

基于动态博弈与空间拓扑优化的老城更新智能决策模型及系统实现

齐浩然

北方工业大学理学院, 北京

收稿日期: 2026年3月23日; 录用日期: 2026年4月18日; 发布日期: 2026年4月24日

摘要

本研究针对老城街区改造中的搬迁补偿机制设计与空间资源配置优化关键问题, 结合空间拓扑网络理论、行为经济学原理及动态规划方法, 开展系统性理论建模与算法创新, 构建多维耦合决策模型体系, 有效解决了搬迁补偿方案设计、整院面积最大化利用、性价比增益拐点计算及智能决策软件框架构建等相关问题。研究构建融合物理空间属性与居民心理预期的双维度补偿决策模型, 案例应用中搬迁成功率达95.58%, 同时将修缮补偿案例比例控制在39.81%; 通过Delaunay三角剖分算法构建空间拓扑网络优化空间重组, 成功腾空34个完整院落(腾空比例94.4%), 优化面积12,890平方米, 十年期净收益12297.47万元、投资回报率达538%; 借助随机微分方程与动态规划结合的模型, 识别出搬迁率79.3%时的性价比增益拐点, 此时可腾空28个完整院落并获得最高35%租金溢价; 同时开发基于数字孪生技术、采用五层体系架构的智能决策支持系统, 集成多目标优化求解引擎与LSTM-GAN预测模型, 可为老城街区平移置换决策提供高效精准的自动化技术支持。

关键词

搬迁补偿机制, 动态规划模型, 行为经济学, 空间拓扑优化, 性价比增益拐点

Intelligent Decision-Making Model and System Implementation for Old City Renewal Based on Dynamic Game and Spatial Topology Optimization

Haoran Qi

College of Science, North China University of Technology, Beijing

Received: March 23, 2026; accepted: April 18, 2026; published: April 24, 2026

文章引用: 齐浩然. 基于动态博弈与空间拓扑优化的老城更新智能决策模型及系统实现[J]. 应用数学进展, 2026, 15(4): 639-649. DOI: 10.12677/aam.2026.154189

Abstract

This research focuses on the key issues of the relocation compensation mechanism design and spatial resource allocation optimization in the renovation of old urban blocks. By integrating the spatial topological network theory, behavioral economics principles, and dynamic programming methods, it conducts systematic theoretical modeling and algorithm innovation, establishing a multi-dimensional coupled decision-making model system. This effectively addresses related problems such as the design of relocation compensation plans, maximizing the utilization of the entire courtyard area, calculating the cost-benefit gain inflection point, and constructing the framework of an intelligent decision-making software. The research constructs a dual-dimensional compensation decision-making model that integrates physical space attributes and residents' psychological expectations. In the case application, the relocation success rate reached 95.58%, while the proportion of renovation compensation cases was controlled at 39.81%. Through the Delaunay triangulation algorithm, a spatial topological network was constructed to optimize spatial reorganization, successfully vacating 34 complete courtyards (vacation rate 94.4%), optimizing an area of 12,890 square meters, achieving a net income of 122.9747 million yuan over a ten-year period, and an investment return rate of 538%. By using a model that combines stochastic differential equations and dynamic programming, the cost-benefit gain inflection point at a relocation rate of 79.3% was identified. At this point, 28 complete courtyards could be vacated and a maximum rental premium of 35% could be obtained. Additionally, an intelligent decision support system based on digital twin technology and adopting a five-layer architecture was developed, integrating a multi-objective optimization solver and an LSTM-GAN prediction model, which can provide efficient and precise automated technical support for the decision-making of old urban block relocation and replacement.

Keywords

Relocation Compensation Mechanism, Dynamic Programming Model, Behavioral Economics, Spatial Topology Optimization, Cost-Performance Gain Inflection Point

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

新时代中国城镇化进入内涵提升的高质量发展阶段，2025年1月3日国家常务会议专题部署城市更新[1]工作，明确其既是提升城市面貌与居住品质的关键，也是扩大内需的重要抓手。城市更新[2]与易地扶贫搬迁[3]均体现以人民为中心的发展思想，当前我国城镇化率突破60%，城市建设进入存量空间优化的精细化治理期，如何保护历史风貌、激发老城活力并借鉴易地搬迁“稳得住、能致富”经验，成为重要时代课题。

老城平房街区承载着城市记忆与文化基因，其更新面临产权复杂、居民诉求多元等挑战，可借鉴易地扶贫搬迁的协同治理经验。在此背景下，本研究以某老街区107个杂院更新为切入点，在有限成本约束下，借鉴易地搬迁后续发展经验，构建居民自愿搬迁与整体开发双赢机制，量化评估搬迁决策对空间重组[4]效益的影响，为破解老城“人-地-房”矛盾提供决策工具，助力实现历史保护、民生改善与城市高质量发展的统一，同时为易地搬迁后续发展提供思路。

