

人工智能赋能节段预制装配式桥墩抗震损伤评估技术研究综述

饶倩¹, 魏硕含¹, 范守定¹, 王城泉^{1,*}, 董腾方², 杨波³, 徐广振³

¹浙大城市学院工程学院, 浙江杭州, 中国

²浙江大学建筑工程学院, 浙江杭州, 中国

³中交第三公路工程局有限公司, 北京, 中国

*通讯作者

【摘要】节段预制装配式桥墩(PSBP)在加速桥梁建设中优势显著,但损伤集中于接缝与连接界面,自复位机制易掩盖局部损伤,传统评估方法适配性不足。本文阐述地震损伤评估概念与四类方法体系,分析PSBP损伤特征与评估难点。重点综述机器学习、计算机视觉、多模态融合及数字孪生在PSBP损伤评估中的应用。总结数据集不足、模型泛化性有限等挑战,指出物理信息神经网络、小样本学习、多模态融合及数字孪生驱动的全寿命健康监测是未来重要方向。

【关键词】节段预制装配式桥墩; 抗震性能; 损伤评估; 机器学习; 数字孪生

【基金项目】浙江省自然科学基金项目(编号:LTGG23E080001);浙大城市学院2026年大学生创新训练计划项目(编号:X202601057、X202601071)

1.引言

加速桥梁建设(Accelerated Bridge Construction, ABC)的核心思路在于最大限度地现场湿作业转移至工厂完成,以缩短工期并提升工程质量。节段预制装配式桥墩(Segmental Precast Assembled Bridge Piers, PSBP)正是这一理念的典型产物:节段在工厂预制养护后运抵现场拼装,既加快了施工进度,又保证了构件质量[1-4]。与现浇桥墩相比,PSBP具有残余变形小、受损节段可更换等突出优势,在震后快速修复场景中展现出良好的应用前景[1,2]。

然而,PSBP的受传力机制与现浇桥墩存在本质差异。其纵向钢筋通常在接缝处不连续,地震作用下接缝先行张开、界面发生滑移、边缘混凝土易被压碎,损伤呈现显著的局部集中特征[5-9]。更为复杂的是,自复位体系使震后残余位移维持在较低水平,容易给人“结构完好”的错觉,而接缝、混凝土及连接件实际上已发生不同程度的损伤[6,7]。这意味着,仅凭墩顶位移或延性系数等整体指标,难以准确判定PSBP的真实损伤状态,亟需发展适配其受力特点的专用评估方法。

与此同时,桥梁抗震的设计理念正经历深刻转变——从传统的“防止倒塌”逐步迈向“损伤可控、功能可恢复”[10,11]。这一转变对震后评估提出了更高要求:不仅要判断结构“坏没坏”,还要明确“伤在哪、伤多重、能不能

修、恢复到什么程度”。位移延性、能量耗散、Park-Ang双参数等传统方法虽能反映结构整体性能的变化趋势,但对PSBP接缝局部损伤和隐蔽缺陷的刻画能力明显不足[10-14]。近年来,机器学习、计算机视觉和数字孪生技术的迅猛发展,为PSBP损伤识别与多源信息融合评估开辟了新的技术路径[15-22]。

目前,针对PSBP抗震损伤评估的研究已取得一定进展,但相关成果较为分散,缺乏系统性的梳理与评述。基于此,本文以PSBP抗震损伤评估为研究对象,在阐释地震损伤评估基本概念与方法体系的基础上,系统梳理国内外代表性研究成果,重点分析数字孪生与智能算法在该领域的应用现状,进而总结当前研究瓶颈并展望未来发展方向,以为后续研究提供参考。

2.地震损伤评估的基本理论与方法

2.1 地震损伤评估的概念与内涵

地震损伤评估是指依据结构在地震前后的响应信息和状态数据,判断构件的损伤程度、空间分布及剩余承载能力[10-12]。震后最迫切的问题是:桥梁是否损坏、损伤位于何处、损伤程度如何、结构能否修复、能否继续服役。这些问题直接关系到震后应急通行决策和修复资源配置。

