

DOI:10.11784/tdxbz202406011

基于数字孪生的索膜结构构件失效机制研究

刘占省^{1,2}, 史国梁^{1,2}, 王泽强^{3,4}, 赵一峰⁴, 贾玮寒¹

(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. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072; 4. 北京市建筑工程研究院有限责任公司, 北京 100039)

摘要: 索膜结构在运维过程中容易受到风荷载、温度等外界环境因素的影响, 导致节点松动、构件失效进而严重影响了结构的安全性能。如何实现结构服役期安全状态的精准仿真, 有效提高结构的抗倒塌性能, 同时降低健康监测的成本是实现索膜结构智慧运维所面临的关键问题。本文提出了基于数字孪生的索膜结构构件失效机制分析方法。首先从几何和物理两个层面修正虚拟模型, 形成高保真的数字孪生模型的建立方法, 从而高效精准地映射结构受力状态。其次, 在孪生模型的基础上, 给出构件失效前后力学响应的分析流程。在孪生模型中设置构件失效工况, 获取结构的力学响应规律。根据失效前后结构力学性能的变化情况, 计算构件重要性系数, 捕捉关键受力构件。在关键构件失效后分析结构内力分布情况, 得到结构倒塌前的传力机理。以长春东收费罩棚索膜结构为研究对象进行方法应用, 验证了理论方法的可行性。案例应用结果表明: 所建立的孪生模型可以有效仿真结构的受力状态, 计算误差在 3% 以内; 通过分析各类构件失效后的结构力学性能得到了力学响应表现规律和关键受力构件; 基于关键受力构件失效前后的力学响应, 建立了传力机理, 获取了内力传递路径, 明确了结构健康监测对象。本研究为制定结构安全的智慧运维策略和提高结构抗倒塌性能提供了可靠支撑。

关键词: 索膜结构; 数字孪生; 构件失效; 力学响应; 传力机理

中图分类号: TU393.3

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2025)04-0357-11

Research on Failure Mechanism of Components in Cable-Membrane Structure Based on Digital Twin

Liu Zhansheng^{1,2}, Shi Guoliang^{1,2}, Wang Zeqiang^{3,4}, Zhao Yifeng⁴, Jia Weihang¹

(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. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

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

Abstract: The cable-membrane structure is easily affected by factors in the external environment such as wind load and temperature during its operation and maintenance process, which leads to the relaxation of joints and the failure of components and thus seriously affects its safety performance. Therefore, how to realize an accurate simulation of its safety state during its service period and effectively improve its collapse resistance performance while reducing the cost of health monitoring is a key problem that the intelligent operation and maintenance of the cable-membrane structure faces. In this paper, a failure mechanism analysis method for the components in a cable-membrane structure based on digital twin was proposed. First, the virtual model was modified at the geometric and physical levels to form a high-fidelity digital twin model, so as to efficiently and accurately map the stress state of the structure. Then,

收稿日期: 2024-06-03; 修回日期: 2024-08-29.

作者简介: 刘占省(1983—), 男, 博士, 教授, lzs4216@163.com.

通信作者: 王泽强, wzeq7902@sina.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52178095); 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).

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

based on the twin model, the analysis process of mechanical response before and after the component failure was given. The component failure condition was set in the twin model to obtain the mechanical response law of the structure. According to the changes in structural mechanical properties before and after the failure, the importance coefficient of components was calculated to capture the key stressed components. After the failure of key components, the internal force distribution in the structure was analyzed, and the force transfer mechanism before the collapse of the structure was obtained. The cable-membrane structure of Changchun East Toll Shed was taken as a research object, and the feasibility of the proposed theoretical method was verified. The application results of the case study show that the established twin model can effectively simulate the stress state of the structure, with a calculation error less than 3%. Through the analysis of the structural mechanical properties after the failure of various components, the mechanical response performance law and key stressed components were obtained. Based on the mechanical response of key stressed components before and after the failure, the force transfer mechanism was established, the internal force transfer path was obtained, and the structural health monitoring object was clarified. The proposed method provides a reliable support for the formulation of intelligent operation and maintenance strategies for structural safety and the improvement in structures' collapse resistance performance.

Keywords: cable-membrane structure; digital twin; component failure; mechanical response; force transfer mechanism

大型公共建筑使用空间结构、预应力结构等形式^[1-2], 此类结构在服役期对风荷载、温度作用等外界环境因素较为敏感, 容易产生节点松弛、构件失效等现象, 严重地影响了结构的正常使用和承载力^[3]. 近年来因构件失效导致结构倒塌事故^[4]频繁发生, 严重威胁了人员的生命财产安全. 因此, 如何实现结构服役期安全状态的精准仿真, 有效提高结构的抗倒塌性能, 同时降低健康监测的成本, 成为制约索膜结构智慧运维的瓶颈^[5].

当前的研究大都利用有限元仿真和试验验证的方法分析构件失效对结构力学性能的影响^[6]. 邓满宇等^[7]分析了节点变形失效、钢索松弛失效和构件强度失效 3 种失效模式对结构安全性能的影响, 并得到了相应的可靠度限值. 惠卓等^[8]和张微敬等^[9]通过有限元和试验模拟对 Geiger 型穹顶结构进行了抗倒塌性能分析, 并对提高结构安全性能提出了参考建议. Bojórquez 等^[10]利用蒙特卡罗模拟技术和腐蚀的随机建模方法评估了腐蚀对钢筋混凝土建筑结构可靠性的影响, 该研究明确了腐蚀在结构失效中起到了重要作用, 是结构可靠性设计必须考虑的因素. Lu 等^[11]通过实验和数值模拟研究了 6 m 跨度的平面桁架弦结构的失效机理, 分析了不同类型的拉索断裂对结构可靠性的影响. Vaezzadeh 等^[12]通过试验分析获取了索网结构的连续性倒塌模式, 结果表明影响索网结构倒塌的最大因素是约束失效. Ozer 等^[13]通过建立桥梁的有限元模型进行结构的模态分析, 通过对比结构的频率和阵型变化判断可靠性.