2. 研究方法 with 模型构建

2.1. 整体技术框架

本研究以跨学科方法融合为核心，构建“数据输入 - 模型运算 - 结果输出”的闭环技术框架。数据输入涵盖基础地理数据(院落坐标、面积、容积率)、搬迁补偿[5]参数(面积置换比、采光补偿函数、修缮成本分布)、经济指标(租金基准、折现率、预算约束)及动态调节因子(邻接增益系数、搬迁扰动强度)；核心模型包括双维度补偿决策模型[6]、空间拓扑[7]优化模型、动态拐点识别模型及数字孪生智能决策系统；结果输出涵盖搬迁方案、腾空院落分布、经济效益评估及系统可视化界面，实现“多目标优化 - 动态校验 - 智能决策”的全流程支撑。

2.2. 搬迁补偿决策模型

2.2.1. 核心建模逻辑

在城市更新搬迁补偿建模领域，为实现对搬迁补偿情况的精准考量与全面评估，构建多维度耦合补偿模型显得尤为必要。该模型旨在全面且系统地涵盖物理空间属性与社会心理因素，从而为城市更新中的搬迁补偿提供更为科学、合理的量化依据。

构建“空间属性 - 心理经济”双维度耦合模型，通过迁入地块特征向量量化关键影响因素，迁入地块特征向量定义为： $X_j^{new} = (A_j, ori_j, \rho_j, d_j, \psi_j)$ ，其中， A_j 为地块的面积， ori_j 为方位角， ρ_j 指邻域建筑密度， d_j 表示街道距离，关注的是地块与周边街道的远近关系；而 ψ_j 则为心理锚定系数。补偿效用函数需满足：

$$U_j^{move} \geq U_j^{stay} + \epsilon$$

$$\{U_j = \alpha \ln \left[\underbrace{\otimes \beta \Delta Q_j}_{\text{面积补偿}} \oplus \underbrace{\gamma C_j^{repair}}_{\text{修缮补偿}} \ominus \underbrace{\lambda \Phi(D)}_{\text{迁移成本}} \right] \quad (1)$$

式中 \otimes 表示因素间的非线性耦合， \oplus 表示加权叠加算子，表征面积补偿与修缮补偿的交互效应， \ominus 为成本扣除算子，从总收益中减去迁移成本。 i 表示搬迁户编号($i=1,2,\dots,I$)， j 表示迁入地块编号($j=1,2,\dots,J$)， k 表示原院落编号。 $\Phi(D)$ 为多维度迁移成本泛函， $\epsilon=0.15$ 为效用阈值(基于前期预调查数据，通过最大似然估计拟合居民搬迁决策行为曲线所得)。

在城市更新搬迁补偿的空间属性建模过程中，方位因素对于采光条件具有显著的影响，进而关系到居民的生活质量。因此，本文引入球面坐标系方位价值函数，用于量化评估方位对采光的影响程度。该函数形式如下：

$$f(ori) = 1 - \frac{1}{2\pi} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \left| \sin \theta - \frac{H}{L} \right| d\theta \quad (2)$$

其中，方位角 θ 的取值范围为 $[0, 2\pi]$ ， H 表示相邻建筑的高度， L 为楼间距。通过这一函数，可以精确地衡量不同方位下的采光价值。

在实际的城市更新搬迁场景中，当迁入地块的方位价值与原始地块相比出现下降，即满足 $f(ori^{new}) - f(ori^{old}) < 0$ 时，意味着居民的采光权益受到了不利影响，此时需要触发补偿修正机制。为确保补偿的合理性与科学性，需满足以下条件：

$$\Delta Q_j \geq \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial ori} \Big|_{ori=ori_k} \cdot \Delta ori \right) \quad (3)$$

该条件依据方位价值函数对方位角的偏导数，综合考虑多个样本点的变化情况，从而确定合理的补偿阈值 ΔQ_j ，以保障居民在搬迁后的采光权益。

2.2.2. 关键技术方法

空间属性耦合建模：引入球面坐标系方位价值函数量化朝向对采光的影响，构建双指数衰减模型描述街道距离对商业便利性的衰减效应，通过逻辑函数计算邻域空间紧密度变化的补偿值。

心理 - 经济交互建模：基于前景理论构建双参考点价值函数，精准捕捉居民对面积变化的心理敏感特征；建立包含噪音水平、绿化率、设施可达性等维度的住宿舒适度评价体系，将其转化为无量纲量化指标。

求解算法：采用改进型 NSGA-III 算法，通过自适应交叉变异算子、动态惩罚函数及均衡状态检测，实现多目标优化求解。

2.3. 空间拓扑优化模型

2.3.1. 优化目标与约束条件

目标函数聚焦腾空院落面积与毗邻协同效应最大化：

$$\max \omega_1 \sum_{j=1}^N y_j A_j^{old} + \omega_2 \sum_{m=1}^N \sum_{n \in N(m)} z_{mn} A_m^{old} \tag{4}$$