PSBP与现浇桥墩的损伤机理存在本质差异。现浇桥墩的损伤以塑性铰区材料非线性为主,整体侧移与局部损伤之间具有较好的对应

关系；而 PSBP 的损伤首先在接缝附近萌生，自复位机制又压低了残余位移，形成“整体变形有限、但局部已明显受损”的矛盾局面[6,7,11,12]。因此，PSBP 的损伤评估不应照搬现浇桥墩的评价体系，而应遵循“从局部损伤查起、再到整体性能判定”的逻辑路径。

2.2 损伤评估的主要方法体系

表 1.主要损伤评估方法/模型对比

方法/模型	代表性提出者(年代)	核心公式/模型	主要适用指标	优点	局限
位移/延性指标	Park 等(1985); 梁金宝等(2021)	漂移率 $\mu=\Delta/\Delta_y$; 延性系数	墩顶位移、残余位移	简单直观、易与性能目标挂钩	难反映局部损伤；易低估自复位体系损伤
能量类指标	欧进萍等(1999); 梁金宝等(2021)	$D=\delta_{\max}/\delta_u + \beta \int dE/(F_y \delta_u)$	累积耗能、变形-能量双参数	反映循环累积损伤	依赖完整滞回曲线；现场操作性弱
Park-Ang 综合模型	Park & Ang(1985)	$D=\delta_m/\delta_u + \beta \cdot E_h/(F_y \delta_u)$	最大变形+累积耗能	可定量描述损伤	参数依赖试验标定；默认损伤连续发展
改进 PSBP 损伤模型	张于晔等；杨雪成(2026)	在双参数中引入连接/耗能分区项	接缝开口、耗能单元塑性	适配拼接构造差异	仍需针对性试验标定
地震易损性分析	胡志坚等(2022); 葛宁等(2023)	$P[DS \geq c I/M] = \Phi((I/M - \mu)/\sigma)$	漂移率、轴向剩余承载力	概率表达清晰、便于比选	阈值敏感、假设依赖较强

按所依据的物理量和建模思路，现有损伤评估方法可划分为四类，其分类关系如图 1 所示。第一类是位移指标法，主要包括墩顶漂移率和位移延性系数。该类方法物理意义明确、计算简便，常与性能等级划分配合使用[11,12]。但其主要反映结构的整体侧移变形，对 PSBP 接缝等局部损伤的敏感性不足。第二类是能量指标法，通过累积耗能或变形-能量双参数来描述结构在低周循环荷载下的性能退化过程[12]。该类方法比单一位移指标更贴近损伤演化的物理本质，但需要完整的滞回曲线和高质量的试验数据，现场快速评估的操作性不强。第三类是综合损伤模型，以 Park-Ang 双参数模型为代表，同时考虑最大变形响应和累积耗能两个因素，可给出定量化的损伤指标[10,12,23]。针对 PSBP 已有多种修正形式，但模型参数依赖试验标定，且其基本假设——损伤与变形连续对应——与 PSBP 离散化的损伤特征不完全吻合[11,12]。第四类是地震易损性分析方法，将地震动强度、结构响应和损伤状态通过概率模型相关联，给出结构超过各级损

伤状态的条件概率[11,24,25]。该方法适用于方案比选和风险评估，但评估结果对损伤阈值和模型假设较为敏感。表 1 对上述四类方法的代表性提出者、核心模型、适用指标及其对 PSBP 的适配性进行了系统比较。总体而言，单一方法均难以全面刻画 PSBP 的损伤特征，这正是后续引入多源信息和智能方法的根本动因。