上述研究针对特定结构进行了构件失效后的力

学性能分析, 并给出了结构安全维护建议. 然而, 传统的有限元计算方法存在着精度不足的问题, 不能有效映射结构的真实状态^[14], 且构件失效的试验存在安全隐患. 同时, 当前对构件失效后的传力机理研究较少, 没有明确关键受力构件, 不利于维护策略的制定. 智慧建筑和智慧运维的快速发展对结构的承载能力提出了新的要求^[15]. 在该背景下, 如何提高建筑结构抗倒塌能力并降低健康监测的成本是关键问题^[16]. 因此, 亟需建立高保真的仿真模型, 实现对构件失效后的力学性能分析.

数字孪生技术在结构健康监测方面起到了虚实交互映射和时空演化分析的作用^[17]. 数字孪生技术实现了结构实体与虚拟模型之间的交互映射. 建立结构的孪生模型为构件失效机制分析提供了有力的工具^[18].

Wang 等^[19]将数字孪生与深度学习融合, 提出了索穹顶结构损伤智能识别方法, 该方法能够智能识别损伤类型、损伤位置和损伤程度, 且具有较高的精度和较强的鲁棒性. Ritto 等^[20]在孪生理念下探索了基于有限元模型与机器学习的集成方法, 实现了工程实际与虚拟模型的有效融合, 为结构的安全控制提供了可靠的决策. Zhu 等^[21]提出了基于数字孪生的大坝安全评估方法, 实现了大坝状态的自动化和高效监测. Liu 等^[22]提出了基于数字孪生的预应力钢结构安全智能评估方法, 保证了结构的安全等级并提高了结构运维安全评估的智能化水平.

基于上述分析, 本研究提出了基于数字孪生的索膜结构构件失效机制分析方法. 首先, 从几何和物理

两个层面修正虚拟模型,形成高保真的数字孪生模型的建立方法,提高有限元模型的仿真精度.一方面由坐标的对比修正几何模型,另一方面基于遗传算法优化构件参数修正物理模型.其次,在孪生模型的基础上,给出构件失效后力学响应的分析流程.在孪生模型中设置构件失效工况,获取结构的力学响应规律.根据失效前后结构力学参数的变化情况,计算构件重要性系数,捕捉关键受力构件,明确结构健康监测的对象,降低运维成本.在关键构件失效后分析结构内力分布情况,得到结构倒塌前的传力机理,辅助制定维护策略提高结构的抗倒塌性能.以长春东收费罩棚索膜结构为研究对象进行方法应用,验证了理论方法的可行性.

1 结构孪生建模方法

索膜结构在长期服役阶段,受到温度、风荷载等因素的干扰,索构件容易产生失效现象,严重影响了结构的安全性能^[23].目前,对构件失效机制的研究大多借助于有限元建模方法进行仿真模拟,但是存在精度低的问题^[24-25].本研究在孪生建模过程中,考察自重条件下结构的受力性能.根据自重条件下结构实测力学性能与仿真的力学性能之间的差距修正基本参数,建立高保真的孪生模型.在实际监测过程中,风荷载和温度变化均很小.在结构服役期,根据实际环境因素,通过孪生模型,可以分析风荷载、温度等因素作用下的受力性能.本研究提出了在几何和物理两个层面修正有限元模型形成数字孪生模型的建立方法.孪生模型的建立可以精准映射结构的真实状态.在孪生模型中通过设置构件的失效可以获取结构力学性能的表现规律,辅助建筑运维策略的输出,保证结构的正常使用性能.孪生模型的建立过程如图 1 所示.

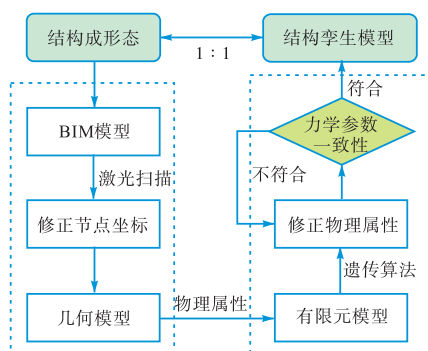


图 1 孪生模型的建立过程

Fig.1 Establishment process of twin model

在预应力结构的施工过程中,通过在拉索构件

中施加预应力提高结构的刚度,驱使结构由零状态发展至成形态.在整个施工过程中,结构经历了大变形、大位移,受施工误差的影响,容易导致结构在几何形态方面的误差^[26].几何形态上的误差主要表现为实际结构的节点坐标与设计文件的理论坐标之间的差异.为了保证虚拟模型在几何形态上与实际结构的一致性,在结构的成形态由三维激光扫描技术^[27]捕捉结构中关键节点的坐标,记为实测坐标.同时基于成形态的 BIM 模型获取结构关键节点理论坐标.通过对比关键节点的实测坐标和理论坐标进行 BIM 模型的修正.坐标的修正过程可表达为

$$\begin{pmatrix} \mathbf{X} \\ \mathbf{Y} \\ \mathbf{Z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & \cdots & x_n \\ y_1 & y_2 & \cdots & y_n \\ z_1 & z_2 & \cdots & z_n \end{pmatrix} \xleftrightarrow{1:1} \begin{pmatrix} \mathbf{X}^* \\ \mathbf{Y}^* \\ \mathbf{Z}^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1^* & x_2^* & \cdots & x_n^* \\ y_1^* & y_2^* & \cdots & y_n^* \\ z_1^* & z_2^* & \cdots & z_n^* \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中: \mathbf{X} 、 \mathbf{Y} 和 \mathbf{Z} 分别表示实际结构的 3 个方向上的空间坐标实测值,具体的各个节点的坐标值表述为 (x_i, y_i, z_i) ; \mathbf{X}^* 、 \mathbf{Y}^* 和 \mathbf{Z}^* 分别表示 BIM 模型中结构的 3 个方向上的空间坐标理论值,具体的各个节点的坐标值表述为 (x_i^*, y_i^*, z_i^*) ; n 表示坐标修正过程中关键节点的数量.通过两个坐标系的对比,修正 BIM 模型的节点坐标,保证结构几何形态的一致性.

