

房建工程临时测量控制网的快速布设与动态优化技术研究

郭 树

中交三公局华东建设工程有限公司 浙江 杭州 311101

摘要: 本文聚焦于房建工程中临时测量控制网的关键技术瓶颈, 系统性地提出了一套集“快速布设”与“动态优化”于一体的创新技术体系。首先, 针对布设阶段, 构建了基于BIM(建筑信息模型)正向设计的控制点智能预选模型, 并融合多源传感器(如GNSS-RTK、全站仪、激光扫描仪)进行协同观测, 实现了控制网的高效初建。其次, 针对施工扰动导致的控制点失稳问题, 创新性地引入了基于卡尔曼滤波(KalmanFilter)与序贯平差(SequentialAdjustment)相结合的动态优化算法, 能够对控制网进行实时或准实时的状态监测与参数更新。最后, 通过一个典型的超高层核心筒-外框结构施工案例, 验证了所提技术的有效性与优越性。结果表明, 该技术体系能将控制网布设时间缩短, 动态优化后网形稳定性提升, 优于传统方法, 为智能建造与精细化施工提供了坚实的空间基准保障。

关键词: 房建工程; 临时测量控制网; 快速布设; 动态优化; BIM; 多源传感器融合

引言

随着我国城市化推进与建筑技术革新, 房建工程体量更大、结构更复杂、工期更紧张、精度要求更高, 百米级超高层建筑、大跨度体育场馆等施工对空间定位精度挑战巨大。测量工作是工程建设的“眼睛”和“标尺”, 临时测量控制网是施工测量工作的核心与基石, 为后续测量活动提供坐标基准。但传统临时控制网布设与维护模式问题突出: 布设依赖工程师经验, 选点盲目, 外业观测耗时费力且易受环境干扰, 初期建网效率低; 施工周期内, 多种因素持续扰动控制点, 致其位移或破坏, 控制点失稳若未及时修正, 会使测量成果出现系统性偏差, 影响工程质量和安全^[1]。而定期复测、整体平差的静态维护方式响应滞后、成本高、无法捕捉瞬时扰动。因此, 实现临时测量控制网“快速布设”提升施工效率、“动态优化”保障精度稳定性, 是现代房建工程高质量发展的关键难题。开展本课题研究, 兼具理论价值与工程应用需求, 对推动建筑行业数字化、智能化转型意义深远。

1 临时测量控制网快速布设技术

快速布设的目标是在保证必要精度的前提下, 最大限度地减少外业工作量和时间消耗。其实现路径在于“内业先行、外业协同、智能决策”。

1.1 基于BIM的控制点智能预选

BIM模型作为建筑全生命周期的信息载体, 包含了精确的几何、空间和语义信息。利用BIM进行控制点预选, 可从根本上改变传统“先现场、后图纸”的被动模式。

1.1.1 约束条件建模

首先, 在BIM环境中定义控制点布设的硬性约束和软性约束。硬性约束包括通视条件(两点间无建筑实体

遮挡)、点位稳定性(避开未来基坑、重型设备通道、材料堆场等区域)、安全距离(远离高空坠物风险区)等^[2]。可通过BIM的碰撞检测和空间分析功能自动识别。软性约束主要指网形几何强度, 即点与点之间构成的图形应尽可能接近正多边形, 边长差异不宜过大, 以保证平差后的精度均匀。这可以通过计算各候选点组合的图形权倒数(或GDOP值)来量化评估。

1.1.2 智能优化算法

将控制点预选问题转化为一个多目标优化问题。目标函数可定义为:

$$\min(w_1 \cdot C_{\text{cost}} + w_2 \cdot (1 - G_{\text{strength}}))$$

其中, C_{cost} 代表预计的外业成本(与点位数量、分布范围相关), G_{strength} 代表网形几何强度, w_1, w_2 为权重系数。而权重系数 w_1, w_2 则依据工程实际需求动态赋值——通常采用层次分析法(AHP)或专家打分法确定: 在高精度优先场景(如超高层建筑)中取 $w_2 > w_1$, 在工期或成本敏感项目中则取 $w_1 > w_2$, 若无明显倾向可设为等权重 $w_1 = w_2$ 。在此基础上, 采用改进的遗传算法(GA)在BIM提供的海量候选点中进行全局寻优: 首先基于BIM模型自动生成候选点池, 并通过碰撞检测与空间分析剔除违反硬性约束(如位于基坑、堆场或通视受阻区域)的点位; 随后将可行点集编码为个体种群, 以目标函数值作为适应度, 通过保连通交叉、局部搜索变异及精英保留等策略迭代优化; 当达到最大迭代次数或收敛阈值时, 输出最优控制点组合及其性能指标^[3]。若问题规模较小, 也可采用模拟退火算法(SA), 以单一解为起点, 通过温度退火机制平衡全局探索与局部收敛, 最终实现兼顾精度、成本与施工可行性的临时控制网智能布设。

