

基于数字孪生的寒地历史街区建筑智能化更新方法研究

安文

哈尔滨工业大学建筑设计研究院有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150090

DOI:10.61369/ME.2026050014

摘 要 : 寒地历史街区建筑长期受低温、冻融及风雪等环境因素影响, 普遍存在围护结构老化、热工性能不足及构件损伤等问题, 传统更新模式在复杂街区中面临效率低、协同难等局限。本课题依托“基于数字孪生的寒地历史街区建筑智慧更新研究”, 以哈尔滨中华巴洛克历史文化街区为例, 综合运用BIM、GIS、三维激光扫描、无人机倾斜摄影及环境监测等技术, 构建数字化更新路径。研究表明, 数字化平台在病害识别、风貌保护、寒地适应性优化及施工协同等方面具有明显优势, 但在长期运维、数据共享和平台协同方面仍需完善, 对寒地历史街区保护更新具有一定参考价值。

关 键 词 : 数字孪生; 寒地历史街区; 智能化更新; BIM-GIS集成; 全生命周期管理

Research on Intelligent Renewal Methods for Buildings in Cold-Region Historical Districts Based on Digital Twins

An Wen

Architectural Design and Research Institute of Harbin Institute of Technology Co., Ltd., Harbin, Heilongjiang 150090

Abstract : Buildings in cold-region historical districts have long been affected by environmental factors such as low temperatures, freeze-thaw cycles, and wind and snow, leading to prevalent issues such as aging envelope structures, inadequate thermal performance, and component damage. Traditional renewal models face limitations such as low efficiency and difficulty in coordination within complex districts. This project, relying on the "Research on Intelligent Renewal of Buildings in Cold-Region Historical Districts Based on Digital Twins," takes the Harbin Chinese Baroque Historical and Cultural District as an example and integrates technologies such as BIM, GIS, 3D laser scanning, UAV oblique photography, and environmental monitoring to establish a digital renewal pathway. The research indicates that digital platforms offer significant advantages in disease identification, style preservation, cold-region adaptability optimization, and construction coordination. However, improvements are still needed in long-term operation and maintenance, data sharing, and platform coordination, providing valuable reference for the preservation and renewal of cold-region historical districts.

Keywords : digital twins; cold-region historical districts; intelligent renewal; BIM-GIS integration; full lifecycle management

历史街区在很长一段时间内, 通常承担着城市生活与商业经营等相关功能。在城市迅速扩张后仍然保留着较为明显的城市整体空间特质^[1], 尤其是部分街巷空间的初始形成较为久远, 其尺度关系、建筑界面和商用业态至今仍能体现出明显的近代城市的阶段性发展特征。地处东北的寒地历史街区建筑长期处于严寒环境, 受到低温、积雪、风荷载和冻融循环等气象因素的持续影响, 其建筑结构和围护系统逐渐出现裂缝、渗漏、沉降和材质风化等问题。同时随着城市更新工作的不断深化, 其文旅产业化、服务大众化等一系列城市建设和管理方面的工作需不断提升标准。如何在历史风貌保护的前提下实现建筑性能品质升级和智慧化运维管控是寒地历史街区更新的主要研究方向之一。

与一般的城市更新相比, 寒地历史街区更新对环境敏感性、技术复杂性的要求更高。一方面, 严寒气候需要赋予建筑更高的保温、防冻、抗风雪性能; 另一方面, 历史建筑保护需要尽可能保留原风貌、保护原结构、延续原材料。由此, 需构建兼顾风貌保护和性能需求的个性化、智能化更新体系。本研究结合课题的研究内容, 建立针对寒地历史街区建筑数字孪生的智能化更新技术路线, 随后, 以哈尔滨中华巴洛克历史文化街区为例展开实践验证研究。

基金项目: 黑龙江省重点研发计划(创新基地), 基于数字孪生的寒地历史街区建筑智慧更新研究, JD24B011。

作者简介: 安文(1986.08-), 女, 汉族, 辽宁大连人, 研究生, 哈尔滨工业大学建筑设计研究院有限公司, 高级建筑师, 研究方向: 寒地建筑的地域性设计。

