

DOI:10.11784/tdxbz202504033

## 面向索桁架结构的温度响应分析及因素耦合研究

史国梁<sup>1,2</sup>, 刘占省<sup>1,2</sup>, 路德春<sup>1,2</sup>, 王泽强<sup>3</sup>, 赵一峰<sup>1,3</sup>, 陈云涛<sup>1</sup>

(1. 北京工业大学建筑工程学院, 北京 100124;

2. 北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124;

3. 北京市建筑工程研究院有限责任公司, 北京 100039)

**摘要:** 当前针对温度作用下索桁架结构力学响应和影响因素耦合分析的研究较为缺乏。如何实现连续动态分析温度作用对结构力学性能的影响并给出合理的补偿措施, 成为提高大型索结构服役期工作性能的关键。本文以索桁架结构为研究对象, 提出了温度响应分析方法, 并研究多影响因素的耦合关系。首先, 根据索桁架试验模型设计了温度作用工况和力学响应的采集机制。以索力实测值作为评估有限元仿真模型精度的指标。通过修正结构设计参数建立了高保真的有限元仿真模型, 获取各类温度作用下的力学响应。在仿真分析的基础上建立可靠的数据集, 提出了基于卷积神经网络的温度响应预测方法。在神经网络中建立温度作用与力学响应之间的数据映射关系, 实现连续动态分析。基于神经网络得到了最不利的温度作用位置和具体工况。其次, 为了进一步给出温度作用下的补偿措施, 进行了随机森林驱动的影响因素的耦合分析。在此基础上进行了最关键因素的参数分析, 得到具体的响应规律。研究表明, 所建立的有限元仿真模型计算误差控制在 3% 以内, 可以精准有效地分析温度作用下的力学响应。基于卷积神经网络的温度响应预测方法实现了结构力学响应的连续动态分析, 分析时间成本降低了 27.8%。针对本试验模型, 最不利的温度作用工况为连续 8 跨升温 37 °C。适当提高预应力水平是改善温度作用下结构工作性能的最佳补偿措施。

**关键词:** 索桁架结构; 温度作用; 力学响应; 影响因素; 补偿措施

中图分类号: TU393.3

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2026)03-0321-11

## Research on Temperature Response Analysis and Factor Coupling for Cable Truss Structure

Shi Guoliang<sup>1,2</sup>, Liu Zhansheng<sup>1,2</sup>, Lu Dechun<sup>1,2</sup>, Wang Zeqiang<sup>3</sup>,  
Zhao Yifeng<sup>1,3</sup>, Chen Yuntao<sup>1</sup>

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education,  
Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

3. Beijing Building Construction Research Institute Co., Ltd., Beijing 100039, China)

**Abstract:** At present, there is a lack of researches on the coupling analysis of mechanical response and influencing factors of cable truss structures under the temperature effect. How to realize the continuous dynamic analysis of temperature effect on the mechanical properties of structures and give reasonable compensation measures has become a key to improving the working performance of large cable structures during their service period. In this paper, a cable truss structure is taken as the research object, its temperature response analysis method is proposed, and the coupling relationship of multiple influencing factors is studied. First, the acquisition mechanism of temperature effect condition and mechanical response is designed according to a test model of the cable truss. The measured value of cable

收稿日期: 2025-04-28; 修回日期: 2025-09-08.

作者简介: 史国梁 (1996—), 男, 博士研究生, guoliangshi@emails.bjut.edu.cn.

通信作者: 刘占省, lzs4216@163.com.

基金项目: 国家土建结构预制装配化工程技术研究中心资助项目 (2023CPCCE-K01); 国家自然科学基金资助项目 (52178095).

Supported by the National Engineering Technology Research Center for Prefabrication Construction in Civil Engineering (No. 2023CPCCE-K01), the National Natural Science Foundation of China (No. 52178095).

force is used as an index to evaluate the accuracy of a finite element simulation model. By modifying the structural design parameters, a high-fidelity finite element simulation model is built to obtain the mechanical response at various temperatures. Based on the simulation analysis, a reliable data set is established, and a temperature response prediction method based on convolutional neural network is proposed. The data mapping relationship between the temperature effect and mechanical response is established in the neural network to realize the continuous dynamic analysis. Based on the neural network, the most unfavorable temperature effect position and specific working conditions are obtained. Second, to further give the compensation measures under the temperature effect, the coupling analysis of influencing factors driven by random forest is carried out. On this basis, the parameter analysis of key factors is performed, and the specific response law is formulated. Results show that the calculation error of the established finite element simulation model is controlled within 3%, so that this model can accurately and effectively analyze the mechanical response under the temperature effect. The temperature response prediction method based on convolutional neural network realizes the continuous dynamic analysis of structural mechanical response, and the cost of analysis time is reduced by 27.8%. For this test model, the most unfavorable temperature effect condition is a continuous eight-span temperature rise of 37 °C. Appropriately increasing the prestress level is the best compensation measure to improve the working performance of the structure under the temperature effect.

**Keywords:** cable truss structure; temperature effect; mechanical response; influencing factor; compensation measure

索桁架结构充分利用拉索的高强性,通过调整结构预应力分布优化结构刚度<sup>[1-2]</sup>,具有承载性能好、跨越能力强、构造轻盈等诸多优点<sup>[3-4]</sup>,广泛应用于卡塔尔世界杯主场馆、石家庄国际会展中心屋盖等实际工程.此类结构形式中索构件是关键的受力构件,对温度作用具有较强的敏感性<sup>[5]</sup>.温度波动往往引起温度应力与结构变形,在极端温差条件下可能引发结构失稳或破坏<sup>[6]</sup>.因此,在温度作用下进行力学响应和影响因素耦合分析并给出合理的补偿措施意义重大.

针对诸如索穹顶、悬索桥等大跨度空间结构在温度变化下的响应特性,已展开了广泛而深入的研究.张爱林等<sup>[7]</sup>构建了大跨度索穹顶结构的分析模型,探讨在初始预应力与温度变化双重因素共同影响下变形及内力响应的具体规律.孙国军等<sup>[8]</sup>建立了索穹顶结构在火灾过程中的时间-温度场模型,得到了火灾温度场对力学性能的影响.范栋浩等<sup>[9]</sup>针对张弦梁结构建立了热力耦合数值分析模型,推导出各类温度场作用下结构挠度和构件应力的变化趋势.针对大跨度悬索桥结构,朱颖等<sup>[10]</sup>构建了描述不同时间周期温度效应与环境温度之间复杂关系的数学模型,进一步推导并提出了针对结构服役期间的有效维护策略.周毅等<sup>[11]</sup>系统研究了大跨度悬索桥在服役期间温度作用对结构变形的影响,并给出了温度响应的公式.张清允等<sup>[12]</sup>面向双向索桁架屋盖结构系统地揭示了温度作用及雨荷载作用下构件应力、索力和位移响应规律,并得到了各类构件对两类荷载的灵敏度,为结构服役期安全评估与维护提供了参考.

