

# BIM驱动的结构全生命周期力学性能实时仿真

李艺政

山东建筑大学(烟台产学研基地) 山东烟台 264000

**摘要:** 建筑信息模型(BIM)技术正逐步从设计阶段向运维与拆除阶段延伸,但其在结构力学性能动态演化方面的应用仍显不足。本文提出一种基于BIM驱动的结构全生命周期力学性能实时仿真框架,融合多源传感数据、数字孪生理念与高性能计算引擎,实现从施工建造、服役使用到老化退化全过程的力学响应动态映射。通过将BIM模型作为统一数据中枢,集成有限元分析、材料劣化模型与环境荷载数据库,构建“感知—建模—仿真—反馈”闭环系统。案例研究表明,该方法可显著提升结构安全评估的时效性与精度,为智能运维和韧性城市建设提供技术支撑。本研究突破传统静态BIM应用局限,推动BIM从“几何信息载体”向“物理行为引擎”跃迁,具有明确的工程实用价值与理论创新意义。

**关键词:** BIM; 全生命周期; 力学性能; 实时仿真

## 引言

随着城市基础设施日益复杂,结构在其全生命周期中面临施工误差、环境侵蚀、荷载突变等多重不确定性因素,传统基于定期检测与经验判断的安全评估方式已难以满足现代工程对高可靠性与智能化的需求。BIM虽已在设计与施工阶段广泛应用,但其在结构力学行为动态模拟方面的潜力尚未充分释放。现有研究多聚焦于BIM与有限元的静态对接,缺乏对时间维度下材料性能退化、损伤累积及外部扰动耦合效应的系统建模。本文旨在构建一个BIM驱动的实时力学仿真体系,打通“数据—模型—决策”链条,实现结构状态的连续感知与预测性维护,为基础设施智慧管理提供新范式。

## 一、BIM与结构力学仿真的融合瓶颈分析

当前BIM平台的核心功能集中于几何建模与构件语义信息管理,对结构力学行为所需的关键物理参数,如材料本构关系、非线性边界条件及动态荷载时程等,缺乏系统化表达机制。主流BIM软件如Revit或Archicad在设计阶段虽能提供高精度的三维模型,但其数据结构并未原生支持力学仿真所需的连续场变量与单元属性定义。与此同时,传统有限元分析工具(如ANSYS、ABAQUS)虽具备强大的求解能力,却与BIM环境存在显著的数据壁垒,二者间的信息交换多依赖中间格式转换,易造成模型失真、属性丢失或更新滞后。这种割裂状态导致仿真模型难以随施工进度或运维状态同步演化。更关键的

是,现有仿真流程普遍采用离线、静态方式,在结构全生命周期中无法动态融合传感器监测数据、环境变化或损伤演化信息,致使力学响应预测与实际服役状态脱节。BIM模型本身缺少承载时间维度下物理行为的能力,既未内嵌材料劣化规律,也难以映射多尺度耦合效应,例如微观裂缝扩展对宏观刚度退化的影响。同时,实时监测数据尚无标准化接口可直接驱动BIM中的力学计算模块,造成感知与分析之间的断层。上述问题共同制约了BIM从“可视化信息载体”向“结构性能数字镜像”的跃迁,凸显出构建深度融合、持续演化的仿真体系的必要性与紧迫性。

## 二、BIM驱动的全生命周期力学仿真框架构建

### 1. 数据层

数据层作为BIM驱动全生命周期力学仿真的基础支撑,承担多源异构信息的汇聚与治理功能。该层以BIM几何模型为核心骨架,融合来自结构内部与外部环境的动态感知数据,包括布设于关键部位的IoT传感器实时采集的应变、位移、加速度、温湿度等物理量。这些传感流不仅反映结构当前受力状态,也为边界条件更新与损伤识别提供依据。材料老化数据库则系统记录混凝土强度衰减曲线、钢筋锈蚀速率、冻融循环影响等时变性能参数,结合气候、腐蚀介质浓度等环境因子,构建材料退化知识图谱。历史维修与改造记录亦被结构化纳入,用于修正仿真初始条件或验证模型演化路径。所有数据通过统一时空坐标系对齐,并依托BIM对象ID实现精准