在建立高保真几何模型的基础上,将构件赋予截面尺寸、预应力等物理属性,进行结构力学性能的仿真分析.由于构件存在初始缺陷或加工误差,容易导致物理层面的误差^[28],主要体现在实际结构构件参数与模型理论参数之间的偏差^[29].遗传算法是一种模拟自然选择和遗传学机理的搜索算法,其核心在于通过迭代方式逐步优化解集.算法首先随机生成一个初始种群,种群中每个个体代表问题的一个潜在解,并通过适应度函数评估其优劣.随后,基于适应度执行选择、交叉(杂交)和变异操作,以生成新一代种群.此过程不断重复,直至满足终止条件,最终种群中的最优个体即为问题的近似最优解.遗传算法作为一种强大的优化搜索技术,展现出诸多显著优势.首先,其全局搜索能力尤为突出,通过模拟自然进化过程,能够在解空间中广泛探索,有效避免局部最优解的陷阱.遗传算法的并行性和可扩展性良好,适合在分布式计算环境中实施,能够显著提升求解大规模复杂问题的效率.本研究提出基于遗传算法^[30]的物理属性优化方法.以结构的构件参数作为优化变量,根据参数服从的分布规律,确定其取值的上限和下限.以结构在自重作用下的索力仿真值与实测值的误差 (ΔF) 最小作为优化目标.在参数优化过程

中,当实测值与仿真值的误差在 3%以内时停止迭代. 此时对应的参数记为最佳参数. 另外,在优化过程中,算法中的迭代次数和种群数量是影响计算结果的关键因素. 本研究中通过控制变量法进行参数敏感性分析,得到最佳的参数取值. 由于不同的构件参数对应着不同的力学参数,首先基于有限元模型建立构件参数与力学参数之间的映射关系(式(2)),构件参数优化过程的数学语言表述(式(3)).

$$f(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_q) \xleftrightarrow{R} g(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_q) \quad (2)$$

$$\begin{cases} a_1 \leq \omega_1 \leq b_1 \\ a_2 \leq \omega_2 \leq b_2 \\ \vdots \\ a_q \leq \omega_q \leq b_q \end{cases} \xleftrightarrow{\text{迭代}} \min(\Delta F) \quad (3)$$

式中: $f(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_q)$ 表示构件参数的集合体; $g(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_q)$ 表示力学参数的集合体; $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_q$ 分别表示具体的力学参数,如拉索的索力、应力、竖向位移等; \xleftrightarrow{R} 表示根据结构的技术标准及数据关联规则,不同构件参数与力学参数的对应关系; ω_i 表示第 i 个优化参数,如拉索的截面面积; a_i 和 b_i 分别表示第 i 个优化参数的上限和下限; q 表示集合体中参数的个数. 通过优化基本参数使得拉索索力的仿真值与实测值接近. 通过修正模型中的关键节点坐标和结构物理属性,建立了高保真的孪生模型. 该模型可以精准映射实际结构的状态,为结构受力性能的孪生仿真提供了支撑. 在孪生模型中分析构件失效后的力学响应,为结构的健康监测提供策略支撑. 因此,本研究从虚实交互映射的角度,一定程度上实现了数字孪生. 在此基础上还应研究服役期力学性能的精准预测方法,以实现结构安全的闭环控制.

2 构件失效前后力学响应分析

本研究对索膜结构进行构件失效前后力学响应分析. 在索膜结构中,索构件是关键的受力、传力构件^[18,31]. 因此,本研究重点考察索构件的受力性能,分析不同位置索构件失效前后的结构力学响应. 在此基础上,捕捉关键的受力构件,明确内力传力机理. 由第 1 节的理论方法形成实际结构的孪生模型. 在自重条件下,对比结构力学参数的实测值与仿真值,验证孪生模型的高保真性. 在结构孪生模型中分别布置多类构件失效工况,获取结构的力学响应,捕捉关键受力构件和构件失效后的内力传递机理. 根据孪生模型高精度分析的力学响应,表征实际结构的受力状态,为结构安全的智慧运维提供依据. 结构

力学性能的分析流程如图 2 所示.

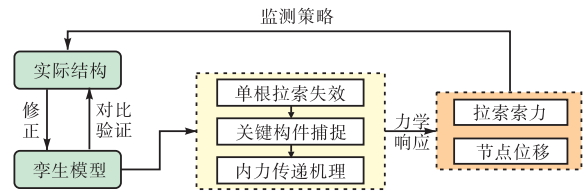


图 2 结构力学性能的分析流程

Fig.2 Flow chart of analysis of structural mechanical properties

在单根拉索失效前后分析结构的力学响应,获取各类构件失效前后结构内力和位移的变化情况. 采用 Cai 等^[32]提出的敏感性分析方法进行关键构件的识别. 在构件失效前后获取结构的力学响应. 以节点位移作为结构响应,进行敏感性分析. 结构中任意节点对应于构件 j 移除的敏感性指标 S 可表达为

$$S = (\lambda - \lambda^*) / \lambda \quad (4)$$

式中: λ 为构件失效前的节点位移; λ^* 为构件失效后的节点位移. 考虑每个节点存在 x, y, z 这 3 个方向的位移,任意节点针对构件 i 移除可计算出 3 个敏感性指标 S_x, S_y 和 S_z . 由敏感性指标得到构件 i 的重要性系数 α_i , 即

$$\alpha_i = \sum_{j=1}^p \frac{|S_x| + |S_y| + |S_z|}{3p} \quad (5)$$

式中 p 为节点数量.

