文章编号:1008-1534(2026)05-0411-10

基于响应面与 NSGA-Ⅱ的大跨连续梁拱桥吊杆索力识别与优化

亓兴军[1],施建州[1],公　杰[1],刘　龙[2],张先岭[2]

(1. 山东建筑大学交通工程学院,山东济南　250101;2. 山东金朝融惠检测科技有限公司,山东济南　250399)

摘　要:为了解决中下承式梁拱桥吊杆初张拉索力偏差较大且多吊杆耦合难以同时满足控制指标的问题,提出一种基于响应面法与第二代非支配排序遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithm Ⅱ, NSGA-Ⅱ)的索力优化方法。将初张拉状态下的实测索力作为初始荷载建立有限元模型,选取吊杆计算长度与截面直径等 11 个关键设计参数,采用 Box-Behnken 设计构建响应面代理模型,并利用最小二乘法实现有限元模型的快速校准。在此基础上,将响应面代理模型嵌入 NSGA-Ⅱ算法开展多目标寻优,结合逼近理想解排序法(technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS)对 Pareto 解集进行综合评价,优选出综合性能最佳的索力调整方案,进而确定最优吊杆参数。结果表明:吊杆索力相对设计值的最大误差由初张拉时的 16.28%降至优化后的 5%以内,主梁线形显著改善。优化索力相对终张拉实测索力的最大误差为 3.3%,验证了优化方案的工程可行性。所提方法有效克服了多吊杆协同受力下索力优化的计算效率与精度难以兼顾的问题,可为大跨径梁拱桥工程中吊杆张拉工序的精准控制提供技术方案。

关键词:桥梁工程;模型修正;索力优化;响应面;NSGA-Ⅱ;机器视觉

中图分类号:U448.22　　**文献标识码**:A　　**DOI**: 10.7535/hbgykj.2026yx05004

Identification and optimization of suspender force of long-span continuous beam arch bridge based on response surface and NSGA-Ⅱ

QI Xingjun[1], SHI Jianzhou[1], GONG Jie[1], LIU Long[2], ZHANG Xianling[2]

(1. School of Transportation Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan, Shandong 250101, China; 2. Jinzhao Ronghui Testing Technology Company Limited, Jinan, Shandong 250399, China)

Abstract: To address the problem of large deviation in the initial tensioning force of suspenders in half-through beam-arch bridges and the difficulty of simultaneously meeting control indices due to the coupling effect of multiple suspenders, a cable force optimization method based on response surface model updating and the Non-dominated Sorting Genetic Algorithm Ⅱ (NSGA-Ⅱ) was proposed. Initially, a finite element model (FEM) was established based on the cable forces measured via the vibration frequency method. Eleven key design parameters, including the calculated length and cross-sectional diameter of the

收稿日期:2026-01-16;修回日期:2026-07-13;责任编辑:丁军苗

基金项目:山东省住房城乡建设科技计划项目(2024KYKF-CSGX024);济青高速铁路有限公司科技计划项目(JQKJ2024-10)

第一作者简介:亓兴军(1974—),男,山东济南人,教授,博士,主要从事桥梁健康监测与安全评估等方面的研究。

E-mail:qxj123@163.com

亓兴军,施建州,公杰,等. 基于响应面与 NSGA-Ⅱ的大跨连续梁拱桥吊杆索力识别与优化[J]. 河北工业科技,2026,43(5):411-420.

Qi Xingjun, Shi Jianzhou, Gong Jie, et al. Identification and optimization of suspender force of long-span continuous beam arch bridge based on response surface and NSGA-Ⅱ[J]. Hebei Journal of Industrial Science and Technology, 2026, 43(5): 411-420.

suspenders, were selected. A Box-Behnken design was employed to construct a response surface surrogate model, and the least squares method was utilized for the rapid calibration of the FEM. Building upon this, the response surface surrogate model was embedded into the NSGA-Ⅱ algorithm to perform multi-objective optimization. By integrating a solution set sorting method, the cable force adjustment scheme with the best comprehensive performance was selected from the Pareto solution set, thereby determining the optimal suspender parameters. The results show that the maximum error of the suspender forces relative to their design values decreased from 16.28% at initial tensioning to less than 5% after optimization, while the main-girder alignment improved. The optimized cable forces had a maximum relative error of 3.3% compared with those measured after final tensioning, supporting the engineering feasibility of the optimization scheme. This method effectively overcomes the difficulty in balancing computational efficiency and optimization accuracy under the synergistic loading of multiple suspenders, providing a reliable theoretical reference for the precise control of the suspender tensioning process in long-span beam-arch bridge engineering.

Keywords: bridge engineering; model updating; cable force optimization; response surface; NSGA-Ⅱ; machine visio

随着高铁线路的增多与延伸,梁拱桥因线形美观、结构简单、跨越能力大,在铁路桥梁建设中得到了越来越广泛的应用。在梁拱桥的建造过程中,通过高效的索力测试手段对吊索索力进行高精度控制,是实现其结构安全的重要保障。现阶段,常规的索力测试主要涵盖千斤顶法、压力传感器法及振动频率法等方法。其中,振动频率法理论成熟,应用最为普遍。然而,传统的振动频率法多依赖接触式加速度传感器,现场测试时通常需要借助登高设备在吊杆上安装传感器,不仅存在高空作业风险,而且测试设备较多,传感器安装与拆卸较为繁琐,严重制约了大规模检测的效率。为克服上述接触式振动频率测试方法的局限,基于微波雷达与机器视觉等技术的非接触式振动频率测试方法逐渐受到关注。朱浩等[1]基于手机视频与图像处理技术实现了拉索振动响应的非接触测量,并据此计算出拉索索力。田文迪等[2]采用多发多收的阵列天线结构,利用干涉相位调制信息反演目标的振动情况,通过分析拉索振动响应的频域特性,基于振动法计算出索力。杜文康等[3]利用机器视觉技术获取拉索振动图像,基于边缘重构算法高精度识别拉索的振动响应曲线,进而通过频谱分析计算得到拉索的实际索力。

此外,系杆与拱肋作为主要承重构件,其受力状态与吊杆索力的大小息息相关。在刚性系杆拱桥的施工中,吊杆张拉具有显著的耦合效应,即单根吊杆的张拉会引起拱肋及系杆的变形与内力重分布,进而影响先期张拉的吊杆索力。加之施工现场荷载变化、锚具回缩(如锁紧螺母及油泵回油时的拉力损失)以及张拉设备局限等因素的叠加影响,导致实际索力往往难以精准匹配设计值[4]。因此,探索高效、精确的索力优化与张拉控制方法一直是该领域的研究重点。

