

数据驱动下的城市更新片区公共服务设施布局优化算法研究与应用

——以某大型产城融合混合社区为例

杜明

同济大学建筑设计研究院（集团）有限公司，上海建筑数字建造工程技术研究中心 上海

【摘要】当前我国城市发展已从增量扩张转入存量提质的城市更新“新阶段”。面对既有城市片区空间局限性大、人口结构复杂、服务设施布局盲目等痛点，传统经验导向的规划方法难以满足精细化治理需求。本文提出一种基于 CIM（城市信息模型）数字底座与非负加权图（Non-negative Weighted Graph）算法的公共服务设施布局优化模型。首先，利用无人机倾斜摄影与三维激光扫描技术构建高精度“空地一体”数字底座，解决现状数据缺失问题；其次，建立多目标优化数学模型，引入步行距离、日照环境及人群热力等多维约束，求解设施布局的最优解；最后，通过工程实证表明，该方法有效提升了设施服务覆盖率与空间利用效率，公共区域能耗降低约 23%，为城市更新场景下的空间微改造提供了科学的量化决策支撑。

【关键词】城市更新；公共设施布局；非负加权图；CIM；数字化规划

【收稿日期】2025 年 12 月 14 日

【出刊日期】2026 年 1 月 5 日

【DOI】10.12208/j.jer.20260014

Research and application of data-driven algorithm for optimizing the layout of public service facilities in urban renewal areas—a case study of a large-scale industry-city integration mixed community

Ming Du

Tongji University Architectural Design & Research Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai Architectural Digital Construction Engineering Technology Research Center, Shanghai

【Abstract】 My country's urban development has shifted from incremental expansion to a "new stage" of urban renewal that focuses on improving the quality of existing urban resources. Faced with challenges such as limited space, complex population structures, and haphazard layout of service facilities in existing urban areas, traditional experience-based planning methods are insufficient to meet the needs of refined governance. This paper proposes a public service facility layout optimization model based on a CIM (City Information Modeling) digital foundation and a non-negative weighted graph algorithm. First, a high-precision "air-ground integrated" digital foundation is constructed using UAV oblique photography and 3D laser scanning technology to address the problem of missing current data. Second, a multi-objective optimization mathematical model is established, incorporating multi-dimensional constraints such as walking distance, solar radiation, and population thermal dynamics to solve for the optimal solution for facility layout. Finally, engineering empirical studies demonstrate that this method effectively improves facility service coverage and space utilization efficiency, reducing public area energy consumption by approximately 23%, providing scientific quantitative decision-making support for spatial micro-transformation in urban renewal scenarios.

【Keywords】 Urban renewal; Public facility layout; Non-negative weighted graph; CIM; Digital planning

1 引言

随着我国城镇化率突破 65%，城市建设重点已由大规模增量扩张转向存量空间的提质增效^[1]。国家住房和城乡建设部总经济师杨保军指出，城市是一个“有机生命体”，城市更新不应是大拆大建，而应是顺应发展

规律的自我调节与有机更新^[2,3]。因此如何在地块破碎、空间受限的既有建成区内，科学精准地布局公共服务设施成为打造“好社区”、“好城区”的关键命题^[4]。

当前城市更新实践中仍存在的显著痛点。一是现状底数不清。既有建筑图纸缺失、空间信息失真，导致

城市更新过程中的规划设计缺乏精准的空间推演载体；二是决策缺乏量化支撑——设施选址往往依赖设计师经验，难以兼顾不同人群的差异化需求，导致设施闲置或服务盲区并存。

针对上述问题，本文基于“数据驱动更新设计”的理念，构建了一套从“现状逆向数字重构”到“正向算法辅助决策”的技术体系。通过构建高精度 CIM 数字底座，结合非负加权图优化算法，旨在解决复杂约束条件下的设施选址问题，实现从经验设计向科学计算的方法论转型。

2 城市更新片区多源异构数据底座构建

高精度的空间数据是算法运行的基础。业界内普遍采用数据量化结合 AI 算法的方法来进行研究^[5-9]。因此，本文首先需要解决城市更新片区的数据构建问题。利用“逆向工程与正向设计”结合的路线^[10]，主要工作如下。

