排、资源配置、风险管理等多个领域^[9-12]。曾超等人使用多目标决策优化了岷江老

收稿日期: 2025-07-29

基金项目: 辽宁省交通科技项目(202327)

作者简介: 张元春(1989—),男,大专,高级工程师,从事桥梁施工技术研究工作。

通信作者: 高元杓(2000—),男,硕士,从事桥梁结构耐久性方面研究工作。电子信箱: 940789650@qq.com

木孔航电枢纽初期蓄水位^[13],李志宏等人使用多目标决策对拱北隧道施工方案进行风险评估^[14],Mahmood Shafie 使用多目标决策确定风能开发地^[15],N. Ibadov 等人通过多目标决策网络模型进行建设项目规划^[16],Xin 等人使用 DHGF 方法进行桥梁系统施工质量监测^[17],Daniel Baloi 通过多目标决策分析建筑成本绩效^[18]。

本文以桥梁少支架为研究对象,通过多目标决策模型进行方案选择,丰富了少支架施工方案选择的研究方法,为实际工程提供经验。

1 桥梁施工方案优选的多目标模糊决策模型

1.1 建立特征值矩阵

设影响桥梁施工的因素为 $cC = (c_1, c_2, \dots, c_m)$, 因素包含结构强度 c_1 , 结构刚度 c_2 , 结构稳定性 L , 抗洪水冲刷性能 c_m 等, 根据设计条件确定方案集为 $V = (v_1, v_2, \dots, v_n)$, 式中 $c_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 代表第 i 个影响因素, $v_j (j = 1, 2, \dots, n)$ 代表第 j 个桥梁比选方案。则方案集 V 的指标特征值矩阵为:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: x_{ij} 表示方案 j 关于指标 i 的特征值, $i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n$ 。

1.2 建立相对隶属度矩阵

1.2.1 定量指标的相对隶属度

定量指标,若指标 i 的特征值越大越优,则其相对隶属度为:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_{i\max}} \quad (2)$$

若指标 i 的特征值越小越优,则其相对隶属度为:

$$r_{ij} = \frac{x_{i\min}}{x_{ij}} \quad (3)$$

1.2.2 定性指标的相对隶属度

(1) 确定标度矩阵

为了确定关于因素 c_i 方案集对优的定性排序,定义因素 c_i 的标度矩阵如下:

$${}_iE = \begin{bmatrix} {}_i e_{11} & {}_i e_{12} & \cdots & {}_i e_{1n} \\ {}_i e_{21} & {}_i e_{22} & \cdots & {}_i e_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ {}_i e_{n1} & {}_i e_{n2} & \cdots & {}_i e_{nn} \end{bmatrix} = ({}_i e_{kl}) \quad (4)$$

$k = 1, 2, \dots, n, l = 1, 2, \dots, n$, 且满足条件:

$${}_i e_{kl} = \begin{cases} 0 & v_l \text{ 优于 } v_k \\ 0.5 & v_l \text{ 等于 } v_k \\ 1 & v_k \text{ 优于 } v_l \end{cases}$$

按照优越性序列的一致性准则,通过将标度矩阵 ${}_iE$ 各行元素之和按从大到小排序,能够得到方案集的相对优劣次序,从而实现定性上的优先级判断。

(2) 确定因素相对隶属度

依据二元论,对矩阵进 ${}_iE$ 行处理,可得到方案集在优劣方面的定性排序,其对应的二元比较有序矩阵可表述为:

$${}_iA = \begin{bmatrix} {}_i a_{11} & {}_i a_{12} & \cdots & {}_i a_{1n} \\ {}_i a_{21} & {}_i a_{22} & \cdots & {}_i a_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ {}_i a_{n1} & {}_i a_{n2} & \cdots & {}_i a_{nn} \end{bmatrix} = ({}_i a_{jk}) \quad (5)$$

则方案 v_j 对于因素 c_i 的相对隶属度 r_{ij} 为:

$$r_{ij} = \frac{1 - {}_i a_{lj}}{{}_i a_{lj}} \quad (6)$$

为了在二元定量对比中更易于按我国的语言习惯给出定量标度 ${}_i a_{lj}$, 建立了语气算子与定量标度 ${}_i a_{lj}$ 之间的对应关系,见表 1^[19]。

