

# 历史建筑结构改造中的节点设计与力学性能分析

黄秀红

身份证号: 441502199412103166

DOI:10.61369/UAID.2025010031

**摘要:** 本文围绕历史建筑结构改造的节点设计与力学性能分析展开。阐述了不同时期建筑材料性能特征,介绍了多种结构的力学传递方式及节点设计要点,强调融合传统与现代理论,还提及研究手段、变形协调机理、抗震性能评估等内容,最后指出研究成果与不足以及未来方向。

**关键词:** 历史建筑; 结构改造; 节点设计

## Node Design and Mechanical Property Analysis in the Structural Renovation of Historical Buildings

Huang Xiuhong

ID: 441502199412103166

**Abstract:** This paper focuses on the node design and mechanical performance analysis of the structural renovation of historical buildings. The performance characteristics of building materials in different periods were expounded. The mechanical transfer modes of various structures and the key points of node design were introduced. The integration of traditional and modern theories was emphasized. Research methods, deformation coordination mechanisms, seismic performance evaluation and other contents were also mentioned. Finally, the research results and deficiencies as well as the future directions were pointed out.

**Keywords:** historical buildings; structural transformation; node design

### 引言

历史建筑作为文化遗产的重要组成部分,其结构改造涉及多方面的研究。2017年发布的《中国文物保护准则》强调了历史建筑保护的科学性和原真性原则。明清至民国时期不同材料结构的建筑,在材料性能上存在诸多问题,如木材腐朽、砖石风化、钢材锈蚀等。不同结构的力学传递方式和节点连接特点各异,这些都影响着结构改造中的节点设计和力学性能分析。在改造过程中,需融合传统与现代,考虑材料老化、构造损伤等因素,同时利用足尺试验、数字图像技术等手段研究节点力学性能,以实现历史建筑在结构安全和文化价值保护上的双重目标。

### 一、历史建筑结构特性解析

#### (一) 历史建筑材料性能特征

明清时期砖木结构的材料性能特征方面,木材随着时间推移,可能出现腐朽、虫蛀等问题,导致其强度和刚度下降。砖石材料可能因风化、侵蚀等因素,产生表面剥落、裂缝等现象,影响其整体性和承载能力<sup>[1]</sup>。民国时期钢混结构的材料性能特征表现为,钢材可能因锈蚀而削弱其力学性能,混凝土可能因碳化、氯离子侵蚀等出现强度降低、耐久性变差的情况。对这些历史建筑材料进行研究时,需综合考虑其所处环境、使用历史等因素,以准确分析其退化规律,进而建立合理的本构模型,为后续结构改造中的节点设计和力学性能分析提供基础。

#### (二) 典型节点构造特征

抬梁式木构架通过柱、梁、枋等构件的巧妙组合实现力学传

递。梁架在柱子上层层叠加,形成稳固的结构体系,将屋面荷载传递至基础。其榫卯节点连接方式不仅增强了结构的整体性,还能适应木材的变形。砖石拱券则依靠拱石之间的挤压传递压力,通过合理的拱券曲线设计,将上部荷载均匀分布到两侧的支撑结构上。拱脚的稳定性对于整个拱券结构至关重要。钢骨混凝土梁柱节点需考虑钢筋的锚固和混凝土的协同工作,确保节点处的力能够有效传递。不同材料的结合方式和力学性能差异是设计的关键因素<sup>[2]</sup>。

### 二、结构改造中的节点设计理论

#### (一) 传统构造与现代设计理论融合

历史建筑结构改造需融合传统构造与现代设计理论。在原真性保护原则下,要考虑现代结构规范要求。对于新旧材料连接节

点,应依据一定准则设计。从传统构造中汲取精华,了解其材料特性与连接方式,同时结合现代设计理论中的力学原理与分析方法<sup>[9]</sup>。例如,在节点设计时,需考虑受力的传递路径,确保新旧材料在受力时协同工作。要对节点进行力学性能分析,包括强度、刚度和稳定性等方面,以满足建筑在使用过程中的安全要求。这种融合不仅能保留历史建筑的文化价值,还能提升其结构性能,使其适应现代社会的使用需求。

## (二) 历史建筑特殊设计参数

历史建筑由于经历了较长时间的使用,材料老化和构造损伤较为常见。在节点设计中,需建立考虑这些因素的节点安全系数调整模型。材料老化可能导致其力学性能下降,如强度降低、韧性变差等,构造损伤则可能影响节点的传力路径和稳定性。因此,要综合评估这些因素对节点安全性的影响,合理调整安全系数。同时,基于可靠度理论制定设计荷载组合方案至关重要。可靠度理论能够考虑荷载的不确定性以及结构的失效概率,从而确保节点在设计使用年限内能够承受预期的荷载作用,保障历史建筑结构改造后的安全性和可靠性<sup>[10]</sup>。

