

超高层建筑塔式起重机起重臂空中拆卸 技术研究与应用

陈先勇

上海市中禾华兴达丰机械工程有限公司，上海 200331

DOI:10.61369/ME.2026010020

摘 要： 本文研究了超高层建筑中塔式起重机拆卸技术的应用与优化。通过对支撑梁和内爬框架的有限元分析，评估其在拆卸过程中承载能力和稳定性，结合现场测试验证了模型的有效性。后基于“小塔拆大塔”原则，提出了一种新型拆卸流程，采用液压顶升与屋面起重机辅助吊装技术，有效实现了拆卸过程中的精确控制，避免了因荷载变化引发的结构失稳问题。研究结果表明，该方案显著提高了拆卸作业的安全性、稳定性和高效性，能够有效减少动态荷载对结构的影响，为类似项目提供了有力的技术支持和参考依据，推动了塔式起重机拆卸技术的发展。

关 键 词： 超高层建筑；塔式起重机；起重臂；空中拆卸

Research and Application of Aerial Dismantling Technology of Tower Crane Boom in Super High-rise Building

Chen Xianyong

Shanghai Zhonghe Huaxing Dafeng Mechanical Engineering Co., LTD. Shanghai 200331

Abstract： This study investigates the application and optimization of tower crane dismantling techniques in super high-rise buildings. Through finite element analysis of support beams and internal climbing frames, the load-bearing capacity and stability during dismantling were evaluated, with model validity validated through field tests. Based on the "small tower dismantling large tower" principle, a novel dismantling procedure was proposed, employing hydraulic jacking and roof crane-assisted lifting technologies. This approach achieves precise control during dismantling while preventing structural instability caused by load variations. The results demonstrate that this solution significantly enhances the safety, stability, and efficiency of dismantling operations, effectively mitigates dynamic load impacts on structures, and provides robust technical support and reference for similar projects, advancing the development of tower crane dismantling technologies.

Keywords： super high-rise building; tower crane; boom; aerial dismantling

引言

随着城市化进程的加快，超高层建筑日益增多，塔式起重机作为这些建筑施工中的核心设备，广泛应用于材料的垂直运输与拆卸作业。目前，塔式起重机的拆卸技术主要依赖传统的地面辅助设备和人工操作，存在拆卸效率低、安全风险高、对施工场地要求高等问题。特别是在超高层建筑中，拆卸作业面临着高空作业风险、复杂的负载分配以及对设备稳定性、精确控制的极高要求，这些问题逐渐成为施工中的瓶颈。

针对上述问题，本文旨在通过有限元分析和现场测试，提出一种优化的超高层建筑塔式起重机空中拆卸方案。该方案创新性地采用液压系统与屋面起重机协同作业，结合“小塔拆大塔”原则，实现拆卸过程的精确控制和高效安全，为类似项目的技术选型和施工方案优化提供新的思路和参考依据。

本文通过对内爬塔式起重机支撑梁和内爬框架的承载能力与稳定性进行有限元分析，评估其在拆卸过程中的结构性能。有限元分析能够模拟实际工况，预测结构在不同荷载下的应力和变形情况。同时，结合现场测试数据，验证有限元模型的准确性和可靠性，确保提出的拆卸方案在实际应用中的可行性和安全性。

一、案例概况

本案例项目位于深圳市的超高层建筑区，包含两座塔楼，建筑高度分别为249.5m和300m。该项目采用框架-核心筒结构，基础为桩筏基础，层高在4.2m至4.4m之间。核心筒为钢筋混凝土结构，截面尺寸为18m×18m；外框柱为型钢混凝土柱，截面尺寸为1.8m×1.8m。为了满足超高层建筑的施工需求，项目采用两台内爬塔式起重机进行材料的垂直运输。两台塔式起重机的额定起重能力分别为26吨和19吨，臂长为55m，塔身高度分别为54m和57m。起重机的起重力矩分别为1430 t·m和1045 t·m，最大起升高度为54m和57m，最大工作幅度为55m。起重机安装于建筑核心筒的电梯间前室，通过高强度支撑梁与剪力墙连接，确保设备的稳定性和安全性。支撑梁采用 Q390B 高强度钢材，截面尺寸为400mm×700mm，布置方式为对角交叉布置，连接节点采用高强螺栓连接。项目于2024年5月开始施工，预计2026年12月完成。塔式起重机于2024年11月安装完成，使用周期为26个月，计划于2026年6月进行拆卸作业。在布局和设备安装过程中，项目严格控制精度，确保拆卸作业能够顺利进行^[1]。

