

基于 BIM+GIS 的石库门里弄建筑数字孪生建模与基础数据标准体系构建

文 / 毛霆钧 上海静安置业（集团）有限公司

摘要：石库门里弄建筑属于上海特有的传统民居形态，具备独特建筑艺术价值与海派文化载体功能。随着城市不断推进现代化发展进程，石库门里弄建筑的保护与利用面临诸多挑战，本研究融合 BIM 与 GIS 技术，提出数字孪生建模方法及基础数据标准体系，集成逆向工程、三维扫描与物联网等手段，构建“一幢一档”数字化管理平台，实现从采集到运维的全周期技术路径，为历史建筑保护提供可推广模式。

关键词：BIM 技术；GIS 技术；数字孪生；石库门建筑；数据标准体系

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.22.016

引言

石库门里弄建筑属于上海特有的传统民居形态，同时具备建筑艺术价值和文化载体功能，随着城市不断发展，石库门建筑保护面临结构老化、修缮困难、管理机制不完善和信息滞后等挑战，数字化技术给石库门建筑的保护与传承提供了全新的可能^[1]。研究以 BIM 与 GIS 技术融合为基础，开展石库门建筑数字孪生建模方法及基础数据标准体系研究，目的是实现建筑信息全面集成与全生命周期管理，为历史建筑数字化保护提供系统性解决方案。

一、石库门里弄建筑特点与保护需求

（一）石库门里弄建筑概述

石库门里弄建筑属于上海特有的民居类型，在 19 世纪中叶开始起源并在 20 世纪初走向兴盛，是中西建筑融合的典范之作，其布局采用联排形式从而形成里弄空间，既能够节约用地又能营造浓厚社区氛围，造型融合江南民居与西方住宅特点且用石材装饰门头构成“石库门”形象，空间组织保留中国传统院落序列由天井等元素组成，体现出传统居住理念^[2]。石库门不只是一种建筑形态更是一种文化现象，记录着上海城市的发展历程承载着几代人的生活记忆与文化情感，从老式石库门到新式石库门，建筑形式与布局不断演变反映出不同时期社会经济与生活的变化，现存的石库门大多位于黄浦、静安、虹口等中心城区，其中不少属于历史保护建筑是上海文化景观的重要组成部分。

（二）保护需求与挑战

石库门建筑保护遇到多方面挑战，包括建筑自身存在的问题以及城市发展带来的压力。一方面是建筑结构老化问题，多数石库门建筑拥有七八十年甚至上百年历史，受到当时建设标准、材料质量以及长期使用且维护不足的影响，存在结构损伤、材料劣化等状况，安全隐患相当大。另一方面是修缮技术难题，传统工艺材料难以复制，现代技术与传统建筑结合存在兼容问题，如何保持原真性同时提升性能成为一大难题。再者是管理机制不完善，石库门建筑产权情况复杂、功能相互混杂，缺乏统一的管理标准与协调机制，导致保护措施难以有

效落实^[3]。还有信息管理落后问题，建筑档案大多为纸质形式，信息分散且更新缓慢，缺少数字化管理平台，难以支持科学决策与精细管理。另外是文化价值挖掘不够，保护工作侧重于物质形态，对非物质文化遗产的挖掘与传承不足，缺少有效的展示传播手段。针对这些挑战，急需采用新技术与管理方法，建立系统的保护体系。数字化技术为此提供了新的可能，BIM+GIS 技术能够全面采集、系统管理并有效利用建筑信息，为石库门建筑保护提供全方位支撑。

二、BIM+GIS 技术在建筑保护中的应用

（一）BIM 技术概述

建筑信息模型也就是 BIM，它是基于数字模型的建筑工程施工管理方法，借助三维可视化模型集成建筑几何物理和功能信息，BIM 不光包含构件尺寸材料属性等参数化数据，还能伴随建筑全生命周期持续更新且具备协调模拟与优化能力来支持各阶段决策。在历史建筑保护方面，BIM 主要用于高精度三维扫描与建模以真实记录建筑形态和构造细节，用于整合历史资料检测与修缮记录从而构建完整的建筑信息库，用于辅助结构能耗与光照等分析来为保护工作提供依据，用于三维可视化展示以提升方案交流与决策的效率^[4]。

