

融合 MIDAS Civil API 和 Kriging 的桥梁有限元自动化修正研究

韩 硕, 韩雄刚, 徐治芹

(中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津市 300000)

摘 要: 针对 MIDAS Civil 有限元模型修正人工依赖性强、自动化程度低的问题, 提出一种基于 MIDAS Civil API 与 Kriging 代理模型的参数动态校准框架, 实现模型修正的标准化与全流程自动化。通过 Python 驱动 API 直接调用原始设计模型, 在保持拓扑关系不变的基础上, 实现参数批量迭代更新与响应数据自动解析, 避免传统人工修正的低效性与跨平台建模的复杂性。以青海空港北路二号桥为工程实例, 修正后模型静力位移误差降至 0.45%~2.43%, 频率误差收敛至 1.98%~3.87%。修正模型可直接复用至设计优化、健康监测等全生命周期环节, 为桥梁数字孪生模型构建提供了可继承的技术路径。

关键词: 桥梁工程; 自动化模型修正; MIDAS Civil API; Kriging 模型

中图分类号: U441

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)12-0282-05

Research on Bridge Finite Element Automatic Correction Integrating MIDAS Civil API and Kriging

HAN Shuo, HAN Xionggang, XU Zhiqin

(North China Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300000, China)

Abstract: Aiming at the problems of strong manual dependence and low degree of automation in the finite element model correction of MIDAS Civil, a parameter dynamic calibration framework based on the MIDAS Civil API and Kriging surrogate model is proposed to achieve the standardization and full-process automation of model correction. By utilizing a Python-driven API to directly invoke the original design model, on the basis of maintaining the topological relationship unchanged, the batch iterative updates of parameters and automatic parsing of response data are achieved to avoid the inefficiency of traditional manual correction and the complexity of cross-platform modeling. Taking the Qinghai North Konggang Road No.2 Bridge as an engineering case, the static displacement error of the model after correction is reduced to 0.45% - 2.43%, and the frequency error is converged to 1.98%~3.87%. The corrected model can be directly reused in design optimization, health monitoring and other full lifecycle stages, providing an inheritable technical pathway for constructing the digital twin models of bridges.

Keywords: bridge engineering; automated model correction; MIDAS Civil API; Kriging model

0 引 言

随着桥梁健康监测系统向数字化、智能化方向发展, 基于实测数据的有限元模型修正技术已成为提升结构状态评估精度的有效手段^[1-3]。然而, 该技术的工程化应用面临显著制约: 当前国内桥梁设计领域广泛采用 MIDAS Civil 软件建立有限元模型, 但其封闭架构长期缺乏标准化数据接口, 导致参数调整、响应数据提取等关键环节高度依赖人工操作, 难

以实现与编程环境的自动化交互。工程实践中常面临效率与精度的双重困境——若采用传统人工修正模式, 需耗费大量时间完成参数分析、样本采集等重复性工作, 且存在人为误差风险; 若转向 ANSYS 等通用有限元软件, 则需跨平台重建模型, 不仅引入建模误差, 还导致设计阶段原始模型与运维阶段修正模型的数据链断裂。

MIDAS Civil NX 2024 首次开放了应用程序接口 (API), 为突破上述技术限制提供了新机遇。本文据此开展了融合 API 与 Kriging 的模型自动化修正研究, 通过 Python 调用 API 接口, 直接在原设计模型上实现参数批量化迭代更新、响应数据自动解析等操

收稿日期: 2025-04-18

作者简介: 韩硕(1998—), 男, 硕士, 助理工程师, 从事桥梁设计工作。

作,形成"参数筛选-代理建模-误差反馈-迭代优化"的闭环修正流程,为桥梁工程数字孪生体系中"设计-修正-运维"全生命周期协同提供了可复用的技术框架。

1 有限元模型修正理论

有限元模型修正是一种在结构实际响应已知的前提下,通过优化算法或其他手段反演得到有限元模型的设计参数,使模型计算响应与结构实际响应趋于一致的技术^[4]。因此模型修正本质上是一个有约束优化问题,其优化目标是使计算响应与结构实际响应之间的误差最小^[5-6],数学上可表达如下:

$$\text{Minimize: } J(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n [y_i^a(\mathbf{x}) - y_i^e(\mathbf{x})]^2 \quad (1)$$

$$\text{Subject to: } x_{j,\min} \leq x_j \leq x_{j,\max}$$

式中: $J(\mathbf{x})$ 表示优化目标函数; $\mathbf{x}$ 表示待修正的结构参数向量; n 表示要修正的结构响应个数; $y^a(\mathbf{x})$ 表示模型计算响应,由有限元模型分析得到; $y^e(\mathbf{x})$ 表示结构实测响应,通常来自现场试验或监测系统; $x_{j,\max}$ 和 $x_{j,\min}$ 分别表示第 j 个结构参数允许变化的上下界。