表 1 语气算子与定量标度及相对隶属度关系

语气算子	同样	稍稍	略为	较为	明显	显著	十分	非常
			极其	极端	无可比拟			
定量标度	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85
				0.65	0.70	0.75	0.80	0.85
				0.95	1			
相对隶属度	0.525	0.575	0.625	0.675	0.725	0.775	0.825	0.875
				0.925	0.975			
	1.0	0.818	0.667	0.538	0.429	0.333	0.25	0.176
相对隶属度				0.111	0.053	0		
	0.905	0.739	0.60	0.481	0.379	0.29	0.212	0.143
				0.081	0.026			

1.3 指标权向量的模糊定权法

模糊集中隶属度可被视为权重的体现,经 R 转置运算后,可得到目标关于“重要性”的相对隶属度矩阵。即:

$$W = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & \cdots & w_{1m} \\ w_{21} & w_{22} & \cdots & w_{2m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ w_{n1} & w_{n2} & \cdots & w_{nm} \end{bmatrix} = (w_{ji})_{n \times m} = R^T \quad (7)$$

在方案集中,各方案处于公平竞争状态且不存在偏好,因此在因素 c_i 重要性上其权重相同。由此,因素与理想的重要目标及非重要目标之间的差异,可分别用广义距离来度量。

$$d_{yi} = \|\vec{y} - \vec{w}_{(i)}\|_p = \left[\sum_{j=1}^n (1 - w_{ji})^p \right]^{\frac{1}{p}} \quad (8)$$

$$d_{zi} = \|\vec{z} - \vec{w}_{(i)}\|_p = \left[\sum_{j=1}^n w_{ji}^p \right]^{\frac{1}{p}} \quad (9)$$

式中: p 为距离参数,当 $p = 1$ 时为海明距离, $p = 2$ 时为欧氏距离。则权重向量为:^[20]

$w_{(i)} = (1 + d_{yi}^2 \cdot d_{xi}^{-2})^{-1}$ (10)

1.4 确定各方案的相对优属度

在因素集内,为体现各因素 c_i 的重要性差异,需为其分配相应的权重 $w_i(i=1,2,\cdots,m)$ 。方案 j 的相对优属度为^[21]

$$u_j = \frac{1}{1 + \left(\frac{\sum_{i=1}^m [w_i(r_{ij} - 1)]}{\sum_{i=1}^m (w_i r_{ij})} \right)^2}$$
 (11)

由最大优属度原则,取相对优属度最大的方案,作为模糊决策的结果。

2 桥梁施工方案比选算例

2.1 工程概况

调军台桥位于辽宁省鞍山市,桥梁长164 m,宽35 m,道路等级为城市主干路,设计速度50 km/h,桥梁荷载等级为城-A级,防洪标准为百年一遇,结构安全等级为一级,见图1。

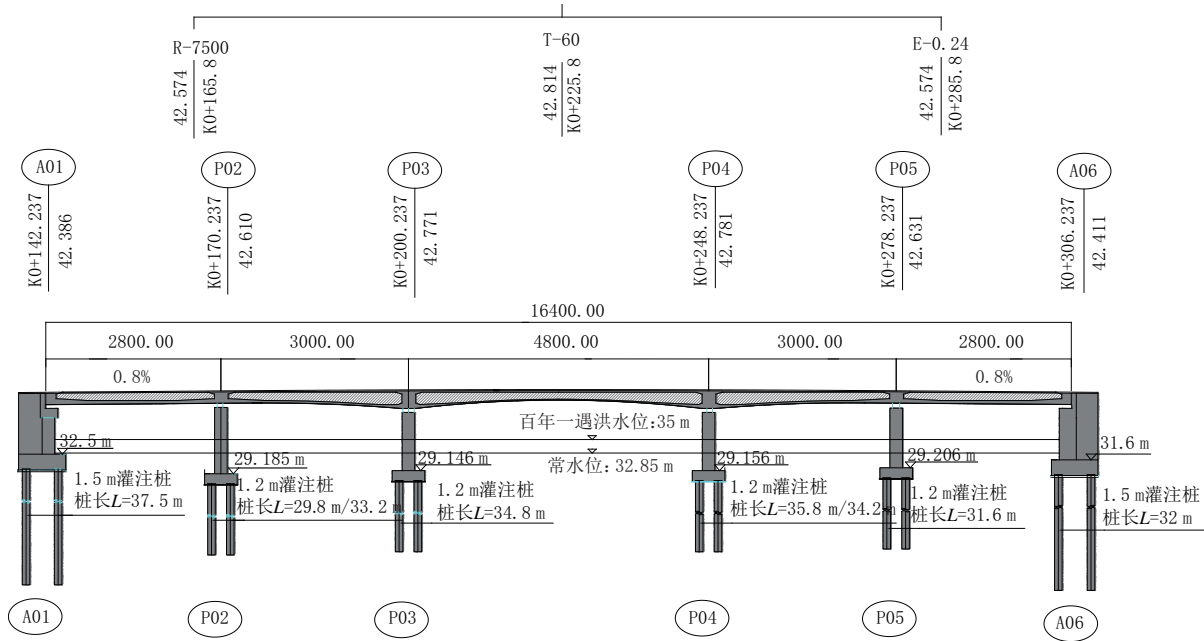


图1 调军台桥总体布置图(单位:cm)