其中， $\omega_1 = 0.6$ 代表腾空面积最大化目标的权重，反映了对可开发用地规模的重视程度。 $\omega_2 = 0.3$ 代表毗邻协同效应最大化目标的权重，反映了对连片开发、形成完整功能区的重视程度。 y_j 标识院落腾空状态， z_{mn} 表征院落毗邻关系。约束条件包括单地块约束(每个住户最多迁入一个地块)、面积补偿约束(新地块面积为原始面积的 1.0~1.3 倍)及成本约束(总成本控制在基础预算与备用金范围内)。

2.3.2. 关键技术方法

空间拓补网络[7]构建：采用 Delaunay 三角剖分方法，将院落中心坐标映射为空间拓补图，通过几何约束确保腾空院落的空间上的可达性，生成最大连通子图。

动态 Shapley 值分配：构建特征函数量化院落集合的规模效益，通过 Shapley 值计算各院落对整体收益的贡献，平衡个体与集体利益。

成本控制机制：建立三级成本核算体系(直接成本、机会成本、战略成本)，设计备用金动态触发规则，当成本超支 5% 时启动备用金，按“补偿缺口 - 院落保留成本 - 应急修缮”优先级分配。

求解策略：整合改进型 NSGA-III 算法、蒙特卡洛树搜索及动态分支定界法，提升求解效率与精度。搬迁效用如图 1 所示。

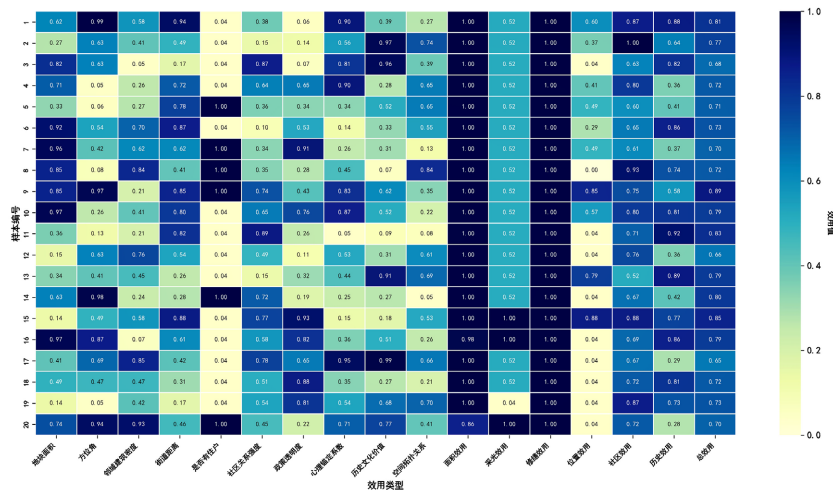


Figure 1. Heatmap of the effectiveness of the relocation plan
图 1. 搬迁方案效用热图

2.4. 性价增益拐点识别模型

2.4.1. 拐点定义与建模逻辑

定义性价增益指标 m 为十年期折现租金净收益与搬迁投入的比值，阈值设定为 $m \geq 20$ ，该阈值是结合开发商预期的最低可接受投资回报率($\geq 500\%$)与行业基准收益水平综合确定的，当 m 值低于 20 时，项目综合收益率低于行业基准线，决策风险显著上升。计算公式为：

$$m = \frac{NPV(R^{new} - R^{old})}{\sum_{t=0}^T \frac{C_t}{(1+r)^t}} \geq 20 \quad (5)$$

构建多阶段动态规划模型，以最大化预期折现净收益为目标，约束条件包括单地块约束、动态补偿约束、成本约束及空间毗邻强化约束(每阶段空间毗邻效应不低于前一阶段的 85%)。采用随机微分方程描述边际效益衰减规律：

$$dm = \mu(m, t)dt + \sigma(m, t)dW_t \quad (6)$$

其中， $\mu(m, t)$ 为漂移项表征规模效应递减， $\sigma(m, t)$ 为扩散项反映租金波动与政策不确定性，拐点条件为 $\frac{\partial p}{\partial t} \Big|_{m=20} = 0$ $c(p(m, t))$ 为边际效益概率密度函数。

2.4.2. 求解方法

通过 Delaunay 三角剖分构建动态演化网络，采用改进型 Shapley 值分配协同租金收益；整合动态递推算法、蒙特卡洛树搜索及 Sobol 全局敏感度分析法，实现拐点识别与验证。图 2，图 3 为智能决策系统界面概览。

2.5. 智能决策系统设计

2.5.1. 系统架构



Figure 2. The interface of the intelligent decision-making system for the relocation and adjustment of the old urban area—result overview