（二）GIS 技术概述

地理信息系统也就是 GIS 是专门处理地理空间数据的系统，具备采集、存储、分析以及展示等多种功能，能够关联属性信息和具体的空间位置，可支持空间查询、分析以及相关决策制定，在城市规划与环境管理等众多领域都有广泛应用。历史建筑保护这个方面，GIS 主要用于准确定位并且详细记录建筑的地理分布情况，进而建立起完善的空间数据库，还能分析建筑和周边地形、交通、景观等环境之间的具体关系，同时支持基于位置的信息查询与统计工作，通过空间分析来评估保护策略并辅助方案进行优化^[5]。

（三）BIM+GIS 技术融合的优势

BIM 和 GIS 的融合互补不断增强，能为建筑保护提供系统化技术支撑，融合宏观环境与微观构件信息，可

实现从室内到室外全面数据整合，集成几何属性影像传感器等多源异构数据，建立统一管理共享机制提升利用效率。

三、石库门里弄建筑数字孪生建模方法

(一) 建模流程与关键技术

石库门里弄建筑的数字孪生模型构建是一项复杂的系统工程，需要严格遵循科学化的技术路线与方法体系。完整的建模过程可划分为四个关键环节：数据获取、数据预处理、三维建模和系统集成。在数据获取环节，重点采集建筑物的空间几何特征与属性信息，综合运用地面三维激光扫描、多视角倾斜摄影、全景影像采集及无人机遥感等技术手段，确保基础数据的完整性与精确性（具体技术指标见表1）。数据预处理环节主要对原始

采集数据进行质量优化，包括数据清洗、坐标配准、精度提升等操作，涉及的核心技术包含点云滤波、影像几何校正、多源数据融合等。其中，点云配准过程采用改进的最近点迭代（ICP）算法实现多测站扫描数据的空间对齐，其数学模型可表示为：

$$\min_{R,t} \sum_{i=1}^n \|(R \cdot p_i + t) - q_i\|^2 \quad (1)$$

其中，R为旋转矩阵参数，t代表平移向量参数，其中源点云与目标点云的对应特征点分别表示为 p_i 和 q_i 。采用迭代优化算法进行点云配准，将配准误差严格控制在2mm阈值范围内，从而满足历史建筑高精度三维重建的技术要求。

表1 数据采集技术参数标准

技术方法	精度要求	适用范围	数据输出格式
三维激光扫描	±2mm @10m	建筑立面、细部构件	.pts, .e57
倾斜摄影测量	地面分辨率≤1cm	屋顶、场地环境	.obj, .osgb
近景摄影测量	像素精度≤0.1mm	装饰细部、雕刻	.jpg, .tif
全景摄影	分辨率≥8K	室内空间记录	.jpg, .mov

在模型构建阶段依据处理好的数据去建立建筑信息模型，其中涵盖几何模型以及属性信息等内容，关键技术包含参数化建模、信息关联、模型轻量化等方面。在平台集成阶段把构建完成的模型和管理系统进行集成，以此实现数据的可视化以及相关应用，关键技术有平台开发、数据接口、功能实现等要点。

(二) BIM模型构建

BIM建模作为数字孪生的核心内容，其质量好坏会直接影响系统最终效果，针对石库门建筑这一特定对象，需要结合保护需求来开展建模工作，首先要进行现场测绘以及数据采集工作，借助三维激光扫描获取高精度的点云数据，重点部位还应提高点云的密度，之后要对点云进行配准与去噪处理，以此提升数据的整体质量。

在建模阶段按照点云数据来构建三维几何模型，以此准确表达出空间与构造方面的特征，并且针对门头、雕花、门窗等特色构件开展精细化建模工作，在此基础上补充材料、结构、年代、修缮记录等相关属性信息，从而形成完整的信息模型，根据不同的应用需求可以建立多个详细层级（LOD100 - 400）的模型。

模型需经过几何精度、信息完整性与标准符合性等质量检查，并实施轻量化处理以提高运行效率，适应Web及移动端应用。还应建立模型更新机制，定期维护，保持与实体建筑一致，支撑数字孪生持续应用。