在结构力学响应分析领域特别是在温度作用下的相关研究中,诸多学者聚焦于特定结构形式,通过详尽的分析工作揭示了温度响应的具体表现规律,研究成果为工程实践提供了理论指导与实际应用价值,促进了结构设计与安全评估的精准性与可靠性.在智慧运维技术发展的背景下,如何实现连续动态分析温度作用对结构力学性能的影响并给出合理的补偿措施是亟待解决的问题.当前针对大型索结构的温度响应研究还存在以下问题:当前研究大多集中在索穹顶、悬索桥等大跨度空间结构,对索桁架结构的温度响应分析较少;传统的索结构温度响应计算存在收敛性差、效率低的问题,还需形成系统的力学响应连续动态分析方法,建立温度作用与力学响应的数据映射关系;面向温度作用下结构工作性能维护的研究较少,需进一步分析影响因素的重要程度,给出提高结构抗温度作用的补偿措施.

在实现结构力学响应连续动态分析和多因素关联分析方面,人工智能算法提供了有效的工具,并在索结构中得到了应用<sup>[13-15]</sup>.为了提高索结构施工计算的收敛性,Shi 等<sup>[16]</sup>通过改进长短时记忆算法,建立了拉索长度与结构标高之间的映射关系,在映射关系的驱动下,实现了索结构提升过程的精细化控制.在结构健康监测领域,Wang 等<sup>[17]</sup>融合了数字孪生与深度学习技术,提出了针对索穹顶结构损伤的智能化识别方法,凭借其高度的精准度与鲁棒性精确识别损伤的类型、位置及其程度,展现出深度学习卓越的性能.此外,卷积神经网络凭借其局部感知与权值共

享的特性,显著降低了参数规模,并实现了特征的高效提取,这一优势已在结构力学响应研究中得到了验证<sup>[18-19]</sup>。部分研究<sup>[20-21]</sup>还引入了随机森林算法,该算法在因素重要性评估方面表现出色,能够精确衡量各特征对预测结果的贡献度,从而有效识别出关键影响因素。卷积神经网络与随机森林这两类算法的应用,为本研究中温度响应预测及多因素关联分析提供了强有力的工具支持。

基于上述分析,本研究提出了面向索桁架结构的温度响应及因素耦合分析方法。根据索桁架试验模型,设计了温度作用工况和力学响应的采集机制。通过修正结构设计参数,建立了高保真的有限元仿真模型,获取了各类温度作用下的力学响应。提出了基于卷积神经网络的温度响应预测方法,建立了温度作用与力学响应之间的数据映射关系。基于神经网络,得到了最不利的温度作用位置和具体工况。将力学响应融入随机森林,进行影响因素的耦合分析,得到了关键因素的重要性程度。最后,进行最关键因素的参数分析,得到了具体的响应规律,为改善温度作用下结构工作性能提供了补偿措施。

## 1 试验模型

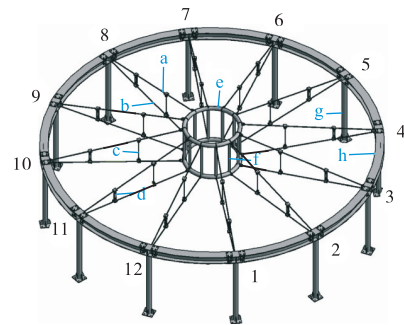
本研究以索桁架结构模型为研究对象,分析在温度作用下结构力学响应的表现规律。在试验过程中,重点分析在温度作用下拉索索力和节点位移的变化趋势。同时,以典型温度作用工况对应的力学响应实测值为依据,评估有限元仿真模型的保真性。

图 1 展示了本研究中采用的索桁架结构试验模型的详细配置。该模型跨度为 6 m,包含了 12 榀索桁架、内环梁(分为双层)以及外环梁、立柱,每个索桁架单元均设计为双层径向索系统,分别为上层径向索与下层径向索,该双层径向索通过内外两道撑杆实现连接,以确保结构的稳定性与承载能力。内环梁部分采用了双层设计,分为上层与下层,它们之间通过飞柱进行连接,以加强结构的整体性能。内环梁的半径设定为 0.50 m,飞柱的高度设定为 0.75 m,立柱高度设定为 1.50 m。结构体系中外环梁和立柱起到支撑作用,拉索构件是关键受拉构件。径向索的直径为 9 mm。拉索采用抗拉强度为 1 670 MPa 的密封索,其他构件采用 Q355。为了更符合工程实际,温度响应是在结构服役期正常荷载作用下进行的<sup>[22]</sup>。在试验过程中,为了实现温度的变化,选用功率为 2 000 W 的电炉用于温度控制,温度测量装置采用常用温度计。在每根径向索与外环梁的连接处设置拉力传感

器采集拉索索力。



(a) 温度作用



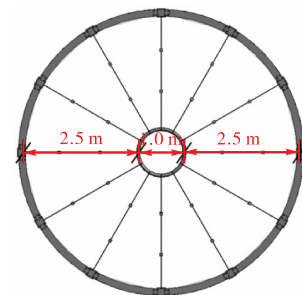
a—上径向索; b—下径向索; c—内撑杆; d—外撑杆; e—内环梁; f—飞柱; g—立柱; h—外环梁

(b) 内部构造

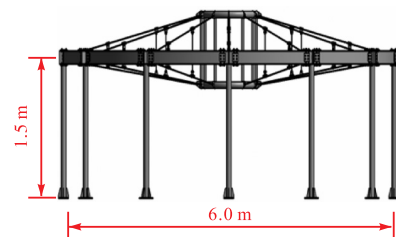
图 1 试验模型

Fig.1 Experimental model

针对本试验模型,在结构整体温度变化过程中获取拉索索力和节点位移的表现规律。为了进一步高效地获取在各类温度作用下结构的力学响应,建立了高保真有限元模型。结构的平面图和立面图如图 2 所示。在本研究中,模型的拉索构件采用了 Link10 单元进行数值模拟,撑杆部分则通过 Link8 单元进行



(a) 结构平面图



(b) 结构立面图

图 2 结构的平面图和立面图

Fig.2 Planar and elevation diagrams of structure

建模,其余的钢构件使用 Beam188 单元进行仿真.拉索构件的边界条件为三向铰接.为了提高有限元仿真模型的计算精度,对模型中的构件尺寸、预应力等参数进行修正.文献[23]具体阐述了参数修正过程,修正后的有限元模型主要参数见表 1,有限元仿真模型如图 3 所示.

