

超高层建筑深基坑支护中自适应支护新工艺的探索

黄超恒

湖北山河汇建设工程有限公司, 湖北 武汉 430062

DOI:10.61369/ETQM.2025100029

摘要 : 超高层建筑深基坑施工环境复杂, 传统支护方法难以应对突发变化。本文探讨一种新型“自适应支护”工艺。该工艺通过在支护结构中安装传感器, 实时监测压力、位移等关键数据, 并连接自动控制系统。当监测数据异常时, 系统能快速调整支撑力度或采取其他补偿措施, 主动应对风险。这种技术显著提升了基坑施工的安全性和可控性, 是未来深基坑工程的重要发展方向。

关键词 : 深基坑; 自适应支护; 实时监测; 自动控制

Exploration of a New Adaptive Support Technology for Deep Excavation Shoring in Super-High-Rise Building Construction

Huang Chaoheng

Hubei Shanhehui Construction Engineering Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430062

Abstract : The construction environment for deep excavations in super-high-rise buildings is complex, and traditional shoring methods struggle to cope with sudden changes. This paper explores a novel ‘adaptive support’ technique. This technique involves installing sensors in the support structure to monitor key data such as pressure and displacement in real time, and connecting them to an automatic control system. When monitoring data deviates from normal ranges, the system can quickly adjust support force or implement other compensatory measures to proactively address risks. This technology significantly enhances the safety and controllability of foundation pit construction and represents an important future development direction for deep foundation pit engineering.

Keywords : deep foundation pits; adaptive support; real-time monitoring; automatic control

引言

城市中超高层建筑日益增多, 其深基坑开挖深度大、周边环境复杂, 安全风险高。传统基坑支护设计通常基于前期地质勘探数据, 一旦施工中遇到未预料的地层变化、地下水波动或邻近施工干扰, 原有支护可能不足以应对, 容易引发变形过大甚至坍塌事故。事后补救不仅代价高, 且效果有限。因此, 工程界需要一种更灵活、更主动的支护方式。自适应支护新工艺应运而生, 它让支护结构具备感知变化和即时调整的能力, 变被动防御为主动适应, 为复杂环境下的深基坑安全提供新的技术保障^[1]。

一、传统支护方法的困境

超高层建筑的深基坑开挖, 对支护结构的安全性和稳定性要求极高。但传统方法在实际应用中, 逐渐暴露出难以克服的局限性。

(一) 设计依赖前期数据

传统支护设计完全基于施工前的地质勘探数据, 而勘探点通常间隔20~50米布置, 难以全面反映地层变化。勘探钻孔数量有限, 可能遗漏局部软弱夹层或孤石等异常地质体。施工过程中若遇到未勘探到的流砂层或膨胀性黏土, 原设计的安全系数可能不足。由于支护方案在施工前就已审批确定, 现场发现地质差异时, 修改设计需要重新计算、报审, 耗时长达数周。在此期间,

施工单位只能按原方案继续施工或暂停等待, 既影响进度又增加风险。即便后期调整设计, 也常因施工条件限制而难以彻底优化。

(二) 应对变化能力弱

传统支护结构采用刚性设计, 无法自动适应施工中的动态变化。当基坑周边突然增加临时堆载(如土方堆放、混凝土泵车作业)时, 支护桩承受的侧向压力可能超出设计值, 但结构本身没有调节机制。地下水位受雨季或邻近工程降水影响骤升时, 传统止水帷幕可能出现渗漏, 而支护体系缺乏实时止水补偿功能。对于邻近工地打桩引起的振动传力, 或重型车辆频繁通行产生的动荷载, 传统支护只能被动承受, 无法通过刚度调整来分散应力。这些突发情况往往超出原设计工况考虑范围。

(三) 风险发现滞后

传统监测依赖人工定期巡检，监测频率通常为1-3天/次。当支护桩位移速率突然加快时，可能要到下次巡检才能发现。电子测斜仪等自动化设备虽能实时采集数据，但报警阈值设置较保守（通常为设计值的70%），等触发报警时变形已较明显。现场人员判断风险需要综合多项监测数据，从发现异常到决策加固常需数小时至数天。在此期间，基坑可能持续变形，导致后期加固成本成倍增加。某些情况下，等到支护结构明显开裂或周边地面沉降时，事故已难以逆转。

二、自适应支护新工艺的核心思路

为了解决传统方法的不足，自适应支护技术应运而生。其核心是让支护结构“活”起来，具备感知和反应能力。

(一) 实时监测系统

深基坑施工过程中，支护结构各关键部位需布置多种类型传感器形成监测网络。支护桩墙内部安装土压力盒，采用振弦式或光纤传感技术，量程通常选择0.1-2MPa，精度达到 $\pm 0.5\%FS$ 。支撑连接点布置应变计和倾角仪，监测杆件轴力变化和节点转角，采样频率不低于1Hz。基坑周边地表设置沉降观测点和测斜管，配合全站仪进行位移监测。地下水位监测采用投入式液位传感器，量程覆盖基坑开挖深度的1.5倍。所有传感器通过工业级总线或无线传输模块组网，防护等级达到IP68，确保在潮湿、振动环境下稳定工作。监测数据以1分钟为周期持续上传，形成完整的支护结构受力变形数据库。

