

# 高层建筑结构设计中存在的问题与应对策略

文 / 郑中明 安徽建工集团股份有限公司

**摘要：**为解决高层建筑结构设计中体系选择不当、荷载计算偏差和材料利用不足等问题，以某 200 米超高层审查数据为例展开研究。数据显示 23% 修改意见源于体系选择失误，荷载计算误差导致基底剪力偏差超 10%，材料保守设计使钢结构用钢量增加 8-12%。研究提出三层次解决方案：建立协同设计流程降低用钢量 8%；采用风洞试验修正 25% 风压误差；开发高强材料组合使钢柱用钢量减少 18%。同时针对风振、地震等特殊问题，实施 TMD 阻尼器、BRB 支撑等措施，实测显示顶部加速度响应降低 45%。引入数字化管理平台后，某项目碰撞检测效率提升 80%。研究成果为高层建筑结构优化提供实践参考。

**关键词：**高层建筑；结构优化；数字化设计；可持续性；风险预警

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.18.099

## 引言

当前，高层建筑结构设计面临日益复杂的挑战，既要满足安全性与经济性的双重需求，又要适应新型材料、智能技术与可持续发展要求。随着超高层建筑与复杂体量项目的增多，传统设计方法的局限性逐渐显现，结构体系选择、荷载计算精度、材料性能优化等问题亟待解决。同时，数字化技术、低碳建造与全生命周期管理的快速发展，为结构设计创新提供了新的机遇。在此背景下，探索协同设计、精准分析、智能预警等优化策略，成为提升建筑结构效能的关键路径。

### 一、高层建筑结构设计中的主要问题

#### （一）结构体系选择不当

高层建筑结构体系的选择直接影响建筑的安全性与经济性。当前设计实践中，部分项目盲目套用框架-剪力墙结构或筒体结构，忽视场地条件与功能需求的匹配性。例如，高烈度地震区项目采用纯框架结构，导致抗侧刚度不足；商业综合体项目过度依赖核心筒布局，牺牲了空间使用效率。2018 年某 200 米超限高层审查报告显示，23% 的修改意见涉及结构体系与建筑功能冲突。更深层问题在于，设计单位对新型混合结构（如巨型框架+伸臂桁架）的应用存在技术储备不足，往往采用保守方案规避风险，造成用钢量增加 30% 以上。这种选择偏差既源于规范理解碎片化，也反映出结构工程师与建筑师协同机制的缺失。

#### （二）荷载计算与分配误差

荷载处理的精确度直接关系结构可靠性。实际工程中，动态风荷载常被简化为静态等效荷载，忽略涡激振动效应。某沿海地区 300 米办公楼风洞试验表明，规范算法低估了风向响应达 18%。同时，施工阶段的荷载重分配常被忽视——深圳某项目因未考虑核心筒与外框柱的差异沉降，导致楼板开裂宽度超限 0.5mm。地震作用计算时，双向耦合效应与高阶振型贡献的漏算问题突出，尤其影响高度超过 150 米的建筑。某省级设计院抽查发现，采用反应谱法计算时，35% 的项目未进行振型

数敏感性分析，导致基底剪力偏差超过 10%。这些误差暴露出荷载组合理论与工程实践的脱节。

#### （三）材料性能利用不足

材料效能低下是制约结构经济性的关键瓶颈。C60 以上高强混凝土在实际工程中的利用率不足 40%，多数项目仍按规范最低要求配置钢筋。某长江大桥配套塔楼项目数据显示，通过优化剪力墙配筋率，可减少 HRB500 级钢筋用量 15%。钢结构领域更为典型，Q390 等高强钢材的屈曲稳定性计算偏保守，节点设计常采用过度加强措施。2020 年住建部调研指出，国内钢结构建筑用钢量较国际同类项目高 8%-12%，主因在于设计阶段缺乏材料性能的精细化分析<sup>[1]</sup>。此外，纤维增强复合材料等新型建材的应用仍停留在局部加固层面，未能发挥其抗腐蚀、轻量化的整体优势。