表 1 修正后的模型参数

Tab.1 Parameters of revised model

参数	初始值	更新结果
上径向索预应力/N	15 000	14 953
下径向索预应力/N	15 000	15 012
上径向索截面积/mm <sup>2</sup>	63.6	64.1
下径向索截面积/mm <sup>2</sup>	63.6	63.2

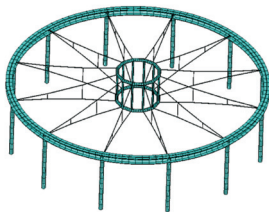


图 3 试验结构的有限元仿真模型

Fig.3 Finite element simulation model of experimental structure

在本试验研究中,设定了结构整体的温度变化范围为 0~30℃,并将此范围细分为以每 10℃为一个增量的若干温度点,其中 0℃被选定为温度响应的参考点.为了评估有限元仿真模型的保真性,在仿真模型中设置了同样的温度作用工况.图 4 对比了拉索

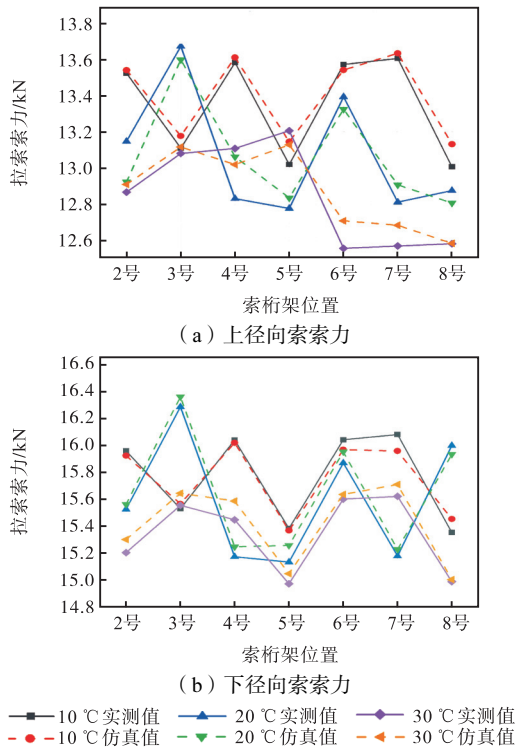


图 4 径向索索力仿真误差分析

Fig.4 Simulation error analysis of radial cable force

索力的温度响应情况.根据本试验结构的对称性,图 4 中对比了 2~8 号索桁架的力学响应.

图 4 中重点展示了拉索索力实测值与仿真值之间的关系.通过对比可以发现,拉索索力的仿真误差均控制在 3% 以内.可见,本研究所建立的有限元仿真模型可以精准有效计算温度作用下的力学响应.

## 2 温度作用对力学性能的影响

本研究依托于在第 1 节构建的有限元仿真模型,开展了多种温度作用条件下的力学响应分析.在此分析基础上,整理并构建了详尽的数据集,用以训练神经网络模型.通过神经网络架构,建立了温度作用与力学响应之间的数据映射关系,实现对结构响应的连续动态分析.基于数据关系,确定了最不利的温度作用工况.

### 2.1 拉索索力分析

根据结构的对称性,以 1 号上径向索和下径向索为分析对象,对比在不同温度作用下拉索索力的表现规律,如图 5 所示.在 0℃作用时,上径向索和下径向索的索力分别为 13.56 kN 和 15.98 kN.

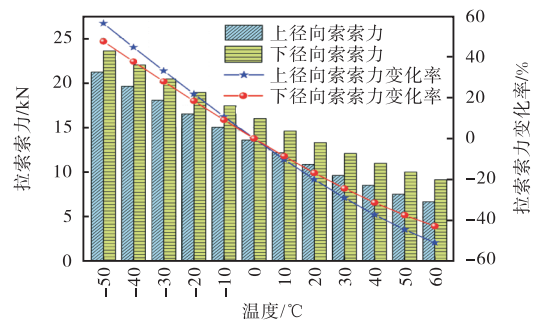


图 5 不同温度作用下拉索索力的表现

Fig.5 Performance of cable force at different temperatures

在温度作用发生变化的工况下,上径向索与下径向索的索力变化趋势呈现出相似的特征:在温度降低的过程中,上径向索索力变化率相较于下径向索索力变化率更为显著;在温度升高的过程中,下径向索索力变化率则超越了上径向索索力变化率.上述变化趋势与热胀冷缩原理相吻合,即温度升高导致预应力减小,温度降低则导致预应力增大.针对本试验所采用的索桁架结构,观察到在低温阶段拉索索力的变化表现得尤为突出.当温度达到-50℃时,上径向索和下径向索的索力分别增加 56.23% 和 47.36%.当温度达到 60℃时,上径向索和下径向索的索力分别下降 50.91% 和 42.85%.

预应力在索桁架结构的成形过程中扮演着至关重要的角色,并且对于结构抵抗外部荷载的能力具有决定性影响.鉴于此,针对实际工程项目中的张拉预应力设计环节,必须全面考虑工程所在地特定的气候条件以及温度作用对结构在正常使用阶段可能产生的效应.

## 2.2 节点位移分析

根据结构的对称性,以1号索桁架各个节点为分析对象,对比在不同温度作用下节点竖向位移的表现规律,如图6所示.在本研究中,向下的竖向位移记为负值.

