

建筑工程设计中的技术经济风险评估与控制研究

刘红健 刘琳曼 田华贤

中国五洲工程设计集团有限公司 北京 100053

摘要: 本研究立足建筑工程设计阶段技术经济风险的复杂特性,构建多维度、智能化风险管控体系。融合多物理场耦合、数字孪生、概率统计及人工智能前沿技术,创新提出建筑结构经济性动态评估、装配式建筑风险阻断、地下工程抗浮风险平衡决策、光伏建筑一体化风险对冲及数字化设计智能预警等方法,实现风险的全生命周期量化分析与动态控制,为建筑行业技术经济风险管理提供理论创新与技术突破,助力提升工程综合效益与安全性能。

关键词: 建筑工程设计; 技术经济风险; 多物理场耦合; 数字孪生; 智能决策

引言: 在建筑行业高速发展与深度变革的背景下,建筑工程设计阶段面临的技术经济风险呈现出显著的复杂性、动态性与交叉性特征。超高层结构多物理场耦合作用下的性能演变、装配式建筑模块化设计的误差累积效应、地下工程抗浮设计参数的不确定性,以及光伏建筑一体化受政策与市场波动的多重影响,使得传统风险管控手段难以满足行业发展需求。这些风险不仅影响工程成本、进度与质量,更对建筑全生命周期的安全与可持续性构成威胁。因此,亟需基于多学科前沿技术,构建更为科学、精准、智能的技术经济风险评估与控制体系,以推动建筑行业高质量发展。

1 基于多物理场耦合的建筑结构经济性风险动态评估方法

1.1 多场耦合模型构建与参数动态校准

建筑结构在服役过程中,温度场、应力场、湿度场等多物理场呈现非线性耦合关系,其通过改变材料微观结构与宏观力学性能,对结构经济性产生持续性影响。基于连续介质力学、热力学及材料科学理论,构建全尺度多物理场耦合模型框架。采用有限元离散化技术,结合ANSYS、ABAQUS等专业仿真软件,实现对复杂结构多物理场交互作用的三维动态模拟。在参数获取方面,利用分布式光纤传感、无线传感器网络等先进监测技术,实现对材料热膨胀系数、弹性模量等关键参数的原位实时监测。通过数据驱动的机器学习算法,对监测数据进行深度挖掘与分析,实现模型参数的动态校准与优

化,确保模型能够精准反映实际工况下多物理场对结构性能的影响机制。

1.2 生命周期成本(LCC)的动态演化分析

以多物理场耦合模型为基础,构建全要素、全过程的LCC动态分析体系。在设计阶段,运用参数化建模与敏感性分析方法,系统研究多物理场变化对结构耐久性、能源消耗等方面的影响,建立基于退化理论的维护成本预测模型;施工阶段,引入数字孪生技术,对施工过程进行实时虚拟映射,结合时变可靠度理论,量化多物理场对施工进度、材料损耗的作用,实现建设成本的动态修正;运营阶段,借助物联网与大数据技术,实时采集结构运行数据,通过机器学习算法对设备性能衰减、结构健康状态进行预测,动态更新运维成本与设备更换成本。通过建立多物理场变量与成本要素之间的复杂非线性映射关系,实现LCC的动态追踪与精准预测。

1.3 动态风险阈值体系与智能调控策略

基于贝叶斯网络与模糊逻辑理论,构建风险概率与损失程度的联合评估模型,以风险熵作为综合度量指标,建立四级动态风险阈值体系。当风险熵值触及阈值时,系统自动触发智能响应机制:低风险场景下,采用基于遗传算法、粒子群优化算法的智能优化技术,对结构设计参数进行自适应调整,优化结构拓扑与材料选型;中高风险场景中,引入智能材料与智能结构技术,如形状记忆合金、压电材料等,通过主动调控物理场分布,实现对结构性能的实时优化与风险抑制,保障建筑全生命周期经济效益最大化。

2 装配式建筑模块化设计中的技术经济风险传递阻断机制

2.1 模块化参数的经济性敏感度深度分析

在装配式建筑模块化设计中,构建包含模块几何参数、连接参数、材料参数等的多维参数空间。采用全局

第一作者简介: 刘红健(1991年—),男,汉族,天津市人,大学本科,工程师。

第二作者简介: 刘琳曼(1992年—),女,汉族,河北省石家庄市人,硕士研究生,工程师。

第三作者简介: 田华贤(1987年—),男,汉族,山东潍坊人,硕士研究生,高级工程师。

敏感度分析方法,结合拉丁超立方抽样与蒙特卡洛模拟技术,系统量化各参数对运输成本、安装效率、结构可靠性等经济指标的影响权重。基于深度学习与代理模型技术,如生成对抗网络(GAN)、克里金模型等,构建高精度的参数-成本非线性映射模型,实现对参数波动影响的快速预测。针对高敏感度参数,运用多目标优化算法,如非支配排序遗传算法(NSGA-II)、多目标粒子群优化算法(MOPSO),在满足结构性能与功能要求的前提下,进行参数协同优化,实现成本与性能的最优平衡。