同理,当以拉索索力作为结构响应进行敏感性分析时,构件 j 的重要性系数 α_j 可由式(6)表示,其中 S_j 表示构件失效前后各根拉索的索力变化率, m 为拉索数量.

$$\alpha_j = \sum_{j=1}^m \frac{|S_j|}{m} \quad (6)$$

在获取关键受力构件的基础上,分析该构件失效后内力的传递机理. 通过逐步分析构件失效后的结构力学响应,得到结构的倒塌表现规律. 根据建筑倒塌规范和现有文献^[33],本研究选取结构最大节点竖向位移超过跨度的 1/50 且失效面积超过结构总面积 30%对应的构件失效模式为结构发生连续性倒塌. 通过得到内力传递机理,重点关注关键受力构件,给出相应的结构健康监测策略,为提高结构的抗倒塌性能提供可靠建议.

3 案例应用

为了验证所提理论方法的可行性,以长春东收费罩棚索膜结构为研究对象分析构件失效机制. 首先

根据实际结构建立高保真孪生模型, 通过对比索力的实测值与仿真值验证了孪生模型的可靠性. 其次, 在孪生模型中分析各类构件失效前后的力学响应, 捕捉关键受力构件. 根据内力传递机理获取结构的连续倒塌模式, 为结构的健康监测提供依据.

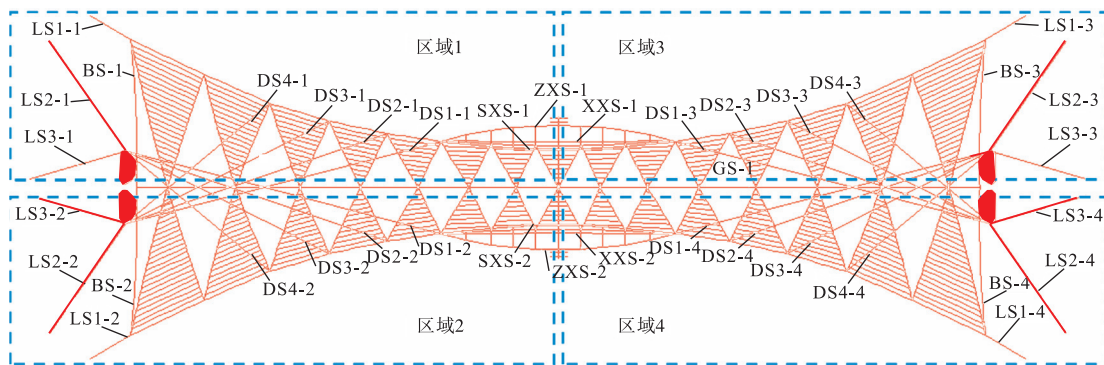
3.1 工程案例

长春东收费罩棚索膜结构是一个以桅杆为支撑构件的索膜结构体系, 整个建筑曲面呈对称双曲抛物

面. 建筑平面尺寸为 248.3 m × 73.4 m, 膜面顶高度为 18.45 m; 平面投影为两边宽中间窄的弧形, 结构最大跨度为 188 m, 横向宽 63.2 m, 中间最窄处 17.9 m; 4 根桅杆梭形柱作为张力体系的压杆, 支承膜高点, 桅杆高度为 48.023 m, 结构拉索边界上设有 18 个固定支座点. 工程结构见图 3, 本结构关于长轴和短轴均是对称的, 将其划分为 4 个区域, 构件的编号见图 3(b).



(a) 结构效果图



(b) 构件编号

图 3 工程结构

Fig.3 Engineering structure

结构主要采用拉索和桅杆对结构进行支撑, 根据构件位置分为吊索(DS)、后背拉索(LS)、边环索(BHS)、边索(BS)、联系索(LXS)、谷索(GS)、张弦梁上弦索(SXS)、张弦梁下弦索(XXS)、张弦梁中间索(ZXS)、膜内支撑索(ZCS)、钢桅杆(WG)和张弦梁刚性杆件(ZXL). 钢结构均采用 Q345. 拉索采用半平行钢丝束拉索, 其弹性模量为 1.9×10^{11} Pa, 极限抗拉强度为 1 670 MPa.

在案例应用中, 重点采集了结构的索力和变形情况. 采用频率法即使用索力动测仪对吊索和后背拉索的索力进行测试, 采用弓式测力仪测试联系索的索力. 本结构中, 索力的采集内容见表 1. 利用全站仪观测节点的变形情况. 结构力学参数的采集如图 4 所示.

3.2 结构孪生模型

在第 1 节理论方法的驱动下, 建立结构的孪生

表 1 索力采集内容

Tab.1 Collection content of cable force

构件位置	采集内容
吊索	每个桅杆有 4 根吊索, 整个结构有 16 根吊索, 全部进行索力监测
后背拉索	本结构一共有 12 根钢柱后背拉索
谷索	本结构一共有 1 根谷索, 检测谷索的两端位置的索力
联系索	联系索数量有 60 根, 抽选 15 根进行索力检测

模型. 在几何层面, 由三维激光扫描技术进行关键节点坐标的修正. 在自重荷载工况下, 利用三维激光扫描仪对实际结构进行扫描, 经去噪、点云拼接后, 得到点云模型. 点云数据导出成 rcp 格式的文件, 在 BIM 软件 Revit 里将 rcp 格式的文件进行链接, 完成数据的转换, 根据点云模型建立修正 BIM 模型. 根据式(1)修正 BIM 模型中节点坐标, 得到高精度的几何模型.