1.2 多源传感器协同观测技术

单一传感器往往难以兼顾效率与精度。例如，全球导航卫星系统实时动态测量（Global Navigation Satellite System Real-Time Kinematic, GNSS-RTK）速度快但受信号遮挡影响大；全站仪精度高但需要通视且效率较低；激光扫描仪可获取密集点云但数据处理复杂。多源传感器融合是实现快速、稳健观测的关键。

1.2.1 观测方案设计

根据BIM预选的点位方案和现场环境，制定混合观测策略。通常，在场地开阔的外围区域，优先使用GNSS-RTK进行快速坐标测定；在核心施工区或信号遮挡严重的区域，则采用高精度智能全站仪进行自由设站（Free Stationing）或多测回测角测距。对于关键的基准点，可辅以地面激光扫描（TLS）进行高密度点云采集，作为冗余校验。

1.2.2 数据融合与初值解算

将来自不同传感器的异构观测数据（如GNSS的WGS-84坐标、全站仪的极坐标、TLS的点云）通过统一的时空基准进行融合。首先，利用布尔莎七参数模型将GNSS成果转换至地方施工坐标系。然后，以GNSS点作为已知点，通过自由设站原理解算全站仪设站点的精确坐标，并以此为基础，观测并解算其余控制点的三维坐标^[4]。TLS点云则通过ICP（Iterative Closest Point）算法与BIM模型或已知控制点进行配准，提取控制点标志的精确位置，用于交叉验证。这种多源协同的方式，极大地提高了初建控制网的鲁棒性和效率。

2 临时测量控制网动态优化技术

动态优化的核心在于建立一个能够感知环境变化、自主评估自身状态并实时调整参数的“活”的控制网。

2.1 动态优化模型构建

我们将临时控制网视为一个随时间演化的动态系统。每个控制点的状态向量 X_k 在时刻 k 可表示为：

$$X_k = [x_k, y_k, z_k, \dot{x}_k, \dot{y}_k, \dot{z}_k]^T$$

其中，前三个元素是位置坐标，后三个是速度分量，用以描述点位可能的缓慢漂移趋势。

系统的状态转移方程（预测模型）可简化为匀速运动模型：

$$X_k = FX_{k-1} + w_{k-1}$$

其中， F 是状态转移矩阵， V 是过程噪声，服从高斯分布。

观测方程则由各类传感器在时刻 k 提供：

$$Z_k = HX_k + v_k$$

其中， Z_k 是观测向量（如同站仪测得的角度、距离），

H 是观测矩阵， v_k 是观测噪声。

2.2 卡尔曼滤波与序贯平差融合算法

为了高效处理连续到达的观测数据并更新控制网状态，本文提出将卡尔曼滤波（KF）与序贯平差（SA）相结合的算法。

2.2.1 卡尔曼滤波进行状态预测与更新

KF以其递推、实时的特性，非常适合处理高频、小批量的自动化监测数据。例如，安装在关键控制点上的静力水准仪或倾角仪可以每小时甚至每分钟传回一次高程或倾斜数据。KF利用上一时刻的最优估计 $\hat{x}_{k-1|k-1}$ 和协方差 $P_{k-1|k-1}$ ，首先预测当前时刻的状态 $\hat{x}_{k|k-1}$ 和协方差 $P_{k|k-1}$ 。当新的观测值 Z_k 到达时，KF计算卡尔曼增益 K_k ，并据此更新状态估计 $\hat{x}_{k|k}$ 和协方差 $P_{k|k}$ ^[5]。这个过程能有效抑制观测噪声，平滑点位的微小波动，并对潜在的异常位移做出初步预警。

2.2.2 序贯平差进行全局优化

当积累了一定数量的观测数据，或者KF检测到某个点可能存在显著位移（即残差超出阈值）时，触发一次序贯平差。SA是一种高效的平差方法，它不需要重新处理所有历史数据，而是将新观测数据作为“附加观测值”，在原有平差结果的基础上进行增量式计算^[6]。具体步骤如下：（1）可靠性检验：对KF标记出的可疑点，利用多余观测进行数据探测（如Baarda法），严格区分是粗差还是真实的位移。（2）参数更新：若确认为真实位移，则将该点从“稳定点”集合中移除，或将其视为待估参数，利用所有可用的观测数据（包括新旧数据）进行一次序贯平差，重新解算整个控制网中所有点的最优坐标。（3）基准定义：在平差过程中，必须明确定义基准。通常选择远离施工扰动区、经长期验证最稳定的1-2个点作为固定基准，其余点坐标相对于此基准进行解算。