(三) GIS地理数据获取与处理

GIS数据能够给BIM提供地理背景以及空间分析基础，主要涵盖这些内容，借助无人机或者激光雷达采集高精度的DEM/DSM地形数据，通过航摄或者卫星遥感的方式获取正射影像，收集道路、水系和绿地等方面的矢量数据，对气象、地质等相关环境数据进行整合。

数据处理会包含数据清洗、坐标转换以及多源融合等步骤，目的是提升数据的质量与一致性，针对石库门保护工作，还需要处理历史地图和影像等相关资料，以此辅助还原环境变迁并支持保护决策。

GIS数据需要按照一定周期进行更新，同时要建立起完善质量标准与管理规范，以此确保地理信息的准确完整以及现势性，从而为数字孪生提供可靠的数据依据。

(四) BIM+GIS数据融合

BIM和GIS的数据融合是达成数字孪生和全过程管理的关键要点，同时也是技术方面的难点所在，两者在尺度、精度以及信息结构上存在着明显差异，所以需要建立起有效的集成机制，融合涵盖几何、语义和功能这三个层面。几何融合要统一BIM局部坐标和GIS全球坐标系以实现精准空间定位。语义融合需通过信息映射达成互操作与共享。功能融合则支持跨领域分析以及协同应用。为实现有效融合，应当采用标准化数据格式与接口，像BIM领域的IFC和GIS领域的CityGML借助标准互补来促进系统集成，在实际应用过程中可以开发专用转换与处理工具，以此弥补标准差异并减少信息损失，融合的时候还需要应对性能方面的挑战，由于BIM+GIS数据量庞大，需要借助空间索引、数据分区和动态加载等技术提升处理与可视化效率，同时应该建立数据更新与同步机制，保持两者一致从而支持数字孪生的实时映射与动态更新。同时应建立数据更新与同步机制，保持两者一致，支持数字孪生的实时映射与动态更新。本文采用联合平差法达成了BIM模型与GIS数据最佳融合效果，平面误差控制在0.1m以内可满足石库门建筑保护管理精度要求，同时建立完善数据质量评价体系确保融合数据可靠性和适用性。数据融合精度效果见表2。

表 2 融合精度效果

融合方法	平面误差 (m)	高程误差 (m)	属性完整度 (%)	处理效率 (km ² /h)
直接坐标转换	0.15-0.30	0.20-0.40	85	2.5
特征点匹配	0.08-0.15	0.10-0.25	92	1.8
联合平差法	0.05-0.10	0.08-0.15	96	1.2
人工智能配准	0.03-0.08	0.05-0.10	98	0.8

在 BIM 与 GIS 数据融合过程中，必须着重考量性能优化策略。鉴于此类数据通常具有海量特性，建议采用空间索引构建、数据分块处理以及动态加载机制等技术手段来提升数据处理与可视化效能。研究表明，基于四叉树的空间索引架构能够有效优化大规模空间数据的检索性能，将查询时间复杂度由线性级 $O(n)$ 降至对数级 $O(\log n)$ 。此外，还需构建完善的数据同步机制来保障 BIM 模型与 GIS 数据的时空一致性，为数字孪生系统实现实时映射与动态更新提供技术支撑。

四、基础数据标准体系构建

基础数据标准体系能够保障数字孪生平台数据规范互通且可持续，该体系涵盖数据内容格式质量和管理四方面标准，数据内容标准明确了采集数据的具体类型包含几何属性历史及环境数据，几何数据规定了模型精度以及对应的坐标系，属性数据定义了字段类型还有相应的单位，历史数据规范了记录的具体形式，环境数据明确了采集要素以及具体的方法。

数据格式标准选用开放国际格式像 IFC、CityGML、GeoTIFF、GeoJSON 等，以此确保数据具备可移植性与互操作性，同时制定内部存储格式来提升处理效率，数据质量标准设定精度、完整性和一致性方面要求，并且建立起质量控制机制。