近年来,众多学者对此展开了深入研究。郭鑫等[5]基于千斤顶法修正频率法中的有效计算长度,有效减少了吊杆索力的调整次数,加快了施工进度。史佩韶等[6]在传统自适应遗传算法的基础上,提出了一种改进的自适应遗传算法(improved adaptive genetic algorithm,IAGA),将其应用到最小弯曲能法进行索力优化,建立了斜拉桥成桥状态的二次规划优化模型。Gao 等[7]针对桥梁的长期变形问题,提出了一种基于影响矩阵与非线性优化的索力调整方法,以主梁挠度为约束、吊杆力为优化目标,求解出最优调整值。然而,现有研究在实际工程应用中仍存在一定的局限性:一方面,传统的索力调整方法多依赖经验或简单的线性影响矩阵,难以应对大跨度梁拱桥高度非线性的多索耦合问题;另一方面,虽然智能算法在目标寻优中表现出色,但其在迭代过程中通常需要频繁调用复杂的有限元模型,导致计算成本激增,难以兼顾寻优精度与计算效率。

鉴于传统索力调整方法不够精确而智能算法效率低下的不足,寻求建立一种能够考虑多吊杆索力耦合效应并兼顾计算精度与效率的优化方法显得尤为必要。因此,本文依托某大跨度连续梁拱桥,提出一种基于响应面法与第二代非支配排序遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithm Ⅱ,NSGA-Ⅱ)的索力协同优化方法,将初张拉状态下的实测索力作为初始荷载引入有限元模型,借助响应面代理模型完成有限元模型的快速、高精度修正,并利用多目标优化算法实现多索耦合下的索力优化,以期解决索力优化中寻优精度与计算效率难以兼顾的矛盾,为同类桥梁的吊杆张拉施工提供理论参考。

1 理论基础

1.1 基于振动频率法的索力计算原理

振动频率法是基于弦理论与梁理论提出的,其原理是将斜索视为弦在一个平面内振动,通过分析索体微段 Δx 的受力平衡并建立横向振动微分方程,得出张力与频率之间的关系,进而根据拉索固有频率计算索力[8]。

根据《公路桥梁荷载试验规程》[9]附录 B 的索力振动测试法(第 B.0.4 条规定)，当索的抗弯刚度可以忽略(即 EI=0)时，索力的计算公式为

$$T=\frac{4\rho L^2 f_n^2}{n^2}, \tag{1}$$

式(1)中：T 为索力；f_n 为索的第 n 阶自振频率；L 为索的计算长度，m；n 为自振频率阶数；ρ 为索的线密度。

对于一根具体的吊杆或者拉索，其长度、线密度是确定的。当测得其在自由振动后的第 n 阶频率后，即可代入式(1)得到索力。

1.2　响应面法

响应面法是一种结合了数学和统计学的方法，用数学函数的方式表达随机输入变量和输出变量的关系，函数表达式为

$$y=f(\xi_1,\xi_2,\cdots,\xi_k)+\varepsilon, \tag{2}$$

式(2)中：f 为输入变量与输出变量的映射关系；ξ_i 为输入变量，应用中往往将其编码为无量纲的变量(x_1，x_2，…，x_k)，其中，k 为参数的数目；ε 为 f 中没有考虑的可变因素，即统计误差。

响应面法的实施主要涵盖试验设计、模型拟合与寻优计算 3 个核心阶段：1) 试验设计阶段　基于选定的试验设计方法对初始输入变量进行显著性筛选并生成代表性样本数据；2) 模型拟合阶段　利用多元回归等数学统计方法构建代理模型并检验其预测精度；3) 寻优计算阶段　以高精度响应面模型为目标函数，结合最优化理论求解最佳参数组合及其对应的预期响应值[10]。在主流的响应曲面设计方法中，Box-Behnken 设计具有设计点较少、运行成本低于同因子数量的中心复合设计，且能高效消除一阶和二阶系数等优势。鉴于索力优化目标多，计算过程复杂，本文采取 Box-Behnken 设计进行响应曲面试验，以降低有限元迭代运行成本并为参数设计提供冗余。

1.3　NSGA-Ⅱ算法

NSGA-Ⅱ算法是目前多目标优化领域应用最为广泛的计算模型之一。在解决工程实际中相互冲突的多目标优化问题时，NSGA-Ⅱ算法以 Pareto 支配关系为基础，能够有效地权衡各目标函数，输出收敛性与多样性俱佳的解集。在多目标优化中(假设为最大化问题)，解的优劣评判无法依赖单一的适应度值，而是通过 Pareto 支配关系来界定。对于任意 2 个不同的决策向量 X、Y，若解 X 对解 Y 构成 Pareto 支配，需同时满足以下条件[11-12]。

$$f_i(X)\geqslant f_i(Y),\forall i\in\{1,2,\cdots,M\}, \tag{3}$$

$$f_i(X)>f_i(Y),\exists i\in\{1,2,\cdots,M\}, \tag{4}$$

式(3)、式(4)中：$f_i(\cdot)$ 为第 i 个目标函数；M 为目标函数的个数。该条件表明，解 X 在所有目标上的表现均不劣于解 Y，且至少在一个目标上严格优于解 Y。

基于标准 Pareto 理论的 NSGA-Ⅱ算法，相较于传统的遗传算法，优越性主要体现在以下方面：1) 引入的快速非支配排序显著降低了计算复杂度，而拥挤度距离机制则有效确保了 Pareto 解集的多样性与均匀分布；2) 精英保留策略大幅强化了求解的收敛稳定性。这些特性使其适合解决大跨梁拱桥中多吊杆相互耦合、目标函数众多的复杂寻优问题。

2　工程实例

本文以某大跨梁拱桥为实验对象，该桥计算跨径为 360 m，吊杆采用整束挤压钢绞线，吊杆纵向间距为 9.0 m，共设 36 组纵向双吊杆，吊杆上端穿过拱肋，锚于拱肋上缘张拉底座，下端锚于吊点翼缘与腹板相交处的固定底座。主梁采用单箱双室、变高度、直腹板箱形截面，中支点处梁高为 11 m，边跨直线段和跨中直线段梁高为 5 m，直线段长度分别为 11.3、21.0 m。拱肋采用竖直平行钢管混凝土哑铃拱，从桥面开始起拱，两拱肋中心距为 11.9 m，计算跨度为 180 m，矢跨比为 $f/L=1/5$。拱桥立面图如图 1 所示。