2.1 “空地一体”全息空间数据采集

采用多源数据采集策略获取既有片区的全量几何信息，主要分两部分：

(1) 宏观肌理获取：利用搭载三轴机械云台的无人机进行五向（一正摄、四侧视）倾斜摄影，快速获取建筑群的屋顶、立面及周边环境的宏观三维纹理。

(2) 微观空间补全：针对无人机视线盲区（如树下空间、狭窄巷道、地下空间），引入站点式三维激光扫描技术。通过多站点云拼接，实现对复杂环境毫米级精度的复现。

通过上述手段，形成“高空+地面”、“粗轮廓+细精度”的混合模型，有效解决了单一技术手段存在的数据空洞问题，为后续算法提供了真实的物理边界约束^[11]。

2.2 异构数据融合与 CIM 底座生成

原始点云数据仅具有几何属性，缺乏语义信息。本文利用基于深度学习的点云分割提取技术，自动识别建筑构件（如墙、柱、窗）并提取关键参数，逆向生成参数化 BIM 模型。

在此基础上，采用数模分离技术与轻量化处理程序，将 BIM 模型与地理信息系统(GIS)、物联网(IoT)数据进行融合。底座不仅包含建筑物理实体信息，还挂载了人口热力、交通轨迹、功能业态等多维社会感知数据，形成了具备空间计算能力的 CIM 数字底座。这一底座能够精准反映片区的“人-地-房”关系，为算法推演提供了可靠的数据输入^[12]。

3 基于非负加权图的设施布局优化算法模型

CIM 数字底座不仅是三维可视化的载体，更是一个高保真的物理与语义边界，因此本文采用了基于 CIM 底座技术的研究方法，将公共设施选址问题抽象为图论中的非负加权图(Non-negative Weighted Graph)优化问题^[13,14]。具体做法是：将 CIM 中的三维空间坐标(如闲置空地、居民楼入口)抽象为图的节点集合 V ，将所有节点之间的可行路径抽象为图的边 E 和对应路径权重 d_{ij} ，然后利用 CIM 存储的人口热力、年龄分布等社会数据量化为需求权重 w_i 并将物理环境简化抽象为约束条件 S_j 。核心目标是在满足服务半径、物理环境等约束条件下，寻找设施点位的最优组合，使满足需求 w_i 的效能最大化。

3.1 问题定义与变量设定

将城市更新片区抽象为无向连通图 $G(V, E, W)$ 。

(1) 节点集合 V ：包含两类节点， $V = I \cup J$ 。其中 $I = \{1, 2, \dots, n\}$ 为需求点集合（如居民楼入口、人流聚集点）； $J = \{1, 2, \dots, m\}$ 为候选设施点集合（如闲置空地、公园边角）。

(2) 边集合 E ：代表节点间的通达路径。

(3) 权重集合 W ： d_{ij} 表示节点 i 到 j 的实际步行距离（基于 CIM 路网计算）。

引入决策变量 x_j 和 y_{ij} ：

$$x_j = \begin{cases} 1, & \text{如果在候选点 } j \text{ 处设置设施} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

$$y_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{如果需求点 } i \text{ 由设施 } j \text{ 服务} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

3.2 目标函数构建

模型的优化目标是最小化广义加权服务成本 Z (Generalized Weighted Cost)，即在考虑人口密度和服务距离的基础上，使整体社会服务的阻抗最低。

$$\text{Minimize } Z = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} w_i \cdot d_{ij} \cdot y_{ij}$$

式中， w_i 为需求点 i 的权重系数，由该点位的人口密度、人群画像（如老龄化程度）及社交媒体需求热力值综合决定。

3.3 约束条件模型

为确保布局方案符合“好社区”标准及物理环境要求，模型须受到物理定律和规划规范的约束：

(1) 服务半径约束：遵循“15 分钟生活圈”要求，任意需求点到最近服务设施的距离不得超过最大阈值 D_{\max} 。且有^[15]：

$$d_{ij} \cdot y_{ij} \leq D_{\max}, \quad \forall i \in I$$

(2) 物理环境适宜性约束：利用 CIM 平台的日照与风场分析功能，筛选候选点 j 。例如，休憩座椅不应布置在夏季强眩光或冬季长期阴影区。定义 S_j 为候选点 j 的环境适宜度评分（0-1），设定阈值 θ ：