一、数字系统在寒地历史街区更新中的应用逻辑

数字系统借助三维激光、无人机倾斜摄影等技术和点云建模，可对部分历史建筑进行较完整的数据采集，形成与原有实体建筑数字表达相对应的数字模型，在模型中反映出建筑的空间尺度、空间组构特性，并保留立面肌理、装饰构件等细部元素，作为后续研究、保护工作的基础资料。

（一）历史建筑数字化保护

对于寒地历史街区而言，进行数字化建模具有比建筑信息存档更为深远的意义，即部分建筑经受常年低温环境的影响，在墙体、材料、屋面等方面会出现开裂、风化和变形等明显的病害特征，采用传统的测绘方式对上述内容进行细部刻画时总会存在一定的限制。通过数字模型的构建可将建筑现状信息相对完整地进行保存，并为后续病害追踪、保护修缮、更新研究等方面提供可回溯的资料基底。

（二）建筑气候适应能力分析

寒地历史建筑长期运行在低温、降雪、冻融等较为复杂的气候空间环境中，建筑热工性能和结构状态会与环境变化相互制约。数字孪生平台将气象、建筑热工和现场监测等数据相结合，实时动态地对建筑的运行状态进行分析。模拟结果显示，建筑不同围护结构部位热量散失、积雪堆积以及冻害敏感性不尽相同。通过对相关工况模拟，能够提前发现建筑运行过程中的风险区域，可以用于后期保护修缮更新设计决策^[2]。

（三）更新方案智能推演与优化

传统历史街区更新方案的确立大多依靠设计经验、现场判断，尤其是建筑保存情况复杂的街区，部分判断仍需要根据现场实际情况进行调整。随着数字模型应用的不断深入，不同的更新方案可以在实施前进行模拟推演，并对能耗水平、结构安全、空间风貌等诸多因素进行分析。研究过程中发现，传统设计阶段不易察觉的部分内容通过模拟提前暴露，避免了后期的不断修改，增强了方案比选的合理性。

（四）全生命周期智慧运维

数字化平台应用在规划设计、施工等过程。在建筑开始投入使用后，通过在建筑主体以及周边环境布置传感器、监测器等装置，可连续性地获取结构状态信息、环境状况信息、设备运转信息等数据，实现动态的信息更新。依托数字化管理平台，逐步实现对监测、预警、维护、评价等运行管理的运维平台的构建，对推进历史街区的长期保护与管理工作具有重要意义。

二、基于数字孪生的寒地历史街区建筑智能化更新技术体系

（一）总体技术框架

将课题研究和项目实施情况相结合，本研究将寒地历史街区数字化更新的过程主要分为数据采集、模型建立、工况分析、方案推演、施工协调、后期运维六个方面。历史街区内部的建筑类

型与保存现状均有区别，因此课题研究开展的过程并未完全按照上述统一流程，而是根据现状进行更新。

（二）历史街区数字化更新研究流程

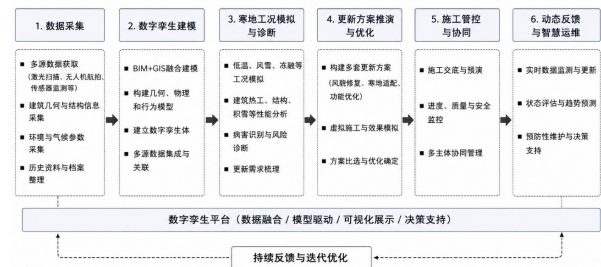


图1 基于数字孪生的寒地历史街区数字化更新研究流程图

（三）空地一体化数据采集

1. 三维激光扫描

在实际测绘中，部分沿街建筑存在立面遮挡、构件缺损以及空间尺度逼仄等问题，单独利用一类测绘方式很难将建筑信息完整获取，结合现场实际情况，项目组最终决定采用地面三维激光扫描配合人工补测的方式，分别对建筑外立面、室内空间以及装饰细部进行多轮校核，因为部分区域光照不足，局部点云存在一定缺损，在后期又增加了人工复核环节。整体模型精度基本满足后期病害分析与方案推演的要求。