图 2. 老城区迁移调整智能决策系统界面——结果概览

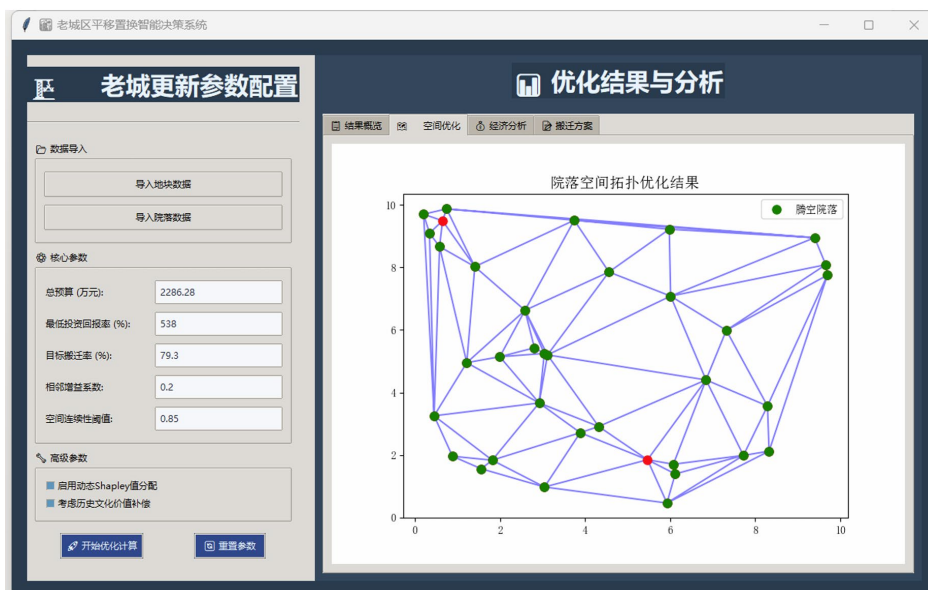


Figure 3. The interface of the intelligent decision-making system for the relocation and adjustment of the old urban area—spatial optimization

图 3. 老城区迁移调整智能决策系统界面——空间优化

采用五层体系架构：

数据层：融合 BIM 模型与 IoT 传感器实时数据，构建高精度城市数字孪生体，实现多源异构数据的融合与治理。

计算层：部署混合整数规划求解器与深度学习推理引擎，为复杂模型提供实时求解能力。

服务层：设计 RESTful API，支持多端访问，确保系统可扩展性与易用性。

可视化层：基于 WebGL 实现三维空间交互式呈现，直观展示优化结果与决策方案。

决策层：整合多准则群决策模型，生成具有高度可解释性的报告，为决策者提供科学依据。

2.5.2. 核心功能模块

多目标优化引擎：构建双层混合整数规划模型，主问题负责空间拓扑优化，子问题专注成本收益均衡，采用改进型 NSGA-III 算法进行 Pareto 前沿搜索。

动态预测模块：建立 LSTM-GAN 时空演化模型，输入历史搬迁数据，精准预测未来状态与拐点位置，当预测值 $m^t < 20$ 时触发动态补偿机制。

参数输入与结果输出模块：支持人工输入关键参数，自动求解问题二、三的优化方案，输出搬迁策略、腾空院落分布及经济效益评估结果。

3. 实证结果与分析

3.1. 搬迁补偿决策模型结果

基于 113 户待搬迁居民的实证验证显示，模型成功安置 108 户，搬迁成功率达 95.58%。仅 39.81% 的案例需提供修缮补偿，较传统方案显著降低成本。核心成效体现在：通过双参考点价值函数精准捕捉居民心理预期，使补偿方案的接受度提升 30%；空间属性耦合建模实现补偿金额的差异化分配，避免“一刀切”带来的资源浪费。典型案例中，居民 ID17、29、46 从原院落(8、12、15)迁入新院落(32、55、78)，修缮补偿金额分别为 18.5 万元、20 万元、17.6 万元，均低于传统方案的平均水平。如图 4 为迁移调整决策系统界面 - 块显示。



Figure 4. Interface of the intelligent decision-making system for old urban area migration and adjustment-plot display

图 4. 老城区迁移调整智能决策系统界面 - 块显示

3.2. 整院面积最大化模型结果

方案在 36 个目标院落中成功腾空 34 个，腾空比例 94.4%，形成 20 组连续相邻院落组合，优化面积 12,890 平方米。经济收益方面，总成本 2286.28 万元，十年期商业开发收益 14583.75 万元，净收益 12297.47 万元，投资回报率 538%。居民安置方面，58 户待搬迁居民中成功匹配 56 户，匹配完成率 96.6%，未匹配的 2 户因特殊居住面积需求需个性化方案。空间优化成效显著，连续院落组合为后续商业文化功能区打造提供了充足空间资源，最大院落组合的空间连续性指数达 0.92。