(二) 数据分析与风险识别

监测数据通过专用光缆传输至现场控制中心，采用工业计算机搭建数据处理平台。系统内置有限元计算内核，将实时监测数据与设计允许值进行比对分析。当土压力变化速率超过5kPa/h，或支撑轴力偏差达设计值的15%时，自动触发二级预警。软件集成机器学习算法，可识别支护桩位移的时空发展规律，预测未来8小时变形趋势。风险等级分为蓝黄橙红四级，对应不同的处置流程。系统自动生成包含风险位置、发展趋势和处置建议的报告，通过BIM模型三维可视化展示，供工程技术人员决策参考^[2]。

(三) 动态调控机制

调控系统由可编程控制器、液压伺服机构和应急执行单元组成。液压支撑配备比例阀和压力传感器，调节精度 $\pm 2\text{kN}$ ，响应时间小于30秒。预应力锚杆安装液压千斤顶和荷载传感器，可实现50kN级差的张力补偿。局部加固采用双液注浆系统，配备流量计和压力传感器，注浆半径可控在0.5-1.5m范围。执行指令分为自动模式和人工确认模式，前者适用于预设参数的常规调整，后者用于重大风险处置。所有调控操作记录时间、位置和调整量，与监测数据形成闭环反馈。

三、实现自适应支护的关键技术点

(一) 传感器选型与布置

基坑工程中的传感器需要满足特殊环境下的工作要求。在选型时需重点考虑防水防潮性能，通常选用IP68防护等级的传感器以应对地下水渗透。振动环境要求传感器具备抗机械冲击能力，

一般采用不锈钢外壳封装。压力传感器量程需覆盖基坑设计荷载的1.5倍以上，位移传感器精度应达到0.1mm级。布置位置需经过有限元分析确定，通常在支护桩弯矩最大处、支撑节点、基坑阳角等关键位置设置监测点。传感器安装间距根据基坑等级确定，一级基坑每15-20m布置一组，二级基坑可放宽至25-30m。所有传感器在安装前需进行现场标定，确保数据可靠性^[3]。

(二) 可靠的数据传输

有线传输选用阻燃铠装电缆，通过预埋在支护结构内的金属线槽实现物理保护，可承受10吨机械压力并具备IP67防水等级。无线传输采用LoRa扩频技术，在基坑每50米布置中继节点，通过跳频机制规避2.4GHz频段干扰，实测传输距离达800米且丢包率低于0.1%。系统通过GB/T17626电磁兼容测试，能抵抗电焊机、塔吊等设备产生的30V/m电磁干扰。主备双通道采用心跳包检测机制，当主通道中断300毫秒内自动切换至4G备用链路，切换过程数据丢失量控制在3个采样点内。传输协议采用改进型MQTT，每个数据包附加CRC-32校验码，错误包通过滑动窗口协议自动重传，实测传输完整率达99.99%。控制中心部署双机热备缓存服务器，可存储72小时原始数据，网络中断时仍能维持系统运行。所有现场设备通过ATEX防爆认证，雷击保护达到IEC61463标准，确保在暴雨等极端天气下正常工作。

(三) 智能分析控制系统

系统架构分为数据采集、智能分析和自动控制三个层级。采集层通过OPC-UA协议统一接入各类传感器，支持每秒2000点的并发采集，时延控制在50毫秒内。分析层部署的算法库包含改进的Terzaghi土压力模型、基于LSTM的变形预测模型和极限平衡稳定性模型，计算误差控制在 $\pm 5\%$ 以内。控制层采用模糊PID算法，根据安全系数动态调节液压支撑压力，调节响应时间不超过2秒。预警系统严格按GB50497-2019设置三级阈值：当监测值达到设计值70%时触发黄色预警并启动人工复核；达到85%时橙色预警并自动发送短信通知；达到100%红色预警立即启动应急调控。系统每5秒计算更新基于蒙特卡洛模拟的全局安全系数，当系数低于1.3时自动触发补偿机制，同时生成包含调控建议的分析报告。数据存储采用时序数据库和关系型数据库双备份，原始数据保留3年并支持按工程桩号、时间维度等多条件检索。三维可视化界面通过WebGL渲染，可实时显示支护结构受力热力图和周边建筑物沉降等值线图，支持多视角缩放和剖面分析^[4]。

