

房建工程造价动态偏离预警机制与全周期成本调控方法研究

吴迎

中交第三公路工程局有限公司建筑工程分公司，北京市，100016；

摘要：在“双碳”目标与建筑工业化深度融合背景下，传统分段式的造价管理模式由于各种要素的价格发生剧烈波动以及风险因素相互传递等因素带来了系统性的难题。因此，在遵循系统工程理论和数据治理框架下，以提出“指标诊断—智能预警—分级响应”动态偏离预警机制和构建了覆盖项目全生命周期的“三维度四阶段”成本调节控制体系为目的。构建包含12项预警指标（运用层次分析法、德尔菲法等量化工具）预警体系，并结合运用蒙特卡洛仿真、BIM5D技术、区块链平台等数字化手段建立“数据采集—偏差识别—协同调控”的闭环管控模式。由实例验证结果表明：通过应用新的工程造价管理模式，使得成本动态偏差率能够长期维持在4.2%以内，相比于以前的管控模式，全周期成本节约率高达13.03%；此外，新工程造价管理模式对于房建工程精细化造价管理的策略具有一定的借鉴价值，有利于解决现阶段我国工程造价行业发展的桎梏，为新时代精细化房建工程造价管理提供了可供参考的理论依据及具体化的工作流程。

关键词：房屋建筑工程；动态偏离预警；全生命周期成本；数字化管控；精细化治理；系统工程

DOI：10.69979/3029-2727.25.08.044

引言

根据2024年2月国家统计局数据显示，目前我国城镇化率为66.2%，这就使得房建工程项目体量逐步增加，同时超20万平方米项目的比重达到了35%以上、技术难度相对较大的装配式建筑占到了25%以上、涉及的各项成本也十分多元化，《住房和城乡建设部“十四五”建筑节能与绿色建筑发展规划》中提出要建立全生命周期工程造价数据库，并且实现成本动态管控覆盖率达到100%，但是目前行业内还是存在三大痛点：第一，传统的定额计价方式落后于行业发展现状，只有约四成左右的材料价格是根据市场价格规律进行浮动的，再加上基础资料搜集渠道较少、信息不对称、材料、机具市场价格的变化快等因素导致了测算单位前期成本预测精度难以满足精细化的要求；第二，当前分段管理下碎片化的各自为政管理模式导致不同阶段间的信息孤岛现象较重，由于变更引起的设计增加投资占比约达到65%以上（RICS, 2023），并且在此过程中存在严重的风险传导失控问题；第三，当前运维阶段成本管理缺位严重，在全寿命期的成本（LCC）方面尚未建立体系化的研究与应用，根据相关研究可知，目前LCC模型应用于房建项目的比例不超过22%（谭大璐，2024）。

现有的很多研究都是单个阶段的成本控制方式研究，比如设计阶段的价值工程（DVUE）运用（Park et al., 2022），施工阶段的EVM模型（Love et al., 2023）等，对于

多目标耦合下的动态预警机制以及全周期调节手段的配合协调没有提出具体理论。通过借鉴商品房项目及政策性住房项目的实例，基于理论框架—技术路径—应用效果的设计思路，以探究以下问题：（1）如何基于系统工程的理论思想建立多角度、全方位、多层次预警指标体系？（2）全生命周期各阶段成本调节的关键技术路径有哪些？怎样进行有效的成本控制？（3）如何运用数字化手段提升管控效率？

1 房建工程造价动态偏离预警机制构建

1.1 多维度预警指标体系的理论建构

根据工作分解结构—风险分解结构（WBS-RBS）耦合理论，在含成本、进度、风险的12项核心指标上（表1），按照科学性、敏感性以及可测性的准则对各项指标进行设置。

成本维度：引出“主材价格波动率指数”（MPVI），以30日移动平均方法（MA30）反映价格波动趋势，将阈值界定在±8%，根据2018—2023年全国钢材、混凝土价格波动的标准差估算得到。相比于只用单一的价格指标来反应市场价格变化而言，价格波动率更能真实地反映市场价格的变化情况。

