

DOI: 10.7672/sgjs2025230017

# 面向结构安全评估的数字孪生建模分析方法

张雅贤

(中央军委后勤保障部安置住房保障中心,北京 100036)

[摘要] 为解决结构安全评估中仿真分析精度不足的问题,提出数字孪生建模分析方法。首先建立以应力、位移等力学响应为评判指标的结构安全评估流程。在此基础上,形成面向结构安全评估的数字孪生模型,有效集成物理维度、数据维度、模型维度、分析维度和决策维度,明确数字孪生与深度学习的融合机理。为高精度评估结构安全状态,融合深度学习算法与数字孪生模型,形成了模型更新方法。在遗传算法驱动下,以力学响应实测值与仿真值间的误差作为模型更新依据,通过对比模型更新前后基本参数的变化情况确定结构损伤位置、程度。为验证所提方法的有效性,将其应用于钢结构算例中,结构安全评估精准有效。

[关键词] 结构安全;数字孪生;智能评估;深度学习;模型更新

[中图分类号] TU714;TP399

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)23-0017-04

## Digital Twin Modeling Analysis Method for Structural Safety Assessment

ZHANG Yaxian

(Resettlement Housing Support Center of the Logistics Support Department of the Central Military  
Commission, Beijing 100036, China)

**Abstract:** To address the issue of insufficient accuracy in simulation analysis for structural safety assessment, a digital twin modeling and analysis method is proposed. Firstly, a structural safety assessment process based on mechanical responses, such as stress and displacement as evaluation indicators is established. On this basis, a digital twin model for structural safety assessment is formed, effectively integrating physical, data, model, analysis, and decision-making dimensions, and clarifying the integration mechanism of digital twin and deep learning. To achieve high-precision assessment of structural safety status, the deep learning algorithm is integrated with the digital twin model to form a model update method. Under the drive of the genetic algorithm, the error between the measured and simulated values of mechanical responses is used as the basis for model update. The location and degree of structural damage are determined by comparing the changes in basic parameters before and after model update. To verify the effectiveness of the proposed method, a steel structure example is taken as the research object and the proposed method is applied, achieving accurate and effective assessment of the structural safety.

**Keywords:** structural safety; digital twin; intelligent assessment; deep learning; model updating

### 0 引言

随着科技不断进步,结构安全评估领域正面临由数字化转型引领的深刻变革<sup>[1]</sup>。在这一背景下,数字孪生技术作为新兴数字化手段,逐渐展现出其在结构安全评估领域的巨大潜力和应用价值<sup>[2]</sup>。数字孪生技术通过构建实际工程结构虚拟模型,实

现精准模拟和预测结构行为、性能及安全状态,从而为结构安全评估提供全新视角和方法。

传统的结构安全评估方法主要依赖于试验测试、物理模拟、经验判断,虽然一定程度上能够评估结构安全性,但存在成本高、周期长、精度低等问题。此外,随着工程结构日益复杂化、大型化,传统方法难以全面、准确掌握结构安全状态。因此,寻求高效、准确的结构安全评估方法成为工程领域亟待解决的问题<sup>[3]</sup>。

数字孪生建模分析方法利用先进的数字化技术,构建与实际结构高度相似的虚拟模型,通过模拟结构在各种工况下的行为、性能,实现对结构安全状态的全面评估,不仅降低评估成本、缩短评估周期,还提高评估精度、效率。

通过建立精确的数字孪生模型,可实现对结构行为、性能及安全状态的精准模拟和预测<sup>[4]</sup>。建模过程中,需充分考虑结构物理特性、材料属性、边界条件等因素,确保模型能够真实反映实际结构的行为、性能。同时,还需大量试验数据和监测数据验证、优化模型,以提高模型准确性和可靠性<sup>[5]</sup>。