2.3 传统损伤评估方法在 PSBP 中的应用研究

国内学者对传统评估方法在 PSBP 中的适用性开展了系列研究，如表 2 所示。梁金宝等[12]采用变形-能量双参数模型评估了 8 度区装配式混凝土桥墩的抗震性能；胡志坚等[11]对预制拼装桥墩进行了地震易损性分析，建立了漂移率与损伤等级的对应关系；杨雪成[23]针对设置耗能钢筋的预制双柱式桥墩建立了地震损伤模型；黄子萱等结合梯级抗震双柱式拼装桥墩试验，将改进损伤指标与不同震害等级进行了对应[24]，葛宁等[26]分析了轨道交通高架桥预制拼装桥墩的易损性。国外方面，Chácara 等[14]通过砌体结构模态损伤试验指出传统方法在复杂损伤状态量化方面的不足；Srinithya 等[27]在准脆性材料疲劳损伤综述中强调多源数据融合与智能识别的潜力；Hilal 等[28]研究了构造分段和耐火膨胀缝界面在火致损伤定位中的作用。

表 2.国内外代表性损伤评估研究对比

研究者(年代)	采用方法	研究对象	主要结论/贡献
梁金宝等(2021)	变形-能量双参数	8 度区装配式混凝土桥墩	实现装配式桥墩抗震性能量化评估
胡志坚等(2022)	地震易损性分析	预制拼装桥墩	建立漂移率-损伤等级易损性曲线
葛宁等(2023)	易损性分析	轨交高架预制拼装桥墩	比较不同连接形式抗震脆弱性
杨雪成(2026)	耗能钢筋损伤模型	预制双柱式桥墩	提出双柱式拼装桥墩地震损伤模型
Chácara 等(2026)	模态损伤评估	砌体交叉拱	揭示传统方法复杂损伤量化不足
Srinithya 等(2026)	疲劳损伤综述	准脆性材料	指出多源融合与智能识别方向
Hilal 等(2026)	火致损伤定位	构造分段界面	界面特征影响损伤定位与服务性

由上表可以发现，传统方法在 PSBP 中具备一定的可用性，但存在共性问题：位移指标、能量指标、Park-Ang 类模型大多建立在现浇桥墩的连续损伤演化假设之上，迁移至 PSBP 的接缝主导、自复位和局部集中损伤特征时，评估精度和稳定性均有不足。

2.4 节段预制装配式桥墩的损伤特征与评估难点

PSBP 的损伤呈现两大特征：一是“位置特定”，二是“表现隐蔽”。接缝区域既是转动和开裂的优先发生位置，也是损伤最集中的部位，裂缝宽度通常比非接缝区大 2 至 8 倍[28,29]。底部节段混凝土压碎、接缝开闭往复、节段滑移错台、灌浆缺陷导致的刚度突变，均是 PSBP 的典型损伤形式[29,30]。自复位体系虽使残余位移维持在较低水平，但接缝反复开合、边缘混凝土压碎和预应力损失会逐步累积[6,7]，形成“残余位移小、但实际损伤不轻”的矛盾状态。

现浇桥墩与 PSBP 在评估逻辑上存在显著差异如表 3 所示，传统模型假设损伤在塑性铰区连续扩展，而 PSBP 的损伤集中在接缝和界面处，兼具隐蔽性和离散性。评估工作不仅要判断“是否损坏”，还需查明损伤的具体位置、损伤机理、可修复性及其对继续服役的影响[11,12,23]。传统单一指标难以覆盖上述评估需求，而这恰恰是人工智能方法可以发挥优势的切入点。

表 3.现浇桥墩与节段预制装配式桥墩损伤评估差异对比

比较项目	现浇桥墩	节段预制装配式桥墩
主要损伤部位	塑性铰区	接缝/连接区/局部耗能部件
损伤演化特征	连续发展为主	局部集中、界面化、离散化
残余位移与损伤关联	较强	可能失真
整体漂移指标适用性	较高	有限
隐蔽损伤比例	相对较低	相对较高
评估重点	整体性能退化	局部损伤识别+整体性能判定
震后决策目标	是否修复/加固	是否可修、换哪里、是否继续服役

2.5 研究现状的统计与分析

为反映近些年该主题论文的发表情况，本文以所引 40 篇文献为样本做了两类统计。第一类是研究主题分布如图 1 所示，分为桥墩构造与抗震性能、传统损伤评估方法、机器学习与深度学习、计算机视觉损伤检测、数字孪生与多模态监测、其他弱相关文献六个方向。第二类是发表年份分布如图 2 所示，按文献出版年份做了柱状统计。