2. 无人机倾斜摄影

利用无人机获取街区整体的空间形式、建筑群关系，通过倾斜摄影的方式输出街区整体实景三维模型，进行空间宏观分析。

3. 环境与结构监测

在典型建筑部位设置温湿度传感器、应变计、位移监测点等，获取有关建筑热工性能、结构变形、环境等参数数据^[3]。

4. 历史信息整合

参考老照片、历史图纸、地方志、建筑档案等相关资料，建立历史建筑信息数据库，完成历史信息数字化存档。

（四）异构数据协同整合与数字孪生模型建立

1. 几何模型建立

依托 BIM 平台完成建筑几何模型的建立，通过模型点云数据校核模型建立精度，完成历史建筑空间、构件的精准还原。

2. 建筑物理模型建立

将材料热工参数、结构力学参数与寒地气象条件输入模型中，作为建筑热工与结构分析的基础。

3. 行为模型建立

模拟建筑内部的人员流线，设备运转以及能源消耗行为，完成对建筑运行状态的动态分析。

4. 时空数据映射

项目实施阶段，研究组在部分典型建筑内部放置温湿度传感器和结构监测传感器等，实时记录建筑运行过程的环境变化。根据历史建筑内部空间环境的复杂性和不同区域监测数据的差异性的特点，在模型更新时结合现场核查和人工校验对部分重点数据进行修正，以提高模型分析结果的准确性和可信度^[2]。

三、寒地工况模拟与建筑病害诊断

（一）低温热工模拟

依托数字孪生平台搭建的建筑热工分析模型模拟分析了冬季极端低温工况下的建筑热损失情况，发现不同的建筑构件热工性能的差异，存在热量从墙体与门窗连接的部位散失的现象；再根据现场监测与病害调查，确认部分既有建筑出现了老化的窗框、开裂与局部渗漏的墙体，病害导致的围护结构密闭性变差也会加大建筑的热量损失。

（二）风雪荷载模拟

结合哈尔滨地区长期气象资料对建筑屋面积雪厚度和风压的分布情况进行模拟分析，了解寒地气候条件下建筑结构的受力特点与风险。由分析结果得知受到冬季风向以及积雪的影响部分建筑房屋的屋面在边缘的荷载集中，在建筑的檐口处与转角处易出现局部受力不均匀，对于部分建筑特别是历史久远的砖木结构建筑而言，在长期冻融环境的循环下极易引起屋面建筑部件产生变形和破坏。

（三）冻融循环分析

针对寒地环境特点设立了冻融循环分析模型，对建筑基础沉降与墙体开裂存在的风险点进行了分析，对不同建筑材料在寒地环境中的耐久性进行了评估。经过勘察调查发现，部分老旧建筑中存在一定的基础冻胀，墙体裂缝现象出现较多的部位集中在受潮较明显的区域。传统建筑基础砖石材料在经受长时间低温与多次冻融作用情况下出现风化加剧、局部强度减弱的情况，这对后期的保护修缮要求进一步提高。

（四）建筑病害智能诊断

在数字化监测的基础上，通过机器学习算法分析相关数据，完成建筑病害自动化识别，并进行风险等级判断。分析中重点关注墙体裂缝、屋面渗漏、木构件腐朽、围护结构保温性能降级、设备老化等病害。综合各项模拟分析可以发现，寒地历史建筑病害很多时候存在相关性，屋面渗漏会使得墙体含水率增大，而受潮区域在低温环境下更易造成冻融损伤，随着病害的加剧，局部问题很有可能扩大并影响其他构件。

四、更新方案虚拟推演与智慧施工

（一）风貌保护与修复策略

更新实施过程中，项目整体采用“修旧如旧”的保护原则进行更新，对部分旧构件因常年使用存在严重腐朽、损伤等现象，在保留其原有尺度、形制、风貌特征等历史建筑价值的基础上，采取局部修复或替换的方式，保证建筑结构安全，满足使用功能。通过实践发现，历史建筑更新不仅是一项原状恢复的工作，还是合理处理历史风貌保护、结构安全提升和现代功能适配关系的综合性实践活动。

