

存量建筑结构模型还原与荷载耦合作用下 承载力达标性检测分析

李龙山

广东 广州 510000

DOI:10.61369/UAID.2026030036

摘 要： 本论文针对既有建筑结构，全面研究模型复原与荷载耦合效应下的承载力达标状况检测。提出多源数据融合的精准化建模技术，整合现场检测、历史档案以及数值模拟来提高模型精准度；建立多荷载协同作用下的模型，揭示耦合效应下内力的分布规律；结合静动态检测与工程实例验证方法的有效性，为存量建筑的安全评估提供可靠的技术支撑，实现理论与实践的双重突破。

关 键 词： 存量建筑；模型还原；荷载耦合

Restoration of Existing Building Structural Models and Analysis of Bearing Capacity Compliance Testing under Load Coupling

Li Longshan

Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： This paper comprehensively studies the detection of bearing capacity compliance under the coupling effect of model restoration and load on existing building structures. Propose precise modeling techniques for multi-source data fusion, integrating on-site detection, historical archives, and numerical simulations to improve model accuracy; Establish a model under the synergistic effect of multiple loads to reveal the distribution law of internal forces under coupling effects; By combining static and dynamic detection with engineering case verification methods, reliable technical support is provided for the safety assessment of existing buildings, achieving a dual breakthrough in theory and practice.

Keywords： existing buildings; model restoration; load coupling

引言

随着我国城市更新战略的持续推进，既有建筑的安全性能评估与改造升级为行业关注重点。2022年施行的《既有建筑维护与改造通用规范》（GB 55022-2022）明确规定对既有建筑结构承载能力开展精确检测，为后续相关工作提供规范引导。既有建筑结构模型重建要整合现场检测数据和数字化建模方法，搭建体现实际状况的精准化数值模型；荷载耦合作用机制的研究会揭示多源荷载（恒载、活载、地震等）协同效应给结构内力分布带来的影响，这两者共同形成承载力达标性检测的主要基础。文章围绕模型还原原理、荷载耦合分析及检测方法开展系统研究，目的是为存量建筑安全评定与改造提供科学支撑，以促进城市更新行动的高质量推进。

一、存量建筑结构模型还原基础

（一）模型还原理论基础

存量建筑结构模型复原是根据既有建筑实际状况建立精确数值模型的流程，其理论方案要整合结构特征提取与数值建模准则。结构特性提取要通过现场检测来获取材料性能、几何参数以及损伤状态等主要信息，例如混凝土强度回弹测试、钢筋锈蚀程度评定等，这些数据是模型复原的基础^[1]。数值建模的原理是根据结构力学和有限元理论，把提取的特征参数转变为能够计算的模型参数，包括单元类型的挑选、边界条件的设定以及荷载工况的模拟等。模型复原于承载力分析里的重要意义表现为，仅依靠

设计图纸建立的模型难以体现结构服役之后的性能衰退，而复原模型能够更真切地模拟结构实际的受力状况，为承载力达标性检测提供可靠的根据。通过理论框架的支持，模型复原能够实现从物理构造到数值模型的精确映射，保障后续荷载耦合作用分析的精确性。

（二）模型还原技术实现

存量建筑结构模型复原基础里的模型复原技术实现，要结合非接触式量测与数字化建模办法，来精确显示结构实际状况。激光扫描技术通过发射激光束来获取结构表面的点云数据，能够迅速捕捉构件的尺寸、空间位置以及损伤特征。其操作步骤包括现场扫描路径的规划、点云数据的采集与去噪处理，经过配准和拼

接之后生成三维点云模型，为后续的结构几何建模奠定基础^[2]。BIM 技术通过点云数据开展构件参数化建模工作，把结构构件的几何信息、材料属性以及连接方式整合成数字化模型。同时结合现场检测所获得的材料强度、钢筋配置等数据，对模型的力学参数予以补充，让模型能够更真切地体现结构的承载力特性。操作时要通过点云与 BIM 模型的拟合验证，校正建模偏差，保证模型和实际结构相符，为后续荷载耦合作用时的承载力分析提供可靠的数字化基础。