数据管理标准对采集、处理、更新与共享流程加以规范，涵盖采集方法、处理要求、更新机制以及共享权限等内容，以此确保数据管理规范且有效，体系需要兼容现有的国家标准，像 BIM、地理信息、文化遗产等方面，保持一致性与开放性。实施过程要配套相应的技术工具和管理措施，例如数据检查、标准培训以及质量审核等，保障标准能够落地，通过构建完善的标准体系，为数字孪生平台奠定坚实的数据基础，支撑其长期稳定发展。

五、实践验证

本研究选取上海市“数字张园”项目作为典型案例，对数字孪生建模方法及数据标准体系的应用成效进行实证分析。该案例具有显著代表性：张园作为沪上现存规模最大、保存最为完好的石库门建筑群落之一，具有重要的历史文化价值。项目通过整合 BIM 与 GIS 技术架构，构建了数字化孪生平台系统，实现了历史建筑遗产的数字化保护与智能化管理目标。

数据采集采用多种技术：三维激光扫描（点云密度 $5\text{mm} \times 5\text{mm}$ ）、无人机倾斜摄影、内部全景拍摄，并结合历史图纸与文献，建立完整建筑数据库。

模型构建采用分级策略：重点建筑要构建 LOD400

精细程度的模型，一般建筑需搭建 LOD300 标准规格的模型，环境要素应创建 LOD200 简化样式的模型，并且所有模型都按照标准格式进行构建，其中包含几何以及属性方面的信息。在平台开发这个阶段，项目搭建起“一幢一档”数字化管理平台，实现了多项具备创新性的功能。首先，建筑信息管理模块实现了对建筑物基础数据、历史沿革及维护记录等信息的集成化管理，并提供多维度检索与统计分析功能；其次，基于 WebGL 技术的三维可视化模块支持浏览器端直接进行三维模型的展示与交互操作，突破了传统插件依赖的限制；最后，空间分析模块整合了可视域分析、日照模拟及热力分布等专业分析工具，为遗产保护规划与设计决策提供科学依据，其四为监测预警功能，接入温湿度、倾斜、振动等传感器数据，实时监控建筑状态并及时发出预警信息，其五是文化展示功能，通过虚拟展馆、历史回溯等方式展示张园历史文化，促进文化传播以及教育事业发展。

平台应用取得了显著成效。在保护管理工作上实现建筑信息系统化从而管理效率与水平，在修缮工程方面为设计和施工提供准确基础数据进而保证工程质量与效果，在文化传播领域通过数字化展示增强公众参与感和体验感以此促进历史文化遗产发展，项目的成功实施证明 BIM+GIS 技术在石库门建筑保护里的有效性和可行性并为同类项目提供可借鉴经验与方法。

结语

综上，本文顺利构建出基于 BIM+GIS 的石库门建筑数字孪生建模方法以及数据标准体系，切实解决了历史建筑保护里文物信息管理不精确和多源数据融合困难的问题，经过“数字张园”项目的实践验证能够表明该技术可实现建筑全生命周期精准管理，明显提升保护工作的科学性、可视化以及综合效能，为传统建筑文化的数字化传承与运维提供了可靠可行路径。

参考文献

- [1] 张昕，白晓晓，焦东晨，等. 数字建模与数字孪生在校园设施维护与安全管理中的应用探索 [J]. 中国信息界，2025，(07): 159-161.
 - [2] 李云，杨云. 基于数字孪生的建筑材料检测流程模拟 [J]. 实验室检测，2025，3(12): 32-34.
 - [3] 齐航，董江波，马力鹏，等. 基于数字孪生的室内外一体化建模仿真研究与验证 [J]. 电信工程技术与标准化，2024，37(08): 22-28.
 - [4] 金和江. 基于 BIM 与数字孪生的建筑施工质量精准管控 [J]. 城市开发，2025，(11): 135-137.
 - [5] 刘恋，唐相桢，胡章杰，等. 基于数字孪生的山水城市景观规划实践——以重庆长江北岸为例 [J]. 现代园艺，2025，(11): 138-143.
- 基金项目：上海市 2022 年度“科技创新行动计划”社会发展科技攻关项目，历史风貌区里弄建筑街区有机更新与地下空间开发关键技术研究及示范。项目编号：22dz1203700。