要求解上述数学问题,最常用的方法是使用优化算法。其中,粒子群算法因其简洁高效易维护而被广泛应用于各领域。

1.1 粒子群优化算法

粒子群优化(PSO)算法^[7-9]是一种基于鸟类捕食行为而提出的元启发式优化算法,其在对动物集群活动行为观察基础上,利用群体中的个体对信息的共享使整个群体的运动在问题求解空间中产生从无序到有序的演化过程,从而获得最优解。在标准粒子群优化算法中,粒子迭代更新公式为:

$$v_i^{k+1} = \omega v_i^k + c_1 r_1 (p_i^k - x_i^k) + c_2 r_2 (g_i^k - x_i^k) \quad (2)$$

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \quad (3)$$

式中: x_i^k 和 v_i^k 分别表示第 i 个粒子在第 k 次迭代时的位置和速度; x_i^{k+1} 和 v_i^{k+1} 分别表示第 i 个粒子在第 $k+1$ 次迭代时的位置和速度; p_i^k 表示第 i 个粒子搜索迭代至第 k 代时历史最优位置,即个体最优; g_i^k 表示搜索迭代至第 k 代时整个种群历史最优位置,即全局最优; ω 表示惯性权重,决定前一时刻的速度对下次移动的影响, $\omega \geq 0$ 且取值较大时,算法的全局搜索能力较强,取值较小时,局部搜索能力较强; c_1 和 c_2 分别表示个体学习因子和社会学习因子; r_1 和 r_2 是介于 $[0,1]$ 之间的随机数,代表扰动因子,以提升搜索多样性。

在有限元模型修正中,优化目标函数 $J(\mathbf{x})$ 即粒子的位置,寻得了种群最优位置,也就得到了使优化目标函数 $J(\mathbf{x})$ 最小的模型结构参数 $\mathbf{x}$,也就意味着模型得到了修正。

然而,从算法原理可知,整个算法寻优迭代的过程中,每次迭代中每个粒子都需要计算一次当前位置,也即优化目标函数 $J(\mathbf{x})$,计算次数取决于粒子群的种群数量和迭代次数,通常数以千次计。优化目标函数 $J(\mathbf{x})$ 包含模型计算响应 $y^a(\mathbf{x})$,这意味着需要计算数以千次计的不同 $\mathbf{x}$ 对应的 $y^a(\mathbf{x})$,若每次都直接调用有限元模型分析,将耗费大量时间和计算资源。为提高效率,研究人员开发了基于代理模型的有限元模型修正方法,该方法使用代理模型(通常为数学模型)来替代有限元模型计算模型响应 $y^a(\mathbf{x})$,只需要消耗少量计算资源用于采集构建代理模型的训练样本,就能获得与直接调用有限元模型相近的修正结果。在众多代理模型当中,Kriging模型由于使用方便和高预测精度而被广泛应用于模型修正领域。

1.2 Kriging 代理模型

Kriging模型是一种基于统计学的插值方法,其核心思想是利用已知样本点之间的空间相关性,对未知位置的数值进行预测^[10]。通过对已有样本数据的拟合,Kriging模型能够描述样本的空间相关性,并通过最小化预测误差来预测未知样本。这种统计插值方法使得Kriging模型能够高效地近似有限元模型的复杂输出。假设一组由 m 个 n 维的设计变量 $\mathbf{x} = \{\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_m\}^T$ 及其对应的真实响应 $\mathbf{y} = \{y_1, y_2, \dots, y_m\}^T$ 组成的训练样本,其Kriging模型可以表示为:

$$\hat{y}(\mathbf{x}) = \mathbf{f}^T(\mathbf{x})\boldsymbol{\beta} + Z(\mathbf{x}) \quad (4)$$