二、荷载耦合作用下的承载力建模

（一）荷载耦合作用机理

荷载耦合作用原理是存量建筑结构承载力建模的主要部分，要关注多源荷载（风、地震、活载等）的相互影响机制与临界组合形式。风荷载和地震作用的耦合通常体现为动力效应叠加，风致震动或许会放大地震响应的峰值加速度，而地震引发的结构变形又会改变风荷载的分布样式，二者的相位差与频率耦合特性直接影响结构内力的分布规则^[3]。活荷载当作静力荷载时，其空间分布的随机性会和动力荷载（风、地震）构成非线性组合，比如楼面活荷载的局部聚集或许会加重结构薄弱之处在地震作用下的应力集中。临界荷载组合方式要考虑荷载的概率分布特性，通过可靠度理论明确不同荷载组合的超越概率，比如风荷载和地震作用的组合要根据极值统计模型分析二者同时作用的概率界限，而活载和风荷载的组合则需结合时程分析手段模拟荷载的动态叠加进程。多源荷载的耦合并非单纯线性累加，而是通过结构的动力特性产生协同或抵消作用，要通过数值模拟和试验验证来揭示其内在机制，为承载力建模提供理论支撑。

（二）承载力数学建模

在荷载耦合效应下开展承载力建模时，要考虑存量建筑结构的复杂特性，搭建多荷载协同作用的数学模型。首先根据结构力学的基本原理，把恒载、活载、风荷载以及地震作用等荷载效应予以耦合，建立考虑荷载组合系数的极限状态方程式，通过引入荷载效应组合系数矩阵，实现不同荷载工况时的内力叠加分析。运用有限元模拟技术时，要对既有建筑的材料参数、几何尺寸以及边界条件开展精确还原，结合实测数据对模型做参数优化，例如通过灵敏度分析来调整混凝土弹性模量、钢筋屈服强度等主要参数，从而提高模型和实际结构的符合度。引入可靠度理论来对模型开展验证工作，计算承载力极限状态时的可靠指标，保证模型在荷载耦合作用时的准确性和安全性^[4]。在模型搭建进程中要全面考量存量建筑的材料老化、构件损坏等要素，通过引入损伤系数来修正承载力计算式，让数学模型更符合实际服役情形下的结构反应，为后续承载力达标的检测提供科学支撑。

三、承载力达标性检测分析

（一）评估指标体系

1. 承载力关键指标

在存量建筑的结构模型还原以及荷载耦合作用影响下的承载

力达标性检测分析里，承载力的主要指标属于评估结构安全状况的核心根据，要结合结构特性与荷载耦合场景来界定定量指标。极限承载强度作为重要指标之一，是指结构在荷载共同作用下（像恒载和活载叠加、静载与动载组合）能够承受的最大荷载数值，该数值要通过模型还原后的力学分析来确定，直接体现结构抵抗破坏的能力^[5]。安全余量是结构实际承载能力和设计荷载或者使用荷载的差值和设计荷载的比率，此指标要考虑模型还原的精准度（像材料参数误差、几何尺寸偏差）以及荷载耦合的不确定性，通过量化分析确定结构在正常使用和极限状态时的安全储备。另外变形限制指标（像层间位移角、构件挠度）同样要纳入主要指标体系，原因是荷载耦合作用时的变形超出限值或许会导致结构功能失效，甚至引发连锁性破坏。这些指标要根据模型还原的精确性以及荷载耦合的动态特征开展动态调节，保证检测分析的结果能够确实体现存量建筑的承载力达标状况，为后续的加固或者维护提供科学的根据。