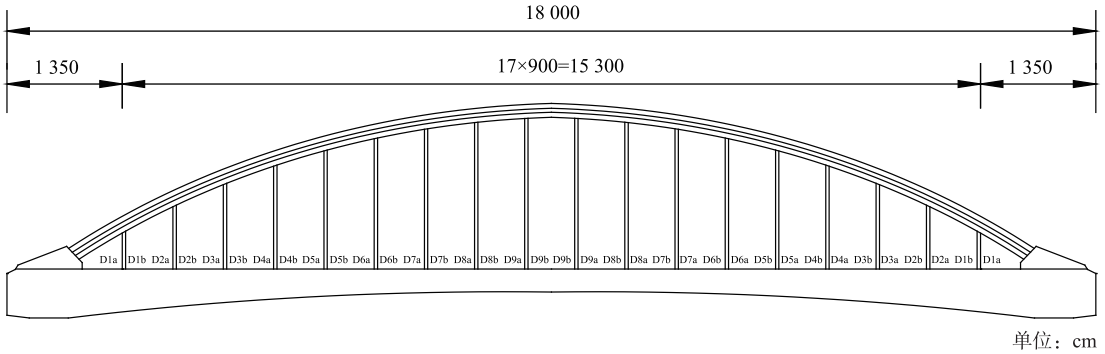


图 1　拱桥立面图

Fig. 1　Facade of arch bridge

2.1 试验概况

本试验选取全桥 72 根吊杆作为测试对象，分别采用加速度传感器法和图像识别法进行频率识别并进行对比试验。具体试验流程如下。

1）基于加速度传感器法的频率测试　首先，利用胶泥与胶带将传感器绑扎在距吊杆底部 2.5 m 的位置，以确保传感器和吊杆充分接触，从而降低因风阻引起的测量误差。其次，通过导线将传感器接入数据采集仪，设定采样频率为 500 Hz，采集时间为 15 min，进行加速度时程采集。然后，通过随机子空间识别法（stochastic subspace identification，SSI）对采集的数据进行模态拟合。最后，通过奇异值分解提取结构的主要特征向量，得到模态参数。加速度传感器布设及采集仪现场采集图如图 2 所示[13]。

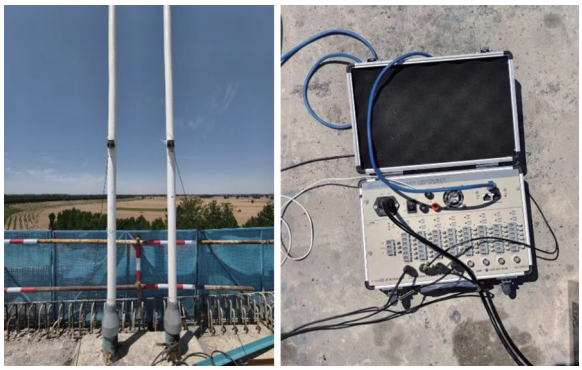


图 2　加速度传感器布设及采集仪现场采集图

Fig. 2　Sensor layout and field acquisition of acquisition instrument

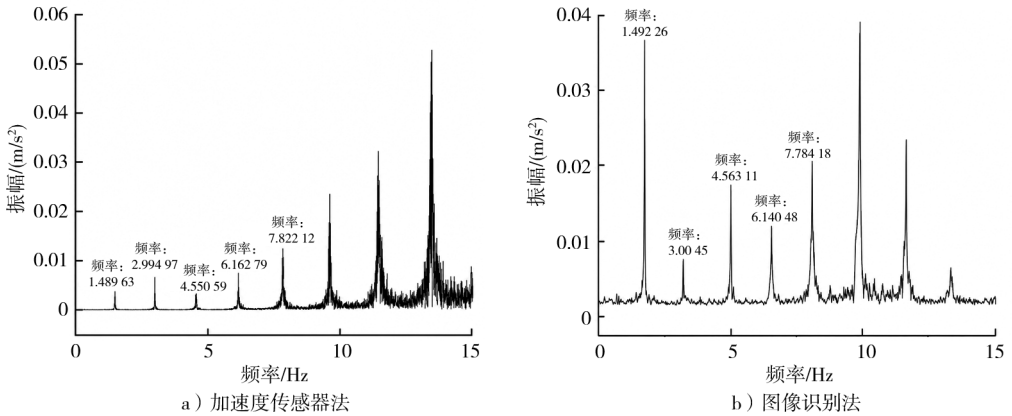
2）基于图像识别法的频率测试　首先，将黑色标定物预先贴在距吊杆底部 2 m 的位置，并采用加固后的相机支架固定单反相机，以最大限度地减小外部环境的影响。其次，使用该相机对标定物进行连续拍摄以采集数据，设定设备的最大像素数为 2 472×10^4 px，采样帧率为 60 Hz，分辨率为 1 920 px×1 080 px，单根吊杆的拍摄过程持续 4 min。然后，在试验结束后，通过物体轨迹跟踪软件对视频中的标定物进行跟踪，获取标定物的位移时程曲线。最后，利用快速傅里叶变换（fast fourier transform，FFT）对位移时程数据进行转换分析，获取吊杆的频谱图。标定物位置及相机现场采集图如图 3 所示。

图 3　标定物位置及相机现场采集图

Fig. 3　Target position and camera field acquisition map

2.2 频率测量误差对比

为方便区分吊杆，以顺桥向为南北向，纵桥向为东西向，并根据图 1 所示的吊杆编号，对全桥吊杆进行划分。因测量吊杆较多，本文选取北东向 D5a 吊杆为例，通过加速度传感器法和图像识别法测得吊杆的位移时程和加速度时程，利用 FFT 分别进行频谱分析，得出吊杆的频谱图和前 5 阶频率并进行对比，结果如图 4 所示。



a）加速度传感器法　　b）图像识别法

图 4　基于加速度传感器法与图像识别法的吊杆频谱对比图

Fig. 4　Comparative analysis of time domain and frequency domain response of boom acceleration based on sensor and image recognition method

由图 4 可知，加速度传感器法与图像识别法测得的频率基本一致，两者最大偏差不超过 0.04 Hz。为验证实验结果的可靠性，选取北向 D1—D9 共 9 组 36 根吊杆，分别通过图像识别法和加速度传感器法测得吊杆频率，然后将每组吊杆频率的平均值代入式（1）计算索力。吊杆测试频率与索力计算结

果如表 1 所示。频率误差及索力误差的计算公式为

$$E_f = |f_b - f_a| / f_a \times 100\% , \quad (5)$$

$$E_T = |T_b - T_a| / T_a \times 100\% , \quad (6)$$

式(5)、式(6)中：E_f 为频率误差；E_T 为索力误差；f_a 与 T_a 分别为加速度传感器测试得到的频率与索力计算结果；f_b 与 T_b 分别为图像识别法测试得到的频率与计算得出的索力结果。