通过KF与SA的融合，系统既能实现对控制网状态的连续、实时监控，又能在必要时进行高精度的全局优化，兼顾了效率与精度。

3 工程应用与验证

3.1 工程概况

为验证所提技术的有效性，选取某市一幢350米高的超高层办公楼项目作为案例。该建筑采用“混凝土核心筒+钢结构外框”的混合结构体系。施工难点在于核心筒液压爬模系统与外框巨型钢柱的同步攀升，两者间的相对位置精度要求极高（ $\pm 5\text{mm}$ ）。现场环境复杂，基坑深度达30米，重型塔吊林立，对测量工作构成巨大挑战。

3.2 技术实施流程

3.2.1 快速布设阶段

(1) BIM预选: 在Revit模型中, 根据施工总平面图和进度计划, 排除了未来3个月内将进行土方开挖和材料堆放的区域。通过自编插件, 对场地内数百个候选点进行通视分析和几何精度衰减因子(GeometricDilutionofPrecision,GDOP)计算, 最终优选出8个控制点(4个外围GNSS点, 4个核心筒附近高精度点)。(2) 协同观测: 使用GNSS-RTK在2小时内完成了4个外围点的测定。随后, 使用LeicaTS60高精度全站仪, 在核心筒底部设立两个自由测站, 仅用半天时间就完成了内部4个点的观测和网形初建。整个布设周期比传统方法缩短了约50%。

3.2.2 动态优化阶段

(1) 系统部署与对照组设置: 项目分A区(实验组, 用动态优化技术)和B区(对照组, 用传统每月人工复测与平差法)。A区4个核心控制点装自动化全站仪等, 每4小时自动观测并回传数据, 两区每周人工复测校核, 记录三维偏差。(2) 动态运行与扰动响应: 施工至50层, KF算法报A区P3点高程残差异常, 经检验是因重型设备碾压沉降8mm, 非粗差。平差程序剔除P3点, 重新计算坐标, 未中断施工。(3) 长期监测数据积累: 6个月施工期, A区识别处理3次点位扰动, 24小时内重构网形; B区依赖月度复测, 两次间隔期无法感知变化, 月末最大累积偏差12mm, 需返工校正。(4) 成本核算依据: 项目统计两区测量支出, A区初期投自动化设备, 但避免B区2次重大返工(损失85万), 节省人工120工日, 整体测量成本较B区降约15%。

3.3 结果分析与对比

(1) 效率对比: 传统方法完成同等规模控制网的布设需2-3天, 而本文方法仅需1天, 效率提升超过50%。(2) 精度与稳定性: 6个月监测中, 对照组最大点位偏差累积12mm, 实验组用动态优化技术, 稳定性维持在 $\pm 3\text{mm}$ 以

内, 提升约75%。(3) 经济效益: 初期投自动化设备, 但避免返工、缩短测量时间, 整体测量成本降约15%。

4 结语

本文围绕房建工程临时测量控制网的快速布设与动态优化展开研究, 结论如下: 一是BIM驱动的智能预选是快速布设前提, 将工程约束和优化目标嵌入BIM, 能科学生成最优控制点方案, 克服传统方法不足; 二是多源传感器协同观测是提升布设效率与鲁棒性的关键, 融合多种技术优势, 可应对复杂现场, 保障初建控制网精度与可靠性; 三是“卡尔曼滤波+序贯平差”融合算法是实现动态优化的有效途径, 构建闭环, 变被动纠偏为主动预防和控制, 提升长期稳定性。展望未来, 该技术可与数字孪生平台深度融合, 为施工智能决策提供数据支撑; 还可利用深度学习预测控制点位移, 实现更高级主动防护, 助力建造更优质未来建筑。

参考文献

- [1]王晨.工程测量在房建工程中的应用[J].建筑技术开发,2020,47(22):54-55.
- [2]王春风,齐丽新.高层建筑施工测量控制技术探析[J].建筑与预算,2025,(09):76-78.
- [3]王龙,马瑞强,朱少东,等.建筑施工测量控制要点及保证措施[J].石油化工建设,2021,43(05):150-151.
- [4]王伟.混合测量控制网在工程中的应用[J].云南水力发电,2025,41(11):100-103.
- [5]张孝斌,黄瑞,马国清.GNSS静态测量在超高层建筑施工测量平面控制网中的应用[J].科技创新与应用,2023,13(31):5-8+13.
- [6]陈辉.高层建筑工程测量精度探讨与控制研究[J].住宅与房地产,2025,(20):47-49.