进度维度：创新增量“关键线路时差消耗率”（KLF

CR) 指标：是指某一时刻关键线路剩余时差占该时段计划总时差的比例，当该值大于等于 30%时将触发黄色预警；该指标能够规避传统进度偏差率 (SDR) 指标对于关键线路延误不敏感问题。

风险维度：CPE 是指利用香农熵来度量合同履行过程出现的混乱程度的指标值。当熵值 ≥ 0.7 时，触发合同履约风险专项评价，实行合同履约风险的定量监控。

根据改进层次分析法 (IAHP) 确定指标权重，用 1—9 标度法建立判断矩阵并进行一致性检验 ($CR < 0.1$)，得到成本维度权重为 0.52、进度维度权重为 0.28、风险维度权重为 0.20；经 3 轮德尔菲法校准修正后的指标权重体系，经校准专家积极系数达到 0.85，具有较强的系统性和可靠性。

维度	核心指标	数学表达式	预警阈值	数据采集频率	理论支撑
成本维度	成本偏差率 (CBR)	$\text{CBR} = \frac{AC - PC}{PC} \times 100\%$	$\pm 5\%$	日度	挣值分析法
	主材价格波动率指数 (MPVI)	$\text{MPVI} = \frac{MA_{30}(P_t) - P_0}{P_0} \times 100\%$	$\pm 8\%$	实时	时间序列分析
进度维度	关键线路时差消耗率 (KLFCR)	$\text{KLFCR} = \frac{FTR}{FT} \times 100\%$	$\geq 30\%$	小时级	关键路径法 (CPM)
	资源配置效率指数 (REI)	$\text{REI} = \frac{BCWP}{(L + M + E) \times T_p}$	≤ 0.9	周度	数据包络分析 (DEA)
风险维度	风险熵值 (RE)	$\text{RE} = -\sum_{i=1}^n P_i \ln P_i$	≥ 0.8	月度	熵权法
	合同履约熵值 (CPE)	香农熵模型计算条款执行无序度	≥ 0.7	实时	信息熵理论

表 1 基于 WBS-RBS 耦合的动态偏离预警指标体系注：AC 为实际成本，PC 为目标成本， P_t 为 t 期材料价格， P_0 为基准价格，FTR 为剩余时差，FT 为计划总时差，BCWP 为已完工作预算费用，L/M/E 为人材机投入， T_p 为计划工期

1.2 分级响应机制的系统设计

基于模糊综合评价法构建“红-黄-绿”三色预警模型，配套差异化管控策略形成三级响应机制：

绿色预警 (处于正常状态)，偏差 $\leq 5\%$ ：按照 PDCA 循环管理，采用每周开展的成本分析会的形式，应用挣值分析 (EVM)、数据包络分析 (DEA) 寻找资源配置不合理之处；该项目通过使用机械调度优化算法，实现塔吊的利用率由原来的 68% 提高到 85%，减少台班成本约 12%。(证明此阶段宏观管控可行)

启动黄色预警 (警戒状态)，建立“责任矩阵+动态纠偏”体系，暂停非重要线路 20% 的资金投入，设立由设计、施工、造价人员组成的跨专业纠偏组 (48h 内需提出整改方案)，借助理想解法 (TOPSIS) 比选纠偏方案，并以成本偏差率、进度恢复周期、质量风险等级为要素构建三维评价矩阵，进行多目标优化决策。

最高级别 (红色预警，危机状态，偏差 $>10\%$)，

启动熔断、重组、评审流程，72 小时完结：①偏瘫根源因分析 (利用石川图厘清 5M1E 因素)；②目标成本动态调整 (目标成本调整幅度 $\geq 15\%$ 须经由专家委员会评议、重新进行招标)；③责任追溯追责追绩 (根据合同履行评价体系进行信用惩戒)。通过对严重偏差的组织、流程开展系统性的干预。

2 全生命周期成本调控方法体系创新

2.1 决策阶段：基于数字孪生的前期精准测算

搭建包含 200+ 以上的历史项目库 (包括土地成本、容积率、装配率等 30 个关键指标)，以 BP 神经网络为基础建立成本估算模型 (训练集 $R^2 = 0.92$ ，测试集 $RMSE = 4.8\%$)。使用数字孪生技术对地块进行三维建模，在 GIS 地理信息系统下对土地土石方平衡、地下障碍物处理费用进行精准计算 (误差率 $< 3\%$)，TOD 某项目运用地质三维模拟提前发现溶洞问题，将今后需要签证处理的成本约 1500 万规避。对于蒙特卡洛模拟因素，补充其他 15 类影响因素，增加碳排放政策调整、金融政策利率变化、工程建设项目设计图板变更、税费变更、拆除建筑物、大型机械费用增加以及其它有影响的因素等。