表 1　吊杆测试频率与索力计算结果

Tab. 1　Suspender frequency test and cable force calculation results

吊杆编号	吊杆长度/m	线密度/(kg/m)	加速度传感器法测得频率/Hz	图像识别法测得频率/Hz	加速度传感器法计算索力/kN	图像识别法计算索力/kN	频率误差/%	索力误差/%
北向 D1	7.500	11.020 3	6.79	6.83	114.32	115.67	0.59	1.18
北向 D2	14.150	13.224 2	4.16	4.17	183.29	184.17	0.24	0.48
北向 D3	19.900	13.224 2	2.52	2.48	133.03	128.84	1.59	3.15
北向 D4	24.600	13.224 0	2.15	2.2	147.97	154.93	2.33	4.71
北向 D5	28.630	13.224 1	1.45	1.48	91.16	94.97	2.07	4.18
北向 D6	32.400	13.224 0	1.56	1.59	135.13	140.38	1.92	3.88
北向 D7	34.890	13.224 1	1.45	1.44	135.38	133.52	0.69	1.37
北向 D8	35.660	13.224 0	1.42	1.45	135.63	141.42	2.11	4.27
北向 D9	37.155	13.224 0	1.57	1.54	179.99	173.18	1.91	3.79

由表 1 可知，图像识别法测得的频率和索力计算结果与加速度传感器法测得的频率和索力计算结果的平均误差分别为 1.49%和 3.00%，最大误差分别为 2.33%和 4.71%。结果表明，图像识别法能够较准确地识别吊杆频率和索力，并与加速度传感器法保持较好的一致性，体现出其在吊杆索力非接触式检测中的应用潜力。

3　基于响应面法的模型修正

本实验依托处于初张拉阶段的新建桥梁进行。鉴于传统油压千斤顶机械压力表精度较低且人工读数误差较大，故需要将加速度传感器法计算索力与图纸设计索力进行对比，以验证初张拉后实测索力与设计索力的吻合程度。索力误差参照式(6)计算，初张拉工况下实测索力与设计值对比结果见表 2。

表 2　初张拉工况下实测索力与设计值对比结果

Tab. 2　Comparison results between the measured cable force and the design value

吊杆编号	加速度传感器法计算索力/kN	设计索力/kN	索力误差/%
北向 D1	114.32	125.00	8.54
北向 D2	183.29	185.00	0.92
北向 D3	133.03	140.00	4.98
北向 D4	147.97	155.50	4.84
北向 D5	91.16	89.00	2.43
北向 D6	135.13	151.50	10.81
北向 D7	135.38	161.00	15.91
北向 D8	135.63	162.00	16.28
北向 D9	179.99	162.50	10.76

根据《公路桥梁施工监控技术规程》[18]可知，中下承式拱桥吊杆的结构内力与几何状态的误差限制在±10%以内，根据表中结果可知 D6、D7、D8、D9 组吊杆的平均索力均已超过设计索力限制。为准确表征初张拉状态下桥梁的实际受力状态，需要建立有限元模型开展结构响应分析。本文在有限元分析的基础上，提出一种基于响应面法与 NSGA-Ⅱ的索力协同优化方法，通过提高搜索效率和优化能力，以获得更优索力配置。

3.1　有限元仿真

依据实测数据与梁拱桥设计图纸，采用 MIDAS Civil 建立有限元模型，该模型考虑预应力张拉和混凝土收缩、徐变特性，桥梁的承重拱肋采用钢管混凝土结构形式，横向支撑体系设计为斜交支撑结构，两者均通过梁单元进行建模，吊杆采用受拉单元进行模拟，其张拉力通过设定初始拉力实现。在模型加载过程中，采用体外力的施加方式，确保在吊杆张拉施工阶段，初始拉力数值与实际工程的拉力值保持一致。全桥模型共划分为 2 482 个节点和 4 910 个单元。其中，桁架单元 72 个，梁单元 4 838 个。按施工组织设计进行施工全过程模拟分析，进行各施工阶段应力、变形和稳定性计算。施工全过程的模拟共划分为 87 个阶段，阶段划分与实际施工过程基本一致。连续梁拱桥有限元模型如图 5 所示。

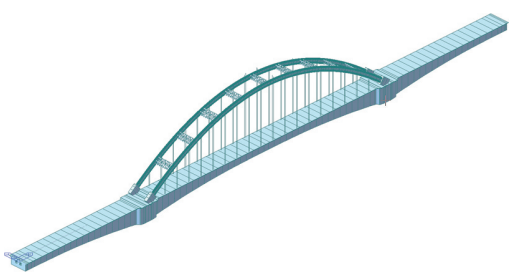


图 5　连续梁拱桥有限元模型

Fig. 5　Finite element model of continuous beam arch bridge

3.2 修正参数的选取

在响应面法中，修正参数的筛选基于方差分析进行，即通过 F 检验判断各个参数的显著性。F_B 为 F 检验进行显著性判别所采用的统计量，其计算公式为

$$F_B=\frac{SS_B/d_B}{SS_E/d_E}\sim F_{1-\alpha}(d_B,d_E)\,, \tag{7}$$

式(7)中：F_B 为 B 因素的 F 统计量；SS_B 为由 B 因素产生的偏差平方和；SS_E 为由误差产生的偏差平方和；d_B 为 B 的自由度；d_E 为误差的自由度；α 为显著性水平。

根据 F 检验判别准则：若计算得到 F_B 值大于 $F_{1-\alpha}(d_B,d_E)$，说明 B 因素具有显著性影响；反之，则 B 因素没有显著性影响。对于具有显著性影响的因素将会保留下来作为后续响应面拟合的输入变量，对于非显著性因素则被剔除[14]。

根据式(1)可知，索力计算结果对吊杆的计算长度极为敏感；由于该参数在公式中呈平方关系，其微小取值偏差便会对测量结果产生较大影响。此外，索的线密度在工程上也很难测量准确，而吊杆的截面面积是计算线密度的重要影响参数。因此，本文以全桥纵向对称的 9 组吊杆的平均计算长度因子(A—I)、吊杆组 D1 的截面直径因子(J)以及吊杆组 D2—D9 的截面直径因子(K)作为输入变量，共计选取 11 种影响显著的因子进行 Box-Behnken 试验设计，并且经过方差分析，11 种因子均通过 F 检验。根据工程经验与测量误差分析，取各因子的设计值为中水平，计算长度因子(A—I)的低水平和高水平分别在中水平基础上降低 5%和提高 5%，直径因子(J、K)的低水平和高水平则分别较中水平降低 10%和提高 10%。响应面参数设计与取值范围见表 3。