其中, $\hat{y}(\mathbf{x})$ 是Kriging预测值,用以代替有限元模型分析值 $y^a(\mathbf{x})$; $\mathbf{f}^T(\mathbf{x})\boldsymbol{\beta}$ 是一个多项式回归模型,反映训练样本的全局趋势, $\mathbf{f}^T(\mathbf{x})$ 为多项式函数向量, $\boldsymbol{\beta}$ 为回归系数向量。 $Z(\mathbf{x})$ 是一个随机过程,服从均值为0,方差为 σ^2 的正态分布,表示与全局趋势的局部偏差。正是由于同时考虑了全局趋势和局部偏差,Kriging模型得以在全局逼近和局部逼近中都能以较高精度逼近真实模型,进而广泛应用于各领域^[11-14]。

1.3 基于MIDAS Civil API和Kriging的模型修正流程

图1给出了基于MIDAS Civil API和Kriging的有限元模型修正流程,主要包含以下步骤:

(1)初始有限元(Finite Element, FE)模型通过

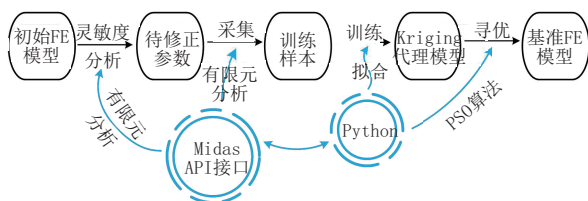


图1 基于MIDAS Civil API和Kriging的有限元模型修正

API接口与Python交互;

(2)灵敏度分析,确定对修正影响显著的参数,即待修正参数;

(3)实验设计,采集FE模型的“修正参数-响应”训练样本;

(4)以修正参数为输入,响应为输出,建立Kriging代理模型;

(5)PSO算法寻优,得到基准FE模型。

2 工程背景

空港北路是青海省海东市连接老城区和工业园区、机场和高铁交通枢纽的重要通道,西起空港北路与曙光大道交叉口,东至古驿大道,道路等级为城市主干道。空港北路二号桥(见图2)位于空港北路东延长线跨越湟水河处,分两幅定线,主桥两幅均位于半径800 m的圆曲线上。左幅桥跨径布置为 $(5 \times 30) + (3 \times 70) + (32.598 + 2 \times 34 + 32.598) = 493.196$ m,右幅桥跨径布置为 $(4 \times 30) + (3 \times 70) + (5 \times 30) = 480$ m。主桥上部结构形式为双层钢结构连续桁架桥,主梁采用双层钢桁梁结构,单幅桁梁全宽15.5 m,左、右幅桥上层桥面均通行机动车;下层桥面宽7.5 m,左幅桥下层桥面为预留管线通道,右幅桥下层桥面为行人和非机动车专用通道。主桥下部结构采用盖梁单柱墩以满足阻水率要求。



图2 空港北路2号桥

有限元模型(见图3)使用MIDAS Civil建立,其中钢桁架为梁单元,上下层桥面均为板单元,材料的本构定义选用MIDAS Civil中默认的方式。共计划分梁单元1 012个,板单元392个。边界条件均为一般支撑中的固定约束。栏杆等二期荷载由静力荷载模拟。

静载试验工况包括中跨的最大正弯矩加载(工

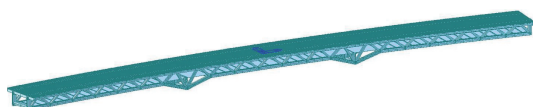


图3 有限元模型

况一)和右边跨的最大正弯矩加载(工况二),试验荷载为汽车荷载。

3 有限元模型修正

3.1 选择修正参数

有限元模型修正中的灵敏度分析常采用差分法来评估设计参数对目标函数的影响程度,其核心思想是通过参数微小扰动前后的响应变化量计算灵敏度^[15],计算公式如下:

$$S_{ij} = \frac{p_j}{f_i(p_j)} \frac{f_i(p_j + \Delta p_j) - f_i(p_j)}{\Delta p_j} \quad (5)$$