$$x_j \cdot S_j \geq \theta, \quad \forall j \in J$$

(3) 设施数量与容量约束：受限于更新资金与空间资源，设施总数 P 有限。约束条件为：

$$\sum_{j \in J} x_j = P$$

(4) 唯一服务约束：每个需求点必须被至少一个设施覆盖。约束条件为：

$$\sum_{j \in J} y_{ij} = 1, \quad \forall i \in I$$

通过上述数学建模，将复杂的城市更新选址问题转化为混合整数规划问题，并利用启发式算法进行迭代求解，输出全局最优布局方案^[16,17]。

4 工程案例应用与分析

为验证上述算法的有效性，选取某大型产城融合更新片区（以下简称“示范区”）进行实证研究。该区域占地约 2 平方公里，呈现出典型的“新旧建筑交织、地下空间复杂、服务需求多元”特征。

表 1 非负加权算法优化前后对比表

对比维度	优化前	优化后	对比优化效果
设施服务覆盖率	76.5%	96.3%	明显提升
中老年人群平均步行距离	285m	135m	缩短约 150m 步行距离
环境适宜性平均分 S_j	0.65	0.88	适应性提高

根据以上计算结果，在示范区内进行设计调整如下：

(1) 增设点位：在人流高频通过且符合日照要求的转角处，新增 3 处适老化休憩点。

(2) 调整点位：将原计划布置在背阴处的快递柜，移动至动线汇聚且光照良好的开敞空间。

(3) 功能复合：建议在中心绿地布置多功能灯杆，兼具照明、监控与 Wi-Fi 服务。

4.3 空间环境校验与效果评估

为确保算法结果的可靠性，利用 CIM 平台进行了日照、可视域及风环境的二次校验，剔除了一个处于狭管效应风口的候选点^[20,21]。

应用成效评估显示：

(1) 服务效能提升：优化后的设施布局实现了对

4.1 数据采集与需求诊断

利用前述逆向工程技术，团队对示范区进行了全量数字化重构，建立了包含建筑结构、地下管网及路网信息的 CIM 底座。在需求识别阶段，结合城市树影像智能识别技术与社交媒体语义分析，构建了片区群体需求热力图^[18,19]。分析发现，示范区北部老旧住宅区的老年群体对休憩设施需求强烈，而南部办公区则对便民取餐及快递柜需求较高，但现状设施分布呈现平均化甚至不足。

4.2 算法推演与方案生成

在 CIM 底座完成数据映射后，提取示范区内的核心需求节点（主要为周边校区住宅出入口、办公楼出入口、公交站点）共计 $|I| = 120$ ，本阶段可供进行空间改造条件的候选点位（如闲置小空地、较宽的路面，公共广场周边）共计 $|J| = 25$ ，并提取了 CIM 底座中相关路网生成路径 $|E| = 340$ 条。

核心约束条件设置如下：

便民设施服务半径 $D_{\max} < 300$ 米；为避免极端物理环境，去除了全天日照时长 < 1 小时的区域；考虑投资预算因素，总共可增设设施总数 $P = 8$ 处。

算法经 $Epoch = 500$ 次迭代后得出优化后方案，与优化前对比如表 1 所示：

重点需求人群的 100%覆盖，居民步行至最近便民点的平均距离缩短了约 150 米。

(2) 运行效率优化：依托智慧运维评估管控平台，通过精准的空间布局与设施联动，公共区域的照明与空调负荷得到有效调控。实测数据显示，公共区域综合能耗降低了 23%，显著提升了运营经济性。

(3) 交通与安全兼顾：通过算法优化的路侧设施布局，有效减少了潮汐车流拥堵，区域混合运行效率提升了 8.5%。

5 结论与展望

城市更新不仅是空间的重塑，更是治理能力的升级。本文针对城市更新中设施布局难点，提出了一套融合“正逆向获取数据底座”与“非负加权图优化算法”的数字化解决方案。

首先, 本文打通了从无人机/激光扫描采集、BIM/CIM 建模到算法决策的数据链路, 保证了规划方案基于真实的物理环境数据, 实现全链条技术闭环; 其次, 通过建立多目标优化模型, 将复杂的社会需求(如适老化)与物理约束(如日照)转化为可计算的数学约束; 最后, 在实际工程案例中进行实验, 证明该技术能有效降低能耗并提升服务覆盖率。说明了数据驱动方法在城市更新的存量时代具有可观的经济和社会价值。