从主题分布看，桥墩构造与抗震性能类文献最多，占 35%（14 篇），说明该领域目前仍以机理研究为主干，是评估方法发展的物理

基础。传统损伤评估方法类占 25%（10 篇），既有方法的适配和改进还是活跃方向。智能算法类（机器学习加计算机视觉）合计约 25%（10 篇），而且大多是 2024 年以后发表的，上升势头明显。数字孪生与多模态监测类占 12%（5 篇），起步晚但增长快。

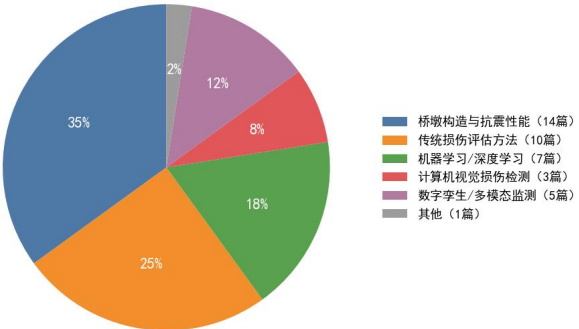


图 1.基于本文所引 40 篇参考文献的研究主题分布

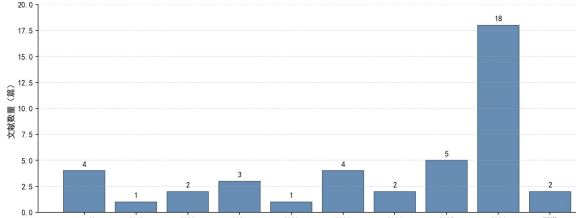


图 2.所引 40 篇文献的发表年份分布

从年份分布看，2019 年以前发表的文献只有 4 篇，属于该领域的早期积累阶段。2019 至 2023 年共 11 篇，是方法发展和试验验证的活跃期。2024 年以来发表的文献高达 25 篇（含 2 篇年份不详），其中 2026 年就有 18 篇，说明该方向正处于快速增长期，尤其智能算法和数字孪生相关的研究在最近两年集中涌现。国内研究力量以高校为主，在试验和评估方法方向比较集中；智能算法方向的国内外差距正在缩小。

3.数字孪生与智能算法在损伤评估中的应用

3.1 物理信息神经网络（PINN）

物理信息神经网络（PINN）的核心思想是把物理守恒律作为约束嵌入神经网络损失函数，让数据驱动与机理建模协同工作。它的好处是：既不必依赖大量标注数据，又能保证预测结果符合物理规律。陈震等[16]提出融合 PINN 与群智能优化算法做结构损伤识别，在 Benchmark 模型上验证了 PINN+PSO 的精度优势；李滨等[17]把 PINN 用到输电网运行方式生成，展示了物理约束在工程网络中的可迁移性。

图 3 给出了 PINN 的典型框架。物理约束项（动力学方程、Park-Ang 损伤指标、材料本

构)作为残差项进入总损失函数,与数据观测(振动响应、位移/应变监测、拟静力试验)共同驱动网络训练。PSBP的离散化损伤机制适合用PINN刻画:接缝张开闭合、混凝土压碎、预应力损失等机制都能以解析形式加入约束,缓解小样本问题。但PINN的训练对超参数(物理损失权重 α 、 β 、 γ)敏感,权重选择不当会出现“物理项压不住数据”或“数据项学不动”的极端倾向。

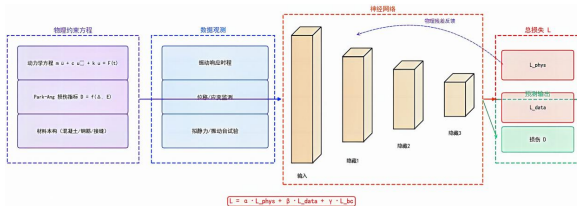


图 3.物理信息神经网络(PINN)框架

3.2 改进 YOLOv8n 目标检测

在 PSBP 震后表现损伤识别中,裂缝、错台、剥落等病害的小目标检测需求强烈。YOLOv8n 本身参数小、推理快,但原模型对细微裂缝的捕获能力有限。张云景等在 YOLOv8n 的基础上做了两项关键改进:一是把 Backbone 末端的 C2f 模块嵌入通道注意力(CA),让网络更聚焦于裂缝特征;二是优化特征金字塔网络(FPN)的多尺度融合路径,让 52×52 、 26×26 、 13×13 三个尺度的特征更合理地传递给检测头。