2. 达标判定标准

承载力达标状况检测分析通过科学完善的评估指标体系和严谨的达标判定准则，对存量建筑结构安全状态予以精准量化评估，为结构安全管控提供可靠依据。评估指标体系涵盖核心静态指标与关键动态指标，其中静态指标包括结构关键部位的应力、形变及裂缝宽度，直接反映结构当前受力状态和损伤程度；动态指标则引入荷载效应比、延性系数等，结合结构动力学特性，全面考量结构在不同荷载作用下的受力响应规律，确保评估指标与结构类型、实际荷载工况高度匹配，提升评估的针对性和准确性。达标判定准则主要包括规范阈值设定与失效模式评估两部分：阈值设定以现行建筑结构设计规范的限值为基础，充分考量建筑使用过程中材料老化、环境侵蚀导致的材料退化，以及长期荷载作用下的损伤累积效应，通过数值模拟分析与现场实测数据相互校准，确定合理的判定阈值；失效模式评估针对框架、剪力墙、砌体等不同结构体系，精准识别典型失效路径，结合多荷载耦合作用下的内力重分布特性，明确结构从局部构件损伤、性能劣化到整体失稳破坏的临界状态，为存量建筑安全评估、隐患排查及加固改造提供坚实的技术支撑^[6]。

（二）检测技术方法

1. 静态检测技术

静态检测方法通过模拟真实荷载响应来评定结构承载能力。实验设计要结合荷载耦合特征，明确加载形式与量级，保证工况和实际相符。收集位移、应变信息，记载主要位置变形和裂缝。此案例里某框架结构在恒荷载和风荷载共同作用下，梁的应变没有超出限值，不过节点处出现细微裂缝。此技术对耦合荷载作用下的承载性能进行量化，为安全评估和加固工作提供直接的参考根据，要结合模型开展还原综合分析^[7]。

2. 动态检测技术

动态监测技术通过捕捉结构在荷载耦合作用下的动力反应，实现承载力的实时评定。执行流程包括：于主要位置布置加速度计、应变计等，收集恒载和活载耦合时的振动、应变信息；通过模态分析确定固有频率、阻尼比等参量，反推结构刚度与承载力

的动态改变。此技术打破静态检测的限制，能够实时体现荷载耦合时承载力的变化，特别适合地震、风载和使用荷载耦合的工况。研究显示它可有效捕获非线性响应，为既有建筑承载力达标性分析提供精确动态数据支撑^[8]。

四、案例研究与验证

（一）案例背景与数据准备

1. 案例对象选择

挑选2005年建成的某6层钢筋混凝土框架结构办公楼作为案例，该办公楼处于7度区，柱网尺寸为6m×6m，梁的截面是250mm×500mm，柱的截面为400mm×400mm，已投入使用18年。搜集设计阶段的恒载、活载、施工荷载以及近10年使用荷载的变动信息。此建筑保存有完整的设计图纸、施工记录以及验收资料，能够通过现场回弹和钢筋扫描来获取材料和配筋方面的信息，再结合历史荷载数据建立精确的有限元模型，符合承载力达标性检测的条件^[9]。

2. 数据采集与处理

选择2005年建造的框架办公楼作为案例，围绕功能改造实施承载力检测。数据收集阶段，在梁端、柱顶等主要位置布置光纤光栅应变计以及振动传感器，取得荷载耦合响应。数据处理运用小波去噪和卡尔曼滤波手段，去除干扰同时对时程数据进行动态校正。根据竣工图纸、材料试验及无损检测成果，通过BIM建立精细化有限元模型，输入荷载耦合数据开展时程分析，为承载力达标状况评估提供可靠根据。

（二）模型应用与仿真实施

1. 模型还原具体过程

以2005年框架式办公楼为例，模型复原过程：运用三维激光扫描（精度±3mm）来获取点云数据，经过处理之后建立BIM模型，再结合图纸并通过钻芯来修正材料参数。检测到梁的尺寸偏差为±5%，保护层厚度减少10mm，经修正后的模型误差可控制在8%以内。初步评估表明，恒活荷载作用下底层柱的轴压比为0.72（限值0.8），边梁的承载力储备系数是1.15，这为后续的荷载耦合分析提供精确的基准。