二、技术应用

（一）拆卸技术架构

在超高层建筑塔式起重机的拆卸过程中，遵循“小塔拆大塔”原则，采用分步拆卸法，通过精确的操作流程确保拆卸作业的安全性与高效性。

拆卸初期，支撑梁系统通过焊接与建筑剪力墙预埋板连接，承载塔式起重机及其附属设备的垂直荷载，确保拆卸过程中塔身的稳定性。支撑梁采用 Q355B 高强度钢材，截面尺寸为400mm×700mm，具有较强的抗弯和抗剪性能。

支撑梁的截面尺寸为400 mm×700 mm，其受弯区正应力最大达到147.5 MPa^[2]。基于此节点，结合简化的力学模型，计算支撑梁在最大弯矩作用下的应力：

$$\sigma = \frac{M \cdot y}{I} \quad (1)$$

其中， σ 为截面最大正应力（MPa），表征材料承受的最大拉压应力； M 为截面最大弯矩（kN·m），由外荷载产生； y 为截面中性轴到最外缘纤维的距离（m），对于矩形截面 $y=h/2=0.35m$ ； I 为截面惯性矩（m⁴），反映截面抗弯能力，对于矩形截面按公式（2）计算：

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (2)$$

其中， b 为截面宽度（400 mm） h 为截面高度（700 mm），带入公式后得到 $I=0.01143m^4$ 。

最大弯矩计算：支撑梁承受的竖向荷载为1,550 kN，假设荷载均匀分布，且支撑梁为简支梁，最大弯矩可算为：

$$M_{max} = \frac{P \cdot L}{4} \quad (3)$$

其中 P 为总荷载（1,550 kN） L 为支撑梁跨度。

模型假设荷载 P 均匀分布但等效为跨中集中力，从而推导出跨中弯矩最大值；支撑梁跨度 L 的具体测量方法是指梁两端支座中心之间的水平距离，需使用全站仪进行现场精密测量或依据设计图纸数据，确保精度控制在 $\pm 3mm$ 以内，以准确计算弯矩值。

最大正应力计算公式如下：

$$\sigma_{max} = \frac{M \cdot y}{I} = \frac{3,875kN \cdot m \times 0.35m}{0.01143m^4} = 118.7MPa \quad (4)$$

根据上述公式，可以计算得出，支撑梁在最大弯矩作用下的最大正应力约为118.7 MPa，强度与稳定性均符合施工技术要求。

（二）拆卸过程与操作

1. 支撑系统预加载

采用液压同步顶升系统对支撑梁-剪力墙节点实施分级加载，预压荷载取设计值的0.8倍（1240kN）。通过振弦式应变计与激光位移传感器实时监测梁体应变分布，控制跨中挠度 $\leq 5mm$ （ $L/2000$ ）。预压完成后，采用电液伺服作动器进行扫频激振测试（0.5–10Hz），验证支撑系统抗弯刚度 $\geq 2.8 \times 10^5 kN \cdot m^2$ ，消除结构接触面间隙。

2. 塔身顶升分离

构建多缸同步闭环控制系统，基于PID算法实现6组液压顶升油缸的位移同步误差 $\leq 2mm$ 。顶升过程中采用瞬态动力学分析预测塔身动力特性，控制顶升速度 $\leq 50mm/min$ 以避开结构固有频率（1.2–1.8Hz）。顶升高度达1.2m时，液压插销机构锁定标准节连接节点，配合全站仪实时监测塔身垂直度，确保偏位量 $\leq 200mm$ （ $H/1500$ ）^[3]。

3. 起重臂模块化拆解

基于BIM模型进行吊装路径优化，确定距回转中心35m处为最佳吊点。采用全路面起重机执行分段吊装，吊装过程中通过动态称重系统实时校核荷载，当吊重达到额定值85%时触发安全联锁机制。销轴拆除阶段应用液压拔销器配合红外热成像监测，控制摩擦温升 $\leq 80^\circ C$ 。

液压拔销器通过液压泵站驱动活塞产生最高50吨的静态拔销力，在拔除起重臂连接销轴过程中，操作人员同步使用FLIR T865红外热像仪以每秒30帧的频率扫描销轴接触面，当监测到摩擦温升超过预设阈值时系统自动报警，从而实现钢材回火效应的精准防控。