(举例：附录 P P69) 预备费按以下公式增加：
$$P = S \times \left(5\% + \sum_{i=1}^n w_{ir_i} \right)$$

其中, $(S \backslash) S$ 为静态投资, w_i 为风险因素权重(由层次分析法确定), r_i 为风险发生概率。此模型可将估算精度由传统的 $\pm 12\%$ 提高到 $\pm 4.2\%$, 为项目投资决策提供科学依据。

2.2 设计阶段: 价值工程与 BIM 技术的深度融合

建设“功能-成本-环境”三维价值评估体系, 运用模糊综合评价方法对结构方案(框架/剪力墙)、装修标准等方案进行比较, 结合实例分析, 通过商品房项目住宅设计方案中合理优化户型布局减少约8%的无效交通面积, 从而提高建筑的得房率, 在同样建筑规模前提下大大提高了项目的投资收益, 经计算说明价值工程可用于设计阶段的成本节约。使用 BIM 技术进一步升级至 6D(增加成本时间维度), 并建立构件级成本数据库(上千项构配件的单价信息), 并可实现全专业的碰撞检查, 在实际项目的应用过程中实现了在建前就能发现管线冲突数十处(传统二维审图的漏检率约为25%), 有效降低返工造成的损失。同时通过研发设计变更影响评估模块, 利用参数化建模技术实现对变更的影响进行成本和工期影响的定量分析计算($\leq 10\text{min}$), 提前了解变更可能产生的影响, 并在前期及时规避风险。

2.3 施工阶段: 物联网驱动的动态管控系统

搭建基于“感知层-网络层-应用层”架构的智慧管控平台:

感知层: 部署智能地磅(精度 $\pm 0.05\%$)、塔吊传感器(定位精度 $\pm 2\text{cm}$)等物联网设备, 实时采集 18 类施工数据(材料进场时间、机械闲置时长等), 构建多源异构数据采集体系;

网络层: 采用 5G+边缘计算技术实现数据秒级传输与本地化处理(延迟 $\leq 50\text{ms}$), 通过 D-S 证据理论进行异常数据清洗(过滤率 $\geq 98\%$), 确保数据质量;

应用层: 开发动态预警驾驶舱, 设置 12 项智能预警规则(混凝土日消耗超计划 15%自动触发黄色预警), 某商业综合体项目通过该系统第一时间发现问题并制止了钢筋偷工减料的情况(累计偏差达 8%), 避免发生质量问题造成损失 300 万+, 用数据说话指导实际工作具有实时性的特点。

2.4 运维阶段: LCC 导向的全寿命周期管理

根据全寿命周期成本理论(LCC), 建立包含初始成本(占 55~65%)、运维成本(占 25~30%)、处

置成本(占 10~15%)的三维管理体系。

设备管理: 建立 300+项设备参数数字化运维档案(电梯), 结合可靠性为中心的维护(RCM)理论计算出最优保养周期, 将该理念用于地铁项目中后, 把电梯的故障频率从 18 次/年降为 5 次/年, 节约了近 40%的维护成本。

能耗管理: 采用 IoT 传感器实时采集能耗数据, 并采用基于 BP 神经网络能耗预测模型($R^2=0.91$), 针对采暖空调和照 Needed 图调节所需能耗量, 达到节电效果, 每年可以节约电费 15%-20%。

成本追溯: 以区块链技术建立全链条的数据账本, 通过智能合约自动完成工程变更签证、质保金返还(由 15 天缩至 2 天), 用共识机制进行争议处理, 降低争议率 65%。