未来随着人工智能技术的演进, 本文将进一步探索在相同场景下基于 AI 智能体的动态运维技术。即利用 ABM (Agent-Based Modeling) 人基模型对设施使用情况进行全生命周期的推演, 使城市社区在设计之处就充分考虑人的需求和因素, 为城市更新贡献更为科学的解决方案。

参考文献

- [1] 吴志强. 城市规划新技术: 人工智能与城市未来[M]. 南京: 江苏凤凰科学技术出版社, 2019.
- [2] 杨宝军. 实施城市更新行动, 推进城市走向高质量发展[R]. 住房和城乡建设部专题讲座, 2023.
- [3] Wang X, et al. Identify different types of urban renewal implementations at the streetscape scale [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2025.
- [4] Shabani A, AlWaer H, Taheri S. Artificial intelligence revolution in urban planning: a 30-year journey a review [J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Urban Design and Planning*, 2026, 179(1): 41-57.
- [5] Brama H, Grinshpoun T, Landau O, et al. AI-Driven Recommendations for Strategic Urban Renewal [C]// 30th International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA). 2025: 91-100.
- [6] Wardah W. Land Degradation Detection in Urban Areas Using Spatial Modelling and Semi-Automatic Classification of Satellite Imagery Data [J]. *Tropical Aquatic and Soil Pollution*, 2025, 5(2): 110-124.
- [7] He H, et al. Time-series land cover change detection using deep learning-based temporal semantic segmentation [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2024, 305: 114101.
- [8] Qiao H, Jiang H, Yang G, et al. A Multi-Source Dynamic Fusion Network for Urban Functional Zone Identification on Remote Sensing, POI, and Building Footprint [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2024, 17: 1-16.
- [9] Wang X, Li X, Wu T, et al. Municipal and Urban Renewal Development Index System: A Data-Driven Digital Analysis Framework [J]. *Remote Sensing*, 2024, 16(3): 456.
- [10] Wang Y, Li C, Zhang H, et al. Research on Multi-Source Data Fusion Urban Functional Area Identification Method Based on Random Forest Model [J]. *Sustainability*, 2025, 17(2): 515.
- [11] 高峰, 于滨. 面向智慧城市管理巡查的可靠性无人机机巢选址优化方法[J/OL]. *交通运输工程学报*, 1-16[2026-03-02].
- [12] Sheng Y, Zhou T, Wang J, et al. Data-Driven Assessment and Renewal Strategies for Public Space Vitality in Aged Residential Areas [J]. *Buildings*, 2025, 15(23): 4299.
- [13] 梁建青. 多模态数据的判别度量学习研究[D]. 天津大学, 2019.
- [14] Zhao Y, Li K, Zhang W. Digital Twin-Based Simulation and Decision-Making Framework for the Renewal Design of Urban Industrial Heritage Buildings and Environments: A Case Study of the Xi'an Old Steel Plant Industrial Park [J]. *Buildings*, 2025, 15(23): 4367.
- [15] 黄若鹏. 老旧小区改造的居民合作行为的影响机理研究[D]. 重庆大学, 2024.
- [16] 吕志明, 王霖青, 赵珺, 等. 一种基于多代理模型的混合整数规划优化方法[J]. *控制与决策*, 2019, 34(02): 362-368.
- [17] 孙凯月. 面向数字孪生的既有建筑内配电管线预测研究[D]. 北京建筑大学, 2023.
- [18] 吴志强, 周咪咪, 刘琦, 等. “跨代孪生”: 映射城市的生命特征[J]. *城市规划学刊*, 2024, (01): 9-17.
- [19] 吴志强, 叶锺楠. 基于百度地图热力图的城市空间结构研究——以上海中心城区为例[J]. *城市规划*, 2016, 40(04): 33-40.
- [20] 董明泽, 王冕, 李婷娜. 基于 BIM 与 3D GIS 集成的智慧园区规划与管理[J]. *电子技术与软件工程*, 2021, (24): 176-180.
- [21] 胡亚辉. 基于气候适应性的中观城市形态生成机理与方法[D]. 东南大学, 2021.

版权声明: ©2026 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

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