表 3 响应面参数设计与取值范围

Tab.3 Parameter design and value range

输入因子	基准值(中水平)	优化下限(低水平)	优化上限(高水平)
A/m	7.500	7.125	7.875
B/m	14.150	13.443	14.858
C/m	19.900	18.905	20.895
D/m	24.600	23.370	25.830
E/m	28.630	27.199	30.062
F/m	32.400	30.780	34.020
G/m	34.890	33.146	36.635
H/m	35.660	33.877	37.443
I/m	37.155	35.297	39.013
J/mm	42.0	37.8	46.2
K/mm	46.0	41.4	50.6

为更全面地分析各个吊杆对单一吊杆的吊杆力的影响，结合大跨径梁拱桥的结构特点以及桥梁结构设计的强度、刚度和稳定性要求，根据设计图纸，将沿跨中对称的吊杆划分为 D1—D9 共 9 组，以各组吊杆索力的平均值作为对应目标函数，分别记为 $F1$—$F9$。

3.3 响应面拟合分析

响应面拟合分析是一种综合试验设计与数学建模的最优化方法。该方法通过合理的试验设计获取实测数据，将系统响应值构建为多因素的函数。在此基础上，建立包含各显著因素一次项、平方项及任意 2 个因素之间交互项的多元二次回归模型，从而精确揭示各因素与响应值之间的关系。该方程能够通过坐标图的方式表现出来，以预测不同条件对响应值的影响。本文基于表 3 构建的 11 因子 3 水平的响应面试验体系生成 188 组试验工况，并通过将试验组中各参数样本值代入有限元模型，计算得到相应结构响应值。

鉴于有限元模型的特性，本文采用 Box-Behnken 建立响应面模型，并采用决定系数 R^2 来评估其拟合精度。R^2 旨在定量评估响应面模型对有限元仿真数据的拟合优度，取值范围为[0,1]。R^2 值越接近于 1，说明响应面模型的拟合程度越高；R^2 值越接近于 0，则说明试验误差较大，应重新进行试验设计。通过对响应面模型进行精度校验，各个响应面模型的 R^2 值如表 4 所示。部分吊杆索力振动响应面模型如图 6 所示。

表 4 各响应面模型 R^2 值

Tab.4 R^2 values of each response surface model

优化目标	R^2
D1 吊杆力 $F1$	0.987 8
D2 吊杆力 $F2$	0.996 9
D3 吊杆力 $F3$	0.994 8
D4 吊杆力 $F4$	0.993 7
D5 吊杆力 $F5$	0.999 9
D6 吊杆力 $F6$	0.988 4
D7 吊杆力 $F7$	0.999 6
D8 吊杆力 $F8$	0.987 9
D9 吊杆力 $F9$	0.998 2

由表 4 可以看出，各响应面模型的 R^2 值均趋近于 1，表明其具有较高的拟合精度与泛化预测能力。其中，D5 吊杆力响应面的 R^2 达 0.999 9，具有较高的拟合精度。这主要是由于代理模型的训练样本完全提取自数值有限元仿真，从根本上规避了物理试验中的随机测量噪声，且中长吊杆索力对几何参数的力学响应高度平滑。因此，可以采用拟合的响应面模型代替初始有限元模型进行优化。

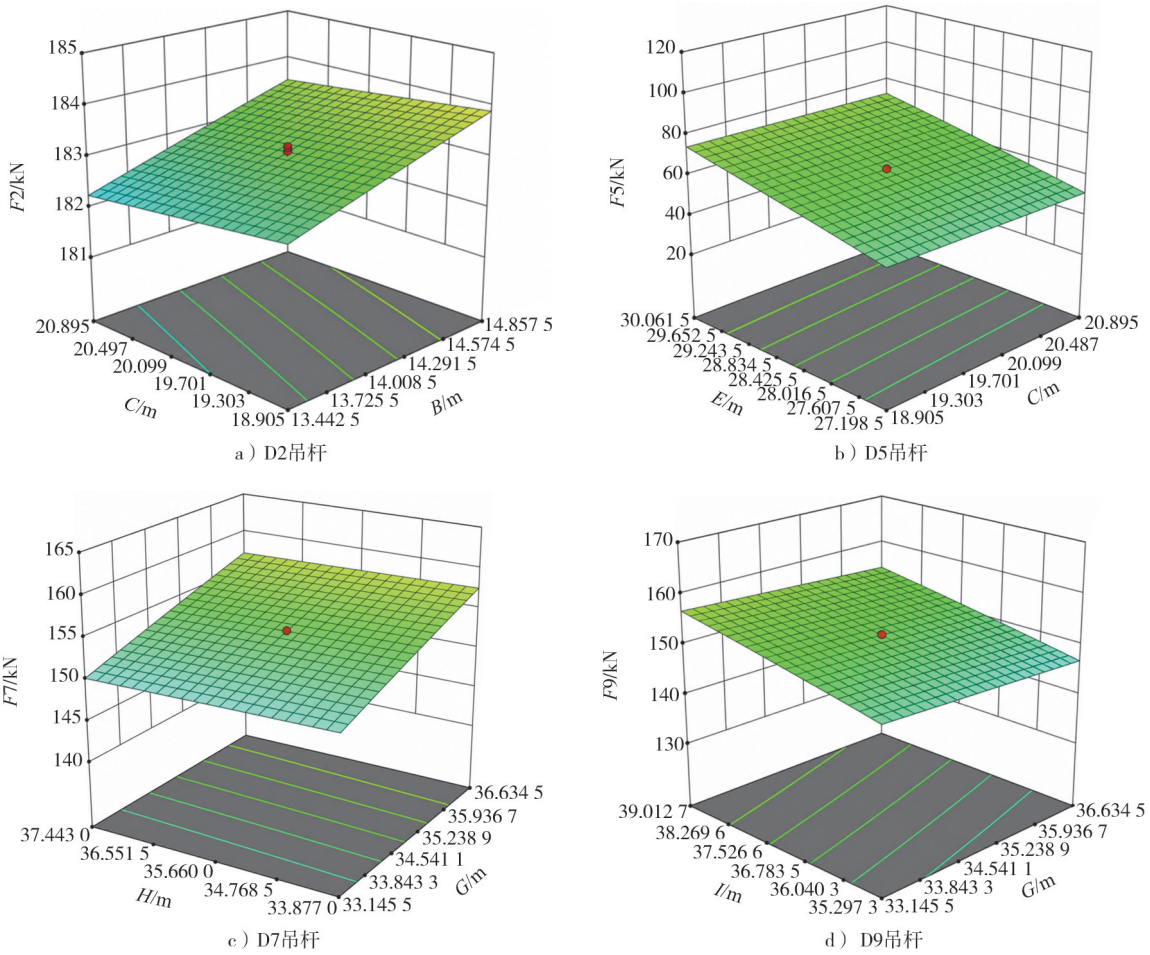


图 6　吊杆索力振动响应面模型

Fig. 6　Response surface model of suspender cable force vibration

3.4　索力修正

通过响应面拟合得到的方程，运用最优化理论（最小二乘法）进行响应面模型内的迭代优化，以 9 组吊杆力趋近设计索力为修正目标，对初始有限元模型的试验设计参数进行优化，并将修正后的参数代入有限元模型进行验证。优化前后参数修正值和变化率 Δ_S 见表 5，变化率计算公式如式(8)所示，索力误差 E_S 计算公式如式(9)所示。