2. 荷载耦合加载模拟

挑选2000年建成的框架式办公楼，根据检测数据建立精细化有限元模型（考量节点刚接以及楼板刚度）。同时施加恒载、

活载（2.0kN/m²）、地震（8度，El Centro波）以及温度荷载（±25℃）。结果表明：底层角柱在地震和温度共同作用时，混凝土压应力达到32.5MPa（接近C30限值），钢筋屈服应变是0.0025，产生塑性铰；顶层梁端在活载和温度共同影响下，承载力富余系数降低至1.05。与单一荷载相比，耦合作用让主要部位的承载力需求提高15%–22%，揭示出多元荷载的叠加效应。

（三）检测结果与分析讨论

1. 承载力检测结果

挑选2005年竣工的钢筋混凝土框架式办公楼，因为功能改造的需求，要验证荷载耦合状况下的承载能力。经静载试验与有限元模型还原分析，实际测量框架梁的受弯承载能力为125kN·m（设计数值130kN·m，偏差3.8%），柱的轴压承载能力达2800kN（设计数值2700kN，超出3.7%），节点的受剪承载能力是320kN（设计数值300kN），均符合规范规定。恒活荷载共同作用时，梁端剪力相比设计值提高8%，不过仍然低于极限承载力的90%。整体承载能力达标率在95%以上，这显示出模型还原与耦合分析手段能够有效核验存量建筑改造之后的安全使用要求。

2. 结果讨论与验证

挑选2005年建成的框架式办公楼，根据现场检测数据建立有限元还原模型，动力特性误差小于5%。在恒载和新增活载共同作用下，部分梁端以及柱底的应力接近限定值，其中三层的某根梁应力达到设计值的92%，存在局部承载能力不足的风险。模型计算所得结果和荷载试验的偏差小于8%，可有效识别出薄弱部位。但未考量材料老化的非线性作用，后续应引入时变参数并整合实时监测数据，从而提高分析精准度与安全性评估效能^[10]。

五、总结

本文专注存量建筑结构模型还原与荷载耦合承载力检测开展研究，提出通过多源数据融合的精细化建模方法，整合现场检测、历史档案以及数值模拟，解决信息缺失和精度不够的问题；建立考虑恒载、活载以及环境荷载协同作用的耦合效应模型，揭示不同荷载组合情形下的内力分布规律。经由实际工程项目，证实该方法具备准确性和有效性。未来能够将机器学习和物联网相结合，实现结构状态的实时监测，并且深入开展极端荷载工况的研究，提高检测的精准度与时效性。

参考文献

- [1]高津津. 温度与风荷载耦合下玻璃幕墙破坏机理与智能预警研究 [D]. 山东科技大学, 2022.
- [2]章科. 溶蚀-荷载耦合作用下混凝土结构的非线性分析 [D]. 浙江工业大学, 2022.
- [3]祁泽昊. 荷载与温度耦合作用下能量桩承载性能研究 [D]. 吉林大学, 2022.
- [4]石萃卿. 海水与荷载耦合作用下FRP筋与ASSC界面粘结耐久性研究 [D]. 广东工业大学, 2022.
- [5]元振. 多筒吸力桩基础单调与循环荷载作用下承载力与变形数值分析 [D]. 大连理工大学, 2023.
- [6]徐鹏, 钟熠, 马昊达, 等. 条形荷载作用下加筋土挡墙承载力上限分析 [J]. 铁道工程学报, 2023, 40(03): 14–19.
- [7]姜瑛, 元振, 曹永, 等. 多向荷载耦合作用下复合基础承载特性分析 [J]. 东北石油大学学报, 2024, 48(01): 107–118+12.
- [8]魏艳红, 苏销淇, 张建, 等. 边坡降雨和动荷载耦合作用下模型试验研究 [J]. 宁波大学学报(理工版), 2024, 37(03): 96–103.
- [9]郭颖. 存量时代中小学校更新策略研究——以广州市中小学校基础设施建设项目为例 [J]. 建筑技艺(中英文), 2024, (S1): 71–73.
- [10]张广泰, 李雪藩, 鲁海波, 等. 冷热-荷载耦合下锂渣混凝土梁的受弯承载力 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2022, 50(07): 991–997.