该桥跨越黄沙河,桥位区地势复杂,汛期洪水频繁,传统满堂支架易被冲毁,存在较大施工风险。为提高施工阶段的抗洪能力,本文提出“少支架施工”策略,通过有限设置支架数,结合有限元软件对连续梁结构进行内力和受力分析,确保桥梁结构稳定性。在此基础上,对3种少支架施工方案进行对比研究,从地形适应性、防洪效果、施工安全与经济性等方面综合评价,筛选出最适合洪水环境下的施工方法。

2.2 支架布置方案

本桥梁为五跨连续结构,跨径布置为:28 m+30 m+48 m+30 m+28 m。立杆采用 $\phi 60 \times 3.2$ mm Q235钢管、横杆采用 $\phi 48 \times 2.5$ mm Q235钢管,剪刀撑D48 Q235钢管。支架布置需满足结构受力安全、施工可达性与经济性,图纸中支架间距单位均为cm,布置采用跨中对称的形式。3种方案的布置形式,见表1。

表1 支架布置表

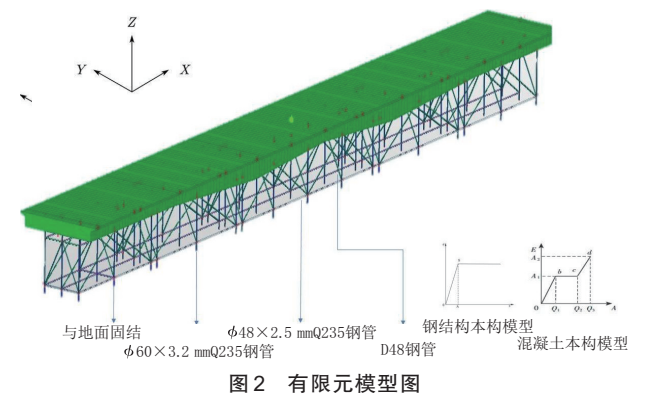
方案	布置说明	布置形式/m	特点说明
方案A	简化支架,只在少部分区域设置支架	14+19+27+12+12+27+19+14	经济性高,支架少
方案B	少支架布置于关键跨中区域,梁端留空	7×3+13+6×3+12+6×7+12+6×3+13+×3	支架数量居中
方案C	支架密布,多设置支架,增加安全性	4×6+8.2+4.3×5+7.7+3.4×9+7.7+4.3×5+8.2+4×6	安全性高、耗材多、施工空间小

2.3 有限元建模及结果分析

2.3.1 有限元建模

根据施工实际,对材料进行定义,采用合理选取梁单元模拟主梁结构,杆单元模拟支架立杆、横杆和剪刀撑,精细划分单元以适应施工阶段分析。边界

条件方面,桥梁端部根据支座类型设置不同约束,如固定铰支座、中墩滑动支座等;支架底部根据地基条件设为固定或弹性支撑,顶部与梁底连接为铰接或滑动形式,确保真实反映施工过程中的受力与变形,建模模型见图2。



通过对建立的调军台桥少支架施工模型进行有限元分析,获得了结构在各阶段下的强度、刚度及稳定性等关键指标。以下图示与表格展示了主要分析结果,包括主梁受力变形情况、支架体系的稳定性评价以及关键构件的应力分布等,为施工方案的合理性与安全性提供了可靠依据,计算结果见表2,失稳模态见图3。