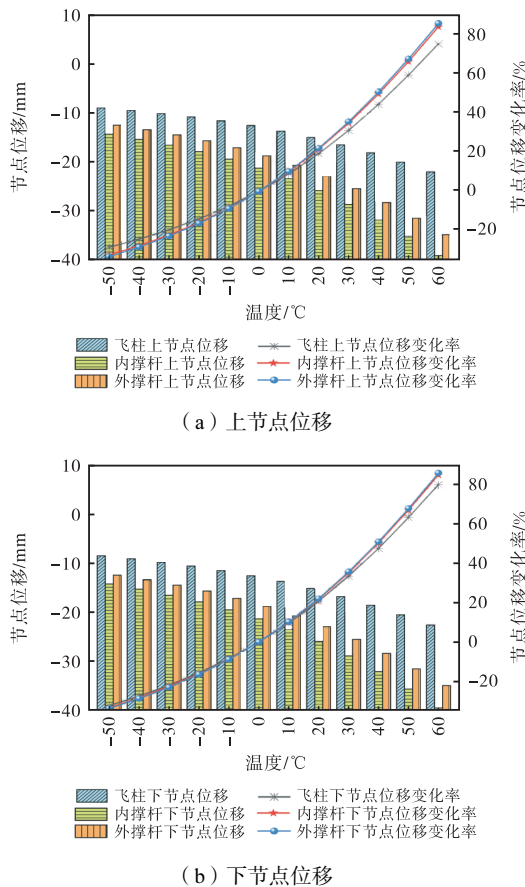


图6 不同温度作用下节点位移的表现规律

Fig.6 Performance law of node displacement at different temperatures

随着温度作用的变化,索桁架中上节点位移和下节点位移的变化趋势大致相同:在降温过程中,飞柱节点的位移变化率最大,内撑杆次之,外撑杆节点的位移变化率最小;在升温过程中,外撑杆节点的位移变化率居于首位,内撑杆节点次之,而飞柱节点的位移变化率相对最小.节点位移对温度的升高表现出更高的敏感性.当对结构施加升温作用时,随着温度的持续增加,结构的竖向位移愈发显著.具体而言,当结构温度达到60℃时,内撑杆节点的位移量达到

最大值,即-39.30 mm.值得注意的是,在温度仅升高至20℃时,内撑杆节点的位移已达到-25.83 mm,超过了结构跨度的1/250,显示出较大的位移响应.因此,针对索桁架等大跨度空间结构,在进行张拉成形时,合理选定张拉温度与预应力度显得尤为重要,以确保结构在服役期间能够维持优异的工作性能水平.

## 2.3 基于卷积神经网络的温度响应预测

为进一步实现在温度作用下力学响应的实时动态分析,本研究建立了高鲁棒性的卷积神经网络模型.基于有限元仿真模型获取各类温度作用下的力学响应并作为训练神经网络的数据集,获取最佳的参数.在神经网络中建立温度作用与力学响应之间的数据映射关系,并得到最不利的温度作用工况.在本试验模型中,每两榀索桁架之间的区域记为一跨.在神经网络中,以温度作用位置及程度作为输入参数,以索力、位移的最大变化率作为输出参数.通过给出温度作用下的力学响应为结构服役期的安全评估与维护提供可靠依据.

### 2.3.1 神经网络训练

根据有限元仿真模型得出的数据样本,训练卷积神经网络.在温度响应预测的过程中,考虑温度作用的位置及程度,得到结构的力学参数最大变化率.温度作用工况和力学响应之间的数据映射关系表述为

$$\begin{pmatrix} \mathcal{T}_{1,2}^{1,T} & \mathcal{T}_{2,3}^{1,T} & \cdots & \mathcal{T}_{12,1}^{1,T} \\ \mathcal{T}_{1,2}^{2,T} & \mathcal{T}_{2,3}^{2,T} & \cdots & \mathcal{T}_{12,1}^{2,T} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathcal{T}_{1,2}^{n,T} & \mathcal{T}_{2,3}^{n,T} & \cdots & \mathcal{T}_{12,1}^{n,T} \end{pmatrix} \xrightarrow{\text{输出}} \begin{pmatrix} \mathcal{F}_{\max}^1 & \mathcal{D}_{\max}^1 \\ \mathcal{F}_{\max}^2 & \mathcal{D}_{\max}^2 \\ \vdots & \vdots \\ \mathcal{F}_{\max}^n & \mathcal{D}_{\max}^n \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中的每一行代表一个样本数据.在输入元素中包含了温度的作用位置和程度,如 $\mathcal{T}_{1,2}^{1,T}$ 表示第1个样本中,1号和2号索桁架之间区域的施加的温度为 $T$ ,温度施加在该区域中的上、下径向拉索及撑杆.为了进一步细化区域得到最不利的温度作用位置,如图7所示,根据撑杆的位置将每两榀索桁架之间的区域划分为3个子区域(内侧、中间和外侧).在神经网络中,具体的温度作用( $T$ )可以由包含6位有效数字的数组表示.如30.2010则表示内侧升温30℃,中间升温20℃,外侧升温10℃.在本研究中每一个温度作用工况不同区域同时施加不同的温度作用,考察力学响应的变化情况,得到最不利的温度作用工况.中间位置的温度作用取两侧的最高温度值.神经网络的输出值为拉索索力和节点位移的最大变化率,分别表示为 $\mathcal{F}_{\max}^n$ 和 $\mathcal{D}_{\max}^n$ .在训练神经网络过程中,输出值均为力学响应的变化率,数据量纲一致,不存在因数

据格式不同而导致神经网络参数变化的问题. 因此, 对索力和位移变化率的预测模型可以选用同一组神经网络的参数.

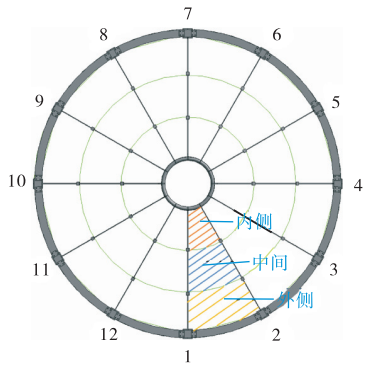


图 7 温度作用子区域划分

Fig.7 Sub-region division under temperature effect

采用式(1)建立的数据样本形式训练卷积神经网络, 建立温度作用工况与力学响应之间的映射关系, 如图 8 所示.

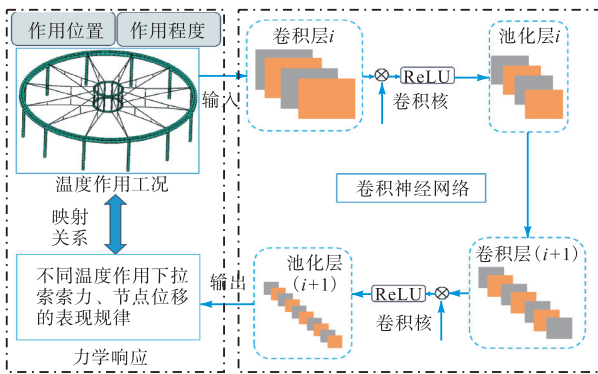


图 8 基于卷积神经网络的力学响应预测模型

Fig.8 Mechanical response prediction model based on convolutional neural network

温度作用数据卷积计算为

$$y_t = \sum_{k=1}^K w_k x_{t-k+1} \quad (2)$$

式中:  $y_t$  为卷积后输出向量的第  $t$  个元素;  $w_k$  为卷积核的第  $k$  个元素;  $x_{t-k+1}$  为输入向量的第  $(t-k+1)$  个元素;  $K$  为卷积核长度. 激活函数为

$$a_t = f(y_t) \quad (3)$$

式中  $a_t$  为激活层的第  $t$  个元素. 为了更好地拟合输入与输出元素之间的映射关系, 本研究选择 ReLU 函数作为神经网络激活函数. 池化层的计算式为

$$Z_t = g(a_{t1}, a_{t2}, L, a_{tm}) \quad (4)$$

式中:  $Z_t$  为池化层的第  $t$  个元素;  $a_{t1}$ 、 $a_{t2}$ 、 $L$  和  $a_{tm}$  为卷积层的连续元素;  $g$  选择最大池化函数, 对卷积激活后的力学响应数据进行加速计算.