(a) 拉索索力采集



(b) 结构变形采集

图 4 结构力学参数的采集

Fig.4 Collection of structural mechanical parameters

基于北京市建筑设计研究院股份有限公司提供的有限元计算模型,对修正后的几何模型赋予物理属性并建立新的有限元模型.在物理层面,由遗传算法进行结构基本参数的修正.构件的截面尺寸是影响结构力学性能的关键指标^[34].本研究以各类构件的截面尺寸作为优化变量,以结构在自重条件下的结构索力的实测值与仿真值的误差作为目标变量.根据现有文献和荷载规范,考虑正常使用状态的构件及节点的自重.在孪生模型中重力加速度取 9.8 m/s^2 .考虑锚具自重,自重的计算系数取 1.05.节点自重采用施加节点荷载.根据式(2)和式(3),在遗传算法的驱动下进行构件参数的迭代优化,当索力仿真值与实测值之间的误差在 3%以内时停止迭代.以后背拉索为例,构件的截面尺寸迭代过程如图 5 所示.迭代完成后,结构的高保真有限元模型如图 6 所示.

在高保真有限元模型中进行结构力学性能的仿真分析,有效地提高了计算精度.以桅杆后背拉索为例,在自重条件下,对比分析索力的实测值与仿真值,见表 2.通过对比发现,索力实测值与仿真值的误差在 3%以内.修正后的虚拟模型可以精准映射结构的受力状态,为构件失效前后的力学响应分析提供了可靠的支撑.

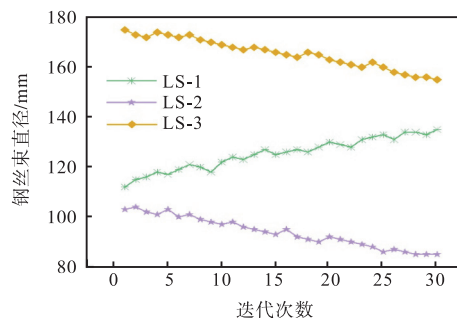


图 5 构件的截面尺寸迭代过程

Fig.5 Iterative process of section size of component



图 6 结构的高保真有限元模型

Fig.6 High-fidelity finite element model of structure

表 2 索力实测值与仿真值对比结果

Tab.2 Results of comparison between measured and simulated cable forces

拉索编号	索力仿真值/kN	索力实测值/kN	误差/%
LS1-1	1 596.5	1 608.20	-0.73
LS1-2	1 580.8	1 600.30	-1.22
LS1-3	1 607.8	1 613.90	-0.38
LS1-4	1 563.5	1 591.50	-1.76
LS2-1	6 120.2	5 965.70	2.59
LS2-2	6 274.4	6 155.00	1.94
LS2-3	6 000.9	5 851.10	2.56
LS2-4	6 106.0	5 930.50	2.96
LS3-1	6 073.0	5 914.70	2.68
LS3-2	6 197.0	6 060.00	2.26
LS3-3	6 097.1	5 983.40	1.90
LS3-4	6 168.5	5 988.85	3.00

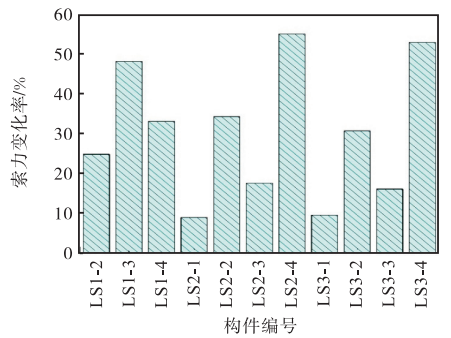
3.3 构件失效力学性能分析

根据实际监测和孪生仿真分析,在自重条件下后背拉索的索力明显高于其他类型的拉索.此类构件的重要性强,因此其是关键受力构件.本研究重点分析了该类构件失效对结构力学性能的影响.在构件失效后,分析结构的内力分布情况.直到结构的变形超限(结构倒塌),逐步获取最大的受力杆件,明确结构的传力路径.考虑结构的对称性,在孪生模型中选取区域 1 的 3 根桅杆后背拉索失效前后的力学响应分析.在本结构中桅杆相连的 LS 和 DS 是关键

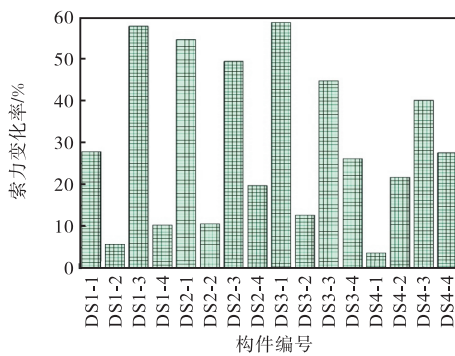
承重构件,因此重点考察了这两类构件的力学性能的表现规律.

3.3.1 LS1-1 失效前后结构的力学响应

在孪生模型中分析了构件 LS1-1 失效前后的结构力学响应,各构件索力变化率如图 7 所示.拉索失效后通过对比索力变化率的大小获取内力的分布情况以及对其他构件的影响程度,进而获取内力的传递路径.因此,在分析过程中,为了方便对比将索力变化率进行了绝对值处理.



(a) 对拉索索力的影响



(b) 对吊索索力的影响

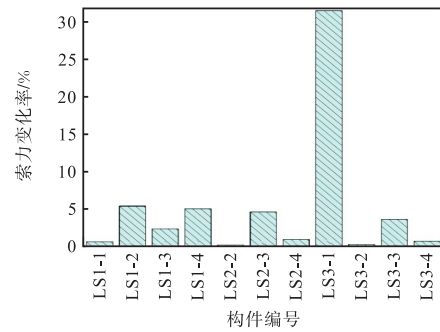
图 7 LS1-1 失效前后索力变化率

Fig.7 Changing rate of cable force before and after failure of LS1-1

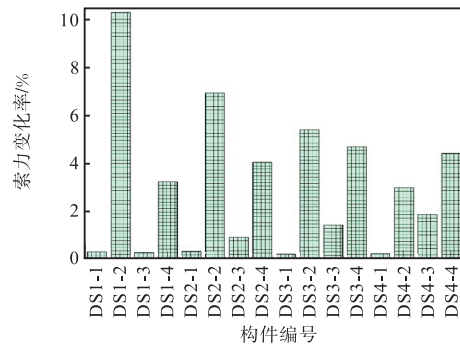
从整体结构来看,LS1-1 失效对后背拉索的影响略高于吊索,索力变化率平均高出 1.09%.在结构的 4 个区域中,LS1-1 失效对区域 3 的影响最大,对区域 2 的影响最小,两者的平均差异为 19.04%.针对单根后背拉索,LS1-1 失效对 LS2-4 的影响最大,该构件的索力变化率为 54.9%;LS1-1 失效对 LS2-1 的影响最小,该构件的索力变化率为 8.9%.针对单根吊索,LS1-1 失效对 DS1-3 的影响最大,该构件的索力变化率为 57.7%;LS1-1 失效对 DS4-1 的影响最小,该构件的索力变化率为 3.7%.通过分析 LS1-1 失效前后的力学影响,应重点关注区域 2 结构的安全状态,需要重点监测 DS1-3 和 LS2-4 的索力.