除建模外,数字孪生建模分析方法还需结合先进的数据分析技术和算法,对模型进行深入分析、挖掘。通过处理、分析、挖掘模型中的数据,可发现结构潜在的安全隐患和失效模式,为结构安全评估提供支持。此外,数字孪生建模分析方法还可结合人工智能、机器学习等数据处理技术,实现对结构安全状态的智能监测和预警,为结构维护、加固、升级改造提供支持<sup>[6]</sup>。

## 1 结构安全评估框架

数字孪生技术指通过采集物理实体数据,构建虚拟模型,并在虚拟环境中模拟物理实体的行为、性能。在结构安全评估领域,数字孪生技术可模拟、分析结构各工况下的性能,从而评估结构安全状态。以力学响应作为评判结构安全性能的指标,首先分析结构安全评估流程。在此基础上建立数字孪生模型,进一步高精度分析结构力学响应。最终明确数字孪生与神经网络的融合机理,获取影响因素与结构安全间的映射关系,为维护结构正常使用性能提供依据。

### 1.1 结构安全评估流程

结构安全评估是确保建筑物、桥梁、机械设备等工程结构在使用过程中安全稳定的重要环节。通过分析结构在不同工况下的应力、位移响应,评估结构承载力、变形情况,从而判断结构是否满足安全要求。

在基于应力和位移的结构安全评估中,首先需要分析结构应力。通过有限元分析法、差分法或其他数值计算方法,获取结构在不同荷载下的应力分布。重点关注结构中的最大应力点、应力集中区域,同时,还需考虑材料许用应力,即材料在特定环境下能够承受的最大应力。若结构中的最大应力超过材料许用应力,则结构可能发生破坏或失效。

结构位移响应反映变形情况,进而判断结构整体稳定性和承载力。通过位移监测设备,可实时监

测结构在不同工况下的位移变化。如果位移超过规定限值,或位移变化速率异常增大,需进一步评估、处理结构安全性。

结构在动态荷载作用下的应力和位移响应与静态荷载作用下不同。因此,需对结构进行动态分析,包括模态分析、时域分析、频域分析等,以保证结构在动态工况下安全稳定。

基于应力和位移的结构安全评估方法需与损伤识别、疲劳分析、断裂力学等方法相结合,以更全面评估结构安全性。此外,评估结果还需综合考虑结构设计要求、使用环境和维护历史等因素,以制定科学合理的维护、管理策略。

基于应力和位移评价指标的结构安全评估方法是全面、有效的评估手段。在实际应用中,需综合考虑多种因素,结合其他评估方法,以更准确评估结构安全性,确保工程结构长期稳定运行。

### 1.2 面向结构安全评估的数字孪生模型

以力学性能为评判指标评估结构的安全状态<sup>[7]</sup>,在此基础上结合数字孪生虚实映射与交互的特点,建立五维模型,如图1所示。数字孪生五维模型框架( $F_{DT}$ )包括物理维度、数据维度、模型维度、分析维度和决策维度,如式(1)所示。

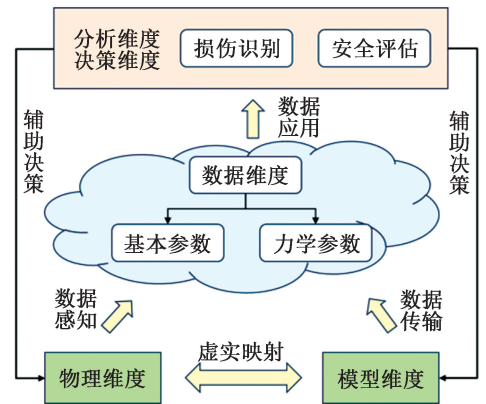


图1 面向结构安全评估的数字孪生模型

Fig. 1 Digital twin model for structural safety assessment

$$F_{DT} = \{PD, DD, MD, AD, DD^*\} \quad (1)$$

物理维度(PD)是数字孪生模型的基石,涉及工程结构物理特性,如尺寸、形状、材料属性、边界条件等。物理维度提供了结构安全评估所需的基础数据,为数字孪生模型构建提供重要依据。