式中: p_j 为结构参数初始值; f_i 为结构响应; S_{ij} 为相对灵敏度; Δp 为参数扰动。

共考虑了以下13个结构参数进行灵敏度分析:(1)弦杆弹模 E_1 ;(2)弦杆容重 D_1 ;(3)斜撑弹模 E_2 ;(4)斜撑容重 D_2 ;(5)板单元弹模 E_3 ;(6)板单元容重 D_3 ;(7)横梁弹模 E_4 ;(8)横梁容重 D_4 ;(9)纵梁弹模 E_5 ;(10)纵梁容重 D_5 ;(11)悬臂弹模 E_6 ;(12)悬臂容重 D_6 ;(13)桥面板弹模 E_7 。共考虑了9个结构响应的灵敏度,包括中跨和右边跨的1/4跨、1/2跨,共6个挠度和前3阶频率。

图4展示了灵敏度分析结果,可以看出, D_2 、 D_4 、 E_5 、 D_5 、 E_6 、 D_6 展现了较低的灵敏度,这些参数在后续模型修正中将不再考虑。于是,最初的13个结构参数缩减到7个,即 E_1 、 D_1 、 E_2 、 E_3 、 D_3 、 E_4 、 E_7 。

3.2 构建Kriging模型

Kriging代理模型的预测精度直接受制于“参数-响应”训练样本在高维特征空间中的分布特性。为此,基于拉丁超立方抽样(LHS)方法,对已确定的7个修正参数构建了包含150组样本点的实验设计矩阵,保证参数空间内样本点的均匀散布。在此基础上,结合桥梁结构力学特性与工程实际,将各参数的相对变化率限定为 $\pm 40\%$,确保参数修正过程符合结构物理机理。结构参数输入MIDAS FE模型获得对应响应,得益于MIDAS civil NX开放的API接口,这一过程得以自动化运行。

以待修正参数为输入,响应为输出,构建Kriging代理模型。为验证Kriging模型有效性,图5展示了位移关于 E_1 、 E_2 的Kriging响应面和均方误差(Mean

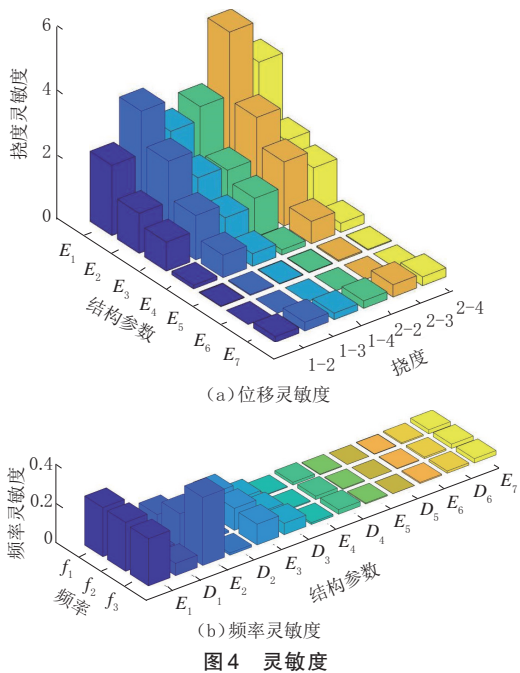


图4 灵敏度

Square Error, MSE) 面,图 5(a)中的散点为数据样本点,平面为拟合的 Kriging 响应面,图 5(b)中最大均方误差仅为 3×10^{-3} ,表明构建的 Kriging 模型具有良好的预测精度,可以代替有限元模型进行后续寻优计算。

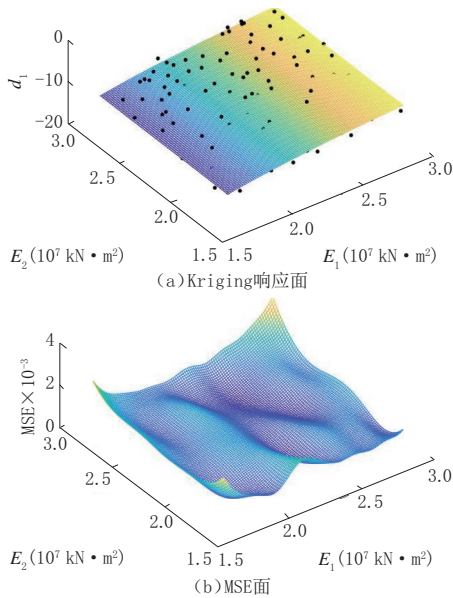


图5 响应面和均方误差面

3.3 修正结果

采用粒子群算法进行寻优计算,粒子种群大小取 $m=100$,粒子的维数取 $D=7$ (每个待修正参数为一维),最大迭代次数 100 次,惯性权重 ω 取 0.729,个体学习因子 c_1 和群体学习因子 c_2 均取 2。