在训练神经网络模型过程中, 以有限元分析结果

作为评判神经网络预测精度的标准, 分别改变模型中的学习率和迭代次数取值情况, 计算预测精度, 如图 9 所示. 经过对比分析, 发现在学习率相对较高且迭代次数相对较低的情况下, 预测精度随着这两个参数的调整而显著提升, 这表明在此参数范围内模型对参数的敏感性较强. 然而, 当学习率和迭代次数增加到某一临界值时, 预测精度的提升趋于平缓, 即随着这些参数的进一步调整, 预测精度的变化不再显著. 此外, 随着迭代次数的增加, 虽然模型性能略有提升, 但相应的计算成本显著增加. 因此, 在平衡计算效率和预测精度的基础上, 确定了神经网络模型中的最优参数组合, 即学习率设定为 0.001 0, 迭代次数设定为 1 800. 在此最优参数配置下, 神经网络模型能够最精确地预测力学性能. 基于参数优化的神经网络, 建立了温度作用工况与力学响应之间的映射关系, 为深入揭示结构在不同温度作用下的力学行为提供了工具. 神经网络可以实现温度荷载工况的批量化计算, 本研究对比了相同数量的工况, 发现相较于有限元仿真模型, 基于神经网络的计算时间成本降低了 27.8%, 预测精度在 95% 以上. 以节点位移最大变化率为考察对象, 基于神经网络部分测试集的分析结果如图 10 所示. 图 10 中以有限元模型的分析值作为评判神经网络预测精度的标准. 图 10 说明有限元模型

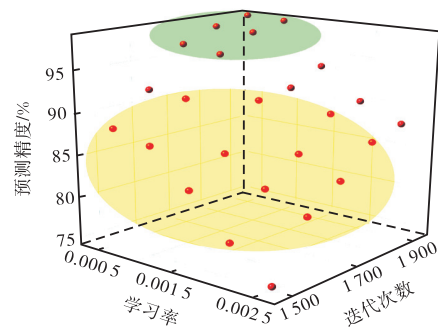


图 9 神经网络参数优化过程

Fig.9 Optimization process of neural network parameters

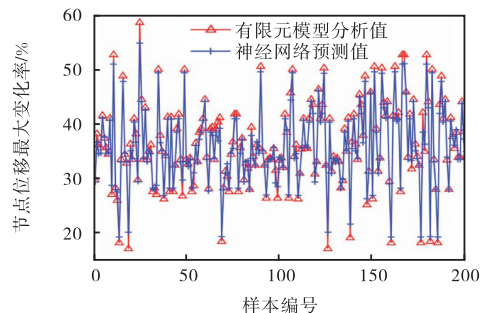


图 10 基于神经网络的温度响应预测

Fig.10 Temperature response prediction based on neural network

可精准表征结构的真实受力状态,因此神经网络的预测结果可有效反映温度作用下结构的实际力学响应.

2.3.2 最不利温度作用工况分析

在训练完成的神经网络中可以精准输出温度作用下的力学响应.在本节中,基于神经网络获取最不利的温度作用工况:一方面,对比单一区域温度响应,得到最敏感的作用位置;另一方面,综合考虑温度作用程度和位置,得到引起结构变形超限的最不利工况.

针对单一位置施加正温度作用,考察结构力学响应的表现规律.在1号和2号索桁架之间,根据第2.3.1节中的位置编码规则,分别在内侧、中间和外侧3个位置施加温度作用.不同温度作用下节点位移和拉索索力的最大变化率如图11所示.

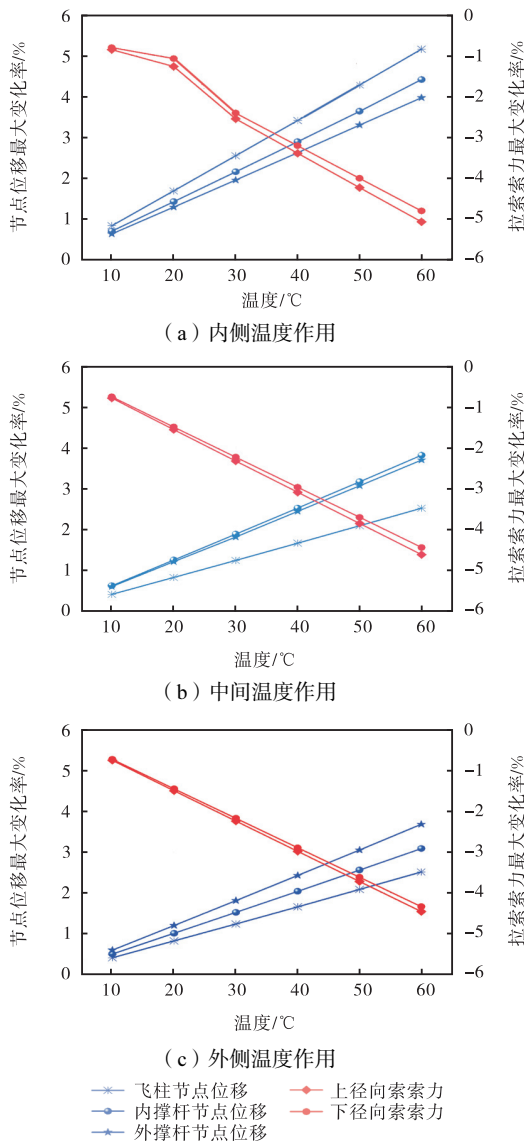


图 11 不同位置温度作用下节点位移和索力的最大变化率  
 Fig.11 Maximum change rate of node displacement and cable force under temperature effect at different positions

根据图 11 对比可以发现,温度作用于靠近内环的位置对结构力学性能的影响最大.温度作用于中间和靠近外环的位置对结构力学性能的影响相似.因此,最不利的温度作用位置为靠近内环的位置,即图 7 中的内侧.在内侧升温过程中,越靠近升温位置,节点位移的变化率最大.上径向索索力变化率高于下径向索的索力变化率.因此,在结构服役期应重点关注内环位置的温度变化情况.