3.3.2 LS2-1 失效前后结构的力学响应

在孪生模型中分析了构件 LS2-1 失效前后的结构力学响应,各构件索力变化率如图 8 所示.



(a) 对拉索索力的影响



(b) 对吊索索力的影响

图 8 LS2-1 失效前后索力变化率

Fig.8 Changing rate of cable force before and after failure of LS2-1

从整体结构来看,LS2-1 失效对后背拉索的影响略高于吊索,索力变化率平均高出 2.1%.在结构的 4 个区域中 LS2-1 失效对区域 1 的影响最大,对区域 3 的影响最小,两者的平均差异为 3.4%.针对单根后背拉索,LS2-1 失效对 LS3-1 的影响最大,该构件的索力变化率为 31.4%;LS2-1 失效对 LS2-2 的影响最小,该构件的索力变化率为 0.18%.针对单根吊索,LS2-1 失效对 DS1-2 的影响最大,该构件的索力变化率为 10.2%;LS2-1 失效对 DS3-1 的影响最小,该构件的索力变化率为 0.17%.通过分析 LS1-1 失效前后的力学影响,应重点关注区域 1 结构的安全状态,需要重点监测 LS3-1 和 DS1-2 的索力变化情况.

3.3.3 LS3-1 失效前后结构的力学响应

在孪生模型中分析了构件 LS3-1 失效前后的结构力学响应,各构件索力变化率如图 9 所示.

从整体结构来看,LS3-1 失效对后背拉索的影响略高于吊索,索力变化率平均高出 4.3%.在结构的 4 个区域中,LS3-1 失效对区域 2 的影响最大,对区域 3 的影响最小,两者的平均差异为 41.6%.针对单根

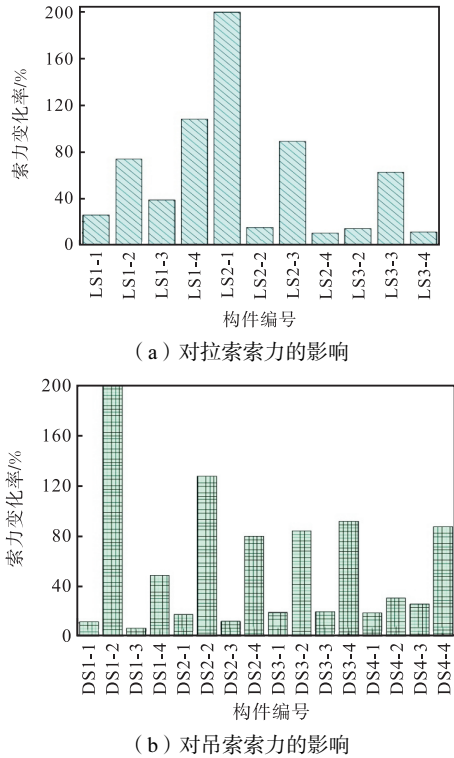


图 9 LS3-1失效前后索力变化率

Fig.9 Changing rate of cable force before and after failure of LS3-1

后背拉索, LS3-1 失效对 LS2-1 的影响最大, 该构件的索力变化率为 199.8%; LS3-1 失效对 LS2-4 的影响最小, 该构件的索力变化率为 9.8%。针对单根吊索, LS3-1 失效对 DS1-2 的影响最大, 该构件的索力变化率为 199%; LS3-1 失效对 DS1-3 的影响最小, 该构件的索力变化率为 5.7%。通过分析 LS3-1 失效前后的力学影响, 应重点关注区域 2 结构的安全状态, 需要重点监测 LS2-1 和 DS1-2 的索力变化情况。

在得到拉索失效前后结构力学响应的基础上, 根据第 2 节构件重要性系数的计算方法获取了本结构中的关键受力构件。以索力为评价指标, 3 类拉索的重要性系数见表 3。通过对比发现, LS3 的重要性系数显著高于其他构件。因此, 该构件失效对结构安全性能的影响最大, 在结构的正常服役期应重点关注该构件的力学状态。

表 3 构件的重要性系数

Tab.3 Importance coefficients of components

构件	重要性系数
LS1	0.297
LS2	0.036
LS3	0.560

通过拉索失效前后的结构力学响应分析, 可以精准获取各根构件的力学性能变化情况, 为结构的健康监测提供建议。同时分析得到了关键的受力构件, 为

结构服役期的安全维护指明了方向, 可以有效降低结构运维成本。

3.4 构件失效后的传力机理

根据 3.3 节的力学性能分析, LS3 的索力最大, 且重要性系数也最大。为了获取构件失效后的内力传递机理和结构的抗倒塌性能, 考虑结构的对称性, 本节分析 LS3-1 失效后结构内力的分布情况和整体形变情况。结构的跨度为 188 m, 根据规范要求, 当最大竖向位移超过 3 760 mm 时, 认为发生了结构倒塌。在孪生模型中, 根据内力的分布情况, 逐步分析最大受力构件失效前后的结构力学响应, 直到结构倒塌为止。图 10 为构件逐步失效过程中索力最大变化率和最大竖向位移的发展情况, 其中最大竖向位移发生于结构跨中, 具体为张弦梁中间索与张弦梁上弦索连接处。