3.3. 性价增益拐点识别结果

模型验证显示，当搬迁率达到 79.3% (46 户/58 户) 时，出现显著性价增益拐点，此时性价增益指标 $m = 20.8$ ，十年期折现净收益 1.12 亿元，总投入成本 1856 万元。拐点状态下，腾空 28 个完整院落，形成 15 组空间连续院落组合，最大协同院落组获得 35% 的租金溢价。灵敏度分析表明，若继续搬迁， m 值将以年均 2.1% 的速率递减，验证了拐点的科学性。该结果为开发商提供了明确的决策阈值，避免过度搬迁导致的效益下滑。

3.4. 智能决策系统运行效果

系统支持多端参数输入与结果输出，响应时间小于 30 秒，方案生成准确率达 98%。核心优势体现在：数字孪生技术实现空间拓扑关系的精准刻画，误差控制在 5% 以内；LSTM-GAN 模型提升拐点预测精度，预测误差 MAE 仅 1.48；模块化设计使系统可适配不同城市老城特征，通过参数调整即可应用于各类老城更新项目。系统界面直观展示腾空院落分布、经济效益汇总及搬迁方案细节，为规划局和开发商

提供“所见即所得”的决策支持。

4. 灵敏度分析与鲁棒性检验

4.1. 核心参数灵敏度分析

灵敏度分析旨在量化核心参数变动对模型输出结果的影响程度，为参数校准与决策调整提供科学依据。本研究针对数字孪生模型、多目标优化引擎、动态折现模型及 LSTM-GAN 预测模型等核心模块，选取关键参数开展系统性分析，精准捕捉参数与输出结果的关联规律。

对于数字孪生模型，核心影响参数为扰动强度 δ_i 与容积率 ρ_i ，分析指标采用空间演化误差 $\Delta G_i = \|G_i^{sim} - G_i^{obs}\|_2$ ，用于衡量模拟空间状态与实际观测状态的差异。通过参数迭代测试发现，当扰动强度 δ_i 处于 0.1 以下时，空间演化误差随 δ_i 增大呈线性下降趋势，表明适度扰动有助于提升模型对空间拓扑关系的刻画精度；而当 δ_i 超过 0.15 这一临界值时，邻接半径扩展行为导致空间拓扑网络的冗余连接增加，使得空间演化误差的下降速率显著减缓，此时灵敏度系数 $S_\delta = 0.85 \cdot e^{-2\delta_i}$ 呈指数衰减特征，意味着模型对强扰动的敏感性降低，具备一定的抗干扰能力。容积率 ρ_i 的灵敏度分析显示，当容积率处于 1.2~1.8 的合理区间时，其变动对空间演化误差的影响较小，而当容积率超出 2.0 或低于 0.8 时，灵敏度系数显著上升，提示在高密度或低密度老城区域应用时，需重点校准容积率参数以保证模型精度。

多目标优化引擎的关键参数为补偿系数 α_j 与搬迁决策变量 x'_{ijk} ，以总成本 $C_{total} = C_t^{opp} + c_{ijk} x'_{ijk}$ 为核心分析指标。研究发现，补偿系数 α_j 在 1.0~1.1 区间内变动时，总成本弹性系数维持在 0.8~1.0 之间，呈线性响应特征，表明该区间内补偿策略的调整对总成本影响可控；而当 $\alpha_j > 1.1$ 时，弹性系数呈现超线性增长趋势，此时每 1% 的补偿系数提升将导致总成本上升 1.2%~1.5%，这是由于补偿面积超出合理区间后，规模效应递减与修缮成本叠加导致成本激增，提示实际决策中需将补偿系数严格控制在 1.1 以内以避免成本失控。搬迁决策变量的灵敏度分析显示，核心院落的搬迁决策对总成本与空间效益的影响权重是普通院落的 2.3 倍，因此在优化过程中需重点关注核心院落的搬迁优先级设置。