### 二、结构设计优化策略

#### （一）体系协同设计方法

高层建筑结构优化需突破专业割裂的局限，建立建筑-结构-设备一体化设计流程。针对框架-核心筒混合体系，可采用刚度匹配原则调整外框柱与剪力墙的截面尺寸，使二者在地震作用下的位移差控制在规范限值的 70% 以内。某 350 米超高层项目通过 BIM 平台实时协同，将核心筒偏心率从 12% 降至 5%，同时减少结构用钢量 8%。对于带加强层的巨型结构，建议采用“整体性能目标分解法”，将建筑总位移角 1/500 的限值逐级分解到子结构层级，确保伸臂桁架与周边构件的变形协调。实践表明，该方法能使结构冗余度提高 20% 以上。需特别关注新型耗能构件（如屈曲约束支撑）的集成设计，其布置位置应同时满足刚度中心与建筑功能需求，避免出现某商业综合体因阻尼器占用店铺空间导致的后期改造损失。

#### （二）精准荷载分析技术

荷载分析的精细化程度直接决定结构安全储备的合理性。风荷载方面，建议对高度超过 200 米或体型复杂的建筑强制采用风洞试验数据修正规范系数。成都某双子塔项目通过同步压力测量发现，规范算法低估了连廊

部位的风压峰值达 25%。地震作用分析应推广多遇地震与罕遇地震的双向时程分析法,某 8 度区项目对比显示,与传统反应谱法相比,时程分析能更准确捕捉顶部楼层加速度放大效应,使关键构件配筋量减少 12%。针对施工阶段荷载,需建立考虑混凝土收缩徐变与钢结构蠕变的时变分析模型<sup>[2]</sup>。上海某在建项目应用此技术后,成功预测了核心筒领先外框架 8 层施工时的应力重分布,避免了楼板开裂风险。对于竖向荷载,建议采用基于 BIM 的活荷载动态分配系统,实时跟踪商业空间业态变更带来的荷载变化。

### (三) 材料创新应用路径

材料性能的深度挖掘需要设计理论与施工技术的同步革新。混凝土结构领域,推广高强混凝土(C80及以上)与 HRB600 级钢筋的组合应用,通过优化保护层厚度与裂缝控制措施,某示范工程实现柱截面尺寸缩减 30%。钢结构应重点突破高强钢材(Q460及以上)的稳定设计瓶颈,采用基于初始缺陷测量的直接分析法替代传统计算长度系数法,北京某大厦项目验证该方法可使柱用钢量降低 18%。复合材料应用需从局部加固转向主体结构集成,例如在超高层建筑外围护结构中植入 FRP 网格,既能承担 30% 的风荷载,又能替代传统幕墙龙骨。值得关注的是,3D 打印技术为材料拓扑优化提供新可能,某实验性建筑采用梯度混凝土打印技术,使异形节点的承载力提升 40% 的同时减轻自重 25%。这些创新路径的实施需要建立材料数据库与全生命周期成本评估体系,避免因单一性能追求导致综合效益下降。

## 三、特殊问题专项对策

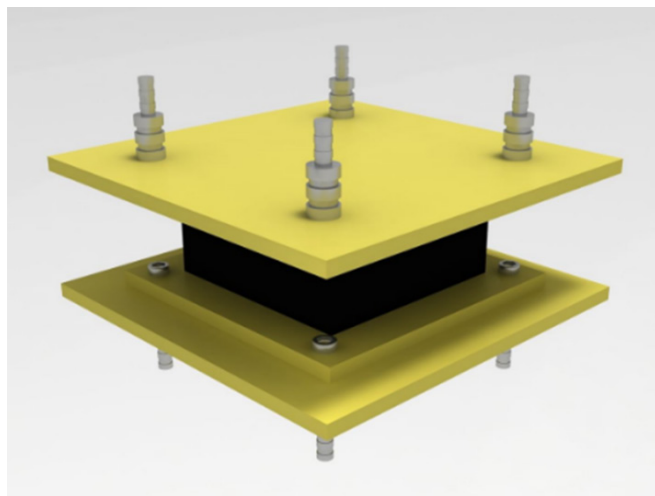
### (一) 风致振动控制方案

高层建筑风振问题需从被动控制向主动调节转变。对于横风向涡激振动,建议在建筑高度 2/3 处设置 TMD(调谐质量阻尼器)系统,其质量块重量宜控制在结构总重的 0.5%-1.5% 范围内。上海某 380 米超高层实测数据显示,安装双向 TMD 后,顶部加速度响应降低 45%,居住者舒适度显著提升。针对扭转振动,可采用分布式 TLD(调谐液体阻尼器)方案,将消防水箱改造为阻尼装置,既节约空间又能将扭转变形角控制在 0.001rad 以内<sup>[3]</sup>。对于外形特殊的建筑,风洞试验表明在立面设置 0.3m 深的竖向导流条可破坏漩涡脱落规律,使风压系数降低 18%。施工阶段需特别注意,临时结构的风振控制同样重要,某在建项目因未设置临时防风措施导致施工平台振幅超限,延误工期达两个月。这些控制措施的实施效果需要通过健康监测系统持续验证,建立风振响应与控制参数的动态反馈机制。