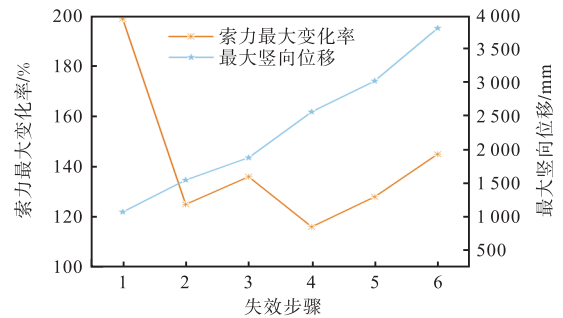


图 10 失效过程中力学性能的变化情况

Fig.10 Changes in mechanical properties during failure

在构件失效过程中, 第 1 根构件失效索力和位移的变化率最显著。因此, 在结构服役期应重点关注 LS3 的受力状态。通过对比发现, 拉索的索力变化情况和结构的整体形变趋势一致, 索力变化率增加, 竖向位移也随之变化加快。这进一步说明本研究所建立的结构数字孪生模型可以精准有效地仿真结构的力学性能。根据构件失效后的内力重分布情况, 得到最大内力的传递路径, 即: LS3-1→LS2-1→LS3-3→LS3-4→LS3-2→LS2-3。通过分析构件失效后的传力机理, 获取了结构正常服役期健康监测的关注重点。为了防止结构出现倒塌等安全事故, 应根据内力的重分布情况实时监测传力路径上的拉索受力情况, 及时进行节点加固、补张拉、防腐蚀等维护措施。研究结果解决了传统运维过程中因受力不明确而导致管理成本高的问题。

4 结论

本研究考虑到索膜结构体量大、结构力学性能分

析精度不足以及索构件的连接和受力对外界环境因素敏感,提出了基于数字孪生的索膜结构构件失效机制分析方法.为了提高结构力学性能的仿真精度,形成了数字孪生建模方法.在孪生建模的基础上,通过分析构件失效前后的力学响应,得到了关键受力构件和传力机理,明确了结构健康监测的对象.本研究方法为制定结构安全的智慧运维策略和提高结构抗倒塌性能提供了可靠支撑,在研究过程中主要得出了以下结论.

(1)在几何和物理两个层面对虚拟模型进行修正,形成了结构数字孪生建模方法,有效地提高了对实际结构的仿真精度.在几何层面,基于三维激光扫描捕捉结构成形态关键节点的坐标,修正结构的BIM模型以保证几何形态的一致性.在物理层面,基于遗传算法以力学参数实测值与仿真值之间的误差为优化目标,修正拉索截面面积等构件参数以提高有限元模型的计算精度.

(2)在孪生模型的基础上,建立了构件失效前后力学响应的分析流程.在结构孪生模型中分别布置多类构件失效工况,获取结构的力学响应,计算构件的重要性系数,捕捉关键受力构件和构件失效后的传力机理.通过得到内力传递机理,重点关注关键受力构件,给出结构健康监测策略,为提高结构的抗倒塌性能提供可靠建议.

(3)通过将基于数字孪生的索膜结构构件失效机制分析方法应用于实际工程,验证了本研究方法的可行性.结构的数字孪生模型计算误差在3%以内,精准地映射实际受力状态.通过分析构件失效前后的力学响应,发现LS3为关键受力构件.通过逐步分析构件失效过程,明确了内力传递路径为:LS3-1→LS2-1→LS3-3→LS3-4→LS3-2→LS2-3.案例应用表明,所提方法获取了结构正常服役期健康监测的关注重点,解决了传统运维过程中因受力不明确而导致管理成本高的问题.

参考文献:

- [1] 陈志华, 马青, 闫翔宇, 等. 复合式索穹顶施工误差影响及控制技术[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, 45(9): 47-56.
Chen Zhihua, Ma Qing, Yan Xiangyu, et al. Research on influence of construction error and controlling techniques of compound cable dome[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2018, 45(9): 47-56 (in Chinese).
- [2] 鲁建, 薛素铎, 李雄彦, 等. 环形交叉索桁结构的施工关键技术[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2021, 54(1): 101-110.
Lu Jian, Xue Suduo, Li Xiongyan, et al. Key Construction technology of annular crossed cable-truss structure[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2021, 54(1): 101-110(in Chinese).
- [3] 韩庆华, 张学哲, 徐颖. 正放四角锥网架敏感性分析及抗连续倒塌性能[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2017, 50(6): 610-617.
Han Qinghua, Zhang Xuezhe, Xu Ying. Sensitive analysis and anti-progressive collapse performance of square pyramid space grids[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2017, 50(6): 610-617(in Chinese).
- [4] Omika Y, Fukuzawa E, Koshika N, et al. Structural responses of World Trade Center under aircraft attacks[J]. Journal of Structural Engineering, 2005, 131(1): 6-15.
- [5] 蒋友宝, 陈奕琳, 张梦华, 等. 下弦与撑杆改进构型张弦梁结构抗连续倒塌动力试验研究[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(4): 178-187.
Jiang Youbao, Chen Yilin, Zhang Menghua, et al. Dynamic experimental study on anti-progressive collapse of beam string structure with improved configuration of lower chord and strut[J]. Journal of Building Structures, 2023, 44(4): 178-187(in Chinese).
- [6] Liu H B, Li B H, Chen Z H, et al. Damage analysis of aluminum alloy gusset joints under cyclic loading based on continuum damage mechanics[J]. Engineering Structures, 2021, 244: 112729.
- [7] 邓满宇, 袁行飞, 董永灿. 考虑不同失效模式的索杆结构构件面积缺损限值研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2024, 52(1): 52-61.
Deng Manyu, Yuan Xingfei, Dong Yongcan. Study on area-loss limit of cable-strut structures considering different failure modes[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2024, 52(1): 52-61 (in Chinese).
- [8] 惠卓, 秦卫红, 许剑武, 等. Geiger型碳纤维索穹顶结构连续倒塌性能非线性分析[J]. 振动与冲击, 2021, 40(15): 114-122.
Hui Zhuo, Qin Weihong, Xu Jianwu, et al. Nonlinear analysis of progressive collapse behavior of Geiger type carbon fiber cable dome structure[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(15): 114-122(in Chinese).