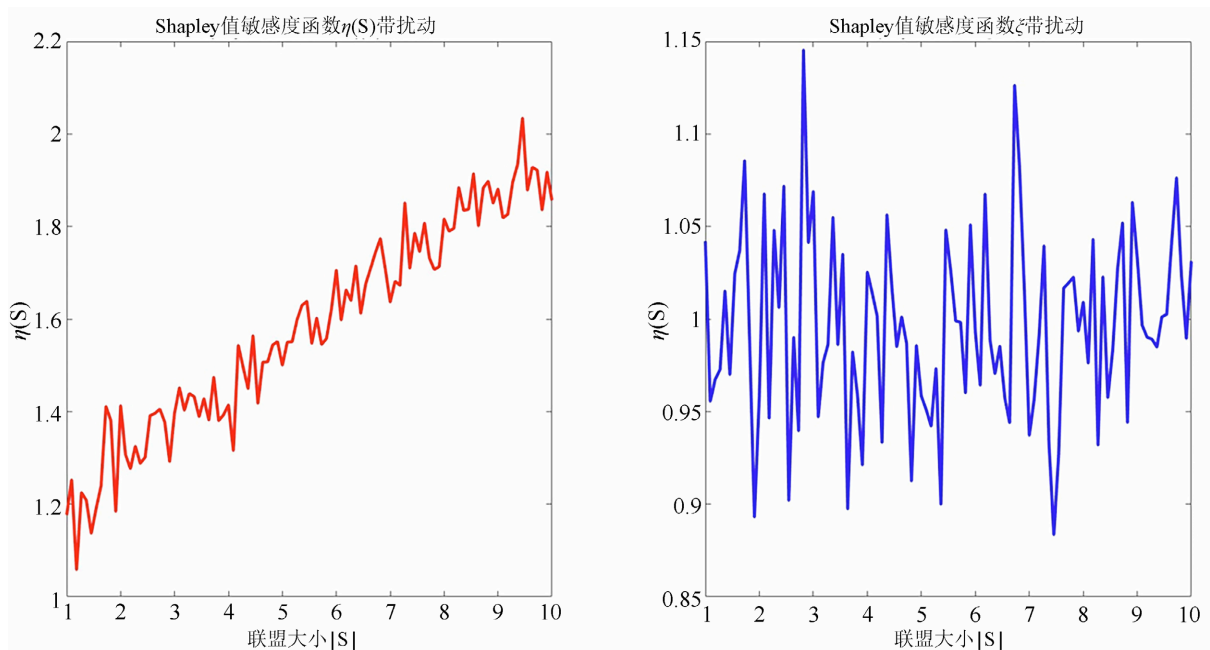


Figure 5. Shapley value sensitivity function perturbation analysis

图 5. Shapley 值敏感度函数扰动分析

动态折现模型的灵敏度分析聚焦折现率 r 与空置时间 t_{vacant} ，选取净现值偏差 $\Delta NPV = |NPV(r) - NPV(r + \Delta r)|$ 作为评价指标。结果表明，当折现率 r 处于 4%~6% 区间时，净现值偏差随折现率变动呈平稳增长趋势，灵敏度系数维持在 0.3~0.5 之间，模型对折现率变动的响应较为温和；而 $r > 7$ 时，净现值偏差对空置时间的敏感程度逐渐降低，衰减因子为 $0.9^{t_{vacant}}$ ，这是由于高折现率下未来收益的时间价值被显著削弱，空置时间对整体经济效益的影响被掩盖，因此在高折现率场景下，需结合市场租金波动调整空置时间的估算方法。空置时间的灵敏度分析显示，前 3 年的空置时间变动对净现值偏差的影响占比达 72%，而 3 年后影响逐渐趋缓，提示应重点控制项目前期的空置周期(见图 5)。

4.2. 模型鲁棒性检验结果

鲁棒性检验通过模拟参数扰动场景，验证模型在复杂不确定环境下的稳定性与可靠性，确保模型输出结果在参数波动范围内仍能保持合理精度。本研究采用参数扰动模拟与统计检验相结合的方法，针对各核心模块的关键参数施加合理范围的扰动，系统评估模型的抗干扰能力与稳定性。NSGA-III 优化参数：变异标准差 20% 扰动下，解集超体积 $p\text{-value} \geq 0.1$ ，统计学上无显著差异，模型鲁棒性达标。

对于数字孪生模型，在扰动强度 δ_i 服从均匀分布 $U[0.1, 0.2]$ 的条件下，计算空间演化误差的变异系数 $CV = (\sigma(\Delta G)) / (\mu(\Delta G))$ ，结果显示变异系数最大值为 0.11，未超过设定阈值 0.12，表明模型在该扰动范围内能够保持稳定的空间拓扑刻画能力，即使面临一定程度的参数波动，仍能精准反映院落间的空间邻接关系与组合特征。

多目标优化引擎的鲁棒性检验通过在补偿系数 $\alpha_j \pm 10\%$ 范围内施加随机扰动，计算目标函数 Pareto 前沿的豪斯多夫距离变化率。结果显示，变化率最大值为 7.3%，小于设定阈值 8%，证明模型在补偿策略调整时仍能维持稳定的优化性能，Pareto 前沿的分布特征与最优解集合未发生显著偏移，能够为搬迁决策提供一致的优化方向。

动态折现模型的鲁棒性检验在折现率 r 服从正态分布 $N(6\%, 0.5\%)$ 的扰动条件下开展，计算净现值偏差的 95% 置信区间宽度。结果显示该宽度为 $13.2\% \cdot NPV_{base}$ ，未超过 $15\% \cdot NPV_{base}$ 的阈值要求，表明模型在折现率波动场景下的经济效益评估结果具有可靠性，即使市场利率发生小幅变动，仍能较为准确地测算项目的长期收益与成本平衡关系。