表2 结果表格

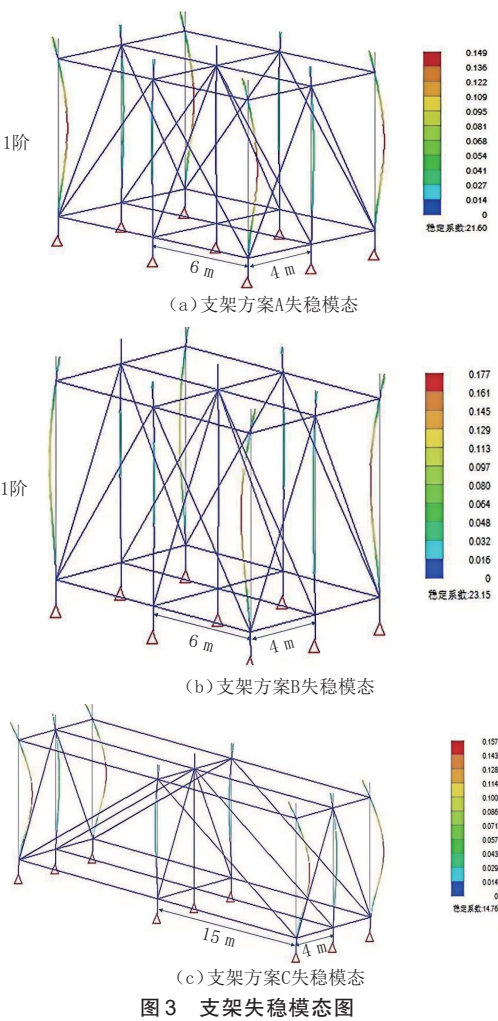
方案	最大应力/ MPa	最大位移/ mm	最大反力/ kN	稳定系数
A	173.66	-6.092	6 966.4	14.76
B	142.52	-4.664	5 259.4	23.15
C	153.14	-4.957	5 614.1	21.6

2.3.2 有限元建模结果分析

有限元分析结果表明,相较于方案B与方案C,方案A在关键结构节点处表现出更高的应力水平与结构强度。从整体分布来看,虽然方案A的最大主应力值略高于其他两种方案,但其应力峰值仍处于设计允许范围之内,结构在承载状态下未发生明显塑性变形或局部失稳,说明其整体承载能力良好。此外,由于方案A采用了更少的支架布设,在实现结构安全的前提下有效减少了材料使用量与施工安装工作量,从而在经济性方面具有显著优势。

各方案在加载过程中均未出现整体结构的突发性失稳,且其失稳模态基本一致,主要表现为外侧边缘支架在竖向加载作用下发生屈曲变形。通过模态分析结果可见,3种方案的最大应力均集中分布于支架横向最外侧构件的中部区域,该区域结构刚度相对较低,属于受力薄弱环节。该现象提示,在结构设计与后续施工阶段,应重点加强对该区域构件的刚度配置与连接节点的加固处理,例如采用加密斜撑、加厚连接板或调整支架间距等措施,以提升整体结构在复杂施工工况下的稳定性能。

综合承载能力、应力分布及失稳模态可知,3种



支架布置方案均满足现行规范对结构安全性的基本要求,但在性能发挥和资源利用方面存在差异。方案A凭借支架布设优化与力学性能合理配置,展现出较强的结构承载性能和更高的经济适用性,具备在实际工程中推广应用的潜力。

3 模糊优选

3.1 建立因素集

依据选择原则,并考虑到工程周围环境,建立因素集为: c_1 ,结构强度; c_2 ,结构刚度; c_3 ,结构稳定性; c_4 ,抗洪水冲刷性能; c_5 ,工程造价; c_6 ,工期; c_7 ,技术先进性。图4所示为调军台桥施工支架模糊优选系统图。

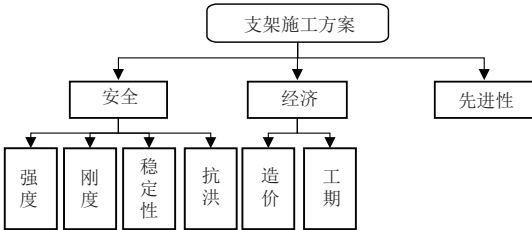


图4 调军台桥施工支架模糊优选系统图

3.2 模糊优选分析

3.2.1 确定相对隶属度矩阵

(1) 定量指标因素

定量类指标的相对隶属度可依据式(2)或式(3)进行计算。以结构强度为例,当其特征值越小代表越优时,应采用式(3)进行求取。

$$r_{11} = \frac{142.52}{173.66} = 0.821, r_{12} = \frac{142.52}{142.52} = 1.000, r_{13} = \frac{142.52}{153.14} = 0.931$$

则 $r = (0.821, 1.000, 0.931)$

(2) 定性指标因素

对于非结构性因素的相对隶属度,要应用二元论方法确定。

影响因素(技术先进性)是非结构性因素,其定性排序矩阵为:

非结构性因素的相对隶属度需采用二元论方法加以确定。而影响因素(技术先进性) c_7 ,其作为非结构性因素,其定性排序矩阵如下:

$${}_2E = \begin{matrix} & v_1 & v_2 & v_3 \\ \begin{matrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 0.5 & 1 & 1 \\ 1 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 \end{pmatrix} & \begin{matrix} 2.5 \\ 1.5 \\ 0.5 \end{matrix} \end{matrix} \quad \begin{matrix} (1) \\ (2) \\ (3) \end{matrix}$$