- [9] 张微敬, 何 静. Geiger 型索穹顶结构模型抗连续倒塌试验研究[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(增 1): 213-219.
Zhang Weijing, He Jing. Experimental study on progressive collapse resistance of Geiger type cable dome structure model[J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(Suppl 1): 213-219(in Chinese).
- [10] Bojórquez J, Ponce S, Ruiz S E, et al. Structural reliability of reinforced concrete buildings under earthquakes and corrosion effects[J]. Engineering Structures, 2021, 237: 112161.
- [11] Lu J Y, Zhang H Y, Wu X L. Experimental study on collapse behaviour of truss string structures under cable rupture[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2021, 185: 106864.
- [12] Vaezzadeh A, Dolatshahi K M. Progressive collapse resistance of cable net structures[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2022, 195: 107347.
- [13] Ozer E, Feng M Q. Structural reliability estimation with participatory sensing and mobile cyber-physical structural health monitoring systems[J]. Applied Sciences, 2019, 9(14): 2840.
- [14] Liu Z S, Shi G L, Liu Y, et al. Investigation of mechanical behaviors of spoke-wheel cable structures through experimental and numerical analysis driven by digital-twin[J]. Structures, 2024, 62: 106099.
- [15] 刘宇飞, 齐 玉, 李保罗, 等. 工程结构运维多场景的敏感服役指标智能识别[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(10): 1-15.
Liu Yufei, Qi Yu, Li Baoluo, et al. Intelligent detection of sensitive service indicators in multiple scenarios of structural maintenance[J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(10): 1-15(in Chinese).
- [16] 沈雁彬, 罗尧治, 傅文伟, 等. 杭州亚运会主体育场结构健康监测与分析[J]. 建筑结构学报, 2024, 45(3): 81-91.
Shen Yanbin, Luo Yaozhi, Fu Wenwei, et al. Structural health monitoring and analysis of main stadium of the Hangzhou Asian Games[J]. Journal of Building Structures, 2024, 45(3): 81-91(in Chinese).
- [17] 罗大明, 李 凡, 牛荻涛. 人工智能时代混凝土结构耐久性诊断研究进展[J]. 建筑结构学报, 2024, 45(2): 1-13.
Luo Daming, Li Fan, Niu Ditao. Research progress on durability diagnosis of concrete structures based on artificial intelligence[J]. Journal of Building Structures, 2024, 45(2): 1-13(in Chinese).
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] Ritto T G, Rochinha F A. Digital twin, physics-based model, and machine learning applied to damage detection in structures[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 155: 107614.
- [21] Zhu X, Bao T F, Yeoh J K W, et al. Enhancing dam safety evaluation using dam digital twins[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2021, 19(7): 904-920.
- [22] Liu Z S, Li H, Liu Y, et al. A novel numerical approach and experimental study to evaluate the effect of component failure on spoke-wheel cable structure[J]. Journal of Building Engineering, 2022, 61: 105268.
- [23] 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).
- [24] 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.
Weng Shun, Zhu Hongping. Damage identification of civil structures based on finite element model updating [J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(3): 1-16(in Chinese).
- [25] Okur E K, Altunışık A C, Okur F Y, et al. Dynamic response of a traditional hıms mansion using updated FE model with operational modal testing[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 43: 103060.
- [26] 田广宇, 郭彦林, 张博浩, 等. 宝安体育场车辐式屋盖结构施工误差敏感性试验及误差限值控制方法研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(3): 11-18.
Tian Guangyu, Guo Yanlin, Zhang Bohao, et al. Experiment on sensitivity to construction tolerance and research on tolerance control criteria in spoke structural roof of Bao'an Stadium[J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(3): 11-18.

- tures, 2011, 32(3): 11-18(in Chinese).
- [27] 程国忠, 周绪红, 刘界鹏, 等. 复杂超高层结构尺寸质量智能化检测方法[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(7): 264-271.
Cheng Guozhong, Zhou Xuhong, Liu Jiepeng, et al. Intelligent inspection method for dimensional quality of complex high-rise structures[J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(7): 264-271(in Chinese).
- [28] Elveli B S, Iddberg M B, Børvik T, et al. On the strength-ductility trade-off in thin blast-loaded steel plates with and without initial defects—An experimental study[J]. Thin-Walled Structures, 2022, 171: 108787.
- [29] 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).
- [30] 吕小青, 王旭, 徐连勇, 等. 基于径向基函数神经网络和 NSGA-II 的气保焊工艺多目标优化[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2020, 53(10): 1013-1018.
Lü Xiaoqing, Wang Xu, Xu Lianyong, et al. Multi-objective optimization of gas metal arc welding process parameters based on radial based function neural network and NSGA-II [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2020, 53(10): 1013-1018(in Chinese).
- [31] 王树, 黄季阳, 刘鑫刚, 等. 大跨度煤场封闭结构预应力体系研究[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(5): 51-61.
Wang Shu, Huang Jiyang, Liu Xingang, et al. Study on prestressed system of long span enclosed coal shed structure[J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(5): 51-61(in Chinese).
- [32] Cai J G, Jia W W, Feng J, et al. Applications of stiffness-based evaluation method to element importance of truss systems[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2017, 23(5): 562-572.
- [33] Liu W H, Zeng B, Zhou Z, et al. Theoretical study on progressive collapse of truss string structures under cable rupture[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2022, 199: 107609.
- [34] 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).

(责任编辑: 武立有)