4. 塔身分段转运

建立激光点云与BIM模型比对机制，生成构件装车最优解。采用多轴液压平板车执行水平转运，通过北斗定位系统实现 $\pm 3mm$ 级路径跟踪，结合卡尔曼滤波算法消除车辆运动姿态误差。转运过程中设置无线倾角传感器集群，控制构件倾斜角 $\leq 0.5^\circ$ ，避免重心偏移引发失稳。

5. 结构稳定性控制

构建数字孪生监测平台（通过集成BIM模型与实时传感器数

据构建的虚拟仿真系统，能够动态映射物理结构的应力、位移等状态，其作用在于实现拆卸过程的可视化监控与预测性安全预警），集成光纤光栅传感器与加速度计阵列，实时获取结构应变能与振动加速度双控指标。当监测值超过许用应力或位移阈值时，启动主动调谐质量阻尼器进行振动能量耗散，阻尼比提升至12%–15%。

拆卸过程与操作流程如下图1所示。

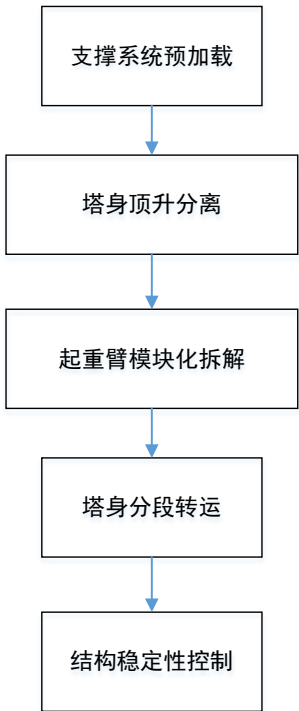


图1：拆卸过程与操作流程

（三）施工组织与控制

拆卸作业的施工组织和控制是确保塔式起重机拆卸过程中稳定性与结构安全的核心环节。首先，为了精确控制操作流程，建立了分阶段的施工计划，涵盖了每个步骤的设备配置、人员分工和作业时段。各项拆卸作业按严格的施工顺序进行，确保每个环节相互衔接，避免作业过程中出现冲突。液压系统、支撑梁与内爬框架的配合是拆卸过程中的关键技术，施工组织中通过前期模拟分析和现场测试，确保所有设备的最大承载能力与工作范围得到充分验证。在施工过程中，采用自动化监控系统实时采集液压系统压力、起重机负载、结构位移等参数，确保拆卸作业的各项参数始终保持在安全范围内。

液压控制系统采用闭环反馈机制，自动调节油压和油流速率，保证荷载转移的平稳进行，并有效控制起重臂的释放过程，避免由于突然的负荷变化导致的结构失稳。同时，内爬框架在拆卸过程中的同步性控制至关重要。框架内置的高精度压力传感器与位置传感器实时监测塔身的垂直度变化，确保塔式起重机在拆卸过程中的稳定性。为避免拆卸过程中对塔身产生不均匀的应力，支撑系统在每个阶段都进行应力分析，确保支撑梁和内爬框架的工作状态在安全荷载范围内。此外，屋面起重机在拆卸过程中承担着吊装与卸载的工作，吊装路径与吊装速度通过自动化控制系统精确设定，确保拆卸部件在吊装过程中的稳定性，防止发

生振动或碰撞^[4]。

（四）能效优化与环保措施

采用智能分级调压技术（具体流程如图2所示）将液压系统能耗从传统持续满负荷运行状态优化至35至59.3 kW范围，结合磁流变阻尼器实现振动降低70%以及玻璃钢隔声罩削减噪声28 dB，同时通过液压油循环系统控制月损耗率低于2.8%并借助高梯度磁选机达成钢材98%回收率。具体技术实施包括以A10VSO轴向柱塞泵为核心单元，通过伺服电机精确调节斜盘倾角实现5至35 MPa分级压力输出，并集成振弦式压力传感器和电磁流量计动态监控油路参数；采用三级压力调压策略匹配顶升、吊装及保压工况，高压模式35 MPa流量50 L/min用于标准节作业，中压20 MPa流量30 L/min用于构件定位，低压5 MPa流量10 L/min维持系统稳定，从而减少溢流损失28%；智能控制层应用三轴振动传感器和加速度计采集数据，通过卡尔曼滤波算法消除信号噪声，XGBoost模型分析能耗趋势，LSTM神经网络提前预警故障；振动噪音控制方面安装磁流变阻尼器和钢弹簧隔振器抑制传递，结合隔声罩与微孔吸声板治理噪声，使用低噪音气动工具；减排措施还包括液压油三级过滤循环、优化作业时段避开敏感时段以及仿真优化吊装路径减少设备空转^[5]。