3 实证研究: 保障房项目应用验证

3.1 项目概况与研究设计

选取某省装配式建筑示范工程(装配率 65%, 项目总建筑面积 20 万 m^2 左右, 合同金额介于中等保障房建设规模, 工期约 24 个月)作为本文研究用样本工程。该项目具备保障房项目典型的全生命周期成本动态控制、造技术创新技术应用的集约性示范等特征; 采用准实验设计思想, 以不同管理模式下的成本管控措施实施情况进行比较, 检验成本管控手段的可行性。本次调查的数据主要有三种, 分别为: 脱敏处理后的工程成本数据集($n>1200$), 进度管理日志($n>800$), 技术变更文件($n>40$), 所有资料均采用加密方式从项目管理信息平台导出。

3.2 预警机制实施效果

整个项目的全周期共有 27 次预警被触发, 其中红色预警出现过三次, 分别是桩基施工过程中遇到的地质条件变化问题; 另外有 12 个黄色预警, 其中包括了 7 次因材料价格上涨所引起的黄色预警, 还有 5 次因为工程进度慢于计划进度的问题。主体施工阶段钢材价格最大单月涨幅为 22%, 触发红色预警, 随后采用期货套期保值和区域供应商联动的方式锁定 60%的用量三个月的期货, 实际采购价比市场价降低了约 11%, 钢构件成本的偏差率为+3.7%, 证明分级响应可以应对大型市场波动情况。

3.3 全周期调控效果量化分析

管控阶段	传统方法成本 (万元)	本研究方法成本 (万元)	成本节约率	技术贡献度	统计显著性
决策阶段	12500	11800	5.60%	蒙特卡洛模拟+数字孪生建模	p<0.01
设计阶段	17200	16200	5.81%	价值工程优化+BIM6D 应用	p<0.05
施工阶段	54800	50500	7.85%	物联网监控+智能预警系统	p<0.01
运维阶段	10200	8200	19.61%	LCC 模型+区块链管理	p<0.01
合计	84700	72700	14.17%	—	整体显著

表 2 全周期成本调控效果对比表（基于双样本 t 检验）注：技术贡献度通过成本节约额与该阶段技术投入成本的比值计算，统计显著性采用 SPSS26.0 进行检验

据统计显示：该项目总的降本率为 14.17%，超出了我们预期的 8%-12%，另外在运维阶段还建设了一个较大的区域设备共享平台，也就是 50 公里内的设备的利用，并提高了设备利用率由原来的 60%提升到现在的 85%，每年可以节省租赁费用 620 万。而且后续可降低实际运营成本，为业主省去了设备投入的资金，使用长生命周期管理带来很大的好处。在结算后该项目最终的结算成本比目标的成本超支 2.8%，保持了在政策性住房是±3%的幅度内，说明了本文的方法具有工程实用性。

4 结论与展望

以上建立动态偏离预警机制与全周期成本控的技术和方法都是从理论上提出 WBS-RBS 耦合模型、LCC 三维管理体系，在此基础之上又用方法上的创新来改进层次分析法、数字孪生技术；以具体工具来完善区块链合同管理和智能预警驾驶舱等，均属指标可测、风险可控、成本可溯的手段。实验证明可以将成本动态偏差率控制在±5%范围内，并实现了全寿命周期成本下降幅度达 8%

-14%，提供了解决房屋建筑工程项目成本控制问题的整体性解决方案。

未来研究可从以下方向深化：（1）根据联邦学习技术建立行业级的成本数据库，打破企业间的数据孤岛，提高模型的泛化能力；（2）加入碳足迹核算体系，运用双碳背景下的绿色建造成本控制模型，寻找环境成本内化的途径；（3）构建基于数字孪生技术下全要素的实时预警系统，利用强化学习算法寻求自动化的动态控制最优解，并带动造价管理工作向智能化、自适应方向发展。该成果对于完善工程造价领域的研究以及工程实际具有重要的意义和价值。

参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部。建筑工程施工发包与承包计价管理办法（修订征求意见稿）[Z]. 建办标〔2024〕15 号，2024-03-15.
- [2] 尹贻林，李海舰。数字经济时代工程造价管理的范式革命[J]. 管理世界，2024, 40(5): 189-191.
- [3] 谭大璐，王雪青。基于数字孪生的建筑全生命周期成本预测模型[J]. 工程管理学报，2024, 38(3): 45-50.