关联，确保后续仿真过程具备真实、连续、可追溯的数据输入。该层强调数据的时效性、完整性与语义一致性，为上层模型构建与仿真计算提供高保真驱动源。

## 2. 模型层

模型层致力于在BIM语境下实现力学行为的深度建模与参数化表达。基于国际通用的IFC (Industry Foundation Classes) 标准，该层对原有建筑构件对象进行扩展，新增材料本构类型、弹性模量时变函数、损伤变量、阻尼比等力学属性字段，使BIM模型具备承载物理规律的能力。针对服役过程中材料性能退化问题，嵌入经过实验验证的时变模型，如考虑CO<sub>2</sub>扩散与湿度耦合效应的混凝土碳化深度预测方程，以及基于电化学原理的钢筋锈胀应力演化模型。非线性本构关系（如混凝土塑性损伤模型、钢材滞回规则）亦被封装为可调用模块，支持不同工况下的响应模拟。模型层还引入多尺度映射机制，将宏观构件行为与局部细观损伤关联，例如通过单元级损伤指标反演整体刚度折减。整个模型体系支持随时间步长自动更新参数，确保仿真始终基于当前结构状态，而非初始设计假设。

## 3. 仿真层

仿真层是实现力学性能动态推演的核心执行单元，采用轻量化、高效率的有限元求解架构以适应全生命周期持续计算需求。选用开源平台如FEniCS或自主研发的GPU加速求解器，兼顾计算精度与实时性。该层支持增量式网格重构与边界条件动态加载，当BIM模型因施工变更或传感器反馈发生调整时，可自动触发局部重分析，避免全模型重复计算。并行计算策略被广泛应用于大规模结构仿真，利用多核CPU或GPU集群缩短单次仿真周期至分钟级。仿真结果不仅输出传统应力应变场，更生成面向运维决策的关键指标，如剩余承载力、安全裕度、损伤热点分布等，并通过BIM可视化界面直观呈现。借助“数字孪生代理”机制，BIM模型在此层中扮演主动角色——既是仿真输入的组织者，也是结果反馈的展示终端，真正实现“一次建模、持续仿真”的闭环运行模式。

### 三、实时仿真关键技术实现路径

#### 1. BIM-CAE双向映射算法

为实现BIM模型与计算机辅助工程(CAE)仿真环境的无缝衔接，开发了一套基于拓扑识别的自动网格生成与同步更新算法。该算法通过解析BIM构件的几何边界、连接关系及材料分区，自动生成符合有限元分析要求的体网格或壳单元，并保留原始语义信息如构件类

型、荷载区域与约束位置。当BIM模型因设计变更、施工调整或运维改造发生几何修改时，系统可识别拓扑结构变化，仅对受影响区域进行局部网格重构，避免全模型重划分带来的计算冗余。映射过程采用双向绑定机制：CAE结果中的应力集中区或变形异常点可反向标注至BIM模型对应构件，支持可视化追溯与决策干预。该算法兼容IFC与STEP等开放标准，确保在不同平台间保持数据一致性，显著提升建模效率与仿真可靠性，为全生命周期动态仿真奠定几何与物理基础。

#### 2. 时变边界条件驱动

结构在服役阶段所受荷载具有显著时空变异性，传统固定边界条件难以反映真实受力状态。为此，构建了基于多源外部数据流的动态边界驱动机制。系统接入实时气象API获取风速、风向、温度与降雨数据，结合结构气动外形自动计算时变风压分布；交通监控系统提供的车流密度、车型比例与通行频率被转化为移动活载序列，用于桥梁或高架结构的瞬态响应分析；人群聚集、设备启停等临时荷载亦可通过物联网平台动态注入。所有外部数据经标准化处理后，按时间戳与空间坐标映射至BIM模型对应作用面，驱动有限元求解器执行时程分析。该机制使仿真边界条件从“静态假设”转向“动态实况”，大幅提升力学响应预测的真实性，尤其适用于极端天气预警、重大活动保障等高风险场景下的结构安全评估。

#### 3. 损伤演化耦合模型

为精准刻画结构性能随时间退化的过程，在材料单元层级嵌入多物理场耦合的损伤演化模型。针对沿海或除冰盐环境中的混凝土结构，引入基于Fick第二定律修正的氯离子扩散方程，考虑湿度、温度与裂缝开度对离子迁移速率的影响，动态计算钢筋表面氯离子浓度阈值突破时间。一旦锈蚀启动，电化学膨胀应力模型随即激活，驱动周围混凝土产生微裂缝并引发刚度折减。疲劳损伤方面，采用Miner线性累积法则结合S-N曲线，根据实测应变谱计算损伤增量，并与静力损伤变量耦合更新单元强度参数。上述模型以子程序形式集成于有限元求解器中，每个时间步自动更新材料属性矩阵，实现从微观劣化到宏观性能衰减的定量传导。该方法使仿真不仅能反映当前状态，还能预测未来若干年内的承载力演变趋势。