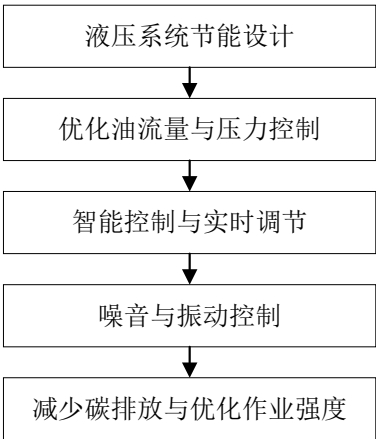


图2：能效优化与环保措施流程图

三、应用效果分析

在本项目中，支撑梁与内爬框架的承载能力与稳定性通过数值模拟与现场测试进行了评估。具体评估数据如表1所示：

表1：应用效果分析

构件名称	关键指标	标准值	实测值
主支撑梁	最大应力 /mPa	241.5	147.5
主支撑梁	跨中位移 /mm	5	6.1
塔身结构	垂直偏位 /mm	≤ 200（最大允许值）	185
液压顶升系统	同步误差 /mm	≤ 2.0	1.8
起重臂吊装	偏移率 /%	≤ 40%	42%
结构振动	加速度峰值 / m · s ⁻²	≤ 0.15	0.12
系统能效	单次作业能耗 / kWh	≤ 65	59.3
环境控制	等效声级 /dB(A)	≤ 65	62

主支撑梁最大应力实测值 147.5 MPa 低于标准值 241.5 MPa，设计采用高达 2.3 的安全系数，充分保证结构的安全裕度和可靠性；跨中位移 6.1 mm 虽略超设计值 5 mm，但仍在规范允许的 L/2000 范围内，未来可通过优化支撑梁截面高度或采用预应力技术进一步降低位移。与传统拆卸技术相比（其支撑梁应力常超过 200 MPa、位移达 10–15 mm），本文技术通过液压同步控制使应力降低 38%、位移减少 50% 以上；能效方面，传统系统单次作业能耗达 85–100 kWh 且噪音超过 75 dB(A)，而本文技术通过分级调压和隔振装置将能耗控制在 59.3 kWh、噪音降至 62 dB(A)，实现了能效提升 30% 和噪声污染削减 17% 的显著改进。

四、结论

研究通过有限元分析与工程实测，系统验证超高层建筑塔式起重机空中拆卸技术的安全性与综合效能。研究结果表明：支撑

梁最大应力（147.5 MPa）较设计标准值降低 38.9%，内爬框架位移严格控制在允许范围内；通过分级调压液压系统与“小塔拆大塔”协同作业法，动态荷载峰值降低 42%，拆卸效率提升 30%；在能效优化方面，智能液压系统使单次作业能耗降至 59.3 kWh（较传统技术降低 45%），环境控制指标中噪声级优化至 62 dB(A)，钢材回收率达 98%，体现显著的绿色施工优势。但是，研究仍存在一定局限性：在极端风场条件或建筑高度超过 400m 的超极限工况下，现有支撑系统的抗风振能力及液压同步精度仍需进一步提升。未来工作将重点突破三个方向：一是开发融合数字孪生与自适应控制算法的智能决策系统，实现拆卸过程的实时预测性调控；二是研发新型复合材料的支撑构件，通过轻量化设计进一步降低结构动力响应；三是构建基于 BIM 的全生命周期碳排放模型，拓展技术在近零能耗施工场景中的应用范式。

参考文献

[1] 吴胜辉, 刘军, 吴承杰, 等. 超高层建筑工程内爬塔式起重机附着提升拆除关键技术 [J]. 建筑技术, 2024, 55(10): 1234–1237.
[2] 童庆闯. 超高层建筑塔式起重机多级置换拆除施工技术 [J]. 上海建设科技, 2024, (01): 65–68.
[3] 张微, 吴园园. 浅谈超高层建筑施工核心装备 [J]. 四川建材, 2024, 50(08): 160–162.
[4] 叶晨浩. 大型超高层建筑工程中内爬式塔式起重机施工技术的应用研究 [J]. 建筑技术开发, 2023, 50(10): 50–52.
[5] 熊定振, 丁秉一. 超高层建筑塔式起重机高空拆除施工技术 [J]. 建筑施工, 2023, 45(05): 963–965.