数据维度(DD)负责收集、整合、处理来自物理维度的数据,包括结构在各工况下的应力、位移、振动等响应数据,以及环境监测数据、材料性能数据等。数据维度通过高效的数据管理和处理技术,确保数据准确、完整、可用。

模型维度 ( MD ) 是基于数据维度提供的标准化数据,利用先进的数值计算方法和仿真软件,根据物理维度提供的结构信息和数据维度提供的响应数据,建立结构数字孪生模型,能够模拟实际结构在各种工况下的行为、性能。

分析维度 ( AD ) 是对数字孪生模型进行仿真分析和评估的核心环节。通过先进的结构分析方法和算法对数字孪生模型进行静态、动态、疲劳分析,以评估结构安全性能。同时,该维度还可结合大数据分析、机器学习等数据处理技术,挖掘、分析结构历史数据,从而更准确评估结构当前状态和未来趋势。

决策维度 ( DD\* ) 基于分析维度的结果,为结构安全评估提供决策支持。该维度综合考虑结构安全性能、经济效益、维护成本等因素,制定针对性的维护、加固或升级改造方案。还可利用数字孪生模型的仿真能力,对不同方案进行虚拟测试和比较,以优化决策过程,提高决策效率和准确性。

综上所述,面向结构安全评估的数字孪生五维模型框架通过物理维度、数据维度、模型维度、分析维度和决策维度的协同作用,全面评估结构安全状态。

## 2 基于遗传算法的数字孪生模型更新

在建立的数字孪生框架基础上,结合遗传算法与虚拟模型,建立高保真分析模型,利用遗传算法更新模型参数。通过对比结构服役期力学参数的变化,更新数字孪生模型基本参数,以获取结构损伤位置、程度。

### 2.1 遗传算法与力学参数融合

传统有限元建模分析方法存在结构状态不准确、力学参数误差大的问题<sup>[8]</sup>。通过优化结构模型基本参数显著提高模型仿真能力。由于结构在正常服役阶段受温度、风荷载等环境因素干扰,易导致模型构件参数与实际结构有偏差<sup>[9]</sup>。本研究提出基于遗传算法<sup>[10]</sup>的物理属性优化方法,将结构基本设计参数作为优化变量,根据参数服从的分布规律,确定其取值上限、下限。将结构在正常荷载作用下的竖向位移仿真值与实测值误差 (  $\Delta\mu$  ) 作为优化目标,在遗传算法中,模型基本参数作为输入值,根据不同参数组合获取结构位移。其中参数组合包含结构尺寸、预应力等。通过对比结构位移分析值与实测值,当偏差满足要求时停止算法迭代,此时的基本参数为最优参数,该有限元模型即数字孪生模型,可高效精准地映射结构力学性能。参数优化过程中的数学语言表述如下。

$$\begin{cases} a_1 \leq \omega_1 \leq b_1 \\ a_2 \leq \omega_2 \leq b_2 \xleftrightarrow{\text{迭代}} \min(\Delta\mu) \\ \dots \\ a_n \leq \omega_n \leq b_n \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $a_n$  和  $b_n$  分别表示第  $n$  个优化变量的上限和下限;  $\omega_n$  表示第  $n$  个优化变量,如构件的截面面积。通过优化基本参数使结构竖向位移仿真值接近实测值。通过修正模型中的结构物理属性,建立高保真的数字孪生模型,精准映射实际结构的安全状态。

### 2.2 结构安全评估机制

通过对比力学参数修正结构的基本参数,建立高保真的数字孪生模型。在模型更新过程中,通过对比基本参数变化情况可快速精准获取结构损伤位置、程度。修正后的数字孪生模型可有效映射结构受力状态,能够进一步分析不同损伤对结构安全状态的影响,从而辅助制定结构维护措施。模型更新下的结构安全评估机制如图 2 所示。