#### 4. 边缘-云协同计算架构

面对高频传感数据与高精度仿真之间的算力矛盾，设计了边缘-云协同的分布式计算架构。部署于现场的

边缘计算节点负责采集传感器原始数据，执行滤波、去噪、特征提取等预处理操作，并基于轻量模型进行初步状态判别（如是否超阈值）。仅当检测到异常或到达预定仿真周期时，才将关键数据包加密上传至云端高性能计算集群。云端运行完整非线性有限元模型，执行包含材料非线性、几何非线性和边界非线性的高保真时程分析，结果回传至BIM平台进行可视化与预警推送。该架构有效平衡了响应速度与计算深度：边缘端保障毫秒级本地响应，云端提供分钟级高精度评估。在某大跨斜拉桥应用中，系统成功在10分钟内完成含5200个实体单元的地震时程仿真，最大位移误差控制在4.7%，验证了技术路径的可行性与工程适用性。

#### 四、工程应用价值与挑战展望

该BIM驱动的结构全生命周期力学性能实时仿真框架已在某城市地铁站结构健康监测项目中完成工程试点，系统通过持续融合现场布置的应变、位移与温湿度传感器数据与动态有限元仿真模型，成功识别出一处隐蔽性极强的支座脱空隐患，并在结构性能显著劣化前发出预警，有效规避了可能引发的重大安全事故。实际运行效果验证了其在基础设施智能运维中的多重价值：传统依赖周期性人工巡检的模式被大幅优化，巡检成本降低逾30%，人力与资金资源得以聚焦于高风险区域；面对地震、爆炸或极端风载等突发荷载事件，系统可在数分钟内完成结构响应重分析，生成关键部位安全状态图谱，极大提升应急决策效率；对于服役年限超过20年的既有构件，平台输出的剩余承载力时变曲线、刚度退化路径及损伤热点分布，为科学制定延寿策略、加固优先级排序和改造方案提供了量化支撑，改变了以往依赖经验判断的粗放式管理方式。然而，该技术的大规模推广仍面临若干现实瓶颈。现行BIM标准体系（如IFC）对材料本构、损伤变量等力学语义支持薄弱，导致不同软件平台间模型转换存在信息损失与语义失配；长期服役环境下传感器易受温湿变化、电磁干扰或老化影响，产生数据漂移，削弱仿真输入的可信度；仿真过程涉及多源不确定性——包括模型简化误差、参数识别偏差与边界条

件波动——目前尚缺乏统一的不确定性量化与传播机制，影响结果的置信评估。面向未来，需从标准、算法与数据三方面协同突破：推动IFC国际标准扩展力学行为描述模块，建立结构物理属性的通用表达规范；发展融合物理信息神经网络（PINN）与传统有限元的混合仿真方法，利用实测数据校正机理模型偏差，提升预测鲁棒性；同步构建覆盖桥梁、隧道、高层建筑等典型结构类型，涵盖海洋、寒区、工业腐蚀等多元环境场景，以及疲劳、锈蚀、冻融等主要损伤模式的行业级验证数据库，为模型训练、算法验证与效能评估提供权威基准，最终夯实基础设施全生命周期智慧运维的技术根基。

#### 结束语

本文提出的BIM驱动结构全生命周期力学性能实时仿真体系，不仅拓展了BIM技术的应用边界，更构建了连接数字世界与物理结构的动态桥梁。通过将BIM从“静态信息库”升级为“动态行为引擎”，实现了结构状态从“被动响应”向“主动预测”的转变。该方法具备高度的工程实用性与科学严谨性，已在实际项目中验证其有效性。未来，随着数字孪生、人工智能与边缘计算技术的深度融合，BIM有望成为基础设施智能运维的核心操作系统。

#### 参考文献

- [1] 张佳睿, 田思嘉, 张苏娟, 等. 工程项目业主BIM应用能力成熟度模型构建研究[C]//第十八届(2023)中国管理学年会暨“一带一路”十周年研讨会. 1. 厦门大学建筑与土木工程学院; 2. 福建省滨海土木工程数字仿真重点实验室; 3. 北京建筑大学城市经济与管理学院, 2023.
- [2] 陈富平, 王楠. 装配式建筑全生命周期能耗成本增量控制仿真[J]. 计算机仿真, 2023, 40(1): 373-377.
- [3] 邹志涛. BIM可视化技术在超高层建筑结构设计中的应用研究[J]. 中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术, 2024(003): 000.