在获取最不利的温度作用位置基础上,综合考虑温度的作用程度,进一步获取最不利的温度作用工况.在温度作用位置较少的情况下,节点位移超限对应的最低温度作用程度即为最不利的工况.通过在神经网络中设置每两榀索桁架之间的内侧区域的不同程度温度作用,获取节点位移的最大变化率.根据《索结构技术规程》<sup>[24]</sup>,当最大节点位移超过跨度的 1/250 即 24 mm 时,结构达到正常使用极限状态.通过对比,可以发现连续区域的温度作用对结构力学性能的影响最大.结构达到正常使用极限状态时,温度作用工况和力学响应见表 2.

表 2 结构达到正常使用极限状态时温度作用工况和力学响应

Tab.2 Temperature working condition and mechanical response when the structure reaches its limit state of normal use

作用位置	升温幅度/°C	最大节点位移/mm	作用位置	升温幅度/°C	最大节点位移/mm
连续 4 跨	60	-24.08	连续 9 跨	35	-24.03
连续 5 跨	55	-24.12	连续 10 跨	32	-24.11
连续 6 跨	48	-24.01	连续 11 跨	29	-24.01
连续 7 跨	42	-24.00	连续 12 跨	28	-24.00
连续 8 跨	37	-24.05			

通过对比可以发现,温度作用位置最少为连续 4 跨,当升温幅度为 60 °C 时,结构达到正常使用极限状态.如果温度作用于满跨,当升温幅度为 28 °C 时,结构达到正常使用极限状态.随着温度作用的位置增加,结构达到正常使用极限状态所对应的升温幅度变化率减缓.综合考虑温度的作用位置和升温幅度,本研究的索桁架试验模型最不利的温度作用工况为连续 8 跨升温 37 °C.在该温度作用工况下,拉索索力和节点位移最大变化率均发生于没有温度作用区域的中间榀索桁架.

3 温度响应下多因素关联分析

根据第 2 节的分析,为了得到温度作用下保证结构工作性能的补偿措施,本节进行多因素的关联分

析. 根据结构力学响应对基本参数的灵敏度, 可以得到最关键的影响因素. 针对最不利的温度作用工况, 对关键因素进行参数化分析, 可以得到最有效的结构安全补偿措施.

### 3.1 多类因素对温度响应的影响

根据文献[25-26], 本研究选取预应力水平、拉索截面尺寸、索桁架榫数和撑杆根数共 4 类影响因素作为分析对象. 在第 2.3.2 节分析得出最不利温度作用工况的基础上, 同等程度改变这 4 类影响因素, 以获取力学响应的表现规律. 根据力学响应和影响因素的关系, 可以得到各类因素的重要程度.

在多因素分析中, 以结构的力学响应作为评判指标, 并与随机森林融合. 针对节点竖向位移的变化率, 建立影响因素与力学响应的耦合关系. 具体而言, 改变 4 类影响因素的数值, 在最不利温度作用工况下得到节点竖向位移的变化率的表现情况.

在多类因素对温度响应的影响分析过程中, 以各影响因素作为输入元素, 以节点位移变化率的等级作为输出元素. 样本的获取可以表述为

$$(P, S, N, M) \xrightarrow[\text{分类}]{\text{影响}} \langle \mu_{\max} \| A, B, C, D \rangle \quad (5)$$

式中:  $P$ 、 $S$ 、 $N$  和  $M$  分别为预应力水平、拉索截面尺寸、索桁架榫数和撑杆根数;  $A$ 、 $B$ 、 $C$  和  $D$  为输出节点位移最大变化率 ( $\mu_{\max}$ ) 的等级. 以此作为数据样本带入随机森林, 根据等级分类精准捕捉各类影响因素的重要性程度. 通过模型分析得到各类因素的重要性程度, 如图 12 所示.

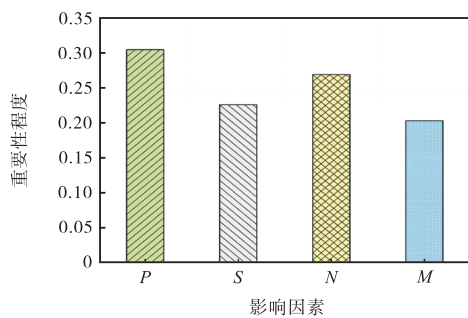


图 12 各类影响因素对力学响应的重要性程度

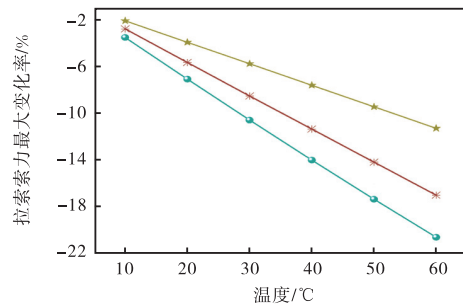
Fig.12 Importance degrees of various influencing factors with respect to mechanical response

由图 12 可直观判断影响结构力学性能变化的关键因素, 可以发现预应力水平对温度作用下节点位移的重要性程度最大.

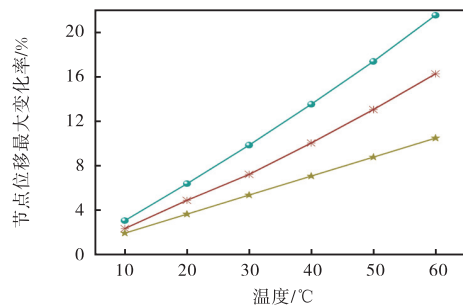
### 3.2 预应力水平对温度响应的影响

通过改变初始预应力水平, 可以得到结构工作性

能的变化规律, 辅助给出最佳的温度响应补偿措施. 在初始预应力水平参数分析过程中, 以 0 °C 的温度响应作为参考, 设计的初始预应力水平为  $P_0$ , 分别考虑  $1.0P_0$ 、 $1.5P_0$  和  $2.0P_0$  共 3 种预应力水平. 在结构其他参数不变的情况下, 分析连续 8 跨索桁架内侧 0 ~ 60 °C 温度作用下拉索索力和节点位移的最大变化率响应, 如图 13 所示.