表 5　优化前后参数修正值和变化率

Tab. 5　Parameter correction value and change rate before and after optimization

修正参数	初始值(μ)	修正值(λ)	变化率/%
A/m	7.500	7.405 9	−1.25
B/m	14.150	14.287 6	0.97
C/m	19.900	20.296 3	1.99
D/m	24.600	25.631 4	4.19
E/m	28.630	29.294 1	2.32
F/m	32.400	33.066 8	2.06
G/m	34.890	33.847 2	−2.99
H/m	35.660	34.610 5	−2.94
I/m	37.155	38.583 3	3.84
J/mm	42	38.530 0	−8.26
K/mm	46	42.100 0	−8.48

$$\Delta_S = (X_\lambda - X_\mu)/X_\mu \times 100\% , \quad (8)$$

$$E_S = |F_\mu - F_\lambda|/F_\mu \times 100\% , \quad (9)$$

式(8)、式(9)中：F 为索力；X 为修正参数；μ 和 λ 分别表示初始值与修正值。

基于修正后的参数进行模型计算，得到修正后索力值。修正后索力与设计索力的对比及误差分布如图 7 所示。

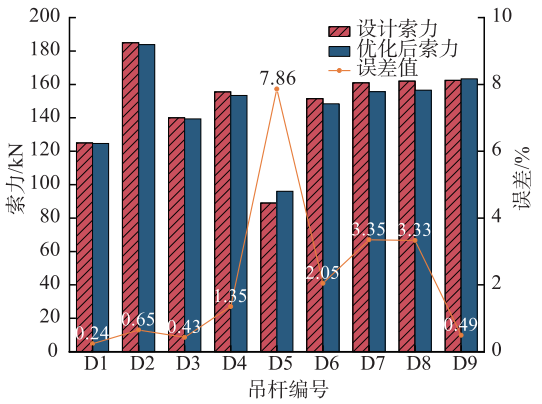


图 7　修正后索力与设计索力的对比及误差分布

Fig. 7　Comparison between corrected and design cable forces and error distribution

由修正结果可知，优化后索力与设计索力的最大误差值为 7.86%，远远小于实测初张拉状态下的最大误差 16.28%，并且 9 组索力与设计索力的误差值均满足规范±10%的要求，8 组吊杆索力与设计索力的误差值均不大于 3.35%，证明优化效果显著。

4 基于响应面代理模型的 NSGA-Ⅱ多目标索力优化

多目标优化问题(multi-objective optimization problem，MOP)旨在权衡多个相互矛盾的目标，以求得由非支配解组成的 Pareto 最优解集。本文研究的索力优化涉及多根吊杆的协同受力，受限于实际施工设备的张拉工序，多根吊杆无法实现同步张拉，导致难以使所有吊杆索力同时达到最优状态，故该问题属于多目标优化问题。在主流多目标优化算法中，强度 Pareto 进化算法(strength Pareto evolutionary algorithm，SPEA)在维持解集多样性时，需要频繁计算大规模种群个体间的两两空间距离。针对本文的 9 维目标，其固有的复杂个体淘汰与筛选机制极易导致计算成本的剧增。此外，尽管近年来涌现的第三代非支配排序遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithm Ⅲ，NSGA-Ⅲ)算法利用预设参考点引导进化，在求解高维目标优化方面表现突出，但本文设定的 9 组索力目标在物理力学机制上高度同质且呈强正相关，缺乏显著的多维度冲突，盲目引入其繁琐的参考点关联与更新机制反而会增加算法复杂度，延长有限元迭代时间，难以满足工程实效性的需求。相比之下，NSGA-Ⅱ算法通过引入快速非支配排序、精英保留策略以及拥挤度比较算子，有效克服了传统算法时间复杂度高的缺陷，在逼近真实 Pareto 前沿与维持解集分布多样性之间取得了优异平衡。因此，针对多吊杆协同受力相互牵制且难以满足±5%工程控制精度的问题，本文最终选用 NSGA-Ⅱ算法，对全桥吊杆索力进行进一步优化[15-16]。

4.1 NSGA-Ⅱ模型设计

本文以 Box-Behnken 设计构建的响应面模型作为代理模型，嵌入 NSGA-Ⅱ算法进行多目标优化，求取 Pareto 最优解集。将本文通过显著性检验的 11 个关键参数(因子 A—K)作为决策变量，并以全桥各组吊杆计算索力与设计值的相对误差最小化作为整体优化目标进行参数寻优。为保证优化结果的合理性及工程性，对模型施加约束条件：1) 边界约束方面　以响应面初步修正后的参数为基准，限定长度因子(A—I)的取值范围在基准值的±5%以内，截面直径因子(J、K)的取值范围在基准值的±10%以内；2) 状态约束方面　优化后任一单根吊杆的最终索力误差均须严格满足±5%的工程控制精度要求。NSGA-Ⅱ模型参数设计与约束范围见表 6。

表 6　NSGA-Ⅱ模型参数设计与约束范围

Tab. 6　Parameter of design and value range of NSGA-Ⅱ model

输入因子	优化下限	优化上限
A/m	6.887 5	7.924 3
B/m	13.287 5	15.287 7
C/m	18.875 6	21.717 0
D/m	23.837 2	27.425 6
E/m	27.243 5	31.344 7
F/m	30.752 1	35.381 5
G/m	31.477 9	36.216 5
H/m	32.187 8	37.033 2
I/m	35.882 5	41.284 1
J/mm	35.832 9	41.227 1
K/mm	39.153 0	45.047 0

4.2 索力优化与结果分析

在前文构建的优化模型与约束条件下，利用 MATLAB 平台运行 NSGA-Ⅱ算法程序，进行全局寻优。设置交叉概率为 0.8，变异概率为 0.05，初始种群数为 800，最大迭代次数为 3 000，最终得到包含 100 组解的 Pareto 最优解集。为客观评判这 100 组解的优劣，引入逼近理想解排序法(technique for order preference by similarity to ideal solution，TOPSIS)进行多目标决策。该方法通过计算各备选方案与正理想解及负理想解的欧氏距离(分别记为 D_i^+ 和 D_i^-)，进而求得各方案的相对贴近度 C_i。相对贴近度的计算公式为