（二）寒地适配更新策略

1. 保温节能优化

在不破坏原有建筑风貌的基础上进行外围护结构保温性能提

升处理，选用低导热保温材料的保温墙体以及断桥节能窗，提高建筑热工性能，降低建筑节能难度。

2. 屋面与排水优化

针对积雪和冻解问题，进行了屋面坡度及排水系统的优化，局部增加防冻措施，提高建筑的寒冷地区气候适应性。

3. 结构加固与功能提升

结合现代使用要求，对部分建（构）筑物增加消防、暖通、无障碍、智慧管理等相关设备，增强建（构）筑物使用功能，而对历史建筑进行持续活化利用。

（三）更新方案虚拟推演

依托数字孪生平台对多套更新方案进行模拟和分析，对比不同方案的能耗、结构安全、施工周期及经济成本，形成最优更新方案。经过对方案的深化发现，在历史建筑更新的过程中，风貌保护和节能性能优化两者存在一定程度的耦合关系，存在部分相互矛盾的情况，需要综合权衡。

（四）智慧施工协同管控

1. 虚拟施工交底

通过数字孪生模型，将复杂节点及施工工艺要求可视化展示，使得施工人员更加直观地理解节点的工艺施工要求，减少现场返工的情况，进而提高施工效率。

2. 实时监测与预警

施工阶段连续监测结构的变形、施工环境温度、施工进度等，对结构的不良变化自动预警，提高施工的安全性及管理效益。

3. 多主体协同管理

依托数字化平台实现有关各方（设计单位、施工单位、监理单位以及文保部门）之间信息共享、协同决策，减少传统施工过程中信息沟通不及时的现象。

五、案例研究：哈尔滨中华巴洛克历史文化街区

（一）街区概况

中华巴洛克历史文化街区位于哈尔滨市道外区中部，由升平街、道外十道街、南勋街、景阳街4条街围合而成，总用地35.17hm²，总建筑面积约44万m²，是集展示体验、休闲娱乐、餐饮购物于一体的多元文化旅游商业街区^[4]。

街区形成的年代较早，起源于20世纪初期，结合了中国传统的建筑形式和西方巴洛克装饰的风格，建筑大多为砖木结构，受寒冷气候影响多年，存在许多问题，比较常见的是围护结构老化、热工特性差、屋面漏水、建筑局部结构变形等影响建筑使用的情况，随着旅游及商贸功能的引入，对街区消防安全、公共服务以及街区的空间品质都有新的要求^[5]。

（二）数据采集与数字建模

研究团队通过三维激光扫描及无人机倾斜摄影相结合的方式对街区典型建筑进行数字采集，获取模型数据，利用点云数据建立街区高精度点云数据库，建立街区BIM模型以及GIS空间模型。在数据整合过程中，部分数据来源精度有一定的差异，所以

研究团队对点云数据、影像数据以及建筑信息进行校正，建立包含建筑的构架、材质、气候以及运营信息的数字孪生数据库。通过 BIM 模型数据库、GIS 空间信息、气象信息及现场监测数据进行关联匹配，实现对建筑物理环境和运行状态的模拟^[6]。

（三）工况模拟分析

在街区数字模型的构建方法和数据整合方式完成后，依托数字孪生平台建立建筑运行与结构运行状态的虚拟映射体系，实现建筑运行状态的可模拟、可展现，以及对热环境变化、风雪作用、冻融等环境变化的作用效果分析，更直接地洞悉建筑薄弱区域和可能受冲击部位，提升了工况分析精度。