## 三、复杂节点力学性能分析

### (一) 静力承载特性研究

#### 1. 节点承载力退化规律

足尺试验和数字图像技术是研究节点力学性能的重要手段。对于榫卯节点和钢混组合节点,在循环荷载作用下,其破坏模式会发生演变。这种演变过程体现了节点承载力的退化规律。通过足尺试验,可以直观地观察到节点在不同荷载阶段的变形、损伤情况。数字图像技术则能精确地记录这些变化,为分析节点的力学性能提供详细的数据支持。从试验和图像分析结果中,可以总结出节点在循环荷载下的应力分布变化、裂缝开展情况以及最终的破坏形态,进而揭示节点承载力随荷载循环次数增加而逐渐退化的规律<sup>[11]</sup>。

#### 2. 变形协调机理

在历史建筑结构改造中,复杂节点的变形协调机理至关重要。建立考虑材料蠕变和构造滑移的非线性变形计算模型是关键步骤之一。材料蠕变会导致节点随时间产生变形,而构造滑移则影响节点各部分之间的相对位移。通过精确考虑这些因素,能够更准确地模拟节点在实际工况下的变形情况。同时,提出节点刚度折减系数确定方法也具有重要意义。节点刚度会因多种因素而发生变化,确定合理的折减系数可以更好地反映节点的实际力学性能,为结构改造设计提供更可靠的依据,确保历史建筑结构在改造后的安全性和稳定性<sup>[12]</sup>。

### (二) 动力响应分析

#### 1. 抗震性能评估

在复杂节点力学性能分析中,通过动力响应分析可进一步开展抗震性能评估。采用时程分析法对历史建筑节点在罕遇地震下的研究至关重要。该方法能够准确模拟地震波作用过程,分析节点的动力响应特征,如位移、加速度等。在此基础上,重点研究

节点的能量耗散特性,了解其在地震过程中吸收和耗散能量的能力,这对于评估节点的抗震性能具有关键意义。进而,依据相关研究成果建立基于性能的抗震加固阈值标准,为历史建筑结构改造中的节点设计提供科学依据,确保节点在地震作用下能够满足相应的性能要求,保障历史建筑的结构安全<sup>[13]</sup>。

#### 2. 疲劳损伤累积

基于雨流计数法构建交通振动荷载谱,以开展改造后节点在长期动力作用下的累积损伤演化研究。通过该方法对荷载历程进行统计分析,获取荷载的幅值和循环次数等关键信息<sup>[14]</sup>。利用这些信息,结合合适的疲劳损伤模型,可分析节点在交通振动荷载下的疲劳损伤累积情况。研究过程中需考虑节点的材料特性、几何形状以及连接方式等因素对疲劳损伤的影响。通过对节点疲劳损伤累积的研究,能够为历史建筑结构改造中的节点设计提供重要依据,确保节点在长期使用过程中具有足够的安全性和可靠性。

## 四、改造工程应用与优化

### (一) 数值模拟技术应用

#### 1. 精细化有限元建模

开发考虑材料各向异性和接触非线性的节点三维实体单元建模方法对历史建筑结构改造中的节点力学性能分析至关重要。通过精确考虑材料特性和接触条件,能更真实地模拟节点在受力状态下的行为。在建模过程中,需综合考虑材料的各向异性参数,如弹性模量在不同方向上的差异等,以及接触表面的摩擦、贴合等非线性因素。通过合理设置单元类型、边界条件和加载方式,构建符合实际情况的三维实体单元模型。同时,采用合适的收敛准则对模型进行验证,确保计算结果的准确性和可靠性,为后续的力学性能分析提供坚实基础<sup>[15]</sup>。

#### 2. 多目标参数优化

在历史建筑结构改造工程中,数值模拟技术发挥着关键作用。采用响应面法,能够建立节点几何参数与力学性能之间的映射关系<sup>[16]</sup>。通过这种方法,可以精准地分析不同几何参数对节点力学性能的影响。基于此映射关系,进一步实现加固方案的多目标优化设计。在优化过程中,综合考虑多个目标,如力学性能的提升、材料的合理利用以及成本的控制等。以力学性能为例,通过调整节点几何参数,使其在承受荷载时能够更好地满足结构安全要求。同时,合理优化材料使用,避免浪费,降低成本。这种多目标优化设计方法为历史建筑结构改造提供了科学、合理的加固方案,确保改造后的建筑既满足安全要求,又具有良好的经济性。