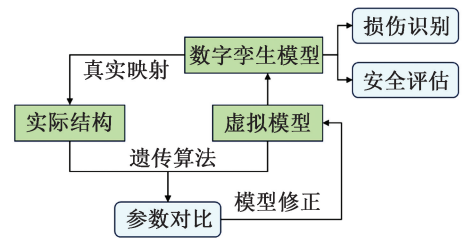


图 2 模型更新下的结构安全评估机制

Fig. 2 Structure safety assessment mechanism under model updating

## 3 算例验证

为验证所提理论方法的可行性,以 2 层 3 跨的钢框架结构为研究对象,进行结构损伤识别、安全评估。首先建立结构数值模型进行力学性能分析,通过对比服役期结构力学参数的实测值和数值虚拟模型仿真值,更新结构基本参数,判断结构损伤位置、程度。在修正后的高保真数字孪生模型中做进一步的安全性能评估。

### 3.1 数值模型

该结构梁柱均为 Q345 工字型钢材。层高 3m、跨度 4m,结构外形及构件编号如图 3 所示。在有限元模型中建立结构数值模型,并分析其正常服役期的结构力学性能,为模型更新、结构安全评估提供依据。

### 3.2 模型更新

在结构正常服役阶段受温度、风荷载等外界环境作用,导致构件锈蚀影响结构安全性能。通过采集结构实际变形情况获取各节点竖向位移,同时,

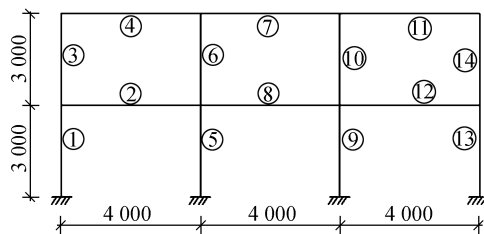


图3 结构外形及构件编号

Fig. 3 Structure shape and component number

在有限元模型中模拟服役状态获取各节点位移的仿真值。以各构件截面面积为基本参数,通过最小化节点位移仿真值与实测值间的误差更新基本参数。在更新基本参数过程中,对比截面尺寸变化情况,可有效获取结构损伤位置及程度。通过模型更新得到各构件基本参数折减率,如图4所示。为方便比较,对各构件折减率进行归一化处理。

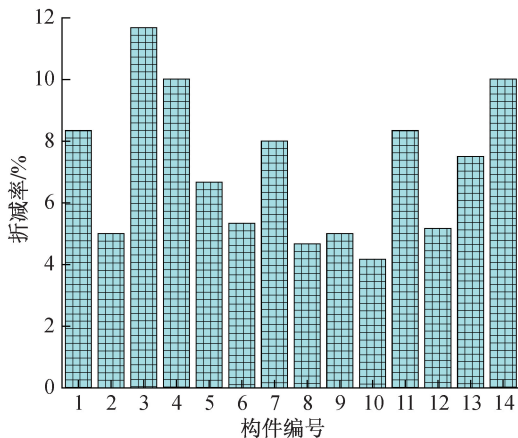


图4 各构件基本参数折减率

Fig. 4 Reduction rate of basic parameters of various components

通过对比分析可知,构件3的损伤率最高,同时结构边缘构件损伤程度明显高于其他部位。因此在结构安全维护过程中,应重点关注此类构件。

### 3.3 结构安全评估分析

为进一步获取结构安全状态的变化规律,在数字孪生模型中分析构件不同损伤程度对应的结构最大竖向位移,如图5所示。根据构件不同损伤程度,拟合出损伤程度( $x$ )与最大竖向位移( $\mu_{\max}$ )间的映射关系,根据映射关系获取结构变形超限时的损伤极限,计算如下:

$$\mu_{\max} = 218.8x^2 + 18.8x + 2.73 \quad (3)$$

## 4 结语

1)结构在服役过程中易受外界环境影响产生损伤,从而影响结构安全状态。以应力、位移等力学响应作为评判结构安全的指标,建立数字孪生五维模

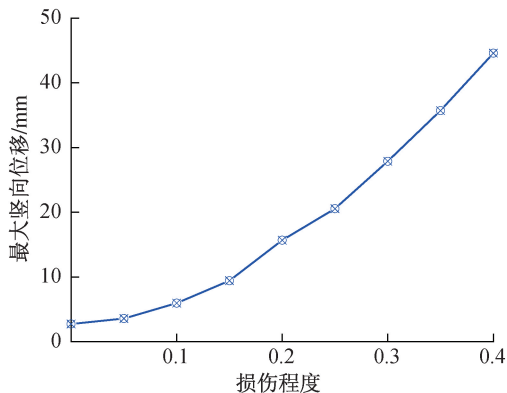


图5 损伤程度与结构变形的映射关系

Fig. 5 Mapping relationship between damage degree and structural deformation

型。其中虚拟模型是分析的基础,融合深度学习与模型进行参数更新,为结构安全评估提供了思路。

2)结合遗传算法与模型参数建立模型将力学响应仿真值与实测值间的误差作为优化目标,将结构基本参数作为优化参数,通过迭代优化保证数字孪生模型与实际结构一致,同时对比参数更新前后的区别,以精准有效获取损伤位置、程度。

3)对钢结构模型理论方法进行验证,表明数字孪生模型可精准获取结构损伤与安全性能间的映射关系。

### 参考文献:

- [1] 张雅贤. 基于数字孪生的结构施工安全智能化分析[J]. 施工技术(中英文), 2025, 54(5): 25-28.  
ZHANG Y X. Intelligent analysis of structure construction safety based on digital twin[J]. Construction technology, 2025, 54(5): 25-28.
- [2] 张栋樑,王永志,廖少明,等. 土木工程数字孪生建造技术研究进展[J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(5): 1-12.  
ZHANG D L, WANG Y Z, LIAO S M, et al. Review of digital twin construction technology for civil engineering[J]. Construction technology, 2023, 52(5): 1-12.
- [3] 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 Z S, SHI G L, DU X L, 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.
- [4] 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 G L, LIU Z S, LU D C, et al. Twinning simulation and model test for construction error assessment of cable truss structure[J]. Journal of building structures, 2024, 45(4): 107-119.