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-}, \tag{10}$$

式(10)中：C_i 取值为 $0 \leqslant C_i \leqslant 1$，$C_i$ 值越大表明该方案与理想状态越接近。

根据贴近度排序，从解集中优选出综合性能最佳的索力调整方案[17]。通过模型计算，设计的 NSGA-Ⅱ模型在 1 500 次迭代后索力误差值稳定在 5%以下，达到最优。NSGA-Ⅱ模型中单吊杆最大索力误差收敛曲线见图 8，优化后模型索力与设计索力的对比及误差分布如图 9 所示。

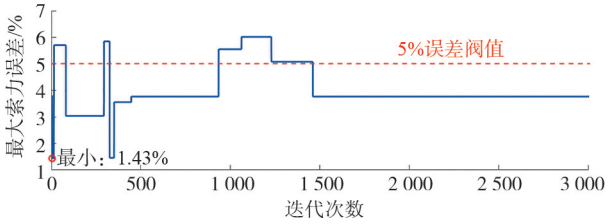


图 8　NSGA-Ⅱ模型中单吊杆最大索力误差收敛曲线

Fig. 8　Maximum single boom error convergence curve of NSGA-Ⅱ model

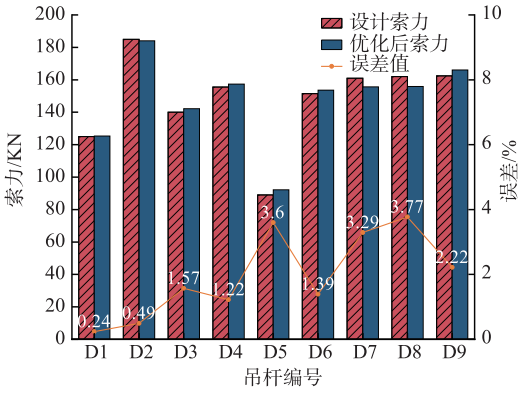


图 9　优化后模型索力与设计索力对比及误差分布

Fig. 9　Comparison of optimized and design cable forces and error distribution

为直观比较采用不同优化方法所得参数的差异，将响应面模型修正参数值与 NSGA-Ⅱ模型优化参数值及其变化率进行对比分析。响应面模型与 NSGA-Ⅱ模型参数对比结果如表 7 所示。

表 7　响应面模型与 NSGA-Ⅱ模型参数对比结果

Tab. 7　Comparison of parameters obtained from the response surface model and NSGA-Ⅱ model

优化参数	响应面模型修正参数值	NSGA-Ⅱ模型优化参数值	变化率/%
A/m	7.405 9	7.650 2	3.3
B/m	14.287 6	14.089 9	−1.38
C/m	20.296 3	19.912 6	−1.89
D/m	25.631 4	24.941 9	−2.69
E/m	29.294 1	28.609 2	−2.34
F/m	33.066 8	32.145 8	−2.79
G/m	33.847 2	33.822 6	−0.07
H/m	34.610 5	35.520 5	2.63
I/m	38.583 3	36.862 2	−4.46
J/mm	38.530 0	36.290 0	−5.81
K/mm	42.100 0	39.890 0	−5.25

由图 9 可知，基于 NSGA-Ⅱ方法优化后的各吊杆索力误差值均小于 5%，满足工程要求。由表 7 可知，响应面模型与 NSGA-Ⅱ模型最优参数的变化率均处于合理范围内。主梁优化前后的挠度变化如图 10 所示。

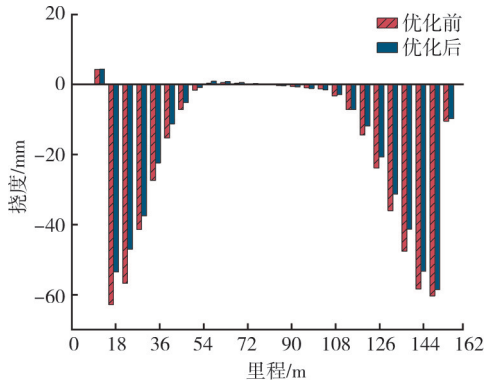


图 10　主梁优化前后的挠度变化

Fig. 10　Deflection changes of main girder before and after optimization

由图 10 可知，优化后主梁各控制截面的挠度得到大幅下降，主梁整体线形改善十分明显。

综上可知，基于响应面代理模型与 NSGA-Ⅱ算法的优化方法可以通过控制吊杆张拉长度，较为精准地控制索力的大小，为实际工程中吊杆张拉调控提供理论参考。

4.3　优化结果与终张拉状态下实测索力的对比分析

为验证基于响应面代理模型与 NSGA-Ⅱ算法所求最优解的工程可靠性，提取本桥北向吊杆(D1—D9)的优化结果与终张拉状态下的实测索力(以下简称终张拉索力)及设计索力进行横向对比分析。各吊杆优化索力与终张拉索力对比如表 8 所示。

表 8　各吊杆优化索力与终张拉索力对比

Tab. 8　Comparison of optimized cable force and final tension cable force of each suspender

吊杆编号	优化索力/kN	终张拉索力/kN	设计索力/kN	优化索力相对终张拉索力误差/%	优化索力相对设计索力误差/%
北向 D1	125.3	127.6	125.0	1.8	2.1
北向 D2	184.1	189.1	185.0	2.6	2.2
北向 D3	142.2	145.6	140.0	2.3	4.0
北向 D4	157.4	160.2	155.5	1.7	3.0
北向 D5	92.2	93.1	89.0	1.0	4.6
北向 D6	153.6	148.7	151.5	3.3	1.8
北向 D7	155.7	153.9	161.0	1.2	4.4
北向 D8	155.9	159.1	162.0	2.1	1.8
北向 D9	166.1	164.4	162.5	1.0	1.2

由表 8 可知，优化索力与终张拉索力的最大相对误差为 3.3%，相对设计索力的最大误差为 4.6%，各吊杆索力相对设计值的误差均满足±5%的工程控制要求。结果表明，优化结果符合桥梁实际物理受力状态，证实了基于响应面代理模型与 NSGA-Ⅱ算法的索力优化方法的工程可行性，可为同类桥梁的索力调控提供理论参考。

5　结　语

本文以某大跨连续梁拱桥为工程背景，围绕吊杆索力识别与优化问题进行系统研究，最终实现了全桥吊杆索力的高效校准与多目标协同优化。研究成果提升了复杂多索耦合下的计算效率，改善了主梁的结构线形，可为实际工程中吊杆张拉力的精准控制提供可靠的理论参考。主要结论如下。