2.2 误差传递路径的数字孪生阻断技术

基于BIM与物联网(IoT)深度融合技术,构建装配式建筑全生命周期数字孪生模型,实现模块化构件从生产、运输到安装的全过程数字化映射与实时监控。在生产环节,利用机器视觉、三维激光扫描等先进检测技术,结合卡尔曼滤波算法,对构件尺寸误差进行实时监控与动态估计;运输阶段,通过GPS定位、惯性导航与传感器网络,建立构件空间姿态变化模型,实时跟踪运输过程中的振动、碰撞等风险因素;安装环节,借助BIM5D管理系统与激光扫描技术,进行实时偏差分析与定位。当检测到误差传递趋势时,基于模型预测控制(MPC)与智能决策算法,自动生成工艺调整指令,通过机器人自动化安装系统实现误差的精准校正与阻断,形成误差传递的闭环控制体系。

2.3 隐蔽工程风险的智能防控与经济补偿设计

针对装配式建筑模块连接节点、管线预埋等隐蔽工程,建立基于可靠性理论与人工智能的风险评估模型。运用蒙特卡洛模拟与Copula函数,量化施工质量变异对结构性能的影响,并分析多失效模式之间的相关性。基于风险价值(VaR)与条件风险价值(CVaR)理论,科学确定风险准备金计提比例。同时,构建包含无损检测技术优化、智能监测系统与应急预案的智能防控体系。采用声发射监测、探地雷达、红外热成像等多源无损检测技术,结合数据融合与深度学习算法,实现隐蔽工程质量的实时诊断与早期预警,有效降低后期因结构失效或功能缺陷导致的经济损失。

3 地下工程抗浮设计的技术经济风险平衡决策系统

3.1 抗浮参数的概率化建模与不确定性分析

地下工程抗浮设计受地下水水位、土体抗浮系数等众多不确定性参数影响。基于地质统计学、随机场理论与贝叶斯推断方法,对不确定性参数进行空间变异性分析与概率建模。采用Karhunen-Loeve展开、多项式混沌展开等技术,实现随机场的有限维离散。利用蒙特卡洛模拟与拉丁超立方抽样方法,生成大量参数样本集,结

合有限元数值模拟技术,建立抗浮稳定性的概率分析模型。通过计算失效概率、可靠指标等量化指标,系统评估不同设计方案的风险水平,为决策提供科学的概率化依据。

3.2 动态成本-安全权衡的智能决策方法

构建包含抗浮结构造价、维护成本、失效损失等要素的全生命周期成本函数,以抗浮安全系数为约束条件,建立多目标优化模型。采用智能优化算法,如NSGA-II、多目标差分进化算法(MODE)等,进行全局寻优,生成成本-安全Pareto前沿曲线。引入风险偏好理论与决策分析方法,通过设定偏好系数、进行敏感性分析等手段,对Pareto前沿曲线进行筛选,确定最优设计方案。利用可视化与交互设计技术,构建直观、便捷的决策支持界面,实现不同风险偏好下设计方案的动态比选与智能决策。

3.3 实时预警与自适应应急控制策略

基于物联网与智能传感技术,构建地下工程抗浮状态实时监测网络,采用分布式光纤传感、压力传感器、位移传感器等设备,实现对地下水水位、水压、结构位移等关键参数的实时、高精度监测。建立基于长短时记忆网络(LSTM)、门控循环单元(GRU)等深度学习模型的水位预测模型,结合马尔可夫链、随机过程理论进行不确定性分析。设定三级预警阈值,当监测数据触发预警时,通过专家系统与智能决策算法自动生成应急方案。轻度预警时,启动智能排水系统的自适应调控;重度预警时,激活预应力抗浮锚杆、压重等快速响应机制,确保地下工程抗浮安全。

4 光伏建筑一体化(BIPV)系统的技术经济风险对冲策略

4.1 光伏性能与建筑形态的深度耦合优化

建立包含建筑日照辐射模型、光伏组件光电转换模型、建筑热环境模型的多物理场耦合仿真平台。基于参数化设计与拓扑优化方法,系统分析建筑朝向、倾角、遮阳构件、建筑表皮设计等因素对光伏性能与建筑能耗的协同影响。采用多目标遗传算法、粒子群优化算法等智能优化技术,以发电效率、建筑热舒适性、成本为优化目标,进行全局寻优,生成Pareto解集。通过BIM技术与虚拟现实(VR)技术,对优化方案进行可视化表达与性能验证,实现光伏性能与建筑功能的深度融合与协同优化。