### (二) 加固技术创新

#### 1. 新型复合加固体系

研发碳纤维-形状记忆合金协同加固技术,该技术结合了碳纤维的高强度和形状记忆合金的独特性能。碳纤维具有轻质、高强度、耐腐蚀等优点,能有效提高结构的承载能力。形状记忆合金则具有形状记忆效应和超弹性,可在结构变形时提供额外的恢复

力。通过对比试验验证加固效果，试验设置了未加固对照组以及不同加固比例和方式的实验组。结果表明，碳纤维 - 形状记忆合金协同加固技术在提高结构极限承载能力、改善结构变形性能等方面效果显著，相比单一加固材料具有明显优势，为历史建筑结构改造提供了一种创新的加固方法。

## 2. 可逆性改造工艺

在历史建筑结构改造中，基于 BIM 技术的模块化加固节点设计方案具有重要意义。该方案通过 BIM 技术的精确建模与分析能力，对加固节点进行细致设计。其模块化的特点使得节点在安装和拆卸过程中更为便捷，有效实现了改造工程的可逆性。同时，借助 BIM 的信息集成优势，能够实时监测节点的力学性能以及整个改造工程的相关数据。这种可监测性为工程的质量控制和后续维护提供了有力支持，确保改造后的历史建筑结构安全可靠，在满足保护历史建筑原有风貌的前提下，提升其结构性能，适应现代使用需求。

### (三) 安全评估体系构建

#### 1. 全寿命周期可靠性评估

建立考虑材料退化随机过程的节点可靠度计算模型是全寿命周期可靠性评估的关键。需综合考虑材料性能随时间的变化规律，采用合适的概率分布函数描述材料退化过程。在此基础上，通过力学分析和结构可靠性理论，构建节点可靠度计算模型。同时，制定分级预警指标体系对于及时发现潜在安全隐患至关重要。依据节点可靠度的计算结果，结合工程实际需求和安全标准，设定不同等级的预警阈值。当节点可靠度指标低于相应阈值时，发出预警信号，以便采取相应的维护和加固措施，确保历史

建筑结构改造后的安全性和可靠性。

## 2. 安全冗余度控制策略

在历史建筑结构改造中，基于风险平衡理论至关重要。首先需明确改造成本与安全储备之间的关系，通过建立优化模型来量化这种关系。该模型要综合考虑建筑结构的特点、改造的目标以及可能面临的风险因素。在构建过程中，准确评估各项成本，包括材料、人工、技术投入等，同时确定合理的安全储备指标。根据模型分析结果，提出经济合理的冗余度配置方案。冗余度的设置要既能满足安全要求，又能避免过度浪费资源。这需要对建筑的关键部位和薄弱环节有清晰的认识，确保冗余度在这些部位的合理分配，从而在保障安全的前提下，实现改造成本的有效控制。

## 五、总结

历史建筑结构改造中的节点设计与力学性能分析是一个复杂且关键的领域。通过对相关研究的梳理，明确了在节点改造方面取得的关键技术突破，包括对传统工艺的创新以及现代技术的合理应用，这为历史建筑的保护与改造提供了技术支撑。然而，当前研究仍存在一些不足，如长期性能监测的不完善以及智能加固技术的发展滞后等。随着科技的不断进步，数字孪生技术为历史建筑的全寿命周期管理带来了新的机遇与方向。未来可借助该技术实现对历史建筑结构改造的精准模拟、实时监测和优化决策，从而更好地保护历史建筑的结构安全和文化价值。

## 参考文献

- [1] 孙天熙. 苏州历史建筑结构加固改造评价体系研究 [D]. 内蒙古科技大学, 2023.
- [2] 刘聪颖. 装配式钢结构梁柱节点设计与力学性能分析 [D]. 湘潭大学, 2019.
- [3] 张群航. 沈阳历史文化街区建筑改造的设计与研究 [D]. 沈阳理工大学, 2023.
- [4] 李婕君. 城市景观大道节点设计 [J]. 城市建设理论研究, 2014, 000(015):1-6.
- [5] 肖锐. BIM 技术在历史建筑改造设计流程中的应用 [D]. 华中科技大学, 2015.
- [6] 潘杰. 历史建筑的结构加固与改造施工技术 [J]. 建筑施工, 2013, 35(7):2.
- [7] 郑瑀. 历史建筑在新型城镇化进程中保护利用价值研究 [J]. 甘肃科技纵横, 2015, 44(2):3.
- [8] 秦锦蓉. 基于结构设计的民用建筑加固改造 [J]. 城市建设理论研究: 电子版, 2011, 000(018):1-4.
- [9] 孙金坤, 李晓明, 冯云平, 等. 攀枝花某学校食堂综合加固改造设计 [J]. 工业建筑, 2011(S1):4.
- [10] 万迎春. 钢结构构件设计及节点设计分析 [J]. 科学技术创新, 2010(14):226-226.