1) 图像识别法与加速度传感器法所得吊杆频率最大偏差不超过 0.04 Hz，图像识别法测得频率和计算索力相对于加速度传感器法的平均误差分别为 1.49% 和 3.00%，最大误差分别为 2.33% 和

4.71%。结果表明,图像识别法能够较准确地识别吊杆频率和索力,并与加速度传感器法保持较好的一致性,体现出其在吊杆索力非接触式检测中的应用潜力。

2) 响应面代理模型能够有效替代复杂有限元模型实现高精度、高效率的参数寻优。响应面代理模型对各目标函数拟合精度 R^2 均接近 1,经最小二乘法校准后,索力与设计值最大误差由 16.28%降至 7.86%,所有吊杆索力误差均满足±10%的规范要求。

3) 多目标协同优化方案显著改善了桥梁的整体受力状态与结构线形。优化后全桥各吊杆索力误差均小于 5%,结构线形显著改善,实现了索力精度与主梁变形控制的综合寻优。

4) 实桥对比验证结果表明,优化索力与终张拉索力的最大相对误差为 3.3%,相对设计索力的最大误差为 4.6%,均满足±5%的工程控制要求,证实了优化方法的可行性。

基于响应面与 NSGA-Ⅱ的梁拱桥吊杆索力修正与优化方法可以有效控制吊杆的结构内力与几何状态的误差,并可根据优化后的吊杆参数对张拉控制提供指导。但本研究未考虑环境振动、温度效应等因素对吊杆索力识别与优化结果的影响,后续将进一步开展多因素耦合作用下的索力长期性能研究,以评估复杂环境条件下所提方法的适用性。

参考文献/References:

[1] 朱浩,肖垚,王永威,等.基于图像识别的非接触式索力测试系统的研究[J].公路,2023,68(1):117-123.
Zhu Hao, Xiao Yao, Wang Yongwei, et al. Research on non-contact cable force estimation system based on image recognition[J]. Highway,2023,68(1):117-123.

[2] 田文迪,熊玉勇,吴朔阳,等.基于微波全场测振的桥梁轻量化监测技术[J].振动与冲击,2025,44(10):106-115.
Tian Wendi,Xiong Yuyong,Wu Shuoyang,et al. Lightweight monitoring technology for bridges based on microwave full-field vibration sensing[J]. Journal of Vibration and Shock,2025,44(10):106-115.

[3] 杜文康,王浩,雷冬,等.基于机器视觉和边缘重构的拉索振动响应识别[J].东南大学学报(自然科学版),2025,55(5):1467-1475.
Du Wenkang,Wang Hao,Lei Dong,et al. Vibration response identification of cable based on machine vision and edge reconstruction[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition),2025,55(5):1467-1475.

[4] 王鹏峰,李运堂,黄永勇,等.基于改进 YOLOv5s 网络的斜拉桥拉索表面缺陷检测[J].光电工程,2024,51(5):240028.
Wang Pengfeng,Li Yuntang,Huang Yongyong,et al. Defects detection for cable surface of cable-stayed bridge based on improved YOLOv5s network[J]. Opto-Electronic Engineering,2024,51(5):240028.

[5] 郭鑫,颜东煌,袁晟,等.刚性系杆拱桥吊杆张拉索力施工控制研究[J].中外公路,2020,40(5):81-86.
Guo Xin, Yan Donghuang, Yuan Sheng, et al. Study on construction control of suspender tensile force in rigid tied-arch bridge[J]. Journal of China & Foreign Highway,2020,40(5):81-86.

[6] 史佩韶,李末.基于 IAGA 算法的钢混独柱式斜拉桥成桥索力优化研究[J].公路,2025,70(3):422-429.
Shi Peishao,Li Mo. Research on completed bridge cable force optimization of steel-concrete single pylon cable-stayed bridge based on IAGA algorithm[J]. Highway,2025,70(3):422-429.

[7] Gao Wenshan, Wang Bosen, Zhu Jinsong, et al. Long-term deformation behavior and hanger force adjustment scheme of a prestressed concrete continuous rigid-frame arch bridge[J]. Results in Engineering,2025,27:106688.

[8] 王良成,袁吉利,佘祖令,等.基于频率法异形索面弯拱桥的不同索力计算理论的差异性研究[J].公路,2025,70(1):251-256.
Wang Liangcheng, Yuan Jili, She Zuling, et al. Research on difference of different cable force calculation theories of curved arch bridge with special-shaped cable plane based on frequency method[J]. Highway,2025,70(1):251-256.

[9] JTG/T J21-01-2015 公路桥梁荷载试验规程[S].

[10] 卢瀚,马沁巍,马少鹏.针对遮挡目标的阵列式光学测量方法及系统[J].激光与光电子学进展,2022,59(8):0815005.
Lu Han,Ma Qinwei,Ma Shaopeng. Camera array-based optical measurement approach and system for occluded targets[J]. Laser & Optoelectronics Progress,2022,59(8):0815005.

[11] 李美求,胡曼玉,陈星,等.基于响应面和 NSGA-Ⅱ算法的切入式螺旋导叶旋流器多目标优化[J].机床与液压,2025,53(20):159-167.
Li Meiqiu,Hu Manyu,Chen Xing,et al. Multi-objective optimization of cut-in spiral guide vane hydrocyclone based on response surface and NSGA-Ⅱ algorithm[J]. Machine Tool & Hydraulics,2025,53(20):159-167.

[12] Xiang Ze,Zhu Zhiwen. Multi-objective optimization of a composite orthotropic bridge with RSM and NSGA-Ⅱ algorithm[J]. Journal of Constructional Steel Research,2022,188:106938.

[13] 金剑森,亓兴军,张瀚升,等.基于数字图像理论的非接触式结构振动位移测量方法研究[J].宁波工程学院学报,2025,37(2):1-9.
Jin Jianmiao,Qi Xingjun,Zhang Hansheng,et al. Non-contact structure vibration displacement measurement method based on digital image theory[J]. Journal of Ningbo University of Technology,2025,37(2):1-9.

[14] 李明星,侣贞贞,亓兴军,等.基于实测频率振型的大跨斜拉桥响应面模型修正研究[J].河北工业科技,2024,41(4):273-281.
Li Mingxing,Si Zhenzhen,Qi Xingjun,et al. Response surface model modification of long-span cable-stayed bridges based on measured frequency mode[J]. Hebei Journal of Industrial Science and Technology,2024,41(4):273-281.

(下转第 476 页)