(a) 预应力水平对拉索索力的影响



(b) 预应力水平对节点位移的影响

—●— 1.0P<sub>0</sub> —\*— 1.5P<sub>0</sub> —▲— 2.0P<sub>0</sub>

图 13 预应力水平对温度响应的影响

Fig.13 Effects of prestress level on temperature response

预应力水平的增加削弱了温度对力学性能的影响. 对比预应力水平由  $1.0P_0$  依次增加至  $1.5P_0$  和  $2.0P_0$ , 在升温 10 °C 工况中, 随着预应力水平的增加, 节点位移最大变化率依次减少 0.41% 和 0.71%, 拉索索力最大变化率依次减少 0.69% 和 0.74%. 在升温 60 °C 工况中, 随着预应力水平的增加, 节点位移最大变化率依次减少 5.23% 和 5.74%, 拉索索力最大变化率依次减少 3.57% 和 5.69%. 提升索构件的初始预应力是增强构件内力最为直接的方法之一, 同时其能有效增强结构的整体刚度. 通过对比可以发现, 温度作用程度越大, 提高预应力水平的补偿作用越明显. 本研究通过分析预应力水平对温度响应的作用机制, 发现适当提高预应力水平可以确保索构件具备充足的预应力储备, 以有效补偿由温度变化引发的预应力损失, 进而有效抑制结构变形. 在试验模型中每根径向索与外环梁连接处均设置了调节套筒, 通过转动调节

套筒补偿预应力。值得注意的是,预应力水平的过度提升亦会加剧索构件的受力负担。因此,在确保结构正常使用的前提下,适度增加预应力水平成为一种可行的策略,其不仅能够优化结构的静力性能,还能有效降低结构对温度波动的敏感性。此外,在预应力水平参数分析的基础上,还需进一步建立神经网络数学模型得到预应力水平与温度作用下力学响应之间的映射关系,精准给出维护策略。一方面,可以补偿温度作用的影响,改善结构的正常工作性能;另一方面,可以保证结构设计的合理性和施工的可行性。基于式(1)建立的数据映射关系,还应将结构的基本参数(见式(5))融合,以得到不同结构类型和温度作用工况下的力学响应,见式(6)。同时,可以在神经网络中调整基本参数(如预应力水平)的取值以高效得到补偿措施。

$$\left( \begin{array}{cccc|cccc} P_1 & S_1 & N_1 & M_1 & \mathcal{T}_{1,2}^{1,T} & \mathcal{T}_{2,3}^{1,T} & \dots & \mathcal{T}_{12,1}^{1,T} \\ P_2 & S_2 & N_2 & M_2 & \mathcal{T}_{1,2}^{2,T} & \mathcal{T}_{2,3}^{2,T} & \dots & \mathcal{T}_{12,1}^{2,T} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ P_n & S_n & N_n & M_n & \mathcal{T}_{1,2}^{n,T} & \mathcal{T}_{2,3}^{n,T} & \dots & \mathcal{T}_{12,1}^{n,T} \end{array} \right) \xrightarrow{\text{输出}} \left( \begin{array}{cc} \mathcal{F}_{\max}^{1*} & \mathcal{D}_{\max}^{1*} \\ \mathcal{F}_{\max}^{2*} & \mathcal{D}_{\max}^{2*} \\ \vdots & \vdots \\ \mathcal{F}_{\max}^{n*} & \mathcal{D}_{\max}^{n*} \end{array} \right) \quad (6)$$

式中:每一行代表一个数据样本; $P_1$ 、 $S_1$ 、 $N_1$ 和 $M_1$ 分别为第1个样本中的预应力水平、拉索截面尺寸、索桁架榫数和撑杆根数的取值; $\mathcal{F}_{\max}^{1*}$ 和 $\mathcal{D}_{\max}^{1*}$ 分别为融合基本参数后温度作用下拉索索力和节点位移的最大变化率。

## 4 结论

为了高效分析索桁架结构在温度作用下的力学响应并给出合理的补偿措施,本研究从仿真建模、神经网络预测和因素关联分析等方面系统地提出了温度响应研究方法。以索桁架结构为研究对象,设计了试验模型。在此基础上,建立了数值仿真模型,提出了基于卷积神经网络的温度响应预测。为了得到在温度作用下保证结构工作性能的补偿措施,进行了随机森林驱动的影响因素的耦合分析。本研究得到了以下结论。

(1) 面向索桁架试验模型,形成了温度作用下力学性能的采集机制。力学响应的实测值为仿真模型提供了精度评判依据。通过修正结构的设计参数,建立了表征温度响应的有限元数值仿真模型。该模型

可以精准映射结构的真实状态,计算误差在3%以内。仿真分析可以降低试验操作成本。

(2) 在有限元仿真模型中进行了各类温度作用下的力学响应分析,得到了索力和位移的响应规律。在仿真分析的基础上建立了可靠的数据集,进一步提出了基于卷积神经网络的温度响应预测方法。在神经网络中建立了温度作用与力学响应之间的数据映射关系,实现了连续动态分析,节省了27.8%的计算成本。充分考虑温度的作用位置和程度,得到最不利的温度作用位置为靠近内环的位置,连续8跨升温37℃为最不利的温度作用工况。

(3) 为了得到温度作用下保证结构工作性能的补偿措施,进行了随机森林驱动的多因素关联分析。根据结构力学响应对基本参数的灵敏度,得出预应力水平是最关键的影响因素。适当提高预应力水平是改善温度作用下结构的工作性能的最佳补偿措施。针对最不利的温度作用工况,对预应力水平进行了参数化分析,得到了预应力水平对温度响应的影响规律。

## 参考文献:

- [1] 陈联盟,黄奔程,曾一洪,等. Geiger型索穹顶冲击动力响应与失效机理研究[J]. 振动与冲击, 2024, 43(18): 145-154.  
Chen Lianmeng, Huang Bencheng, Zeng Yihong, et al. Dynamic response and failure mechanism of Geiger cable dome structures under impact load[J]. Journal of Vibration and Shock, 2024, 43(18): 145-154 (in Chinese).
- [2] 杨佳奇,武岳,周光毅,等. 轮辐式斜交型索结构的几何构型与预应力态分析[J]. 土木工程学报, 2024, 57(12): 30-42.  
Yang Jiaqi, Wu Yue, Zhou Guangyi, et al. Analysis of geometric configuration and prestressed state of wheel-spoke crossed cable structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2024, 57(12): 30-42 (in Chinese).
- [3] 张宁远,罗斌,赵昱昱,等. 大开口刚性内拉环索穹顶结构成形关键技术研究与应用[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(4): 150-157, 215.  
Zhang Ningyuan, Luo Bin, Zhao Minmin, et al. Research and application of key technology for formation of cable dome with a large-opening rigid inner tension ring[J]. Journal of Building Structures, 2023, 44(4): 150-157, 215 (in Chinese).
- [4] 姜正荣,苏延,石开荣,等. 基于阶段生长 PGSA