1. 热工性能分析

模拟结果显示，传统木窗及砖墙部分热损失较严重，部分建筑室内热环境稳定性较差，采用节能窗及内保温技术更新方案后，相应建筑热损失减少约 28%。

2. 风雪荷载分析

研究发现屋面檐口及转角处易产生积雪荷载集中的现象，存在一定的结构风险，对屋面的坡度与排水系统进行优化后，积雪滞留的情况得到一定的改善。

3. 冻融风险分析

部分建筑基础存在长期被反复冻融后的沉降现象，通过地基加固、改善排水等措施，使建筑达到稳定状态。

（四）更新方案优化与实施效果

在数字孪生平台的辅助下，研究团队逐步完成了风貌修复、寒地适配、功能提升等多项更新工作，主要有：

- a) 修复部分立面与装饰构件；
- b) 优化建筑热工性能；
- c) 提升消防与公共服务设施；
- d) 建立智慧监测系统；
- e) 完成施工全过程数字化管理。

数字孪生技术在寒地历史街区更新过程中，能够更好地进行规划决策、方案推演、施工管理，使历史街区更新工作更加科学，也为活化利用、保护历史建筑群的规划设计拓展了技术途

径。同时，改造后的街区环境品质、建筑空间性能以及所提供的公共服务品质都有不同程度的提升，但同时也将在长期运营过程中产生新的变化，如需解决街区的运营维护、功能适应等问题。因此，寒地历史街区更新不仅是一次项目建设，更重要的是在规划、建设、运营以及维护过程中构建全过程的介入机制，从而实现历史文化遗产的保护和可持续利用。

六、结论

数字化技术引入使历史街区更新模式逐步由传统的经验为主导型转向数据驱动型，其通过确立系统的建筑全周期流程信息载体以实现历史建筑信息数字化载体表达和动态进程管理，为下一步寒地历史街区保护更新实现客观描述、科学支撑、协同管理、动态规划提供了新的技术支持。但随着数字化历史街区更新体系实施效果的改善，还需要更严谨的基础数据、更完美的技术系统整合及更加成熟的后期运营管理模式。对于保护历史信息载体残缺及工程保存状况不佳的建筑，其历史街区数字化重建具有一定的不稳定性，对寒地多元繁复的气候作用下的模型动态迭代、平台动态运转、群策群管理仍有客观局限性。由此可见，数字化平台的输出并不能完全替代传统的保护实践输出，而需要先转为辅助规划决策、辅助管理优化的技术工具，并且可以同现场调查、专家研判与工程实践形成协同机制。

从历史街区保护更新实践领域的发展方向来看，数字技术的价值不只体现在项目开展环节的技术应用中，从保护更新的项目全过程视角看，要构建覆盖调查、保护、修缮、运营、维护等相关阶段的动态管理模式。因此应进一步加强数字孪生平台与智慧运维系统的相互融合，完善历史建筑多来源的信息数据共享机制，结合更多的寒地历史街区实践案例开展可持续的验证研究与优化实践，从历史性文化的更新整治模式向全生命周期进行转变，这必将为寒地历史街区保护更新实践构建更为完善的理论与实践成果。

参考文献

- [1] 徐鹏，沈静怡. 数智技术赋能城市历史文化街区可持续更新策略研究 [J]. 智能城市，2024，10（11）：69-72.
- [2] 李瑞琰. 数字孪生技术在历史文化街区中的应用研究 [D]. 青岛：青岛理工大学，2025.
- [3] 田彤彤. 无人机倾斜摄影测量在历史街区建筑三维重建中的应用研究 [J]. 新城建科技，2025，34(10)：100-102.
- [4] 陈剑飞，刘珂鑫. 寒地城市历史文化街区更新策略研究——以哈尔滨中华巴洛克历史文化街区更新改造项目为例 [J]. 建筑实践，2023(5)：32-39.
- [5] 汤阔. 哈尔滨中华巴洛克建筑风格传承与发展研究 [D]. 南昌：南昌大学，2025.
- [6] DORE C, MURPHY M. Integration of Historic Building Information Modeling (HBIM) and 3D GIS for Recording and Managing Cultural Heritage Sites[C]//18th International Conference on Virtual Systems and Multimedia (VSMM 2012). Milan, Italy, 2012: 369-376.