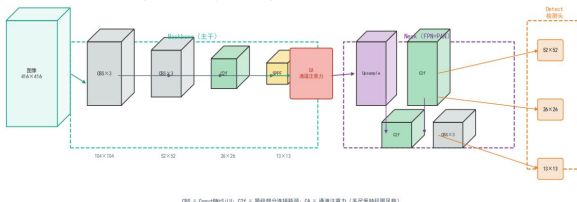


图 4.改进 YOLOv8n 网络结构

图 4 展示了改进 YOLOv8n 的整体结构。Backbone 由 CBS 卷积、C2f 跨级瓶颈和 SPPF 空间金字塔池化构成,Neck 通过 FPN+PAN 实现多尺度特征融合,检测头在 3 个尺度上输出检测结果。加入通道注意力后,模型对细微裂缝的检测精度有提升,但参数和计算量也略有增加。YOLO 类模型的优势是端到端推理和实时部署,适合震后桥梁群的快速筛查;短板是检不到灌浆缺陷这类隐蔽损伤。

3.3 物理引导 LSTM

PSBP 在循环加载下的损伤演化具有强时序性,单一帧的判断往往不够。Xin 等[31]提出物理引导 LSTM,用于预测预制节段接头的受力全过程。其核心思路是:在 LSTM 单元的损失函数中嵌入材料本构方程约束,让模型在

保持时序建模能力的同时,预测结果始终落在物理可行域内。

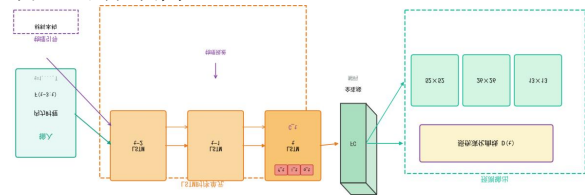


图 5.物理引导 LSTM 网络结构(据文献[30]整理重绘)

图 5 给出了物理引导 LSTM 的基本结构。LSTM 单元通过遗忘门、输入门、输出门控制时序记忆,物理本构作为额外损失项反馈到单元状态更新。预测输出端可以同时给出损伤演化曲线 $D(t)$ 和多尺度网格化结果。相对于纯数据驱动的 LSTM,物理引导 LSTM 在数据稀疏段表现更稳定,能学习初始刚度、极限挠度、破坏模式等关键参数。

3.4 多模态融合与数字孪生

PSBP 震害常是裂缝、错台、接缝开口几种形式同时出现,单一数据源说不全。何俊等[20]综述了面向深度学习的多模态融合技术。王凌波等[32]综述了桥梁健康监测技术。王震等[1]提出了面向预应力预制节段拼装桥墩的灾变智能监控系统,用高机敏混凝土监测模块和电信号回路实现受力状态的连续感知。多模态融合把评估从“震后检测”推向了“全过程监测”,是智能运维的基础。

数字孪生强调物理实体和虚拟模型的实时交互,可以动态模拟接缝开闭、自复位恢复和刚度退化过程。陶飞等[18,19]提出的数字孪生五维模型为桥梁全寿命管理提供了理论框架。Thiyagarajan[33]对数字孪生驱动的质量管理做了范围综述。把 PSBP 数字孪生模型跟 PINN 和多模态融合结合起来,有望实现损伤演化的动态模拟和维修决策的智能支持。表 4 把本章涉及的智能方法的输入数据、适合任务和优劣做了对比。各类方法互补性强,未来的方向更可能是“多模态融合加物理信息驱动加数字孪生”的综合框架。