- 的索穹顶结构预应力优化[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2022, 50(11): 133-140, 154.
- Jiang Zhengrong, Su Yan, Shi Kairong, et al. Prestress optimization of cable domes with plant growth simulation algorithm based on stage growth[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2022, 50(11): 133-140, 154(in Chinese).
- [5] 刘占省, 史国梁, 杜修力, 等. 数字孪生驱动的预应力钢结构安全智能控制方法[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2023, 56(10): 1043-1053.
- Liu Zhansheng, Shi Guoliang, Du Xiuli, et al. Intelligent safety control method of prestressed steel structure driven by digital twins[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2023, 56(10): 1043-1053 (in Chinese).
- [6] Lü H, Zeng J M, Zhu Z Y, et al. Study on prestress distribution and structural performance of heptagonal six-five-strut alternated cable dome with inner hole[J]. Structures, 2024, 65: 106724.
- [7] 张爱林, 刘学春, 冯 珊, 等. 大跨度索穹顶结构温度响应分析[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(4): 40-45.
- Zhang Ailin, Liu Xuechun, Feng Shan, et al. Temperature response analysis of large-span cable dome structure[J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(4): 40-45 (in Chinese).
- [8] 孙国军, 陶 冶, 薛素铎. 基于不同时间-温度场模型的索穹顶火灾响应分析[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2016, 49(增 1): 88-96.
- Sun Guojun, Tao Ye, Xue Suduo. Analysis of fire response for cable dome based on different time-temperature field models[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2016, 49(Suppl 1): 88-96 (in Chinese).
- [9] 范栋浩, 杜 咏, 盛红梅. 高温下张弦梁结构力学特征解析解[J]. 工程力学, 2016, 33(4): 195-204.
- Fan Donghao, Du Yong, Sheng Hongmei. Mathematical calculations for the characteristics of beam string structure in fire[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(4): 195-204 (in Chinese).
- [10] 朱 颖, 郭 辉, 孙大奇, 等. 运营期公铁两用悬索桥温度效应研究[J]. 铁道学报, 2024, 46(6): 156-166.
- Zhu Ying, Guo Hui, Sun Daqi, et al. Investigation on temperature-induced effect on rail-cum-road suspension bridge during service life[J]. Journal of the China Railway Society, 2024, 46(6): 156-166 (in Chinese).
- [11] 周 毅, 陈 波, 夏 勇. 大跨度悬索桥温度变形监测与分析[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2022, 50(8): 117-123.
- Zhou Yi, Chen Bo, Xia Yong. Monitoring and analysis of thermal deformation in long-span suspension bridges[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022, 50(8): 117-123 (in Chinese).
- [12] 张清允, 陈志华, 刘红波. 服役期双向索桁架屋盖结构性能监测与分析[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2021, 54(8): 807-815.
- Zhang Qingyun, Chen Zhihua, Liu Hongbo. Monitoring and analysis of bidirectional cable truss structural characteristics during a service period[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2021, 54(8): 807-815 (in Chinese).
- [13] Liu H B, Zhang F, Ma R, et al. Intelligent noncontact structural displacement detection method based on computer vision and deep learning[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2024, 150(10): 04024127.
- [14] Wang L X, Liu H B, Zhang F, et al. Intelligent prediction approach of spatial structure response and performance deterioration by integrating spatiotemporal deep learning and digital twins[J]. Engineering Structures, 2025, 324: 119367.
- [15] 陆廷杰, 刘东海, 齐志龙. 基于深度学习的水下钢结构锈蚀识别与评价[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2023, 56(7): 713-722.
- Lu Tingjie, Liu Donghai, Qi Zhilong. Corrosion recognition and evaluation of underwater steel structures based on deep learning[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2023, 56(7): 713-722 (in Chinese).
- [16] Shi G L, Liu Z S, Lu D C, et al. Digital twin method for intelligent lifting of cable structures under multi-collaborative mode[J]. Thin-Walled Structures, 2024, 205: 112380.
- [17] Wang L X, Liu H B, Chen Z H, et al. Combined digital twin and hierarchical deep learning approach for intelligent damage identification in cable dome structure[J]. Engineering Structures, 2023, 274: 115172.
- [18] Shirazi M I, Khatir S, Boutchicha D, et al. Feature extraction and classification of multiple cracks from raw vibrational responses of composite beams using 1D-CNN

- network[J]. *Composite Structures*, 2024, 327:117701.
- [19] Hoq E, Aljarrah O, Li J, et al. Data-driven methods for stress field predictions in random heterogeneous materials[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2023, 123: 106267.
- [20] 罗维平, 袁大军, 金大龙, 等. 基于随机森林的复合地层盾构切口泥水压力预测与分析[J]. *土木工程学报*, 2020, 53(增1): 43-49.
- Luo Weiping, Yuan Dajun, Jin Dalong, et al. Prediction and analysis of slurry pressure at the shield cut in composite strata based on random forest[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2020, 53(Suppl 1): 43-49(in Chinese).
- [21] 张帆, 马庆国, 王子玉, 等. 柴油机 Wiebe 模型参数优化及燃烧性能预测[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2024, 57(5): 473-481.
- Zhang Fan, Ma Qingguo, Wang Ziyu, et al. Parameter optimization and combustion performance prediction of diese engine-based Wiebe model[J]. *Journal of Tianjin University(Science and Technology)*, 2024, 57(5): 473-481(in Chinese).
- [22] GB 50009—2012 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- GB 50009—2012 Load Code for the Design of Building Structures[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012(in Chinese).
- [23] Shi G L, Liu Z S, Lu D C, et al. Digital twin-based model updating method for mechanical behaviors analysis of cable truss structure[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2024, 221: 108917.
- [24] JGJ 257—2012 索结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- JGJ 257—2012 Technical Specification for Cable Structures[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012(in Chinese).
- [25] 胡宗羽, 王俊, 赵基达. 轮辐式交叉索结构构形研究及其预应力态分析[J]. *土木工程学报*, 2017, 50(9): 8-15.
- Hu Zongyu, Wang Jun, Zhao Jida. Study on structural types and prestressing force distribution of wheel-spoke crossed cable structures[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2017, 50(9): 8-15(in Chinese).
- [26] 史国梁, 刘占省, 路德春, 等. 索桁架结构施工误差评估的孪生仿真与模型试验[J]. *建筑结构学报*, 2024, 45(4): 107-119.
- Shi Guoliang, Liu Zhansheng, Lu Dechun, et al. Twinning simulation and model test for construction error assessment of cable truss structures[J]. *Journal of Building Structures*, 2024, 45(4): 107-119(in Chinese).

(责任编辑:武立有)