- Construction mechanization, 2023, 44(9):96-98.
- [16] 王春桃. 一种环保建筑垃圾分级破碎筛选分拣回收设备: CN212348861U[P]. 2021-01-15.  
WANG C T. An environmentally friendly equipment for graded crushing, screening, sorting, and recycling of construction and demolition waste: CN212348861U[P]. 2021-01-15.
- [17] 宋占. 低碳视角下绿色建筑施工废弃物二次有效利用技术研究[J]. 环境科学与管理, 2024, 49(4):160-163.  
SONG Z. Secondary effective utilization technology of green building construction waste from a low carbon perspective[J]. Environmental science and management, 2024, 49(4):160-163.
- [18] 张震. 建筑废弃物再生料路基填筑施工技术[J]. 铁道技术标准(中英文), 2023(5):52-56.  
ZHANG Z. Subgrade construction technology using recycled filling of construction waste[J]. Railway technical standard (Chinese & English), 2023(5):52-56.
- [19] 张传仁, 徐兴国, 王泽浚, 等. 大型超细粉磨工艺装备技术的应用[J]. 居业, 2022, 14(5):43-46.  
ZHANG C R, XU X G, WANG Z J, et al. Application of large-scale ultra-fine grinding process equipment technology[J]. Create living, 2022, 14(5):43-46.
- [20] 冯春花, 李东旭, 苗琛, 等. 助磨剂对钢渣细度和活性的影响[J]. 硅酸盐学报, 2010, 38(7):1160-1166.  
FENG C H, LI D X, MIAO C, et al. Effects of grinding aids on activation and fineness of steel slag[J]. Journal of the Chinese ceramic society, 2010, 38(7):1160-1166.
- [21] 朱飞. 水泥粉磨系统节能降耗改造应用[J]. 中国水泥, 2024(2):92-94.  
ZHU F. Application of energy-saving and consumption-reducing transformation in cement grinding system[J]. China cement, 2024(2):92-94.
- [22] 禹敏, 段振洪, 王方伟, 等. 水泥粉磨系统的智能化改造[J]. 水泥技术, 2023(2):13-19.  
YU M, DUAN Z H, WANG F W, et al. Intelligent transformation of cement grinding system[J]. Cement technology, 2023(2):13-19.
- [23] 郭远新, 李秋义, 汪卫琴, 等. 再生粗骨料品质提升技术研究[J]. 混凝土, 2015(6):134-138.  
GUO Y X, LI Q Y, WANG W Q, et al. Research on recycled coarse aggregate quality of enhancement technology[J]. Concrete, 2015(6):134-138.
- [24] 马郁. 掺建筑垃圾再生微粉混凝土性能试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2016(10):88-90.  
MA Y. Experimental study on performance of recycled powder concrete adding construction waste[J]. China concrete and cement products, 2016(10):88-90.
- [25] 蒙华良, 黄禧, 陈阳, 等. 工业固废制备低碳胶凝材料的研究进展[J]. 水泥工程, 2023(5):75-78, 94.  
MENG H L, HUANG X, CHEN Y, et al. Research progress in the preparation of low-carbon cementitious materials from industrial solid waste[J]. Cement engineering, 2023(5):75-78, 94.
- [26] 李兰欣. 建筑垃圾资源化利用的碳排放及核算方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2022.  
LI L X. Study on carbon emission and accounting method of construction waste recycling[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022.
- [27] 罗春燕. 基于BIM的拟拆除建筑垃圾决策管理系统研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.  
LUO C Y. Research of BIM-based decision-making and management system for demolition waste[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.
- [28] 江柯. 装配式与传统现浇建筑的废弃物量化对比分析与仿真研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2023.  
JIANG K. Quantitative comparison and management of waste in prefabricated and traditional cast-in-place buildings[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2023.
- [29] 吕伟, 高奇英, 杨忠贵, 等. 水务泥渣性质特征及资源化途径研究[J]. 给水排水, 2023, 59(11):40-44.  
LÜ W, GAO Q Y, YANG Z G, et al. Research on properties of sludge in water facilities and its resource utilization[J]. Water & wastewater engineering, 2023, 59(11):40-44.

(上接第20页)

- [5] 刘国省, 史国梁, 焦泽栋. 基于数字孪生的预应力钢结构施工安全智能化分析方法[J]. 建筑科学与工程学报, 2022, 39(4):157-165.  
LIU Z S, SHI G L, JIAO Z D. Intelligent analysis method for pre-stressed steel structure construction safety based on digital twin[J]. Journal of architecture and civil engineering, 2022, 39(4):157-165.
- [6] 刘红波, 张帆, 陈志华, 等. 人工智能在土木工程领域的应用研究现状及展望[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2024, 46(1):14-32.  
LIU H B, ZHANG F, CHEN Z H, et al. Research status and prospect of artificial intelligence application in civil engineering[J]. Journal of civil and environmental engineering, 2024, 46(1):14-32.
- [7] 朱昊梁, 王幼松. 基于多源数据的结构安全性能智能化评估[J]. 建筑结构, 2024, 54(23):27-34.  
ZHU H L, WANG Y S. Intelligent evaluation of structural safety performance based on multi-source data[J]. Building structure, 2024, 54(23):27-34.
- [8] 刘纲, 陈奇, 雷振博, 等. 基于改进萤火虫算法的有限元模型修正[J]. 工程力学, 2022, 39(7):1-9.  
LIU G, CHEN Q, LEI Z B, et al. Finite element model updating method based on improved firefly algorithm[J]. Engineering mechanics, 2022, 39(7):1-9.
- [9] ELVELI B S, IDDBERG M B. 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.
- [10] LEE J, HYUN H. Multiple modular building construction project scheduling using genetic algorithms[J]. Journal of construction engineering and management, 2019, 145:04018116.