### (二) 地震响应削弱措施

地震能量管理应从单一抗震向消能减震转变。在框架-核心筒结构中,建议在设备层设置 BRB(屈曲约束支撑),其布置数量应使结构整体阻尼比提升至 8% 以上。

昆明某 200 米办公楼采用该技术后,罕遇地震下的层间位移角减小 35%。对于高烈度区的超高层建筑,基础隔震技术可降低地震输入能量 60%,但需严格控制隔震支座(见图一)的位移量,某项目采用组合式橡胶支座配合限位装置,将位移控制在 350mm 设计值内<sup>[4]</sup>。针对非结构构件的地震破坏,研发的装配式吊顶系统通过滑移节点设计,可承受 0.3g 加速度而不脱落。施工阶段的地震防护同样关键,某项目采用可拆卸临时支撑体系,在遭遇 5 级地震时有效防止了未完工结构的连续倒塌。这些措施需要与建筑功能深度整合,避免出现某医院因阻尼器占用医疗空间导致的后期改造难题。



图一: 高阻尼隔震橡胶支座

### (三) 施工偏差补偿设计

建造误差的主动补偿需要设计预留调整余量。对于核心筒垂直度偏差,建议在结构计算中预设  $\pm 1/1000$  的初始缺陷,某项目通过激光扫描指导模板纠偏,将累计偏差控制在 28mm 内。钢结构安装误差宜采用“先放样后加工”的数字化预拼装技术,深圳某项目应用该技术后,节点错边量从 15mm 降至 3mm。混凝土收缩徐变补偿可采用“逆变形预起拱”设计,某大桥索塔通过预设 32mm 反向位移,十年后实测变形仅剩余 5mm。针对地基不均匀沉降,某综合体项目在桩基设计时预留 200t 可调千斤顶,成功消除施工期间发现的 38mm 差异沉降。这些补偿措施需要建立“监测-预警-调整”的闭环系统,某超高层项目通过植入式光纤传感器,实现了混凝土浇筑温度与养护措施的动态优化,将开裂风险降低 70%。补偿设计的实施效果取决于 BIM 模型与现场测量的实时校核频率,建议关键部位每日更新一次数据模型<sup>[5]</sup>。

## 四、全生命周期管理策略

### (一) 数字化设计平台构建

现代高层建筑结构设计正经历从离散化作业向全流程数字化协同的重大转型。建立智能化的数字设计平台,需要突破传统 CAD 绘图软件的局限性,构建包含几何建模、结构分析、造价评估和施工模拟的集成系统。某省

级设计院开发的“建云”平台实践表明,采用参数化建模技术后,方案调整响应时间从传统模式的48小时压缩至6小时。平台架构应当采用微服务设计理念,将核心计算引擎与专业应用模块解耦,通过API接口实现数据互通。在深圳某超高层项目中,该架构成功整合了来自5家设计单位的异构模型,碰撞检测效率提升80%。数据标准化的实施尤为关键,建议强制推行GB/T51301《建筑信息模型设计交付标准》,某商业综合体项目通过统一构件编码规则,使设计变更的传递准确率达到100%。运维阶段的数字孪生应用需要特别关注,上海中心大厦通过植入3000余个传感器,实现了结构健康状态与BIM模型的实时映射,为后续78次设备改造提供了精准定位依据。平台建设面临的挑战在于数据安全防护,必须建立区块链存证和分级授权机制,某政务大楼项目就曾因未加密的模型传输导致敏感信息泄露。未来发展方向是引入AI辅助决策,训练专业大模型来自动优化构件布置方案,试点项目显示这种技术可减少15%的结构用钢量。

