

商业建筑结构安全检测与加固技术应用分析

文 / 王 亮 深圳市一泰检测有限公司

摘要：商业建筑结构安全关系到人员密集场所的生命财产安全，必须通过科学的检测评估及时发现隐患并采取有效加固措施。基于此，本文针对当前商业建筑中普遍存在的裂缝变形、材料劣化、地基沉降等结构性问题，系统梳理了结构安全检测的核心流程与关键技术，重点分析了三维激光扫描、物联网监测等新型检测手段的应用方法及其技术优势。在加固方面，探讨了 FRP 复合材料、预应力技术、截面增大法等多种加固策略的适用性及其实施效果，并结合具体工程案例验证了技术手段的有效性与可行性。

关键词：商业建筑；结构安全检测；加固技术

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.21.116

引言

随着城市化进程的加快，商业建筑作为城市功能的重要组成部分，其结构安全性直接关系到公众的生命财产安全。然而，许多商业建筑由于设计年限久远、使用功能变化频繁、维护不当等原因，存在结构老化、材料劣化、地基沉降等问题，亟需进行科学的检测评估和有效的加固处理。

近年来，随着三维激光扫描、物联网监测、人工智能等新兴技术的发展，商业建筑结构安全检测与加固技术得到了迅速发展和广泛应用。本文旨在系统阐述商业建筑结构安全检测的核心流程和关键技术细节，探讨新型检测手段的应用方法及其特点，分析常见安全隐患及典型加固策略，并结合真实案例进行技术应用效果评估，以为商业建筑的结构安全提供理论支持和实践指导。

一、商业建筑结构安全检测技术

（一）三维激光扫描与建模技术

新型检测技术，尤其是三维激光扫描，正在重塑商业建筑结构安全检测的方式。相比传统依赖人工和图纸的测绘手段，该技术可在短时间内获取建筑表面的高密度点云数据，构建精确的“数字孪生”三维模型，真实反映建筑的现状，包括微小的变形、倾斜、裂缝等细节。

通过将扫描结果与设计 BIM 模型或历次检测数据对比，能够定量分析结构变形趋势和累积变化，有效识别潜在受力异常。例如，定期扫描大型商业综合体，可早期发现柱梁的轻微位移或挠曲，预警结构问题。该技术还广泛应用于灾后快速调查，全面记录损毁状况，辅助事故分析。



图 1 三维激光扫描仪

（二）物联网传感器实时监测

物联网（IoT）技术的应用标志着商业建筑结构安全监测方式的根本转变。通过在关键部位布设应变计、加速度计、倾斜传感器及裂缝计等传感器，能够实现结构状态的全天候、连续监测。所采集的数据通过无线或有线方式实时传输至云端平台，管理人员可远程查看结构健康指标，并在系统识别出异常变化（如加速度异常或裂缝突变）时及时获得预警，从而快速干预，降低风险。

（三）智能检测与数据分析

人工智能（AI）和大数据分析技术已经开始应用于结构检测领域。例如，利用图像识别算法自动识别混凝土表面裂缝并计算其长度、宽度，比人工目测更加客观精准；通过机器学习模型分析多点传感器的历史数据，可预测结构性能变化的趋势并评估潜在风险；将深度学习算法应用于结构损伤识别，可以在振动信号中检测细微的刚度降低迹象，比传统频域分析方法更敏感。

近年来，基于 BIM 的数字孪生框架正被尝试用于结构监测研究，将实时传感数据嵌入 BIM 模型，构建可动态更新的可视化健康图谱，为构件受力与变形诊断提供直观而新颖的技术路径。

二、常见安全隐患与典型加固策略

（一）商业建筑常见结构安全隐患

基于既有商业建筑检测经验与事故统计，可将常见结构安全隐患归纳为以下五类：第一，地基不均匀沉降因地基土质差异或施工缺陷导致局部沉降差异，从而引发上部结构倾斜与裂缝；第二，构件裂缝与变形表现为在长期荷载或使用功能调整下，梁板挠度超限及裂缝宽度超规范限值，进而削弱承载力与耐久性；第三，材料老化劣化则因混凝土碳化、钢筋锈蚀及预应力构件腐蚀松弛等现象，导致结构性能退化与安全储备下降；第四，结构改造不当主要指未经结构评估的私自拆改或开洞破坏承重墙、梁板，以及新增大荷载设备未做补强，致使承载体系被削弱；第五，外部灾害（火灾、水浸、地震等）通过混凝土爆裂、基土软化、节点开裂等多种破坏模式削弱结构整体性。

上述隐患一旦形成,若不采取措施,遇到极端情况(如罕遇地震、严重超载)时可能诱发局部甚至整体结构失效,造成人员伤亡和巨大损失。因此,需要针对不同隐患类型采取有针对性的结构加固技术,以消除隐患、恢复安全储备。