4.2 经济性风险的多维量化与预测

构建包含政策风险、市场风险、技术风险等维度的BIPV系统风险评估框架。运用德尔菲法、层次分析

法、模糊综合评价法等确定风险指标权重，采用灰色关联分析、主成分分析等方法量化各风险因素与经济指标（内部收益率、净现值等）的关联程度。建立基于随机森林、梯度提升决策树（GBDT）、长短期记忆网络（LSTM）等机器学习模型的风险预测模型，通过对历史数据的学习与训练，预测不同风险场景下经济指标的波动范围与趋势，为风险对冲策略制定提供准确的数据支持。

4.3 风险对冲策略的创新设计与应用

设计基于金融衍生工具、技术创新与政策协同的复合风险对冲策略。针对电价波动风险，开发基于天气衍生品、电力期货期权的光伏电价保险产品；对于组件价格风险，运用远期合约、期货合约、期权组合等金融工具进行套期保值；面对技术迭代风险，建立技术创新基金，通过产学研合作、技术研发联盟等形式，加强技术储备与创新。采用风险价值（VaR）、条件风险价值（CVaR）、风险调整后收益（RAROC）等度量指标，对风险对冲效果进行评估，通过动态调整对冲比例与策略，实现BIPV系统全生命周期技术经济风险的有效控制。

5 数字化设计平台中的技术经济风险智能预警框架

5.1 规则引擎与知识图谱的深度构建

基于本体论、语义网技术，构建建筑工程设计领域知识图谱，整合设计规范、工程经验、材料性能、结构设计等多源知识，利用Neo4j图数据库实现知识的结构化存储与高效检索。通过自然语言处理（NLP）技术，如语义解析、知识抽取、规则转换等，将设计规范条文转化为计算机可执行的语义规则。开发基于正向推理、反向推理与混合推理的智能规则引擎，结合知识图谱的语义检索与知识推理功能，实现设计方案的智能合规性检查、风险初步识别与知识推荐，为后续风险评估提供基础支持。

5.2 智能预警模型的强化训练与优化

收集建筑工程设计全生命周期多源异构数据，包括设计参数、施工记录、运维数据、行业案例等，构建大规模数据集。采用集成学习算法，如XGBoost、LightGBM、随机森林等，结合深度学习算法，如卷积神经网络（CNN）、循环神经网络（RNN）、Transformer等，构建高性能智能预警模型。通过特征工程、数据增强、模型融合等技术优化模型输入，利用交叉验证、网格搜索、贝叶斯优化等方法进行超参数调优。以准确

率、召回率、F1值、AUC等为评估指标，结合SHAP值、LIME等模型解释技术，对模型进行全面评估与解释，确保模型在识别潜在风险时具有高可靠性、泛化能力与可解释性。

5.3 动态反馈与智能优化控制流程

建立设计-预警-优化的闭环智能控制流程。当智能预警模型识别到风险后，基于知识图谱与案例推理技术，自动生成风险报告与优化建议。通过参数化设计工具、智能设计辅助系统，实现设计方案的快速修改与调整。修改后的方案重新提交至智能预警模型进行评估，形成迭代优化循环。利用强化学习算法，如深度Q网络（DQN）、近端策略优化算法（PPO）等，对优化策略进行动态调整与学习，通过不断积累优化经验，实现设计方案的持续改进与技术经济风险的动态控制，提升设计质量与效率。

结语

本研究通过融合多学科前沿技术，构建了建筑工程设计阶段技术经济风险的智能化评估与控制体系，在多物理场耦合分析、数字孪生应用、智能决策等方面实现了技术创新与理论突破。然而，随着建筑行业向智能化、绿色化、工业化方向加速发展，技术经济风险呈现出更多新特征与新挑战。未来研究需进一步探索跨领域风险的协同演化机制，深化人工智能、区块链、数字孪生等技术在风险管控中的应用，完善风险评估与控制理论方法，为建筑行业高质量可持续发展提供更坚实的技术支撑。

参考文献

- [1]张志强.BIM技术在建筑工程中的成本控制与管理研究[J].中国厨卫,2024,23(11):305-307.
- [2]丁忠勇.BIM技术在水利工程项目风险管理中的应用研究——基于风险识别与控制视角[J].科技与创新,2024,(15):191-193.
- [3]潘彦华.建筑工程项目管理中风险识别、评估与控制策略研究[J].城市建筑,2025,22(02):230-232.
- [4]宋棒,温晓晨.建筑工程质量监督检测中的风险评估与控制策略研究[J].中国厨卫,2025,24(04):360-362+366.
- [5]谢明明.建筑工程项目管理中的风险评估与控制策略研究[J].中国厨卫,2025,24(03):368-370.