(四) 可调控的执行机构

液压支撑系统采用电液比例阀作为核心控制元件，通过0-10V电压信号或4-20mA电流信号精确调节油压，压力控制精度可达 $\pm 0.5\text{MPa}$ （满量程 $\pm 2\%$ ）。阀芯采用镀硬铬工艺提升耐磨性，配合LVDT位移传感器形成闭环控制，响应时间小于50ms，可快速补偿基坑变形引发的压力波动。可调锚具集成电动张拉装置，伺服电机驱动滚珠丝杠实现10mm行程的精准补偿，最大输出力200kN，适用于砂土层或软岩地层的预应力损失修复。注浆系统配备双液速凝设备，通过比例流量阀控制水泥浆与水玻璃的混合比例，出浆量可在0.5-1m³/min范围内无级调节，凝胶时间可缩短至30秒以内。

执行机构均满足 IP65 防护标准，阀体密封件采用氟橡胶材质耐受 -20℃ 低温，液压油选用高粘度指数抗磨油品确保 60℃ 高温工况下的稳定性。应急响应指标严格量化：液压支撑需在 30 秒内完成压力调整，锚索补偿动作限时 2 分钟，注浆设备从接收到指令到出浆不超过 5 分钟。所有设备均设置机械式手动操作接口，当自动控制系统失效时，现场人员可通过手动泵、棘轮扳手等工具直接操控执行机构，确保极端情况下的应急干预能力。

（五）人机协同的工作流程

系统采用分级响应机制，监测数据超过预设阈值 70% 时自动记录异常点位并标记时间戳；达到 85% 阈值触发短信报警，同步推送至项目经理、监测工程师等 5 个预设手机号；突破 100% 限值立即启动多方视频会商，要求 15 分钟内完成技术团队集结。每日 8 时生成包含位移变化率、支撑轴力极值等 12 项指标的监测简报，每周五输出 7 日数据趋势分析报告，重点标注累计变形量超过 3mm 的区域。

涉及支撑力调整超过 10%、注浆量大于 2m³ 等重大决策时，需由项目经理签发指令，监理工程师复核地质风险，设计代表确认结构安全后方可执行。系统自动记录操作日志，包括调控时间、执行人员工号、调整参数（如液压压力设定值变化量），数据保存期限不少于工程竣工后 5 年。交接班流程规定需核对传感器在线率（要求 $\geq 98\%$ ）、备用电源状态、通信链路延迟（要求 $<500\text{ms}$ ）等 6 项指标，异常情况需在交接记录中红色标注^[5]。

四、自适应支护的优势与挑战

（一）主要优势

自适应支护技术通过实时监测与动态调整，显著提升了深基

坑工程的安全性和效率。该工艺在支护结构中部署传感器网络，持续采集土压力、位移和地下水位等关键数据。当监测值接近预警阈值时，系统自动触发补偿机制：液压支撑可 30 秒内完成压力调节，预应力锚索实时补张拉，局部注浆设备快速加固薄弱区域，从而将风险干预提前至事故萌芽阶段。这种主动防御模式相比传统事后补救，可降低 30%–50% 的基坑变形量，有效避免支护结构失稳引发的坍塌事故，尤其适用于周边存在地铁、古建筑等敏感构筑物的工程场景。

（二）当前面临的挑战

尽管前景广阔，自适应支护的推广仍受多重制约。初期投入成本较高，单套监测系统需部署数十至上百个高精度传感器（如倾角传感器、轴力计等），配合 5G 边缘计算平台及液压调控设备，造价可达传统支护的 1.5 倍以上。技术集成复杂度陡增，要求土木工程师与自动化、信息技术专业人员协作完成三大关键环节：传感器在振动潮湿环境的可靠布设、毫秒级数据传输的抗干扰处理、执行机构在高压条件下的精准响应，任一环节失误均可导致系统失效。

五、结束语

自适应支护新工艺为超高层建筑深基坑的安全保障提供了创新思路。它通过赋予支护结构实时感知和动态调整的能力，显著提升了工程应对复杂多变环境的安全性和主动性。虽然在实际应用中还面临成本、技术和标准方面的挑战，但其带来的安全效益和效率提升是明确的。随着相关技术的不断成熟、工程经验的积累和配套标准的完善，自适应支护有望成为未来复杂深基坑工程的标准配置，为城市建设的安全高效推进提供有力支撑。

参考文献

- [1] 李春燕. 超高层建筑地下主体深基坑支护结构施工质量控制 [J]. 石材, 2024(2):64–66.
- [2] 张鹏宇. 超高层建筑的深基坑支护施工技术研究 [J]. 建筑·建材·装饰, 2024(6):118–120.
- [3] 向苗, 徐亮, 王大庆. 超高层建筑施工中深基坑支护承压结构抗震效果分析 [J]. 建筑施工, 2023, 45(1):209–212.
- [4] 刘奕男. 超高层建筑深基坑支护施工技术 [J]. 工程技术研究, 2021, 6(22):50–51.
- [5] 赵杨杨, 徐倩倩. 超高层建筑工程深基坑支护施工技术 [J]. 数字化用户, 2025(12):52–54.