表 1 列出了修正前后响应变化。修正后模型在静动力特性方面均得到显著改善。在静力响应方面,工况 1 下各测点位移相对误差由初始模型的

6.73%~9.26% 降低至 0.45%~1.31%;。工况 2 下测点位移误差从初始的 12.29%~16.56% 收敛至 0.54%~2.43%,最大降幅达 14.13%。动力特性修正效果更为显著,前 3 阶频率误差幅值由初始的 13.93% 至 19.88% 优化至 1.98% 至 3.87%。特别是主梁竖向基频 f_1 从 2.268 Hz 提升至 2.83 Hz,误差收敛幅度达 17.9 个百分点。修正后各阶频率相对误差均控制在 5% 阈值内,满足工程精度要求。图 6 为工况一、工况二修正前后对比。

表 1 修正前后响应变化

响应	实测值	初始响应	修正后响应	初始误差	修正后误差
工况 1 (中跨)	L/4 挠度/ mm	-9.7	-10.598	9.26%	-0.78%
	L/2 挠度/ mm	-15.7	-16.757	6.73%	-1.31%
	L/4 挠度/ mm	-11.0	-11.943	8.57%	-0.45%
工况 2 (右边跨)	L/4 挠度/ mm	-12.1	-13.615	12.52%	0.61%
	L/2 挠度/ mm	-19.4	-21.784	12.29%	0.54%
	L/4 挠度/ mm	-13.4	-15.619	16.56%	2.43%
频率	f_1 /Hz	2.83	2.268	-19.88%	-1.98%
	f_2 /Hz	3.47	2.827	-18.54%	-3.87%
	f_3 /Hz	4.49	3.865	-13.93%	-2.89%

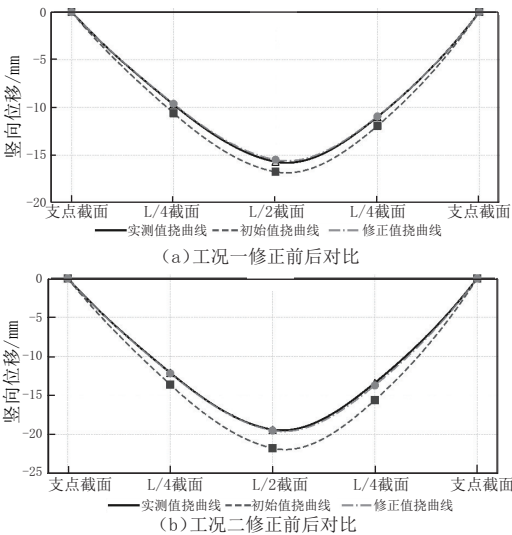


图6 工况一、工况二修正前后对比

表 2 为结构参数的修正结果,参数修正率较大,这是由于:有限元建模时进行了适量简化(如温度、几何单元、截面等),模型分析结果与实际存在一定误差(见表 1);同时,为平衡修正效果与效率,选择了一些对响应有显著影响的参数进行了修正而非全部(如未修正边界条件、支撑刚度等)。因此,表 2 所

列的修正后参数应体现了建模简化与未修正参数影响的“等效参数”,并非真实材料属性。

表 2 修正前后结构参数对比

修正参数	修正前	修正后	修正率
弦杆弹模 $E_1/(10^5 \text{ MPa})$	2.06	2.867	39.18%
弦杆容重 $D_1/(10^4 \text{ N} \cdot \text{m}^{-3})$	7.698	4.619	-40.00%
斜撑弹模 $E_2/(10^5 \text{ MPa})$	2.06	1.538	-25.33%
板单元弹模 $E_3/(10^5 \text{ MPa})$	2.06	2.868	39.24%
板单元容重 $D_3/(10^4 \text{ N} \cdot \text{m}^{-3})$	7.698	4.715	-38.74%
横梁弹模 $E_4/(10^5 \text{ MPa})$	2.06	1.682	-18.34%
桥面板弹模 $E_7/(10^5 \text{ MPa})$	2.06	1.405	-31.80%