表 4.人工智能方法在 PSBP 损伤评估中的主要应用场景、优势与局限

AI 方法	主要输入数据	适合任务	优势	局限
机器学习	振动、位移、频率、响应时程	状态分类、性能预测	处理非线性映射	小样本、泛化差
深度学习	图像、视频、多源信号	裂缝识别、损伤定位	自动特征提取	黑箱性强
计算机视觉	图像/视频	裂缝、错台、剥落识别	非接触、部署快	内部损伤难识别
多模态融合	图像+响应+应变等	综合评估	信息更全面	数据同步复杂

智能监测系统	传感网络、在线信号	连续监测、预警	实时性好	成本与耐久性问题
数字孪生	模型+实时监测数据	状态推演、决策支持	全寿命动态表征	建模与数据依赖高

4.结论

基于本文对PSBP抗震损伤评估领域代表性研究工作的梳理与对比分析,得出以下主要判断。

(1) PSBP 的损伤以接缝主导、局部集中和自复位明显为特征。现浇桥墩那套位移、能量、Park-Ang 和易损性方法搬过来用,对接缝的离散化、隐蔽化损伤刻画不稳,需要发展适配的评估体系。

(2) 国内外在试验模拟和传统方法适配方面积累了不少成果,但研究力量还集中在构造和性能机理层面。智能算法类文献虽然占比约 25%且增长快,但直接结合 PSBP 受力特点的专门评估方法还不多。

(3) 物理信息神经网络(PINN)、改进YOLOv8n 和物理引导 LSTM 在三类典型任务上各有优势:PINN 适合少样本+物理约束的损伤识别,改进 YOLOv8n 适合表观裂缝快速检测,物理引导 LSTM 适合损伤演化时序预测。多模态融合和数字孪生是支撑这些算法走向工程的关键底座。

(4) 后续应沿"机理—数据—模型—应用"的主线,重点发展数字孪生、多模态智能评估、物理信息神经网络和面向规范运维的工程化框架,把 PSBP 抗震损伤评估从经验分析推向智能化和全寿命管理。

参考文献

[1] 王震,王景全.预应力节段预制拼装桥墩抗震性能研究综述[J].建筑科学与工程学报, 2016, 33 (6) : 88-97.

[2] 梁倩倩,朱春阳,孙丽.预制节段拼装桥墩抗震性能研究综述[C]//第十五届沈阳科学学术年会论文集, 2018: 726-731.

[3] Shang A, Zhu G, Li M, et al. Recent Advances in Connection Methods and Seismic Performance of Precast Segmental Piers [J]. Buildings, 2026, 16(3): 608.

[4] 陈宏,李静,张菊辉等.预制拼装桥墩抗震技术发展及展望[J].城市道桥与防洪, 2025, (5) : 70-75.

[5] 汪劲丰,王宇同,向华伟等.采用大直径灌浆套筒连接的预制桥墩抗震性能研究[J].桥梁建设, 2024, 54 (3) : 39-45.

[6] Luong N C, He H, Yang C, et al. Towards a

low-damage seismic design: Developing and validating a performance-based design framework for segmental post-tensioned precast concrete piers [J]. Advances in Structural Engineering, 2026, 29(11): 2312-2331.

[7] Shaebi A R, Jiao X, Li N. Enhancing seismic resilience of precast segmental piers using external replaceable ring energy dissipator (ERRED) [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2026, 203: 110133.

[8] Haaj A M, Shami A Q, Li N, et al. Multi-directional quasi-static testing of unbonded post-tensioned precast segmental bridge piers: Effects of loading-path geometry, variable axial load, and direction-dependent boundary conditions [J]. Engineering Structures, 2026, 366(PA): 123299.

[9] Haaj A M, Shaebi A R, Amer M, et al. Seismic performance of precast segmental bridge piers under square orthogonal biaxial loading: Experimental investigation and RSM-based prediction [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2026, 209: 110470.

[10]欧进萍,何政,吴斌等.钢筋混凝土结构基于地震损伤性能的设计[J].地震工程与工程振动, 1999, (1) : 21-30.