图 2 建筑火灾图

(二) 典型加固技术及其应用评价

1. 纤维增强复合材料 (FRP) 加固

FRP 由高强度纤维(如碳纤维、玻璃纤维)与树脂基体构成,采用“湿法铺贴”工艺将纤维布或板材经环氧树脂胶粘贴于混凝土构件表面,以增强构件的强度和刚度。施工流程包括表面打磨与裂缝修补、底胶涂布、多层纤维布铺设及表面封闭保护,能够在有限净高空间内快速实施,对建筑正常运营影响较小。常见应用场景为在受拉区粘贴碳纤维布以提高梁板抗弯性能,以及在梁侧面或柱角采用 U 形 / 环绕式包裹以提升抗剪强度或轴压承载力。

FRP 加固具有轻质、柔性可塑、耐腐蚀及施工便捷等优势,尤其适用于截面尺寸受限的商业建筑加固需求;环绕式 FRP 包裹能够对柱体提供有效箍束约束,提高延性和承载力。然而,其耐火性能不足,高温环境下纤维强度显著下降,需配合防火涂层;且 FRP 弹性模量低于钢材,刚度增益有限。



图 3 FRP 加固技术应用图

2. 预应力加固技术

预应力加固通过在构件中施加预应力来抵消工作荷载下的部分应力,从而提高构件的承载力和刚度。典型做法包括在大跨度商场楼板下方增设可张拉的钢拉杆,使其对楼板产生向上的预应力弯矩以抵消自重弯矩,或在受弯构件两侧粘贴预应力钢板(或 FRP 板),经端部锚固后张拉锁定,使加固板主动承担拉力分担梁体拉应力。

预应力加固具有材料利用效率高、加固后构件工作应力显著降低以及挠度与裂缝控制效果优异等优势,尤其适合对振动控制和变形限制要求严格的高端商业建筑场所。然而,该技术的施工及锚固工艺复杂,设备与人工成本较高;引入预应力也会改变结构内力分布,设计阶段需进行精细的力学分析与校核,以防止新的不平衡应力引发次生问题。

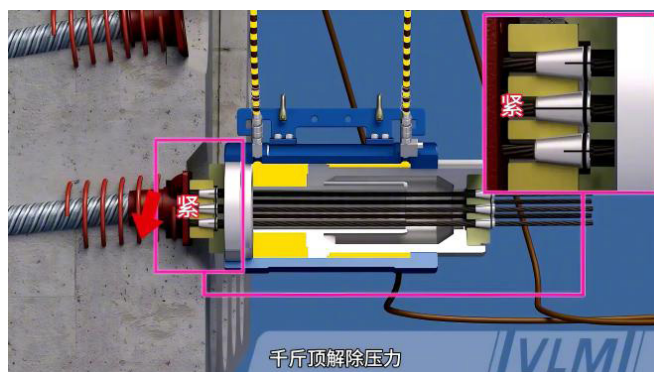


图 4 预应力张拉施工原理三维图

3. 截面增大法与置换混凝土

传统截面增大加固通过外包混凝土或粘贴型钢 / 钢板等方式直接扩大构件截面,以提高承载力和刚度。其中,外包混凝土加固需在原柱或梁外围设置钢筋笼并浇筑新混凝土;粘贴钢板加固则在受弯区粘贴厚型钢板或型钢;而混凝土置换法则通过局部凿除劣化混凝土、增配钢筋并回填高强或新型混凝土,以恢复或超越原有截面承载能力。为兼顾环保与性能,近年来逐步引入高性能低碳混凝土(掺合粉煤灰、矿渣等工业废料)及 CO₂ 矿化固化技术。

传统截面增大加固方法以其直接性和可靠性著称:增大的截面不仅显著提升了承载性能和刚度,还可改善构件耐久性,适用于重大安全隐患治理。然而,其现场施工多为湿作业,工期较长且需占用使用空间,影响商业环境运营。

4. 钢结构加固与支撑

增设钢结构构件加固主要通过既有构件旁增设钢柱、型钢支架或在楼面下焊接组合钢梁来分担原有荷载,以缩短跨中跨度并显著提升承载力与刚度。此类方法依托钢材高强度、高刚度及工厂预制、现场拼装的施工优势,可在较短工期内完成大幅度加固;同时,可与外包混凝土或钢-混凝土组合加固等技术协同应用,以兼顾材料

性能优势。为满足商业建筑耐火规范，外露钢构件须采取防火涂料或防腐处理，确保在火灾或腐蚀环境下仍具备可靠性能。

在实际工程中，钢结构加固常与其它方法组合使用以实现最佳效果：例如，针对沉降引起的倾斜，宜先行地基加固再施以外包钢或FRP环绕；对于梁板裂缝，则可先灌注环氧树脂封闭裂缝，随后粘贴碳纤维布加固；在旧址改造中，常同步采用钢框架加固、剪力墙增厚及节点加腋以全面提升整体刚度与延性。