4 结 语

本研究针对桥梁有限元模型修正中的效率瓶颈与工程适用性问题,提出了一种基于 MIDAS Civil API 与 Kriging 代理模型的自动化修正方法。通过筛选弦杆弹模 E_1 、板单元容重 D_3 等 7 类关键参数构建代理模型,结合粒子群算法实现多参数联合优化。修正后模型静力位移误差收敛至 3% 以内,前三阶频率误差控制在 4% 以下,显著提升了模型对实际结构的表征能力,为桥梁数字孪生模型构建提供了可继承的技术路径。主要意义如下:

(1)全周期数据同源:直接基于 MIDAS Civil 原生模型实施模型修正,完整继承原设计模型的拓扑关系(荷载工况及构件属性标签等),保证设计基准模型与修正模型的全生命周期数据同源,有效规避跨平台建模导致的几何属性失真与材料信息丢失问题,使“设计基准模型-施工控制模型-运维监测模型”形成全链条数据映射,显著降低全周期工程数据管理的协同复杂度。

(2)修正全程自动化:通过 Python 深度集成 MIDAS Civil API 构建的自动化模型修正系统,将传统离散的人工操作转化为全流程闭环工作流,实现关键修正参数的动态识别与稳定收敛,并确保跨平台数据的无损交互与鲁棒性控制,突破人工操作效

率瓶颈,显著提升复杂模型修正的可靠性与一致性。

(3)模型可跨阶段复用:修正模型直接继承自设计模型,荷载体系与构件标签,可用于施工阶段预拱度智能预测、运营阶段荷载试验动态校验、健康监测数据融合分析,实现有限元模型在设计校验、施工模拟、健康监测三大工程阶段的平滑复用,为桥梁全生命周期数字化管理奠定高精度模型基础。

参考文献:

- [1] 王凌波,王秋玲,朱钊,等.桥梁健康监测技术研究现状及展望[J].中国公路学报,2021,34(12):25-45.
- [2] 宋晓东,颜永逸,李佳靖,等.基于子结构的大型桥梁有限元模型修正方法[J].桥梁建设,2021,51(2):40-46.
- [3] 翁顺,朱宏平.基于有限元模型修正的土木结构损伤识别方法[J].工程力学,2021,38(3):1-16.
- [4] 李延强,刘晓慧,陈泽林,等.基于索力响应面法的斜拉桥模型修正[J].铁道学报,2021,43(2):168-174.
- [5] 杨雅勋,杨福利,陈东.改进响应面法在桥梁结构有限元模型修正中的应用[J].公路交通科技,2020,37(10):83-91;133.
- [6] 秦世强,张亚州,康俊涛.基于改进稳态遗传算法的桥梁有限元模型修正[J].中山大学学报(自然科学版),2020,59(4):79-88.
- [7] 周红利,周广东,刘凯凯,等.基于 PSO-GRNN 的大跨桥梁有限元模型修正方法[J].东南大学学报(自然科学版),2024,54(6):1489-1495.
- [8] 王震宇,王计真,杨婧艺,等.基于新型粒子群算法的结构动力学热振模型修正[J].航空学报,2023,44(7):108-120.
- [9] 杨福利.基于响应面-线性递减权重粒子群算法的桥梁结构有限元模型修正[D].西安:长安大学,2021.
- [10] 赵敏龙,彭珍瑞,张亚峰.基于 Kriging 模型和无迹卡尔曼滤波的转向架构架模型修正[J].振动与冲击,2022,41(4):270-277.
- [11] 李斌,李嘉,李萍,等.基于 Kriging 的燃油离心泵智能优化设计方法研究[J].推进技术,2023,44(9):218-229.
- [12] 许瑞飞,段卓毅,钱瑞战.基于 Kriging 代理模型的高升力构型优化设计[J].航空科学技术,2023,34(3):58-63.
- [13] 赵欢.基于自适应多可信度多项式混沌-Kriging 模型的高效气动优化方法[J].力学学报,2023,55(1):223-238.
- [14] 郑智群,黄贤振,姜智元,等.基于 Kriging 模型的螺旋波纹管流动换热特性及结构优化[J].东北大学学报(自然科学版),2024,45(7):992-1001.
- [15] 于虹,文望青,严爱国,等.大跨斜拉桥基于灵敏度分析的索力传感器优化布置[J].振动工程学报,2025,38(5):1046-1054.