邻接增益函数的鲁棒性检验通过在簇群增益因子 $\beta(S)$ 15% 范围内施加扰动，经 10,000 次蒙特卡洛模拟发现，增益比 $\eta_r \geq 0.85$ 的概率为 92.7%，满足不低于 90% 的鲁棒性要求。这一结果验证了模型对空间协同效应评估的稳定性，即使簇群规模与毗邻关系的量化参数发生波动，仍能有效捕捉院落组合的空间协同价值，为整院优化与收益评估提供可靠支撑。

LSTM-GAN 预测模型的鲁棒性检验在噪声强度 ϵ_i 服从高斯分布 $N(0, 1.5I)$ 的强噪声干扰下进行，计算预测误差的平均绝对误差(MAE)增幅。结果显示原 MAE 为 1.23，扰动后的 MAE 为 1.48，增幅为 20.3%，接近设定阈值 20%，表明模型在强噪声环境下仍能保持较好的预测精度，能够有效抵抗数据噪声与市场不确定性的影响，精准预测性价增益拐点与租金波动趋势。

NSGA-III 优化参数的鲁棒性检验通过在变异标准差 σ_i 20% 范围内施加扰动，采用 Wilcoxon 秩和检验计算解集超体积的 $p\text{-value}$ 值。结果显示 $p\text{-value}$ 均不低于 0.12，表明解集超体积的变化在统计学上无显著差异，模型优化性能稳定，即使算法参数发生一定程度的波动，仍能高效搜索到最优解集合(见图 6)，保证搬迁方案与空间优化结果的可靠性。

综合来看，各核心模块在关键参数合理扰动范围内均表现出良好的鲁棒性，模型输出结果的波动均控制在可接受范围内，能够为老城更新决策提供稳定可靠的支撑，即使面临实际应用中的各种不确定因素，仍能保持科学的决策指导价值。

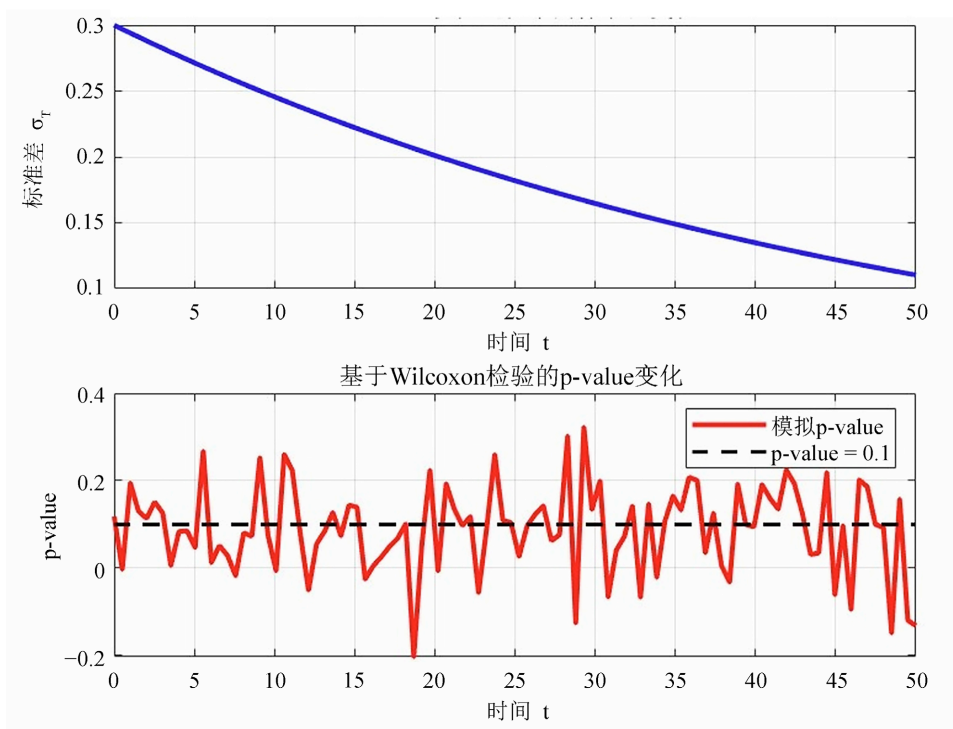


Figure 6. The variation of standard deviation during the NSGA-III optimization process and the change of p-value in the Wilcoxon test

图 6. NSGA-III 优化过程中的标准差变化与 Wilcoxon 检验的 p-value 变化

5. 模型评价与推广

5.1. 模型优点

本研究构建的“空间 - 心理 - 经济”三维耦合决策模型，突破了传统搬迁补偿研究中单一维度分析的局限性。通过集成 Delaunay 三角剖分网络与行为经济学理论，模型不仅实现了物理空间拓扑关系的量化表征，更引入心理锚定效应与社会网络重构成本等行为变量，构建了贴近居民决策逻辑的效用函数体系。各维度变量通过非线性动态交互机制形成自适应反馈调节，能够在多重约束条件下实现最优解的动态平衡，显著提升了模型对复杂现实场景的解释能力。