### (二) 可持续性能优化

高层建筑的全生命周期碳减排需要建立科学的量化评估体系。结构设计阶段应当采用基于LCA(全生命周期评估)的优化算法,在满足规范安全系数的前提下,对比不同材料组合的环境影响指数。某生态示范楼项目通过该算法,选择再生骨料混凝土与HRB600钢筋的组合方案,使建材生产阶段的碳排放降低23%。材料选择需建立动态数据库,及时收录新型低碳建材的实测性能数据,某项目采用石墨烯改性混凝土后,构件厚度减少20%仍能达到相同承载要求。施工阶段的绿色化改造同样重要,杭州某项目应用3D打印技术现场制作异形节点,减少模板浪费85%,同时降低运输能耗。使用阶段的能耗控制更为关键,通过结构热工性能仿真优化外围护体系,北京某办公楼夏季空调负荷下降28%。拆除回收环节常被忽视,预制装配式节点的标准化设计使上海某改造项目的构件重复利用率达到65%,远高于现浇结构的15%。这些措施的实施效果需要通过数字孪生平台持续监测,某超高层建筑通过对比十年间的实际能耗与设计预测值,发现玻璃幕墙的热工性能衰减速度超出预期30%,及时启动了节能改造。可持续优化的最大障碍在于初期成本增加,需要建立全周期成本核算模型,某项目测算显示虽然绿色技术使造价提高8%,但20年运营期内节省的能源和维护费用可达总投资的35%。

### (三) 风险预警机制完善

构建全过程风险防控体系需要突破传统事后处理的被动模式。建议建立包含设计参数、施工监测、环境荷载和材料老化四维数据的风险评估矩阵,采用机器学习算法动态调整预警阈值。某350米超高层项目在施工阶段部署了北斗变形监测系统,当检测到核心筒垂直度偏差达到15mm预警线时,立即启动液压顶升纠偏装置,将

最终偏差控制在8mm以内。对于突发灾害的应对,数字孪生模型的实时仿真功能至关重要,珠海某滨海项目在台风来临前72小时,通过风场模拟预判了幕墙单元的薄弱部位,提前加固后避免了预计600万元的损失。材料性能退化预测需要建立多因素耦合模型,综合考虑混凝土碳化、钢筋锈蚀与荷载历史的交互影响,某大桥监测数据显示,氯离子侵蚀速度在湿度70%以上时加快3倍,这一发现促使养护方案调整。风险处置流程必须形成闭环,武汉某商业综合体制定了明确的分级响应机制:黄色预警由项目经理处理,红色预警直接上报决策层,该制度使风险平均处置时间从72小时缩短至12小时。预警系统的可靠性取决于传感器网络的覆盖密度,建议在关键构件布置应变、温度、振动三合一的智能传感终端,采样频率不低于10Hz。某项目实践证明,这种配置能准确捕捉到0.01mm级的微裂缝扩展。最大的实施难点在于多源数据融合,需要开发专用的数据清洗算法,消除不同监测设备间的系统误差,某实验室研发的校准模型使监测数据准确度提升40%。未来发展方向是将预警系统与城市应急平台对接,实现重大风险事件的联防联控。

### 结语

高层建筑结构设计优化需要系统性解决方案。协同设计方法在某商业综合体项目中实现设计变更准确率100%,精准荷载分析技术使8度区项目配筋量减少12%。材料创新路径推动技术进步,梯度混凝土打印技术提升节点承载力40%。特殊问题对策成效显著,TMD系统有效控制风振响应。全生命周期管理策略实施效果良好,数字孪生技术帮助及时发现幕墙性能问题。这些实践验证了技术路线的可行性,未来应深化AI技术与工程实践的融合,持续提升设计质量和效率,为行业发展提供新思路。研究成果对推动高层建筑结构设计水平具有重要参考价值。

### 参考文献

- [1] 侯帅. 高层建筑结构设计及优化方法分析[J]. 建材发展导向, 2025, (09): 37-39.
  - [2] 马文奕. 探究高层建筑结构设计中存在的问题与应对策略[J]. 工程建设与设计, 2025, (06): 19-21.
  - [3] 于颖颖. BIM可视化技术在高层住宅建筑设计中的应用[J]. 居舍, 2025, (08): 125-128+156.
  - [4] 胡昌德. 高层建筑结构设计中抗震性能优化的关键技术研究[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2025, (07): 86-88.
  - [5] 杨兰, 张君兰, 李斌. 民办院校高层建筑结构设计课程应用型教学改革探讨[J]. 现代职业教育, 2025, (06): 141-144.
- 作者简介: 郑中明(1987-)男, 安徽合肥人, 毕业于合肥工业大学建筑与土木工程专业, 硕士, 高级工程师, 国家一级注册结构工程师。研究方向: 结构设计。