[11]胡志坚,闫明辉,周知等.预制拼装桥墩地震易损性分析[J].土木工程学报, 2022, 55 (1) : 89-99.

[12]梁金宝,许维炳,陈彦江等.基于变形-能量双参数模型的 8 度区装配式混凝土桥墩抗震性能评估[J].工程抗震与加固改造, 2021, 43 (2) : 14-23.

[13]周敕,李嘉航,申心力等.灌浆缺陷对预制拼装桥墩抗震性能的影响研究[J].振动与冲击, 2026, 45 (4) : 245-258.

[14]Chácará C, Bendezú A, Pellegrini D. Experimental modal-based damage evaluation of masonry cross-vaults under quasi-static and dynamic cyclic loading [J]. Construction and Building Materials, 2026, 540: 147612.

[15]鲁勇,唐赛乾.基于机器学习的 FRP-钢混杂配筋混凝土梁承载能力预测研究[J].湖南交通科技, 2025, 51 (3) : 172-177.

[16]陈震,李锐杰,李晓克等.融合物理信息神经网络与群智能优化算法的结构损伤识别研究[J].振动工程学报, 2026: 1-14.

- [17]李滨,甘明浩,叶进宇等.基于物理神经网络的输电网运行方式智能生成方法[J].电工技术学报, 2026: 1-15.
- [18]陶飞,刘蔚然,张萌等.数字孪生五维模型及十大领域应用[J].计算机集成制造系统, 2019, 25 (1) 1-18.
- [19]陶飞,张贺,戚庆林等.数字孪生模型构建理论及应用[J].计算机集成制造系统, 2021, 27 (1) : 1-15.
- [20]何俊,张彩庆,李小珍等.面向深度学习的多模态融合技术研究综述[J].计算机工程, 2020, 46 (5) : 1-11.
- [21]曹晓明,张永和,潘萌等.人工智能视域下的学习参与度识别方法研究[J].远程教育杂志, 2019, 37 (1) : 32-44.
- [22]张琰,江辉,文霖等.薄壁墙式墩结构装配式方案及其抗震性能分析[J].东南大学学报(自然科学版), 2024, 54 (4) : 911-920.
- [23]杨雪成.设置耗能钢筋的预制双柱式桥墩地震损伤模型分析[J].工程抗震与加固改造, 2026, 48 (1) : 97-104.
- [24]黄子萱,宁晓骏,马沂帆.双柱式节段拼装桥墩抗震性能的影响因素分析[J].工业安全与环保, 2023, 49 (11) 73-78.
- [25]刘路,宗周良,周海飞等.近场爆炸作用下节段预制拼装 RC 桥墩的易损性评估[J].中国公路学报, 2024, (4).
- [26]葛宁,陈浩,章群等.轨道交通高架桥预制拼装桥墩的地震易损性分析[J].现代交通与冶金材料, 2023, 3 (1) : 65-70.
- [27]Srinithya A, Kishen C M J. An Overview on Damage Assessment due to Fatigue in Quasi-Brittle Materials [J]. Journal of the Indian Institute of Science, 2026: 1-36.
- [28]Hilal G, Necdet T. Performance-Based Role of Structural Segmentation and Fire-Rated Expansion Joint Interfaces in Fire-Induced Damage Localization and Postfire Serviceability [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2026, 40(5).
- [29]Wang T, Liu L, Bao P, et al. Experimental study on seismic performance of precast segmental bridge piers with large-diameter grouted sleeve connections [J]. Structures, 2026, 89: 112130.
- [30]陈挺地,王胜斌,冯克岩等.不同连接构造的预制拼装钢管混凝土桥墩数值模拟与地震响应特点[J].振动与冲击, 2024, 43 (7): 134-143.
- [31]Xin R, Juntong Z, Xianlin W. Predicting failure process of precast deck joints using physics-guided LSTM [J].
- [32]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.
- [33]Thiyagarajan S. Digital twin-driven supply chain quality management for strengthening manufacturing resilience: a scoping review [J]. International Journal of Quality & Reliability Management, 2026, 43(8): 2041-2074.