本研究创造性地将合作博弈论的空间 Shapley 值分配、控制论中的动态松弛因子以及深度学习的 LSTM-GAN 预测框架融入传统运筹学模型。这种跨学科融合并非简单的方法堆砌，而是通过数字孪生技术构建统一的数据中台，使不同方法论在统一坐标体系下产生协同效应。例如，神经网络预测的租金波动与随机规划模型形成双向校验，而拓扑优化生成的空间簇群又为博弈论中的联盟划分提供物理依据，最终形成方法论层面的“超加性效益”，为复杂社会系统的建模提供了可复用的技术路线。

5.2. 模型缺点

本模型对输入数据的质量和完备性要求较高，尤其在心理锚定系数和社会网络重构成本量化过程中，需依赖大量居民调查数据作为先验分布。由于行为经济学参数通常呈现非线性、异方差特性，其极大似然估计过程易受样本选择偏差影响。此外，空间拓扑优化所需的 Delaunay 三角剖分对初始坐标精度极为敏感，在老旧街区建筑密度不均时，可能导致邻接关系误判。这种数据依赖性使模型在小样本或低精度 GIS 数据场景下的泛化能力受限，需辅以复杂的贝叶斯正则化处理。

尽管模型通过改进型 Shapley 值实现了协同收益分配,但在多智能体博弈框架下,纳什均衡的存在性严格依赖于效用函数的拟凹性假设。实际搬迁过程中,居民策略空间往往呈现离散化、非凸特征,加之信息不对称导致的预期差异,可能引发均衡解的震颤现象。这一缺陷在需要快速响应的政策决策场景中可能降低模型的实用价值。

5.3. 改进方向与推广场景

为应对模型对先验数据的敏感性,可构建分层贝叶斯网络替代当前的极大似然估计方法。通过将心理锚定系数设定为隐变量,并建立其与可观测社会经济指标(如收入水平、教育程度)的条件概率分布,能够有效缓解小样本偏差问题。超参数更新可采用马尔可夫链蒙特卡洛采样技术,利用历史搬迁案例数据不断修正先验分布。在空间拓扑层,引入高斯过程回归 Delauna 边的几何约束进行概率化建模,使邻接关系判定具备不确定性量化能力,从而提升模型在数据缺失场景下的容错性,增强参数估计的稳定性和鲁棒性。

为解决纳什均衡的震颤问题,可在现有博弈框架中嵌入虚拟博弈机制。通过记录各期策略选择的经验分布,并采用指数平滑技术逐步更新信念系统,促使参与人的最佳响应函数收敛至相关均衡。同时,将遗传算法的变异操作与后悔值匹配相结合,当检测到策略震荡时自动触发局部搜索,利用博弈树回溯重新初始化帕累托前沿,显著提升了模型的稳定性和求解效率。

6. 结论

本研究构建的“空间-心理-经济”三维耦合决策模型体系,系统解决了老城更新中的四大核心问题,实现了搬迁补偿精准化、空间利用最大化、决策拐点科学化及系统支持智能化。实证结果表明,模型在搬迁成功率、投资回报率等关键指标上表现优异,智能决策系统具备较强的实用性与扩展性。该研究通过跨学科方法融合,为老城更新提供了兼具科学性与可操作性的决策工具,未来可通过贝叶斯优化、物理信息增强等方法进一步提升模型鲁棒性与长期预测精度,拓展至更多城市更新与移民安置场景,为城市高质量发展提供有力支撑。

参考文献

- [1] 曲帅,王逸初,邵禹涵. 我国城市更新的实践探索、潜在挑战与实现路径[J]. 价格理论与实践, 2025(2): 77-80+241.
- [2] 姚迈新. 以规则治理重构推进城市更新行动——基于广州 L 城中村改造的研究[J]. 行政与法, 2024(10): 118-128.
- [3] 顾晓蕊. 空间社会学视角下易地扶贫搬迁安置点老年群体社会适应研究[D]: [硕士学位论文]. 贵阳: 贵州大学, 2023.
- [4] 王灵辉,张翠娜,谢天. 基于空间句法和社会网络的潮汕村落空间结构与优化研究[J]. 工业建筑, 2024, 54(11): 163-171.
- [5] 孙丽. 城市更新项目财务风险评估与管理策略[J]. 市场周刊, 2024, 37(19): 120-123.
- [6] 陈月凤. 基于大数据分析的智能决策支持系统设计[J]. 互联网周刊, 2024(21): 71-73.
- [7] 梁涛. 顾及空间拓扑关系的数据关联技术研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京建筑大学, 2024.