三、工程实例分析

(一) 工程概况

该工程为一座建成于20世纪90年代的三层框架结构商业建筑，总建筑面积20300 m²，地上三层，基础为条形基础与筏板基础结合形式。近期使用过程中，二层C3-C6柱脚出现45°斜裂缝，裂缝宽度为0.3-0.5 mm、深度超过50 mm，表明柱体抗剪承载力有所退化；一层营业厅L12-L15号梁跨中检测到最大下挠56 mm（相当于L/350），同时伴有0.2 mm的纵向裂纹，已接近设计许可限值L/400；东南角基础沉降速率平均达0.15 mm/d，外墙竖向裂缝扩展速率约0.02 mm/月，显示地基承载力与整体刚度存在不同程度的不足。以上病害严重影响建筑的正常使用和安全性能，急需通过系统化的检测与加固措施予以恢复。

(二) 检测与机理分析

基于结构健康监测系统与现场实验，混凝土取样检测结果表明柱梁混凝土强度平均值为32.5 MPa，满足C30等级设计要求；然而柱脚裂缝已穿透保护层，主筋部位剥离率超过15%，表明混凝土保护层失效。现场沉降观测与结构分析进一步表明，区域沉降差 $\Delta=18\text{mm}$ 导致柱脚产生附加弯矩 $5M_{add}$ ，配合实测活荷载 4.8kN/m^2 使梁受拉钢筋应力达到 $0.85f_y$ （HRB335），接近屈服极限。多元回归分析显示，地基沉降对结构损伤的贡献率为63%（ $p<0.05$ ），且损伤程度与检测数据的相关性高达 $R^2=0.89$ ，由此可见，地基不均匀沉降是本工程病害的主要驱动因素。

(三) 加固设计方案与实施效果

针对上述病害机理，提出地基—柱—梁三级联动的加固方案。地基加固采用微型树根桩，桩径 $\Phi 300\text{ mm}$ 、桩长15 m，桩端进入持力层2 m，以提高整体承载力与刚度；框架柱加固则在柱脚和节点部位环绕粘贴T700 CFRP碳纤维布，限制环向应变不超过0.6%，以增强构件的承载和延性；主梁加固方面，粘贴预应力钢板（Q345、厚度10 mm）并配合桁架支撑体系，设计5 mm反拱，旨在恢复和提高梁体刚度与抗裂性能。

通过12个月监测获得关键性能改善数据（表1），同时发现：多源传感检测技术使病害识别准确率提升至92%；预应力与CFRP协同作用降低钢筋应力27%；结构体系改造减少节点弯矩42%。

表1 加固效果监测数据对比

监测指标	加固前	加固后	容许限值
柱脚裂缝宽度 (mm)	0.48	0 (闭合)	≤ 0.3
梁跨中挠度 (mm)	56	28	≤ 40
钢筋应力比	0.85	0.62	≤ 0.75
振动加速度 (m/s^2)	0.25	0.15	≤ 0.20
沉降速率 (mm/d)	0.15	0.02	≤ 0.05

分析表明：加固后结构退化速率降低76%，构件可靠性指标 β 从2.1提升至3.4（目标值 $\beta \geq 3.2$ ）。

结语

本文系统分析了商业建筑结构安全检测与加固技术的应用现状与发展趋势。通过引入三维激光扫描、物联网监测等新型检测手段，提高了结构隐患识别的准确性和效率。在加固方面，采用FRP复合材料、预应力加固技术、截面增大法等多种策略，有效提升了结构的承载力和耐久性。实际案例分析表明，综合运用现代检测技术与绿色高效的加固方案，能够显著改善既有商业建筑的结构性能，延长其使用寿命。

参考文献

- [1] 郑文成, 潘慧明, 于泽泉. 不同泥浆体系的超声波成孔质量检测关键技术应用研究 [J]. 广东土木与建筑, 2024, 31(12): 119-122.
- [2] 董春燕, 张雪, 徐军广, 马莉, 刘畅. 既有商业建筑复式结构 (LOFT) 改造设计实例 [J]. 建筑技术, 2016, 47(07): 582-584.
- [3] 刘晓铮. 住宅建筑结构安全性检测鉴定与加固技术 [J]. 居舍, 2024 (35): 35-38.
- [4] 李辰戈. 成都市某商业建筑增层后抗震性能分析和加固优化设计 [D]. 成都理工大学, 2016.
- [5] Mahlil, Fachri, Munirul Hady, Siti Mira Maulida, Ucha Arief Pratama, Rafiq Muhrita Yusputri, Adrian Ulza. Structural Retrofitting of Corrosion-Damaged Columns in Reinforced Concrete Buildings: A Case Study in KFC Commercial Restaurant Banda Aceh, Indonesia [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2024, 2916(1).

作者简介：王亮，1985年9月，男，汉族，甘肃省天水市，本科学历，现有中级职称，主要从事：房屋安全性检测鉴定，主体结构检测等。