就因素 c_7 而言,排序为(1)的方案 v_1 较排序为(2)的方案 v_2 呈“明显”优势,较排序为(3)的方案 v_3 呈“极其”优势,据此可得:

$${}_7r = (1.000, 0.429, 0.111)$$

所以可以得到相对隶属度矩阵:

$$R = \begin{pmatrix} 0.821 & 1.000 & 0.931 \\ 0.762 & 1.000 & 0.943 \\ 0.643 & 1.000 & 0.931 \\ 1.000 & 0.429 & 0.111 \\ 1.000 & 0.340 & 0.202 \\ 1.000 & 0.643 & 0.374 \\ 1.000 & 0.429 & 0.111 \end{pmatrix}$$

3.2.2 确定权向量

根据式(11)计算权向量,为了将误差减小,令 $p = 1, p = 2$ 取各项数值并计算其均值后,可得到归一化处理后的因素集权向量。 $w = (0.188, 0.186, 0.1812, 0.099, 0.099, 0.147, 0.099)$ 。

3.2.3 确定相对优属度向量

根据式(11)可以得到各方案的相对优属度

$$U = (0.954, 0.907, 0.735)$$

从模糊优选分析结果来看,方案A在综合评价中表现最为突出。该方案不仅造价较低、工期较短,而且具备良好的抗洪能力和较高的技术水平,因此

在多因素权衡下应优先选用方案A。

4 结 语

本文基于多目标决策模型对3种支架施工方案进行了系统性对比与优选分析,综合考虑结构力学性能与多维工程指标,得出以下主要结论:

(1)相较于方案B与方案C,方案A在承载能力上表现出更高的应力水平与结构强度,尽管应力值较大,但均处于安全范围之内。值得注意的是,方案A采用支架数量更少,能在结构安全的情况下有更好的经济性。

(2)3种方案的结构失稳模态基本一致,最大应力均集中于外侧支架中部区域,表明该区域为整体结构的薄弱部位。因此,在后续设计与施工阶段,应针对该部位采取强化措施,以提高支架系统的整体稳定性与安全性。

(3)通过使用多目标模糊优选模型,综合造价、工期、抗洪性能和技术先进性等评价指标进行比选分析,结果方案A在多个关键指标上优于方案B和方案C,在多目标协调与工程适应性方面表现出更强的综合优势,具备良好实际应用前景。

参考文献:

- [1] 潘春为,杨飏,蔡有信,等.桥梁盖梁支架一体化智能升降装置研究与应用[J].桥梁建设,2025,55(1):154-162.
- [2] 黄天立,傅金龙.支架现浇刚性系杆拱桥的吊杆施工张拉力确定方法[J].桥梁建设,2016,46(5):35-40.
- [3] ROMBOUTS J, LIEW A, LOMBAERT G, et al. Designing bending-active gridshells as falsework for concrete shells through numerical optimization[J/OL].Engineering Structures, 2021, 240: 112352.
- [4] 陈正,于志兵,徐代宏,等.临港公铁两用长江大桥主桥桥塔施工关键技术[J].桥梁建设,2023,53(1):123-129.
- [5] 方柯,刘爱林,王令侠.芜湖长江公铁大桥南引桥铁路梁斜腿支架现浇施工技术[J].桥梁建设,2020,50(6):116-121.
- [6] ALQATTAN H F, EL AGHOURY I M, IBRAHIM S A B. Enhancing sustainability in construction: experimental testing and finite element investigation of falsework ringlock joints[J/OL].Innovative Infrastructure Solutions, 2024, 9(6)[2025-07-09].
- [7] PIEŃKO M, BŁAZIK-BOROWA E. Experimental studies of ringlock scaffolding joint[J/OL].Journal of Constructional Steel Research, 2020, 173: 106265.
- [8] Peng J L, Pan A D E, Chew W F, et al. Structural Modeling and Analysis of Modular Falsework Systems[J/OL].Journal of Structural Engineering, 1997, 123(9): 1245-1251.
- [9] 袁志朋,杨侃,陈静,等.基于NSGA-III的区域水资源多目标优化配置方案决策[J].人民黄河,2024,46(7):79-84;153.
- [10] 田蕊,黄健陵,陈辉华,等.基于SD的既有线施工安全管理多目标决策分析[J].铁道科学与工程学报,2019,16(3):827-834.

(下转第145页)